



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



REYDNER LUCAS TOBIAS

**Estudo da abrasividade mediante ensaio CERCHAR de
minérios de ferro do Brasil utilizando aços H13 e Hadfield**

Ouro Preto – MG
2026

Estudo da abrasividade mediante ensaio CERCHAR de minérios de ferro do Brasil
utilizando aços H13 e Hadfield

REYDNER LUCAS TOBIAS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Minas.

Orientador: Prof. Vladmir Kronemberger Alves

Coorientadores: Cristian Camilo V. Arango
Eleir Mundim Bortoleto

**Ouro Preto – MG
2026**



FOLHA DE APROVAÇÃO

Reydner Lucas Tobias

Estudo da abrasividade mediante ensaio CERCHAR de minérios de ferro do Brasil utilizando aços H13 e Hadfield

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Minas

Aprovada em 16 de abril de 2026

Membros da banca

Doutor - Vladimir Kronemberger Alves - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Doutor - Cristian Camilo Viáfara Arango - (ITV Vale S.A.)
Doutor - Eleir Bortoleto - (ITV Vale S.A.)
Mestre - Jacinto Tchipa Daniel Cumena - (Ipê Mineração)

Vladimir Kronemberger Alves, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 25/05/2026



Documento assinado eletronicamente por **Vladimir Kronemberger Alves, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/05/2026, às 14:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1113548** e o código CRC **943EDA25**.

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo apoio incondicional e por me incentivarem a lutar pelos meus sonhos com integridade. À minha namorada, por ser meu porto seguro e caminhar ao meu lado em todos os momentos. Aos meus irmãos e à minha tia Ambrosina, por acreditarem nas minhas metas e as vivenciarem comigo. Aos amigos e familiares que me acompanharam nesta jornada, meu muito obrigado. Guardo comigo a memória e a gratidão pelos ensinamentos da minha avó Sebastiana e de Antonio Cabeludo, que mesmo ausentes, permanecem vivos em minhas conquistas. Por fim, dedico este esforço a todos que me ajudaram a tornar real o sonho de estudar na Espanha, o meu mais sincero obrigado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela saúde, sabedoria e perseverança. Mesmo nos momentos mais difíceis, ele me tornou mais forte, determinado e me provou que quem acredita sempre alcança. Aos meus orientadores, pela dedicação, parceria e pelo direcionamento fundamental. Aos amigos da UFOP, do ITV e da Fundação Gorceix, agradeço por cada risada e aprendizado; sou grato por ter construído uma verdadeira família com vocês. A todos da UFOP que cruzaram meu caminho durante a graduação e, por fim, a todos que fazem parte da minha vida e compõem a minha família, o meu muito obrigado.

Talento sem trabalho não é nada.

(Cristiano Ronaldo)

RESUMO

O manuseio do minério de ferro é a causa de desgaste nos equipamentos utilizados em diferentes etapas do processamento mineral, afetando diretamente o custo operacional. Para a otimização do desempenho dos equipamentos é importante compreender a abrasividade dos minérios de ferro. Este estudo teve como objetivo analisar a abrasividade de minérios de ferro por meio do ensaio CERCHAR, utilizando dois tipos de pinos: aço H13 e aço Hadfield que é amplamente aplicado em revestimento de britadores devido à sua capacidade de encruamento sob impacto. Foram avaliados minérios provenientes da Província Mineral de Carajás (PA) e do Quadrilátero Ferrífero (MG), na qual foi riscada a superfície natural dos minérios. Os pinos de aço foram caracterizados antes e depois dos ensaios através de um microscópio óptico e um microscópio estereoscópico. Foram medidas as durezas dos pinos de aço, onde a dureza média do aço H13 foi de 50 HRC e do aço Hadfield de 198 HV₃₀. Durante o ensaio CERCHAR se aplicou uma força normal pré-definida de 70 N com uma distância de riscamento de 10 mm. Adicionalmente, foram conduzidos ensaios utilizando o pino de aço Hadfield e os minérios Jaspilito e Itabirito Compacto, variando a distância do riscamento, com o fim de analisar os regimes de desgaste transitório e estacionário. Após os ensaios se mediram os diâmetros desgastados dos pinos e, a partir destes, foram calculados os Índices de Abrasividade CERCHAR (CAI: *CERCHAR abrasiveness index*). Os resultados dos ensaios indicaram que o Itabirito Compacto e a Hematita Compacta, pertencentes à região Sudeste, e o Jaspilito, pertencente à região Norte, foram os minerais mais abrasivos. Ademais, destacou-se a importância de considerar a distância de riscamento ao avaliar a abrasividade dos minerais de ferro sendo riscado pelo aço Hadfield, já que foi identificado um regime transitório predominante nos primeiros 10 mm, com tendência à estabilização em distâncias maiores. Este resultado mostra que na distância padronizada do ensaio CERCHAR, o desgaste ainda pode se encontrar em regime transitório utilizando pino de aço Hadfield.

Palavras-chave: Abrasividade; Minérios de ferro; Ensaio CERCHAR; aço H13; aço Hadfield.

ABSTRACT

Iron ore handling induces wear in process equipment across multiple stages of mineral processing, thereby directly increasing operating costs. To optimize equipment performance, it is important to understand the abrasivity of iron ores. This study aimed to analyze the abrasivity of iron ores using the CERCHAR test, employing two types of styli: H13 steel and Hadfield steel, the latter being widely applied in crusher liners due to its work-hardening capacity under impact. Ores from the Carajás Mineral Province (PA) and the Iron Quadrangle (MG) were evaluated, where scratching was performed on the natural surface of the ores. The steel styli were characterized before and after the tests using an optical microscope and a stereoscopic microscope. The hardness of the steel styli was measured, resulting in average values of 50 HRC for the H13 steel and 198 HV₃₀ for the Hadfield steel. During the CERCHAR test, a pre-defined normal force of 70 N was applied with a scratching distance of 10 mm. Additionally, tests were conducted using the Hadfield steel stylus on Jaspilite and Compact Itabirite ores, varying the scratching distance to analyze the transient and steady-state wear regimes. After the tests, the worn diameters of the styli were measured, and from these, the CERCHAR Abrasivity Indices (CAI) were calculated. The test results indicated that Compact Itabirite and Compact Hematite, from the Southeast region, and Jaspilite, from the North region, were the most abrasive minerals. Furthermore, the importance of considering the scratching distance when evaluating iron ore abrasivity using Hadfield steel was highlighted, as a predominant transient wear regime was identified in the first 10 mm, with a tendency towards stabilization at greater distances. This result shows that at the standard CERCHAR test distance, wear may still be in the transient regime when using a Hadfield steel stylus.

Keywords: Abrasivity; Iron ores; CERCHAR test; H13 steel; Hadfield steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma simplificado de uma planta de beneficiamento de minério de ferro da Província Mineral de Carajás.	15
Figura 2: Circuito de cominuição, envolvendo britagem e moagem.	16
Figura 3: Ilustração de um britador de mandíbula e o nome dos componentes. ...	18
Figura 4: Micrografia do aço Hadfield no estado bruto de fundição.	19
Figura 5: Micrografia do aço Hadfield, com matriz austenítica atacado com reagente Nital 2% e com aumento de 100x.	19
Figura 6: Curvas tensão-deformação de um aço Hadfield com diferentes tamanhos de grão.	21
Figura 7: Esquema geral de um tribossistema baseado em Zum Gahr (1987). ...	22
Figura 8: Classificação dos tipos de desgaste.	23
Figura 9: Classificação do desgaste segundo quantidade de corpos.	24
Figura 10: Principais mecanismos de desgaste.	26
Figura 11: Modos de desgaste abrasivo: A- Abrasão a dois corpos; B- Abrasão a três corpos.	27
Figura 12: Micromecanismos de desgaste produzidos na superfície de um material quando em contato com partícula abrasiva: A- Microsulcamento; B- Microfadiga; C- Microcorte; D- Microtrincamento.	29
Figura 13: Esquema do ensaio CERCHAR.	33
Figura 14: Esquemas das características construtivas e configurações dos equipamentos para o ensaio CERCHAR.	34
Figura 15: Minérios da Província Mineral de Carajás.	37
Figura 16: Minérios da Província do Quadrilátero Ferrífero.	37
Figura 17: Equipamento CERCHAR do Laboratório de Tribologia do ITV-MI; pesos (1); porta-pino (2); porta-amostra (3); manivela de movimentação (4); mesa de coordenadas para a movimentação da amostra (5); suporte (6).	38
Figura 18: Cálculo do diâmetro médio da ponta do pino após o ensaio.	40
Figura 19: Valor do CAI dos minérios da Província Mineral de Carajás.	42
Figura 20: Valores de CAI para os minérios da Província do Quadrilátero Ferrífero.	43
Figura 21: Diâmetro médio da ponta do pino de aço Hadfield após ensaio com minérios da região Norte.	44
Figura 22: Diâmetro médio da ponta do pino de aço Hadfield após ensaio com minérios da região Sudeste.	44

Figura 23: Ranking do CAI dos minérios das duas regiões estudadas, em verde minérios da região sudeste e em amarelo os minérios da região norte.	45
Figura 24: Ranking do diâmetro desgastado médio dos minérios das duas regiões estudadas, em verde minérios da região sudeste e em amarelo os minérios da região norte.	46
Figura 25: Taxa de desgaste do pino de aço Hadfield riscando Jaspilito na distância padrão (10 mm).	47
Figura 26: Evolução do desgaste do pino de aço Hadfield riscando Jaspilito em distâncias estendidas (10 a 25 mm).	47
Figura 27: Taxa de desgaste do pino de aço Hadfield riscando Itabirito Compacto na distância padrão (10 mm).	48
Figura 28: Taxa de desgaste do pino de aço Hadfield riscando Itabirito Compacto em distâncias estendidas (10 a 25 mm).	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos estágios de britagem.	17
Tabela 2: Classificação dos regimes de desgaste abrasivo baseada na severidade.	28
Tabela 3: Classificação da abrasividade segundo a norma ASTM D7625.	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos	13
1.1.1	Objetivo Geral.....	13
1.1.2	Objetivos Específicos	13
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1.	Processamento mineral.....	14
2.2.	Desgaste de equipamentos.....	16
2.3.	Britadores.....	17
2.4.	Aço Hadfield.....	18
2.5.	Tribologia	21
2.5.1.	Tribossistema.....	21
2.5.2.	Tipos de desgaste	23
2.5.3.	Mecanismos de desgaste.....	25
2.5.4.	Desgaste abrasivo.....	26
2.5.5.	Característica das partículas abrasivas e sua influência na severidade do desgaste.....	29
2.6.	Ensaio CERCHAR.....	32
2.6.1.	Parâmetros que determinam o CAI	34
2.6.2.	Dureza do pino	35
2.6.3.	Aço H13	35
3	METODOLOGIA.....	36
3.1	Caracterização dos materiais.....	36
3.1.1	Amostras de minério	36
3.1.2	Pinos de aço	37
3.2	Equipamento CERCHAR	38
3.3	Procedimentos de ensaio.....	39
3.4	Delineamento experimental.....	39
3.5	Análise dos resultados do ensaio CERCHAR	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1	Índice de abrasividade CERCHAR.....	42
4.2	Desgaste do pino de aço Hadfield	43
4.3	Comparação da abrasividade dos minérios	44

4.4	Análise dos Regimes de Desgaste do Aço Hadfield	46
5	CONCLUSÃO	49
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

1 INTRODUÇÃO

A indústria de mineração enfrenta constantes desafios operacionais relacionados ao processamento dos minérios de ferro, devido aos equipamentos de manuseio sofrerem um desgaste relevante, o que impacta diretamente nos custos operacionais. O processo de cominuição representa em torno de 50% do custo operacional de uma planta de processamento mineral (SCHNEIDER et al., 2016). Segundo Holmberg *et al.* (2017) estimou-se que o consumo total de energia das atividades de mineração globais, incluindo a extração de minerais e rochas, corresponda a 6,2% do consumo total de energia global. Cerca de 40% da energia consumida na mineração é utilizada para vencer o atrito.

Além dos desafios operacionais inerentes ao desgaste, o setor mineral enfrenta um cenário de empobrecimento progressivo de reservas de alto teor, o que tem impulsionado a necessidade de aproveitamento de minérios de menor qualidade ou com maiores teores de impurezas, exigindo rotas de processamento mais intensivas para atender às especificações do mercado. Esse contexto torna o tema ainda mais relevante, pois a redução de teor e o aumento de ganga podem demandar maior cominuição e manuseio, ampliando a exposição de componentes ao desgaste e aumentando custos associados à manutenção e substituição de partes.

Para minimizar esses efeitos e otimizar o desempenho dos equipamentos é essencial compreender a abrasividade dos minérios de ferro que estão sendo processados. A avaliação precisa da abrasividade desses minérios é fundamental para a seleção e desenvolvimento de materiais utilizados durante o processamento mineral. Nesse contexto, o ensaio CERCHAR emerge como uma ferramenta que se destaca na determinação da abrasividade dos minérios (Michalakopoulos et al., 2006). O ensaio CERCHAR consiste em riscar a superfície de um minério com um pino de aço, sendo um método simples que necessita de uma pequena quantidade de amostra de minério, além de ser um equipamento simples e de baixo custo de fabricação (American Society for Testing and Materials (ASTM) D7625-22 (2022).

Anteriormente, no grupo de tribologia do Instituto Tecnológico Vale Mineração (ITV MI), foi realizado um estudo sobre a determinação da abrasividade de Jaspilitos da mina de Serra Sul, considerando amostras com a superfície polida (Münch, 2022).

Foram avaliados três Jaspilitos diferentes, nos quais se analisou o riscamento em três condições distintas: paralelo às bandas de Si, paralelo às bandas de Fe e perpendicular às bandas do minério. Os resultados mostraram que há uma tendência de maior abrasividade, quando o riscamento é realizado perpendicular às bandas do Jaspilito; porém, as diferenças entre os valores médios do índice de abrasividade CERCHAR (CAI: *CERCHAR Abrasiveness Index*), considerando o desvio padrão, não foram significativas. Os resultados do CAI para os Jaspilitos com superfície polida indicaram um valor de abrasividade alta.

A condição da superfície da amostra, seja natural ou serrada, exerce forte influência nos resultados do ensaio CERCHAR. Segundo Plinninger et al. (2003) e Yarali e Duru (2016), os valores do índice CAI tendem a apresentar um incremento de 14% a 18% quando o riscamento é executado em superfícies naturais, que preservam a rugosidade original da rocha. Partindo dessa premissa, o presente trabalho propõe reavaliar a abrasividade dos Jaspilitos da Província Mineral de Carajás (anteriormente estudados com superfície polida pelo grupo do ITV), adotando agora a condição de superfície natural. Além disso, a pesquisa expande o escopo ao caracterizar a abrasividade de outros minérios de ferro provenientes da região Norte e da região Sudeste do Brasil.

Embora a norma ASTM D7625 padronize o ensaio CERCHAR utilizando pinos de aço com dureza HRC 55, a realidade operacional das minas muitas vezes emprega ligas distintas para o revestimento de equipamentos. Tem-se como exemplo o aço Hadfield (aço manganês austenítico) que é amplamente utilizado em revestimento de britadores devido à sua capacidade de encruamento sob impacto, mas com a dureza baixa, o que o torna um aço de interesse para ser utilizado no ensaio CERCHAR.

No entanto, a aplicação direta da metodologia padrão do ensaio CERCHAR (riscamento de 10 mm) para aços com comportamento de encruamento, como o Hadfield, apresenta lacunas no conhecimento técnico-científico. Estudos preliminares indicaram que a distância padronizada de 10 mm pode não ser suficiente para ultrapassar o regime transitório de desgaste e atingir o regime estacionário nesse material. Essa discrepância pode levar a uma subestimação da abrasividade real enfrentada pelos equipamentos em campo.

Portanto, este trabalho tem como objetivo estudar a abrasividade de minérios de ferro das regiões Norte e Sudeste, utilizando tanto um aço padronizado pela norma ASTM D7625 quanto um aço amplamente empregado no revestimento de britadores. Além disso, investigar os regimes de desgaste do aço Hadfield e verificar se a metodologia normativa atual do ensaio CERCHAR é adequada para prever o desgaste desse tipo de aço.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Determinar a abrasividade de minérios de ferro provenientes da região Norte da Província Mineral de Carajás (PA) e da região Sudeste, na Província do Quadrilátero Ferrífero (MG), aplicando o método CERCHAR e avaliando a resposta tribológica com pinos de aço H13 e o aço Hadfield.

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Caracterizar as amostras de pinos de aço e os minérios de ferro a serem usados nos ensaios.
2. Caracterizar a abrasividade de minérios de ferro mediante ensaio CERCHAR usando pinos de aço padrão da norma ASTM D7625 e adaptar a metodologia da norma ASTM D7625 ao utilizar os pinos de aço Hadfield.
3. Estudar os regimes transitório e estacionário de desgaste variando a distância do risco no ensaio CERCHAR usando pinos de aço Hadfield.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A compreensão dos mecanismos de desgaste na indústria mineral e a correta determinação da abrasividade dos minerais são fundamentais para a seleção de materiais e previsão da vida útil de equipamentos. Este capítulo apresenta,

inicialmente, uma visão geral do processamento mineral e dos sistemas de britagem, seguidos pelas características metalúrgicas do aço Hadfield. Na sequência, são abordados os fundamentos da tribologia para a compreensão dos processos de desgaste que atuam nos equipamentos. Por fim, são detalhados o método CERCHAR como ferramenta de avaliação de abrasividade e as características metalúrgicas do aço H13.

2.1. Processamento mineral

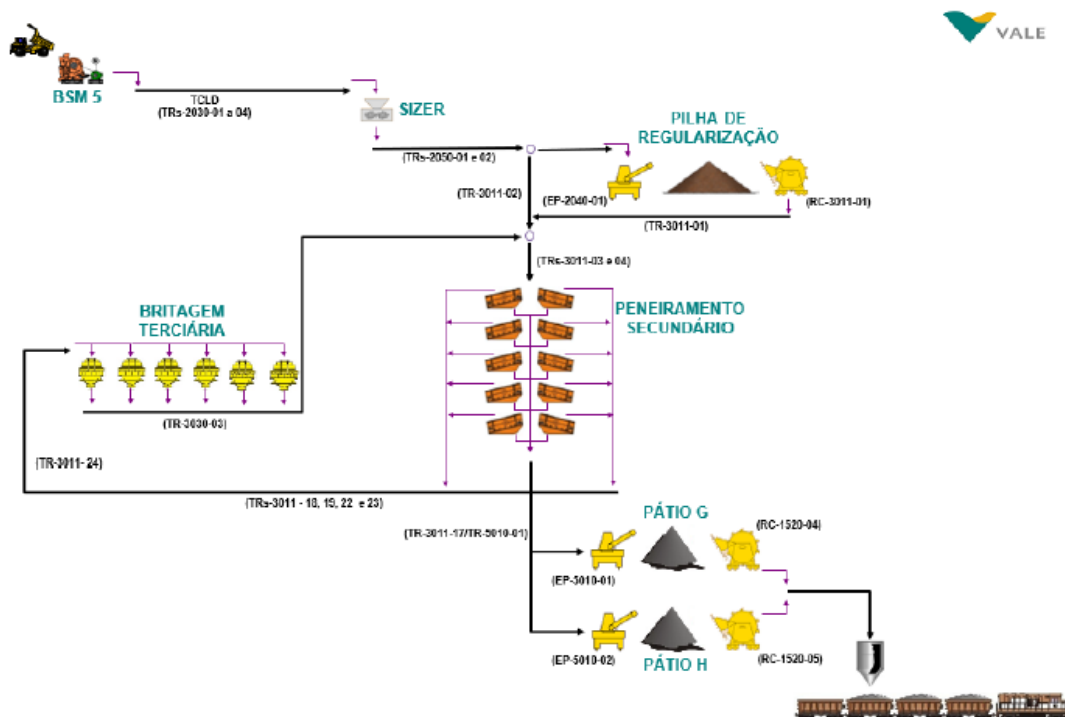
O processamento mineral consiste no conjunto de operações unitárias aplicadas aos bens minerais brutos (*run-of-mine-ROM*) visando modificar suas características físicas e químicas, sem alterar sua constituição mineralógica principal, para adequá-los às especificações de mercado ou etapas subsequentes (CHAVES, 2012).

Segundo Valadão e Araujo (2007), o processamento mineral é constituído por um conjunto articulado de operações que abrange desde a fragmentação e separação por tamanho até a concentração, separação sólido/líquido e disposição de rejeitos, incluindo ainda atividades auxiliares como manuseio e estocagem. Essas etapas são dispostas sequencialmente com o propósito fundamental de maximizar a recuperação dos bens minerais e garantir que os produtos finais atendam às especificações exigidas pelo mercado. Valadão e Araújo (2007) destacam ainda que a distribuição granulométrica exerce influência determinante em todas as etapas do tratamento de minérios, impactando não apenas a eficiência operacional, mas também a qualidade dos produtos intermediários e finais.

Conforme descrito por Sampaio et al. (2001), o processamento inicia-se com o minério bruto, que é submetido a circuitos sequenciais de britagem, moagem e classificação granulométrica, seguidos por etapas de desaguamento e filtragem. Essas operações unitárias visam à adequação do material para a obtenção de uma combinação variada de produtos, incluindo granulado (*lump*), *sinter feed*, *pellet feed* e finos para redução direta. A Figura 1 ilustra o fluxograma de beneficiamento típico adotado para os minérios de ferro da Província Mineral de Carajás.

Contudo, é fundamental observar que a movimentação de grandes volumes de massa mineral através destas etapas impõe severas solicitações mecânicas aos equipamentos. Como o minério de ferro frequentemente contém constituintes de elevada dureza (como sílica e a própria hematita compacta), cada etapa descrita por Valadão e Araujo (2007) atua também como um sistema tribológico agressivo, onde o desgaste das superfícies metálicas é inerente ao processo produtivo.

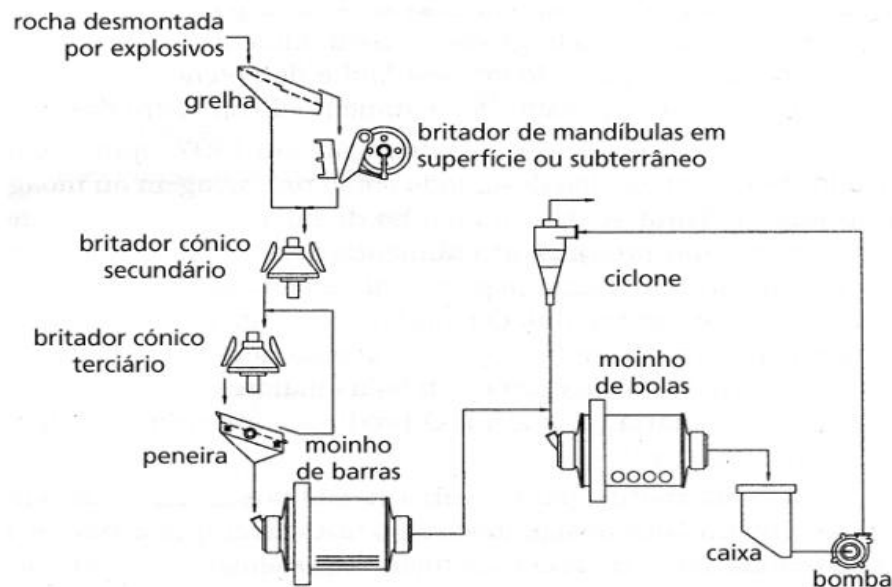
Figura 1: Fluxograma simplificado de uma planta de beneficiamento de minério de ferro da Província Mineral de Carajás.



Fonte: Münch (2022)

Segundo Luz e Lins (2018), a pré-condição para a concentração de um minério é a liberação física de seus constituintes, o que implica idealmente, a obtenção de partículas compostas por uma única espécie mineralógica. Para atingir esse estado, o material é submetido a processos de cominuição, que é o processo de redução de tamanho de partículas. Segundo Wills e Finch (2016), a cominuição é frequentemente a etapa de maior custo em uma usina de beneficiamento, envolvendo equipamentos de grande porte como britadores e moinhos. Um exemplo de circuito de cominuição é apresentado na Figura 2.

Figura 2: Circuito de cominuição, envolvendo britagem e moagem.



Fonte: Chaves, Arthur Pinto (2003)

Correia e Couto (2018) ressaltam que a eficiência dessa etapa é crítica: falhas ou paradas não programadas na britagem interrompem todo o fluxo produtivo da mina. Para evitar a sobremoagem e otimizar o processo, utilizam-se operações de classificação, como peneiramento e ciclonação. Uma vez alcançada a liberação adequada, as espécies minerais podem ser efetivamente separadas, gerando, em sua forma mais simples, um concentrado e um rejeito.

2.2. Desgaste de equipamentos

As indústrias minerais enfrentam desafios contínuos para aumentar a eficiência operacional e reduzir custos. Dentro desse cenário, a seleção adequada dos equipamentos desempenha um papel relevante na melhoria dos processos produtivos. A eficiência operacional na mineração está diretamente relacionada à otimização de equipamentos e ao uso de inovações tecnológicas.

Conforme destaca Tressia (2015), o desgaste de equipamentos na indústria mineral é uma realidade presente diariamente, imposta pela severidade do ambiente operacional. Tal condição repercute diretamente na redução da vida útil dos equipamentos e na elevação dos custos de manutenção e reposição. Nesse cenário,

a gestão de custos deve transcender a simples troca de componentes ou reparos emergenciais, englobando o monitoramento contínuo e a adoção de estratégias preventivas e corretivas visando a eficiência operacional.

2.3. Britadores

Segundo Hawk e Wilson (2001), o desempenho do processamento mineral é severamente impactado pelo desgaste em equipamentos de cominuição, como britadores e moinhos, uma vez que a natureza abrasiva dos minérios provoca a remoção progressiva de material das superfícies operacionais.

O processo de britagem, conforme descrito por Wills e Finch (2016), envolve múltiplos estágios de redução do minério bruto sob condições de alta compressão e impacto, empregando-se tipicamente britadores giratórios, de mandíbulas e cônicos nas etapas primária, secundária e terciária. A Figura 3 ilustra um exemplo de um britador de mandíbula. Nos dois primeiros estágios, a fragmentação é realizada em britadores e no último estágio, em moinhos. A Tabela 1 apresenta a classificação dos estágios de britagem em relação ao tamanho máximo das partículas.

Tabela 1: Classificação dos estágios de britagem.

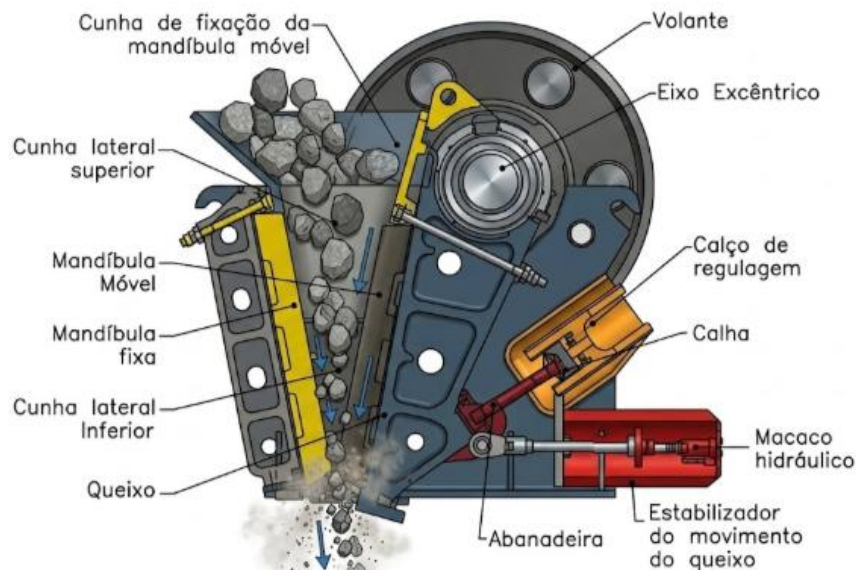
Estágio de britagem	Tamanho máximo de partícula na alimentação (mm)	Tamanho máximo de partícula pós britagem (mm)
Britagem Primária	1000	100,0
Britagem Secundária	100	10,0
Britagem Terciária	10	1,0
Britagem Quaternária	5	0,8

Fonte: Adaptado de Luz; Almeida; Braga (2018).

Gates (1998) afirma que a seleção adequada de materiais de revestimento resistentes ao desgaste é a estratégia mais eficaz para maximizar a vida útil dos componentes. Em particular, a viabilização de depósitos mais compactos (como itabiritos compactos e litologias com maior contribuição de fases duras) passa, em grande medida, pela seleção e desenvolvimento de ligas metálicas capazes de operar sob condições mais severas de abrasividade. Isso é especialmente crítico quando há maior participação de minerais/impurezas duras (sílica e quartzo) associados ao minério, pois tais constituintes intensificam o potencial de dano abrasivo sobre

ferramentas e revestimentos. Neste contexto o aço Hadfield surge como um material que combina propriedades mecânicas e de resistência ao desgaste adequado para aplicação em revestimento para britadores.

Figura 3: Ilustração de um britador de mandíbula e o nome dos componentes.

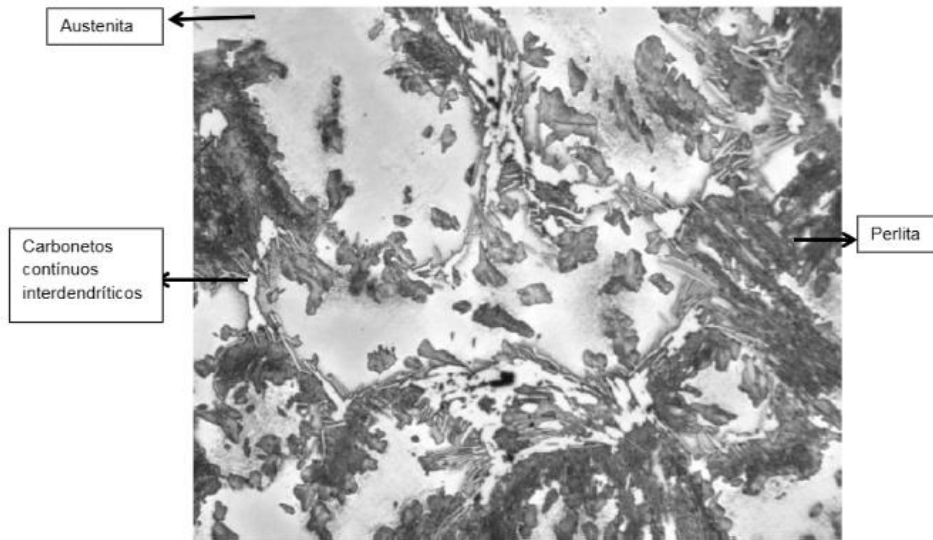


2.4. Aço Hadfield

O aço manganês austenítico, ou aço Hadfield, como ficou conhecido devido ao nome de seu inventor, Robert Abbot Hadfield, foi desenvolvido em 1882 (GOUSSELAND 1974). Segundo Tressia (2015), desde sua criação, este material se consolidou em aplicações que exigem elevada resistência à abrasão e ao impacto, devido à sua microestrutura austenítica que, à temperatura ambiente, combina alta tenacidade e ductilidade com uma notável capacidade de endurecimento por deformação (encruamento). Devido à capacidade de encruamento, as indústrias de mineração utilizam largamente o aço Hadfield em componentes sujeitos a alto impacto e abrasão, como revestimentos de britadores e dentes de escavadeiras.

Inserido no contexto das ligas de matriz austenítica, o aço Hadfield apresenta particularidades microestruturais relevantes. Conforme ilustra a Figura 4, a microestrutura desse material, no estado bruto de fundição, caracteriza-se por uma matriz austenítica metaestável, acompanhada pela precipitação de carbonetos eutéticos interdendríticos e intergranulares, além de colônias de perlita.

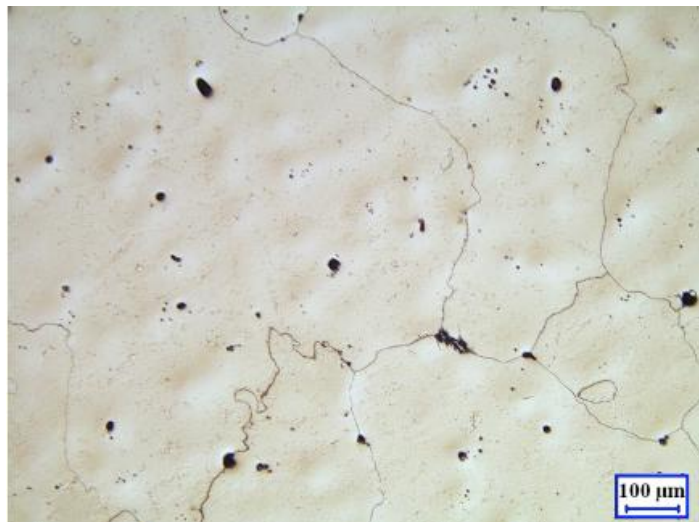
Figura 4: Micrografia do aço Hadfield no estado bruto de fundição.



Fonte: Venturelli, Tressia e Albertin (2018).

Contudo, em componentes industriais de grande porte, o processo de fabricação pode introduzir descontinuidades a essa estrutura. Segundo Tressia (2015), a análise metalográfica de amostras extraídas de uma mandíbula de britador fundida em aço Hadfield revelou a presença de inclusões e porosidades nos contornos de grão, evidenciando defeitos inerentes ao processo de fundição do componente, como apresentado na Figura 5.

Figura 5: Micrografia do aço Hadfield, com matriz austenítica atacado com reagente Nital 2% e com aumento de 100x.



Fonte: Tressia (2015).

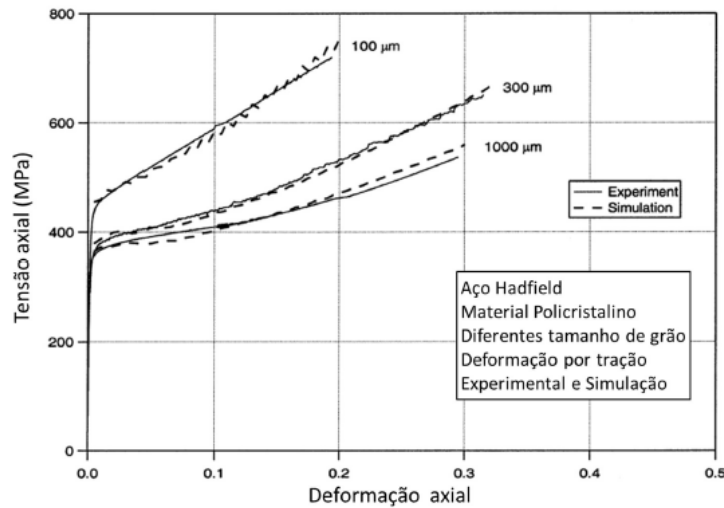
Apesar desses defeitos oriundos da fundição, o desempenho adequado do material em serviço é assegurado por sua resposta mecânica. Venturelli, Tressia e Albertin (2022) demonstraram que os altos teores de manganês e carbono na liga favorecem a deformação plástica por maclação quando o material é submetido a impactos ou pressões severas. Esse mecanismo eleva expressivamente a dureza da superfície deformada, otimizando sua resistência ao desgaste, enquanto o núcleo da peça preserva sua tenacidade.

Tressia (2015) investigou especificamente a resistência à abrasão do aço Hadfield aplicado a britadores, avaliando o efeito do tamanho do abrasivo e do ambiente. Seus resultados indicam que o desempenho desse aço depende da severidade do contato capaz de ativar o mecanismo de encruamento.

Atabaki *et al.* (2012) realizaram medições de dureza em amostras de aço Hadfield antes e após ensaios de desgaste na configuração pino contra disco, mostrando o endurecimento da superfície desgastada. A dureza da superfície desgastada foi 1,8 vezes maior em relação à dureza inicial, aumentando de 28 para 52 HRC. Os autores também mostraram que a resistência à abrasão das amostras do aço Hadfield aumentou ao longo do ensaio, devido ao aumento da dureza das amostras em função do tempo de ensaio.

A influência do tamanho de grão nas propriedades mecânicas do aço Hadfield foi detalhadamente analisada por Karaman *et al.* (2000) e Venturelli *et al.* (2018). As investigações demonstraram a existência de uma relação inversamente proporcional entre a dimensão do grão e parâmetros mecânicos fundamentais, nomeadamente o limite de escoamento, a resistência à tração e a taxa de encruamento. Conforme evidenciado pelos ensaios de tração de Karaman *et al.* (2000), apresentados na Figura 6, o refino do grão altera os mecanismos de deformação do material.

Figura 6: Curvas tensão-deformação de um aço Hadfield com diferentes tamanhos de grão.



Fonte: Adaptado de Karaman et al. (2000).

2.5. Tribologia

A tribologia é a área que estuda o atrito, o desgaste e a lubrificação em superfícies em contato e em movimento relativo, com foco em compreender mecanismos de desgaste e orientar seleção de materiais (Hutchings e Shipway, 2017). Desde o trabalho preliminar de Leonardo da Vinci no século XV, passando pelas leis de atrito de Amontons e Coulomb, até a formalização do termo “tribologia” no Relatório Jost (1966), o campo evoluiu significativamente, tornando-se essencial para a engenharia moderna. Atualmente, a tribologia está diretamente associada à confiabilidade de sistemas mecânicos, eficiência energética e otimização de materiais em diversas indústrias, incluindo mineração, metalurgia, transporte e bioengenharia.

Segundo Rohde (1981), a tribologia moderna consolidou-se como área interdisciplinar envolvendo física, química, engenharia mecânica e ciência dos materiais, englobando desde fenômenos de contato em macroescala até tribologia de nanoestruturas.

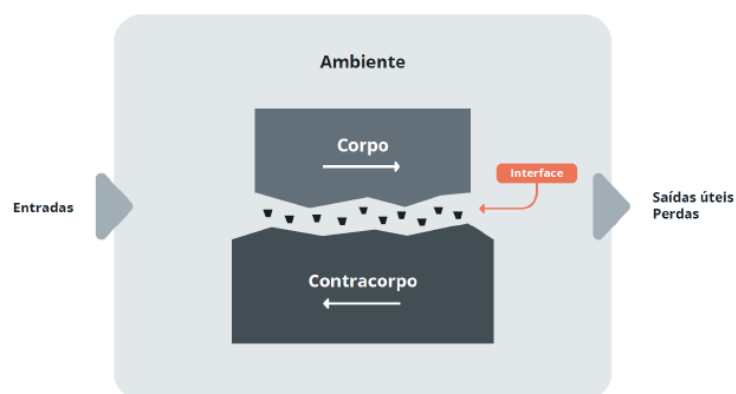
2.5.1. Tribossistema

O conceito de tribossistema organiza a análise tribológica como um sistema composto pelas superfícies em contato e pelas variáveis que controlam a interação

(Zum Gahr, 1987). Na abordagem de Zum Gahr (1987), o tribossistema é a base para classificar processos de desgaste e relacionar condições de operação, materiais e mecanismos atuantes. O tribossistema pode ser tratado como uma unidade de análise para projeto e interpretação experimental, pois sua estrutura (corpo, contra-corpo, meio interfacial e ambiente) e sua função estão interligadas e podem ser descritas sob a ótica de uma abordagem de sistemas (CZICHOS, s.d; 1978). A estrutura desse sistema, ilustrada na Figura 7, é composta pela interação fundamental entre quatro elementos: corpo, contra-corpo, meio interfacial e o ambiente circundante. Complementarmente, a norma ASTM G40 (2017) estabelece que a análise do comportamento tribológico deve considerar não apenas esses elementos físicos, mas também a influência conjunta de fatores mecânicos, químicos e ambientais que atuam sobre o sistema.

Ainda segundo Zum Gahr (1987), o desgaste não deve ser interpretado como uma propriedade intrínseca do material, mas sim como a resposta de um sistema dinâmico denominado tribossistema. Em ensaios de deslizamento, a evolução do tribossistema pode ser observada por mudanças de atrito, temperatura e morfologia superficial ao longo do tempo, o que fundamenta análises de transição de regime em aços (Viáfara e Sinatora, 2011).

Figura 7: Esquema geral de um tribossistema baseado em Zum Gahr (1987).



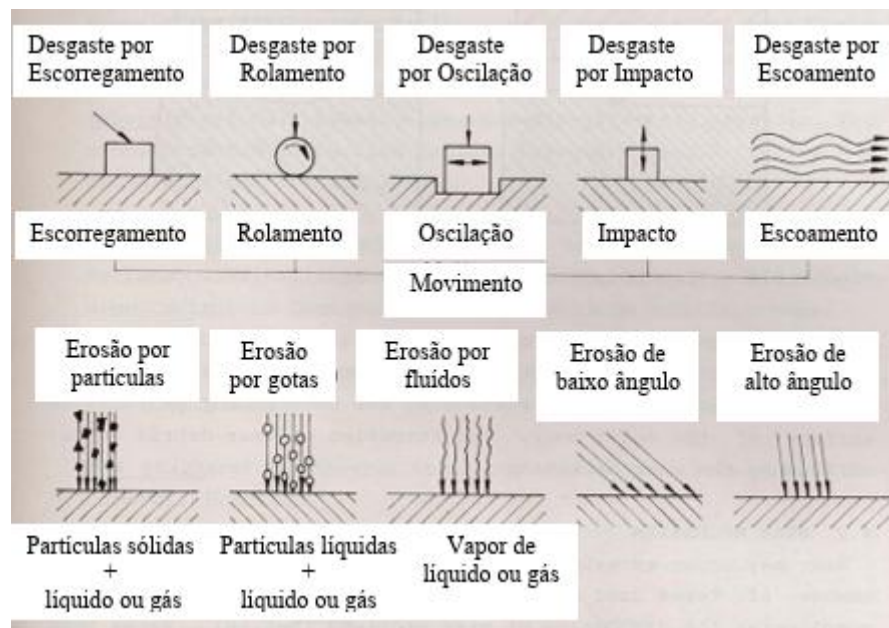
Fonte: (Münch 2022)

2.5.2. Tipos de desgaste

O desgaste pode ser entendido como a perda progressiva de material de uma superfície sólida devido à interação mecânica e/ou físico-química durante o contato (Zum Gahr, 1987). Segundo Hutchings e Shipway (2017), os tipos ou modos de desgaste descrevem a condição macroscópica e a cinemática do tribossistema, sendo classificados de acordo com a natureza do contato e do ambiente operacional. A Figura 8 mostra esquematicamente os diferentes tipos de ações na interface de um corpo sólido. Em função do movimento das interfaces pode-se variar entre, deslizamento, rolamento, oscilação, impacto e erosão, dependendo da cinemática do sistema. A erosão pode ainda ser classificada pelo estado físico do contra-corpo, por exemplo, sólido ou líquido, ou o ângulo de ação.

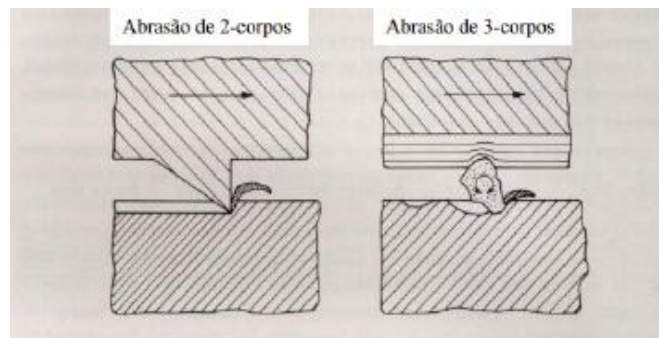
Outra forma de classificar o desgaste é pela quantidade de corpos. Nessa classificação, existe o desgaste de dois corpos, que ocorre quando temos dois sólidos em contato, com ou sem lubrificante, e o desgaste de três corpos, quando existem partículas sólidas que interferem no contato entre dois corpos principais (Zum Gahr, 1987). A Figura 9 ilustra essas duas configurações.

Figura 8: Classificação dos tipos de desgaste.



Fonte: Adaptado de Zum Gahr, 1987

Figura 9: Classificação do desgaste segundo quantidade de corpos.



Fonte: Adaptado de Zum Gahr, 1987

Os principais tipos de desgaste observados na indústria mineral são: Desgaste abrasivo, desgaste por impacto, desgaste erosivo, desgaste adesivo e desgaste por fadiga de contato.

O desgaste por impacto é caracterizado pela degradação e remoção de material devido a choques mecânicos repetidos e de alta energia entre superfícies sólidas. Segundo Zum Gahr (1987), nos britadores (especialmente os de mandíbulas e cônicos), o desgaste por impacto atua em sinergia com o desgaste abrasivo. Varela *et al.* (2021) mostram que os fragmentos de minério durante a cominuição causaram altas tensões de impacto na superfície do britador, levando a severas marcas de desgaste abrasivo, alta deformação e formação de trincas no material do segmento do britador.

Já o desgaste erosivo ocorre quando partículas sólidas, transportadas por um fluxo de fluido (líquido ou gás), incidem contra a superfície do material em determinada velocidade e ângulo (Hutchings; Shipway, 2017). O desgaste adesivo resulta da formação e do subsequente rompimento de micro-soldas (junções de estado sólido) geradas na interface de duas superfícies metálicas que deslizam entre si sob alta pressão. É menos frequente no contato direto entre o minério e o revestimento, mas atua severamente nos componentes mecânicos internos das máquinas, como mancais, engrenagens e articulações que operam sob falha ou ausência de lubrificação (BHUSHAN, 2013). Por outro lado, o desgaste por fadiga de contato (fadiga superficial) manifesta-se em superfícies submetidas a ciclos repetidos de carga e descarga mecânica, como no contato de rolamento puro ou rolamento com deslizamento. Essa ciclagem gera tensões alternadas que promovem a nucleação e a propagação de microtrincas subsuperficiais. Com o tempo, essas trincas alcançam

a superfície, causando o destacamento de fragmentos de material, formando cavidades conhecidas como *pitting* ou lascamento (JIANG et al., 2017).

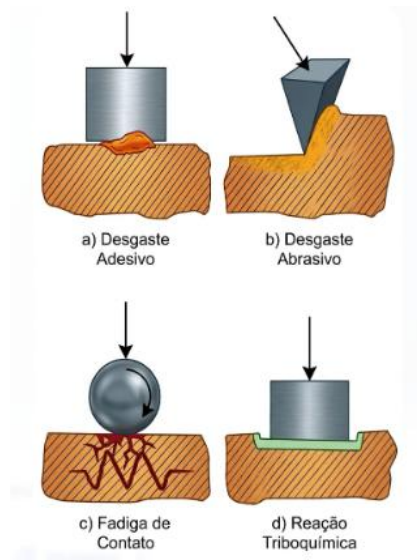
O desgaste abrasivo é considerado tanto um tipo de desgaste, quanto um mecanismo de desgaste. No capítulo 2.3.4 será detalhado em foco.

2.5.3. Mecanismos de desgaste

Em tribologia, uma classificação amplamente utilizada organiza o desgaste em mecanismos fundamentais: Adesão, abrasão, fadiga superficial e reações triboquímicas, como mostrado na Figura 10. Esses mecanismos explicam a maioria das morfologias e taxas observadas em serviço e em laboratório (Zum Gahr, 1987).

Quando a remoção de material decorre de choques repetidos, caracteriza-se o desgaste por impacto (ZUM GAHR, 1987). Já quando as partículas abrasivas são transportadas por um fluxo líquido ou gasoso, configura-se o desgaste erosivo (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2011). Além dos mecanismos puramente mecânicos, existem os processos assistidos quimicamente, como o desgaste corrosivo, onde a degradação resulta da reação com o meio (água, óxidos, soluções salinas) (BHUSHAN, 2013). Por fim, o desgaste por fadiga origina-se da repetição de ciclos de carga e descarga, podendo ser mitigado através da otimização geométrica dos componentes (JIANG et al., 2017). Hutchings e Shipway (2017) reforçam essa abordagem ao tratar o desgaste por deslizamento e o desgaste por partículas duras como classes centrais de análise, conectando mecanismos às condições de contato e à resposta do material.

Figura 10: Principais mecanismos de desgaste.



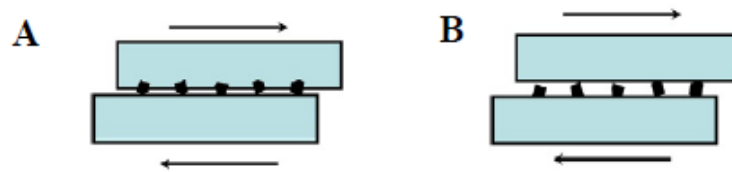
Fonte: Adaptado de ZUM GAHR (1987) e DIN 50320 (1979).

2.5.4. Desgaste abrasivo

Segundo Hutchings e Shipway (2017), o desgaste abrasivo é definido como o processo de remoção ou deslocamento de material causado por partículas duras ou protuberâncias que são pressionadas e movimentadas contra uma superfície sólida. Na literatura clássica, esse mecanismo é categorizado em dois modos principais: a abrasão a dois corpos, onde as partículas abrasivas estão fixas em uma superfície e riscam a outra; e a abrasão a três corpos, onde as partículas estão soltas na interface, podendo rolar ou deslizar livremente.

A Figura 11 ilustra os dois modos fundamentais de desgaste abrasivo baseados na restrição das partículas. Em (A), observa-se a abrasão a dois corpos, caracterizada por partículas abrasivas fixas ou ancoradas em uma superfície; já em (B), tem-se a abrasão a três corpos, onde as partículas movem-se livremente entre as superfícies de contato. Segundo Gates (1998), essa classificação é determinante para a interpretação da severidade do desgaste: embora a abrasão a dois corpos seja tipicamente mais agressiva (ação de corte), o mecanismo a três corpos pode se tornar extremamente severo dependendo da rigidez do contra-corpo envolvido.

Figura 11: Modos de desgaste abrasivo: A- Abrasão a dois corpos; B- Abrasão a três corpos.



Fonte: Retirado de Hutchings e Shipway (2017)

Historicamente, Avery (1961) propôs a classificação do desgaste abrasivo com base na magnitude dos esforços atuantes, definindo-o em três categorias: goivagem (deformação generalizada e danos macroscópicos), alta tensão (com fratura das partículas abrasivas) e baixa tensão (deformação microscópica sem fratura do abrasivo). Contudo, Gates (1998) aponta limitações nesta abordagem, argumentando que a fratura do abrasivo depende primordialmente de suas propriedades intrínsecas e não apenas da força aplicada. Além disso, a classificação original negligencia a cinemática das partículas (se fixas ou livres), fator que altera drasticamente o mecanismo de desgaste. Diante disso, Gates (1998) propôs um novo modelo baseado na severidade do desgaste, classificado em suave, severo e extremo, além de integrar variáveis como tamanho, forma e restrição de movimento do abrasivo. A Tabela 2 sumariza as características, tensões de contato e mecanismos predominantes em cada regime.

Hutchings e Shipway (2017) ressaltam, contudo, que a cinemática das partículas (deslizamento *versus* rolamento) é determinante para a taxa de desgaste, muitas vezes mais do que apenas a configuração dos corpos. Zum Gahr (1987) complementa essa visão ao relacionar o desgaste abrasivo diretamente à microestrutura do material, consolidando-o como um mecanismo central na análise tribológica.

Tabela 2: Classificação dos regimes de desgaste abrasivo baseada na severidade.

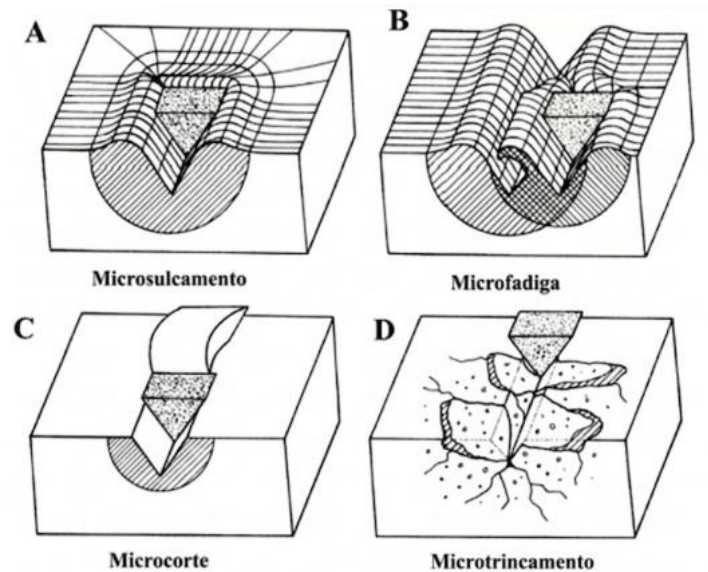
	Modo de desgaste		
	Suave	Severo	Extremo
Tamanho do abrasivo	Pequeno	Médio	Grande
Restrição	Não restrito	Parcialmente restrito por contra-corpo	Fortemente restrito
Forma do abrasivo	Arredondado	Pontiagudo	Pontiagudo
Tensão de contato	Baixa – insuficiente para quebrar as partículas	Moderada – suficiente para quebrar as partículas	Muito alta – deformação macroscópica ou fratura frágil
Mecanismo dominante	Microsulcamento	Microcorte	Microcorte, microtrinca
Termos equivalentes	Abrasão a baixos esforços; Abrasão por riscamento; Baixos esforços três corpos.	Abrasão a altos esforços; Altos esforços três corpos; Baixos esforços dois corpos.	Abrasão por goivagem; Altos esforços dois corpos.

Fonte: Adaptado de Gates (1998).

Zum Gahr (1987) propõe que o desgaste abrasivo não ocorre de maneira uniforme, mas manifesta-se através de quatro micromecanismos distintos de interação entre a partícula abrasiva e a superfície. A predominância de cada mecanismo depende diretamente da relação entre a dureza do abrasivo e a tenacidade à fratura do material desgastado, conforme ilustrado na Figura 12.

Intimamente associado a esse mecanismo está o conceito de abrasividade. Enquanto o desgaste é o efeito observado no componente, a abrasividade é a propriedade intrínseca do material (como o minério) de provocar esse dano. De Azevedo Barbosa et al. (2021) definem a abrasividade como a capacidade de um material promover o desgaste em outro, como revestimentos e aços de equipamentos. No processamento mineral, onde a abrasão é o modo de falha predominante, a correta mensuração dessa propriedade é vital para prever o consumo de componentes e planejar a manutenção.

Figura 12: Micromecanismos de desgaste produzidos na superfície de um material quando em contato com partícula abrasiva: A- Microsulcamento; B- Microfadiga; C- Microcorte; D- Microtrincamento.



Fonte: Adaptado de Zum Gahr (1987).

2.5.5. Característica das partículas abrasivas e sua influência na severidade do desgaste

Segundo a ASTM G40-17 (2017), o desgaste abrasivo é “devido a partículas duras ou protuberâncias duras forçadas contra e movimentadas ao longo de uma superfície sólida”, de modo que a severidade do dano depende não apenas do material desgastado, mas também das características do abrasivo que atua no contato. Nessa perspectiva, Hutchings e Shipway (2017) destacam que, em desgaste por partículas duras, é prática consolidada discutir dureza, forma e tamanho do abrasivo, pois essas variáveis controlam a penetração, o modo de interação e a taxa de remoção de material na interface. Em termos aplicados, Pintaude (2011) reforça que a geometria (forma), dureza e tamanho podem ser considerados os atributos mais importantes para explicar variações de taxa de desgaste causadas por partículas abrasivas, embora o efeito conjunto dependa do tribossistema e possa evoluir durante o contato.

No caso de minérios de ferro, essas variáveis se conectam diretamente à mineralogia e à textura do material. Por exemplo, a literatura de formações ferríferas

bandadas associadas a Carajás descreve o Jaspilito como um material composto por bandamentos de jaspe/sílica e minerais de ferro, além de ocorrência de veios de quartzo, o que cria heterogeneidade local de dureza e resposta ao riscamento (Moura et al., 2019). Em estudo tribológico por esclerometria/micro-scratch em Jaspilito, Magnol et al. (2017) descrevem que o Jaspilito apresenta dois minerais principais, hematita e jaspe, e relatam que a presença de veios de quartzo influencia a resposta ao riscamento, tendendo a fragilizar o comportamento local durante o ensaio. Essa visão é consistente com a caracterização mineralógica do Jaspilito de Carajás, que identificou frações relevantes de quartzo e fases de ferro (magnetita, Goethita e hematita), indicando que a participação de fases duras ou silicosas pode aumentar o potencial abrasivo do sistema (Münch, 2022).

Entre as propriedades das partículas, a dureza do abrasivo é fundamental porque condiciona a capacidade de penetração e sulcamento. A escala de Mohs frequentemente usada como referência mostra que o quartzo apresenta dureza 7, indicando alta capacidade de riscamento quando comparado a muitos minerais e a vários metais (Klein, 1994). Para minerais típicos de minérios de ferro, tabelas compilatórias indicam dureza de Mohs da hematita na faixa de 5 a 6,5 enquanto a Goethita apresenta dureza 5,0 a 5,5 valores inferiores ao quartzo (Klein, 1994). Assim, em minérios com maior participação de sílica e quartzo, a probabilidade de contatos abrasivos mais severos tende a aumentar, pois há maior chance de interação com partículas efetivamente mais duras que as fases de óxidos/hidróxidos de ferro (Klein, 1994; Moura et al., 2019). Além disso, Pintaude (2011) ressalta que a hipótese de uma partícula “rígida e invariável” frequentemente não se sustenta, pois as partículas podem fragmentar; isso pode reduzir a eficiência do abrasivo ao longo do contato e contribuir para condições de desgaste mais brando em determinados regimes.

A forma ou a angulosidade do abrasivo também controla a severidade porque arestas e vértices concentram tensões e elevam a capacidade de corte. Stachowiak (2000) investigou a relação entre angularidade de partículas e desgaste e reportou que parâmetros de angularidade podem se correlacionar com taxas de desgaste abrasivo e erosivo, reforçando que a forma do abrasivo é um fator crítico. Em linha experimental direta, Ligier e Lemecha (2020) compararam areia natural e areia britada com distribuição granulométrica semelhante e observaram desgaste

significativamente maior com areia britada, atribuindo o aumento à geometria das arestas dos grãos. Para minérios de ferro, essa discussão é pertinente porque detritos gerados em cominuição/manuseio podem apresentar diferentes graus de angularidade; além disso, no Jaspilito, o contraste textural entre bandamentos e veios (incluindo quartzo) pode produzir regiões com maior propensão a comportamento mais frágil sob riscamento, conforme discutido por Magnol et al. (2017).

O tamanho (granulometria) influencia a escala do sulcamento e a intensidade do dano, pois altera a geometria efetiva de contato e a capacidade de remoção de material. Em minérios de ferro, esse ponto é relevante porque o “tamanho efetivo” do abrasivo pode mudar com a fragmentação durante processos de britagem/moagem e também porque veios e bandamentos (como no Jaspilito) influenciam a formação de detritos e a resposta ao riscamento (Magnol et al., 2017; Moura et al., 2019). Adicionalmente, Pintaude (2011) reforça que a fragmentação altera simultaneamente tamanho e forma, modificando as condições tribológicas ao longo do ensaio/serviço. Portanto, além de dureza, forma e tamanho, a mobilidade e a concentração de abrasivo na interface podem mudar o modo de abrasão observado.

Em microabrasão, Trezona, Allsopp e Hutchings (1999) mostraram que diferentes condições de ensaio podem produzir comportamento associado a uma transição do desgaste por sulcamento para o desgaste por rolamento, podendo ser identificada com uma relação crítica entre carga e concentração da suspensão. Complementarmente, Gates (1998) discute criticamente o uso universal da classificação “dois corpos/três corpos”, recomendando cautela ao interpretá-la e destacando que a severidade deve ser discutida com base nas condições reais do sistema. Em aplicações com minérios de ferro, isso reforça que a abrasividade e o desgaste não devem ser interpretados apenas como “propriedade do minério”, mas como resposta do tribossistema, influenciada pelo modo de geração, ou transporte, de partículas abrasivas durante o processamento (ASTM, 2017; Hutchings; Shipway, 2017).

Diante da influência de dureza, forma e tamanho das partículas na severidade do desgaste, observa-se que a abrasividade pode ser avaliada por diferentes métodos, escolhidos conforme o tipo de contato que se deseja representar (ferramenta-rocha, cominuição ou polpa). No contexto de cominuição, um

procedimento clássico é o Bond Abrasion Index (Ai), que expressa a abrasividade do material a partir da perda de massa de um elemento metálico padronizado, sendo utilizado como subsídio para estimar desgaste de revestimentos e corpos moedores em britadores e moinhos (BERGERMAN et al., 2021). Já em sistemas com polpas (*slurries*), o Miller Number (ASTM G75-15) permite classificar a abrasividade relativa de suspensões por meio do desgaste em um material de referência, além de possibilitar a comparação da resposta ao desgaste de diferentes materiais na mesma polpa (ASTM G75-15, 2021).

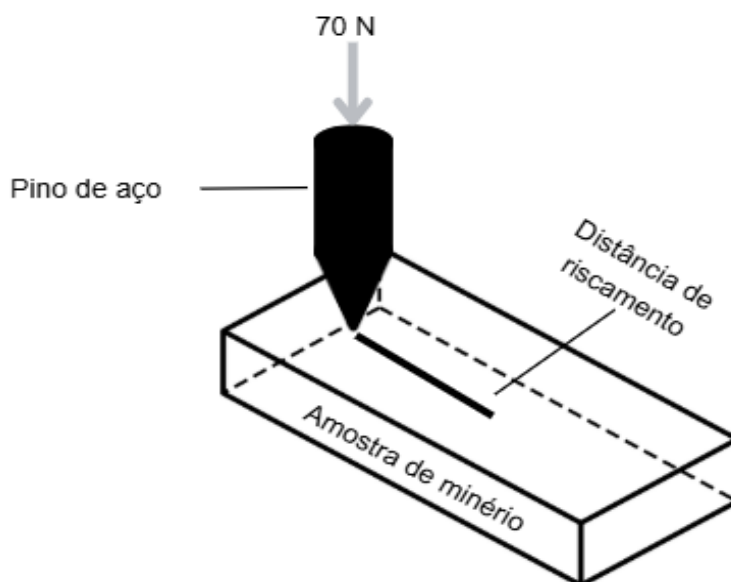
Portanto para quantificar de forma prática a abrasividade associada aos minérios e suas características, apresenta-se a seguir o ensaio CERCHAR, que permite avaliar a abrasividade a partir do desgaste gerado na ponta de um pino de aço após o riscamento controlado da superfície da amostra (ASTM, 2017; ASTM, 2010; Plinninger et al., 2003).

2.6. Ensaio CERCHAR

O ensaio CERCHAR (*CERCHAR Abrasivity Index - CAI*) foi desenvolvido na década de 1970 pelo *Centre d'Études et Recherches des Charbonnages de France* com o objetivo inicial de prever o desgaste de ferramentas de corte em mineração de carvão, sendo um ensaio simples e de baixo custo. (Plinninger, 2003; West, 1989; CERCHAR, 1986)

Atualmente, o procedimento é regido pela norma ASTM D7625, que padroniza os parâmetros de ensaio. Segundo a norma, o ensaio consiste em riscar a superfície de uma amostra de rocha com um pino cônico de aço, sob uma força normal constante de 70 N, ao longo de uma distância de 10 mm, como mostrado na Figura 13. O índice CAI é calculado com base no diâmetro da superfície de desgaste plana gerada na ponta do pino, relacionando-o à abrasividade do minério.

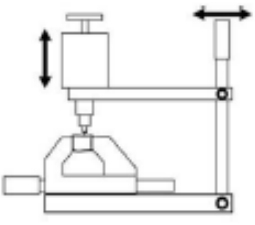
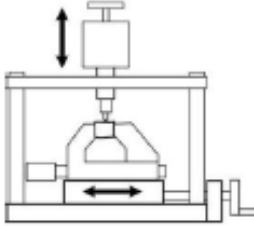
Figura 13: Esquema do ensaio CERCHAR.



Com o avanço das tecnologias e a necessidade de aprimorar os métodos de teste, foram propostas modificações para melhorar a precisão e a eficácia do ensaio. Uma dessas modificações é o ensaio CERCHAR Modificado por West (West, 1981). A modificação proposta por West incorpora elementos adicionais ao ensaio CERCHAR tradicional. A diferença entre os dois tipos de equipamentos (tradicional e o modificado por West) está relacionado com a movimentação relativa durante o ensaio, sendo que no ensaio CERCHAR convencional é o pino que se movimenta enquanto a amostra está fixada e no modelo de West é a amostra que se movimenta durante o ensaio (Alber et al, 2014; Plinninger et al, 2003). Na Figura 14 podem-se observar os dois modelos do equipamento para o ensaio CERCHAR.

Mais recentemente, Zhang et al. (2025) realizaram uma revisão abrangente das aplicações do ensaio CERCHAR, destacando sua versatilidade, mas também apontando a necessidade de rigor no controle das variáveis de teste para garantir a reprodutibilidade dos resultados.

Figura 14: Esquemas das características construtivas e configurações dos equipamentos para o ensaio CERCHAR.

Modelo dos equipamentos	
<p>Original CERCHAR: Pino se movimenta e a amostra é fixa.</p>	
<p>Modificado por West: Amostra se movimenta e o pino é fixo.</p>	

Fonte: Alber et al. (2014)

2.6.1. Parâmetros que determinam o CAI

Apesar da padronização, o valor do CAI é sensível a diversos parâmetros operacionais e geológicos. Plinninger et al. (2003) investigaram as condições de teste e identificaram que fatores como a velocidade de riscamento e, principalmente, a rugosidade da superfície da amostra (superfície serrada *versus* superfície natural de fratura) influenciam significativamente o diâmetro de desgaste final.

Além disso, como a condição da superfície da amostra influencia o índice CAI, estudos indicam incremento da ordem de 14% a 18% quando o risco é executado em superfícies naturais em comparação a superfícies serradas, o que reforça a necessidade de considerar preparo de amostra e representatividade do ensaio para extrapolação em campo (Plinninger et al., 2003; Yarali; Duru, 2016).

Aydin (2014) aprofundou a investigação sobre os parâmetros de teste, demonstrando que variações na microestrutura da rocha e na preparação da amostra podem introduzir dispersões nos resultados, exigindo um número adequado de réplicas para validade estatística. Além disso, Kasling e Thuro (2010) propuseram avanços na determinação rápida dos parâmetros de interação pino-rocha, buscando

métodos mais práticos que mantenham a precisão necessária para aplicações industriais.

2.6.2. Dureza do pino

Um dos aspectos mais críticos do ensaio CERCHAR é a especificação do material do pino. A norma ASTM D7625 recomenda o uso de um aço com dureza HRC 55, pois a variação na dureza do pino altera drasticamente o valor do CAI medido.

Michalakopoulos et al. (2006) estudaram a influência da dureza dos pinos de aço no índice de abrasividade CERCHAR e concluíram que pinos com durezas diferentes produzem classificações de abrasividade distintas para a mesma rocha, o que pode levar a erros na previsão de desgaste se não houver a devida correção. Stanford e Hagan (2009) corroboraram essa visão ao avaliar a abrasividade focando na interação do material da ferramenta, sugerindo que o uso de materiais de pino que reproduzem o equipamento real pode oferecer dados mais representativos.

Alber (2008) expandiu essa discussão ao analisar a dependência da tensão no índice CAI e seus efeitos no desgaste de ferramentas de corte, estabelecendo uma ponte teórica importante entre o ensaio de laboratório (microescala) e o desempenho de componentes em campo submetidos a altas tensões de contato.

Devido à elevada dureza e estabilidade do aço H13, ele é utilizado no ITV-MI como material de referência em ensaios tribológicos, como o CERCHAR, Além disso, na prática tribológica em geral, ensaios padronizados como pino-disco (ASTM G99) e roda de borracha (ASTM G65) são amplamente usados para avaliar desgaste/abrasão de materiais, podendo empregar o aço H13 como corpos de prova/pinos.

2.6.3. Aço H13

O H13 é um aço-ferramenta para trabalho à quente ligado ao cromo-molibdênio. Segundo Rheinheimer, Lorenzi e Souza (2022), este material destaca-se pela excelente combinação de ductilidade, tenacidade e resistência à fadiga térmica,

propriedades mantidas mesmo sob elevadas temperaturas. Em sua revisão sobre o uso deste aço, os autores destacam que a formação de carbonetos globulares e a alta temperabilidade do H13 garantem uma dureza estável, o que o torna uma boa opção para ser usada como referência no ensaio CERCHAR.

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve os materiais, equipamentos e procedimentos experimentais adotados para a determinação da abrasividade dos minérios e para a análise comparativa do desgaste entre os aços H13 e Hadfield. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tribologia do ITV-MI, seguindo as diretrizes da norma ASTM D7625, com adaptações para o estudo do comportamento do aço Hadfield.

3.1 Caracterização dos materiais

3.1.1 Amostras de minério

Foram selecionadas amostras de minério de ferro provenientes de duas províncias minerais distintas, visando cobrir uma variabilidade litológica representativa:

- Região Norte (Província Mineral de Carajás - PA): Foram coletadas amostras de Hematita Compacta (CH), Jaspilito (JP) e Minério Hidratado (HO), como mostrado na Figura 15.
- Região Sudeste (Província do Quadrilátero Ferrífero - MG): Através da Figura 16 é possível verificar os minérios de Itabirito Compacto (CI), Hematita Compacta (CH), Hematita Goethita (GH) e Ganga Goethita (GG).

Figura 15: Minérios da Província Mineral de Carajás.

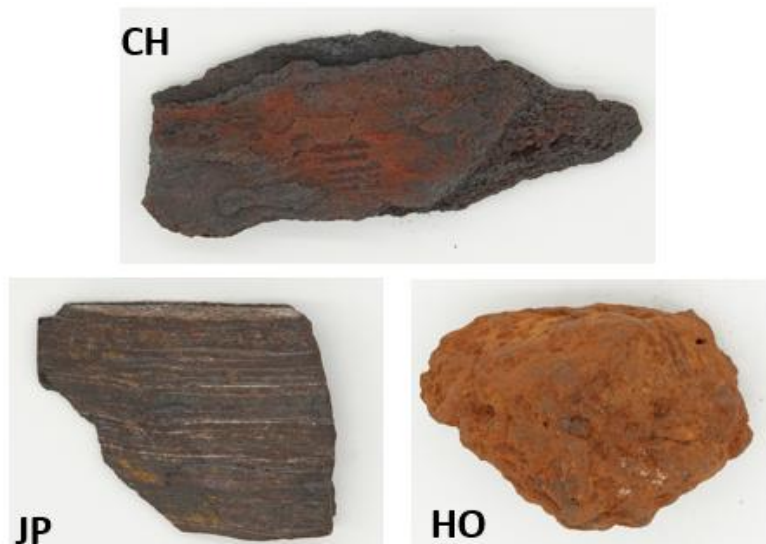
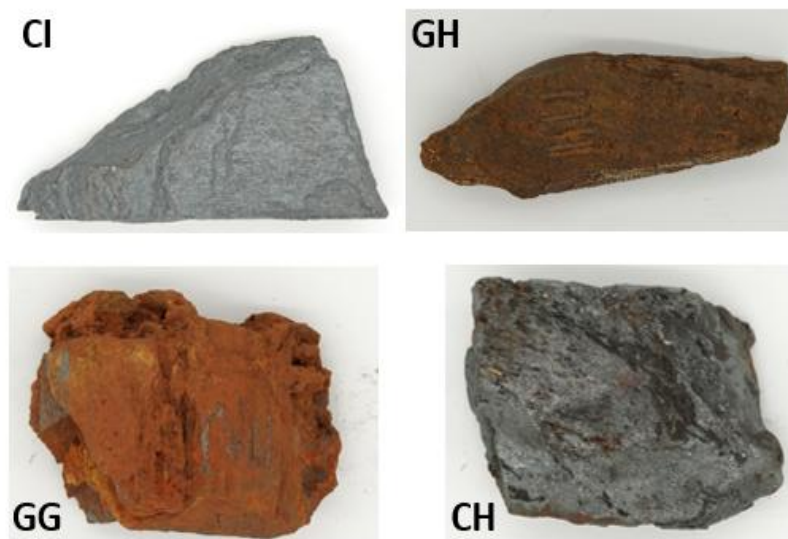


Figura 16: Minérios da Província do Quadrilátero Ferrífero.



Os ensaios foram realizados nas superfícies naturais das amostras, selecionando-se áreas com menor rugosidade aparente, ou seja, superfície plana aparente.

3.1.2 Pinos de aço

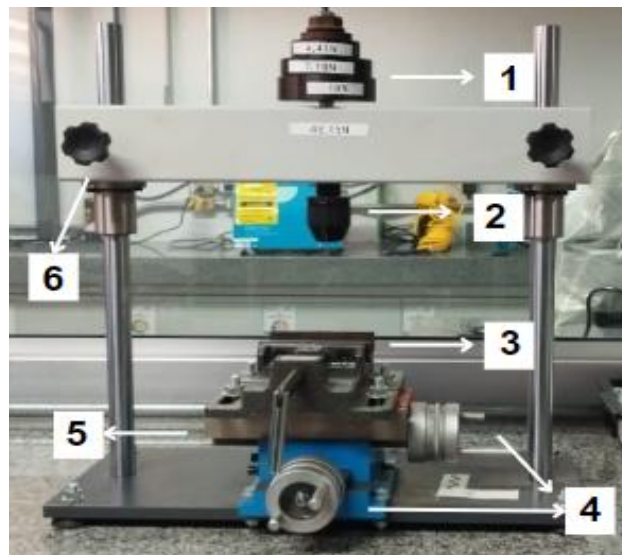
Para a análise comparativa de desgaste, foram utilizados dois tipos pinos de aço com geometria cônica de 90°:

1. Aço H13: Aço ferramenta. As amostras utilizadas apresentaram dureza média de 50 HRC, verificada em macrodurômetro Rockwell. Este material serve como linha de base para o cálculo do CAI padrão.
2. Aço Hadfield: Aço manganês austenítico, amplamente utilizado em revestimentos de britadores devido à capacidade de encruamento. Os pinos apresentaram dureza inicial média de 198 HV₃₀. Esse valor de dureza é considerado baixo, não sendo possível convertê-lo para HRC.

3.2 Equipamento CERCHAR

O equipamento utilizado baseia-se na configuração modificada por West, disponível no ITV-MI, como é mostrado na Figura 17. Diferentemente do arranjo original onde o pino se move, neste equipamento a amostra de rocha é fixada em uma mesa de coordenadas móvel, enquanto o pino permanece estático sob uma força normal constante. O sistema garante a aplicação de uma força normal de 70 N sobre a superfície da rocha, conforme a norma ASTM D7625. O deslocamento da amostra é realizado manualmente através de uma manivela, garantindo uma velocidade de ensaio controlada de aproximadamente 10 mm/s.

Figura 17: Equipamento CERCHAR do Laboratório de Tribologia do ITV-MI; pesos (1); porta-pino (2); porta-amostra (3); manivela de movimentação (4); mesa de coordenadas para a movimentação da amostra (5); suporte (6).



3.3 Procedimentos de ensaio

1. Preparação: Limpeza dos pinos e verificação da geometria da ponta (90°) em microscópio óptico.
2. Montagem: Fixação da amostra na morsa do equipamento. Utilizou-se um nível de bolha para garantir que a superfície de riscamento estivesse horizontal, minimizando componentes de força lateral não desejadas.
3. Execução: Aplicação da carga de 70 N e realização do risco na distância pré-determinada, sendo realizado por 5 vezes em cada minério.
4. Análise Pós-Teste: Os pinos foram levados para análise de imagem em microscópio óptico e o diâmetro médio desgastado foi calculado. A perda de massa foi medida, mas desconsiderada devido à baixa magnitude dos valores em relação à precisão da balança.

3.4 Delineamento experimental

Para atingir os objetivos de comparação entre minérios e ligas metálicas, o ensaio experimental foi dividido em duas etapas:

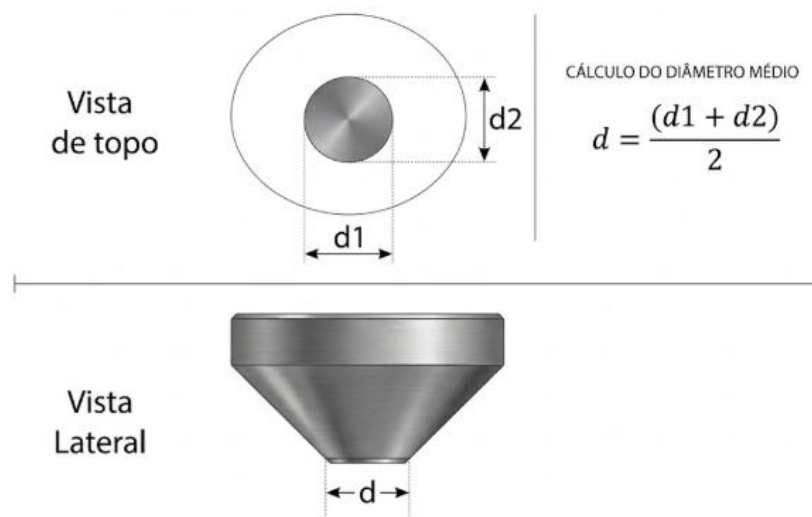
Na etapa 1, todos os minérios analisados (tanto de Carajás quanto do Quadrilátero Ferrífero) foram submetidos ao ensaio CERCHAR com ambos os tipos de pino (H13 e Hadfield). Utilizou-se uma distância de riscamento padronizada de 10 mm, sendo realizadas 5 réplicas (riscos) para cada par *Minério-Pino*. Essa configuração foi proposta para se comparar diretamente o valor do diâmetro desgastado com o aço padrão H13 versus o desgaste sofrido pelo aço industrial Hadfield nos mesmos minérios.

Para a etapa 2, onde pretendeu analisar os regimes de desgaste transitório e estacionário do aço Hadfield, foram realizados ensaios nos minérios Jaspilito e Itabirito Compacto. O ensaio foi realizado utilizando-se distâncias de riscamento de 15 mm, 20 mm e 25 mm, sendo 5 réplicas para cada distância, com a finalidade de identificar o ponto de transição entre o regime de desgaste transitório e o estacionário.

3.5 Análise dos resultados do ensaio CERCHAR

Após o ensaio, o diâmetro desgastado de cada pino é medido em milímetros e a média das repetições é usada para calcular o CAI. O CAI é um índice adimensional, calculado por $CAI = 10 \cdot d$, em que d é o diâmetro médio de desgaste medido em milímetros. Conforme a Figura 18 e a eq.1 a seguir.

Figura 18: Cálculo do diâmetro médio da ponta do pino após o ensaio.



$$CAI = 10d$$

Equação 1

A classificação da abrasividade, conforme a norma da ASTM D7625, é apresentada em intervalos de CAI, que correspondem a diferentes níveis de abrasividade para facilitar a comparação e interpretação dos resultados. A Tabela 3 apresenta a classificação mencionada.

É importante observar que se a dureza do pino de aço não for 55 HRC, recomenda-se representar os resultados como CAI_x , onde X representa o valor de dureza do pino (ALBER et al., 2014) e CAI_x o valor equivalente do CAI calculado. A equação 2 (JACOBS; HAGAN, 2009) permite a normalização dos valores de CAI para diferentes durezas do pino, facilitando a comparação entre os resultados obtidos.

Tabela 3: Classificação da abrasividade segundo a norma ASTM D7625.

Níveis de abrasividade	CAI (55 HRC)
Abrasividade muito baixa	0,30 - 0,50
Abrasividade baixa	0,50 - 1,00
Abrasividade média	1,00 - 2,00
Abrasividade alta	2,00 - 4,00
Abrasividade muito alta	4,00 - 6,00
Quartzítica	6,00 - 7,00

Fonte: ASTM D7625 (2010)

$$CAI = \frac{0,415 CAIx}{1-0,0107X} \quad \text{Equação 2}$$

Fonte: JACOBS; HAGAN (2009)

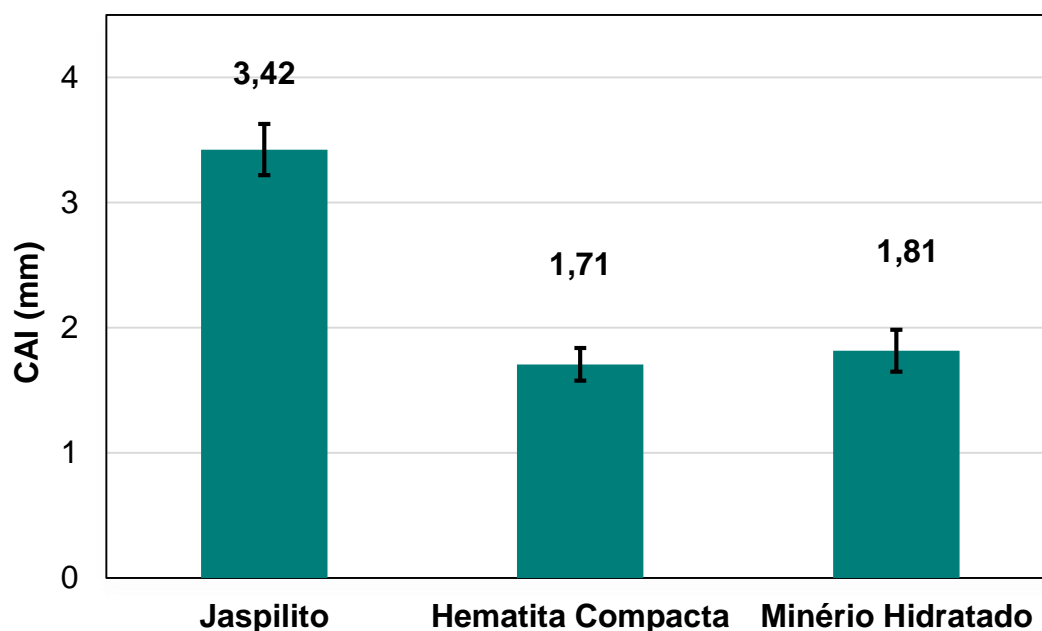
A análise dos resultados considera diversos parâmetros, como a força normal aplicada, a distância de riscamento do ensaio, a velocidade do riscamento e o método de medição do diâmetro desgastado. Portanto, a determinação da abrasividade a partir dos valores de CAI pode auxiliar na previsão de desgaste em campo e fornecer subsídios para a seleção de materiais para equipamentos que permitam ter uma produção eficiente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Índice de abrasividade CERCHAR

A Figura 19 apresenta os resultados do CAI obtidos nos ensaios CERCHAR utilizando os pinos de aço H13 para os minerais da região Norte. O Jaspilito destacou-se pela maior severidade, apresentando um CAI médio de 3,42, o que o classifica como mineral de alta abrasividade. Este comportamento é atribuído à presença de bandas de quartzo, mineral de alta dureza, intercaladas com a hematita. Em contrapartida, a Hematita Compacta e o Minério Hidratado apresentaram valores de 1,71 e 1,81, respectivamente, enquadrando-se na categoria de abrasividade média.

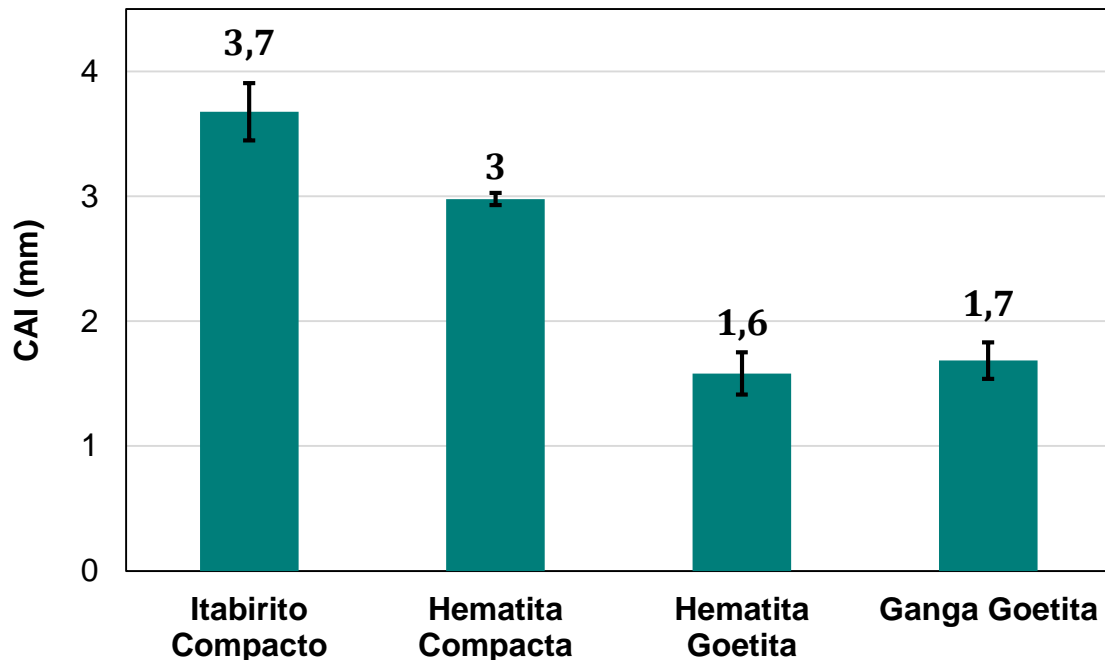
Figura 19: Valor do CAI dos minérios da Província Mineral de Carajás.



A Figura 20 apresenta os resultados de CAI obtidos a partir dos ensaios CERCHAR utilizando os pinos de aço H13 para o riscamento de minerais da região Sudeste. Observa-se que a compactação do minério é determinante para a abrasividade nesta região. O Itabirito Compacto obteve o maior índice, seguido pela Hematita Compacta, ambos classificados como de alta abrasividade. Em contraste, os minérios com matriz goetítica, Hematita Goethita e Ganga Goethita, apresentaram valores significativamente menores, situando-se na faixa de abrasividade média. Essa

diferença evidencia que a porosidade e a menor resistência mecânica da Goethita reduzem a abrasividade dos minerais.

Figura 20: Valores de CAI para os minérios da Província do Quadrilátero Ferrífero



4.2 Desgaste do pino de aço Hadfield

Devido à baixa dureza inicial do aço Hadfield (~198 HV), o cálculo do CAI padrão (calibrado para 55 HRC) não é aplicável diretamente. Portanto, a análise baseia-se no diâmetro médio da ponta desgastada. Os resultados do diâmetro médio das pontas desgastadas, apresentados na Figura 21, confirmam que o Jaspilito possui o comportamento mais abrasivo do grupo. Em contrapartida, a Hematita Compacta e o Minério Hidratado apresentaram desempenhos similares entre si.

Ao analisar o comportamento do aço Hadfield frente aos minérios da região Sudeste (Figura 22), nota-se a formação de dois grupos distintos de abrasividade. O primeiro grupo composto pelos minérios compactos, a Hematita Compacta e o Itabirito Compacto mostraram-se mais abrasivos. O segundo grupo, formado pelos minérios associados à Goethita, Hematita Goethita e Ganga Goethita, apresentou um comportamento menos abrasivo.

Figura 21: Diâmetro médio da ponta do pino de aço Hadfield após ensaio com minérios da região Norte.

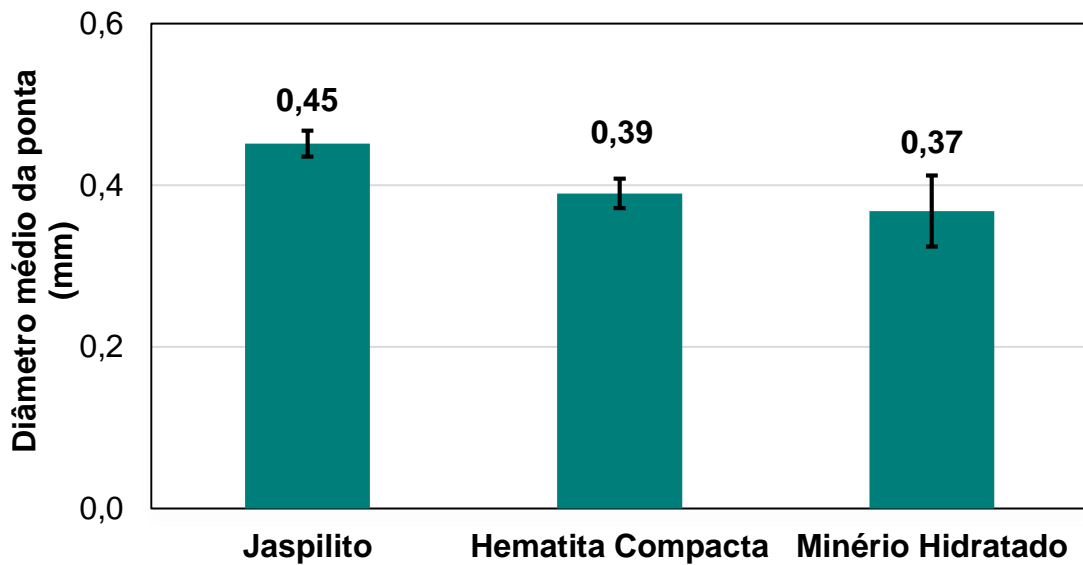
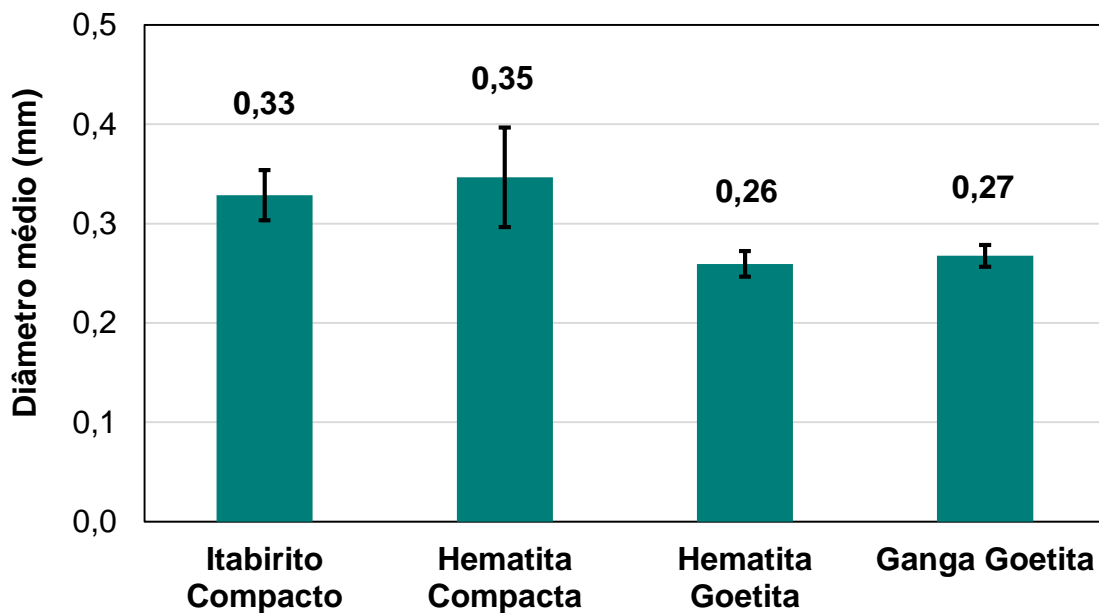


Figura 22: Diâmetro médio da ponta do pino de aço Hadfield após ensaio com minérios da região Sudeste.

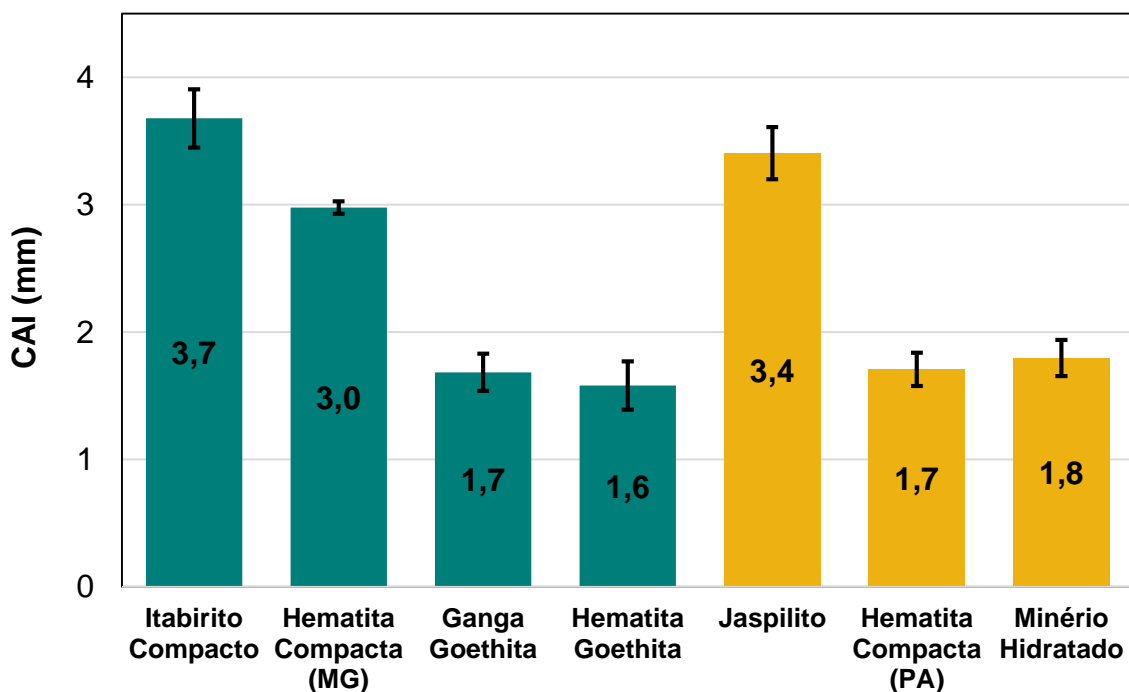


4.3 Comparação da abrasividade dos minérios

A Figura 23 reúne os resultados de abrasividade obtidos com o pino H13 por meio do índice CAI, observa-se que os maiores valores de CAI concentram-se nos minérios compactos e no Jaspilito. Os minérios que se destacaram como mais

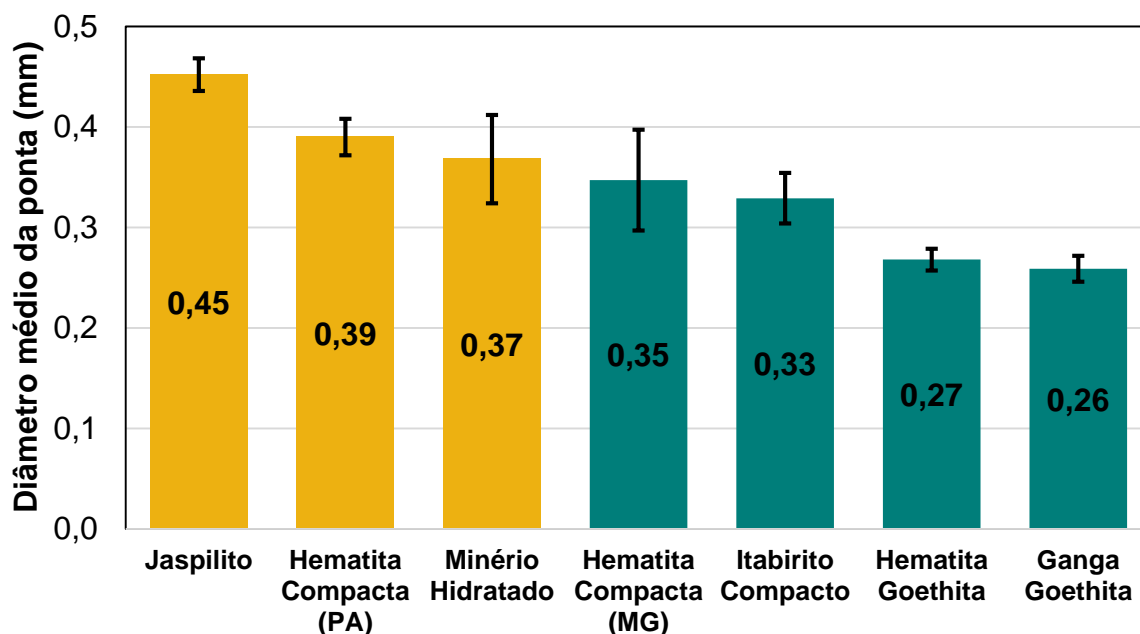
abrasivos foram o Itabirito Compacto, o Jaspilito e a Hematita Compacta do Quadrilátero Ferrífero todos classificados como abrasividade alta. Em contraste, litologias com maior participação goetítica exibem menores índices, como Hematita Goethita e Ganga Goethita, na faixa de abrasividade média, evidenciando a influência da matriz mineralógica e das propriedades mecânicas na resposta ao riscamento. Esses resultados indicam que é necessário utilizar matérias de revestimento resistentes para operar os minérios classificados como abrasividade alta.

Figura 23: Ranking do CAI dos minérios das duas regiões estudadas, em verde minérios da região sudeste e em amarelo os minérios da região norte.



Para o pino Hadfield, a comparação é realizada pelo diâmetro médio desgastado, uma vez que o CAI padrão é calibrado para pinos de aço com dureza HRC, enquanto o Hadfield apresenta dureza inicial significativamente menor e comportamento mecânico distinto. Assim, a resposta do Hadfield tende a ser mais sensível às condições iniciais de contato e à evolução do desgaste ao longo do riscamento, o que pode resultar em pequenas alterações no ranqueamento quando comparado ao pino H13. O Jaspilito apresenta o maior desgaste do Hadfield, enquanto Hematita Compacta e Minério Hidratado da região Norte exibem valores intermediários. Para os minérios do Sudeste, observa-se novamente um agrupamento em dois níveis, com maiores diâmetros para os minérios compactos e menores valores para os minérios goetíticos, como é mostrado na Figura 24.

Figura 24: Ranking do diâmetro desgastado médio dos minérios das duas regiões estudadas, em verde minérios da região sudeste e em amarelo os minérios da região norte.



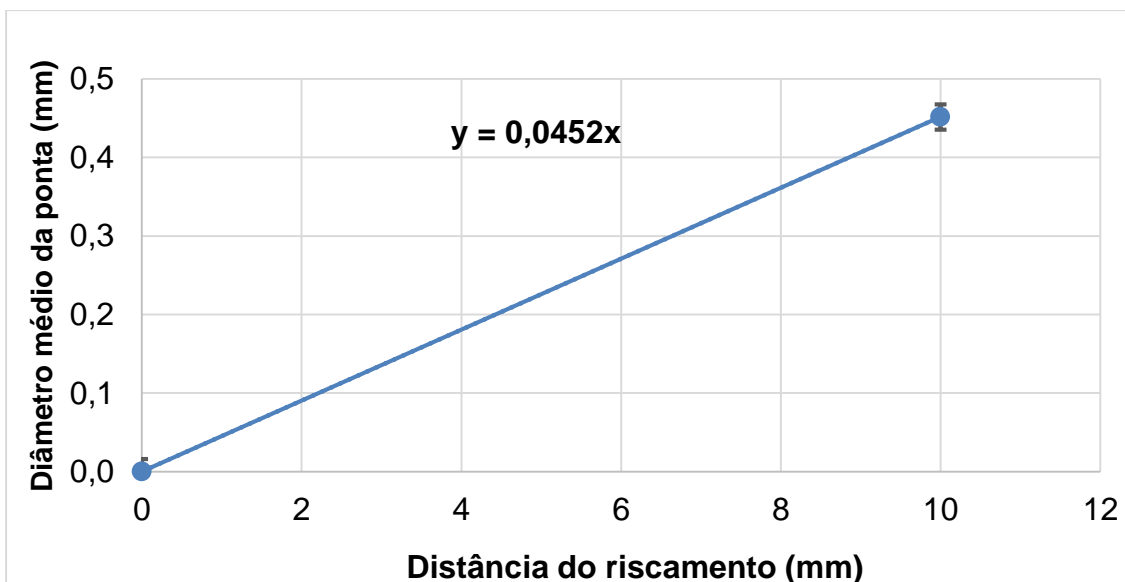
As diferenças pontuais no ranqueamento entre alguns minérios podem ocorrer porque o método padronizado de 10 mm avalia materiais com comportamentos mecânicos distintos sob a mesma condição de ensaio. Dessa forma, o tópico seguinte prepara uma discussão subsequente sobre a resposta do Hadfield em termos de regime transitório e regime estacionário de desgaste.

4.4 Análise dos Regimes de Desgaste do Aço Hadfield

Ensaio CERCHAR complementares foram realizados utilizando o Jaspilito e o Itabirito Compacto com diferentes distâncias de riscamento. Foram testadas distâncias de riscamento de 15, 20 e 25 mm. Para fins comparativos, avaliou-se a taxa de desgaste dos pinos de aço Hadfield em contato com os dois minérios, com base nos resultados de testes anteriores.

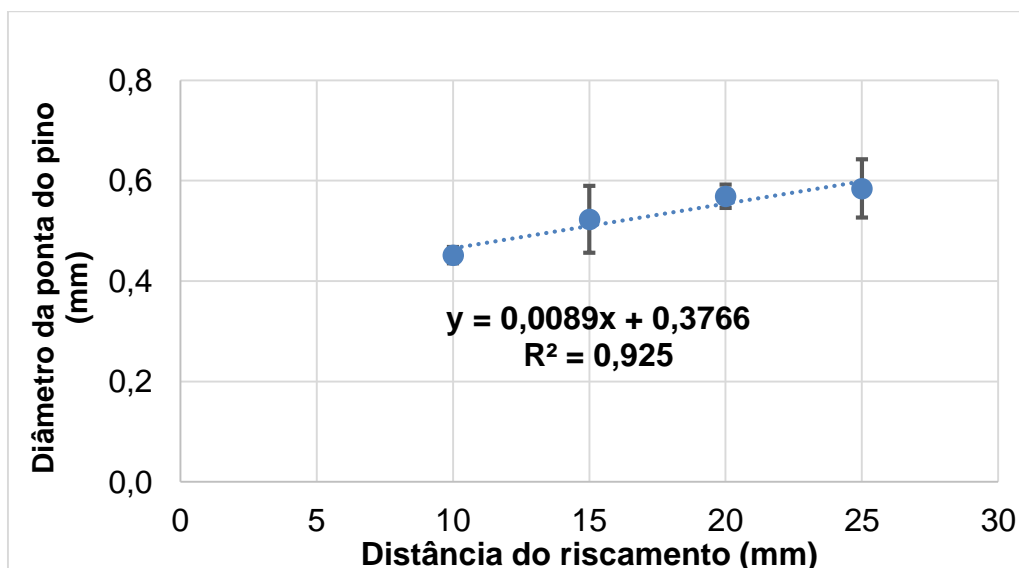
Avaliando o ensaio com o minério Jaspilito, a Figura 25 mostra os resultados dos testes para uma distância de riscamento de 10 mm. Assumindo um ajuste linear para considerar uma taxa de desgaste constante, tem-se uma variação do diâmetro da ponta de 45,2 $\mu\text{m}/\text{mm}$ (0,0452 mm/mm). Esta taxa caracteriza o Regime Transitório, onde o pino ainda está sofrendo desgaste em relação à distância, ainda com baixa dureza superficial, sofre microcorte severo.

Figura 25: Taxa de desgaste do pino de aço Hadfield riscando Jaspilito na distância padrão (10 mm).



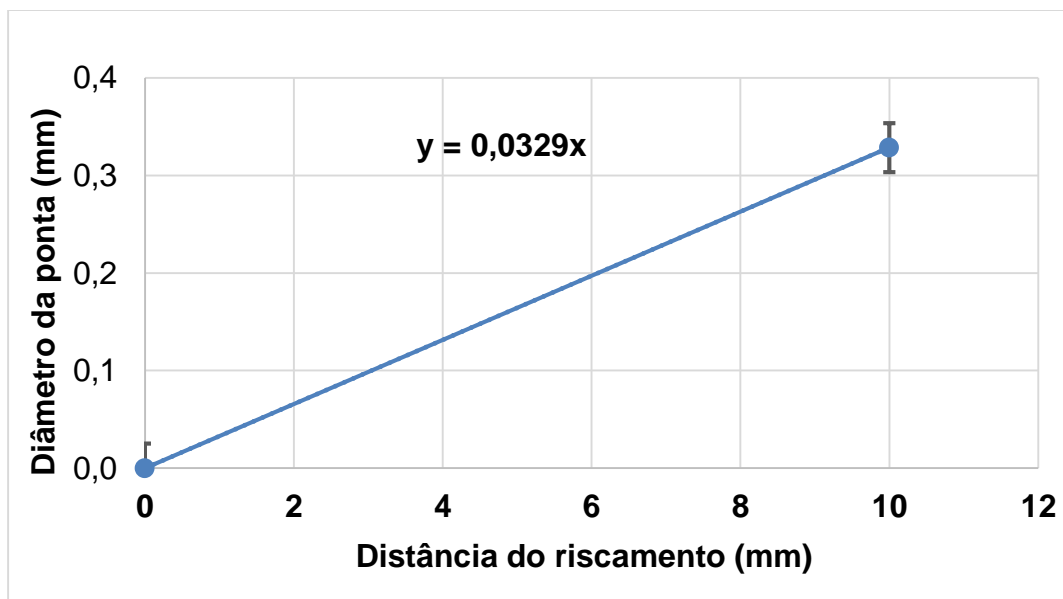
A Figura 26 apresenta os resultados do diâmetro da ponta do pino em função das diferentes distâncias de riscamento, onde foi realizado um ajuste linear. O ajuste linear estabeleceu uma taxa de desgaste de $8,9 \mu\text{m}/\text{mm}$. Esse valor é menor que a taxa observada nos primeiros 10 mm ($45,2 \mu\text{m}/\text{mm}$). As estimativas de taxa de desgaste sugerem que, durante os primeiros 10 mm, o pino sofreu um desgaste mais intenso, correspondente a um regime de desgaste transitório. A partir da distância de 15 mm, estabeleceu-se um regime de estado estacionário, com baixa variação no diâmetro médio desgastado das pontas dos pinos.

Figura 26: Evolução do desgaste do pino de aço Hadfield riscando Jaspilito em distâncias estendidas (10 a 25 mm).



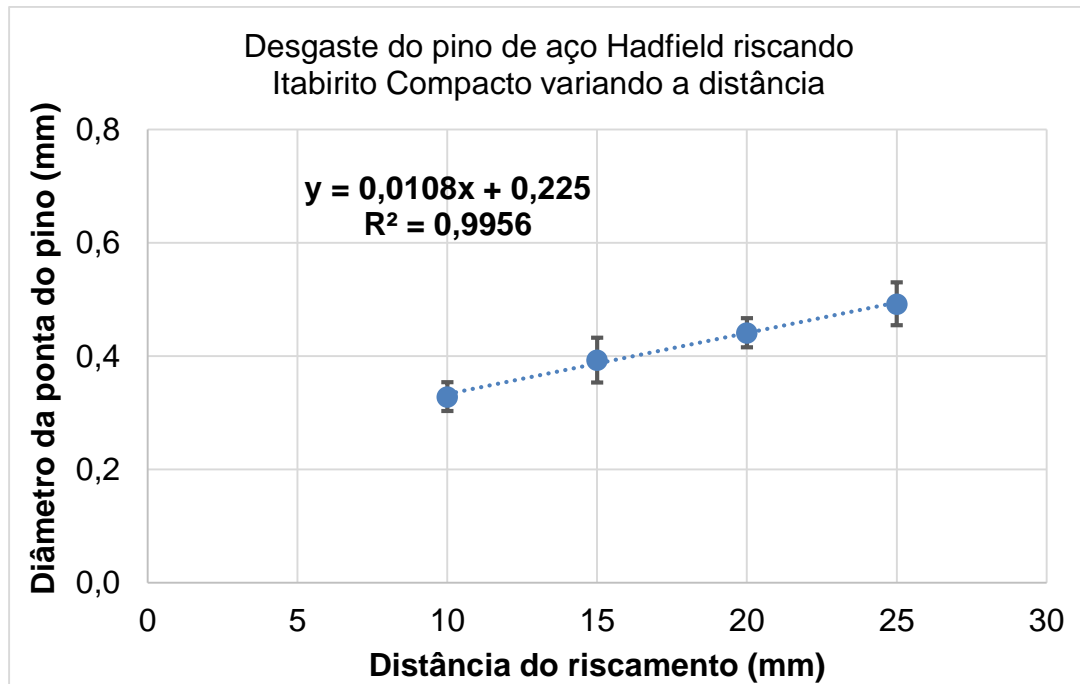
A análise comparativa das curvas de desgaste, apresentadas nas Figuras 27 e 28, permite quantificar a distinção entre os regimes tribológicos atuantes no aço Hadfield que risca o minério de Itabirito Compacto. Na distância inicial de 10 mm, observa-se uma taxa de desgaste acentuada de 39,3 $\mu\text{m}/\text{mm}$, conforme a Figura 27. Essa taxa trata-se de um regime transitório, caracterizado pela variação do desgaste ao longo do tempo/distância de riscamento. Nessa fase inicial, a superfície do aço ainda mantém sua condição de dureza original e sofre maior deformação plástica e remoção de material. A taxa de desgaste desta fase inicial sugere que, dentro da distância normativa do ensaio CERCHAR, o mecanismo de encruamento ainda está em processo de formação e não é suficiente para conter o desgaste mais abrasivo.

Figura 27: Taxa de desgaste do pino de aço Hadfield riscando Itabirito Compacto na distância padrão (10 mm).



Em contrapartida, a análise da distância estendida (> 10 mm) na Figura 28 revela uma mudança drástica na inclinação da curva. A taxa de desgaste cai para 10,8 $\mu\text{m}/\text{mm}$. Esta redução de quase 4 vezes na taxa de remoção de material sinaliza a entrada no Regime Estacionário.

Figura 28: Taxa de desgaste do pino de aço Hadfield riscando Itabirito Compacto em distâncias estendidas (10 a 25 mm).



Portanto, a dureza superficial se estabiliza devido ao encruamento suportado pelo material. A partir da distância de 10 mm, a camada encruada formada pode ser capaz de resistir mais eficazmente à abrasão, resultando em uma taxa de desgaste constante e significativamente menor. Isso evidencia que a distância do ensaio CERCHAR padrão penaliza o aço Hadfield, avaliando-o majoritariamente em seu estado mais vulnerável (transiente), antes que ele atinja seu estado estacionário.

5 CONCLUSÃO

1. Os ensaios CERCHAR com pino H13 mostraram que a abrasividade varia significativamente entre as litologias. No Norte (Carajás), o Jaspilite foi o mais abrasivo, sendo classificado como alta abrasividade. Enquanto Hematita Compacta e Minério Hidratado ficaram na faixa de abrasividade média.
2. No Sudeste (Quadrilátero Ferrífero), os minérios compactos apresentaram os maiores CAI, com Itabirito Compacto e Hematita Compacta classificados como alta abrasividade, enquanto os minérios com maior participação goetítica foram classificados como abrasividade média

3. Para o pino de aço Hadfield, a análise foi feita pelo diâmetro médio desgastado, o Jaspilito apresentou novamente o maior desgaste em relação aos minérios da sua região.
4. A comparação entre CAI (H13) e diâmetro (Hadfield) mostrou que a tendência: minérios compactos e o jaspilito ocupam as posições de maior severidade, enquanto os minérios goetíticos apresentam menor abrasividade. Porém variações de ranqueamento ocorrem porque o Hadfield tem resposta mais sensível às condições iniciais do desgaste durante o riscamento.
5. Nos ensaios com distâncias variadas, o Hadfield apresentou um regime transitório no início do ensaio. Para o Jaspilito, a taxa estimada em 10 mm foi 45,2 $\mu\text{m}/\text{mm}$, enquanto a taxa ajustada no intervalo 10–25 mm reduziu para 8,9 $\mu\text{m}/\text{mm}$, indicando tendência à estabilização do desgaste em distâncias maiores (a partir de 15 mm). Para o Itabirito Compacto, observou-se comportamento semelhante: a taxa de desgaste em 10 mm foi 39,3 $\mu\text{m}/\text{mm}$, e em distâncias estendidas houve queda da taxa para 10,8 $\mu\text{m}/\text{mm}$, caracterizando a transição para um comportamento mais estável à medida que o encruamento evolui.

Em conjunto, conclui-se que o ensaio CERCHAR foi eficaz para diferenciar a abrasividade dos minérios avaliados. Além disso, a análise com o pino de aço Hadfield mostrou que a interpretação do desgaste deve levar em conta a existência de um regime transitório relevante em 10 mm e a tendência de estabilização em distâncias maiores, aspecto crucial para extrapolações para aplicação industrial. Assim, os resultados indicam que a distância padronizada de 10 mm pode não ser adequada para representar o comportamento do desgaste do aço Hadfield, pois o ensaio tende a capturar predominantemente o regime transitório. Portanto, qualquer proposta de padronização do ensaio CERCHAR para esse material deve considerar distâncias de riscamento maiores, capazes de refletir o regime estacionário associado ao encruamento.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBER, M. Stress dependency of the Cerchar abrasivity index (CAI) and its effects on wear of selected rock cutting tools. *Tunnelling and Underground Space Technology*, v. 23, n. 4, p. 351–359, 2008. (Elsevier).

ALBER, Michael; YARALI, Olgay; DAHL, Filip; BRULAND, Amund; KÄSLING, Heiko; MICHALAKOPOULOS, Theodore N.; CARDU, Marilena; HAGAN, Paul; AYDIN, Hamit; ÖZARSLAN, Ahmet. ISRM Suggested Method for Determining the Abrasivity of Rock by the CERCHAR Abrasivity Test. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v. 47, 2014. DOI: 10.1007/s00603-013-0518-0.

ANDRADE, Gustavo Tressia de. Resistência à abrasão de aço Hadfield para britadores: efeito do tamanho do abrasivo e do pH do meio. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica de Projeto e Fabricação) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. doi:10.11606/D.3.2016.tde-11072016-102946.

ASM INTERNATIONAL. *ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. Materials Park, OH: ASM International, 1990.

ASTM INTERNATIONAL. *ASTM D7625: Standard Test Method for Laboratory Determination of Abrasiveness of Rock Using the CERCHAR Method*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2010.

ASTM INTERNATIONAL. *ASTM G40-17: Standard Terminology Relating to Wear and Erosion*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

ASTM INTERNATIONAL. *ASTM D7625-22: Standard Test Method for Laboratory Determination of Abrasiveness of Rock Using the CERCHAR Abrasiveness Index Method*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.

ASTM INTERNATIONAL. *ASTM G75-15 (2021): Standard Test Method for Determination of Slurry Abrasivity (Miller Number) and Slurry Abrasion Response of Materials (SAR Number)*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021. Disponível em: ASTM G75 (Miller Number/SAR). Acesso em: 11 fev. 2026.

ATABAKI, M. M. et al. Abrasive wear behavior of high chromium cast iron and Hadfield steel – A comparison. *Journal of Iron and Steel Research, International*, v. 19, n. 4, p. 43-50, 2012.

AVERY, H. S. The measurement of wear resistance. *Wear*, v. 4, n. 6, p. 427-449, 1961.

BARBOSA, E. A. et al. Abrasividade de minérios de ferro e sua influência no desgaste de revestimentos. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 2021.

BHUSHAN, B. *Introduction to Tribology*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2013.

CERCHAR. *The Cerchar abrasiveness index*. Verneuil: Centre d'Études et des Recherches des Charbonnages de France, 1986.

CHAVES, A. P. *Teoria e Prática do Tratamento de Minérios: Bombeamento de Polpas e Classificação*. 4. ed. São Paulo: Signus, 2012.

CHAVES, Arthur Pinto; PERES, Antonio Eduardo Clark. Teoria e prática do tratamento de minérios: britagem, peneiramento e moagem. São Paulo: Signus, 2003

CORREIA, J. C. G.; COUTO, H. J. B. Classificação e peneiramento. In: Tratamento de minérios. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. Cap. 5, p. 225–272. Disponível em: <https://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2177>.

Czichos, H. *Tribology – a systems approach to the science and technology of friction, lubrication and wear*. Elsevier, Amsterdam (1978).

DIN 50320:1979-12 – Wear; Terms, Systematic Analysis of Wear Processes, Classification of Wear Phenomena (Verschleiß; Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes). Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), 1979. (Status: Withdrawn).

GATES, J. D. Two-body and three-body abrasion: A critical discussion. *Wear*, v. 214, n. 1, p. 139-146, 1998.

GOUSSELAND, P. A historical note on the early years of Hadfield manganese steel. *Climax Molybdenum Co*, 1974.

GUZMÁN, E. E. M. N. de; BERGERMAN, M. G.; MASSOLA, C. Development of a laboratory test for wear prediction in ore processing circuit. 2021. Disponível em: Repositório USP – PDF.

HAWK, J. A.; WILSON, R. D. Crushing and Grinding. In: *ASM Handbook Vol 18: Friction, Lubrication, and Wear Technology*. ASM International, 2001.

HOLMBERG, K.; KIVIKYTÖ-REPONEN, P.; HÄRKISAARI, P.; VALTONEN, K.; ERDEMIR, A. Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry. *Tribology International*, v. 115, p. 116–139, 2017. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.05.010.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.

JACOBS, N.; HAGAN, P. The effect of stylus hardness and some test parameters on CERCHAR Abrasivity Index. In: *43rd US Rock Mechanics Symposium & 4th US-Canada Rock Mechanics Symposium*. OnePetro, 2009.

JIANG, Z. et al. Fatigue wear of metallic materials. In: *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier, 2017.

JOST, PETER. "Lubrication (Tribology) - A report on the present position and industry's needs". Department of Education and Science, H. M. Stationery Office, London, UK, 1966.

KÄSLING, H.; THURO, K. Determining rock abrasivity in the laboratory. In: *Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering – EUROCK 2010*, Lausanne, Switzerland. London: Taylor & Francis/Balkema, 2010.

KARAMAN, I.; SEHITOGLU, H.; BEAUDOIN, A. J.; CHUMLYAKOV, Y. I.; MAIER, H. J.; TOMÉ, C. N. Modeling the deformation behavior of Hadfield steel single and polycrystals due to twinning and slip. *Acta Materialia*, v. 48, n. 9, p. 2031–2047, 2000.

KLEIN, Cornelis. *Minerals and rocks: exercises in crystallography, mineralogy, and hand specimen petrology*. Rev. ed. New York: Wiley, 1994, 405 p. Disponível em: Internet Archive – Minerals and rocks (1994).

LIGIER, Krzysztof; LEMECHA, Magdalena. Effect of abrasive particle shape on two-body abrasive wear of steel. *Tribologia*, n. 6, p. 21–27, 2020. DOI: 10.5604/01.3001.0014.8332.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. Introdução ao tratamento de minérios. In: Tratamento de minérios. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. Cap. 1, p. 3–23. Disponível em: <https://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2172>

LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M.; BRAGA, P. F. A. Cominuição: Britagem e moagem. In: Tratamento de minérios. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. Cap. 4.2, p. 135–183. Disponível em: <https://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2175>

MAGNOL, Renan Valter et al. Tribological behavior of jaspilite evaluated by micro-scratch test. In: 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2017). Curitiba, 2017.

MOURA, Geanso M. M. et al. Caracterização física, química e mineralógica do jaspilito de Carajás. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 16, n. 2, p. 157–162, 2019. DOI: 10.4322/2176-1523.20191675.

MICHALAKOPOULOS, T. N. et al. The influence of steel stylus hardness on the Cerchar Abrasivity Index value. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 43, n. 2, p. 321-327, 2006.

MÜNCH, Daiane. *Determinação da abrasividade de jaspilitos da Serra Sul - Província Mineral de Carajás*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

PINTAUDE, Giuseppe. Characteristics of Abrasive Particles and Their Implications on Wear. In: GHRIB, Taher Hcine (Ed.). *New Tribological Ways*. IntechOpen, 2011. DOI: 10.5772/14618.

PLINNINGER, R.; KÄSLING, H.; THURO, K.; SPAUN, G. Testing conditions and geomechanical properties influencing the CERCHAR abrasiveness index (CAI) value. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 40, n. 2, p. 259–263, 2003. DOI: 10.1016/S1365-1609(02)00140-5.

RHEINHEIMER, V.; LORENZI, A.; SOUZA, A. Propriedades e aplicações do aço H13: uma revisão. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 2022.

ROHDE, S. M. Tribology: A Challenges for the 80s. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1981.

SAMPAIO, J. A.; SILVA, F. T.; ALMEIDA, S. L. M. Tratamento de minérios de ferro. In: LUZ, A. B. et al. *Tratamento de Minérios*. 3. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2001.

SCHNEIDER, Claudio L.; MATIOLO, Elves; NEUMANN, Reiner; GOMES, Otávio F. M. Beneficiamento de minérios. In: MELFI, Adolpho José; MISI, Aroldo; CAMPOS, Diogenes de Almeida; CORDANI, Umberto Giuseppe (org.). *Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios*. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2016. p. 256-260.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. *Engineering Tribology*. 3. ed. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2011.

STACHOWIAK, Gwidon. Particle angularity and its relationship to abrasive and erosive wear. *Wear*, v. 241, p. 214–220, 2000. DOI: 10.1016/S0043-1648(00)00378-1.

STANFORD, M.; HAGAN, P. An Assessment of the Impact of Stylus Metallurgy on Cerchar Abrasiveness Index. In: *Coal 2009: Coal Operators' Conference*. Wollongong: University of Wollongong; Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2009. p. 348–355.

TREZONA, R. I.; ALLSOPP, D. N.; HUTCHINGS, I. M. Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test. *Wear*, v. 225–229, p. 205–214, 1999. DOI: 10.1016/S0043-1648(98)00358-5.

VALADÃO, G. E. S.; ARAUJO, A. C. *Introdução ao Tratamento de Minérios*. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

VARELA, Luís Bernardo; TRESSIA, G; MASOUMI, Mohammad; BORTOLETO, Eleir Mundim; REGATTIERI, Cintia; SINATORA, Amilton. Roller crushers in iron mining, how does the degradation of Hadfield steel components occur? *Engineering Failure Analysis*, v. 122, art. 105295, 2021. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105295.

VENTURELLI, B. N; TRESSIA, G.; ALBERTIN, E. Efeito da composição química na resistência ao desgaste do aço Hadfield. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 2022.

VENTURELLI, B. N.; ALBERTIN, E.; AZEVEDO, C. R. F. The effect of the austenite grain refinement on the tensile and impact properties of cast Hadfield steel. *Materials Research*, v. 21, n. 5, p. 1–8, 2018. DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2018-0069.

VIÁFARA ARANGO, Cristian Camilo; SINATORA, Amilton. Unlubricated sliding friction and wear of steels: An evaluation of the mechanism responsible for the T1 wear regime transition. *Wear*, v. 271, p. 1689–1700, 2011. DOI: 10.1016/j.wear.2010.12.085.

WEST, G. A note on the effect of testing speed in the Cerchar Abrasivity Test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1981.

WEST, G. Rock abrasiveness testing for tunnelling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, v.26(2), p.151–160, 1989.

WILLS, B. A.; FINCH, J. *Wills' Mineral Processing Technology*. 8. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016.

YARALI, O.; DURU, H. Investigation into effect of scratch length and surface condition on Cerchar abrasivity index. *Tunnelling and Underground Space Technology*, v. 60, p. 111–120, 2016. DOI: 10.1016/j.tust.2016.08.005.

ZHANG, G.; THURO, K.; SONG, Z.; DANG, W.; BAI, Q. Cerchar abrasivity test and its applications in rock engineering: A review. *International Journal of Coal Science & Technology*, v. 12, n. 1, art. 13, 2025. DOI: 10.1007/s40789-024-00731-8.

ZUM GAHR, K. H. *Microstructure and Wear of Materials*. Amsterdam: Elsevier, 1987.

ZUM GAHR, K.-H.; ELDIS, G. T. Abrasive wear of white cast irons. *Wear*, v. 64, p. 175–194, 1980. DOI: 10.1016/0043-1648(80)90101-5.