

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

RAFAELA DUELES CALONGE

Avaliação do efeito da severidade do desgaste abrasivo nos aços AISI H13 e AISI D2

BELO HORIZONTE

2022

RAFAELA DUELES CALONGE

AVALIAÇÃO DO EFEITO DO DESGASTE ABRASIVO NOS AÇOS AISI H13 E AISI D2

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Carlos Eduardo dos Santos

BELO HORIZONTE

2022

RAFAELA DUELES CALONGE

AVALIAÇÃO DO EFEITO DO DESGASTE ABRASIVO NOS AÇOS AISI H13 E AISI D2

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais

Aprovado em 06/12/2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Carlos Eduardo dos Santos – Orientador

Profa. Aline Silva Magalhães

Prof. Jose Jimmy Penagos

AGRADECIMENTOS

À Deus pelas bênçãos concedidas em minha vida.

Aos mestres da Engenharia de Materiais do CEFET-MG pela oportunidade e pelo aprendizado gerado, sobretudo ao professor Carlos Eduardo dos Santos pelo suporte, paciência e orientação.

Aos colegas do Instituto Tecnológico Vale pelo acolhimento e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho, sobretudo a Jose Jimmy Penagos pela disponibilidade, parceria e confiança.

Aos colegas de trabalho pelo conhecimento compartilhado durante a trajetória do estágio, sobretudo a Sergio Neri de Almeida, pela orientação e apoio durante a busca por oportunidades de me desenvolver cada vez mais dentro da Vale.

À minha família pelo apoio incondicional.

Agradeço também às amigadas de infância e ao meu noivo pelo carinho e pela união nos momentos difíceis.

RESUMO

Chutes de transferência são equipamentos comumente utilizados no transporte de materiais sólidos em uma planta industrial mineradora. A avaliação do desgaste abrasivo ocorrido em materiais presentes no revestimento desses instrumentos colabora para a diminuição de custos de operação e mitigação da perda de produção. Vários métodos podem ser utilizados para avaliação do desgaste abrasivo de um material. O objetivo do presente trabalho foi avaliar de forma comparativa o desgaste abrasivo dos aços AISI H13 e AISI D2 em laboratório, por meio do experimento conhecido como Roda de Borracha. A avaliação foi realizada por meio da perda de massa das amostras e cálculo do coeficiente de desgaste abrasivo k das mesmas. Foram realizadas também análises microscópicas e metalográficas dos materiais ensaiados. Os resultados obtidos mostraram que amostras de AISI H13 apresentaram maior perda de massa que as amostras de AISI D2. As análises das superfícies de desgaste evidenciaram maior recorrência de possíveis regiões de microsulcamento no AISI H13 e microcortes no AISI D2. Foi possível concluir que o AISI D2 apresenta maior resistência ao desgaste abrasivo que o AISI H13. A dureza, a composição química, o tamanho e morfologia dos carbonetos presentes na estrutura do AISI D2 podem ter colaborado para o resultado encontrado.

Palavras-chave: AISI H13. AISI D2. Roda de Borracha. Resistência ao Desgaste Abrasivo.

ABSTRACT

Transfer chutes are equipment commonly used in the transport of solid materials in an industrial mining plant. The evaluation of abrasive wear occurring in materials present in the coating of these instruments contributes to the reduction of operating costs and mitigation of loss of production. Several methods can be used to evaluate the abrasive wear of a material. The objective of this work was to comparatively evaluate the abrasive wear of AISI H13 and AISI D2 steels in the laboratory, through the experiment known as Rubber Wheel. The evaluation was carried out through the loss of mass of the samples and calculation of their coefficient of abrasive wear k . Microscopic and metallographic analyzes of the materials were also carried out. The results obtained showed that AISI H13 samples presented greater mass loss than AISI D2 samples. Analyzes of wear surfaces showed greater recurrence of possible microgrooving regions on AISI H13 and microcuts on AISI D2. It was possible to conclude that AISI D2 has greater resistance to abrasive wear than AISI H13. The hardness, chemical composition, size and morphology of the carbides present in the AISI D2 structure may have contributed to the result found.

Keywords: AISI H13. AISI D2. Rubber Wheel. Abrasive Wear Resistance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama típico do processamento de minério.	16
Figura 2 - Representação esquemática de um chute de transferência e suas repartições: (a) chute/parede dianteira, (b) chute de queda, (c) chute de carga e (d) zona de acomodação.	17
Figura 3 - Representação esquemática de diferentes mecanismos de desgaste: (a) abrasão, (b) adesão, (c) fadiga de superfície, (d) reação triboquímica.	20
Figura 4 - Representação esquemática de (a) superfície dura e áspera ou superfície com grãos abrasivos incrustados deslizando em uma superfície mais macia, e (b) grãos abrasivos livres confinados entre superfícies com pelo menos uma das superfícies mais macia do que os grãos abrasivos.	21
Figura 5 - Representação esquemática de sub mecanismos de desgaste abrasivo.	23
Figura 6 - Representação esquemática dos testes de desgaste abrasivo (a) pino sobre disco abrasivo, (b) pino em chapa abrasiva, (c) pino em tambor abrasivo, (d) teste de abrasão por roda de borracha e (e) teste de abrasão em microescala.	25
Figura 7 - Representação esquemática do equipamento para ensaio de desgaste abrasivo Roda de Borracha.	26
Figura 8 - Fluxograma com as etapas seguidas de acordo com a metodologia do trabalho.	28
Figura 9 - Fotografia dos corpos de prova de (a) aço AISI H13 e (b) aço AISI D2.	29
Figura 10 - a) Embalagem de Areia Normal Brasileira #50 e imagem dos grãos abrasivos no MEV com aumento de 30x; b) Embalagem de Areia Normal Brasileira #100 e imagem dos grãos abrasivos no MEV com aumento de 30x.	30
Figura 11 – Equipamento de abrasão por Roda de Borracha e ferramentas utilizadas para ajustes dos parâmetros.	32
Figura 12 - Aparato utilizado em laboratório para obtenção da densidade dos materiais analisados através do princípio de Arquimedes.	34
Figura 13 - Evolução da perda média de volume encontrada nos ensaios com carga 45N.	36
Figura 14 - Evolução da perda de volume em 10 minutos de ensaio considerando as cargas 45 e 130N.	37
Figura 15 - Evolução da perda de volume em 20 minutos de ensaio considerando a carga 45N.	38
Figura 16 - Evolução da perda de volume em 30 minutos de ensaio considerando a carga 45N.	39

Figura 17 - Imagens para análise metalográfica do AISI H13 (a) obtida experimentalmente e (b) encontrada na literatura.	40
Figura 18 - Imagens para análise metalográfica do AISI D2 (a) obtida experimentalmente e (b) encontrada na literatura.	40
Figura 19 - Imagem do AISI D2 após ensaio com carga 130N obtida pelo MEV evidenciando trilhas paralelas.	41
Figura 20 - Imagem do AISI D2 após ensaio com carga 130N obtida pelo MEV evidenciando regiões com microcortes.	41
Figura 21 - Imagem do AISI H13 após ensaio com carga 130N obtida pelo MEV evidenciando possíveis regiões de microsulcamento e incrustamento.	42
Figura 22 - Imagem do AISI H13 após ensaio com carga 130N obtida pelo MEV evidenciando possíveis regiões de microsulcamento.	42
Figura 23 - Imagem do AISI D2 após ensaio com carga 45N obtida pelo MEV evidenciando possíveis regiões de riscos.	43
Figura 24 - Imagem do AISI D2 após ensaio com carga 45N obtida pelo MEV evidenciando regiões em alto relevo.	44
Figura 25 - Imagem do AISI H13 após ensaio com carga 45N obtida pelo MEV evidenciando possíveis regiões de microsulcamento.	44
Figura 26 - Imagem do AISI H13 após ensaio com carga 45N obtida pelo MEV evidenciando possíveis regiões de incrustamento	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do AISI H13.	18
Tabela 2 - Composição química do AISI D2.	19
Tabela 3 - Ensaio e amostras utilizadas.	31
Tabela 4 - Parâmetros utilizados nos ensaios realizados em amostras AISI H13 e AISI D2 para 45N e 130N.	32
Tabela 5 - Perda média de volume e coeficiente de desgaste k médio calculado para cada material ensaiado com carga de 45N.	35
Tabela 6 - Perda de volume para cada material ensaiado com carga de 130N.	36

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AISI: American Iron and Steel Institute.

ASTM: American Society for Testing Materials.

CEFET-MG: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

DEMAT: Departamento de Engenharia de Materiais.

ITV: Instituto Tecnológico Vale.

MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura.

PIB: Produto Interno Bruto.

K: Coeficiente adimensional de desgaste abrasivo.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo geral	13
2.2 Objetivos específicos	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Indústria Extrativa Mineral	14
<i>3.1.1 Processamento do minério de ferro</i>	<i>14</i>
<i>3.1.2 Chutes de minérios</i>	<i>16</i>
3.2 Aços AISI H13 e AISI D2	18
<i>3.2.1 Aço AISI H13</i>	<i>18</i>
<i>3.2.2 Aço AISI D2</i>	<i>18</i>
3.3 Análise tribológica	19
<i>3.3.1 Mecanismos de desgaste</i>	<i>19</i>
<i>3.3.2 Desgaste abrasivo</i>	<i>20</i>
<i>3.3.3 Fatores que afetam a intensidade do desgaste</i>	<i>23</i>
3.4 Testes em laboratório para desgaste abrasivo	24
<i>3.4.1 Métodos utilizados para avaliação de desgaste abrasivo</i>	<i>24</i>
<i>3.4.2 Ensaio Roda de Borracha</i>	<i>25</i>
<i>3.4.3. Equação de Archard, segundo Rabinowicz</i>	<i>26</i>
4 METODOLOGIA	28
4.1 Fluxograma do método experimental	28
4.2 Materiais a serem utilizados	29
<i>4.1.1 Corpo de prova</i>	<i>29</i>
<i>4.1.2 Equipamentos</i>	<i>29</i>
<i>4.1.3 Abrasivo</i>	<i>30</i>
4.3 Procedimento experimental	31
<i>4.3.1 Preparo das amostras</i>	<i>31</i>
<i>4.3.2 Preparo do equipamento</i>	<i>31</i>
<i>4.3.3 Realização do experimento e das análises</i>	<i>33</i>
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1 Volume perdido nos ensaios de desgaste abrasivo	35
5.2 Evolução da perda de volume em gráficos	36
5.3 Análise dos constituintes - metalografia	39

5.4 Análise microscópica no MEV	41
6 CONCLUSÃO	47
7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	48
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	49

1 INTRODUÇÃO

Várias etapas gerais estão envolvidas no processamento do minério de ferro. Uma série de operações unitárias são realizadas como, por exemplo, as operações de cominuição, concentração e demais operações auxiliares, que consistem no transporte de sólidos, na estocagem, homogeneização em pilhas, armazenamento em silos e espessamento. Um exemplo de equipamentos muito utilizado no transporte de minério e insumos em uma planta industrial é o chute de minério, que deve ser projetado de forma correta a fim de evitar acúmulo de material em sua parede frontal, sendo peças importantes para evitar perda de produção.

O estudo da interação entre as superfícies de materiais pode ser realizado no intuito de minimizar ou eliminar perdas decorrentes de atrito e desgaste entre superfícies, proporcionando menos avarias, melhor desempenho e maiores ganhos econômicos. O mecanismo de desgaste por abrasão corresponde à remoção de material da superfície devido a ação de partículas duras, e também ocorre frequentemente em britadores, moinhos e bombas. Vários parâmetros tribológicos estão associados ao desgaste abrasivo e uma maneira de avaliá-lo é através de testes como o de abrasão por Roda de borracha, por exemplo. Muitos estudos vêm sendo realizados ultimamente no intuito de avaliar materiais que apresentem maior resistência ao desgaste abrasivo, e, conseqüentemente, maior vida útil. Os aços AISI H13 e AISI D2 são materiais aceitos em ensaios de desgaste e tipicamente utilizados como referência para avaliar a resistência ao desgaste de materiais empregados em revestimento de chutes. A adequada reprodução das condições de uso em campo desses materiais em menor escala possibilita a realização de análises importantes que são utilizadas como comparação efetiva de desempenho desses materiais quando aplicados em equipamentos envolvidos na indústria extrativa mineral.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar em laboratório o desgaste abrasivo dos aços AISI H13 e AISI D2, que apresentam matriz similar aos materiais utilizados em placas para revestimento de chutes de minério.

2.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar a perda de massa de material através do ensaio de desgaste abrasivo Roda de Borracha em amostras de aços AISI H13 e AISI D2 em condição de menor severidade com carga de 45N nos tempos de 10, 20 e 30 min utilizando areia IPT #100 como material abrasivo;
- b) Avaliar a perda de massa de material através de ensaio de desgaste abrasivo Roda de Borracha em amostras de aços AISI H13 e AISI D2 em condição padrão com carga de 130N e duração do ensaio de 10 minutos utilizando areia IPT #50 como material abrasivo;
- c) Estimar por meio da equação de Archard, segundo Rabinowicz, o coeficiente de desgaste abrasivo k para os materiais ensaiados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Indústria Extrativa Mineral

A mineração, em sua forma mais simples, surgiu na era paleolítica e pode ser considerada a segunda atividade industrial mais antiga da humanidade, ficando atrás apenas da agricultura. O grande avanço tecnológico dos últimos séculos está diretamente relacionado à dependência de recursos minerais. Com isso, houve evolução significativa na mecanização e automação das operações de lavra, permitindo assim, a evolução na capacidade produtiva desse insumo (CURI, 2014).

Há quatro etapas gerais que compõem a operação da mineração: prospecção, exploração, desenvolvimento e lavra. A prospecção corresponde à busca por massa de substância mineral com valor econômico. A exploração consiste na investigação geológica das ocorrências minerais. O desenvolvimento equivale às tarefas preparatórias para o uso da jazida mineral. Já a lavra, trata da utilização econômica da jazida (CURI, 2014). As atividades de lavra e beneficiamento do minério no Brasil apresentam uma participação no Produto Interno Bruto - PIB de 1,5%, excluindo petróleo e gás (LUZ e LINS, 2010).

3.1.1 Processamento do minério de ferro

O beneficiamento do minério depende do teor e das características do material que foi explorado. Minérios de alto teor de ferro podem passar apenas pelas operações de britagem e classificação por tamanho. Já aqueles que apresentam teor mais baixo, além dessas etapas básicas são submetidos também à moagem e outros procedimentos de concentração por métodos gravimétricos, como a separação magnética e a flotação, por exemplo (CURI, 2014). O processamento do minério de ferro é executado em uma série de operações unitárias que são realizadas a úmido, em sua maioria (LUZ e LINS, 2010). Trata-se das operações de cominuição, concentração e outras operações secundárias que são conhecidas como operações auxiliares (CHAVES, 2002).

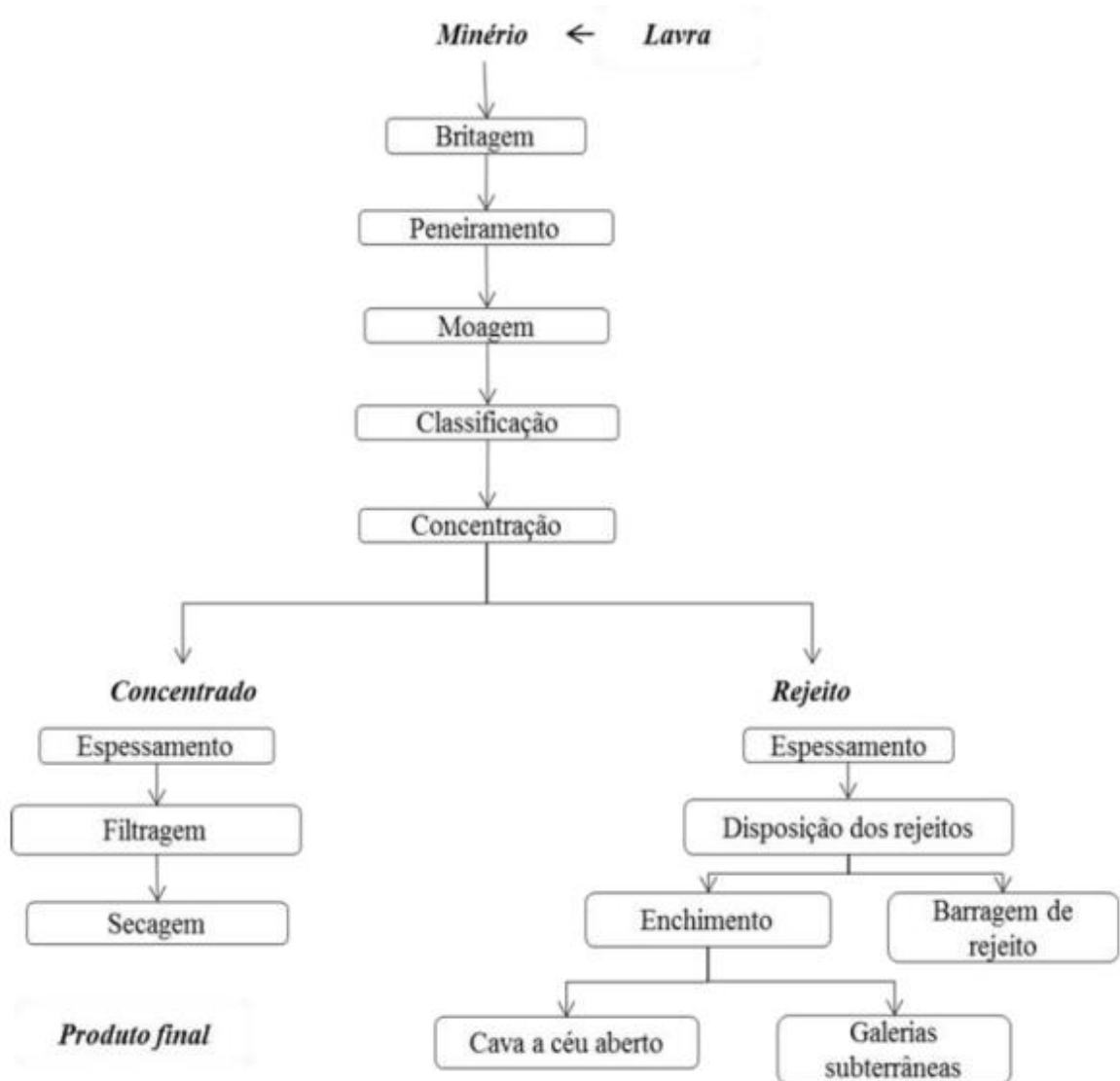
As operações de cominuição têm como objeto promover a fragmentação dos sólidos, de modo a adequar a dimensão das partículas através do uso de britadores e moinhos (CHAVES, 2002). Esses procedimentos envolvem mecanismos de impacto, compressão e cisalhamento dos

materiais submetidos ao processo. A britagem pode ocorrer em até quatro estágios: britagem primária, secundária, terciária e quaternária. Através do uso de britadores giratórios, de mandíbulas, cônicos, de rolos e de impacto (horizontal e vertical) é possível obter produtos com granulometria superior a 10 milímetros. Já a moagem, visa a obtenção de produtos com granulometria inferior a 10 milímetros, utilizando-se de equipamentos como moinhos tubulares rotativos (bolas e barras), moinhos vibratórios, moinhos de rolos e moinhos de impacto. Peneiras e classificadores também podem ser utilizados como ferramentas para categorização do material obtido. O peneiramento envolve mecanismos de estratificação e segregação, com o uso de equipamentos como peneiras vibratórias, rotativas e estáticas. O processo de classificação está atrelado a fenômenos da mecânica dos fluidos. Ele pode ocorrer através da hidroclassificação, com cones estáticos, hidrociclones, classificadores espirais e outros hidroclassificadores; e através da arosetração, com o uso de ciclones e arosetratadores dinâmicos (DUTRA, 2008).

As operações de concentração separam as partículas por espécies minerais e grau de pureza (CHAVES, 2002). Propriedades como o tamanho relativo das partículas, cor, densidade, solubilidade, molhabilidade superficial, condutividade elétrica e características magnéticas são utilizadas como referência para a seleção do material no intuito de recuperar o minério de interesse em sua maior concentração possível. Essa etapa pode ser constituída pelos processos de seleção, mecanismos de separação (gravimétrica, por meio denso, magnética e eletrostática), flotação, desaguamento, sedimentação, filtragem, centrifugação e, por fim, secagem (DUTRA, 2008).

Há também as operações auxiliares, que consistem no transporte de sólidos, na estocagem, homogeneização em pilhas, estocagem em silos e espessamento (CHAVES, 2002). A figura 1 apresenta esquematicamente as operações unitárias em um fluxograma do processamento de minérios, mostrando as etapas percorridas pelo minério desde sua extração na lavra até a obtenção de rejeito e material concentrado, que dará origem ao produto final. Os rejeitos produzidos com o processo de tratamento do minério podem ser dispostos em galerias subterrâneas, cavas de minas ou em barragens e devem ser qualificados mineralógica e quimicamente, no intuito de identificar contaminantes e seus efeitos ao meio ambiente (LUZ e LINS, 2010).

Figura 1 - Diagrama típico do processamento de minério.



Fonte: LUZ, SAMPAIO E FRANÇA, 2007.

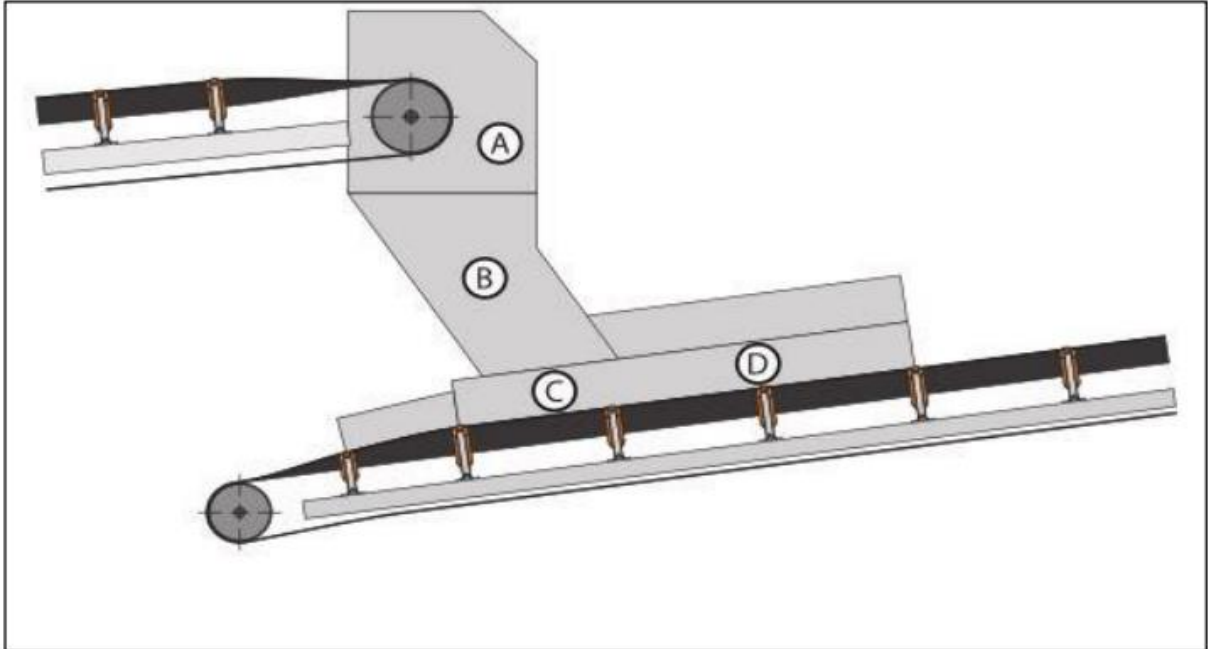
3.1.2 Chutes de minérios

Vários equipamentos são utilizados no transporte de minério e insumos em uma planta industrial, como por exemplo os chutes de minérios. Em sistemas de transporte por correia, os chutes de transferência promovem o deslocamento de materiais sólidos entre transportadores de correia, silos de carga e porões de navio (ILIC, 2019).

Chutes de alimentação são geralmente implantados ao final de uma correia. Chutes projetados de forma correta devem evitar acúmulo de material, principalmente em sua parede frontal,

sendo peças importantes para evitar perda de produção (MIRANDA, 2021). A figura 2 a seguir apresenta esquematicamente componentes de um chute de alimentação tradicional.

Figura 2 - Representação esquemática de um chute de transferência e suas repartições: (a) chute/parede dianteira, (b) chute de queda, (c) chute de carga e (d) zona de acomodação.



Fonte: MIRANDA, 2021.

A transferência eficaz de minério nas operações é de suma importância para a indústria, de modo que há necessidade de aumento da vida útil e redução dos custos de manutenção relacionados à diversos componentes envolvidos no processo. As propriedades do minério, os parâmetros operacionais e a seleção do material utilizado no revestimento são fatores relevantes e devem ser considerados. Determinadas condições de funcionamento operacional podem ocasionar zonas localizadas de alto desgaste, gerando a necessidade de paradas e inspeções regulares das condições dos revestimentos dos equipamentos (OU, 2022).

Dois mecanismos específicos de desgaste são predominantes em chutes de minério: impacto e abrasão. O desgaste por impacto ocorre quando o abrasivo, ao entrar em contato com os materiais que revestem as paredes do chute em velocidades altas, apresenta ângulos oblíquos a normais, ou seja, entre 0 e 90°. Geralmente, esse cenário ocasiona fratura localizada ou lascamento na superfície do revestimento, principalmente se tratar de materiais frágeis, como os cerâmicos. Já o desgaste abrasivo ocorre quando há fricção prolongada entre o abrasivo e a

superfície do material de revestimento, resultando em desgaste de menor magnitude se comparado com o desgaste por impacto (OU, 2022).

3.2 Aços AISI H13 e AISI D2

Os aços AISI H13 e AISI D2 são materiais aceitos em ensaios de desgaste e tipicamente utilizados como referência para avaliar a resistência ao desgaste de materiais empregados em revestimento de chutes.

3.2.1 Aço AISI H13

O aço AISI H13 é geralmente temperado e revenido antes de ser utilizado, apresentando em sua microestrutura matriz martensítica e precipitados de carboneto de endurecimento secundário (SUN, 2022). Além da resistência ao choque térmico e à fadiga térmica, essa liga metálica possui ótima tenacidade e é muito utilizado para trabalhos a quente, como por exemplo em matrizes de forjamento, extrusão e fundição sob pressão (CHADRA, 2022). A tabela 1 a seguir apresenta sua composição química típica.

Tabela 1 - Composição química do AISI H13.

Material	C	Mn	Si	Cr	Mo	V
AISI H13	0,40%	0,35%	1,00%	5,2%	1,50%	1,00%

Fonte: BAÇO, 2007 (adaptada).

3.2.2 Aço AISI D2

O aço AISI D2 é um aço híbrido que possui cromo e carbono em sua composição. Apresenta alta resistência ao desgaste devido a frações consistentes de carbonetos de cromo duros presentes nesse material. Além de exibir alta dureza e resistência ao impacto, esse material é capaz de manter suas propriedades mecânicas íntegras, sobretudo em temperaturas normais. As propriedades do material, morfologia de seus carbonetos e as partículas abrasivas presentes no sistema são fatores que podem influenciar o desgaste abrasivo em aços com microestrutura multifásica (ZEIDI, 2021). A combinação de boas propriedades e de custo relativamente baixo possibilitou o uso do AISI D2 por muitos anos em funcionalidades como matrizes de

conformação, por exemplo (SURBERG, 2008). A tabela 2 a seguir apresenta sua composição química típica.

Tabela 2 - Composição química do AISI D2.

Material	C	Mn	Si	Cr	Mo	V
AISI D2	1,40 a 1,60%	0,60%	0,60%	11,00 a 13,00%	0,70 a 1,20%	1,10%

Fonte: MEDANHA, 2008 (adaptada).

3.3 Análise tribológica

Segundo Jost (1995), o conhecimento científico acerca de situações que envolvem mecanismos de atrito, desgaste e lubrificação - mais conhecido como tribologia, foi criado em 1966 e possibilitou o estudo mais detalhado da superfície dos materiais.

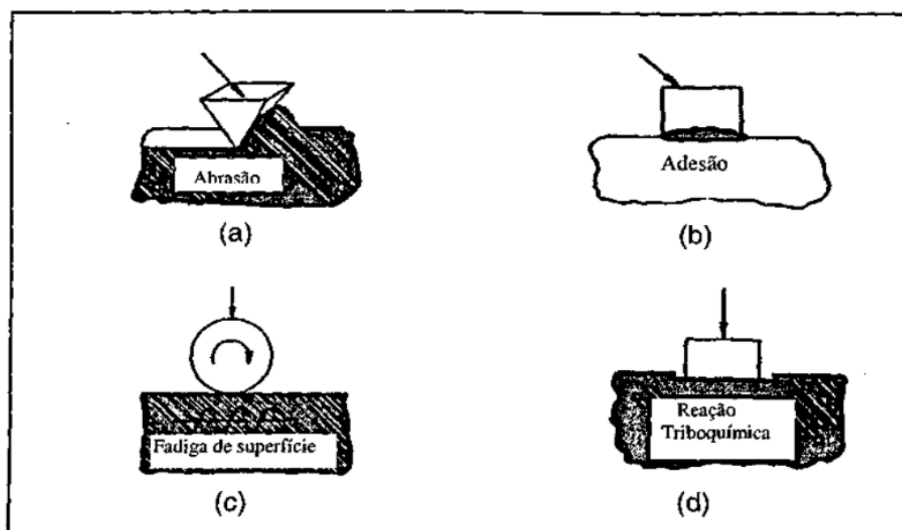
A tribologia, também conhecida como ciência do atrito, ou ciência da lubrificação, requer compreensão das interações entre superfícies, A complexidade de uma interface tribológica demanda conhecimento acerca de tópicos como física, química, matemática, mecânica dos sólidos, mecânica dos fluidos, termodinâmica, transferência de calor, ciência dos materiais, reologia. lubrificação, projeto de máquinas, desempenho e confiabilidade. O objetivo desse campo de estudo é minimizar ou eliminar as perdas decorrentes de atrito e desgaste entre superfícies, proporcionando menos avarias, melhor desempenho e maiores ganhos econômicos (BHUSHAN, 2013). Nesse contexto, a falha de uma estrutura pode ocorrer através de quatro mecanismos: deformação plástica, corrosão, desgaste e trincas.

3.3.1 Mecanismos de desgaste

Quando a superfície de um corpo se movimenta em relação a outro pode ocorrer perda gradual de material, ou seja, desgaste. Em um sistema tribológico, que geralmente é composto por corpo, contra corpo, elementos interfaciais e atmosfera (DIN 50320, 1970); considera-se que cerca de 50% do desgaste é abrasivo; 15% adesão; 8% reação triboquímica e 5% fadiga de contato (EYRE, 1981).

De acordo com Eyre (1981), o desgaste por abrasão corresponde à remoção de material da superfície devido a ação de partículas duras, e ocorre frequentemente em britadores, moinhos e bombas. Já o desgaste por adesão, acontece devido a altas pressões nas asperidades com o movimento, causando ruptura, e a formação de junções que leva à transferência de material. É frequente em eixos, bombas de engrenagem e mancais de bucha. No desgaste por reação triboquímica há contato deslizante, no qual os corpos reagem com o meio ambiente, resultando na remoção e formação contínua de camadas de reação. Pode ser identificada em feixes de molas e chapas rebitadas. Por fim, o desgaste por fadiga de contato (ou fadiga de superfície), é causado pelo carregamento superficial cíclico de rolamento e deslizamento, levando à formação e propagação de trincas. Ocorre em rolamentos, cilindros de laminação e rodas de vagões sobre trilhos. A figura 3 a seguir apresenta esquematicamente os mecanismos de desgaste citados anteriormente.

Figura 3 - Representação esquemática de diferentes mecanismos de desgaste: (a) abrasão, (b) adesão, (c) fadiga de superfície, (d) reação triboquímica.



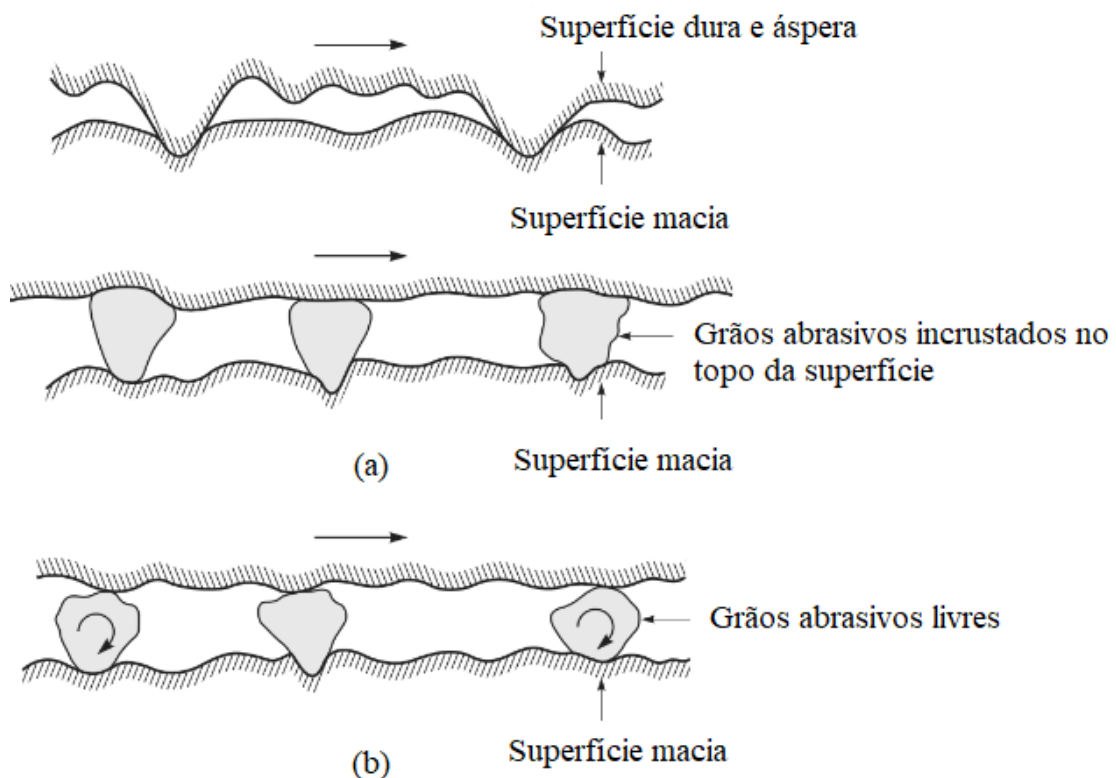
Fonte: ZUM GAHR, 1987.

3.3.2 Desgaste abrasivo

Na atividade mineradora os sistemas são mais agressivos e há grande ocorrência de desgaste abrasivo, principalmente em equipamentos que apresentam estruturas metálicas. O consumo desses componentes é considerável, levando a um gasto significativo. Por esse motivo, materiais com boa relação custo/benefício e elevada resistência ao desgaste abrasivo são bastante utilizados nas operações das minerações (MÁSCIA, 2002).

O desgaste abrasivo a dois corpos é assim classificado quando as asperidades duras se movimentam em relação à superfície a ser estudada. Já o desgaste abrasivo a três corpos ocorre quando há abrasivos livres entre duas superfícies. No último caso, se o diâmetro das partículas abrasivas for semelhante à distância entre as duas superfícies, podem ocorrer incrustações dessas partículas na superfície menos dura ou em defeitos superficiais, alterando assim para a configuração de desgaste abrasivo a dois corpos (MÁSCIA, 2002). Em materiais dúcteis com alta tenacidade à fratura, como metais por exemplo, o contato de suas asperezas provoca deformação plástica, mesmo quando submetido a cargas mais leves. Já em materiais frágeis com baixa tenacidade à fratura, como cerâmicas por exemplo, o desgaste ocorre por fratura frágil, provocando rachaduras significativas na zona desgastada (BHUSHAN, 2013). A figura 4 a seguir mostra o esquema de desgaste abrasivo a dois e a três corpos.

Figura 4 - Representação esquemática de (a) superfície dura e áspera ou superfície com grãos abrasivos incrustados deslizando em uma superfície mais macia, e (b) grãos abrasivos livres confinados entre superfícies com pelo menos uma das superfícies mais macia do que os grãos abrasivos.

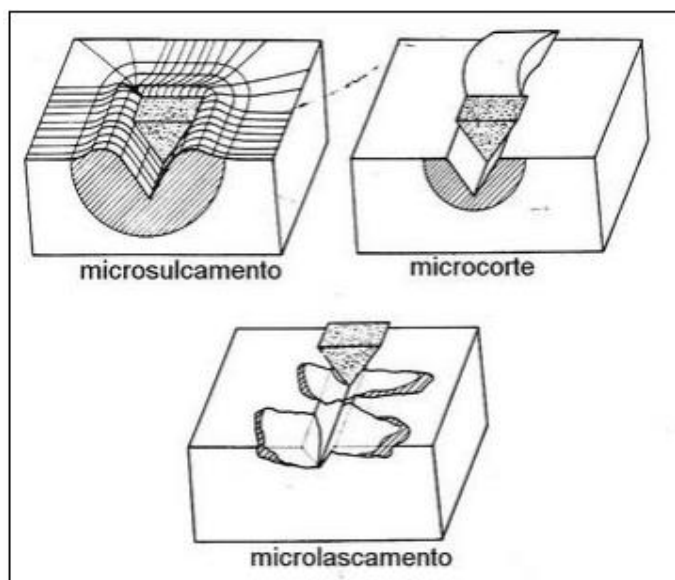


Segundo Jeff Gates (1997), estudos sugerem outra forma de classificação do desgaste abrasivo, de acordo com o nível de esforços no contato: baixos esforços, altos esforços e “gouging abrasion”. A distinção entra abrasão de alto e baixo esforços se encontra na fratura das partículas abrasivas durante a abrasão. Caso haja fratura, pode ocorrer a formação de arestas de corte afiadas, que geralmente proporcionam taxas de desgaste mais altas (altos esforços). O desgaste abrasivo classificado como “gouging abrasion” remete a situações com altas tensões e abrasivos grosseiros (rochas) que produzem deformações plásticas generalizadas nos materiais, provocando sulcos visíveis macroscopicamente.

Segundo Zum Gahr (1987), vários parâmetros tribológicos estão associados ao desgaste abrasivo. Em relação às características do projeto têm-se a transmissão de carga; o tipo de movimento; a forma das partes estruturais; o grau de lubrificação; a temperatura e a atmosfera. Já em relação às condições operacionais pode-se citar a área e a pressão de contato; o grau de lubrificação, a temperatura ambiente e a topografia de operação. No que diz respeito ao abrasivo, sua dureza, forma, tamanho, ductilidade e tenacidade à fratura são fortes influenciadores. Sobre as propriedades do material, deve-se levar em conta sua composição química, microestruturas, endurecimento superficial e revestimento.

Três sub mecanismos podem ocorrer no desgaste abrasivo: microsulcamento, microcorte e microlascamento (ZUM GAHR, 1987). A figura 5 a seguir representa esquematicamente os sub mecanismos de desgaste. Os dois primeiros prevalecem em materiais dúcteis. No microsulcamento as partículas duras promovem deformação plástica e acúmulo de material nas laterais do sulco. Sucessivas deformações resultam no surgimento de trincas ou de laminações, sucedendo assim microfragmentos de desgaste. Quando há aumento da dureza do material ou da força normal que atua na partícula dura há ocorrência do microcorte, que provoca a formação de microcavacos. O microlascamento, também conhecido como microtrincamento, ocorre com altas concentrações de tensões em materiais frágeis, acima da carga crítica, de forma que a propagação de trincas faz com que grandes fragmentos sejam desprendidos (MÁSCIA, 2002).

Figura 5 - Representação esquemática de sub mecanismos de desgaste abrasivo.



Fonte: MALHEIROS, 2013.

3.3.3 Fatores que afetam a intensidade do desgaste

Vários aspectos podem influenciar o desgaste abrasivo. O tamanho, a forma e a dureza do abrasivo são fatores importantes, bem como a dureza e microestrutura do material que sofre o desgaste e as demais condições do sistema, como carga, temperatura, entre outros. A taxa de desgaste abrasivo geralmente se apresenta de forma inversamente proporcional à dureza da superfície. O abrasivo deve ser sempre mais duro que o material analisado. Caso a dureza do material avaliado seja de mesma magnitude que a dureza do abrasivo não há incrustamentos por completo, sendo assim, pode ocorrer deformação plástica e, portanto, desgaste abrasivo em ambos os corpos. O aço é o material de engenharia mais utilizado em análises de desgaste abrasivo, apresentando dureza na faixa de 200 a 1000 kg/mm². Já o abrasivo mais habitual é a areia, que apresenta dureza em torno de 750 kg/mm². Ao realizar processo de endentação para aferição da dureza dos aços pode ser observado o seguinte comportamento do material: em metais recozidos há formação de acúmulo de material acima da superfície original, distantes da endentação. Já em materiais de elevada dureza, pode ser observado a formação de colinas bem próximas da endentação. Isso significa aumento do volume perdido em materiais de alta dureza se comparados com materiais recozidos (RABINOWICZ, 1995).

O tamanho das partículas do abrasivo também pode influenciar a taxa de desgaste. Partículas menores podem sofrer maior endentação e, por isso, ao aderirem ao material, previnem o

contato de outras partículas abrasivas, culminando em redução da intensidade do desgaste (RABINOWICZ, 1995).

A umidade do ar também pode afetar a taxa de desgaste. Ensaios em laboratório realizados no verão, época a qual a umidade relativa do ar costuma ser mais intensa, apresentaram taxas de desgaste aproximadamente 15% maiores do que nos ensaios realizados no inverno, considerando as mesmas condições. Ou seja, o controle da umidade no ambiente onde ocorrem os experimentos para análise de desgaste de materiais é fundamental para garantir a reprodutibilidade dos testes (RABINOWICZ, 1995).

3.4 Testes em laboratório para desgaste abrasivo

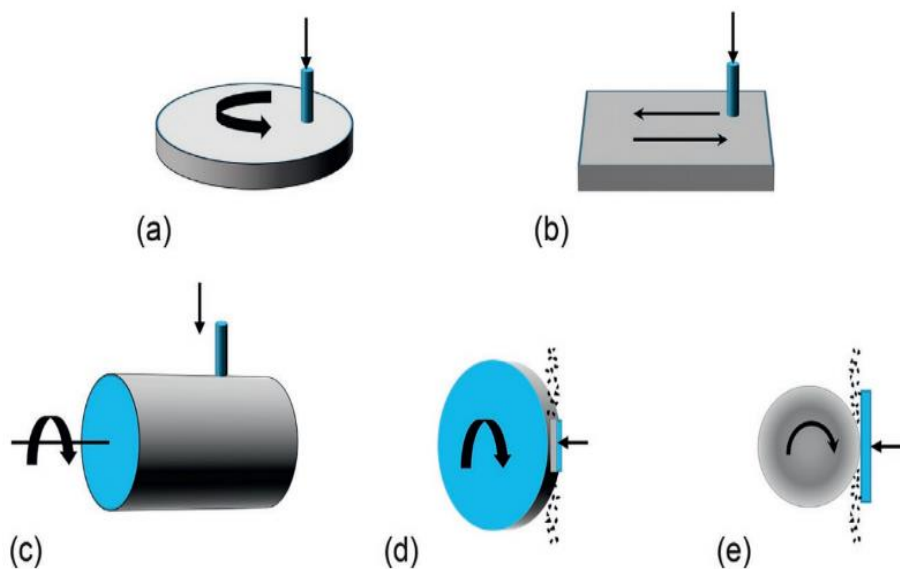
3.4.1 Métodos utilizados para avaliação de desgaste abrasivo

Uma das maneiras de avaliar o desgaste abrasivo em materiais é através do ensaio pino sobre disco, no qual um pino desliza sobre um corpo de prova em formato de disco, resultando em desgaste abrasivo de dois corpos. Há opção de alimentar continuamente partículas abrasivas entre as superfícies, resultando em desgaste abrasivo de três corpos. A taxa de desgaste pode variar de acordo com o número de repetições devido a uma série de fatores. Na geometria pino sobre disco, o pino descreve uma trilha em espiral de acordo com o movimento radial do disco. Há geometrias alternativas nas quais o pino desliza linearmente em uma folha de papel abrasivo ou se posiciona paralelo ao eixo de um cilindro giratório com partículas abrasivas (HUTCHING, 2017).

Outros métodos podem ser utilizados para avaliar o desgaste abrasivo, tais como pino em chapa abrasiva, pino em tambor abrasivo, roda de borracha e abrasão em microescala, conforme figura 6. No ensaio pino em chapa abrasiva ocorre um riscamento na superfície da chapa. No teste pino em tambor abrasivo, geralmente utilizado para avaliar desgaste em geometrias cilíndricas, ocorre a formação de trilha de desgaste ao longo da circunferência do corpo de prova. No ensaio conhecido como roda de borracha o corpo de prova pode ter o formato de placa ou bloco e é pressionado contra a superfície de uma roda, enquanto partículas abrasivas são despejadas no sistema. Já no teste de abrasão em microescala, também conhecido como desgaste de calota, a amostra é pressionada contra uma esfera de aço enquanto partículas abrasivas são gotejadas em pasta concentrada. Este método é adequado para medir taxas de desgaste de revestimentos finos

(HUTCHING, 2017). A figura 6 a seguir mostra uma representação esquemática dos cinco métodos mais utilizados para avaliar a taxa de desgaste abrasivo de materiais.

Figura 6 - Representação esquemática dos testes de desgaste abrasivo (a) pino sobre disco abrasivo, (b) pino em chapa abrasiva, (c) pino em tambor abrasivo, (d) teste de abrasão por roda de borracha e (e) teste de abrasão em microescala.

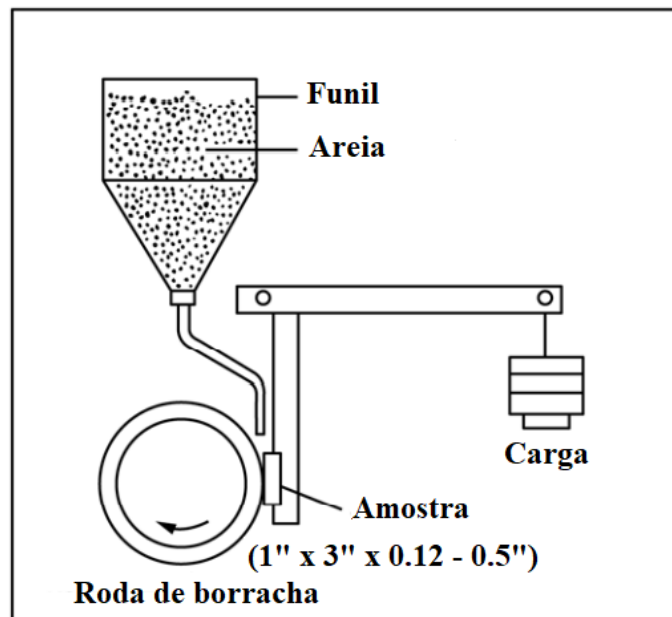


Fonte: HUTCHING, 2017.

3.4.2 Ensaio Roda de Borracha

O experimento conhecido como Roda de Borracha deve ser feito em materiais de tamanho e composição conhecidos. A roda de borracha utilizada deve ser de clorobutila ou neopreme, com dureza e diâmetro específicos. O abrasivo utilizado deve ter tamanho e composição controlados. A disposição do equipamento é estabelecida de modo a garantir que a amostra seja pressionada contra a roda de borracha em ponto aproximadamente tangente ao diâmetro horizontal da mesma. A pressão é aplicada através da força exercida pelo braço de alavanca. Enquanto isso, o abrasivo é despejado com vazão controlada entre a superfície da amostra e da roda (ASTM, G65-16). A figura 6 a seguir representa esquematicamente a disposição do equipamento e seu funcionamento. Os materiais submetidos ao experimento devem ser pesados antes e depois do ensaio.

Figura 7 - Representação esquemática do equipamento para ensaio de desgaste abrasivo Roda de Borracha.



Fonte: Norma ASTM G65-16 (adaptado).

A resistência ao desgaste abrasivo obtida deve ser apresentada pelo volume perdido do material ensaiado, em mm^3 . Dessa forma, considerando as diferentes densidades de cada material, é possível garantir um resultado confiável. O cálculo utilizado para demonstração dos resultados deve ser realizado de acordo com a equação 1 a seguir, que representa a conversão de massa perdida para volume perdido dos corpos de prova ensaiados (ASTM, G65-16).

$$\text{Volume perdido, cm}^3 = \frac{\text{massa perdida (g)}}{\text{densidade (g/cm}^3)} \times 1000 \quad (1)$$

Quanto menor a perda volumétrica maior é a resistência ao desgaste abrasivo de determinado material.

3.4.3. Equação de Archard, segundo Rabinowicz

Uma maneira de obter a taxa de desgaste gerada pelas partículas abrasivas atuantes em testes de desgaste abrasivo, conforme os citados acima, é através da equação de Archard a seguir. Na equação 2, o k , também conhecido como coeficiente de desgaste, mede a severidade do desgaste e é diretamente proporcional à taxa de desgaste; O V faz referência ao volume de material

removido (mm^3); F faz referência à força normal total empregada no sistema e Δl corresponde à distância deslizada no material desgastado (RABINOWICZ, 1995).

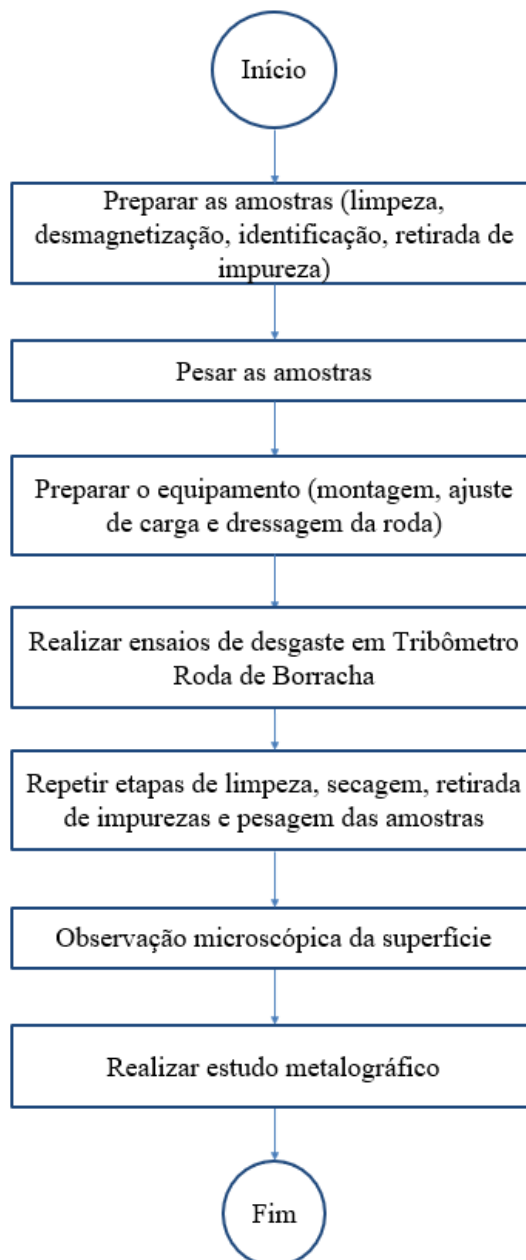
$$k = \frac{V}{F \cdot \Delta l} \quad (2)$$

4 METODOLOGIA

4.1 Fluxograma do método experimental

O método experimental realizado nesse trabalho está representado esquematicamente na figura 8 a seguir.

Figura 8 - Fluxograma com as etapas seguidas de acordo com a metodologia do trabalho.



4.2 Materiais a serem utilizados

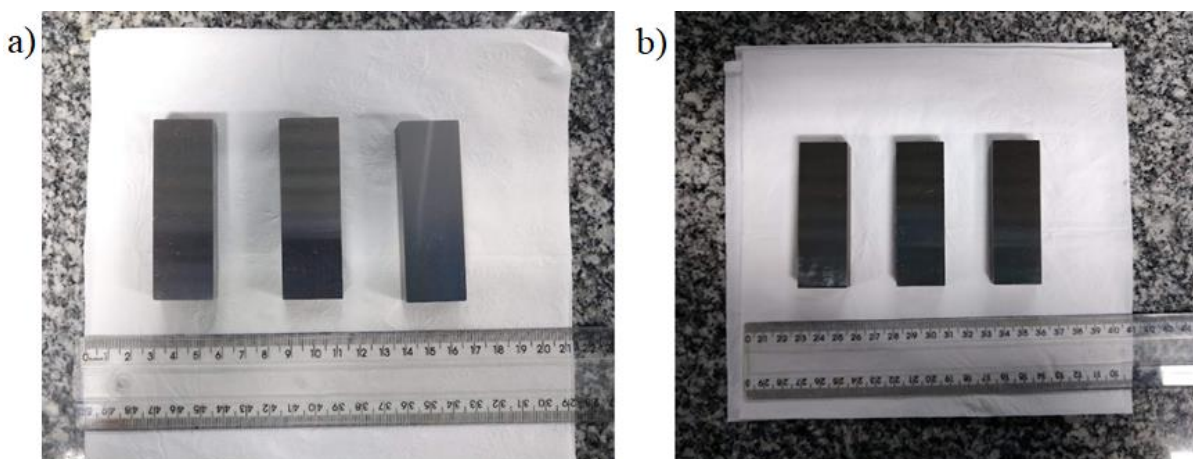
4.1.1 Corpo de prova

Os materiais utilizados como objeto de estudo nesse trabalho são:

- a) Aço martensítico temperado AISI H13;
- b) Aço martensítico temperado AISI D2;

Os corpos de prova foram disponibilizados nas dimensões 76mm x 25mm x 11mm. A figura 9 a seguir representa as amostras utilizadas no presente trabalho.

Figura 9 - Fotografia dos corpos de prova de (a) aço AISI H13 e (b) aço AISI D2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2 Equipamentos

Os seguintes equipamentos foram utilizados nesse projeto:

- a) Equipamento para ensaio abrasivo por Roda de Borracha disponível no Instituto Tecnológico Vale (ITV), em Ouro Preto, MG;
- b) Balança de precisão Shimadzu modelo UX620H;
- c) Lavadora ultrassônica Eco-Sonics 3,8L;
- d) Desmagnetizador portátil;
- e) Durômetro Mitutoyo Hardmatic HH-300 series;
- f) Dinamômetro Crown DBC Oswaldo Filizola;

- g) Cortadora metalográfica CM 80 com disco de corte Fortel III;
- h) Embutidora à quente Arotec Pre30mi;
- i) Politriz metalográfica Arotec;
- j) Lixas numeração 240, 320, 400, 600, 9 μ , 3 μ e 1 μ ;
- k) Microscópio óptico Kontrol;
- l) Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) Shimadzu SSX 550.

4.1.3 Abrasivo

Para a carga de 45N foi utilizada Areia Normal Brasileira de quartzo grão arredondado fina #100 com granulometria na faixa de 0,15 a 0,3 mm. Para carga de 130N foi utilizada areia semelhante, média fina, #50, com granulometria na faixa de 0,3 a 0,6 mm. A figura 10 a seguir mostra as embalagens e imagens microscópicas desses materiais.

Figura 10 - a) Embalagem de Areia Normal Brasileira #50 e imagem dos grãos abrasivos no MEV com aumento de 30x; b) Embalagem de Areia Normal Brasileira #100 e imagem dos grãos abrasivos no MEV com aumento de 30x.



Fonte: PENAGOS, 2016 (adaptado).

4.3 Procedimento experimental

Os ensaios descritos nesse trabalho foram realizados no ITV, localizado em Ouro Preto. O Instituto forneceu os materiais e abrasivo utilizados, bem como a estrutura necessária de seus laboratórios. O estudo metalográfico e a análise da superfície por meio do uso do Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV foram realizados no Departamento de Engenharia de Materiais - DEMAT, no CEFET-MG.

4.3.1 Preparo das amostras

As amostras foram disponibilizadas já cortadas nas dimensões previstas pelo processo de eletroerosão à fio. Em seguida, foram limpas com água e sabão, secas, desmagnetizadas, identificadas e permaneceram por 10 minutos no ultrassom, imersos em álcool, para evitar a presença de impurezas. Após serem pesadas, três vezes cada uma, as amostras estavam prontas para serem utilizadas no ensaio de Roda de Borracha. A tabela 1 a seguir mostra os 24 ensaios realizados.

Tabela 3 - Ensaio e amostras utilizadas.

Material	Quantidade de ensaios	Carga aplicada (N)	Tempo de ensaio (min)
AISI H13	3	45	10
AISI H13	3	45	20
AISI H13	3	45	30
AISI H13	3	130	10
AISI D2	3	45	10
AISI D2	3	45	20
AISI D2	3	45	30
AISI D2	3	130	10

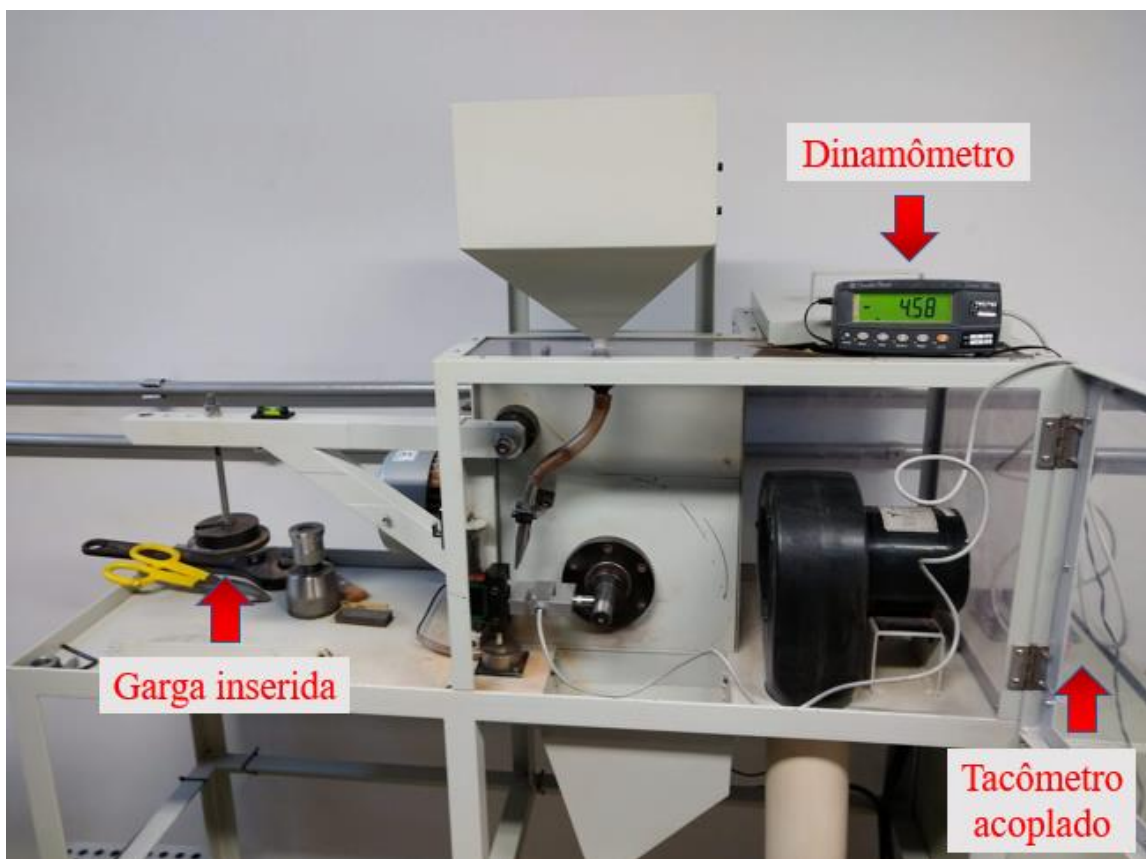
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2 Preparo do equipamento

Em relação ao equipamento, inicialmente foi medida a dureza Shore da borracha empregada no experimento com durômetro HH-300. Após a montagem do equipamento, conforme Figura 11

a seguir, a carga foi inserida e ajustada com o auxílio de uma célula de carga (dinamômetro) para conferência. A rotatividade da roda ajustada em 200 rpm através do uso de um tacômetro acoplado ao equipamento. Em seguida foi realizada a dressagem, procedimento que tem o objetivo de regularizar a superfície da borracha, com lixa #200 e, posteriormente, #400. A tabela 4 a seguir mostra esquematicamente os parâmetros utilizados nos ensaios realizados com 45N e 130N, respectivamente.

Figura 11 – Equipamento de abrasão por Roda de Borracha e ferramentas utilizadas para ajustes dos parâmetros.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 - Parâmetros utilizados nos ensaios realizados em amostras AISI H13 e AISI D2 para 45N e 130N.

Parâmetros	45 N	130 N
Rotação	200 rpm	200 rpm
Duração do teste	10, 20 e 30 min	10 min
Abrasivo	Areia fina #100	Areia média fina #50

Fonte: Elaborado pelo autor.

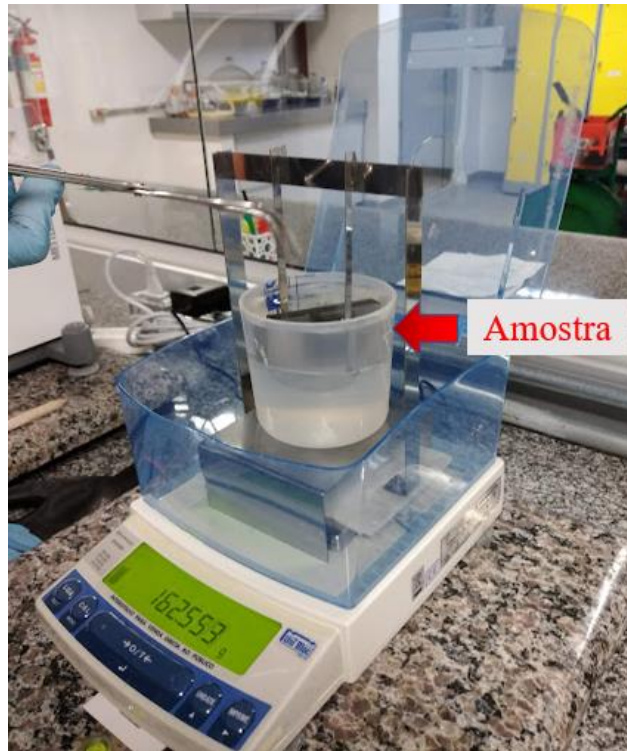
4.3.3 Realização do experimento e das análises

No intuito de medir o desgaste abrasivo a três corpos, foi realizado ensaio de abrasão por Roda de Borracha de acordo com a norma ASTM G65 – 16, seguindo os parâmetros e condições previstas. Inicialmente foram realizados ensaios com cargas de 45N e areia #100, durante os tempos de 10, 20 e 30 minutos. Também foram realizados ensaios com a carga de 130N e areia #50, com duração de 10 minutos. Tanto o aço AISI H13 quanto o Aço AISI D2 foram submetidos aos ensaios sob as duas configurações descritas.

Após a realização dos experimentos, foram repetidos os procedimentos de limpeza das amostras e as mesmas foram pesadas, para mensurar a perda de massa. A avaliação da perda de massa e volume foi realizada em triplicata. Sendo assim, foram considerados valores médios nos cálculos realizados. Os resultados obtidos foram compilados e a partir deles foi calculado o coeficiente de desgaste abrasivo de acordo com a equação de Archard, segundo Rabinowicz. Os ensaios com a configuração de carga 130N foram realizados apenas para o tempo de 10 minutos.

Foi realizada análise por imagem da superfície de desgaste através do MEV, disponível no Laboratório de Caracterização do DEMAT, localizado no CEFET-MG campus Nova Suíça. Em paralelo, foi elaborada a caracterização dos materiais utilizados no experimento por meio de estudo metalográfico. A densidade dos materiais analisados foi obtida de acordo com o Princípio de Arquimedes, através do uso de aparato em laboratório localizado no ITV, como pode ser observado na figura 12 a seguir. Para o estudo metalográfico, as amostras foram preparadas seguindo as etapas de seccionamento, embutimento, lixamento e polimento. Para melhor obtenção das imagens metalográficas foi realizado ataque químico e secagem em pequena fração retirada das amostras de cada material analisado. Ambas microestruturas foram reveladas com o reagente químico Nital 5%. O aço AISI D2 foi revelado durante 45 segundos e o aço AISI H13 durante 30 segundos. Por fim, os resultados obtidos foram discutidos de acordo com as referências encontradas na literatura.

Figura 12 - Aparato utilizado em laboratório para obtenção da densidade dos materiais analisados através do princípio de Arquimedes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Volume perdido nos ensaios de desgaste abrasivo

A aferição da dureza média da borracha empregada no experimento foi de $59,35 \pm 4,46$ Shore. A tabela 5 a seguir apresenta os valores referentes à perda de volume, bem como o coeficiente de desgaste abrasivo k médio calculado para as amostras ensaiadas com carga de 45N.

Tabela 5 - Perda média de volume e coeficiente de desgaste k médio calculado para cada material ensaiado com carga de 45N.

Material	Dureza HV30 (kgf/mm ²)	Densidade ρ (g/cm ³)	Perda de volume (mm ³) em 10 min	Perda de volume (mm ³) em 20 min	Perda de volume (mm ³) em 30 min	k médio (mm ² /N)
AISI H13	478 ± 11	7,65	$21,99 \pm 3,14$	$36,56 \pm 3,28$	$52,33 \pm 5,16$	$2,93 \times 10^{-7} \pm 3,89 \times 10^{-8}$
AISI D2	669 ± 18	7,69	$3,97 \pm 0,83$	$8,12 \pm 1,65$	$11,93 \pm 2,41$	$6,39 \times 10^{-8} \pm 7,83 \times 10^{-10}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos resultados exibidos na tabela 5 foi possível perceber que a perda de volume para o material AISI H13 foi pelo menos 4,5 vezes maior que a perda encontrada para o AISI D2, sendo que a perda de volume do AISI H13 no tempo de 20 minutos foi de $36,56 \pm 3,28$ mm³, enquanto que a perda do AISI D2 na mesma condição foi de $8,12 \pm 1,65$ mm³. Também é possível observar uma evolução gradual da perda de volume dos materiais ensaiados conforme aumento do tempo de duração dos ensaios, como por exemplo para o AISI H13 no qual a perda volumétrica aumentou de $21,99 \pm 3,14$ mm³ no tempo de 10 minutos para $36,56 \pm 3,28$ mm³ no tempo de 20 min. A tabela 6 a seguir apresenta os valores referentes às perdas de volume das amostras ensaiadas com carga de 130N por 10 minutos.

Tabela 6 - Perda de volume para cada material ensaiado com carga de 130N.

Material	Dureza HV30kg	Densidade ρ (g/cm ³)	Perda de volume (mm ³) em 10 min	k (mm ² /N)
AISI H13	478 ± 11	7,65	177,15 ± 19,76	9,85 x 10 ⁻⁷
AISI D2	669 ± 18	7,69	40,37 ± 6,34	2,25 x 10 ⁻⁷

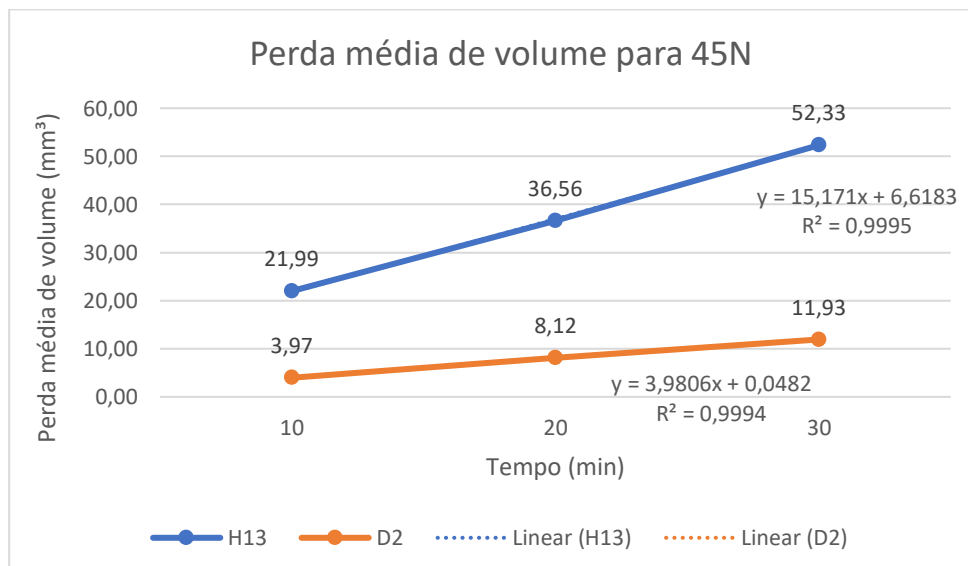
Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao comparar os resultados exibidos nas tabelas 5 com a tabela 6, foi possível perceber que a perda de massa para o material AISI H13 na carga de 130N em 10 minutos foi 8 vezes maior que a perda encontrada na carga de 45N no mesmo tempo para o mesmo material, aumentando de $21,99 \pm 3,14$ mm³ perdidos para $177,15 \pm 19,76$ mm³ perdidos, mostrando a influência da maior carga na severidade do desgaste. A diferença é ainda maior com o material AISI D2, de modo que a perda volumétrica na carga de 130N foi 10 vezes maior que a perda encontrada na carga de 45N, aumentando de $3,97 \pm 0,83$ mm³ perdidos para $40,37 \pm 6,34$ mm³ perdidos.

5.2 Evolução da perda de volume em gráficos

A figura 13 a seguir apresenta a evolução da perda média de volume encontrada nos ensaios com carga 45N, para o AISI H13 e AISI D2.

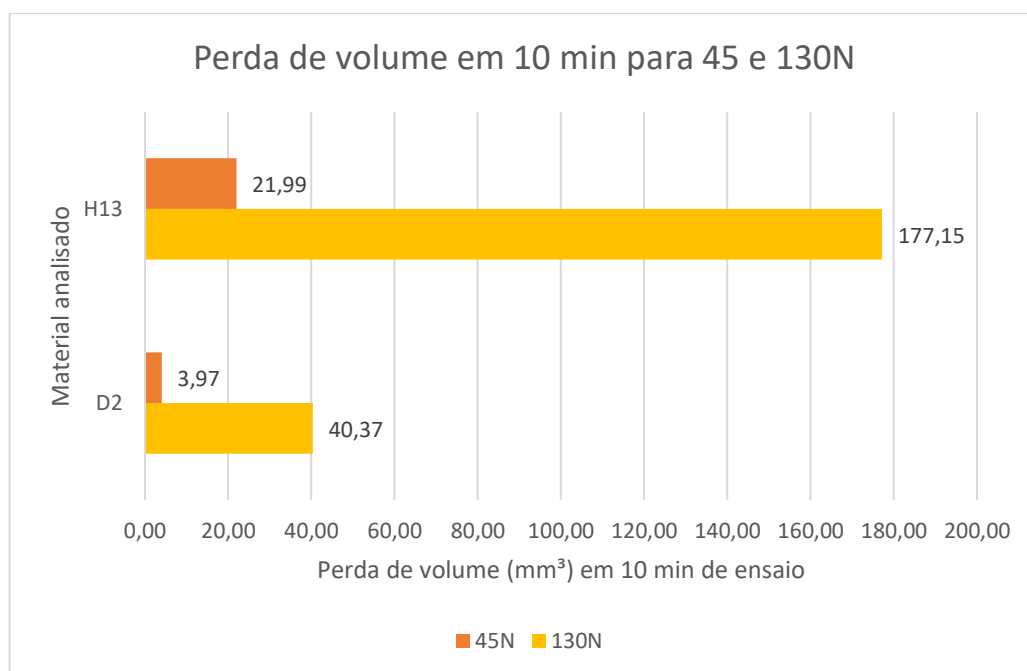
Figura 13 - Evolução da perda média de volume encontrada nos ensaios com carga 45N.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados relatados no gráfico evidenciam a relação de linearidade da perda média de volume em função do tempo para ambos os materiais, apresentando em ambas as retas a correlação R^2 de 0,99. A inclinação da reta referente ao AISI H13 (que apresenta coeficiente angular de valor 15, aproximadamente) é 3,7 vezes maior que a inclinação da reta do AISI D2 (que apresenta coeficiente angular de aproximadamente 4), demonstrando que houve maior perda de volume no AISI H13, como esperado, uma vez que este apresenta dureza menor que o AISI D2. A figura 14 a seguir apresenta esquematicamente a evolução da perda de volume em 10 minutos de ensaio para AISI H13 e AISI D2 para as cargas 45 e 130N.

Figura 14 - Evolução da perda de volume em 10 minutos de ensaio considerando as cargas 45 e 130N.

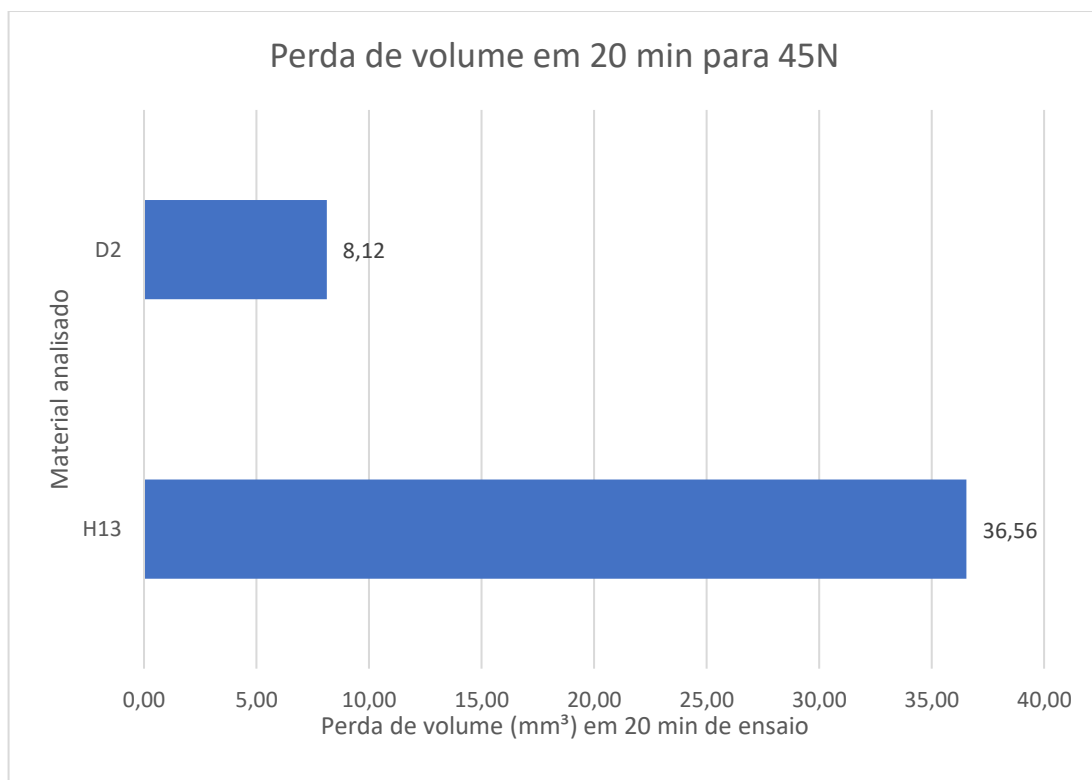


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados relatados mostram a influência da severidade do desgaste em cada material analisado, considerando duração de ensaio por 10 minutos. O AISI H13 apresentou perda volumétrica de 22,99 mm³ para carga 45N e 177,15 mm³ para carga 130N. Ou seja, a perda volumétrica na carga 130N foi 8 vezes maior que na carga 45N. O AISI D2 apresentou diferença ainda maior, sendo que houve perda de volume de 3,97 mm³ para carga 45N e 40,37 mm³ para carga 130N. Ou seja, a perda volumétrica foi 10 vezes maior na condição de maior severidade para esse material.

O gráfico apresentado na figura 14 também permite analisar a diferença do comportamento dos materiais para uma mesma carga no tempo de 10 minutos. Considerando a carga 45N, o AISI H13 apresentou perda volumétrica de 22,99 mm³, enquanto o AISI D2 apresentou apenas 3,97 mm³ de perda, ou seja, o AISI D2 apresentou perda 5,5 vezes menor. Ao considerar a carga 130N, o AISI H13 apresentou perda volumétrica de 177,15 mm³, enquanto o AISI D2 apresentou apenas 40,37 mm³ de perda, ou seja, o AISI D2 apresentou perda 4,4 vezes menor. A figura 15 a seguir apresenta esquematicamente a evolução da perda de volume em 20 minutos de ensaio para AISI H13 e AISI D2 considerando a carga 45N.

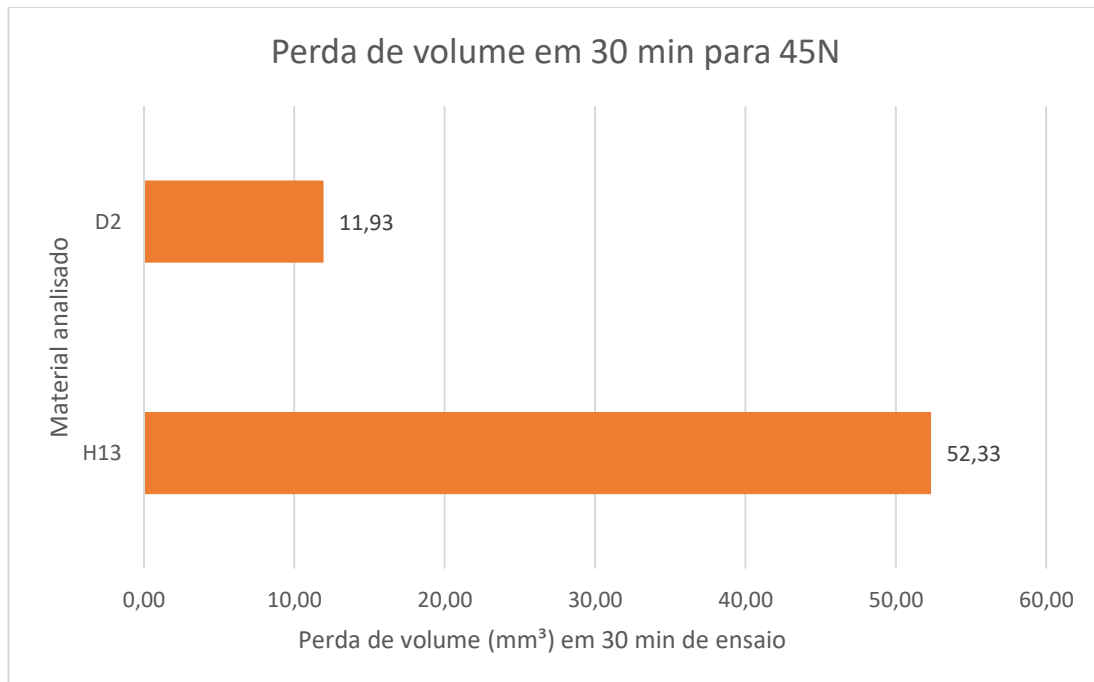
Figura 15 - Evolução da perda de volume em 20 minutos de ensaio considerando a carga 45N.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico apresentado na figura 15 permite analisar a diferença do comportamento dos materiais para a carga 45N no tempo de 20 minutos. O AISI H13 apresentou perda volumétrica de 36,56 mm³, enquanto o AISI D2 apresentou apenas 8,12 mm³ de perda, ou seja, o AISI D2 apresentou perda 4,5 vezes menor. A figura 16 a seguir apresenta esquematicamente a evolução da perda de volume em 30 minutos de ensaio para AISI H13 e AISI D2 considerando a carga 45N.

Figura 16 - Evolução da perda de volume em 30 minutos de ensaio considerando a carga 45N.



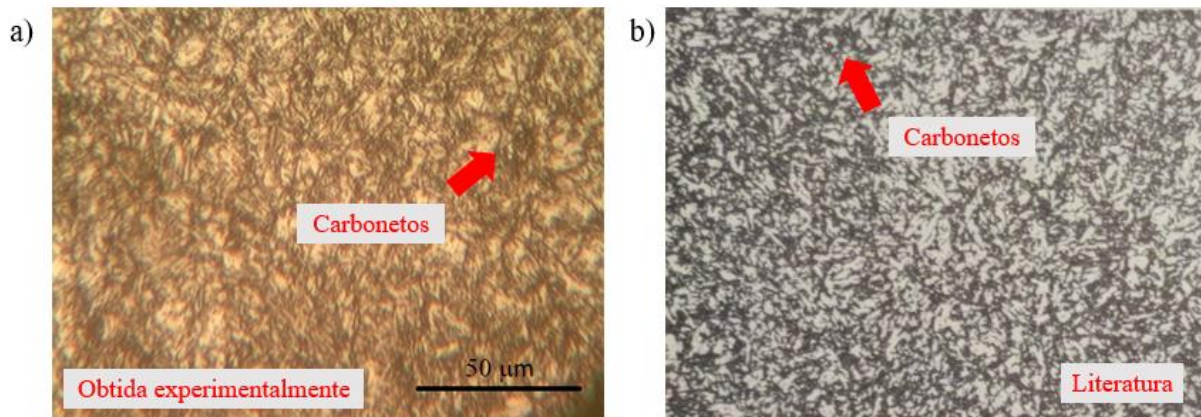
Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico apresentado na figura 16 permite analisar a diferença do comportamento dos materiais para a carga 45N no tempo de 30 minutos. O AISI H13 apresentou perda volumétrica de 52,33 mm³, enquanto o AISI D2 apresentou apenas 11,93 mm³ de perda, ou seja, o AISI D2 apresentou perda 4,4 vezes menor.

5.3 Análise dos constituintes - metalografia

A figura 17 a seguir mostra imagem obtida em microscópio para análise metalográfica do AISI H13 com aumento de 800x, ao lado a imagem de comparação encontrada na literatura do AISI H13 com aumento de 500x, após ataque com Nital 5% e 2%, respectivamente.

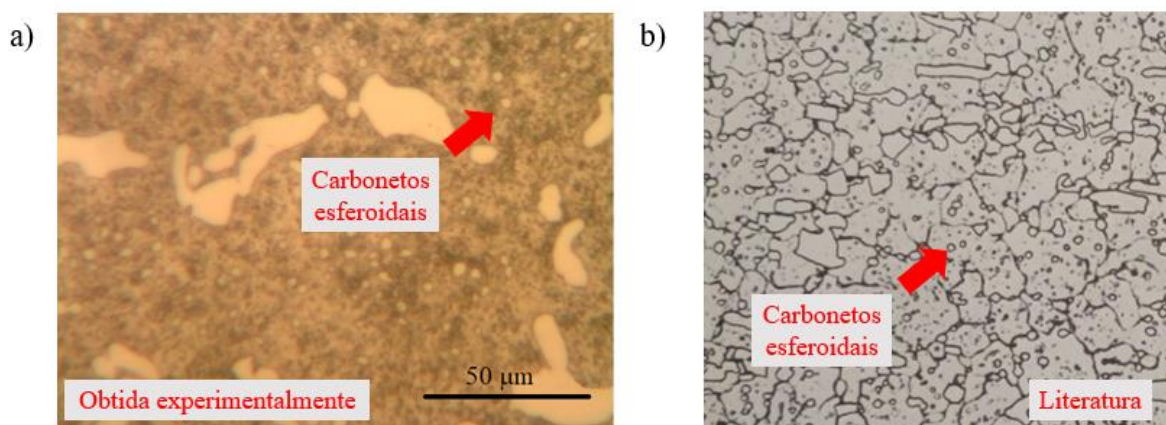
Figura 17 - Imagens para análise metalográfica do AISI H13 (a) obtida experimentalmente e (b) encontrada na literatura.



Fonte: MEHL, 1972 (adaptado).

Através das imagens da estrutura do AISI H13 é possível identificar matriz martensítica temperada, correspondente às regiões mais claras, e partículas de carboneto de liga, correspondente às regiões mais escuras. A figura 18 a seguir mostra imagem obtida experimentalmente em microscópio para análise metalográfica do AISI D2 com aumento de 800x e imagem encontrada na literatura do AISI D2 com aumento de 500x, após ataque com Nital 5% e 2%, respectivamente.

Figura 18 - Imagens para análise metalográfica do AISI D2 (a) obtida experimentalmente e (b) encontrada na literatura.



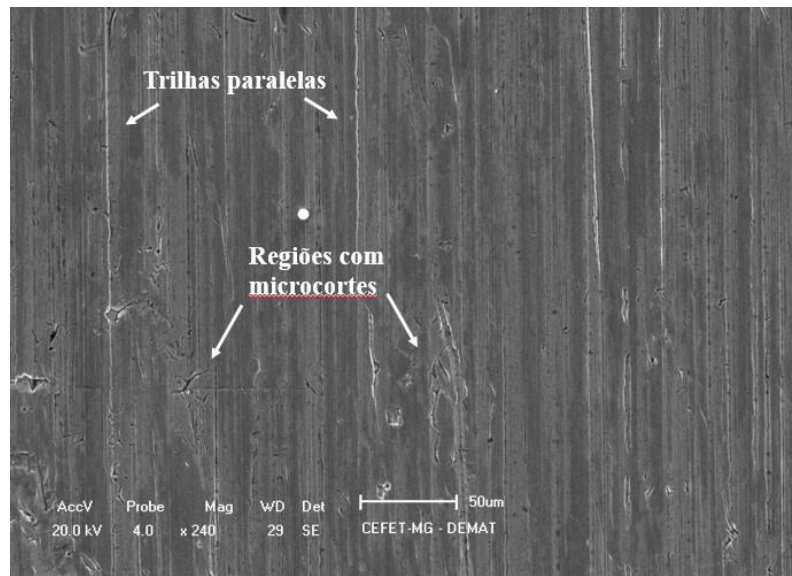
Fonte: MEHL, 1972 (adaptado).

Através das imagens da estrutura do AISI D2 é possível identificar matriz martensítica temperada e pequenas partículas de carboneto esferoidal dentro dos grãos.

5.4 Análise microscópica no MEV

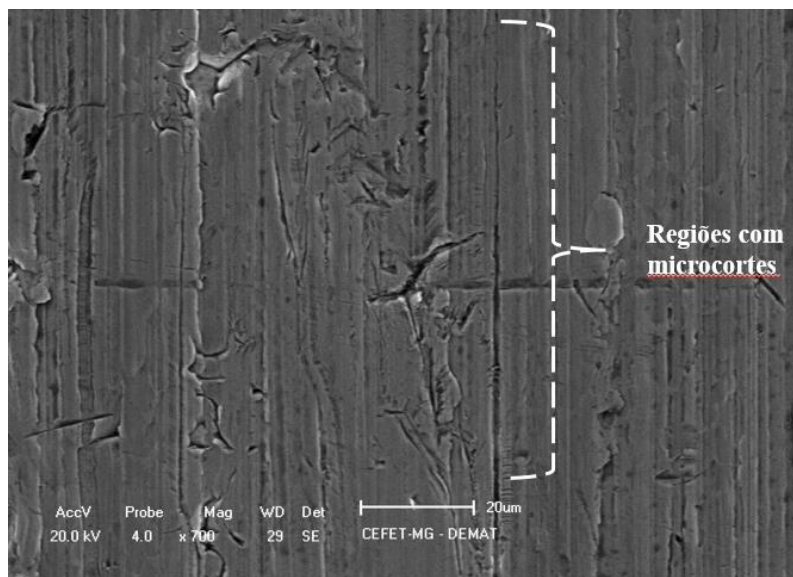
As figuras 19 e 20 a seguir mostram análise microscópica realizada pelo MEV da estrutura do AISI D2 após ensaio por Roda de Borracha com carga 130N.

Figura 19 - Imagem do AISI D2 após ensaio com carga 130N obtida pelo MEV evidenciando trilhas paralelas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

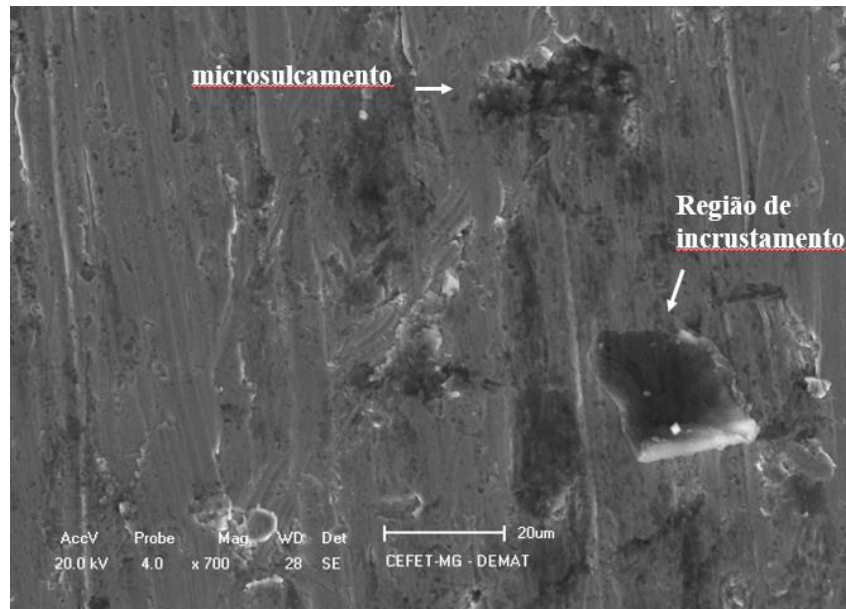
Figura 20 - Imagem do AISI D2 após ensaio com carga 130N obtida pelo MEV evidenciando regiões com microcortes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

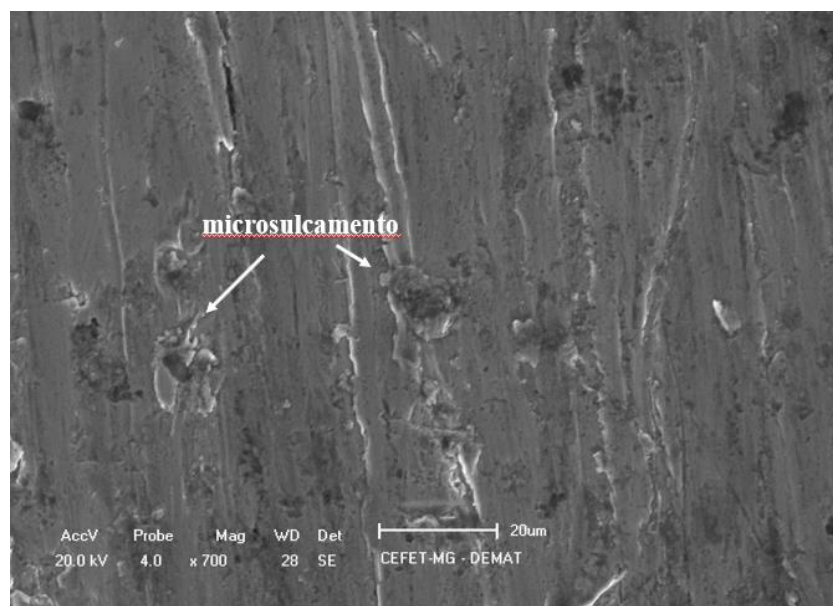
As figuras 21 e 22 a seguir mostram análise microscópica realizada pelo MEV da estrutura do AISI H13 após ensaio por Roda de Borracha com carga 130N.

Figura 21 - Imagem do AISI H13 após ensaio com carga 130N obtida pelo MEV evidenciando possíveis regiões de microsulcamento e incrustamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

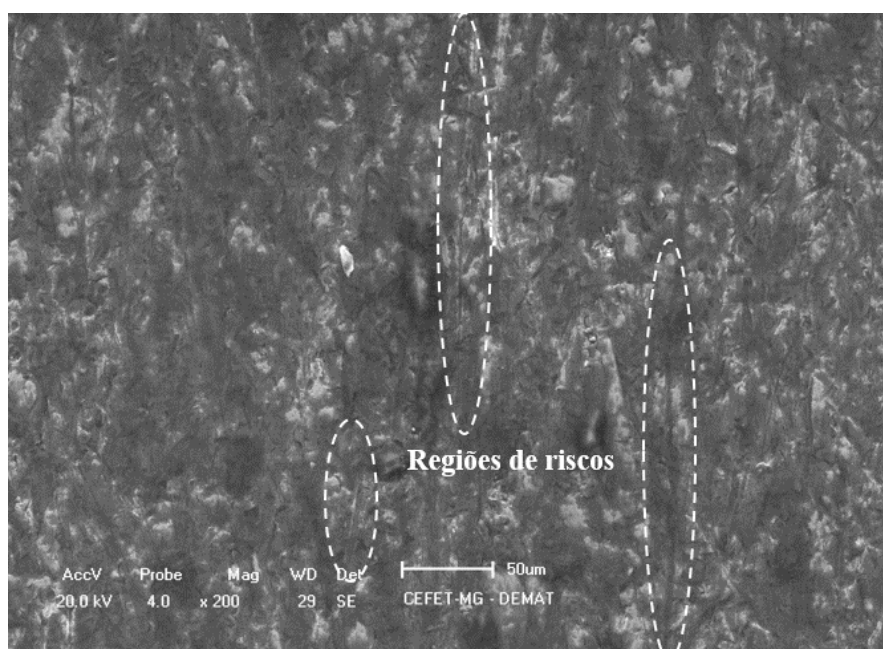
Figura 22 - Imagem do AISI H13 após ensaio com carga 130N obtida pelo MEV evidenciando possíveis regiões de microsulcamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

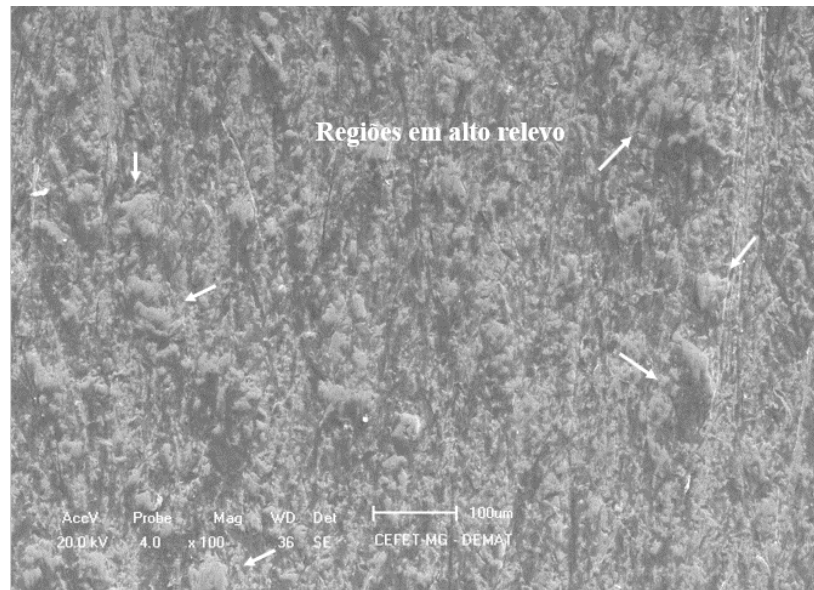
As imagens mostram que, para a mesma carga de 130N, no AISI D2 é possível perceber riscos contínuos e alinhados no sentido do fluxo do abrasivo, ou seja, trilhas bem definidas e paralelas, indicando alta severidade do desgaste. É possível identificar regiões de microcorte, podendo atribuir a maior dureza do material e dificuldade de deformação plástica. No aço AISI H13 a identificação do paralelismo nas trilhas não foi tão nítida, no entanto, é possível identificar materiais deformados nas bordas indicando deformação plástica, típica de microsulcamento, que são submecanismos menos severos de retirada de material se comparado ao microcorte. As figuras 23 e 24 a seguir mostram análise microscópica realizada pelo MEV da estrutura do AISI D2 após ensaio por Roda de Borracha com carga 45N.

Figura 23 - Imagem do AISI D2 após ensaio com carga 45N obtida pelo MEV evidenciando possíveis regiões de riscos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

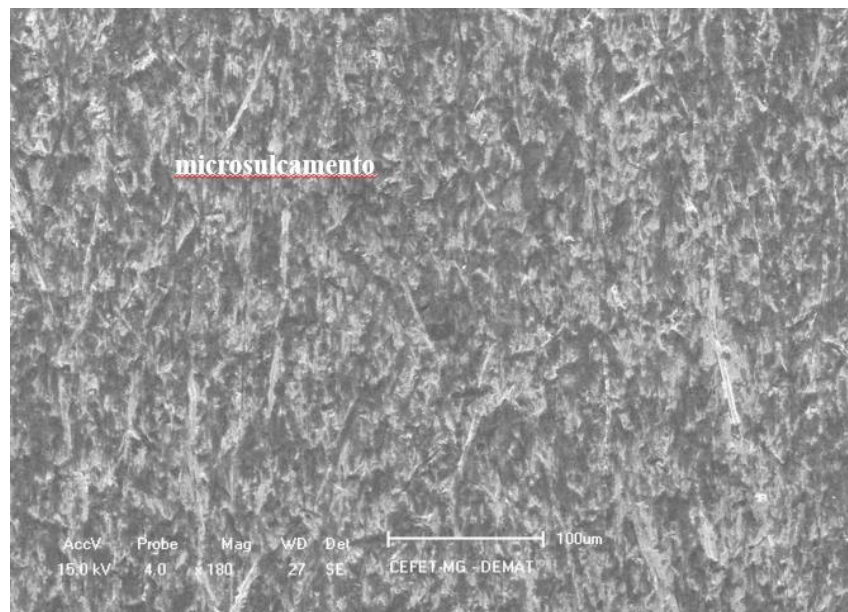
Figura 24 - Imagem do AISI D2 após ensaio com carga 45N obtida pelo MEV evidenciando regiões em alto relevo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

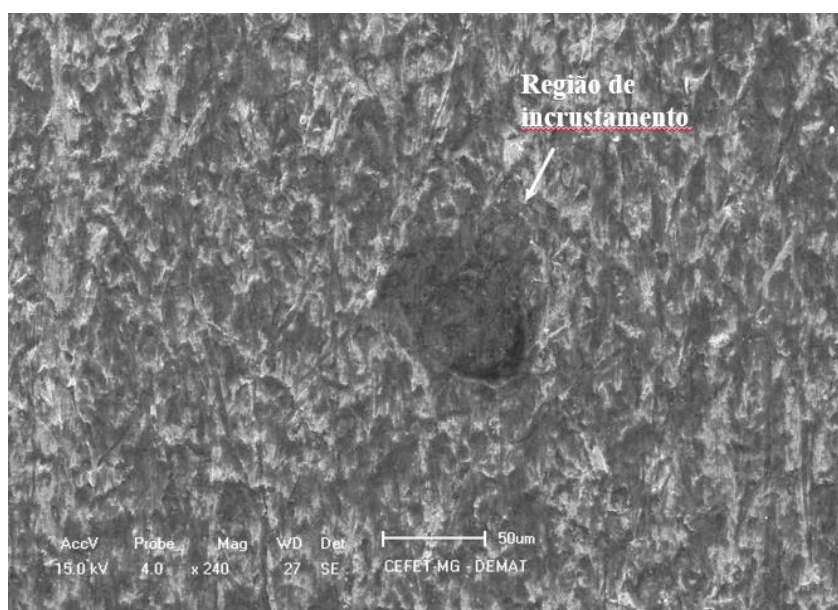
As figuras 25 e 26 a seguir mostram análise microscópica realizada pelo MEV da estrutura do AISI H132 após ensaio por Roda de Borracha com carga 45N.

Figura 25 - Imagem do AISI H13 após ensaio com carga 45N obtida pelo MEV evidenciando possíveis regiões de microsulcamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 - Imagem do AISI H13 após ensaio com carga 45N obtida pelo MEV evidenciando possíveis regiões de incrustamento



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas imagens dos ensaios de 45N, em ambos os materiais, não foi possível identificar trilhas bem definidas, principalmente no AISI H13. Alguns riscos podem ser identificados na figura 23, mas em menor quantidade e menos alinhados que na condição mais severa. Foram identificadas regiões em alto relevo na figura 24, que podem corresponder aos carbonetos presentes no AISI D2, que devem estar atuando como barreira aos eventos abrasivos. Nas imagens 25 e 26 não há regiões em alto relevo e há uma possível região de incrustamento de abrasivo (areia) no AISI H13, como pode ser observado na figura 26.

Ao analisar os resultados de volume perdido e análise microscópica, foi evidente que o aumento da carga aplicada provoca evolução da severidade do desgaste, resultando em maior perda de massa e, conseqüentemente, volume. Outro fator contribuinte para esse resultado é o tamanho do abrasivo, que ao ser menor apresenta capacidade reduzida de remoção de material, uma vez que é mais propício à ocorrência de incrustamento, como foi possível observar nas amostras de AISI H13. As imagens do MEV também comprovam esse comportamento, uma vez que nas amostras submetidas ao ensaio com carga 130N foi possível observar microcortes na estrutura, que é um submecanismo de desgaste mais severo do que o microsulcamento, que foi observado com maior frequência nas amostras ensaiadas com 45N.

Além dos parâmetros de ensaio, as características dos materiais analisados também podem ter influenciado o resultado obtido. O aço AISI D2 não só possui maior teor de carbono, apresentando 1,40 a 1,60% de carbono em comparação com 0,40% do AISI H13, como também apresenta em sua composição química mais que o dobro do teor de cromo, na faixa de 11,00 a 13,00%, em comparação com 5,2% do AISI H13, o que corrobora para maior dureza desta matriz. O cromo também é considerado como um elemento de maior resistência a abrasão. Outro fator que pode colaborar para a construção desse cenário é o tamanho e a morfologia dos carbonetos presentes na estrutura do AISI D2, já que carbonetos mais finos dispersos na matriz de martensita podem resultar em melhor desempenho de desgaste e dureza do material.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos com as pesquisas realizadas neste trabalho permitem concluir que a taxa de desgaste abrasivo dos aços AISI H13 e AISI D2 através do ensaio de desgaste abrasivo por Roda de Borracha com cargas 45N seguem uma tendência linear no intervalo de 10 a 30 minutos.

O aumento do tamanho do abrasivo de #100 para #50 resulta em maior severidade de desgaste abrasivo, comprovado pela maior quantidade de material perdido e pelos submecanismos de desgaste identificados na análise microscópica das amostras ensaiadas.

A carga de 130 aumenta a severidade do desgaste, sendo que o submecanismo de microcorte promove maior retirada de material em relação ao microsulcamento.

Características físicas e químicas dos materiais analisados também contribuíram justificar o ganho de resistência entre os materiais, uma vez que o AISI D2 apresenta dureza (669 kgf/mm^2) 1,4 vezes maior que o AISI H13 (478 kgf/mm^2) e maior resistência ao desgaste abrasivo devido à sua composição química e às características de seus constituintes.

A equação de Rabinowicz apresentou válida para o ensaio abrasivo no equipamento Roda de Borracha, no intervalo de 10 a 30 minutos com carga de 45N.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para pesquisas futuras relacionadas ao presente trabalho é recomendável realizar ensaios de desgaste abrasivo por Roda de Borracha para AISI H13 e AISI D2 com carga 130N e areia média fina #50 por 20 e 30 minutos a título de comparação com os resultados estimados por meio do K abrasivo calculado neste trabalho. É sugerido também a realização de testes diferentes para avaliação do desgaste abrasivo nos mesmos materiais, no intuito de aproximar ainda mais da condição real exercida em campo na utilização desses materiais em diferentes equipamentos empregados na indústria extrativista mineral.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G65-16**: Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, 19428 – 2959 p.

BAÇO, R. L. O. **Efeito do carbono no processo de nitrocarburação com plasma pulsado na liga metálica AISI H13**. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de física “Gleb Wataghin”. Campinas, 2007. 147 p.

BHARAT BHUSHAN. **Introduction to Tribology**. Revisão técnica Pak Lim Ko. 2 ed. Wiley. 2013. 711 p.

CAMPOS, N. C. S. **Proposta de equipamento de ensaio de desgaste por abrasão e impacto para classificação de materiais de placas de chutes**. Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia Mecânica. Ouro Preto, 2021. 64 p.

CHADRA, K. TIAN, Y. NYAMUCHIWA, K. SPRAY, J. JR, C. A. Austenite transformation during deformation of additively manufactured H13 tool steel. **Materials Today Communications**. n. 33 (2022) 104332, p. 2352-4928, ago. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104332>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352492822011746?via%3Dihub>. Acesso em: 9 nov. 2022.

CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. 2 ed. São Paulo. Signus Editora. 2002. 2 ed.

CURI, Adilson. **Minas a céu aberto: planejamento de lavras**. São Paulo. Oficina de textos. 2014. 182 p. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Acervo/Publicacao/175011>. Acesso em: jan, 2022.

DIN 50320: Wear; Terms, Systematic Analysis of Wear Processes, Classification of Wear Phenomena. Beauth-Verlag, Berlin, 1970. 1-8 p.

DUTRA, R. Beneficiamento de Minerais Industriais. II Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais. 2008. 8 p.

EYRE, T. S., **Friction and wear mechanisms**. Anais do II Seminários sobre Materiais Resistentes ao Desgaste, Uberlândia, 1991. p.262 - 263.

FERREIRA, A. G.; FREITAS, W. F. **Normas para Elaboração e Formatação do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Materiais**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2013. 41 p.

FIGUEIRA, H. V. O.; LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M. Britagem e Moagem. CETEM - CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Rio de Janeiro. 2010. 5 ed. Cap 4. 143 - 211 p. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/732/1/CCL00260010.pdf>. Acesso em: jan 2022.

GATES, J. D. Two-body and three-body abrasion: A critical discussion. **Wear**. 1998. 8 p.

GONÇALVES, M. M. **Desenvolvimento de abrasômetro ASTM G65 para simulação de desgaste abrasivo na superfície de roletes de carga**. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais. Ouro Preto. 2017. 69p.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. Butterworth-Heinemann: An imprint of Elsevier. 2017. 2 ed. 388 p.

ILIC, D. ROBERTS, A. WHEELER, C. Modelling bulk solid interactions in transfer chutes: Accelerated flow. **Chemical Engineering Science**. 2019. 18 p.

JOST, H. P. **Economic impact of tribology**. Mechanical Engineering. 1975. vol 97. p. 26-33

LUZ, A. B. LINS, F. A. F. **Introdução ao Tratamento de Minérios**. Tratamento de Minérios. 2018. 6 ed. 23 p. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/2172/1/Tratamento%20de%20Min%C3%A9rios%206a%20edi%C3%A7%C3%A3o%2028CAP.1%29.pdf>>. Acesso em: jan, 2022.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, A. S.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. CETEM - CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL. Rio de Janeiro. 2010. 5 ed. Cap 1. 20 p.

MALHEIROS, F. C. N. **Micro-abrasão em DLC Depositado em Borracha**. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. Departamento de Engenharia Mecânica. Vitória. 2013. 63p.

MÁSCIA, R. **Desenvolvimento e classificação tribológica de materiais resistentes ao desgaste abrasivo para indústria mineradora de cassiterita**. Universidade Federal de Uberlândia. 2002.

MEDANHA, A. JÚNIOR, A. R. F. GOLDENSTEIN, H. TSCHIPTSCHIN, A. P. PINEDO, C. E. **Principais Parâmetros Metalúrgicos e suas influências na qualidade e desempenho do aço para trabalho a frio AISI D2**. 6º Seminário da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes – ABM. São Paulo, 2008. 20 p.

MEHL, R. F. Atlas of Microstructures of Industrial Alloys. ASM Handbook Committee. 8 ed. Vol 7. 1957. 374 p.

MIRANDA, W. G. **Análise da Melhoria do Chute de Alimentação dos Calcinadores de uma Planta de Ferroníquel**. Faculdade Evangélica de Goianésia. 2021. 35 p.

OU, T. CHEN, W. On accurate prediction of transfer chute wear using a digital wear sensor and discrete element modelling. **Power Technology**. 2022. 8 p.

PENAGOS, J.J. **Efeito do refinamento da microestrutura e da adição de nióbio na resistência ao desgaste abrasivo de ferros fundidos de alto cromo**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica. São Paulo. 2016. 140 p.

RABINOWICZ, Ernest. **Friction and wear of materials**. Wiley-Interscience. 2 ed. 1995. 315 p.

SUN, Y. WANG, J. LI, M. WANG, Y. LI, C. DAAI, T. HAO, M. **Thermal and mechanical properties of selective laser melted and heat treated H13 hot work tool steel**. Materials & Design. 2022. 13 p.

SURBERG, C.H. STRATTON, P. LINGENHOLE, K. The effect of some heat treatment parameters on the dimensional stability of AISI D2. Cryogenics. 2008. Vol 48. 42 – 47 p.

ZEIDI, A. BEN SAADA, F. ELLEUCH, K. ATAPEK, H. **AISI D2 punch head damage: Fatigue and wear mechanism**. Engineering Failure Analysis. 2021. 17 p. Disponível em: <<https://mail.google.com/mail/u/0/?tab=rm&ogbl#inbox/FMfcgzGqRZXQPmBZkJkJtwJNTWqwfFC?projector=1&messagePartId=0.1>>. Acesso em: out, 2022.

ZUM GAHR, K. H. **Microstructure and wear of materials**. Elsevier. Amsterdam. 1987.