



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

RUTE NARA DE JESUS FARIAS DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DO AÇO HADFIELD E FERRO
FUNDIDO BRANCO ALTO CROMO EM ENSAIO PINO-DISCO
COM FRAGMENTAÇÃO DE ABRASIVO PARA APLICAÇÕES NA MINERAÇÃO**

BELÉM-PA
2024

RUTE NARA DE JESUS FARIAS DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DO AÇO HADFIELD E
FERRO FUNDIDO BRANCO ALTO CROMO EM ENSAIO PINO-DISCO
COM FRAGMENTAÇÃO DE ABRASIVO PARA APLICAÇÕES NA MINERAÇÃO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal do Pará como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Industrial. Área de Concentração: Projetos Industriais

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cordeiro Machado.

BELÉM-PA
2024

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

D278a de Jesus Farias da Silva, Rute Nara.
AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DO AÇO
HADFIELD E FERRO FUNDIDO BRANCO ALTO CROMO EM
ENSAIO PINO-DISCO COM FRAGMENTAÇÃO DE
ABRASIVO PARA APLICAÇÕES NA MINERAÇÃO / Rute
Nara de Jesus Farias da Silva. — 2024.
125 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Paulo Cordeiro Machado
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Industrial, Belém, 2024.

1. Desgaste abrasivo. 2. Tribologia. 3. Pino disco com
fragmentação de abrasivo. I. Título.

CDD 621.7

RUTE NARA DE JESUS FARIAS DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DO AÇO HADFIELD E FERRO
FUNDIDO BRANCO ALTO CROMO EM ENSAIO PINO-DISCO
COM FRAGMENTAÇÃO DE ABRASIVO PARA APLICAÇÕES NA MINERAÇÃO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal do Pará como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Industrial. Área de Concentração: Projetos Industriais

Aprovada em: ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Cordeiro Machado
Presidente/Orientador (PPGEI/UFPA)

Prof. Dr. Amilton Sinatora
Membro Interno (PPGEI/UFPA/ITV)

Prof. Dr. Eduardo de Magalhães Braga
Membro Interno (PPGEI/UFPA)

Prof. Dr. Gustavo Tressia de Andrade
Membro Externo (USP/ITV)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao longo dessa jornada de mestrado, que não seria possível sem o apoio e incentivo de pessoas tão especiais.

Em primeiro lugar, agradeço imensamente ao meu orientador, Professor Doutor Paulo Machado, por sua paciência, orientação e apoio incondicionais. Sua dedicação e conhecimento foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, e sua confiança foi uma fonte constante de motivação.

Ao Professor Amilton Sinatora, minha admiração e agradecimento por ser uma inspiração. Sua experiência e paixão pelo conhecimento foram um exemplo que levarei comigo ao longo da minha carreira.

Ao Gustavo Tressia, meu sincero agradecimento por todas as oportunidades concedidas durante o mestrado. Sua presença constante e apoio foram inestimáveis para meu crescimento acadêmico e profissional.

Aos colegas e amigos do laboratório LCAM, meu profundo reconhecimento, especialmente a Tarsio Cabral, Angelo Castro, Jean Ramos, Matheus Santos, Christian Loayza, Luiz Sena, Ravi Patrick e Pablo do Carmo. Sou muito grata pela ajuda e pelo tempo que cada um de vocês dedicou para colaborar neste trabalho. A parceria e o apoio de vocês tornaram essa caminhada mais leve e produtiva.

A uma amiga em especial, Natália Valente, pelo total apoio durante esta jornada e pelos cafés da tarde que ajudaram nos momentos de desespero.

A minha família, em especial aos meus pais, Marzane Laura e Osmarino Farias, agradeço por toda dedicação, amor e apoio constantes. A vocês, minha eterna gratidão por sempre acreditarem em mim e me incentivarem a seguir em frente, sem vocês e suas orações nada disso seria possível.

À minha filha, Laura Cristina, agradeço a compreensão e carinho ao longo desse percurso. Sua presença amorosa é uma motivação que me impulsiona todos os dias.

À empresa Vale pelo suporte financeiro através do Instituto Tecnológico Vale (ITV), sou muito grata pela oportunidade de integrar um grupo de pesquisa tão bem estruturado, que proporcionou não apenas conhecimento acadêmico, mas também um grande aprendizado como ser social.

RESUMO

A mineração, sendo uma indústria com processos que incluem escavação, britagem e moagem, enfrenta elevados níveis de desgaste, resultando em falhas de componentes, aumento no consumo de energia e custos operacionais. Estudos indicam que o consumo global de energia nas atividades de mineração é significativo, com grande parte sendo usada para superar o atrito e substituir peças desgastadas. O presente trabalho investiga a eficiência de diferentes materiais, como os aços Hadfield com 15 % de Mn (Mn15) e o ferro fundido branco alto cromo (FFBC), em resistir ao desgaste abrasivo, além de parametrizar o equipamento de teste para os dois materiais. O teste de desgaste abrasivo a três corpos Pino Disco com Fragmentação de Abrasivo (PDFA) foi utilizado para simular e avaliar a resistência ao desgaste abrasivo desses materiais. A pesquisa compara os micromecanismos de desgastes obtidos no PDFA com os micromecanismos encontrados no teste britador de mandíbulas, com o intuito de encontrar formas de avaliar os materiais em estudo de forma menos complexa e menos dispendiosa economicamente, enfatizando a importância de testes que reproduzam ao máximo condições reais de operação, otimizando a escolha de materiais e reduzindo custos, consumo de energia e emissões de CO₂ na mineração. A caracterização das amostras desgastadas foi realizada via microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura nos modos SE, BSE e EDS. As taxas de desgaste foram de 0,0006 g/min para o FFBC e de 0,0021 g/min para o aço Mn15. Além disso, foram observados nas superfícies dos dois materiais micromecanismos semelhantes aos identificados em amostras de mandíbulas fixas ensaiadas em testes de britador de mandíbulas, como microsulcamento, microcorte e microtrincamento.

Palavras-chave: desgaste abrasivo; tribologia; pino disco com fragmentação de abrasivo.

ABSTRACT

Mining, as an industry with processes that include excavation, crushing, and grinding, faces high levels of wear, resulting in component failures, increased energy consumption, and operational costs. Studies indicate that global energy consumption in mining activities is significant, with a large portion used to overcome friction and replace worn parts. The present work investigates the efficiency of different materials, such as Hadfield steel with 15% Mn (Mn15) and high-chromium white cast iron (HCWCI), in resisting abrasive wear, as well as parameterizing the test equipment for the two materials. The Pin-on-Disc Abrasive Wear Test with Abrasive Fragmentation (PDFA) was used to simulate and evaluate the abrasive wear resistance of these materials. The research compares the wear micromechanisms observed in the PDFA test with those found in the jaw crusher test, aiming to identify less complex and more cost-effective ways to evaluate the studied materials. This emphasizes the importance of tests that closely replicate real operational conditions, optimizing material selection while reducing costs, energy consumption, and CO₂ emissions in mining. The characterization of the worn samples was performed using optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM) in SE, BSE, and EDS modes. The wear rates were 0.0006 g/min for HCWCI and 0.0021 g/min for Mn15 steel. Additionally, similar micromechanisms, such as microgrooving, microcutting, and microcracking, were observed on the surfaces of both materials, comparable to those identified in fixed jaw samples tested under jaw crusher conditions.

Keywords: abrasive wear; tribology; pin-on-disk with abrasive fragmentation; word 4.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa	16
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivo geral	16
1.2.2	Objetivos específicos	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Tribologia	18
2.1.1	Desgaste	20
2.1.2	Desgaste abrasivo	22
2.1.3	Desgaste abrasivo por deformação plástica	27
2.1.4	Micromecanismos de desgaste abrasivo	31
2.2	Materiais resistentes ao desgaste abrasivo	36
2.2.1	Aços Hadfield	36
2.2.1.1	Influência da composição química nas propriedades mecânicas	37
2.2.2	Ferro Fundido branco alto cromo	49
2.2.2.1	Influência da composição química nas propriedades mecânicas	49
2.3	Teste de desgaste de fragmentação de abrasivo pino disco- PDFA	53
3	METODOLOGIA	60
3.1	Preparação dos corpos de prova	62
3.2	Preparação dos abrasivos	64
3.3	Equipamento de teste pino disco com fragmentação de abrasivo – PDFA	64
3.4	Planejamento experimental	66
3.5	Caracterização dos materiais após teste de desgaste	67
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	69

4.1 Micrografias	69
4.2 Microdureza antes do teste de desgaste.....	72
4.3 Abrasivos.....	73
4.4 Perda de massa	78
4.5 Perfil de microdureza após teste de desgaste	87
4.5.1 Seção transversal do aço Mn15 e FFBAC	89
4.6 Micromecanismo de desgaste	92
4.6.1 Micromecanismos de desgaste do aço Mn15	93
4.6.2 Micromecanismos de desgaste FFBAC.....	100
4.7 Interferometria	105
4.8 Classificação do desgaste abrasivo do teste PDFA	106
5 CONCLUSÕES	110
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	111
REFERÊNCIAS.....	112
APÊNDICE.....	117

1 INTRODUÇÃO

É notável a necessidade de compreensão e melhorias dos tribossistemas existentes na mineração. O desgaste abrasivo é uma classificação de desgaste encontrada em diversas situações durante o processamento de minerais, e é um dos maiores responsáveis pelos danos observados em componentes e maquinários industriais (EYRE, 1976). A Tabela 1 mostra o percentual em que diferentes tipos de desgastes ocorrem na indústria.

Tabela 1- Tipos de desgaste e seus respectivos percentuais de ocorrência na indústria.

Tipo	Percentual
Abrasivo	50 %
Adesivo	15 %
Erosivo	8 %
Fretting	8 %
Químico	5 %

Fonte: Eyre (1976)

Algumas soluções para reduzir o atrito e o desgaste na mineração incluem o uso de materiais inovadores com propriedades aprimoradas de resistência e dureza, tratamentos de superfície mais eficazes, revestimentos de alto desempenho, além de novos lubrificantes e aditivos (ZUM GAHR, 1987; HOLMBERG *et al.*, 2017). Novos designs para peças móveis e superfícies, como revestimentos, lâminas, placas, pás, mandíbulas, câmaras, pneus, rolamentos, caixas de engrenagens, motores, correias transportadoras, bombas, ventiladores e funis também são considerados. (HOLMBERG, 2017).

O desgaste é um fenômeno intrínseco ao cotidiano e se manifesta em diversas situações e contextos na sociedade. Stachowiak, (2005), destaca uma variedade de exemplos de produtos de engenharia avançada, abrangendo desde sistemas que envolvem altas velocidades de deslizamento ou rolamento até aqueles de dimensões reduzidas ou operando em ambientes severos. Essa diversidade inclui aplicações como turbinas a gás, articulações artificiais para seres humanos, motores e transmissões automotivas, pneus e freios, discos rígidos para armazenamento de dados, além de uma crescente variedade de dispositivos eletromecânicos utilizados tanto em ambientes domésticos quanto industriais.

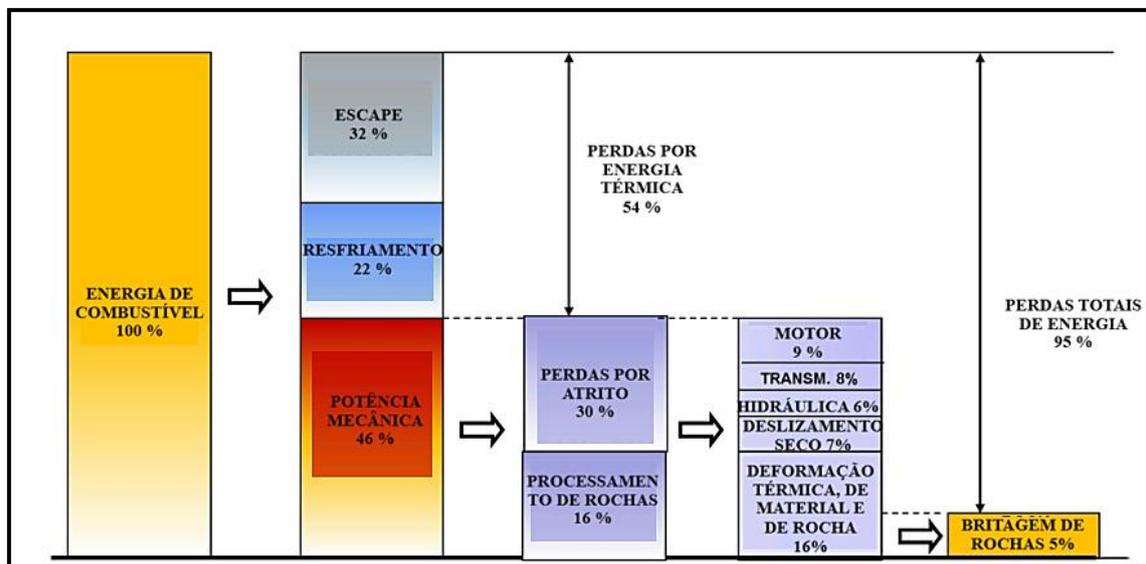
Na indústria da mineração os processos de tratamento de minérios transcorrem diversas etapas como escavação, britagem, moagem e entre outros. Estas etapas geram elevados níveis de desgaste que levam a falhas de componentes e máquinas, além de gastos energéticos para superar o atrito (HOLMBERG *et al.*, 2017). Falhas e desgastes são mecanismos tribológicos

que impulsionam a demanda por substituição e reparo, além de aumentar o consumo de recursos devido à necessidade de novos equipamentos e bens de consumo (WOYDT, 2021).

Conforme elucidado por Holmberg *et al* (2017) o consumo global total de energia das atividades de mineração, incluindo a mineração de minerais e rochas, é estimado em 6,2% do consumo global total. Cerca de 38% da energia consumida na mineração (equivalente a 4,6 EJ anualmente em escala global) é usada para superar o atrito e 2 EJ são usados para remanufaturar e substituir peças desgastadas e reservar peças sobressalentes e equipamentos necessários devido a falhas por desgaste. O autor ainda ressalta que as etapas de mineração que mais consomem energia são moagem (32%), transporte (24%), ventilação (9%) e escavação (8%).

Härkisaari (2015), realizou um estudo sobre três casos de perdas por atrito e desgaste, envolvendo um britador de mandíbula móvel, um moinho de moagem e um caminhão de transporte, representando, respectivamente, três categorias típicas de equipamentos utilizados na mineração. A Figura 1 mostra com detalhe a distribuição energética em um britador de mandíbulas móvel a diesel empregado na britagem de minério de ferro.

Figura 1- A distribuição de energia em um britador de mandíbula movido a diesel, tipicamente usado na britagem de minério de ferro (peso de 50 toneladas)



Fonte: Adaptado de Holmberg (2015)

Conforme apresenta a Figura 1, 54 % da energia de combustível é desperdiçada em energia térmica que configura o escape e resfriamento, 46 % em potência mecânica que inclui perdas por atrito (30 %) e processamento de rochas (16 %). É interessante ressaltar que em 100 % de energia de combustível empregado para o funcionamento da máquina, apenas 5 % desse valor é empregado para cumprir a função do equipamento, britagem de rochas e minérios.

Ou seja, muita energia é perdida em todo o processo.

Nos outros dois estudos de caso, o moinho e caminhão de transporte, apenas 5 % é utilizada para cominuir rochas e 31 % para mover o caminhão.

As perdas econômicas totais estimadas resultantes do atrito e desgaste na mineração de minerais somam 210.000 milhões de euros anualmente, distribuídas como 40% para superar o atrito, 27% para produção de peças de reposição e equipamentos sobressalentes, 26% para trabalhos de manutenção e 7% para produção perdida, dados obtidos por Holmberg *et al* em 2017.

Além disso, Holmberg *et al* ainda ressalta que ao aproveitar novas tecnologias para redução de atrito e proteção contra desgaste em equipamentos de mineração de minerais, as perdas por atrito e desgaste poderiam ser potencialmente reduzidas em 15% a curto prazo (10 anos) e em 30% a longo prazo (20 anos). A curto prazo, isso equivaleria a economias globais anuais de 31.100 milhões de euros, 280 TWh de consumo de energia e uma redução de emissões de CO₂ de 145 milhões de toneladas. A longo prazo, o benefício anual seria de 62.200 milhões de euros, 550 TWh de consumo de energia e uma redução de emissões de CO₂ de 290 milhões de toneladas.

Costa (2022) *apud* (IBRAM; SGM; IBGE (2020 afirma que a participação do setor de mineração no PIB do Brasil é de aproximadamente 4%, de acordo com dados obtidos da SGM (Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral do Ministério de Minas e Energia) e do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Considerando apenas a indústria extrativa mineral, excluindo petróleo e gás, essa participação é de aproximadamente 2,3%, com base em dados de 2018.

Diante das problemáticas impostas pela presença do atrito e desgaste que atuam diretamente na economia industrial, mais especificamente o desgaste abrasivo, se torna imprescindível o controle dos tribossistemas. Para isto, é necessário além do conhecimento dos materiais empregados nas superfícies dos sólidos em contato e dos movimentos relativos existentes, os testes de simulação de desgaste laboratorial são ferramentas aliadas.

Em consonância com Eyre (1976), o desgaste abrasivo ocorre quando partículas duras penetram uma superfície e deslocam material na forma de cavacos ou lascas alongadas. Uma superfície que, de outra forma, seria lisa, torna-se áspera com sulcos relativamente regulares, com ou sem detritos metálicos soltos. Esse tipo de dano é geralmente descrito como arranhões, riscos ou sulcos, sendo a diferença principalmente no grau de severidade.

Terva et al. (2009) aponta que um problema comum na indústria de mineração de rochas é a realização de testes simplificados de desgaste sem alterar drasticamente as condições

originais. Por essa razão, os equipamentos de teste para aplicações como britadores de mandíbula, cônico, entre outros, são frequentemente versões miniaturizadas dos britadores originais, exigindo corpos de prova de teste relativamente grandes e com geometrias complexas. Isso aumenta o custo e o tempo dos testes, além de dificultar o exame das amostras durante o processo de caracterização.

Um grupo de pesquisa em tribologia da *Tampere University of Technology* estudou a resistência ao desgaste abrasivo de diferentes materiais empregados em diferentes equipamentos na mineração, por meio do teste *Crushing pin on disc*, desenvolvido pela equipe. No teste, um corpo de prova cilíndrico avança e recua repetidamente contra os abrasivos livres contidos em um disco em rotação. Os testes foram conduzidos utilizando diferentes tipos de abrasivos, parâmetros e variadas combinações de materiais com durezas distintas. Destaca-se nos artigos e teses publicados pela universidade sobre este ensaio, o quão importante é a aplicação dele e facilidade que há em combinar diferentes materiais em um mesmo teste e entender a performance de cada.

Apesar do teste ter um mecanismo relativamente simples, a nível de pesquisa, classificação dos materiais e a complexidade existentes nos tribossistemas, é importante controlar cuidadosamente as variáveis que afetam o fenômeno durante os testes. Fabert (1975) *apud* Avery (1961), relata que um teste de desgaste em laboratório deve atender alguns requisitos para que seus resultados tenham validação. O teste deve ter a capacidade de classificar os materiais, fornecer reprodutibilidade estatística e validade em relação a um conjunto específico de condições de serviço em campo. A caracterização dos micromecanismos encontrados nos diversos ensaios em comparação aos micromecanismos encontrados em campo é um dos fatores que promove validação dos testes.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a resistência ao desgaste abrasivo de alta tensão de dois diferentes materiais através do teste de desgaste abrasivo a três corpos Pino Disco com Fragmentação de Abrasivo (PDFA). Os materiais utilizados foram os aços Hadfield com 15 % Mn (Mn15) e ferro fundido branco alto cromo (FFBAC). As caracterizações foram realizadas através da microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura para verificação dos micromecanismos de desgaste resultantes dos testes.

1.1 Justificativa

Diferentes autores (HOLMBERG *et al*, 2017; ZUN GAHR, 1987; HUTCHINGS E SHIPWAY, 1992) afirmam a necessidade de conhecer bem as propriedades dos materiais e mensurar de forma comparativa os mais resistentes ao desgaste para serem empregados de forma correta. O intuito é otimizar a produção, reduzir custos e paradas para manutenção, além de reduzir troca de peças e uso de matéria prima para produção de novas peças. Também está inserido nesse contexto a redução de envio de gases nocivos, como o CO₂, para a atmosfera (HOLMBERG & ERDEMIR, 2015; WOYDT, 2022). E um dos maiores desafios, segundo Terva *et al* (2009), na indústria da mineração, é a realização de testes de desgaste mais simples que consigam produzir dados com maior acuracidade e repetibilidade. Em geral, quando há necessidade avaliar materiais empregados em moinhos, britadores de mandíbulas, cônicos, entre outros, são utilizados normalmente protótipos de laboratório em versão miniaturizada. Apesar de não simularem fidedignamente o desgaste em campo, são ferramentas passíveis de comparar e classificar diferentes materiais, ou até mesmo aprimorar ligas (FABERT, 1975). O uso de protótipos, geralmente, leva ao uso de amostras com geometrias complexas e consideravelmente grandes que resulta em maiores gastos com materiais e outros recursos, além de ser dispendioso o preparo das amostras para a caracterização após o desgaste.

O Teste PDFA, por utilizar amostras relativamente pequenas e de geometria simples, pode ser uma forma de simular os desgastes abrasivos em diferentes materiais de forma mais simples e econômica. Portanto, a justificativa do atual trabalho, além de comparar o comportamento ao desgaste abrasivo de duas diferentes ligas, é entender como o teste pode ser empregado como ferramenta de análise de desgaste abrasivo em diferentes materiais.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a resistência ao desgaste via ensaio Pino Disco com Fragmentação de Abrasivo (PDFA) em dois materiais usados em equipamentos de mineração: aço Mn15 e FFBAC. E parametrizar o equipamento de teste para simular o desgaste abrasivo de alta tensão adequadamente nos dois materiais.

1.2.2 Objetivos específicos

- Parametrizar o equipamento de teste de desgaste abrasivo Pino Disco com Fragmentação de Abrasivo (PDFA);
- Desgastar o aço Mn15 e FFBAC por meio do ensaio PDFA;
- Definir os micromecanismos de desgaste da superfície desgastada via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).
- Caracterizar a sessão transversal das amostras após o desgaste via MEV e microdureza HV;
- Análise da rugosidade da superfície desgastada via interferometria.

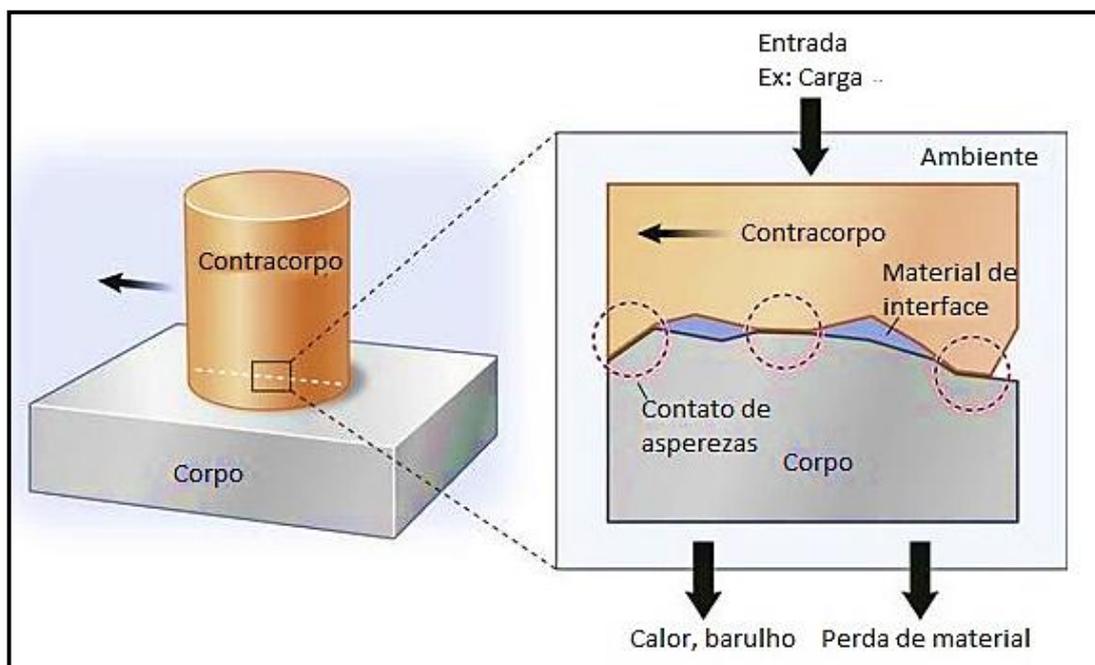
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tribologia

A palavra "tribologia", de origem grega (tribo = esfregar, atritar; logos = estudo), constitui o campo da ciência e tecnologia dedicado à investigação da interação entre superfícies em movimento relativo e temas correlatos. Este termo foi empregado em um relatório apresentado por H. Peter Jost ao Departamento Britânico de Educação e Ciência em 1966 (ANDERSON et al., 1992; BHUSHAN, 2013). A área de estudo engloba a análise do atrito, desgaste, lubrificação e o desenvolvimento de sistemas de rolamento, que é vital para o projeto, fabricação e utilização de praticamente todo sistema com peças móveis (HUTCHINGS E SHIPWAY, 1992; LING; HART, 1983).

Anderson *et al.* (1992) define o termo "tribossistema" como uma combinação funcional de elementos tribológicos, abrangendo inclusive fatores térmicos e químicos. De acordo com Hutchings e Shipway um sistema tribológico é composto por um corpo, contracorpo, uma superfície interfacial e o ambiente circundante. A Figura 2 mostra uma representação esquemática dos componentes que constituem um sistema tribológico.

Figura 2 - Elementos do tribossistema

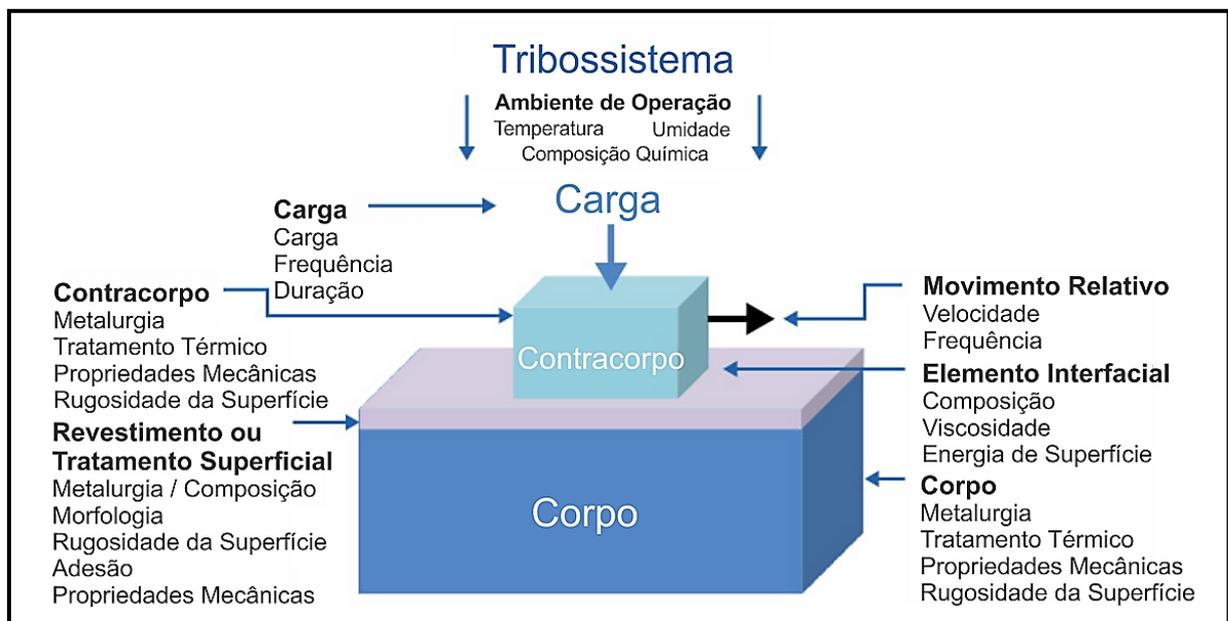


Fonte: Wimmer e Laurent (s.d).

Contudo, desgaste e o atrito não se apresentam como propriedades intrínsecas dos materiais, mas sim como características inerentes aos sistemas de engenharia, conhecidos como tribossistemas (ZUM GAHR, 1987; BHUSHAN, 2013). Em outras palavras, eles estão sujeitos às propriedades das superfícies em contato, às propriedades dos materiais envolvidos e à presença ou ausência de partículas e agentes lubrificantes (STACHOWIAK, 2005).

Um tribossistema possui diferentes variáveis que devem ser consideradas quando observado. A Figura 3 mostra possíveis fatores que podem modificar o grau de severidade do desgaste.

Figura 3 - Elementos de um tribossistema



Fonte: WeldingLand (s.d.)

Esses elementos acrescentam maior complexidade aos processos de desgaste, uma vez que englobam de forma simultânea mecanismos de atrito, desgaste e deformação em diversos níveis de escala (STACHOWIAK, 2005).

A relevância da tribologia não se limita apenas ao desgaste em si, como um fator contribuinte para danos a componentes e peças, mas também se estende à esfera econômica e sustentável. Foi realizada uma Conferência Internacional sobre Desgaste de Materiais em St. Louis em abril de 1977, o evento incluiu um Workshop que abordou a questão do impacto econômico do desgaste na sociedade.

De acordo com o relatório resultante do evento (BAHADUR, 1977), os temas abordados foram: o efeito do desgaste na utilização de recursos, a conservação de energia, o desempenho de máquinas e a economia nacional. O relatório conclui que uma aplicação mais abrangente da tribologia em situações de engenharia pode proporcionar ganhos econômicos substanciais para a indústria. Além disso, essas vantagens podem ser observadas em indústrias não diretamente relacionadas à produção de energia, transporte, processamento de alimentos, fabricação de bens de consumo, entre outras, pois a indústria sempre utiliza equipamentos mecânicos onde a tribologia é relevante.

Jost, (s.d) em um relatório financiado pelo governo dos Estados Unidos sugeriu que \$ 16,25 bilhões por ano (em valores de 1976) poderiam ser economizados por meio de uma "Estratégia para Conservação de Energia por meio da Tribologia". O mesmo relatório adiciona que atualizando essa quantia para valores americanos de 1981 e levando em conta o aumento do preço mundial do petróleo e a inflação nos Estados Unidos, esse montante de economia poderia ultrapassar os \$ 40 bilhões por ano. A proteção contra desgaste amplia a vida útil e a eficácia dos componentes integrados em uma máquina, reduzindo assim a necessidade de substituição de equipamentos para operações de produção e manuseio. Isso resulta em uma diminuição no consumo de materiais, energia primária e trabalho necessário para a produção, o que, por sua vez, ajuda a reduzir as emissões. (MATHIAS WOYDT et al., 2021).

Os seguintes subtópicos tratarão sobre as definições de desgaste, desgaste abrasivo e suas classificações e micromecanismos de desgastes, para melhor esclarecimento sobre o presente trabalho.

2.1.1 Desgaste

O conceito de desgaste pode ser descrito como "a deterioração de uma superfície sólida, frequentemente caracterizada pela perda gradual de material devido ao movimento relativo entre essa superfície e uma ou mais substâncias em contato" (STACHOWIAK, 2005). Essa definição engloba a variedade de tipos de desgaste reconhecidos na literatura, incluindo desgaste abrasivo, adesivo, erosivo, por fadiga, por corrosão, entre outros.

De acordo com Anderson *et al.* (1992), os danos presentes na superfície de um tribossistema geralmente resultam de múltiplos passos sucessivos, envolvendo diversos micromecanismos distintos que estão ativos na superfície de contato. Ou seja, os danos são

resultados cumulativos em uma escala macro dos efeitos desses micromecanismos. Identificar os mecanismos e processos que resultaram em danos à superfície e estabelecer conexões entre esses mecanismos, a geometria, as propriedades do material e outras características do tribossistema é um passo fundamental para aprofundar a compreensão dos elementos tribológicos. Esse entendimento permite intervenções eficazes na busca por melhorias no desempenho do tribossistema (ANDERSON *et al.*, 1992; HOLMBERG *et al.*, 2017).

Kato (2005), afirma que as classificações de desgastes encontradas na literatura facilitam o entendimento sobre que movimento gerou o dano. Gates (1998) diz em seu trabalho que a classificação do desgaste deve resultar em modos de desgaste dentro dos quais certas literaturas características são comuns. Esses recursos característicos se enquadram em três grupos:

Situação - uma descrição de engenharia das condições macroscópicas que produzem o desgaste, como a geometria de contato, tensões, velocidades de deslizamento etc.;

Mecanismos - os processos microscópicos por quais as partículas de detritos são geradas;

Manifestações - fenômenos observáveis, como taxa de desgaste e transições de taxa de desgaste, características de superfícies desgastadas, detritos etc.

Gates também destaca que nos sistemas tribológicos, a categorização é frequentemente orientada pela situação específica ou pelas manifestações observadas. Algumas literaturas classificam os tipos de desgaste com base nos mecanismos subjacentes. A vantagem desta abordagem é que permite uma compreensão muito mais precisa do mecanismo de desgaste e pode estabelecer uma base sólida para o desenvolvimento de estratégias na forma de mitigação do desgaste.

A análise minuciosa das superfícies desgastadas e dos resíduos resultantes do desgaste pode oferecer informações valiosas acerca dos mecanismos envolvidos no processo, embora seja frequentemente desafiador discernir de forma definitiva entre os possíveis mecanismos em ação em um cenário específico. É presumível que as superfícies desgastadas apresentem vestígios de detritos em todas as fases de seu ciclo de vida, o que por vezes dificulta a identificação clara de uma progressão linear no processo de desgaste. Além disso, é crucial questionar se os resíduos coletados durante um teste de desgaste mantêm a condição em que foram desprendidos da superfície original, considerando a possibilidade de que sua aparência e até mesmo composição possam ter sofrido modificações subsequentes. A transferência e

deformação das partículas de detritos entre as superfícies em deslizamento e a oxidação dos resíduos metálicos após sua separação representam exemplos de potenciais alterações que podem ocorrer. Tressia (2015) em seu trabalho avaliou partículas de desgaste. Após análises dos detritos e da superfície de desgaste, concluiu a inviabilidade de afirmar com precisão qual o mecanismo de desgaste predominante, mas, esclarece que a presença de dois micromecanismos de desgaste, microsulcamento e microcorte.

Zhun Gar (1987), relata que as características metalúrgicas, por exemplo, o tamanho e contornos de grão, presença de segunda fase, defeitos cristalinos, afetam diretamente a resistência dos materiais ao desgaste. Um exemplo que pode ser citado é o que Rabinowicz (1995) *apud* Bhushan (2013) argumentou, em que há uma forte tendência de os metais deslizantes aderirem fortemente um ao outro devido a compatibilidade metalúrgica, que é o grau de solubilidade sólida quando os dois metais são fundidos juntos. O aumento do grau de incompatibilidade reduz o desgaste, levando a um menor valor dos coeficientes de desgaste. Rabinowicz (1995) *apud* Bhushan (2013), ainda acrescenta que metais de estrutura hexagonal compacta (HC) exibem um desgaste inferior (uma ordem de magnitude menor) e menor atrito do que os metais cúbicos. Um par de materiais envolvendo dois metais hexagonais se comportam da mesma maneira que um par com apenas um metal hexagonal, este fato deve-se a característica dos metais hexagonais possuírem um número limitado de planos de escorregamento.

Como já citado anteriormente, existem diferentes tipos de desgastes e estes variam de acordo com os mecanismos, movimento e ambiente em que estão inseridos os componentes. De acordo com o atual trabalho, será abordado a seguir o desgaste abrasivo e suas principais características.

2.1.2 Desgaste abrasivo

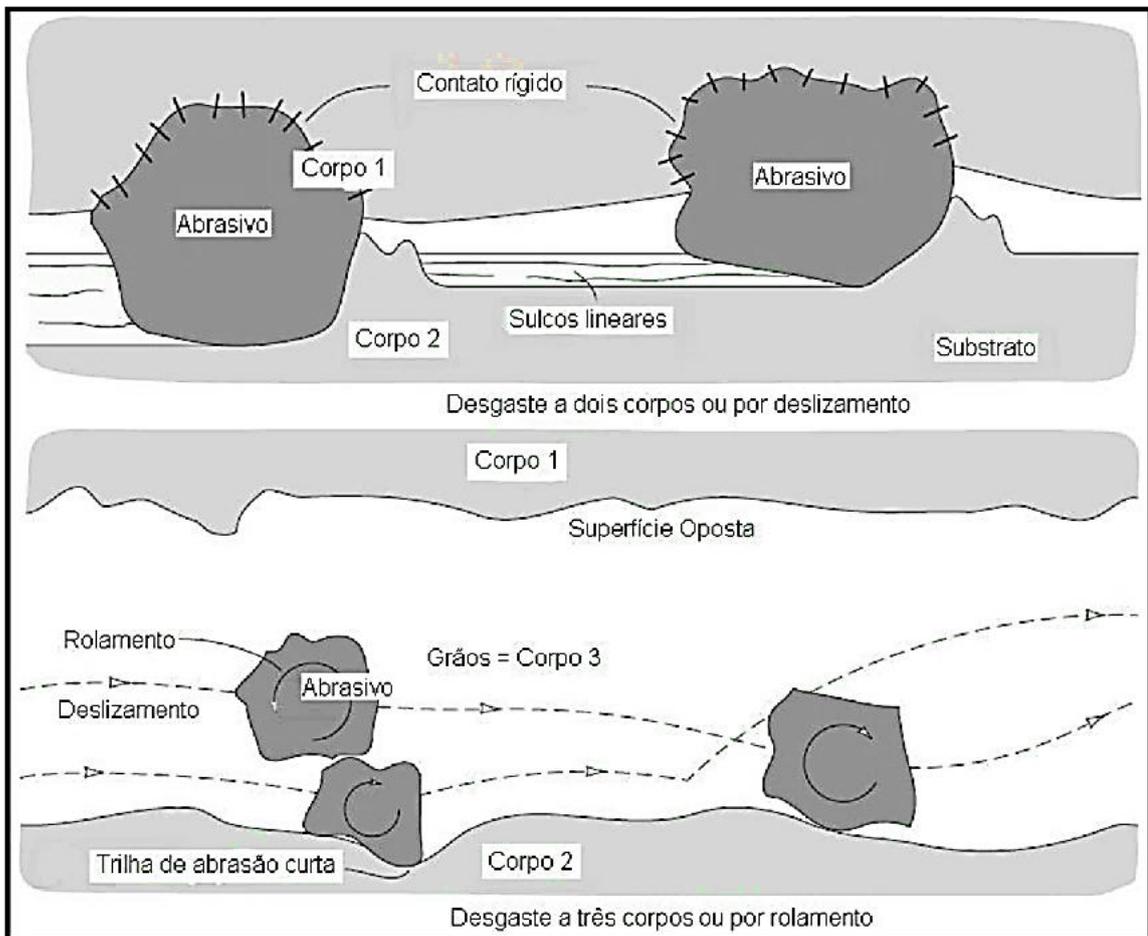
A norma ASTM G40 (2021) define o desgaste abrasivo como a remoção ou deslocamento de material por partículas duras ou protuberâncias presentes entre superfícies (face e contraface) pressionadas uma contra a outra e com movimento relativo.

Esse tipo de desgaste pode ser categorizado de diferentes maneiras de acordo com a configuração do sistema tribológico. Hutchings e Shipway (1992) propõem as seguintes classificações para o desgaste abrasivo:

Desgaste de dois ou três corpos: O desgaste de dois corpos ocorre quando protuberâncias duras na contraface ou partículas duras nela aderidas causam abrasão, onde o movimento predominante é de deslizamento. No desgaste de três corpos, as partículas duras estão livres para rolar e deslizar entre duas superfícies deslizantes, e o movimento dominante é o de rolamento. A

Figura 4 mostra esquematicamente os dois tipos de configuração do desgaste abrasivo.

Figura 4 - (a) Esquema de configuração do desgaste abrasivo a dois corpos; (b) esquema de configuração do desgaste abrasivo a três corpos.



Fonte: Stachowiak (1992)

Desgaste abrasivo de alta tensão ou baixa tensão: No desgaste de alta tensão, as partículas abrasivas sofrem esmagamento durante o processo de desgaste, enquanto no desgaste de baixa tensão, as partículas permanecem intactas.

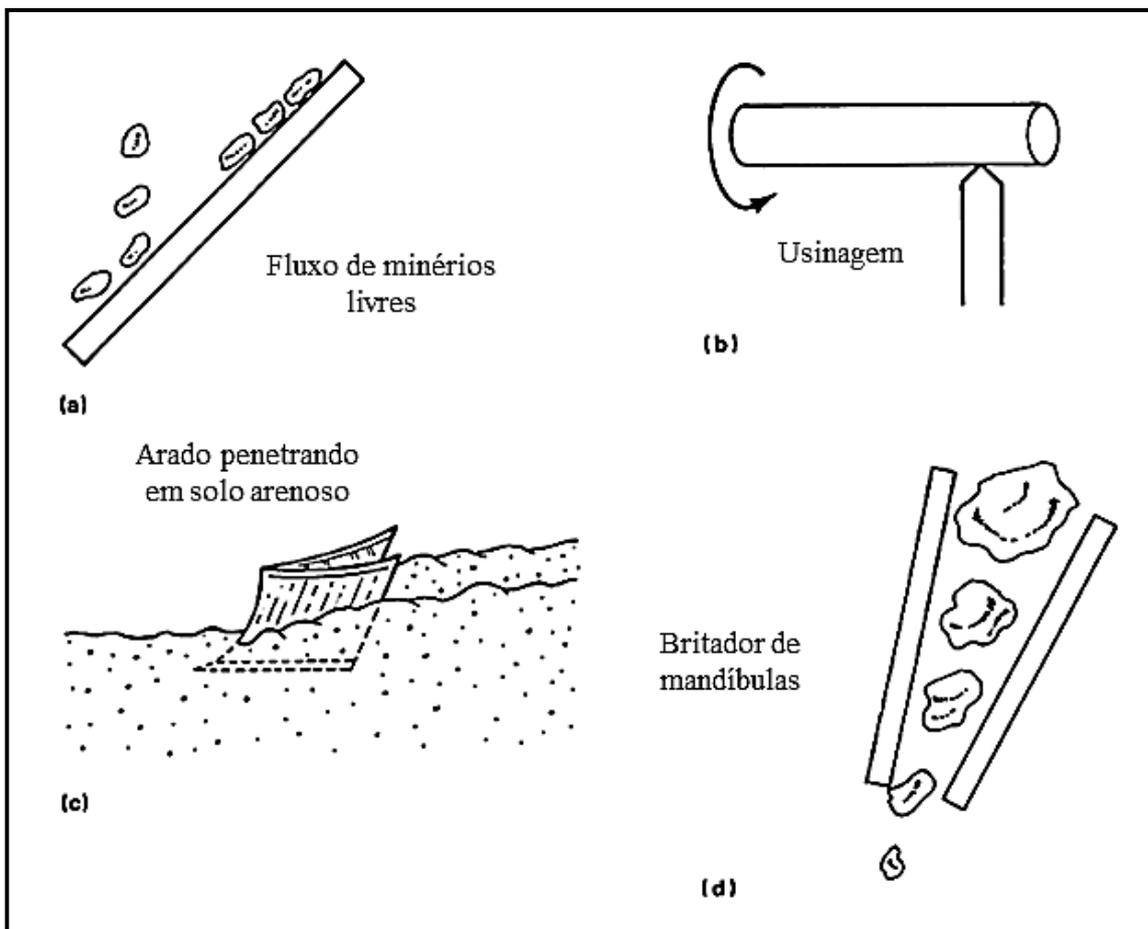
No caso da abrasão de alta tensão causada pela fragmentação de partículas abrasivas grandes e duras, é empregado o termo "abrasão por goivagem". Isso ocorre quando há remoção de material da superfície desgastada, como é observado na fragmentação de rochas em um

britador de mandíbulas (HUTCHINGS e SHIPWAY, 1992; ASTM G40-22a; BLICKENSDEFER, MADSEN e TYLCZAK, 1985).

Estas variações de movimento, contato, velocidade, tamanho, forma e dureza dos abrasivos e condições ambientais, influenciam diretamente a taxa de abrasão das superfícies, assim como, nos micromecanismos de desgastes encontrados nas superfícies dos componentes desgastados (ASTM G40-22a). Os sistemas de desgaste a dois corpos, geralmente, sofrem de 10 a 1.000 vezes mais perdas, quando comparado com sistemas de desgaste a três corpos para uma determinada carga e comprimento (ASTM G40-22a; Hutchings e Shipway).

De acordo com o ambiente de contato, os sistemas podem ser classificados como aberto ou fechado. A Figura 5 mostra quatro esquemas de sistemas de desgaste abrasivo classificados como abertos ou fechados e de dois ou a três corpos.

Figura 5 - Tipos de contato durante o desgaste abrasivo. (a) Dois corpos abertos. (b) Dois corpos fechados. (c) Três corpos abertos. (d) Três corpos fechados.



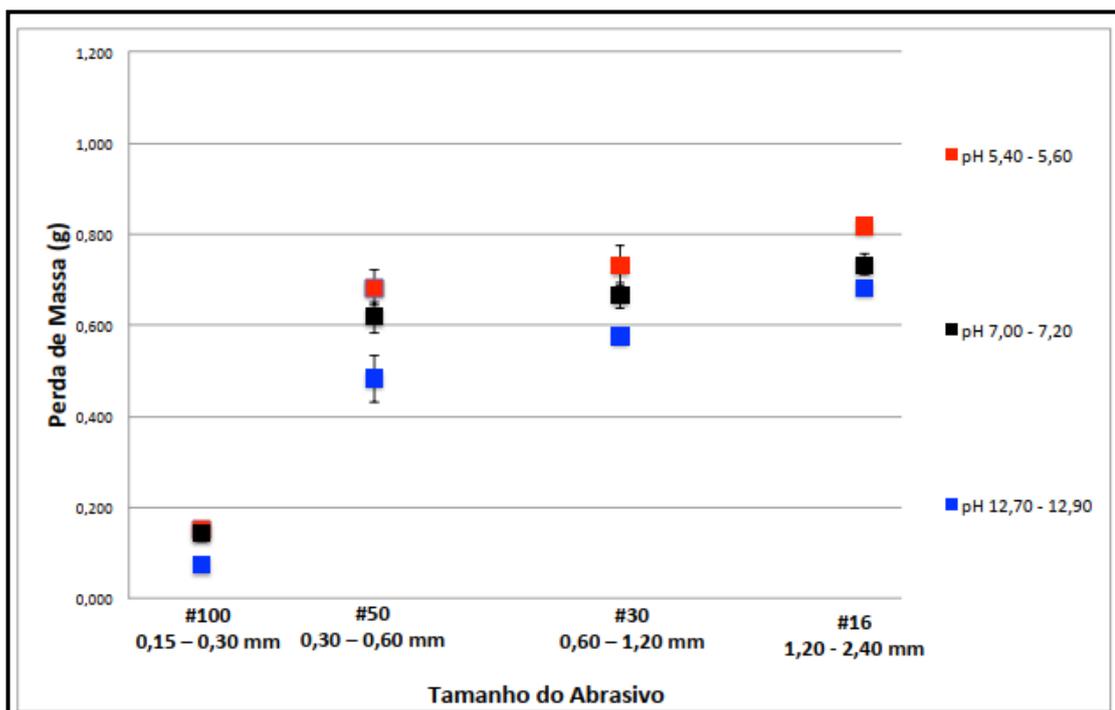
Fonte: ASM Handbook (1992)

Blickensderfer; Madsen; Tylczak (1985), em diferentes ensaios, demonstraram que, para uma carga e comprimento de caminho de desgaste específicos, a taxa de desgaste é praticamente constante quando se compara sistemas fechados com sistemas abertos. No entanto, as perdas em sistemas fechados, em geral, parecem ser maiores do que as perdas em sistemas abertos. Isso possivelmente se deve ao aumento do desgaste em sistemas fechados, que pode ser causado pela aplicação de cargas mais elevadas, algo comum nesses sistemas. Os resultados obtidos por Blickensderfer, Madsen e Tylczak indicam que a descrição e a compreensão do tribossistema são complexas e fundamentais. Na Figura 5, pode-se observar que os quatro sistemas exemplificados são de desgaste abrasivo, entretanto, os componentes e dinâmica desses sistemas diferem levando a distintas taxas de desgaste.

A intensidade do desgaste pode ser influenciada por diferentes fatores dentro do sistema tribológico. De acordo com Hutchings e Shipway (1992), as características dos abrasivos, como forma, tamanho, dureza e ambiente podem alterar a gravidade do desgaste, aumentando ou reduzindo sua severidade.

Andrade (2015) avaliou a perda de massa do aço Hadfield variando o tamanho do abrasivo e pH do meio. Em todos os meios com diferentes pH's, observou-se que houve incremento na perda de massa com o aumento do tamanho dos abrasivos. Na Figura 6 são mostrados esses resultados.

Figura 6 - Variação da perda de massa do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo e pH do meio.



Fonte: Andrade (2015)

É relevante destacar que a maior variação na perda de massa ocorre na faixa de granulometria entre #100 e #50, em outros tamanhos a variação é menos pronunciada. Além disso, o pH é um fator que influencia a intensidade do desgaste, conforme identificado por Tressia. Em ambientes ácidos, ocorre maior propensão à corrosão dos materiais imersos, o que resulta em aumento na taxa de desgaste.

Gates traz em seu trabalho uma forma de classificar o desgaste abrasivo a partir do grau de severidade do desgaste. A Tabela 2 mostra essa classificação.

Tabela 2- Classificação do desgaste abrasivo de acordo com o grau de severidade.

Situação típica	Modo de desgaste abrasivo		
	Moderado	Severo	Extremo
Tamanho da partícula	Pequeno	Médio	Grande
Restrição	Sem restrição	Parcialmente restringido por contraface	Fortemente restringido
Forma da partícula	Redonda	Angular	Angular
Tensão de contato	Baixo: Insuficiente para fraturar partículas	Moderado: suficiente para fraturar partículas	Muito alto: pode causar deformação macroscópica ou fratura frágil do material que está sendo desgastado.
Mecanismo dominante	Microsulcamento	Microcorte	Microcorte e/ ou microfratura
Termos equivalentes	<ul style="list-style-type: none"> • Abrasão de baixa tensão; • Abrasão por riscamento; • Baixa tensão a três corpos 	<ul style="list-style-type: none"> • Abrasão de alta tensão; • Abrasão por moagem; • Alta tensão a 3 corpos; • Baixa tensão a dois corpos 	<ul style="list-style-type: none"> • Abrasão por goivagem; Alta tensão a dois corpos.

Fonte: Gates, 1998.

Esta classificação é bastante interessante, contudo, existem deficiências que requerem debates mais aprofundados (GATES, 1998). Como mencionado anteriormente, existem várias maneiras de classificar o desgaste abrasivo, porém, ainda há dificuldades ao agrupar adequadamente todos os mecanismos e gravidades de forma tão objetiva como apresentado na Tabela 2.

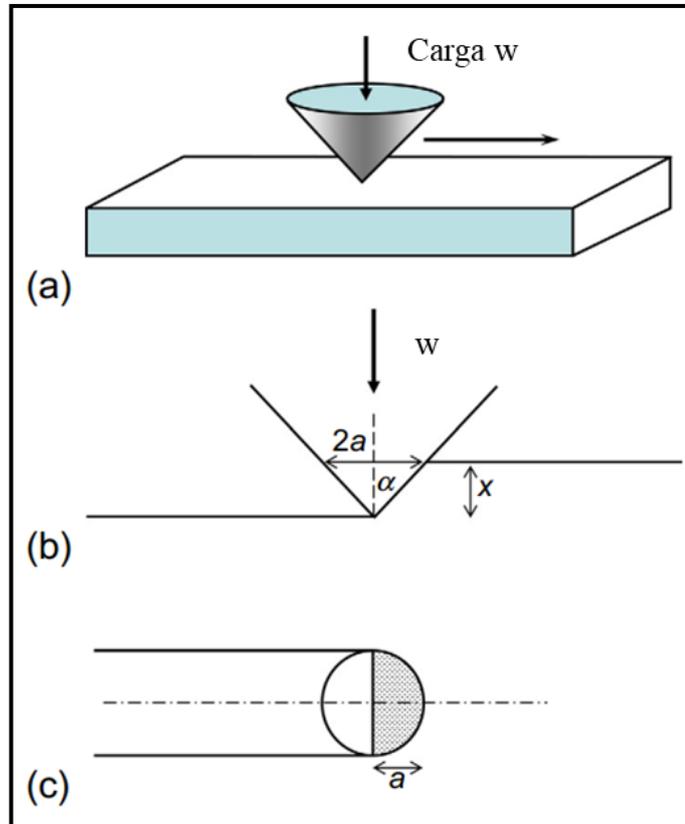
2.1.3 Desgaste abrasivo por deformação plástica

Os mecanismos de desgaste abrasivo podem envolver tanto a deformação plástica quanto a fratura frágil. Sob algumas circunstâncias, o fluxo plástico pode ocorrer sozinho, mas ambos frequentemente ocorrem juntos (BHUSHAN, 2013; HUTCHINGS; SHIPWAY, 1992).

Hutchings e Shipway (1992) apresentaram um modelo (Equação 1) que descreve o desgaste abrasivo como a remoção de material por meio de deformação plástica. Esse modelo é baseado em uma representação visual, Figura 7, em que uma partícula abrasiva cônica, com um semiângulo α e se movendo sobre a superfície de um material dúctil que se deforma sob uma pressão de indentação P . Esse movimento da partícula forma um sulco no material e o desgaste ocorre pela remoção de material deslocado. A carga normal W suportada pela partícula é sustentada pelo fluxo plástico sob a partícula, o que gera uma pressão P atuando sobre a área de contato entre a partícula e a superfície.

$$w = P \frac{\pi a^2}{2} = \frac{1}{2} P \pi x^2 \tan^2 \alpha \quad (1)$$

Figura 7 - Geometria de contato entre uma partícula abrasiva cônica idealizada e uma superfície: (a) vista em perspectiva; (b) seção em elevação; (c) seção na vista plana.



Fonte: Hutchings (1992)

O volume de material deslocado do sulco pelo cone ao deslizar uma distância l ao longo da superfície é $l a x$, ou $l x^2 \tan \alpha$. As quantidades a e x estão definidas na Figura 7. Portanto, se uma fração η do material deslocado do sulco é efetivamente removida como detritos de desgaste, então o volume de detritos de desgaste produzido por essa única partícula por unidade de distância deslizada, q , será dado pela Equação 2:

$$q = \eta x^2 \tan^2 \alpha \quad (2)$$

Substituindo o valor de x^2 da equação x, encontra-se a Equação 3:

$$q = \frac{2\eta w}{\pi P \tan \alpha} \quad (3)$$

Somando muitas partículas abrasivas e supondo que P seja a dureza de indentação do material, pode-se demonstrar que o volume total removido por unidade de distância deslizada Q é dado pela Equação 4:

$$Q = \frac{KW}{H} \quad (4)$$

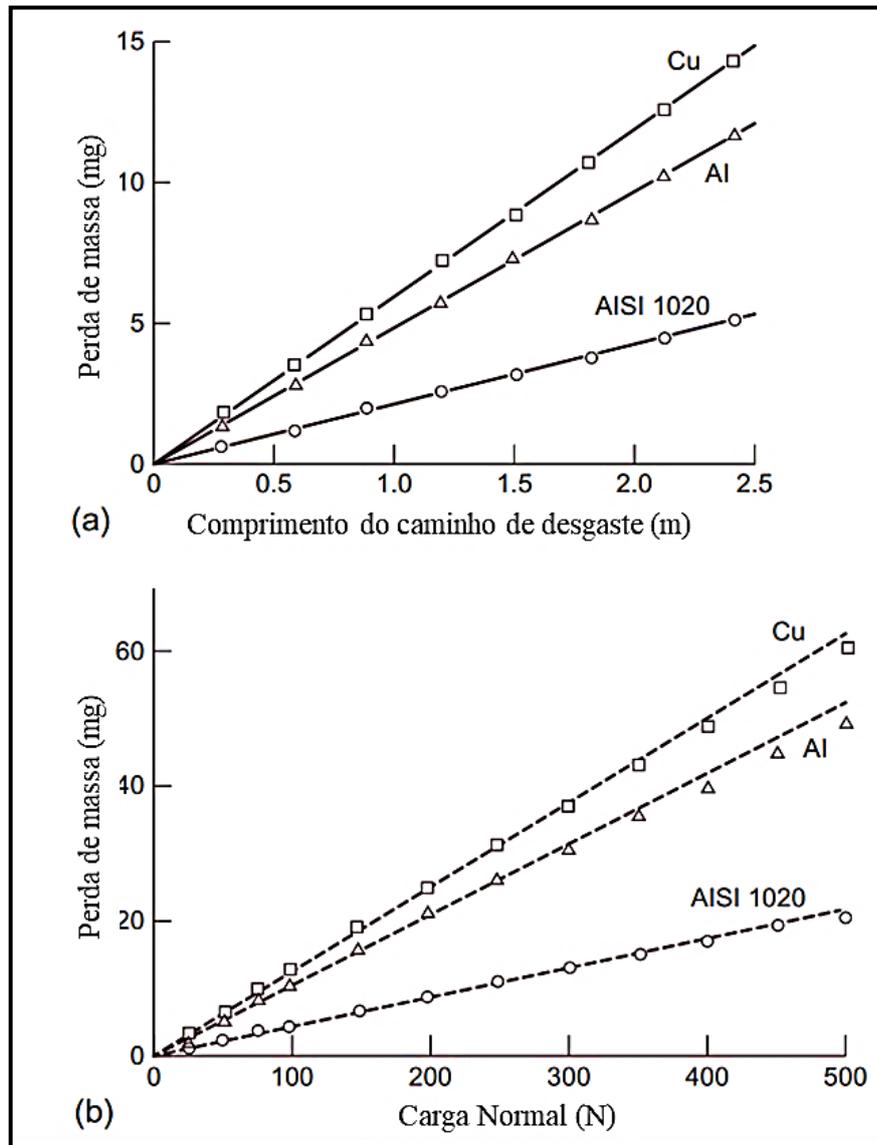
Onde W é a carga normal total aplicada e a constante K depende da fração η do material deslocado efetivamente removido, e da geometria das partículas abrasivas.

Hutchings e Shipway (1992) concluem que Equação 4 é exatamente a mesma que a equação de Archard, empregada para análise do desgaste por deslizamento, ainda que tenha sido ramificada de suposições iniciais diferentes, K , o coeficiente de desgaste adimensional, pode ser usado como medida da severidade do desgaste. Valores típicos de K no desgaste abrasivo de dois corpos (abrasão por deslizamento) em metais variam entre 5×10^{-3} e 50×10^{-3} . Para a abrasão de três corpos, K é menor, normalmente entre $0,5 \times 10^{-3}$ e 5×10^{-3} . Assim como no caso do desgaste por deslizamento, às vezes é mais útil considerar a taxa específica de desgaste k (igual a K/H), com as unidades usuais em $\text{mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$.

Do ponto de vista fundamental, a Equação 4 surge da premissa de que a taxa de desgaste (volume de material removido por unidade de distância deslizada) depende exclusivamente da carga normal e da dureza ou resistência à tração da superfície mais macia. Esta é a única relação dimensionalmente correta possível entre Q , W e H . O volume removido por unidade de distância deslizada, Q , é dimensionalmente uma área, enquanto W/H representa também uma área de grande importância nos processos de contato: a área real de contato para asperezas completamente plásticas. Assim, K pode ser entendido como a relação entre essas duas áreas.

O modelo simples de desgaste por deformação plástica que leva à equação 4, prevê que o volume de material removido pela abrasão por deslizamento deve ser diretamente proporcional à distância de deslizamento e à carga normal (HUTCHINGS e SHIPWAY, 1992). Esse comportamento é geralmente observado na prática, como ilustrado na Figura 8 para três metais dúcteis submetidos à abrasão por deslizamento de partículas de carbetto de silício.

Figura 8 - Desgaste, medido como perda de massa, para amostras de cobre, alumínio e aço carbono 0,2% (AISI 1020) submetidas à abrasão de dois corpos por partículas de carboneto de silício de 115 μm : (a) variação com a distância de deslizamento; (b) variação com a carga normal.

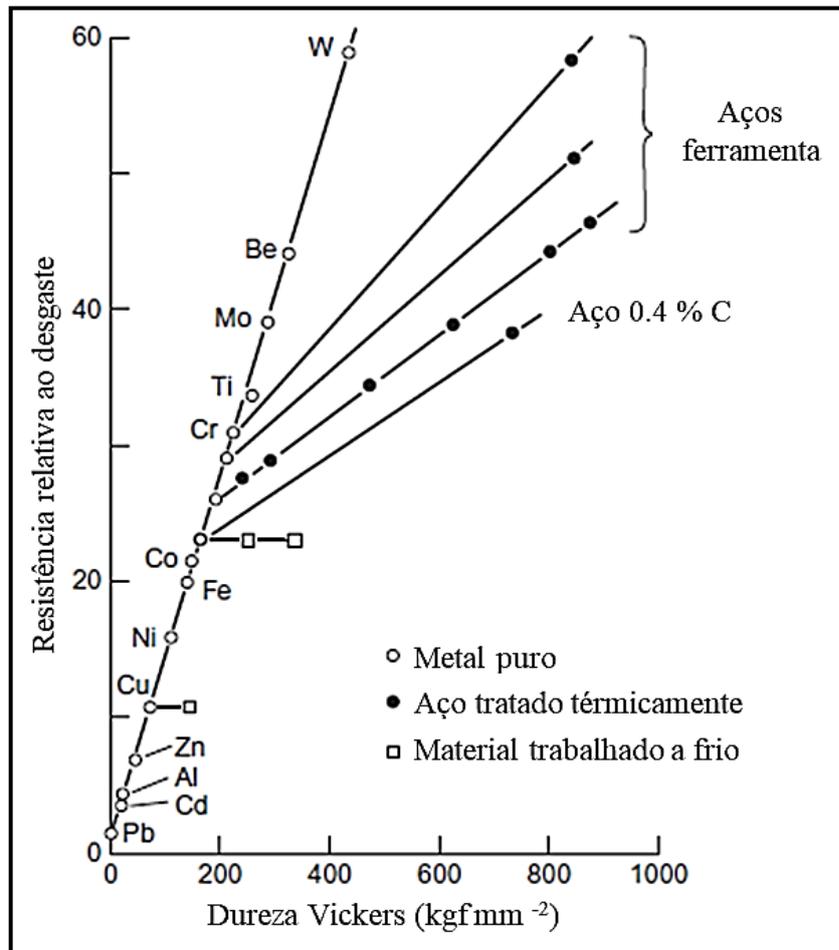


Fonte: Misra e Finnie (1981) *apud* Hutchings (1992)

A Equação 4 também sugere que a taxa de desgaste deve variar inversamente com a dureza do material, H . Muitos metais puros se comportam dessa maneira, embora ligas frequentemente apresentem um comportamento mais complexo. A Figura 9 apresenta os resultados de testes de abrasão por deslizamento em uma variedade de metais puros recozidos (pontos abertos) e aços tratados termicamente e endurecidos por trabalho (pontos sólidos). A resistência relativa ao desgaste, que é proporcional ao recíproco da taxa de desgaste volumétrico Q , é plotada em relação à dureza de indentação dos metais. Os pontos experimentais para os metais puros estão próximos da linha reta através da origem, conforme esperado pela Equação

4. No entanto, os resultados para os aços (pontos sólidos) não estão nessa linha, mas em outras linhas com inclinações diferentes.

Figura 9 - Resistência relativa ao desgaste (proporcional a 1/taxa de desgaste) para metais puros (pontos abertos) e aços tratados termicamente e endurecidos (pontos sólidos) sob condições de abrasão de dois corpos, plotada em relação à dureza de indentação.



Fonte: Misra e Finnie (1981) *apud* Hutchings (1992)

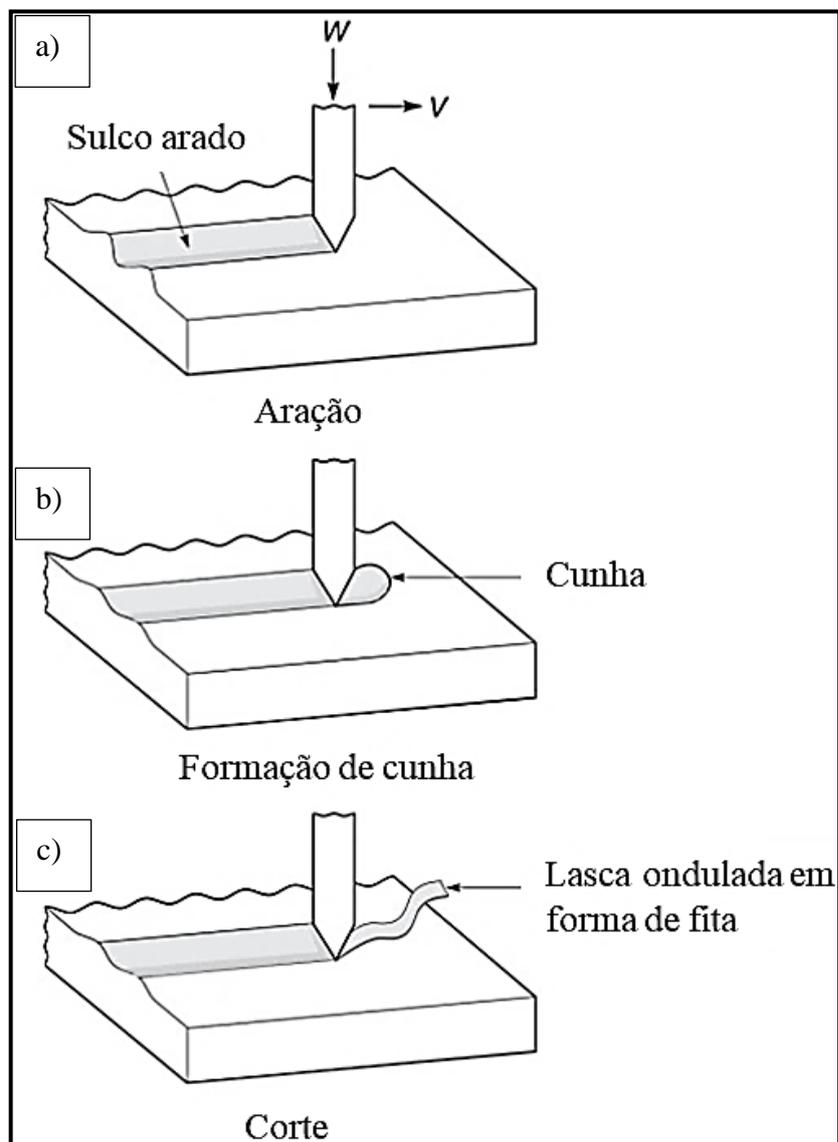
2.1.4 Micromecanismos de desgaste abrasivo

Conforme citado por Bhushan (2013), o desgaste abrasivo ocorre quando as asperezas de uma superfície rugosa e rígida ou partículas duras deslizam sobre uma superfície mais suave e causam danos à interface por meio de deformação plástica ou fratura. Em materiais dúcteis com alta tenacidade à fratura, como metais e ligas, as asperezas ou partículas duras causam danos devido ao fluxo plástico do material mais suave. Por outro lado, em materiais com baixa

tenacidade à fratura, as asperezas ou partículas geram danos por fratura frágil. Bhushan ainda ressaltava que a zona desgastada é caracterizada por fissuras significativas.

A remoção de material de uma superfície por meio de deformação plástica durante o processo de abrasão pode ocorrer por vários modos de deformação, incluindo aração ou sulcamento, formação de cunha e corte. A Figura 10 ilustra esquematicamente os micromecanismos citados.

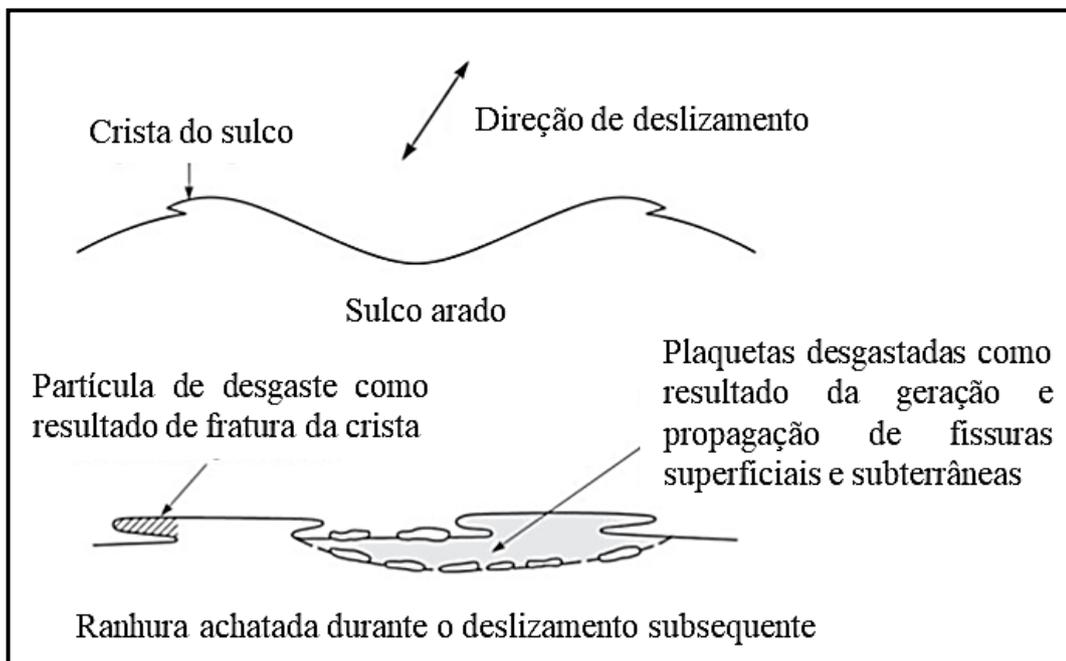
Figura 10 - Esquema dos processos de desgaste abrasivo por deformação plástica por três modos de deformação.



Fonte: Bhushan (2013)

A aração é resultante de uma série de sulcos. Na aração, o material é deslocado de um sulco para os lados sem a remoção de material, conforme mostrado na Figura 10 (a). No entanto, após a superfície ter sido arada várias vezes, a remoção de material pode ocorrer por um mecanismo de fadiga de baixo ciclo. Quando ocorre a aração, saliências se formam ao longo das laterais dos sulcos arados, independentemente de as partículas de desgaste serem formadas ou não. Essas saliências são achatadas e eventualmente se rompem após ciclos repetidos de carga e descarga, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11: Esquema do sulco arado e formação de partículas de desgaste devido ao arado como resultado da fratura da crista achatada e propagação de trincas superficiais e da subsuperfície.



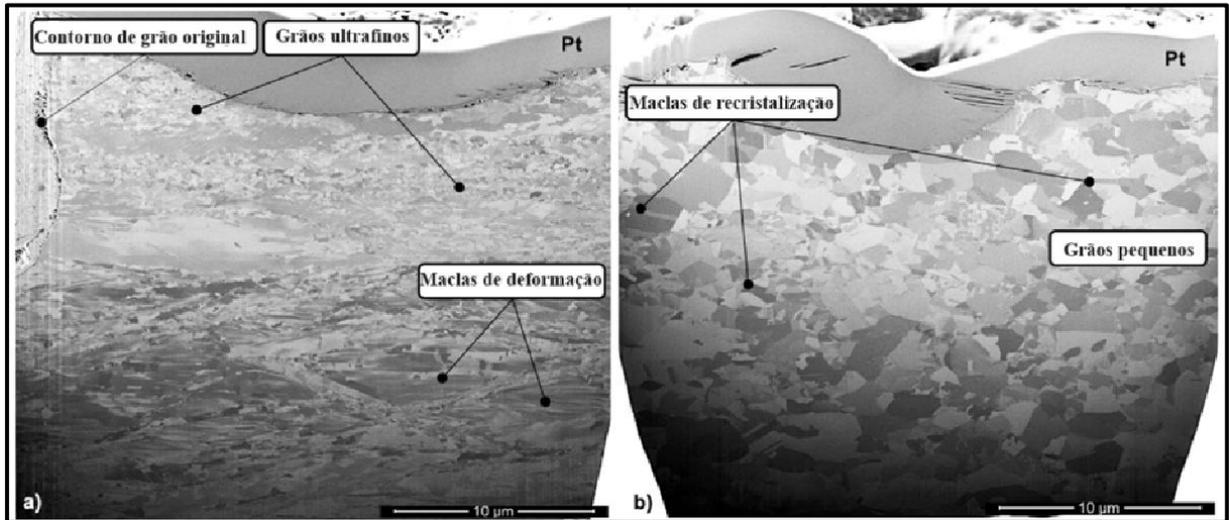
Fonte: Bhushan (2013)

O sulcamento também induz deformação plástica subsuperficial, podendo contribuir para a nucleação de trincas na superfície e abaixo dela (BHUSHAN, 1999). Cargas adicionais e ciclos de carga-descarga (fadiga de baixo ciclo, alta tensão) promovem a propagação dessas trincas, assim como de vazios e trincas pré-existentes. No caso das trincas subsuperficiais, sua propagação ocorre paralelamente à superfície, a uma certa profundidade, unindo-se a trincas vizinhas que eventualmente se estendem até a superfície. Esse processo forma elementos finos de desgaste, como ilustrado na Figura 11.

Machado et al., (2021) mostraram a relação entre o desgaste abrasivo em multiescala e o fenômeno de recristalização dinâmica na microestrutura subsuperficial. Representando a escala

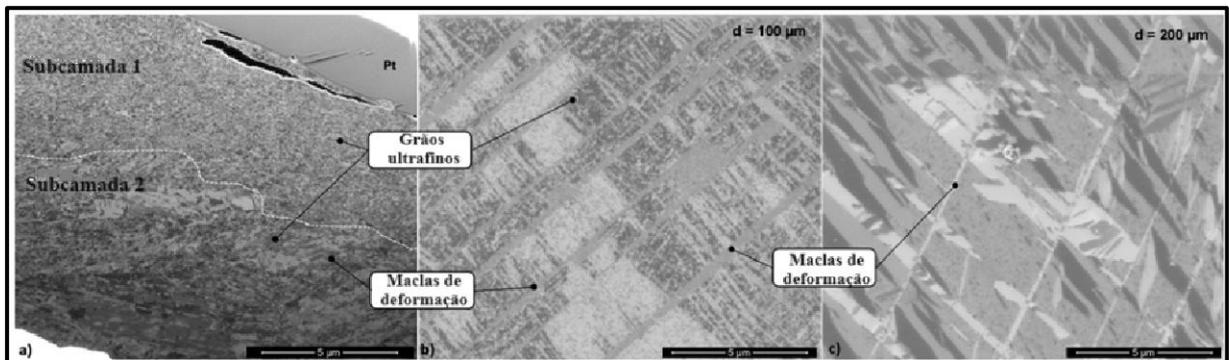
macro foi analisada a seção transversal de um revestimento de um britador cônico visto na Figura 12, como meso escala uma amostra de um britador de mandíbulas laboratorial (Figura 13) e como micro escala uma amostra do teste *scratch*, Figura 14.

Figura 12- Microestruturas da subsuperfície do revestimento do britador cônico utilizando MEV-FIB. a) Ponto I. b) Ponto II.



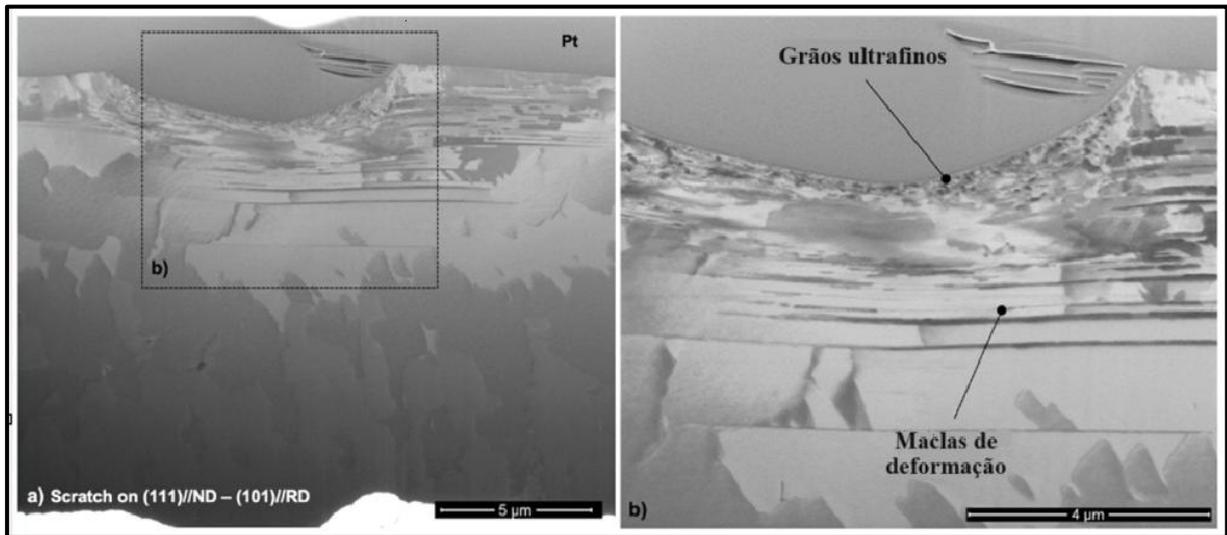
Fonte: Machado, Pereira e Sinatora (2021).

Figura 13- a) Micrografias de MEV-FIB da microestrutura na subsuperfície da amostra do britador de mandíbula. b) A 100 µm abaixo da superfície. c) A 200 µm abaixo da superfície.



Fonte: Machado, Pereira e Sinatora (2021).

Figura 14- Micrografia de MEV-FIB em vista transversal da microestrutura do risco em $\{101\}$ //RD. a) Identificação do ponto do risco e b) Alta ampliação da área do risco destacando a formação de uma camada de grãos ultrafinos e a presença de maclas de deformação.



Fonte: Machado, Pereira e Sinatora (2021).

Como pode ser observado nas Figuras 12, 13 e 14, os três tipos de mecanismos de desgaste promoveram deformações ao longo da seção transversal das amostras, como maclas e recristalização, contribuindo com a informação de Bhushan (1999)

No tipo de desgaste abrasivo caracterizado pela formação de cunha, uma extremidade abrasiva inicialmente cria uma fenda que, à medida que avança, gera uma protrusão ou uma proa à sua frente. Esse fenômeno é mais comum quando a relação entre a resistência ao cisalhamento na interface é significativamente maior do que a resistência ao cisalhamento do material em questão, geralmente variando entre 0,5 e 1. Nessa situação, apenas uma parte do material deslocado pela fenda se move para os lados, enquanto o restante assume a forma de uma cunha, como ilustrado na Figura 10 (b).

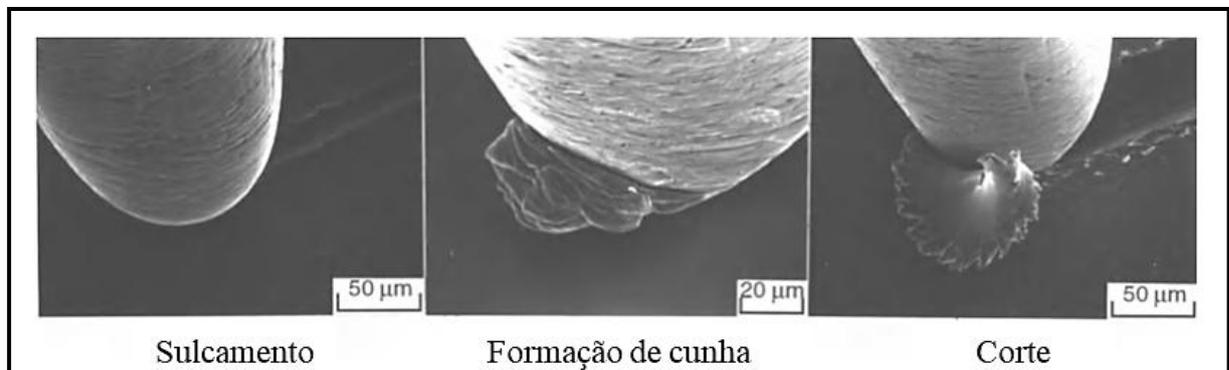
No desgaste abrasivo na forma de corte, uma ponta abrasiva com um ângulo de ataque substancial cria uma fenda e remove o material em pequenas partículas ou fitas, de maneira semelhante a um de corte de metal, como ilustrado na Figura 10 (c). Isso frequentemente resulta em uma remoção significativa de material e a quantidade deslocada em relação ao tamanho da fenda é consideravelmente reduzida.

Os fatores que controlam esses três modos de deformação são o ângulo de ataque e a resistência ao cisalhamento na interface entre as superfícies.

Hokkirigawa e Kato *apud* Bhushan (1988) observaram que em uma ponta abrasiva

afiada, há um ângulo crítico no qual pode ocorrer a transição entre a aração, formação de cunha e o corte. A magnitude desse ângulo crítico depende das propriedades do material que está sendo desgastado. Além disso, o grau de penetração desempenha um papel importante na transição do sulcamento e da formação de cunha para o corte, uma vez que o coeficiente de atrito aumenta proporcionalmente ao grau de penetração. Para materiais metálicos dúcteis, foram identificados os mecanismos de sulcamento, formação de cunhas e corte, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15: Micrografias SEM observadas do processo de desgaste durante o desgaste de latão não lubrificado por um pino de aço.,



Fonte: Hokkirigawa, K. e Kato, K. (1988) *apud* Bhushan (2013)

2.2 Materiais resistentes ao desgaste abrasivo

2.2.1 Aços Hadfield

A liga de aço manganês austenítico, denominado aço Hadfield em homenagem ao seu inventor Robert Hadfield, é uma liga de elevada tenacidade, boa capacidade de endurecimento por deformação e resistente ao desgaste abrasivo. Esta liga possui propriedades mecânicas típicas como 379 MPa de limite de escoamento, resistência à tração final de 965 MPa, alongamento em 50 mm e impacto Charpy com entalhe em V com valores entre 169 J a 22 °C e 7 J a -196 °C (DASTUR e LESLIE, 1981). Devido a capacidade de agregar resistência e plasticidade, é empregada em serviços que combinam abrasão de alta tensão e impacto pesado, como na mineração, ferrovias, terraplanagem, dragagem, perfuração, entre outros (PANCHAL, 2016; DASTUR e LESLIE, 1981; CHEN et al., 2018). Suas propriedades podem ser influenciadas por tratamentos térmicos, reforço por precipitação, temperatura de vazamento,

composição química, e estas variáveis estão relacionadas ao grau de encruamento e deformação plástica, que leva a uma energia de falha de empilhamento consideravelmente baixa, um atributo muito propício à maclação.

2.2.1.1 Influência da composição química nas propriedades mecânicas

A norma ASTM A128 que abrange este aço permite faixas de composição de 1,0 a 1,4% em peso de carbono e 10,0 a 14,0% em peso de manganês (CHOWDHURY et al., 2017). No entanto, há muitas variações na composição química original do aço manganês austenítico. As variações composicionais geralmente envolvem mudanças no carbono e manganês, com ou sem adição de ligas adicionais, como cromo, níquel, molibdênio e titânio. A Tabela 3, mostra a composição química do aço Hadfield conforme as especificações determinadas pela norma.

Tabela 3 - Composição química do aço Hadfield de acordo com a norma ASTM A128

Classe	Composição (% em peso)						
	C	Mn	Cr	Mo	Ni	Si	P
A	1,05 – 1,35	11,0 min	-	-	-	1,00 máx	0,07 máx
B-1	0,9 – 1,05	11,5 – 14,0	-	-	-	1,00 máx	0,07 máx
B-2	1,05 – 1,2	11,5 – 14,0	-	-	-	1,00 máx	0,07 máx
B-3	1,12 – 1,28	11,5 – 14,0	-	-	-	1,00 máx	0,07 máx
B-4	1,2 – 1,35	11,5 – 14,0	-	-	-	1,00 máx	0,07 máx
C	1,05 – 1,35	11,5 – 14,0	1,5 – 2,5	-	-	1,00 máx	0,07 máx
D	0,7 – 1,3	11,5 – 14,0	-	-	3,0 – 4,0	1,00 máx	0,07 máx
E-1	0,7 – 1,3	11,5 – 14,0	-	0,9 – 1,2	-	1,00 máx	0,07 máx
E-2	1,05 – 1,45	11,5 – 14,0	-	1,8 – 2,1	-	1,00 máx	0,07 máx
F	1,05 – 1,35	6,0 – 8,0	-	0,9 – 1,2	-	1,00 máx	0,07 máx

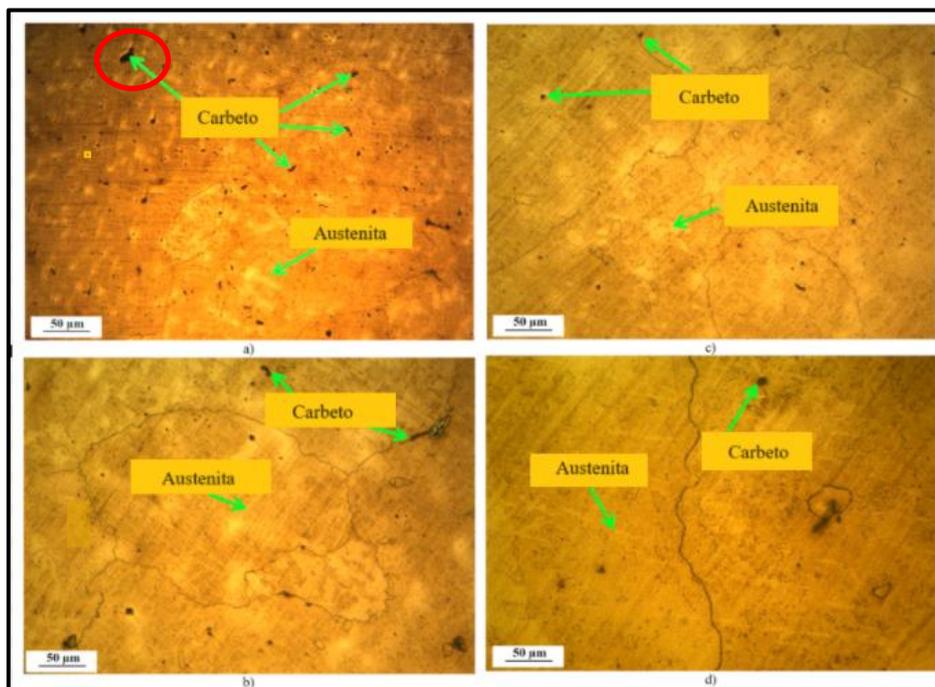
Fonte: ASTM A128

Chowdhury *et al.* (2017) discutem que a variação do teor de carbono na faixa de composição do Hadfield não afeta significativamente a elongação. No entanto, a resistência à tração e a ductilidade aumentam com o incremento do teor de manganês. Os autores ainda ressaltam que o aumento no teor de manganês entre 10,0% e 14,0% em peso não resulta

necessariamente em um aumento na resistência ao escoamento. Ainda mencionam que o aço manganês fundido apresenta limitações devido à formação inevitável de carbonetos, o que compromete a ductilidade, tenacidade ao impacto e pode promover a formação de perlita. Para a produção de aço Hadfield de alta qualidade, o método convencional envolve o tratamento térmico por austenitização seguido de resfriamento rápido em água.

Para garantir a solubilização completa dos carbonetos, é necessário que o tratamento de solubilização seja realizado entre 30-50 °C acima da Temperatura de Martensita em Equilíbrio (ACM). A temperatura de fusão deve ser mantida abaixo de 1470 °C para evitar o crescimento excessivo do grão e minimizar a segregação química. A faixa típica de temperatura para o tratamento térmico de solubilização situa-se entre 1010-1120 °C. É essencial utilizar uma taxa de aquecimento moderada para prevenir a formação de trincas internas, enquanto taxas de resfriamento elevadas é preferível para evitar a precipitação de carbonetos. Jafarian et al. (2021) investigou o efeito da temperatura de austenitização nas propriedades mecânicas do aço Hadfield. Foram empregues quatro temperaturas distintas: 1000 °C, 1075 °C, 1150 °C e 1225 °C. A Figura 16 exibe as micrografias do aço austenitizado nas quatro temperaturas mencionadas.

Figura 16 - Micrografias ópticas do aço Hadfield para as amostras austenitizadas a) 1000 C, b) 1075 C, c) 1150 C, d) 1225 C.

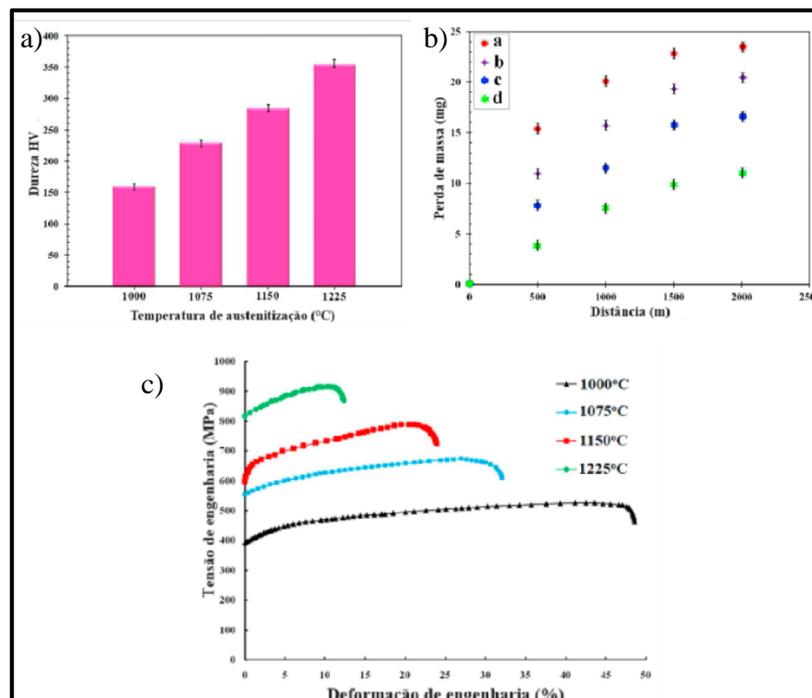


Fonte: Jafarian (2021)

Nas micrografias da Figura 16, o autor diferencia o que são carbonetos e austenita, entretanto, cabe ressaltar em algumas marcações, como indicado pelo círculo vermelho, possivelmente se trata de uma porosidade. Normalmente este tipo de material apresenta alguns poros como característica.

Os autores concluem que as análises microscópicas demonstraram que o incremento da temperatura de austenitização durante o tratamento térmico do aço Hadfield resulta em um tamanho de grão de austenita maior e quantidades menores de carbonetos. E este efeito influenciou nos resultados obtidos na caracterização mecânica. Tal como, aumento do limite de escoamento e resistência a tração, redução da tenacidade e ductilidade, redução da energia de impacto no ensaio Charpy e aumento da dureza. Adicionalmente, a capacidade de resistência ao desgaste do aço Hadfield ampliou-se à medida que houve aumento na temperatura de austenitização, principalmente devido à elevada resistência ao escoamento que o aço apresentou em temperaturas de austenitização mais elevadas. Esta constatação está em consonância com o relato de Bhushan (2013) e Zum Gahr (1987), que destacam a influência do tamanho de grão nas propriedades mecânicas. A Figura 17 mostra alguns dos resultados obtidos a partir do estudo realizado por Jafarian *et al* (2021), incluindo os resultados de perda de massa, em que foi utilizado como teste de desgaste o equipamento pino disco.

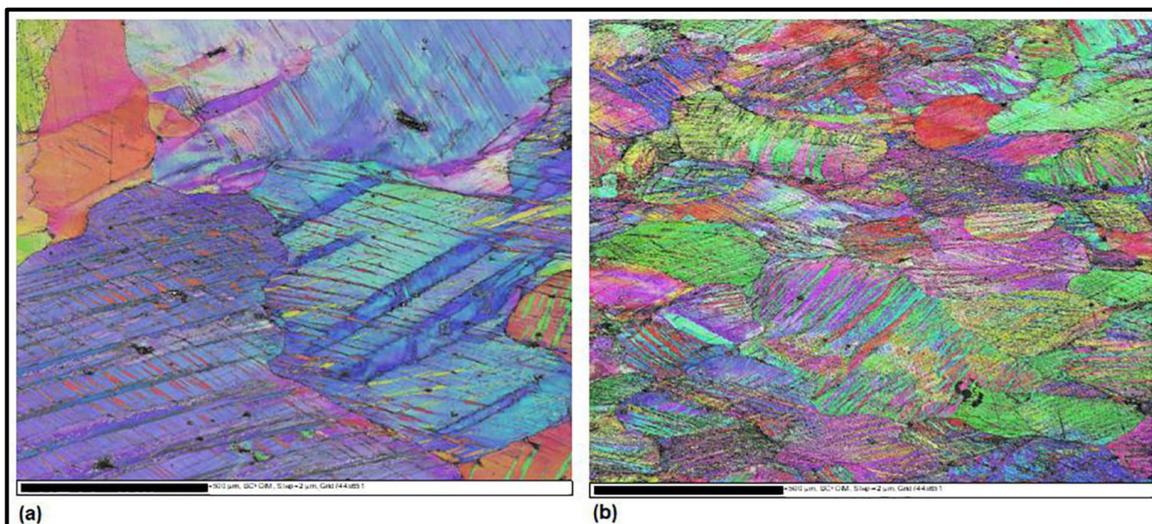
Figura 17 - Resumo gráfico dos resultados obtidos por Jafarian *et al*; (a) Gráfico de influência da temperatura de austenitização na dureza; (b) Perda de massa em diferentes temperaturas de austenitização; (c) Gráfico tensão-deformação.



Fonte: Jafarian (2021)

Venturelli, Albertin e De Farias Azevedo (2018), avaliaram a influência do refino do grão da austenita nas propriedades de tração e impacto do aço Hadfield fundido. A caracterização microestrutural revelou que o tamanho de grão de austenita do aço Hadfield fundido inoculado com Hf é cinco vezes menor ($600\ \mu\text{m}$ versus $3000\ \mu\text{m}$) do que o do aço Hadfield fundido não refinado. Os resultados dos testes de tração indicaram que a redução do tamanho de grão de austenita do aço Hadfield fundido causou um pequeno aumento na resistência ao escoamento e grande aumento na resistência à tração (37%), no expoente de endurecimento por deformação (50%), na elongação (53%), na tenacidade (88%) e na energia de impacto Charpy (13%) e densidade de maclas. Os autores concluem que a deformação plástica por formação de maclas, que foi promovida pelo refinamento do tamanho de grão de austenita desempenhou um papel significativo na melhoria das propriedades mecânicas do aço Hadfield fundido. A Figura 18 mostra as imagens de EBSD da seção transversal do Hadfield fundido não refinado e do Hadfield fundido refinado, ressaltando a diferença no tamanho de grão e densidade de maclas.

Figura 18- Imagem de EBSD da seção transversal adjacente à superfície dos corpos de prova de tração mostrando a presença de maclas mecânicas: (a) Aço Hadfield fundido não refinado e; (b) Aço Hadfield fundido refinado com Hf.

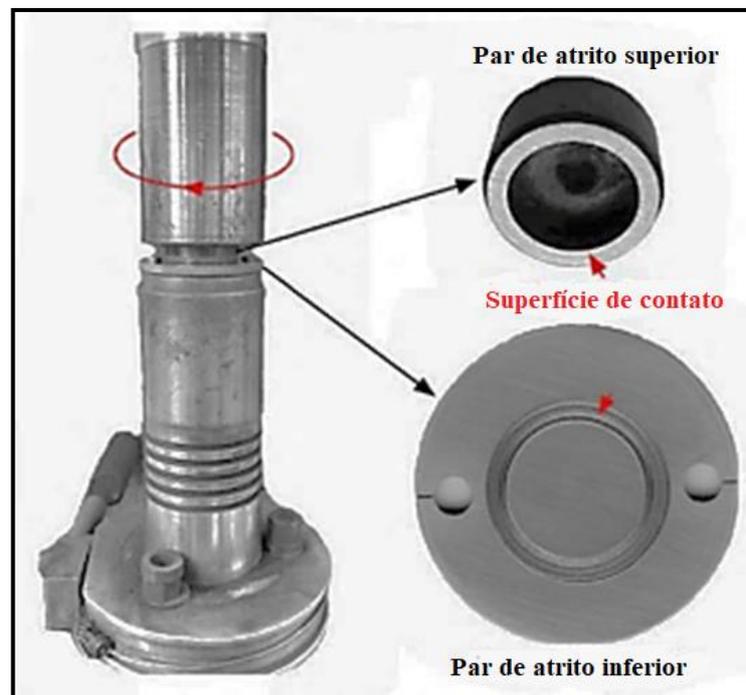


Fonte: Venturelli; Albertin e Azevedo (2018).

No trabalho realizado por Chen *et al* (2018), foram analisadas duas ligas de aço Hadfield com o objetivo de comparar sua resistência ao desgaste e capacidade de endurecimento. O experimento envolveu o uso de uma liga convencional (Mn12) e outra modificada com a adição de Cr e N (Mn12CrN). A

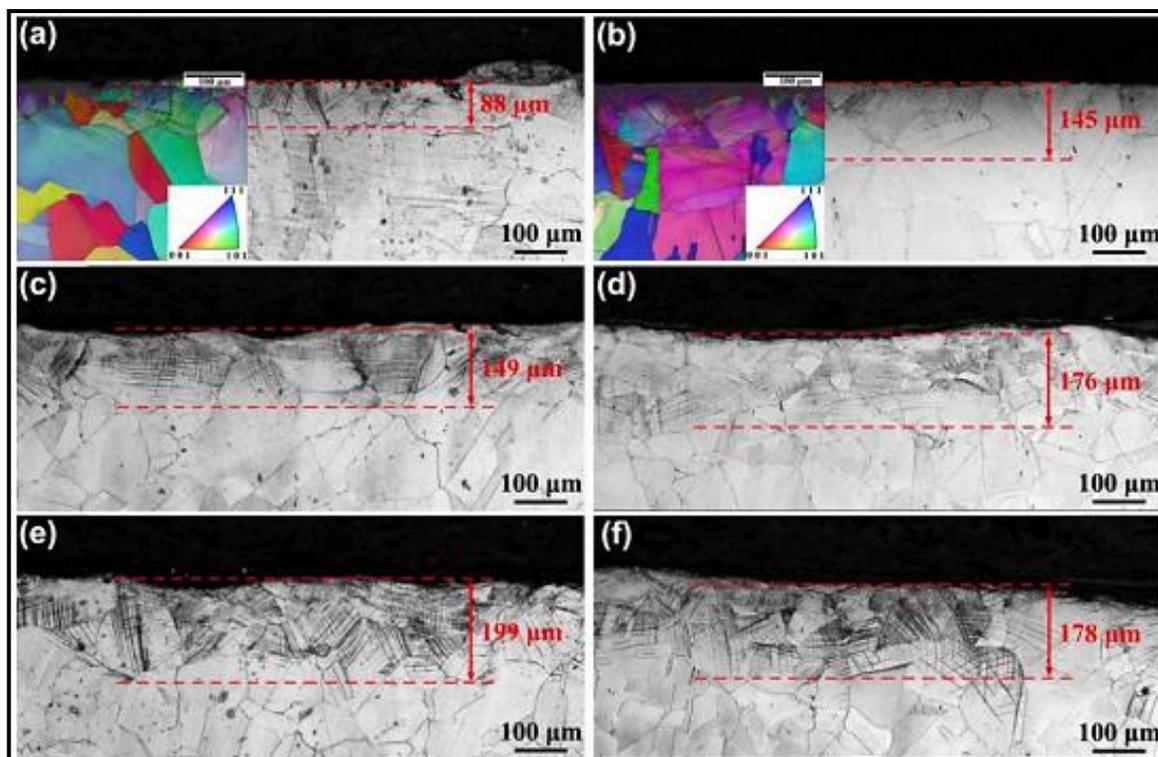
Figura 19 mostra o teste utilizado, que consistiu em um ensaio de desgaste por deslizamento realizado em uma máquina MMU-5G, enquanto a Figura 20 apresenta imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da seção transversal após o teste de desgaste. Essas imagens mostram a profundidade do encruamento nas duas ligas sob diferentes cargas aplicadas. O autor conduziu o experimento utilizando três diferentes níveis de carga (500 N, 1000 N e 1500 N), mantidos por 150 minutos cada.

Figura 19 - Máquina de teste de desgaste por deslizamento MMU-5G.



Fonte: Chen *et al* (2018)

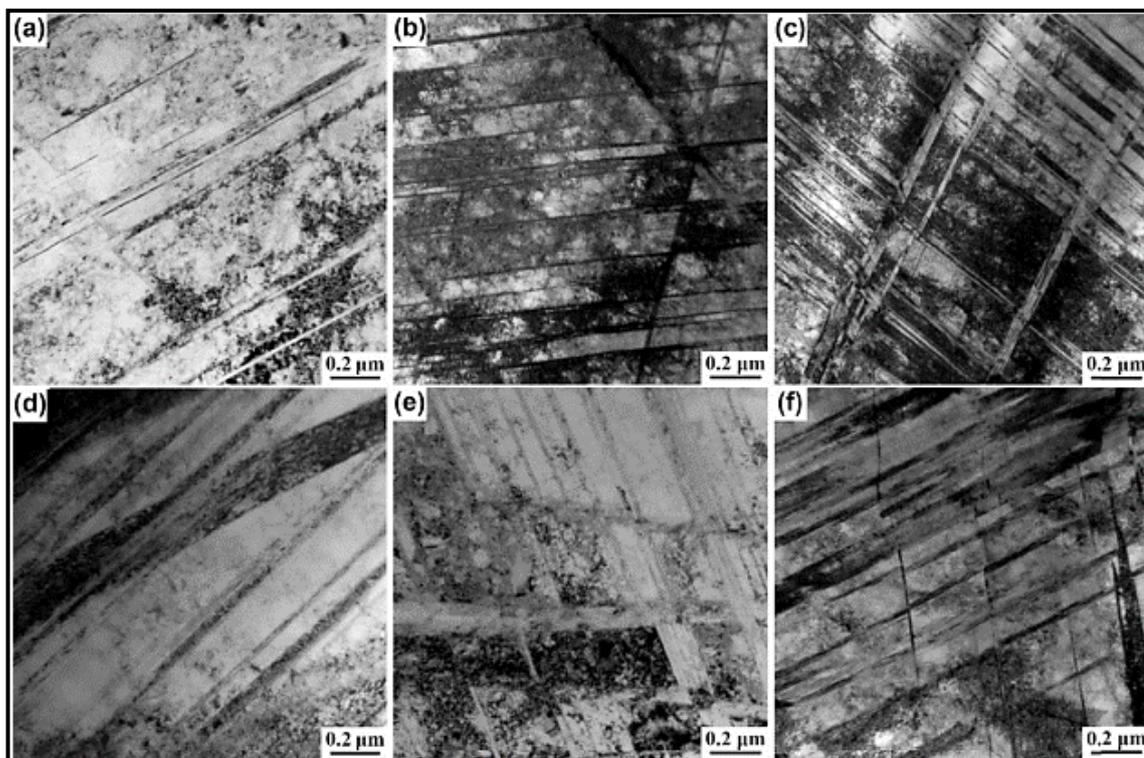
Figura 20: Imagem de MEV e mapa EBSD da seção transversal (a) Mn12CrN 500 N; (b) Mn12 500 N; (c) Mn12CrN 1000 N; (d) Mn12 1000 N; (e) Mn12CrN 1500 N; (f) Mn12 1500 N.



Fonte: Chen *et al* (2018)0

A adição das ligas de Cr e N resultou na diminuição da Energia de Falha de Empilhamento (EFE) do material, devido à maior densidade de maclas de deformação. Esse fenômeno contribuiu para maior resistência à deformação inicial, como visto na Figura 21, na qual a profundidade de encruamento se apresentou reduzida. De acordo com o autor, quando submetido a cargas de 1000 N (Figura 21c) e 1500 N (Figura 21 e), observa-se um aumento de 69,3% e 126,1%, respectivamente, na profundidade da camada de maclas de deformação no aço Mn12CrN em comparação com aquelas sob 500 N. Por outro lado, no aço Mn12, os incrementos na profundidade foram de apenas 21,4% e 22,8%, respectivamente. Indicando que, apesar do grau de deformação plástica ser menor no aço Mn12CrN em relação ao aço Mn12, a tendência à formação de maclas de deformação foi mais pronunciada no aço Mn12CrN à medida que a carga de desgaste aplicada aumentou. A Figura 21 mostra as superfícies desgastadas e a presença de maclas via Microscópio Eletrônico de Transmissão.

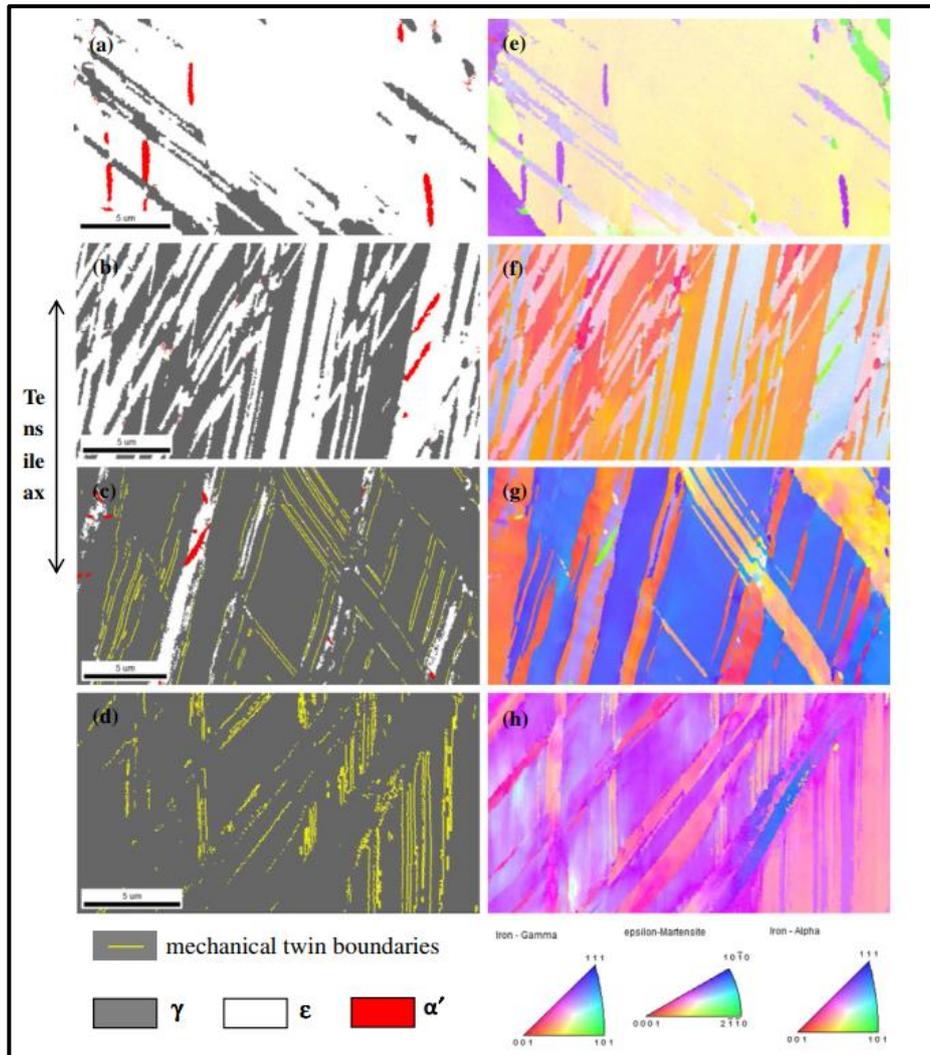
Figura 21: Micrografias de TEM da superfície desgastada dos aços: (a) aço Mn12CrN-500 N; (b) aço Mn12CrN-1000 N; (c) aço Mn12CrN-1500 N; (d) aço Mn12-500 N; (e) aço Mn12-1000 N; (f) aço Mn12-1500 N.



Fonte: Fonte: Chen et al, 2018.

Xiong et al. (2015) estudaram o efeito da energia de falha de empilhamento no encruamento de aços de alto manganês Fe–Mn–Si–C, variando os teores de silício e carbono. Observaram que somente maclas mecânicas foram produzidas no aço Hadfield convencional (Figura 22 (a)), em contraste, poucas maclas mecânicas foram observadas nos aços Fe–17Mn–6Si–0,3C (Figura 22 (b)) e Fe–17Mn–5Si–0,5C (Figura 22 (c)). Nestes foram observadas a presença de muitas ϵ -martensitas. Além disso, algumas α' -martensitas foram introduzidas dentro das bandas de ϵ -martensita. Curiosamente, algumas maclas mecânicas foram induzidas no aço Fe–17Mn–3Si–0,6C, além de ϵ -martensita e algumas α' -martensitas dentro delas.

Figura 22- Mapas de EBSD mostrando microestruturas na fratura dos aços Fe–17Mn–6Si–0,3C, Fe–17Mn–5Si–0,5C, Fe–17Mn–3Si–0,6C e Hadfield tratados por solução. (a) a (d) Mapas de fases juntamente com o caráter das fronteiras de grão; (e) a (h) Figura de polo inverso

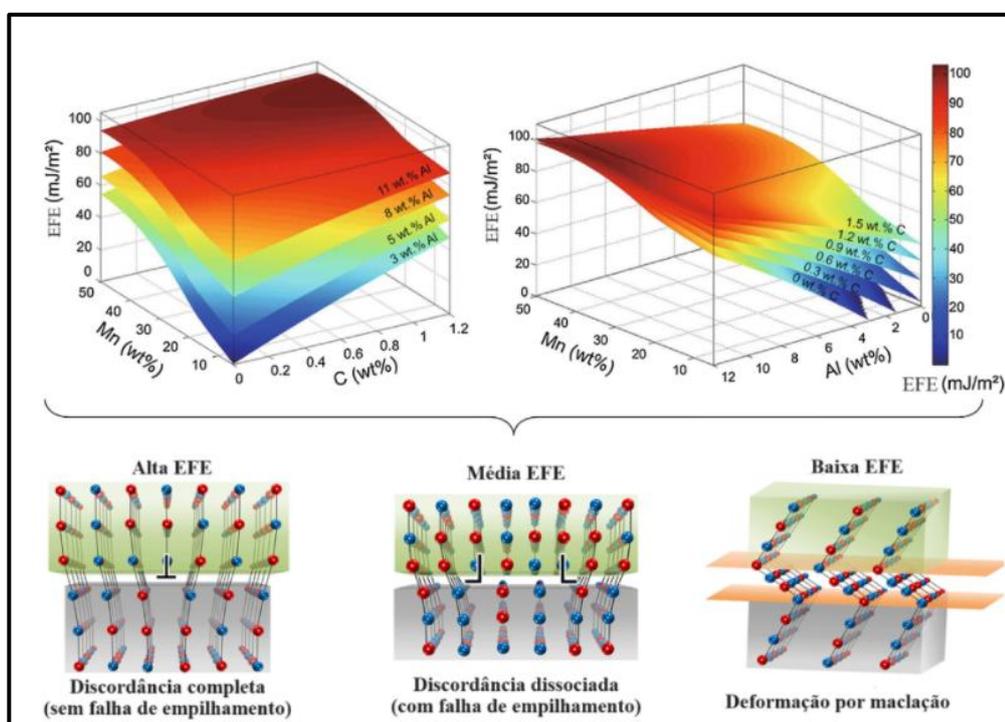


Fonte: Xiong et al. (2015)

Os autores concluem que a taxa de encruamento dos aços Fe–17Mn–Si–C com menor SFE foram todas superiores à do aço Hadfield para deformações abaixo de 0,28, porque a quantidade de martensita induzida por deformação e maclas mecânicas foram maiores nos aços Fe–17Mn–Si–C do que no aço Hadfield. As observações microestruturais mostraram que a transformação de martensita induzida por deformação ou a maclagem mecânica ocorria quase no início da deformação nos aços Fe–Mn–Si–C, enquanto as maclas mecânicas eram produzidas no aço Hadfield somente quando a deformação era superior a 0,03. O menor SFE nos aços Fe–Mn–Si–C foi responsável pelo início mais precoce da transformação de matensitas induzidas por deformação ou da formação de maclas mecânicas.

Chowdhury et al. (2017) *apud* Song *et al* (2014), mostrou baseando-se em um modelo termodinâmico, avaliaram a EFE (energia de falha de empilhamento) em função da composição da liga, e pode ser visto na Figura 23. A alteração no nível de EFE traz implicações significativas quanto ao mecanismo de deformação dominante. Por exemplo, uma energia de falha de empilhamento muito baixa promove a maclação, enquanto uma EFE alta implica em plasticidade mediada por discordâncias completas. O valor intermediário de EFE está associado à prevalência de deslizamento estendido (conectado por um plano de falha de empilhamento). Os efeitos observados podem ser rastreados até como os defeitos na rede discreta seriam nucleados como resultado da magnitude da EFE.

Figura 23- O efeito do teor de Al e C nos níveis de energia de falha de empilhamento (EFE) conforme previsto por Song *et al*.



Fonte: Chowdhury et al. (2017)

Andrade (2021), analisou diferentes composições de aço Hadfield quanto à resistência ao desgaste utilizando o ensaio pino-disco. A Tabela 4 apresenta as composições examinadas no estudo.

Tabela 4- Composição química das ligas Hadfield modificadas.

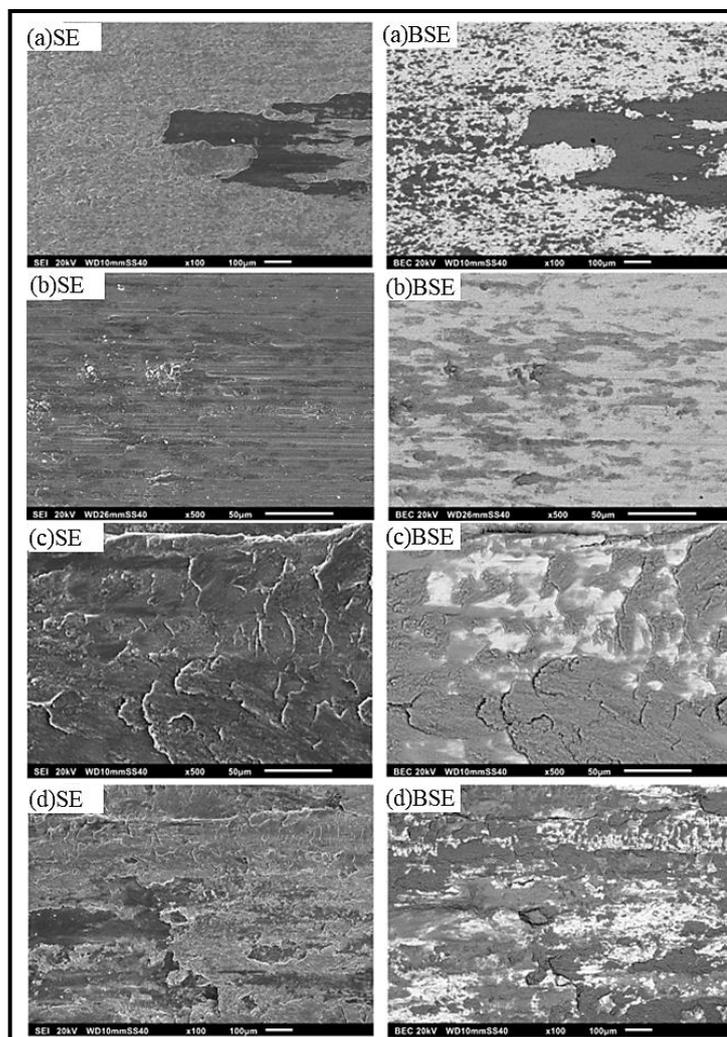
Liga	C	Mn	Cr	Mo	Si	N	Al
1.1	1,29	12,6	1,74	0,91	0,12	0,0262	0,0009
1.2	1,29	18,3	1,79	0,92	0,19	0,0323	0,0005
1.3	1,01	12,6	1,76	0,96	0,26	0,0099	0,0018
1.4	1,5	12,4	1,74	0,91	0,14	0,0109	0,0012
2.5	1,24	12,6	2,47	0,95	0,48	0,0467	0,0013
2.6	0,98	18,2	2,47	0,96	0,62	0,0739	0,0005
2.7	0,97	18,3	2,45	0,94	0,62	0,0600	0,0005
2.8	1,02	12,7	2,51	0,93	0,56	0,0504	0,0015
3.9	0,81	18	6,5	0,95	0,61	0,1250	0,0005
3.10	0,81	12,9	6,4	0,96	0,58	0,0956	0,001
3.11	0,78	12,8	8,7	0,96	0,58	0,1200	0,014
3.12	0,63	18,1	13,1	0,97	0,62	0,2660	0,0005

Fonte: Andrade, 2021

Com base nos resultados obtidos pelo autor, foi identificado que as composições que continham adições de Cr e N exibiram resistência ao desgaste superior à medida que a força normal aumentava de 50 N para 500 N. A liga com a maior porcentagem de cromo evidenciou mecanismo de desgaste predominantemente oxidativo, como ilustrado na Figura - 24.

Esta observação destaca a influência positiva das adições de Cr e N na melhoria da resistência ao desgaste dessas ligas de aço Hadfield, especialmente em níveis mais elevados de força normal. Além disso, a presença do mecanismo de desgaste oxidativo na liga com maior teor de cromo sugere que essa adição desempenhou um papel significativo na resposta do material ao processo de desgaste. Hutchings confirma que a camada de óxido atua como uma barreira entre as superfícies metálicas, reduzindo o contato direto entre elas e, conseqüentemente, diminuindo o atrito e a adesão durante o deslizamento ou abrasão.. Adicionalmente, as ligas com concentrações mais elevadas de nitrogênio (N) e cromo (Cr) demonstraram uma capacidade de deformação superior em comparação com as outras ligas. Isso fica evidenciado pela camada encruada de menor espessura e menor dureza, bem como pelas frações volumétricas menores observadas. Estes resultados entram em consonância com os obtidos por Chen *et al* (2018). A Figura 24 mostra as imagens de MEV-SE e BSE das superfícies desgastadas da liga 3.12 com diferentes cargas.

Figura - 24: MEV-SE e BSE da superfície da liga 3.12 ensaiada com as cargas; (a) 50 N; (b) 100 N; (c) 400 N; (d) 500 N.



Fonte: Andrade (2021)

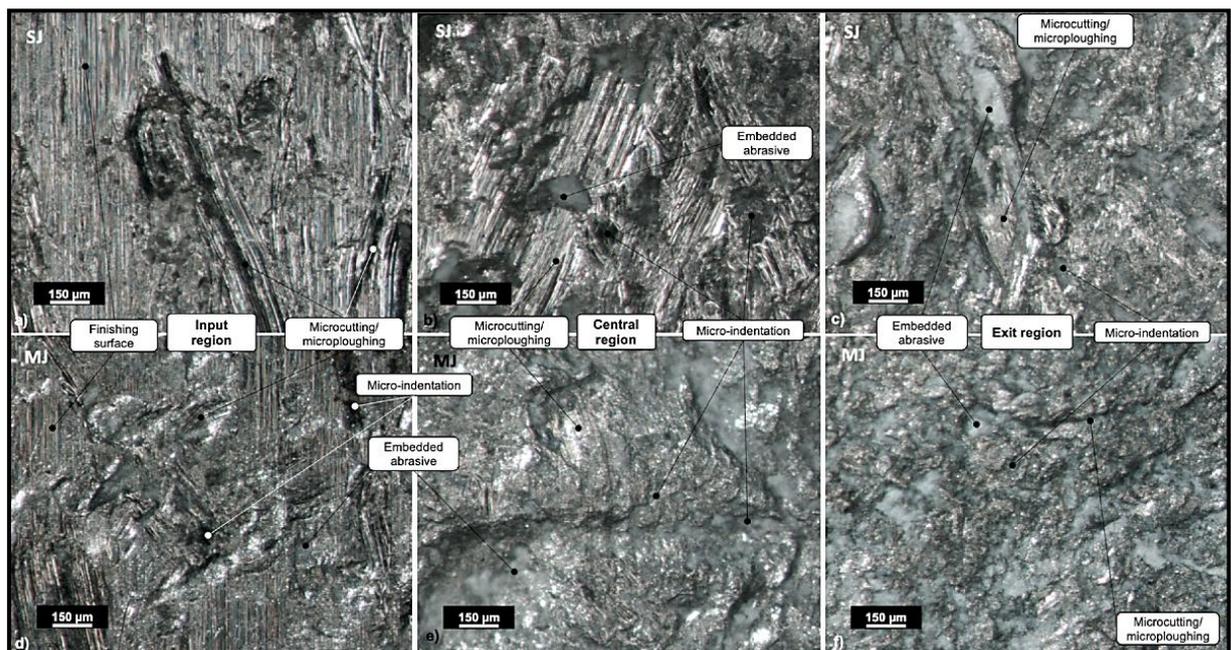
Durante os ensaios e diversas análises conduzidas, as ligas exibiram desempenhos variados à medida que a carga e o tempo de aplicação do ensaio eram alterados. Por exemplo, a liga 2.8, caracterizada por um teor de carbono mais baixo, demonstrou um desempenho superior no ensaio de impacto. Nesse contexto, Andrade concluiu enfatizando a importância de investigar o comportamento do aço sob diferentes níveis de carga. Ainda salientou que o comportamento do material e o coeficiente de atrito variam ao longo dos testes, influenciados não apenas pela carga, mas também pela composição química específica do material.

Essa conclusão destaca a complexidade das interações entre as propriedades do material, a carga aplicada e o tempo de teste. Ela ressalta a necessidade de uma análise abrangente e cuidadosa para entender completamente como o aço se comporta sob diferentes

condições, levando em consideração fatores como a composição química para uma avaliação precisa do desempenho em aplicações específicas.

Machado (2017) avaliou a resistência ao desgaste abrasivo de aço Hadfield com 12% e 20% de Mn por meio do ensaio britador de mandíbulas. Os resultados obtidos mostraram que o desgaste entre as mandíbulas fixa e móvel tiveram diferenças de 55% para 12Mn e 32% para 20Mn, além disso, o micromecanismo de desgaste predominante ao longo das mandíbulas fixa e móvel são diferentes. A mandíbula móvel teve predominância de microindentações, apesar de ter alguns arranhões e a mandíbula fixa tem o microcorte e o microsulcamento como micromecanismos predominantes. A Figura 25 mostra as imagens estereográficas da superfície da mandíbula móvel e fixa em 3 posições: entrada, centro e saída das placas do britador.

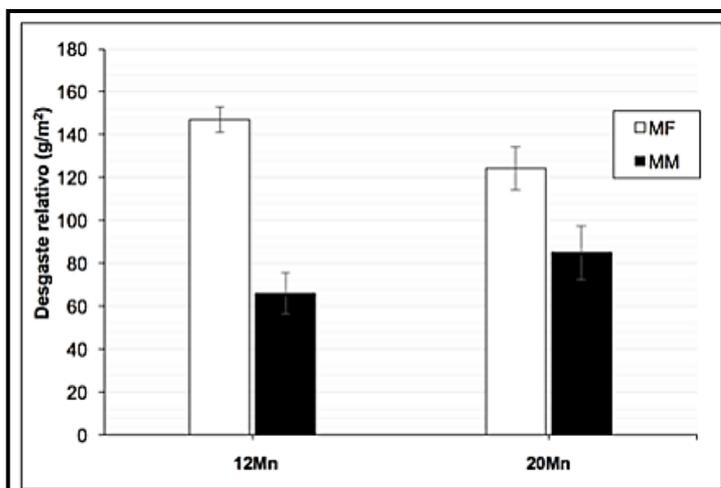
Figura 25- Imagens estereográficas da superfície da mandíbula móvel e fixa em 3 posições: Entrada, centro e saída das placas do britador. (a) e (d) Região de entrada; (b) e (e) região central; (c) e (f) Região de saída.



Fonte: Machado (2017)

Nota-se a partir das imagens feitas por Machado (2017) que em um mesmo componente pode-se encontrar diferentes mecanismos de desgastes, assim como, em dois componentes que desempenham a mesma função, como as mandíbulas, que diferem em seu movimento, geram taxas de desgaste distintas. A Figura 26 mostra o gráfico de taxa de desgaste relativo comparando as taxas de desgastes das duas mandíbulas (fixa e móvel) dos aços 12Mn e 20 Mn.

Figura 26- Desgaste relativo das mandíbulas fixa e móvel dos aços 12Mn e 20Mn.



Fonte: Machado, 2017.

2.2.2 Ferro Fundido branco alto cromo

Os ferros fundidos brancos (FFB) com alto teor de cromo são ligas de alto desempenho comumente empregadas no ramo industrial onde a resistência a abrasão e a capacidade de resistir a impactos moderados são necessários. Sua superior resistência à abrasão, combinada com uma tenacidade à fratura satisfatória, posiciona esses compósitos de matriz metálica reforçados in situ como os consumíveis de desgaste mais vantajosos no manuseio, transporte, britagem, moagem e classificação de minerais extraídos, particularmente em revestimentos de moinhos (moinhos de bolas, moinhos AG, moinhos SAG) e revestimentos de calhas de transferência de minério (TABRETT, 1996; DURAND-CHARRE (2004); POURASIABI E GATES, 2022).

2.2.2.1 Influência da composição química nas propriedades mecânicas

Segundo Durand-Charre (2004), os FFBC contêm de 11 a 23% de cromo, com até 3,5% de molibdênio. De acordo com autor, essa faixa de composição de teores do cromo garantem boa resistência à corrosão e à oxidação em elevadas temperaturas. A alta resistência à abrasão e à erosão está associada a uma ductilidade ligeiramente melhorada em comparação com os ferros fundidos brancos comuns. O molibdênio e outros elementos de liga, como tungstênio, vanádio e nióbio, participam nos carbonetos eutéticos M_7C_3 , $M_{23}C_6$ e M_6C e também formam carbonetos específicos (por exemplo, M_2Q VC). Além disso, o molibdênio e o tungstênio reforçam a matriz por endurecimento por solução sólida. Grandes peças fundidas apresentam

estruturas dendríticas grosseiras, com segregação acentuada que não pode ser removida pelo tratamento térmico, permanecendo assim heterogêneas."

Os FFB alto cromo são regidos pela norma ASTM A532M-10, que garantem a adequação da composição química para que o material obtenha boa resistência ao desgaste abrasivo nas aplicações industriais. A Tabela 5 mostra a composição química do FFB de acordo com a norma.

Tabela 5 - Composição química do ferro fundido alto cromo de acordo com a norma ASTM A532.

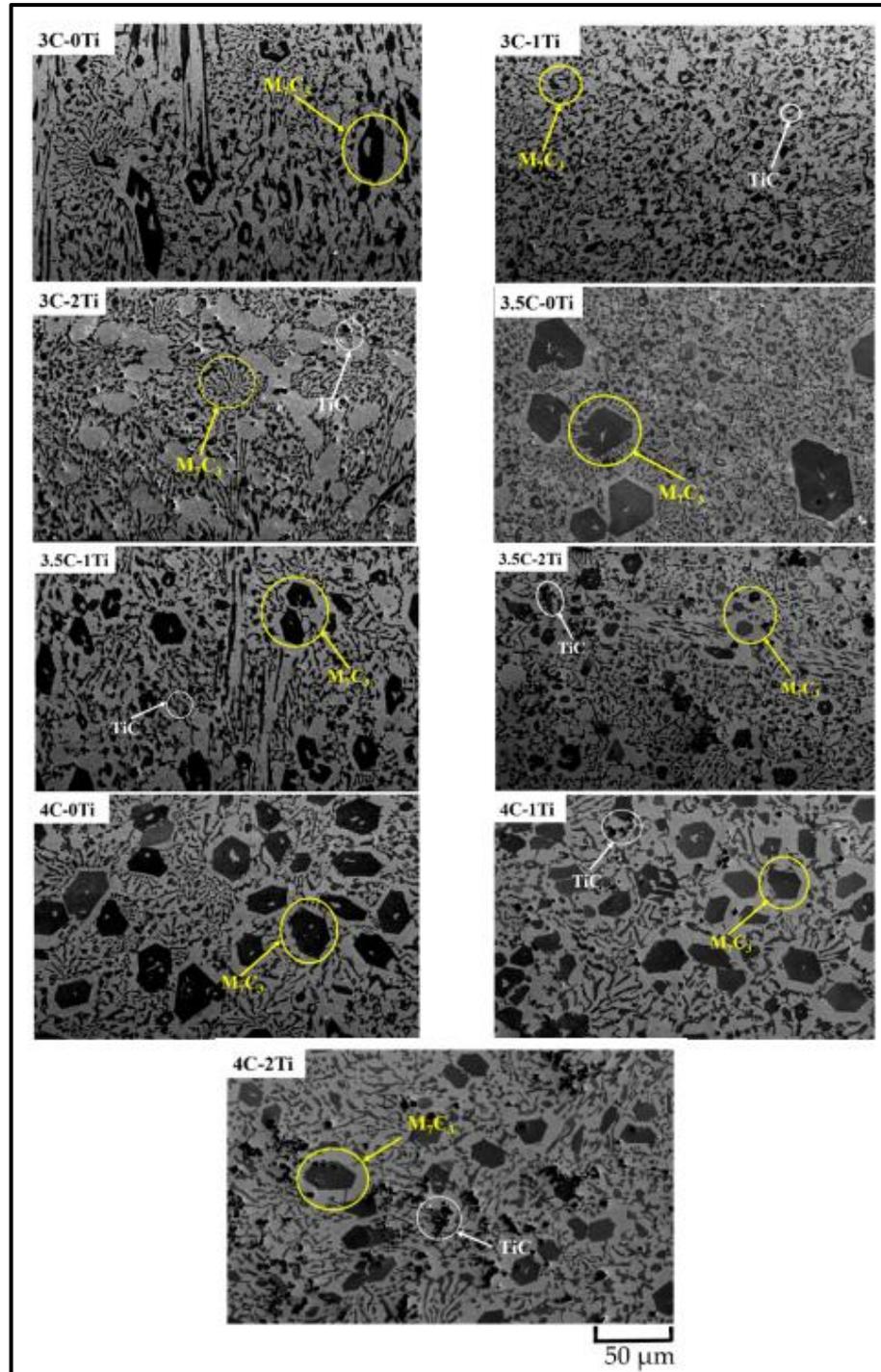
Classe	Tipo	Designação	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mb	Cu	P	S
-	A	Ni-Cr-Hc	2,8-3,6	2,0 máx	0,8 máx	3,3-5,0	1,4-4,0	1,0 máx	...	0,3 máx	0,15 máx
-	B	Ni-Cr-Lc	2,4-3,0	2,0 máx	0,8 máx	3,3-5,0	1,4-4,0	1,0 máx	...	0,3 máx	0,15 máx
-	C	Ni-Cr-GB	2,5-3,7	2,0 máx	0,8 máx	4,0 máx	1,0-2,5	1,0 máx	...	0,3 máx	0,15 máx
-	D	Ni-HiCr	2,5-3,6	2,0 máx	2,0 máx	4,5-7,0	7,0-11,0	1,5 máx	...	0,10 máx	0,15 máx
II	A	12 % Cr	2,0-3,3	2,0 máx	1,5 máx	2,5 máx	11,0-14,0	3,0 máx	1,2 máx	0,10 máx	0,06 máx
II	B	15%Cr-Mo	2,0-3,3	2,0 máx	1,5 máx	2,5 máx	14,0-18,0	3,0 máx	1,2 máx	0,10 máx	0,06 máx
II	D	20%Cr-Mo	2,0-3,3	2,0 máx	1,0-2,2	2,5 máx	18,0-23,0	3,0 máx	1,2 máx	0,10 máx	0,06 máx
III	A	25 % Cr	2,0-3,3	2,0 máx	1,5 máx	2,5 máx	23,0-30,0	3,0 máx	1,2 máx	0,10 máx	0,06 máx

Fonte: ASTM A532M (2022).

Como visto anteriormente no tópico 2.2.1 sobre aço Hadfield, a composição além de modificar a microestrutura do FFBAC, afeta diretamente as propriedades obtidas e o desempenho. Huq et al. (2022) investigaram o desempenho do desgaste abrasivo de três amostras de FFBAC com diferentes teores de Ti e C. O teste usado para avaliar a resistência ao desgaste foi o ensaio a três corpos roda de borracha da norma ASTM G65.

Os autores ressaltaram a significância da microestrutura de materiais como o FFBAC na análise das propriedades de desgaste do material. As microestruturas de todas as nove amostras são exibidas na Figura 27.

Figura 27- Imagem de MEV da matriz e do carboneto (círculos amarelos indicam carbonetos M7C3 e círculos brancos indicam carbonetos TiC)



Fonte: Huq et al. (2022)

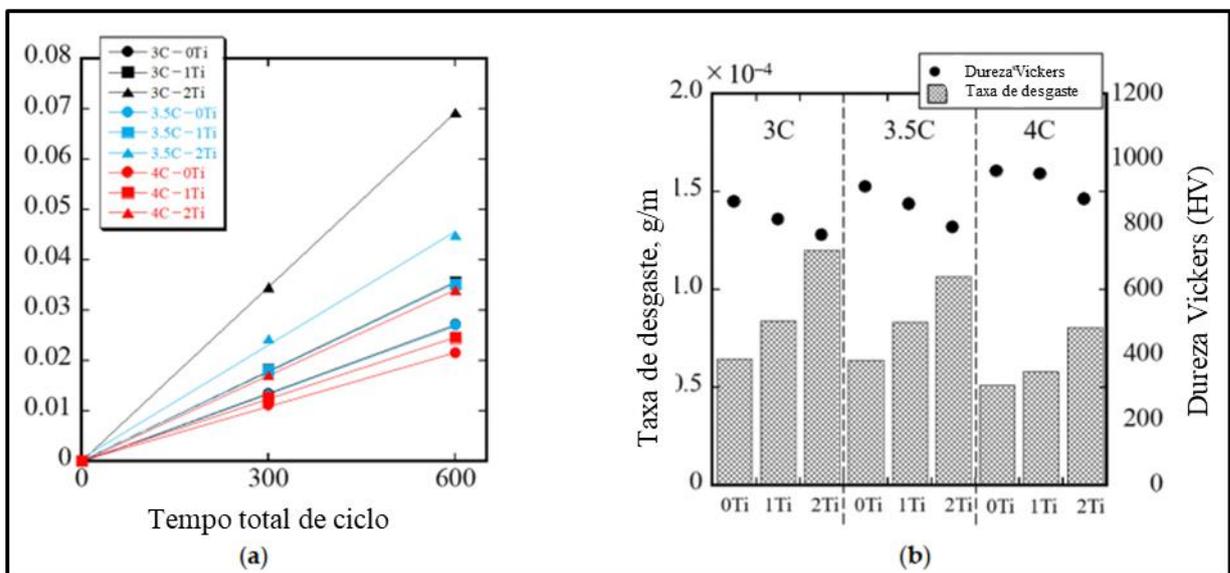
As imagens revelam que uma quantidade significativa de carbonetos se precipita na microestrutura. Independentemente da porcentagem de C ou Ti, o carboneto eutético primário M₇C₃ é observado em todas as amostras. Com a adição de Ti, o TiC começa a se formar. A precipitação de TiC tem um efeito evidente sobre o M₇C₃, reduzindo sua quantidade devido ao

aumento do teor de Ti. O Ti se precipita antes do M7C3, consumindo o C disponível e resultando em uma menor formação de M7C3. Além disso, a quantidade de M7C3 diminui e seu tamanho também é reduzido com a formação de TiC.

No entanto, uma tendência oposta é observada quando o teor de C é aumentado. Com o aumento do teor de C, a quantidade de M7C3 começa a crescer e seu tamanho também aumenta. Para teores de C de 3% e 4% em peso, o tamanho médio das partículas de M7C3 é de 12,6 μm e 32,6 μm , respectivamente, no caso de 0% em peso de Ti. Uma tendência semelhante é observada nas amostras com 1% e 2% em peso de Ti. Uma explicação plausível para esse fenômeno é o forte comportamento formador de carbonetos do Cr. Uma maior quantidade de Cr pode segregar uma porcentagem maior de C, o que, por sua vez, pode aumentar a quantidade e o tamanho do M7C3.

A variação na quantidade e tamanhos dos carbonetos afetaram as propriedades de dureza e resistência ao desgaste abrasivo. A Figura 28 mostra a relação entre dureza de resistência ao desgaste abrasivo.

Figura 28-A taxa de desgaste em termos dos ciclos de teste e dureza Vickers: (a) relação entre taxa de desgaste e ciclo de teste e (b) relação entre taxa de desgaste e dureza Vickers.



Fonte: Huq et al. (2022)

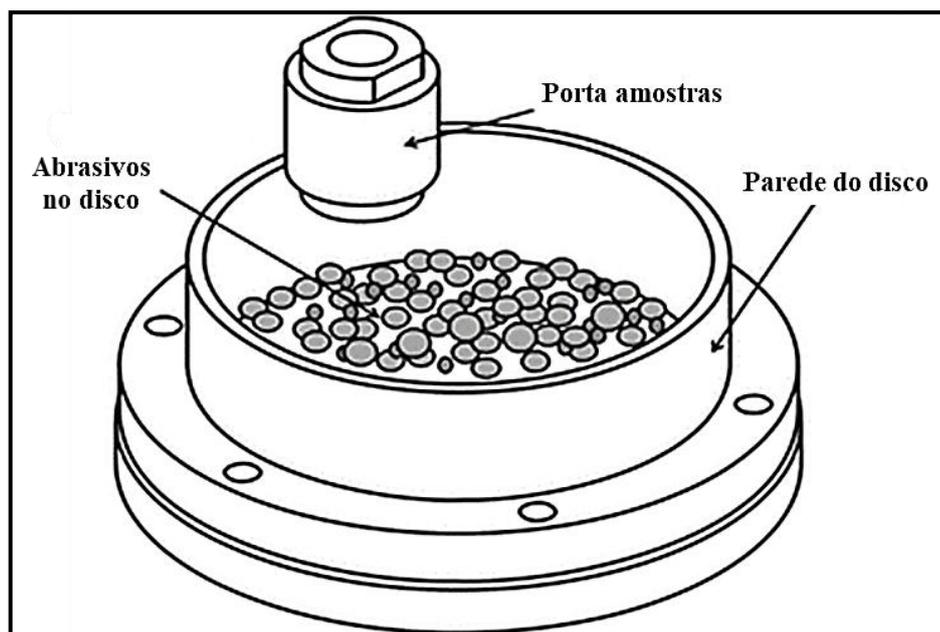
Analisando o teste abrasivo com roda de borracha, os autores concluem que a dureza geral da microestrutura aumenta, resultando em um menor volume de desgaste e melhor resistência ao desgaste abrasivo. A dureza da microestrutura, a dureza da matriz e a morfologia da cristalização dos carbonetos têm um efeito notável na resistência ao desgaste abrasivo.

O maior teor de C resulta em melhor resistência ao desgaste, enquanto a composição 4C-0Ti exibe melhor dureza, uma taxa de desgaste menor e uma profundidade de desgaste mais superficial.

2.3 Teste de desgaste de fragmentação de abrasivo pino disco- PDFA

O equipamento de Fragmentação de Abrasivo Pino Disco (PDFA) foi projetado pelo grupo de pesquisa da universidade de Tampere na Finlândia. O intuito do teste é promover o desgaste abrasivo de alta tensão, com o objetivo de classificar e avaliar materiais empregados em diferentes tipos de britadores de minerais (TERVA *et al.*, 2009). O teste permite os movimentos de esmagamento e deslizamento, além de variar a carga aplicada, velocidade de rotação, entre outras variáveis que permitem modificar o sistema e alterar a severidade do desgaste. O ensaio é uma ferramenta importante na caracterização de materiais e na avaliação do desempenho de superfícies em condições de desgaste. É baseado no teste convencional pino-disco regido pela norma ASTM G99, no qual um pino cilíndrico é pressionado contra um disco em rotação. No entanto, no sistema PDFA, o pino não entra em contato com o disco em nenhum ponto, porque há sempre uma camada solta de abrasivos entre o pino e o disco. A compressão é realizada ciclicamente e o atrito resultante e as interações de contato entre o pino e o disco causam desgaste na superfície do pino. A Figura 29 mostra esquematicamente a configuração do equipamento.

Figura 29- Equipamento de teste de desgaste de Fragmentação de Abrasivos Pino Disco.



Fonte: Valtonen, Ratia e Kuokkala, 2019.

O teste permite avaliar a taxa de desgaste de diferentes materiais ou revestimentos em condições simuladas de atrito e deslizamento. Isso é fundamental para determinar a durabilidade e a vida útil de materiais em várias aplicações.

Em seu trabalho, Terva *et al* (2009) utilizou o teste para avaliar o desempenho de três tipos de aço com diferentes durezas. Foram testados cruzadamente pares de pino-disco e pinos contra um disco de borracha, utilizando três tipos de abrasivos de rocha ígnea com diferentes propriedades. O desgaste foi medido por perda de massa tanto do pino quanto do disco, e a cominuição da rocha foi medida por peneiramento.

A escolha do contra-corpo demonstrou ter uma influência significativa no desgaste da amostra. Um contra-corpo de maior dureza promove maior fragmentação das partículas abrasivas, resultando em menores taxas de desgaste abrasivo da amostra. Em contraste, um contra-corpo mais macio facilita o deslizamento das partículas abrasivas sobre a superfície da amostra, aumentando o desgaste. No caso de um disco de borracha, a cominuição do abrasivo é consideravelmente reduzida, e a dureza dos materiais dos pinos não tem impacto na taxa de cominuição, ao contrário do observado com outros tipos de discos.

A Tabela 6 mostra resumidamente os parâmetros empregados nos testes de Terva *et al* (2009).

Tabela 6- Resumo dos parâmetros usados por Terva et al (2009).

Força (N)	200
Vel. de rotação (RPM)	25.8
Ciclo (s)	5/5

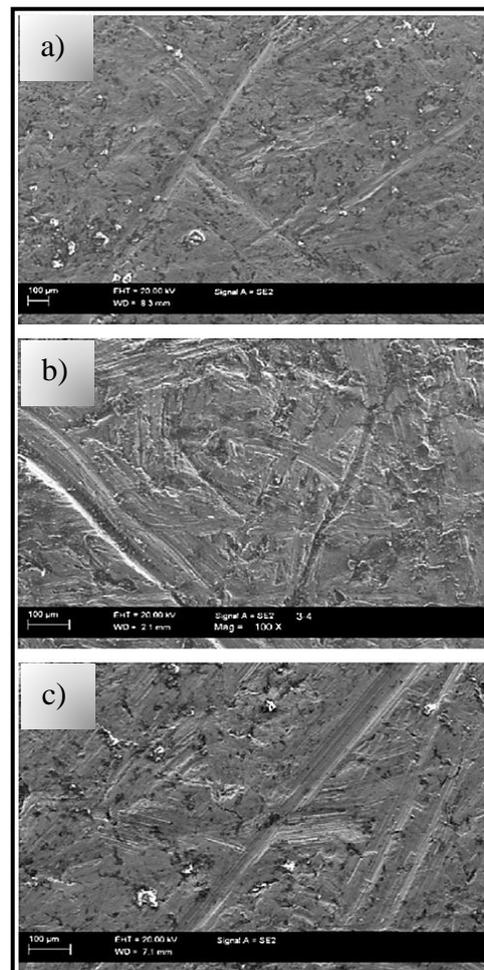
Fonte: Terva *et al* (2009).

A Figura 30 mostra as superfícies de pinos feitos do aço Ralloy WR6 de dureza 750 HV10. Em (a) é mostrada a superfície desgastada do pino de WR6 contra um disco de WR6 com dureza de 690 HV5 e abrasivo tonalito. Em (b) um pino WR6 testado com um disco de borracha e abrasivo de granito e em (c) pino WR6 testado com o abrasivo de granito de tamanho maior e um disco WR6.

Como pode ser visto, os micromecanismos de desgaste são alterados em função do contra corpo e abrasivos utilizados. Na Figura 30 (a), os riscos de diferentes profundidades,

larguras e comprimentos estão claramente visíveis. Para que os riscos mais profundos pudessem ser formados, provavelmente o abrasivo deve ter fixado no disco WR6 ligeiramente mais macio. O pino WR6 na Figura 30 (b), mostra marcas de desgaste deslizante semelhantes às aquelas ao usar um disco rígido. Uma diferença são as marcas de arranhões muito mais largas, que não penetram profundamente no aço. Isso pode ser devido ao maior atrito causado pelo disco de borracha em relação ao disco WR6, onde o abrasivo também pode deslizar devido à menor profundidade de penetração e menor área efetiva de contato. Há também um aumento do número de arranhões causados por deslizamento na superfície de desgaste. Ao usar o abrasivo de tamanho maior, os arranhões na superfície do pino WR6 são mais largos do que com o abrasivo de tamanho original, conforme mostrado na Figura 30 (c).

Figura 30- Superfícies desgastadas do pino de WR6: (a) pino WR6/disco WR6 e abrasivo tonalito; (b) pino/disco de borracha e abrasivo granito; (c) pino WR6/disco WR6 e abrasivo granito de maior granulometria.



Fonte: Terva *et al*, (2009)

Os resultados indicaram que o mecanismo de desgaste é fortemente afetado pela dureza do contra corpo.

Ojala *et al* (2014) em seu trabalho avaliou a resistência ao desgaste de aços comerciais de grau 400HB. A Tabela 7 mostra os valores de carga, velocidade e ciclo utilizados no trabalho.

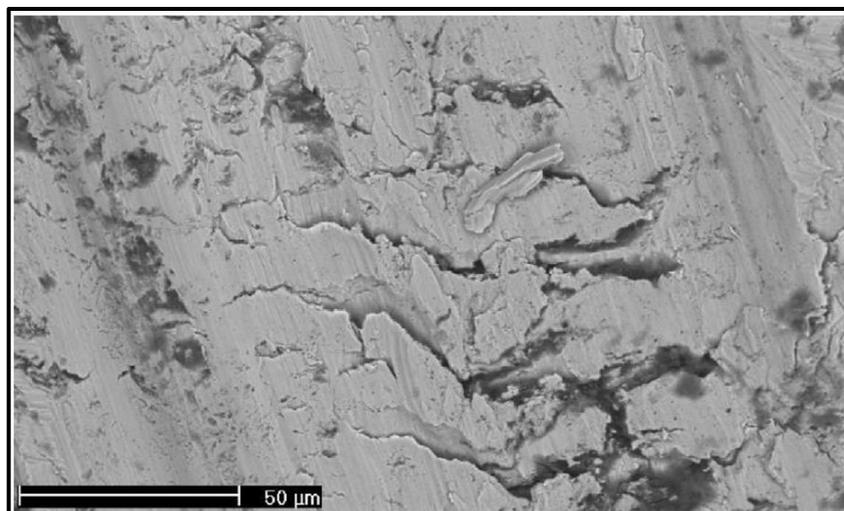
Tabela 7- Parâmetros utilizados no trabalho de Ojala et al (2014).

Força (N)	235
Vel. de rotação (RPM)	20
Ciclo (s)	5/2,5

Fonte: Ojala *et al* (2014)

A Figura 31 mostra a superfície desgastada de um dos aços testados. Pode-se ver a presença de sulcos e trincas resultantes do desgaste a que foi submetida a amostra.

Figura 31- Superfície desgastada do aço B desgastado no teste Crushing pin on disc.



Fonte: Ojala *et al* (2014)

Saha *et al* (2020) estudaram quatro tipos de aços, denominados como aço martensítico, aço bainítico inferior, aço TRIP (Transformação Induzida por Deformação) e aço QP (*quenching-partitioning*). O trabalho avaliou a resistência ao desgaste abrasivo dos quatro

materiais via teste FAPD. A Figura 32 mostra as imagens de MEV realizadas na superfície das amostras desgastadas.

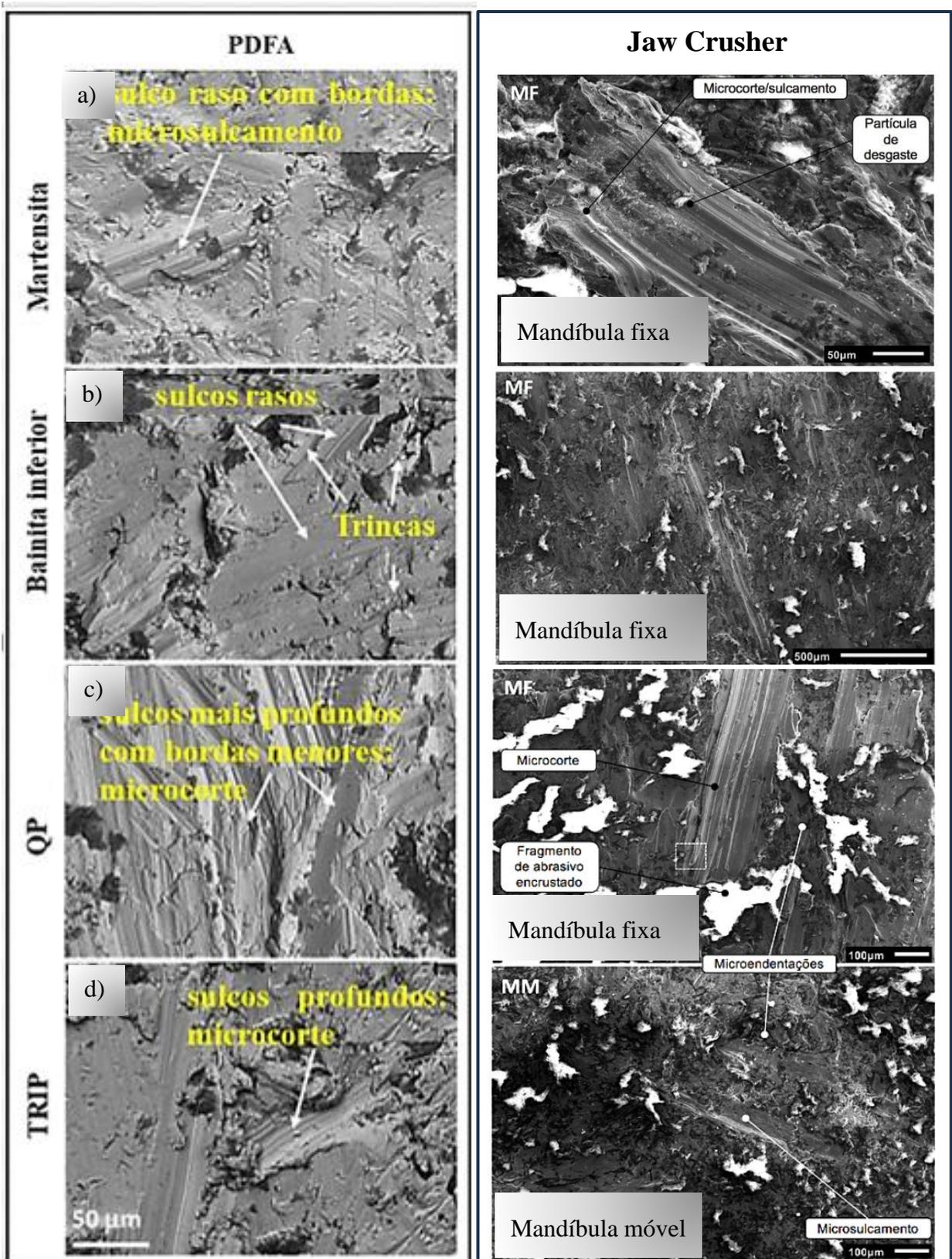
A superfície de desgaste do aço martensítico testado com PDFA (Figura 32 (a)) parece mais suave do que a do aço bainítico inferior (Figura 32 (b)). Os sulcos no aço bainítico inferior são comparativamente mais largos e ligeiramente mais profundos do que no martensítico. Os sulcos no aço bainítico inferior também estavam associadas as trincas superficiais, contribuindo para uma perda de material maior. Também havia menos partículas abrasivas de granito incrustadas no aço martensítico do que no aço bainítico inferior. Os sulcos rasos combinados com as bordas plásticas de ambos os lados dos sulcos, especialmente no martensítico, indicam um mecanismo de desgaste menos severo, principalmente microsulcamento.

Em contraste, os aços QP (Figura 32 (c)) e TRIP (Figura 32 (d)) sofreram sulcamento mais severos devido à sua menor dureza inicial. Os sulcos mais profundos, juntamente com a presença mínima de bordas adjacentes, contribuem principalmente para a remoção de material pelo mecanismo de desgaste por microcorte. A formação de cunha à frente das ranhuras é comum no aço TRIP, e durante a ação repetitiva de sulcamento pelas partículas abrasivas de granito, elas se soltam da superfície do aço.

É interessante ressaltar a semelhança entre os micromecanismos de desgaste encontrados nas superfícies desgastadas pelo teste PDFA e os micromecanismos encontrados na superfície desgastada do teste britador de mandíbulas do trabalho de Machado (2017), vistos na Figura 32. Porém, a mandíbula fixa apresenta maior semelhança com a superfície desgastada no teste PDFA por apresentar majoritariamente a presença de microsulcamento e microcorte, enquanto a mandíbula móvel apresenta mais endentação.

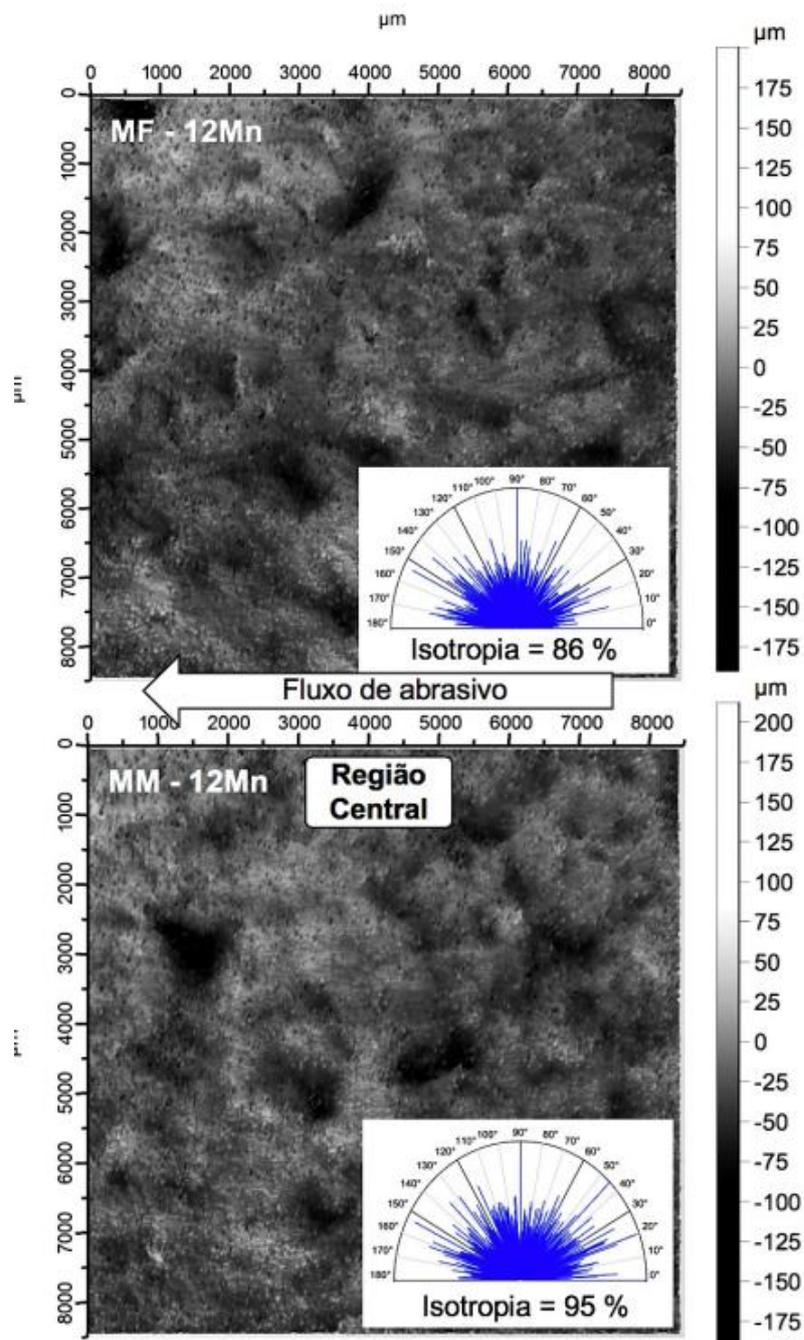
Além disso, Machado (2017) avaliou a rugosidade das superfícies desgastadas via interferometria. A mandíbula fixa obteve valor de isotropia menor que a mandíbula móvel indicando padrões e texturas orientados em uma direção preferencial. De acordo com Machado, esses valores indicam a predominância de microsulcamento e microcorte, dispostos longitudinalmente ao fluxo de abrasivos. Os resultados de interferometria podem ser vistos na Figura 33.

Figura 32: Superfícies de desgaste do PDFA; (a) martensita; (b) bainita inferior; (c) aço QP; (d) aço TRIP, realizadas por Saha et al (2020). Ao lado Imagens de MEV das mandíbulas e móvel e fixa desgastadas, realizado por Machado (2017)



Fonte: Saha *et al* (2020); Machado (2017)

Figura 33- Resultados de interferometria para a mandíbula fixa e móvel de aço Mn12.



Fonte: Machado (2017).

A metodologia de teste foi baseada na literatura (Terva et al., 2009; OJALA, et al, 2014.; Valtonen, et al 2019; Saha et al., 2020;). Estes autores utilizaram diferentes valores de ciclo, carga, pré-teste, tempo de interrupção do teste para pesagem da amostra e rotação, parâmetros

estes que alteram o mecanismo do ensaio e refletem nos resultados de desgaste. A Tabela 8 mostra a amplitude de valores de cada um dos parâmetros utilizados em diferentes trabalhos.

Tabela 8- Amplitude de valores dos parâmetros utilizados no teste *Crushing Pin on Disc*.

Parâmetros	Valores
Força normal (N)	200 – 240
Velocidade de rotação (RPM)	20 – 30
Ciclo (s)	2,5 – 5
Tempo total do ensaio (min)	30 – 90
Tempo de pré-teste (min)	15 – 20
Pesagem do pino (min)	7,5 – 10
Tamanho de abrasivos (mm)	2 – 10

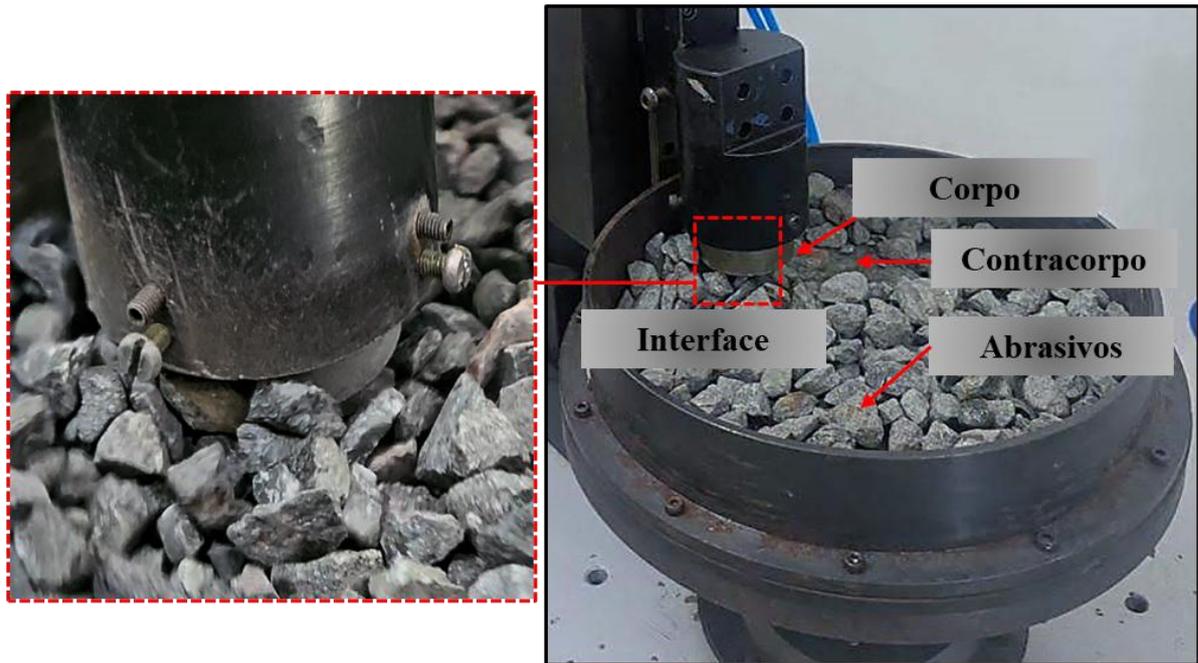
Fonte: OJALA et al (2014).; Saha et al., 2020; Terva et al., 2009; Valtonen, et al (2019).

3 METODOLOGIA

Com o objetivo de definir um padrão metodológico para o ensaio, foram realizados diversos testes preliminares com diferentes materiais (resultados desta etapa no Apêndice) a fim de encontrar parâmetros que viabilizassem a aplicação do teste de forma otimizada e com boa dinâmica dos abrasivos contidos dentro do disco para os dois materiais estudados.

Nos primeiros testes, devido a altas pressões empregadas, conseqüentemente cargas elevadas, ocorreram desgastes severos nos discos de borracha que forçavam a parada do ensaio antes do tempo previsto, além de muitos abrasivos escaparem de dentro do disco. A pressão, a posição do corpo de prova, tempo de ciclo e a rotação empregados atualmente foram os parâmetros encontrados que permitiram a realização dos testes sem que ocorressem os problemas citados e sem prejudicar o grau de severidade requerido durante o teste, além de permitir boa dinâmica em todo o sistema tribológico (Figura 34).

Figura 34- Componentes do sistema tribológico em estudo.

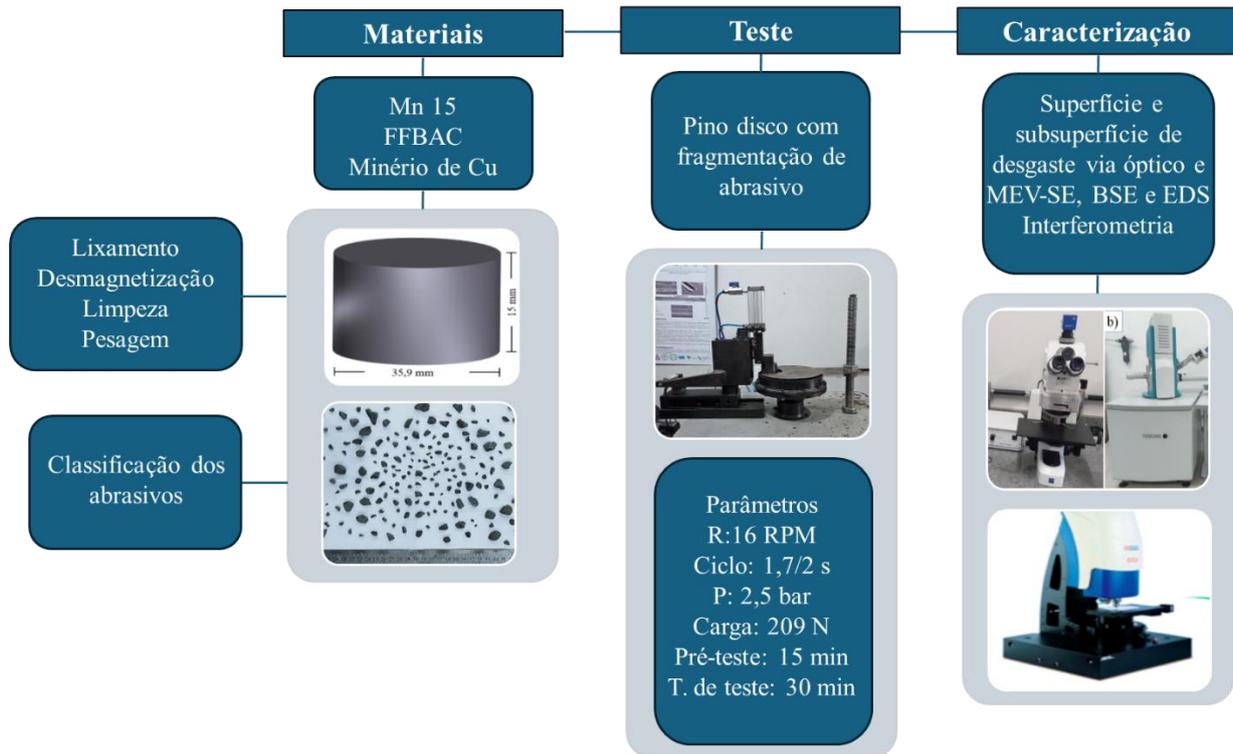


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na Figura 34, pode-se ver o corpo, que são os corpos de prova produzidos de Mn15 e FFBA, o contracorpo que é um disco feito da borracha de Neoprene, os abrasivos que são minério de cobre e a interface, que é a superfície de contato entre o corpo e abrasivos.

Após a realização dos testes preliminares, foram executados os ensaios com as amostras do atual trabalho. As amostras foram preparadas, os abrasivos classificados por tamanho e os parâmetros de ensaio ajustados. As caracterizações foram realizadas antes e após os testes. Contudo, são dadas maior ênfase as caracterizações realizadas após testes que envolvem a definição dos micromecanismos de desgaste. A Figura 35 mostra um diagrama que resume as etapas adotadas para a realização dos testes.

Figura 35- Diagrama resumo da metodologia.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.1 Preparação dos corpos de prova

No atual trabalho foram empregados dois diferentes materiais, o aço Hadfield com 15 % de Mn e o FFBAC. O aço Mn15 foi submetido ao tratamento térmico de solubilização a 1120 °C por 5 horas seguido por resfriamento em água e o FFBAC foi temperado e revenido a 1100 °C e 250 °C, respectivamente. Foram cortadas em eletroerosão três amostras de cada material. A Tabela 9, mostra a composição química do FFBAC, enquanto a Tabela 10, traz a composição do Mn15.

Tabela 9- Composição química do FFBAC.

% p. C	% p. Si	% p. Mn	% p. Cr	% p. Mo	% p. Cu	% p. S	% p. P
2,72	0,75	0,84	30,3	0,96	1,05	0,008	0,058

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

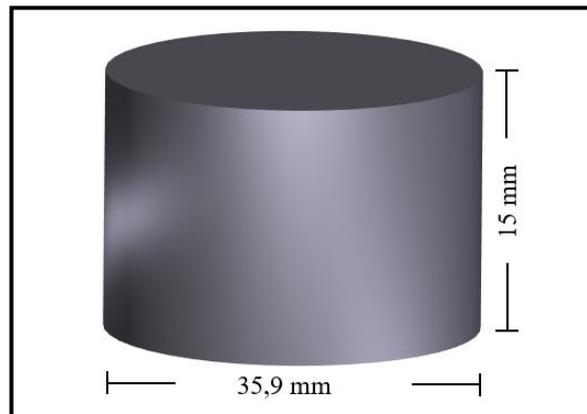
Tabela 10- Composição química do aço Mn15.

% p. C	% p. Mn	% p. Si	% p. Mo	% p. P	% p. S
1,3	15,2	0,35	0,88	0,017	0,025

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Antes da realização dos testes cada uma das amostras foi submetida ao lixamento (lixa de 120 a 400 *mesh*) da superfície a ser testada para padronização, com o cuidado de garantir a geometria e paralelismo das faces. Em seguida, foram desmagnetizadas, limpas em banho ultrassônico e pesadas em balanças de precisão analítica. A Tabela 11 resume as etapas mencionadas na sequência de realização e a Figura 36 mostra a geometria e dimensões dos corpos de prova utilizados no teste.

Figura 36- Geometria e dimensão do corpo de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Tabela 11 - Resumo das etapas de preparação dos corpos de prova.

Etapas de preparação dos corpos de prova antes do teste de desgaste	Lixamento (120 - 400 <i>mesh</i>)
	Desmagnetização
	10 min de limpeza em banho ultrassônico
	5 pesagens em balança de precisão analítica

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

3.2 Preparação dos abrasivos

O material abrasivo empregado para promover o desgaste nas amostras durante o teste consistiu no minério de cobre (MCu). Foram empregados diferentes granulometrias do minério, sendo utilizadas peneiras com variadas aberturas de malha para classificá-las. As quantidades e dimensões dos abrasivos de entrada estão detalhadas na Tabela 12.

Tabela 12- Distribuição de abrasivo e suas respectivas quantidades de entrada.

Distribuição do abrasivo (mm)	Massa (g)	%
10 – 8	150	30
8 – 6	200	40
6 – 4	100	20
4 – 2	50	10
Total	500	100

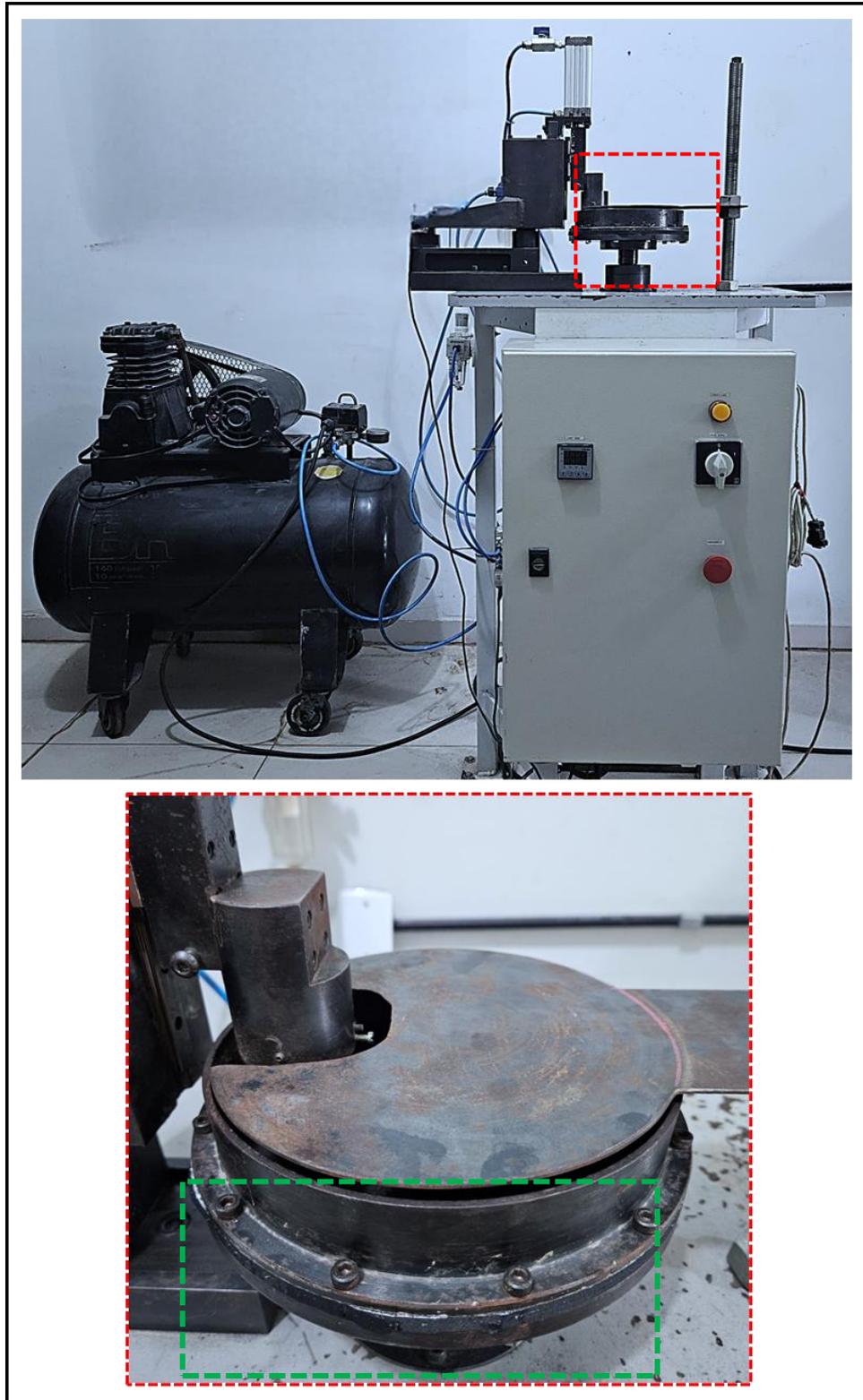
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

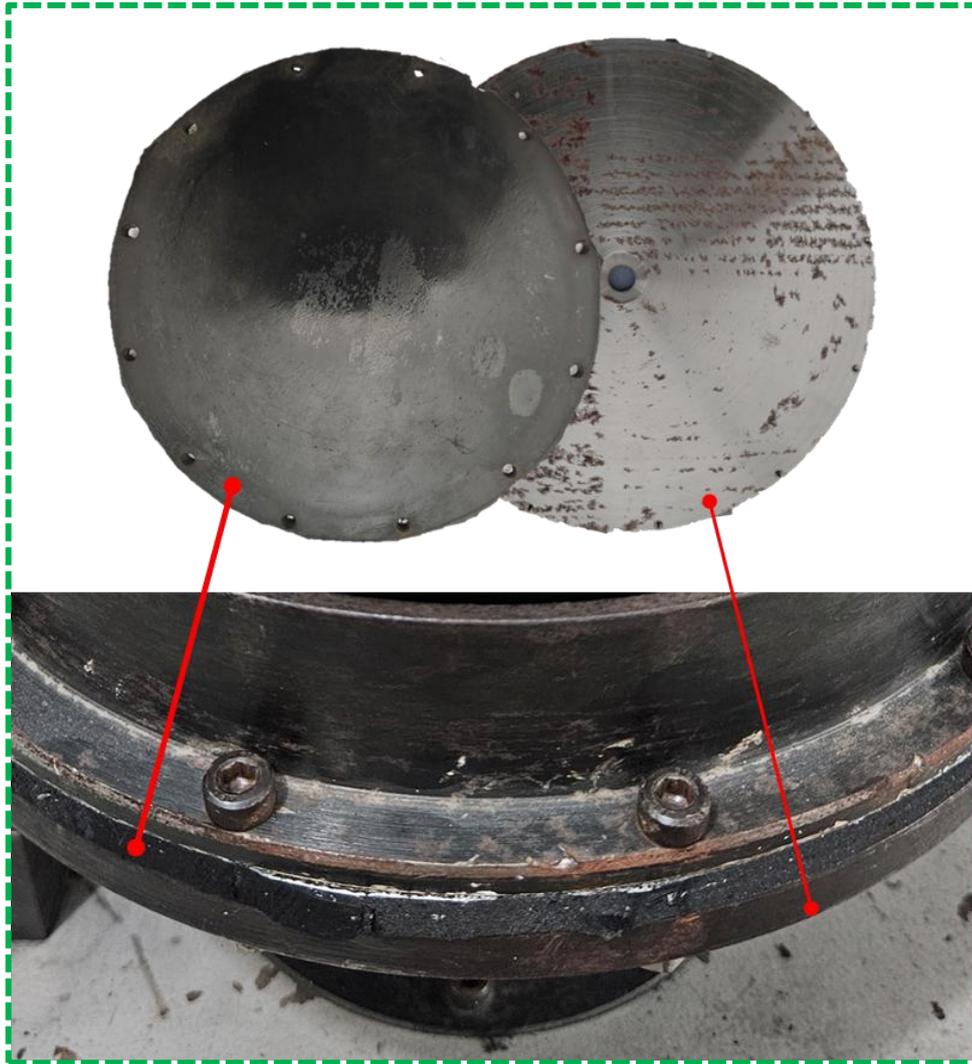
Com o intuito de registrar as mudanças ocorridas no abrasivo ao longo do teste, no que tange a distribuição de tamanho ao final do ensaio, foi realizado o peneiramento dos abrasivos antes e após o teste. Além disso, os abrasivos foram caracterizados quanto a sua forma antes do teste com o objetivo de verificar se as partículas abrasivas se classificam como circulares ou angulares, devido a forma ser uma variante no grau de severidade.

3.3 Equipamento de teste pino disco com fragmentação de abrasivo – PDFA

A máquina de teste é equipada com um sistema pneumático que oferece a capacidade de ajustar e regular a pressão aplicada e permite o movimento vertical do cilindro. O porta - amostras é fixado ao cilindro para realizar o movimento de avanço e retenção durante o ensaio. Abaixo do porta amostras fica o leito circular que acomoda os abrasivos, este componente é composto por um disco de aço e sobre este um disco de borracha, como pode ser visualizado na Figura 37. Para conter os poucos abrasivos que podem escapar durante a rotação, foi inserida uma chapa de proteção acima do disco. Para configurar os parâmetros do teste, é utilizado um computador conectado ao equipamento via USB com o software Sensoft que habilita os comandos do ensaio.

Figura 37- Equipamento e acessórios do teste de desgaste abrasivo PDFA.





Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.4 Planejamento experimental

Para este experimento as amostras e abrasivos foram preparados de acordo com os subtópicos 3.1 e 3.2. A pressão utilizada foi de 2,5 bar, que resulta em uma carga de 209 N. No teste denomina-se ciclo a soma do tempo de avanço (em que o corpo de prova fica em contato com os abrasivos) e o tempo de retenção (em que o corpo de prova fica suspenso, sem contato com os abrasivos). O ciclo adotado consistiu em 1,7 segundos de avanço seguidos por 2 segundos de retenção. Esse tempo de ciclo permite a recirculação dos abrasivos entre o corpo de prova e o disco. A velocidade de rotação utilizada foi de 16 RPM.

Anterior ao ensaio, é realizado o pré-teste por 15 min, esta etapa permite que as superfícies em contato se adaptem, reduzindo irregularidades, obtendo resultados menos

sujeitos a variações. Este procedimento é realizado empregando abrasivos de menor tamanho, na faixa de 2 a 4 mm, porém, os demais parâmetros são os mesmos empregados no teste. Na execução do ensaio a amostra é pressionada repetidamente contra os abrasivos contidos no leito giratório, de acordo com o tempo de ciclo determinado.

Os testes foram conduzidos por 30 minutos com interrupções a cada 7,5 minutos para a pesagem dos corpos de prova. O ensaio todo é composto por 486 ciclos, 4 etapas de 7,5 min totalizando os 30 minutos de teste. Além disso, os corpos de provas percorreram 97,6 m durante os 30 minutos e o tempo total de contato da amostra com os abrasivos é de 13,7 minutos. Na Tabela 13 pode ser visto os parâmetros empregados no ensaio atual.

Tabela 13- Resumo dos parâmetros utilizados nos ensaios.

Parâmetros	Valores atuais
Tempo total de contato (min)	13,7
Tempo de interrupção (min)	7,5
Tempo total de teste (min)	30
Tempo de cada ciclo (s)	3,7
Distância percorrida (m)	97,6
Velocidade de rotação (RPM)	16
Força normal (N)	209

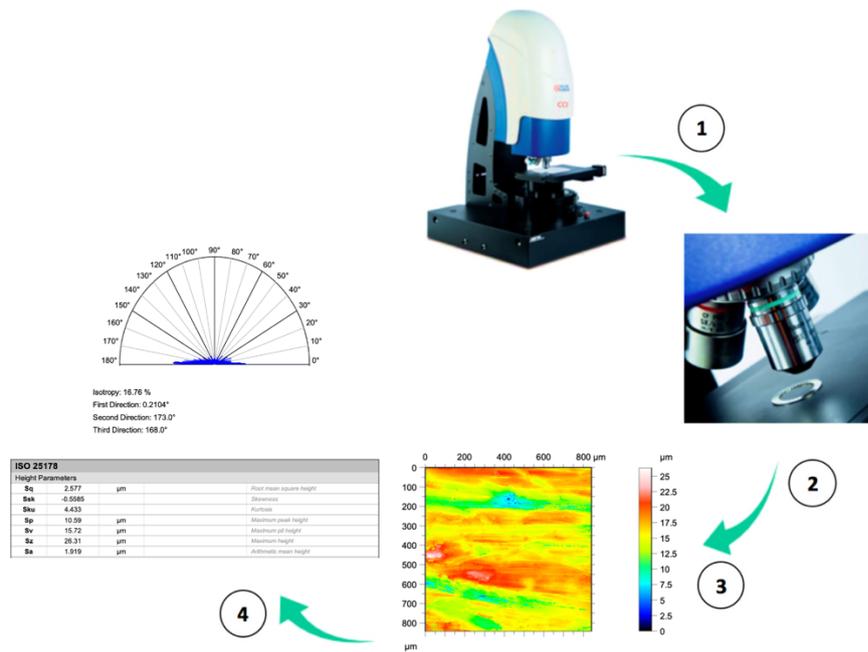
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.5 Caracterização dos materiais após teste de desgaste

A caracterização dos micromecanismos dos corpos de prova (CP) após ensaio foi conduzida via microscopia eletrônica de varredura, nos modos de elétrons retroespalhados (BSE), elétrons secundários (SE) e EDS da superfície desgastada e seção transversal à superfície desgastada. O objetivo principal desse processo foi a identificação e descrição dos micromecanismos de desgaste que foram gerados durante o ensaio na superfície do material, assim como identificar se houve adesão de material abrasivo. Além disso, foi realizado o perfil de microdureza na seção transversal a superfície de desgaste para análise de encruamento, e interferometria para caracterização dos parâmetros de rugosidade da superfície desgastada. A análise topográfica após ensaio de abrasão foi realizada em um ponto central das amostras via técnica de interferometria 3D com o equipamento Taylor-Hobson modelo CCI MP do Laboratório de Fenômenos de Superfície da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

(Poli/USP). Na Figura 38 é mostrado o fluxo de operações que resultam a análise de rugosidade (1- Posicionamento da amostra e seleção de objetiva; 2 – Configuração do hardware e software; 3 – Processo de interferometria e mapeamento 3D; 4 – Quantificação de parâmetros de rugosidade). Os parâmetros de análise e o pré-processamento de imagem utilizados na análise de interferometria foram: objetiva 20X, resolução de 1024 x 1024 (modo: xyz), área de 1,68 mm² (841,2 x 841,2 μm), preenchimento de pontos não medidos (< 1 %) e nivelamento da superfície.

Figura 38-Etapas da análise de interferometria óptica 3D.



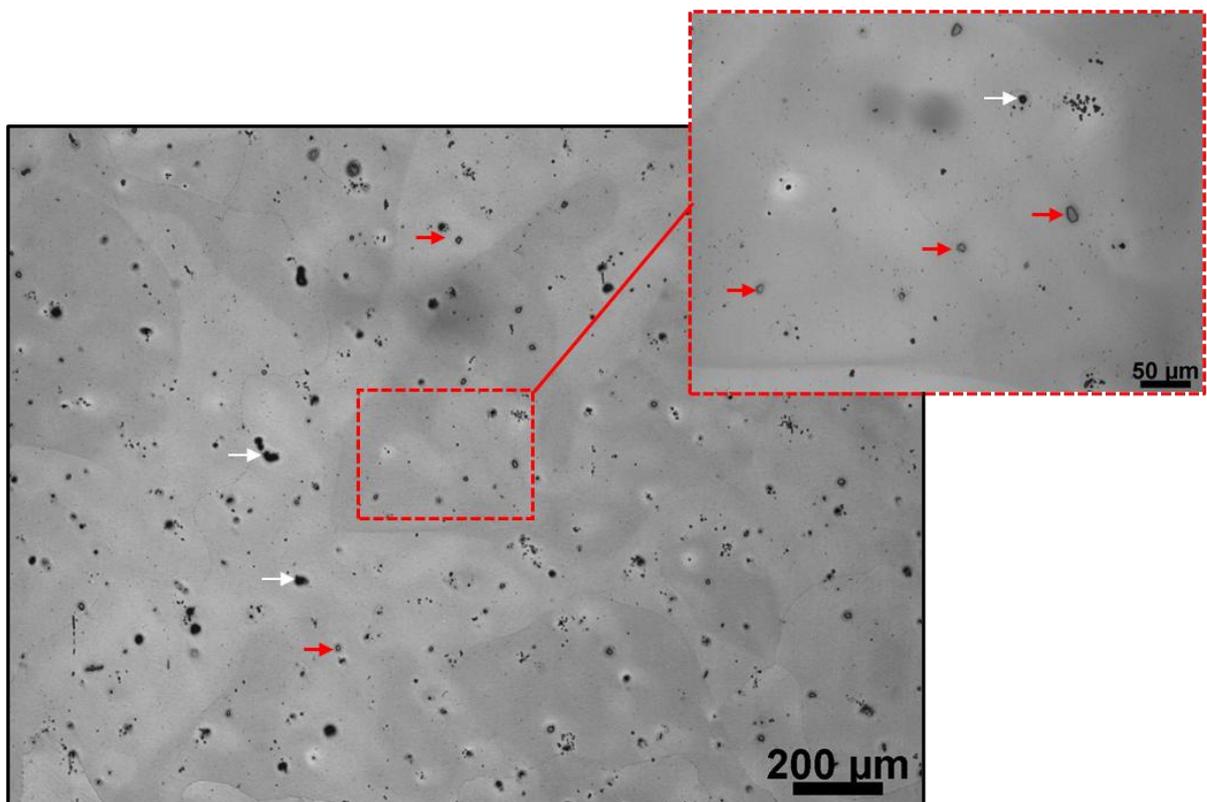
Fonte: Adaptado de Machado (2017)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Micrografias

A Figura 39 exibe a micrografia da superfície do aço Mn15 na ampliação de 50 x, e em destaque uma pequena área ampliada a 500 X. A microestrutura observada é de matriz austenítica, com a presença de alguns poros, indicados pelas setas brancas, e algumas inclusões de cor acinzentada, possivelmente sulfeto de manganês, indicados pelas setas vermelhas. Machado (2017), Andrade (2021) e Kahrobaee & Zohourvahid Karimi (2019), observaram microestruturas semelhantes em seus trabalhos com aço Hadfield.

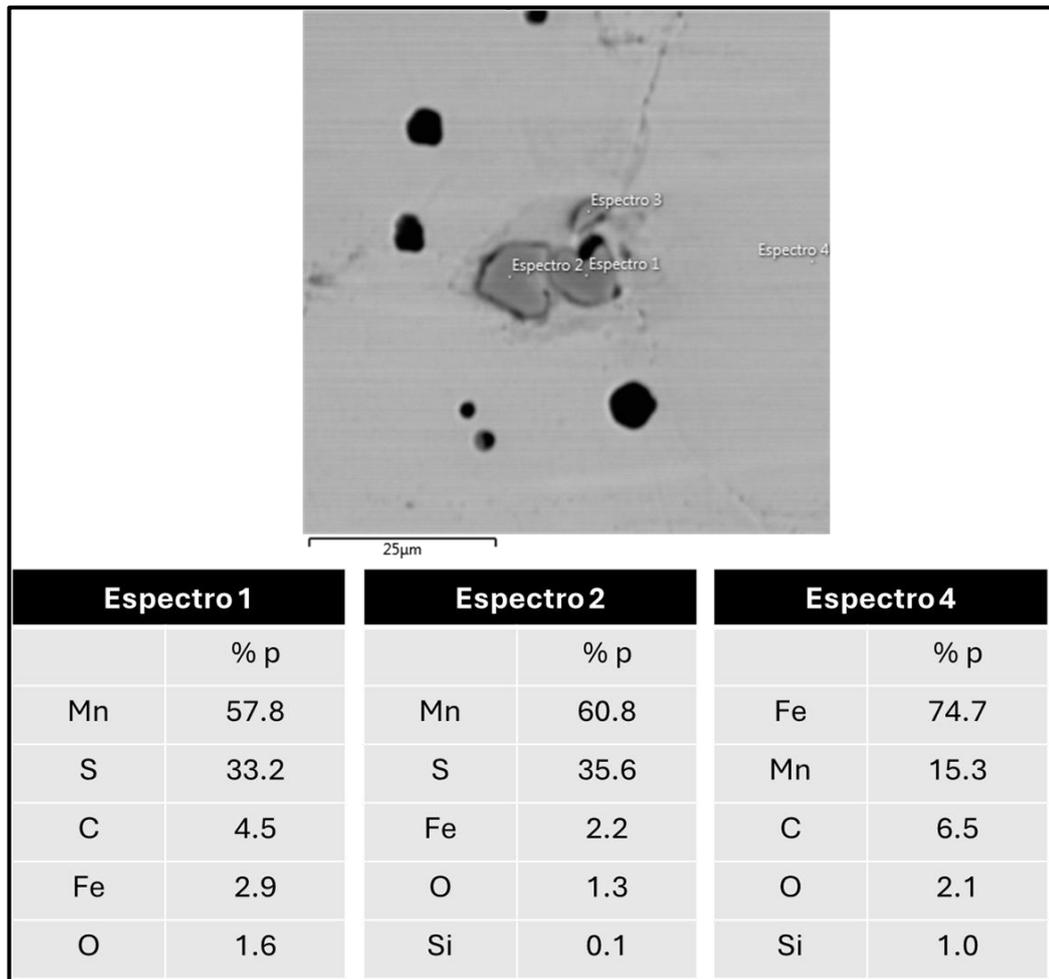
Figura 39- Micrografia da superfície do aço Mn15. Ampliação 50x. Ataque com reagente Nital 3%.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A partir da análise realizada na Figura 40 que mostra a imagem de MEV no modo EDS do Mn15, observou-se a presença de sulfetos de manganês e porosidades, como já identificado na micrografia da Figura 39.

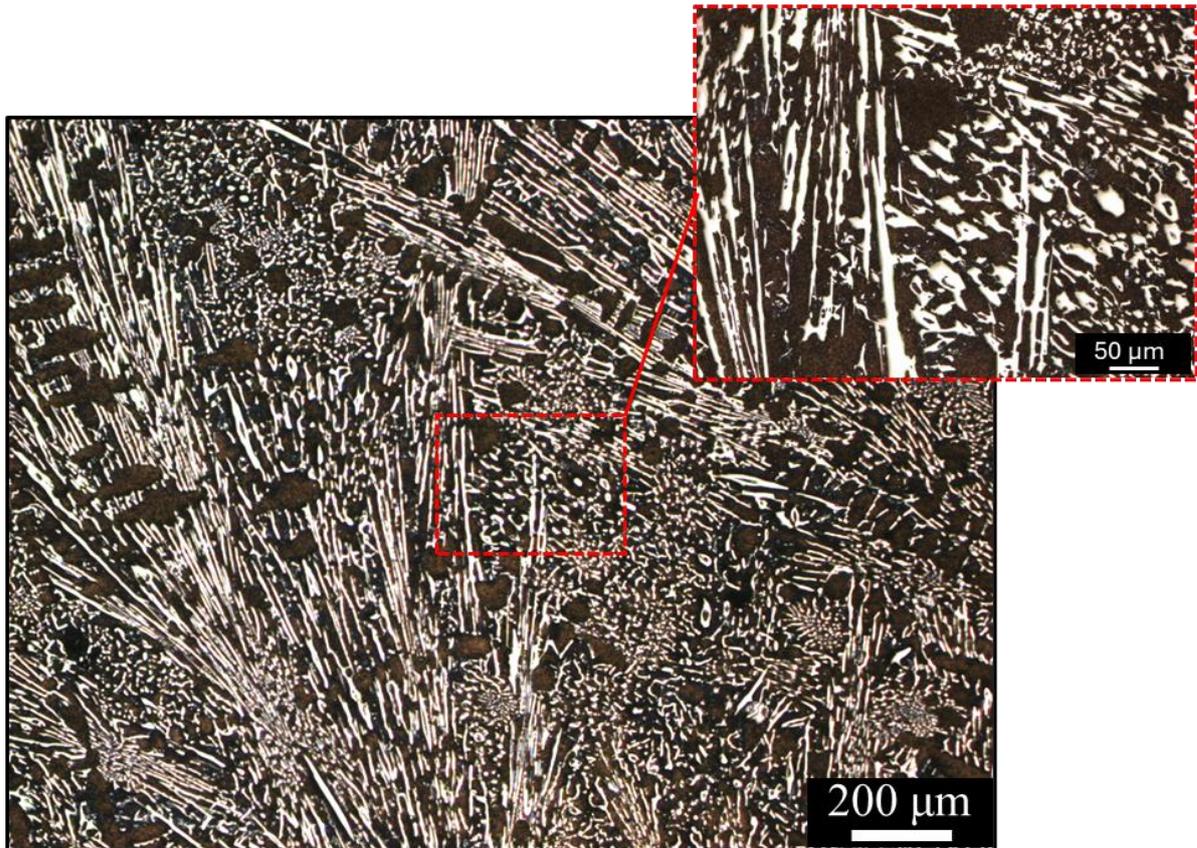
Figura 40- Imagem MEV- EDS da superfície do aço Mn15.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na Figura 41 pode ser visualizada a micrografia do FFBAC. A microestrutura é formada por martensita revenida (fases amarronzadas), algumas dendritas e carbonetos M_7C_3 (estruturas claras e alongadas) distribuídos ao longo da matriz. (Agunsoye et al., 2013) em seu trabalho obteve microestrutura semelhante.

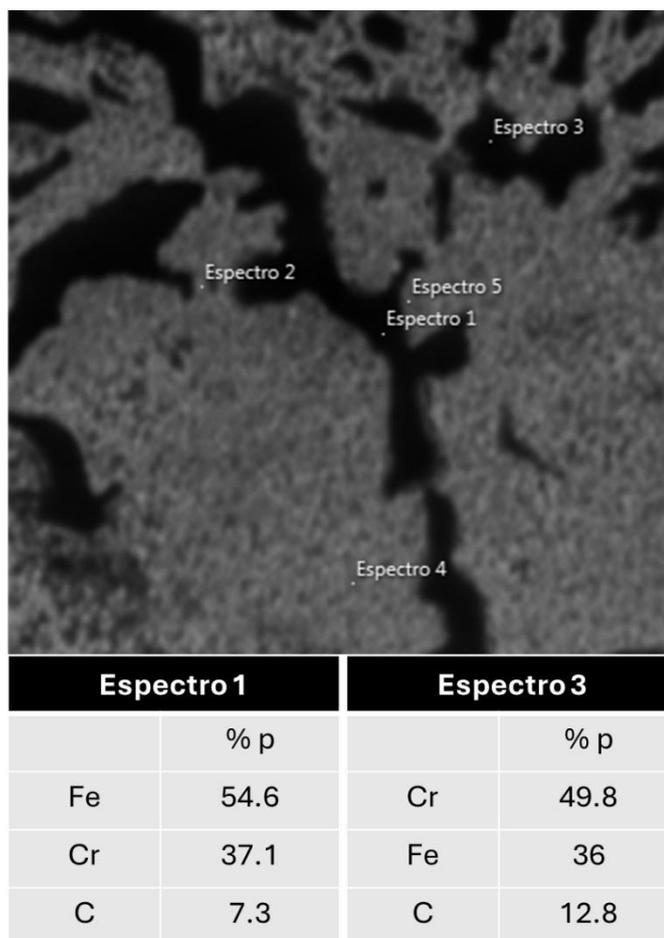
Figura 41- Micrografia do FFBAC. Ampliação 50x. Ataque com reagente Kalling nº2.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 42 mostra o EDS confirmando a presença do carboneto eutético M_7C_3 destacados na Figura 41.

Figura 42- MEV-EDS do FFBAC.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.2 Microdureza antes do teste de desgaste

Os resultados de microdureza podem ser vistos na Tabela 14. Os valores médios são decorrentes de 10 repetições realizadas em cada material.

Tabela 14- Microdureza HV do aço Mn15 e do FFBAC antes do teste de desgaste.

Material	Microdureza HV 0.3
Mn15	379,9 ± 43
FFBAC	690 ± 73

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O FFABC apresentou maior dureza em comparação ao aço Mn15. Esses dados são esperados, pois, o FFABC é um material mais duro tendo como segunda fase carbonetos ricos em cromo, e o Mn15 é um material homogêneo de matriz mais macia que endurece por deformação (AGUNSOYE et al., 2013). Penagos et al.(2016) em seu trabalho ao avaliar a dureza do FFABC, obteve média de aproximadamente 700 HV0.1. O valor também está condizente com o estabelecido por norma (*Standard Specification for Abrasion-Resistant Cast Irons 1*, 2023). O aço Mn15 obteve microdureza média de 379 HV. Valores aproximados foram obtidos por Lindroos et al. (2015).

4.3 Abrasivos

A Tabela 15 apresenta os resultados de distribuição de tamanho dos abrasivos antes e após o teste de desgaste do aço Mn15 e FFABC.

Tabela 15-Distribuição dos abrasivos após teste de desgaste.

Distribuição Mn15			
Tamanho (mm)	Entrada (%)	Saída (%)	Desvio padrão
10--8	30	8,81	0,97
8--6	40	32,99	1,14
6--4	20	24,81	1,06
4--2	10	18,07	1,11
<2	0	15,32	0,22
Distribuição FFABC			
Tamanho (mm)	Entrada (%)	Saída (%)	Desvio padrão
10--8	30	12,38	0,87
8--6	40	36,49	1,54
6--4	20	24,59	0,63
4--2	10	14,8	0,28
<2	0	11,74	1,49

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os dados mostram que a faixa de partículas mais grossas (10–8 mm) sofreu uma redução acentuada, de 30% na entrada para 8,81% na saída, indicando uma elevada fragmentação durante os ensaios. Essa tendência é acompanhada por um desvio padrão relativamente baixo (0,97), sugerindo consistência nos resultados.

Na faixa de 8–6 mm, há uma redução menor, de 40% para 32,99%, com maior dispersão nos dados (desvio padrão de 1,14). Já as partículas de tamanho intermediário (6–4 mm e 4–2 mm) apresentam um comportamento interessante: ambas mostram um aumento percentual na saída (24,81% e 18,07%, respectivamente), indicando que parte das partículas maiores foi fragmentada para essas faixas. O desvio padrão, ainda que moderado (1,06 e 1,11), reflete uma variação significativa na cominuição do minério.

Por fim, a fração mais fina (<2 mm), inexistente na entrada, apresenta uma porcentagem considerável (15,32%) na saída, corroborando a intensa fragmentação das partículas maiores. O desvio padrão baixo (0,22) sugere uniformidade na geração dessas partículas finas.

Para o abrasivo FFBAC, o comportamento das partículas também reflete fragmentação significativa, mas com padrões distintos. A faixa de 10–8 mm apresenta uma menor redução (30% para 12,38%) em comparação ao teste com Mn15, com menor dispersão (desvio padrão de 0,87). Isso pode indicar que o abrasivo ensaiado com o FFBAC resistiu melhor ao contato da amostra.

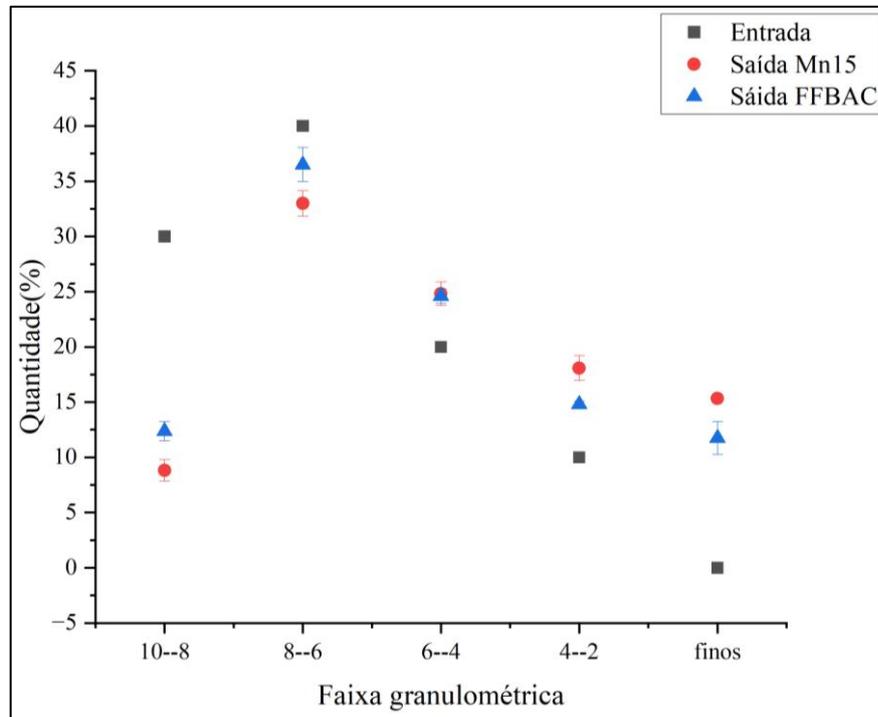
Na faixa de 8–6 mm, observa-se o maior percentual de saída (36,49%), próximo ao valor inicial de 40%. Esse comportamento, aliado ao desvio padrão elevado (1,54), sugere que a maioria das partículas dessa faixa mantém suas dimensões, mas com variações significativas entre os ensaios. As partículas de 6–4 mm e 4–2 mm têm comportamento similar ao Mn15, com percentuais de saída próximos (24,59% e 14,8%, respectivamente). No entanto, o menor desvio padrão (0,63 e 0,28) indica uma fragmentação mais uniforme.

A fração mais fina (<2 mm) apresenta menor formação de partículas (11,74%) em relação ao Mn15, mas com maior dispersão (desvio padrão de 1,49), o que pode refletir uma fragmentação menos controlada ou dependente de fatores variáveis durante o ensaio.

A Figura 43 mostra o gráfico da distribuição granulométrica inicial e final. O gráfico indica que os abrasivos de maior granulometria reduziram expressivamente, possivelmente, devido à sua maior área de contato com o pino. Quando pressionados, essa característica intensifica a concentração de tensões em suas superfícies, favorecendo a fragmentação. Além

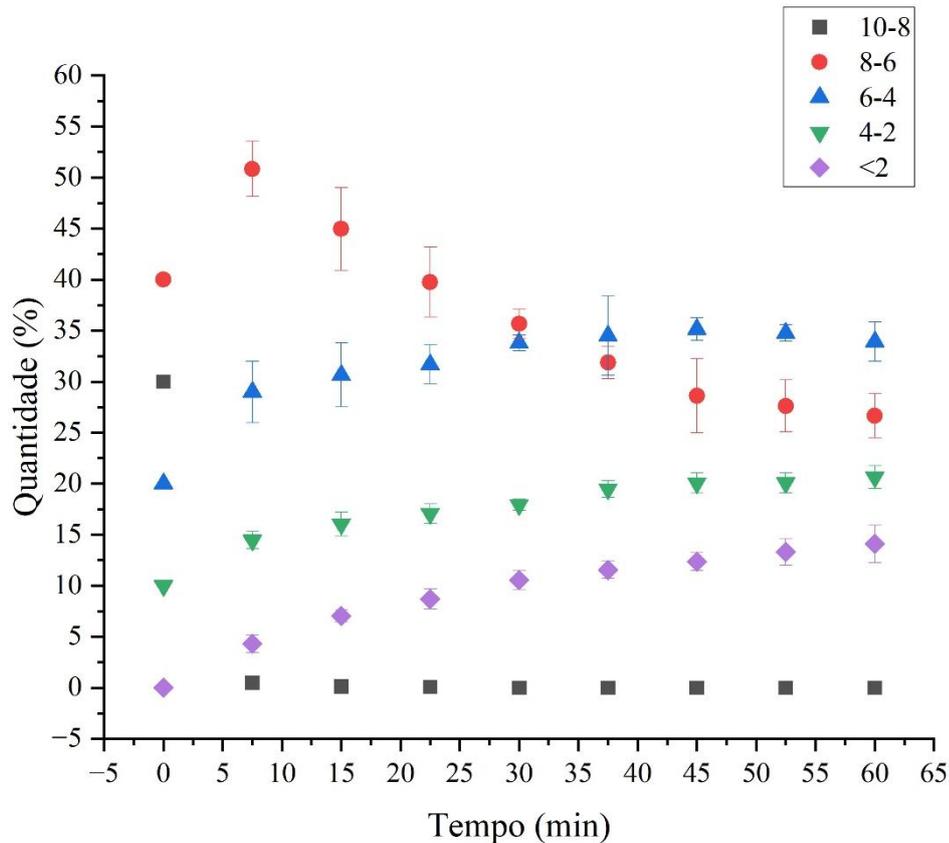
disso, os abrasivos maiores podem atuar como uma barreira protetora para os menores, absorvendo a maior parte da carga devido à sua maior área exposta.

Figura 43: Distribuição abrasiva inicial e final do aço Mn15 e FFBAC.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Anteriormente aos testes realizados para a atual pesquisa, foram realizados testes preliminares, como já mencionado no Tópico 3. A Figura 44 mostra a distribuição granulométrica dos abrasivos ao longo do ensaio do Mn12 empregando pressão de 3 bar, equivalente a uma carga de 247 N. Neste teste, a cada interrupção para pesagem do pino amostra, os abrasivos foram peneirados e registrados as quantidades obtidas a cada etapa.

Figura 44- Distribuição granulométrica do abrasivo M_{Cu} no teste de desgaste do aço Mn12.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Provavelmente devido a carga neste teste ter sido superior a carga utilizada nos testes com Mn15 e FFBAC, a quantidade das partículas abrasivas que se encontravam inicialmente na faixa 10-8 mm zerou após os 7,5 minutos de teste, como visto no gráfico.

A fração 8–6 mm (círculos vermelhos) apresenta uma redução progressiva ao longo do tempo, indicando uma diminuição contínua das partículas nesse intervalo devido à fragmentação. Essa tendência é mais acentuada nas primeiras etapas do ensaio, estabilizando-se após cerca de 40 minutos.

As partículas na faixa 6–4 mm (triângulos azuis) aumentam na porcentagem inicial, indicando que parte das partículas da faixa superior (8–6 mm) se fragmenta e migra para este intervalo. No entanto, à medida que o tempo avança, as partículas dessa faixa também sofrem cominuição, resultando em uma leve redução nos valores percentuais.

A fração 4–2 mm (triângulos verdes) mostra um comportamento similar ao da faixa 6–4 mm, com um aumento inicial, seguido de estabilização e posterior redução, indicando que a fragmentação continua transferindo partículas para a faixa mais fina.

As partículas menores que 2 mm (representadas por losangos roxos) aumentam continuamente ao longo do tempo, refletindo a fragmentação acumulada das partículas maiores durante o ensaio. Esse crescimento constante demonstra que o abrasivo é gradualmente reduzido em tamanho devido à carga.

A estabilização das frações intermediárias (6–4 mm e 4–2 mm) após aproximadamente 30 minutos sugere que, embora as partículas ainda estejam se fragmentando, a taxa de fragmentação nas faixas superiores diminui, atingindo um equilíbrio dinâmico.

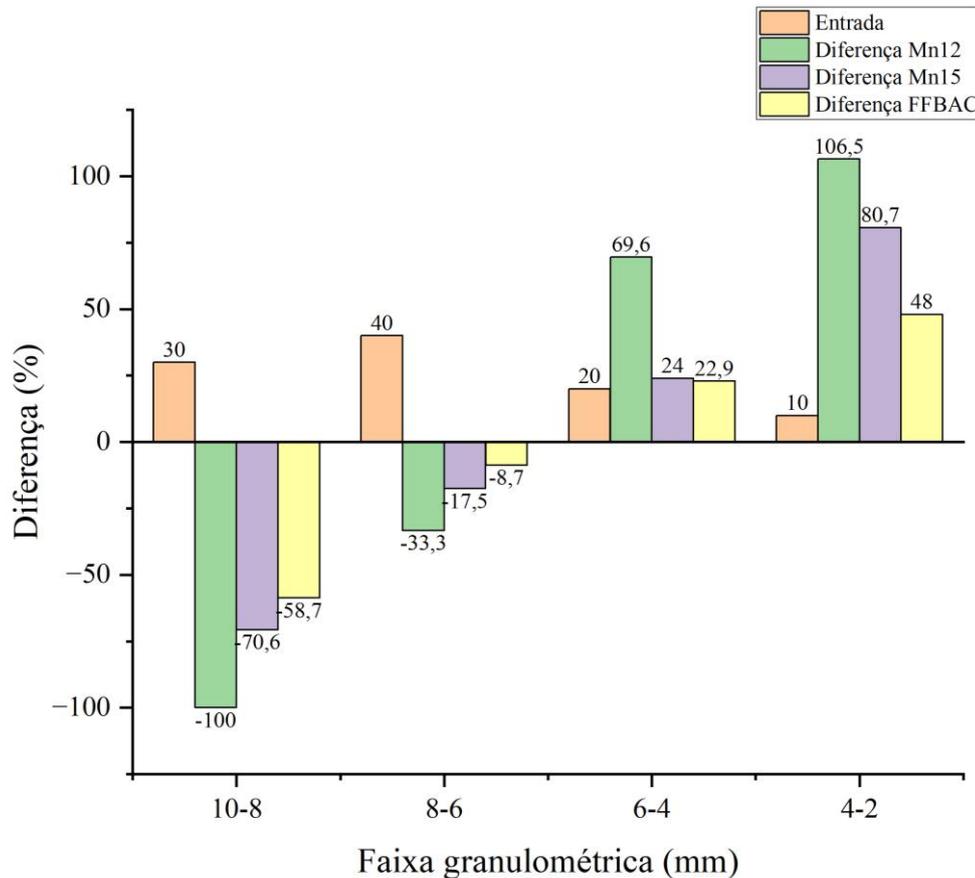
A fração <2 mm continua crescendo mesmo após 60 minutos, indicando que o material abrasivo apresenta uma significativa geração de partículas finas em testes prolongados. A pressão de 3 bar equivalente a carga de 247 N cria condições severas que favorecem a fragmentação contínua dos abrasivos, especialmente nas faixas maiores.

Foi realizado o cálculo da taxa de variação média para este teste. Essa taxa reflete o comportamento dinâmico das frações ao longo do tempo de teste:

- **10–8 mm:** Decai a uma taxa de **-0,42%** por minuto, indicando uma redução contínua.
- **8–6 mm:** Decai a **-0,25%** por minuto, com um ritmo de redução menor que a faixa anterior.
- **6–4 mm, 4–2 mm e <2 mm:** Todas apresentam crescimento médio de **0,25%** por minuto, indicando um aumento constante devido à fragmentação de partículas maiores.

O gráfico da Figura 45 mostra a diferença percentual da granulometria obtida após o teste com o aço Mn12, Mn15 e FFBAC. Os abrasivos que inicialmente se encontravam na faixa de distribuição de 10-8 mm, reduziram em torno 100 % para o Mn12, 71 % para o Mn15 e aproximadamente 59 % no teste com FFBAC. Na faixa 8-6 houve redução em 33 % para Mn12, 18 % para o Mn15 e 9% para o FFBAC.

Figura 45-Gráfico da diferença percentual da quantidade de distribuição dos abrasivos obtidos após o teste de desgaste do Mn15 e FFBC.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Apesar dos resultados consistentes, é necessário ainda diversos ensaios para compreensão mais apurada do comportamento do abrasivo durante o teste, bem como, testes mais longos com o intuito de entender o que ocorre após o tempo já visto nos testes atuais. Ademais, observa-se que a carga é um fator de grande relevância no teste, visto que o aumento da carga fez com que as granulometrias maiores reduzissem em pouco tempo de teste.

4.4 Perda de massa

Os valores de perda de massa do Mn15 e FFBC podem ser vistos nas Tabela 17, respectivamente.

Tabela 16- Perda de massa obtida dos três corpos de prova do Mn15

Tempo	Mn15-A	Mn15-B	Mn15-C	Média (g)	DP	Variância
7,5	0,020	0,018	0,019	0,019	0,001	1,39E-6
15	0,019	0,015	0,015	0,016	0,003	7,42E-6
22,5	0,018	0,011	0,016	0,015	0,003	1,19E-6
30	0,015	0,015	0,017	0,016	0,001	1,17E-6
Total	0,073	0,059	0,066	0,066	0,0072	

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Tabela 17- Perda de massa obtida dos três corpos de prova do FFBC.

Tempo	FFBAC-A	FFBAC -B	FFBAC -C	Média (g)	D. P	Variância
7,5	0,0061	0,0050	0,0048	0,0051	0,0007	5,37E-7
15	0,0044	0,0046	0,0055	0,0047	0,0006	3,47E-7
22,5	0,0039	0,0047	0,0048	0,0048	0,0005	2,71E-7
30	0,0046	0,0043	0,0035	0,0043	0,0006	3,07E-7
Total	0,019	0,018	0,018	0,018	0,00021	

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Os resultados evidenciam diferenças marcantes na perda de massa entre o FFBC e o Mn15, com o FFBC apresentando uma perda de 0,018 g, significativamente menor que a média de 0,066 g do Mn15. Além disso, o desvio padrão do FFBC é consistentemente menor, sugerindo maior uniformidade no desgaste. Essa característica pode ser atribuída as características metalúrgicas de cada um dos materiais. A presença de carbonetos ricos em cromo contribui para a resistência à abrasão e tornam o FFBC menos suscetível ao desgaste superficial em comparação ao aço Mn15.

Estudos indicam que a microestrutura do FFBC, composta por uma matriz de martensítica e carbonetos de cromo, oferece resistência elevada à abrasão devido ao papel de endurecimento dos carbonetos. Agunsoye *et al* (2013) comparou a resistência a abrasão via teste pino-disco de um aço Hadfield e ferro fundido branco alto cromo com microestrutura austenítica e martensítica. Em todos os resultados comparativos do FFBC martensíticos e austeníticos com o Hadfield, o FFBC obteve menor taxa de desgaste. Os carbonetos dispersos na matriz do FFBC atuam como barreiras ao avanço de desgaste, aumentando a resistência do material. Como resultado, o Mn15 tende a apresentar maior perda de massa, pois, segundo Agunsoye *et al*, o aço Hadfield se trata de uma liga com alta resistência ao desgaste, mas apenas sob cargas dinâmicas. Quando um componente feito de aço fundido Hadfield opera sob

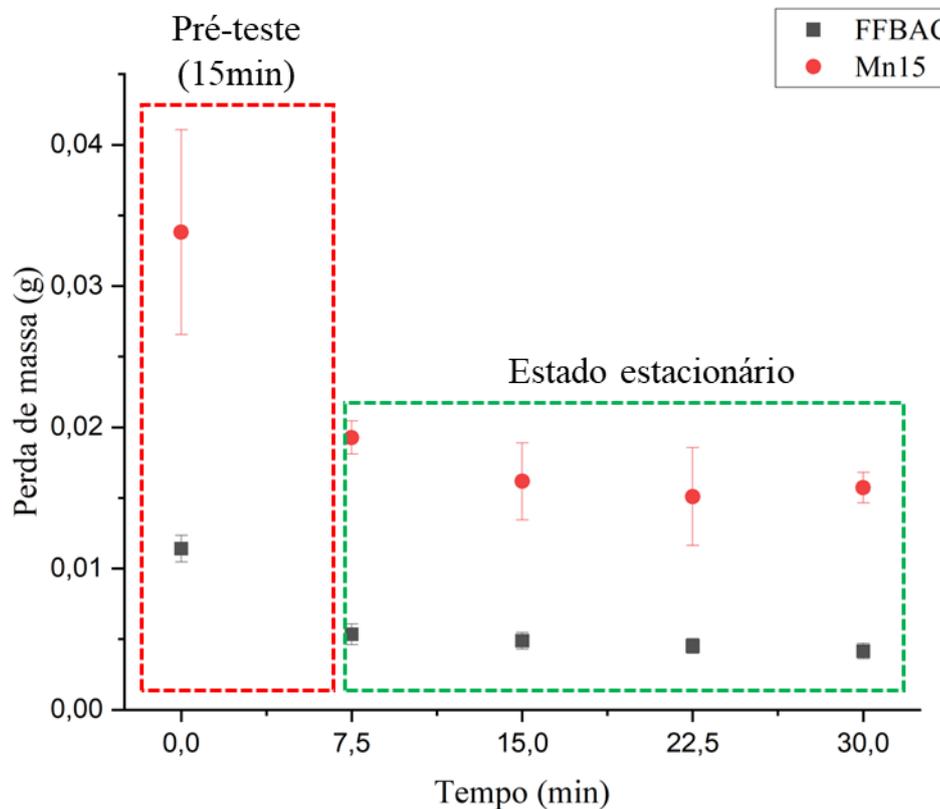
condições de baixa carga, como abrasão por areia, sua resistência ao desgaste é comparável à do aço carbono fundido. quando submetido a condições de abrasão severa.

O comportamento de encruamento do Mn15 é uma característica relevante, já que o endurecimento ocorre na superfície quando o material é submetido a condições de impacto repetitivo. Essa propriedade torna os aços austeníticos, como o Mn15, vantajosos em aplicações onde o impacto é predominante. Em ambientes puramente abrasivos, como em ensaios de desgaste com partículas duras, a ausência dessas fases duras no Mn15 resulta em uma maior perda de massa, já que a superfície do material é removida mais facilmente.

Esses resultados destacam o impacto da microestrutura e das fases secundárias, como os carbonetos no FFBAC, na otimização da resistência ao desgaste e na redução da perda de massa em condições abrasivas.

A Figura 46 mostra o gráfico de perda de massa média incluindo o tempo de pré-teste do Mn15 e FFBAC.

Figura 46- Gráfico de perda de massa média do aço Mn15 e FFBAC incluindo o tempo de pré-teste.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O gráfico exibe maior inclinação da reta na etapa de pré-teste. A inclinação maior sugere mais perda de massa em comparação ao ensaio. Este comportamento é esperado, pois, no pré-teste, as superfícies geralmente apresentam irregularidades e micropicos presentes na superfície que se desgastam rapidamente, levando a uma maior perda de massa inicial antes de alcançar uma condição de desgaste mais estável. Nessa fase, ocorrem deformações plásticas significativas e uma alta taxa de desgaste (KHONSARI *et al.*, 2021). Seguido a etapa de pré-teste está em destaque (retângulo pontilhado na cor verde) o estado estacionário, ou regime permanente, etapa do teste que se refere a uma condição em que a variável de interesse (perda de massa, desgaste) permanece constante ou varia de forma muito lenta ao longo do tempo, indicando que o sistema atingiu uma estabilidade dinâmica, ou seja, não há grandes variações quanto a perda de massa.

Observa-se também que o FFBAC parece entrar em regime de desgaste estacionário um pouco antes do Mn15, portanto, se faz necessário realizar paradas para pesagem dentro da etapa de pré-teste, com o intuito de observar melhor os fenômenos e o comportamento da perda de massa nesse estágio para diferentes materiais, como os em estudo no trabalho. Além disso, como já observado nas Tabelas 16 e 17, o desvio padrão e variância do FFBAC é muito menor em comparação ao do aço Mn15, permitindo inferir que o FFBAC se comporta de maneira mais estável e com menor dispersão dos dados neste ensaio.

A análise via ANOVA foi conduzida para avaliar a influência do tipo de material e do tempo de teste na perda de massa dos materiais, bem como a interação entre esses fatores. Os resultados são apresentados em termos da soma dos quadrados, quadrado médio, valor de F e nível de significância. Esses dados podem ser vistos na Tabela 18.

- **Influência dos Fatores**

Material:

O tipo de material foi o fator que apresentou a maior contribuição para a variação na perda de massa. O valor F foi 287,14, com um $P < 0,0001$, indicando que o efeito do material é altamente significativo. Esse resultado reforça que existe uma diferença estatisticamente relevante entre os materiais testados. O material FFBAC apresentou valores consistentemente menores de perda de massa, o que sugere um melhor desempenho em resistência ao desgaste em comparação ao Mn15.

Tempo :

O efeito do tempo apresentou uma contribuição menor em relação ao material, com um valor F de 2,72 e $P = 0,0789$. Embora não tenha sido significativo ao nível de 5% ($P < 0,05$), os resultados indicam uma tendência de influência do tempo sobre a perda de massa. Isso sugere que, em uma análise mais aprofundada ou com um aumento no número de réplicas, o tempo pode apresentar maior relevância estatística.

Interação Material x Tempo:

A interação entre material e tempo não foi significativa, com $F = 1,08$ e $P = 0,38447$. Esse resultado indica que não há interação relevante entre os dois fatores, ou seja, o comportamento dos materiais em relação ao tempo é independente. Tanto o Mn15 quanto o FFAC demonstraram padrões consistentes ao longo dos tempos de teste.

Tabela 18- Tabela de significância estatística.

	Soma dos quadrados	Quadrado médio	Valor F	Valor P
Material	8,40E-4	8,40E-4	287,14	<0,0001
Tempo	2,39E-5	7,96E-6	2,72	0,07
Interação	9,51E-6	3,17E-6	1,08	0,38

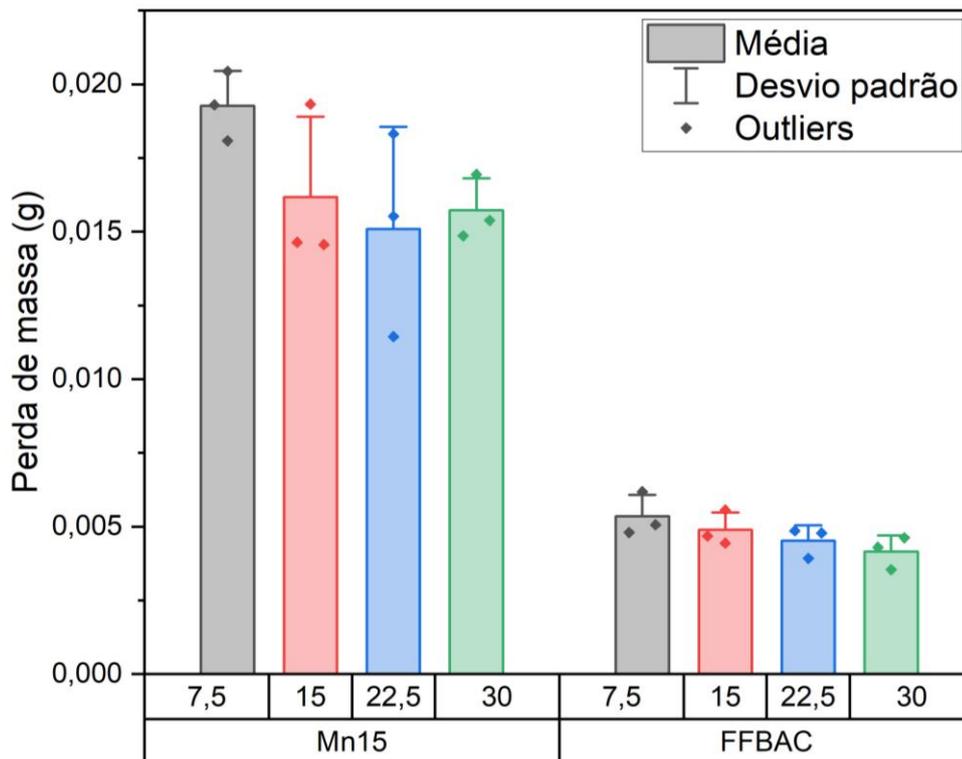
Fonte : Elaborado pelo autor (2024)

O gráfico de barras, apresentado na Figura 47 com o erro padrão exibe as médias de perda de massa para cada material e tempo, juntamente com os valores discrepantes (outliers). A interpretação do gráfico é consistente com os resultados do ANOVA:

- O material Mn15 apresentou maiores valores de perda de massa, com elevada variabilidade entre réplicas, conforme evidenciado pelos desvios padrão maiores.
- O material FFAC, por outro lado, apresentou menor perda de massa e menor dispersão, indicando maior resistência ao desgaste.
- Em relação ao tempo, observa-se uma tendência de leve redução na perda de massa com o aumento do tempo, mas sem alterações estatisticamente significativas.
- A presença de outliers indica que houve medições discrepantes em alguns pontos experimentais, especialmente no material Mn15, o que pode estar relacionado à variabilidade intrínseca do material ou a condições experimentais.

A presença de valores discrepantes no Mn15 exige cautela na interpretação dos resultados. Deve-se investigar se esses valores são consequência de erros experimentais ou variabilidade natural do material.

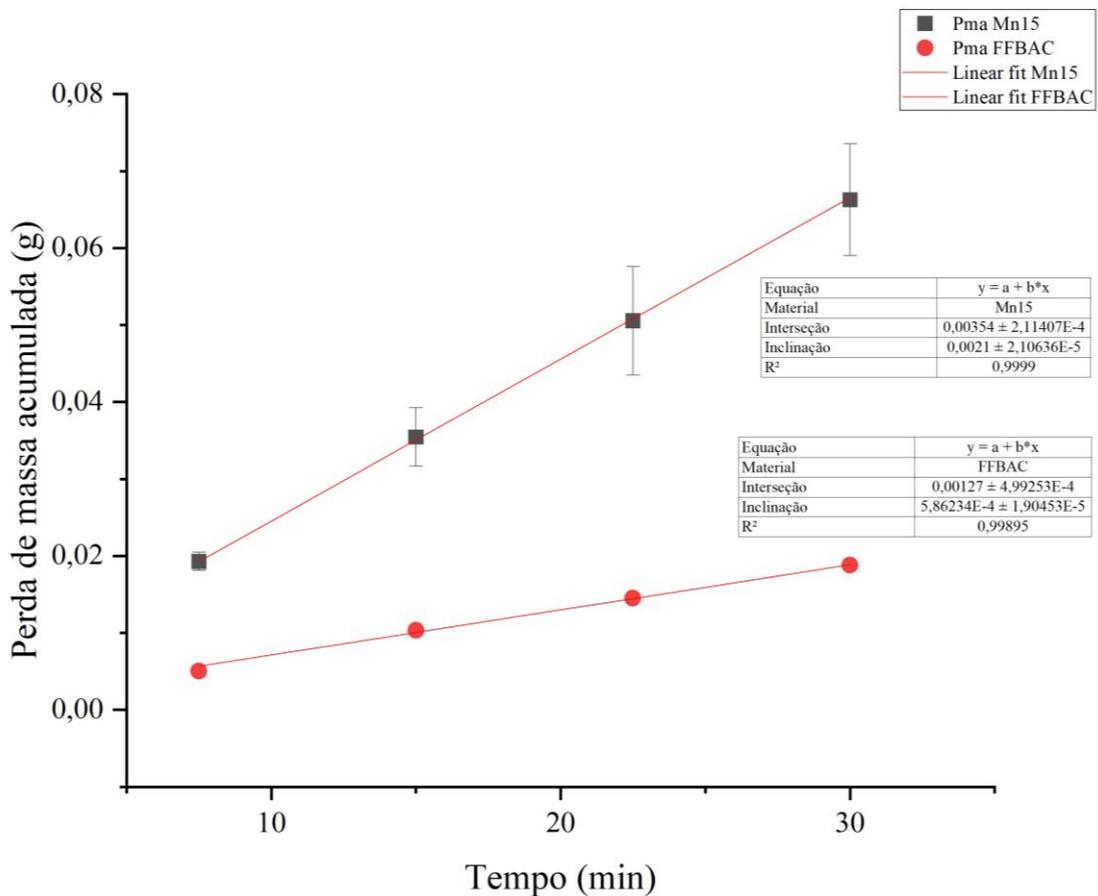
Figura 47- Gráfico de perda de massa, média, desvio padrão e outliers do aço Mn15 e FFBAC.



Fonte : Elaborado pelo autor (2024)

A Figura 48 mostra a perda de massa acumulada em função do tempo dos dois materiais em estudo. A taxa de desgaste do FFBAC foi 0,0006 g/min e o aço Mn15 obteve taxa de 0,0021g/min. Esses valores representam uma diferença de 3,5 vezes entre o desgaste do aço 15Mn e o FFBAC. Diesburg e Borik (1974) realizaram uma pesquisa sobre a resistência ao desgaste de materiais empregados na mineração. Os autores apresentaram resultados do teste de britador de mandíbula laboratorial para aços Hadfield e ferros fundidos branco alto cromo, onde, a partir de uma análise realizada com os dados disponíveis no trabalho, tem-se a razão média de perda de massa de 0,34 g para o aço Hadfield e 0,1 para o FFBAC, correspondendo a uma diferença de 3,2 vezes para o desgaste relativo entre os dois materiais. Esse resultado é de grande importância para a esta pesquisa, pois mostra uma correlação entre os ensaios de britador de mandíbula e o pino disco com fragmentação de abrasivo.

Figura 48-Gráfico de perda de massa acumulada do aço Mn15 e FFBAC.



Fonte : Elaborado pelo autor (2024)

Agunsoye et al. (2013), compararam a resistência ao desgaste abrasivo por deslizamento do aço Hadfield e FFBAC utilizando o teste pino-disco. O FFBAC teve o melhor desempenho, com perda de massa de aproximadamente 0,06 g, enquanto o aço Hadfield com 14% de Mn registrou uma perda de massa de 0,17 g, representando uma diferença de 2,8 vezes entre os materiais. Os autores afirmam que o diferencial na resistência ao desgaste se dá pela presença de carbonetos na matriz do FFBAC.

Sare e Arnold (1989) investigaram a resistência ao desgaste abrasivo de alta tensão do aço alto manganês e ferro fundido branco alto cromo por meio do teste britador de mandíbulas de laboratório. Os resultados indicaram melhor desempenho para o FFBC, porém, os autores afirmam que os resultados dos testes de abrasão em britador de mandíbulas têm implicações importantes para avaliar o desempenho dos ferros fundidos brancos de liga em aplicações industriais. A maioria dos estudos sobre o desempenho desses materiais sob desgaste abrasivo

utiliza testes em laboratório, que não reproduzem condições de impacto repetitivo. No entanto, muitas aplicações reais envolvem carregamentos complexos, combinando abrasão com impactos repetitivos, por exemplo em revestimentos de moinhos. Embora os testes laboratoriais forneçam uma classificação das ligas e seus tratamentos térmicos, não é possível inferir com precisão seu desempenho em condições reais de serviço.

Dodd (1969) apontou a dificuldade em reproduzir nos testes laboratoriais a mesma superfície encruada que ocorre em condições de impactos contínuos em serviço, como em moinhos. A investigação mostrou que a matriz austenítica dos ferros brancos de liga sofre encruamento e formação de martensita induzida por deformação em um grau muito maior no teste de abrasão em britador de mandíbulas, comparado ao teste convencional. Com isso o autor sugere que, a menos que o desgaste no teste seja causado pelo mesmo mecanismo que ocorre na prática, a validade dos testes laboratoriais deve ser questionada.

O atual teste utilizado, embora não normatizado, simula uma condição de desgaste abrasivo cíclico, como encontrado em componentes industriais expostos a abrasivos sob carga (por exemplo, moinhos e britadores, Terva et al (2009)). A carga é essencial para determinar a severidade do desgaste, pois ela afeta diretamente a interação entre o pino e o abrasivo. A variação da granulometria do abrasivo (conforme discutido anteriormente) também influencia diretamente os resultados. Partículas maiores tendem a provocar maior perda de massa, enquanto partículas menores promovem desgaste mais uniforme e progressivo. Essa mudança no perfil das partículas abrasivas pode interferir diretamente na taxa de desgaste, como observado ao longo do ensaio ao apresentar estabilidade no desgaste que pode ser devido a estabilidade da superfície ou a redução drástica das partículas abrasivas maiores.

Foi realizado o cálculo da curva Ha/Hm para os dois materiais. O intuito disto é a melhor compreensão quantitativa do desgaste ocorrido durante o teste.

Para isto, utilizou-se a dureza dos dois materiais e dureza do abrasivo. Para o abrasivo foi adotado o valor de 120 HV. Contudo, para relacionar melhor, foi realizado o cálculo do fator de desgaste através da Equação 4, baseada na equação de Archard. Foi utilizada a dureza dos materiais, a força normal empregada no teste e a distância percorrida pelo corpo de prova. Para o cálculo do volume removido, foi utilizado como valor de densidade 7,85 g/cm³ para o Mn15 e 7,8 g/cm³ para o FFAC. A Tabela 19 mostra os resultados obtidos.

Tabela 19- Valores de razão Ha/Hm e fator de desgaste K.

Amostra	Razão Ha/Hm	Fator de desgaste K
Mn15	0,316	$1,56.10^{-4}$
FFBAC	0,174	$7,84.10^{-5}$

Fonte : Elaborado pelo autor (2024)

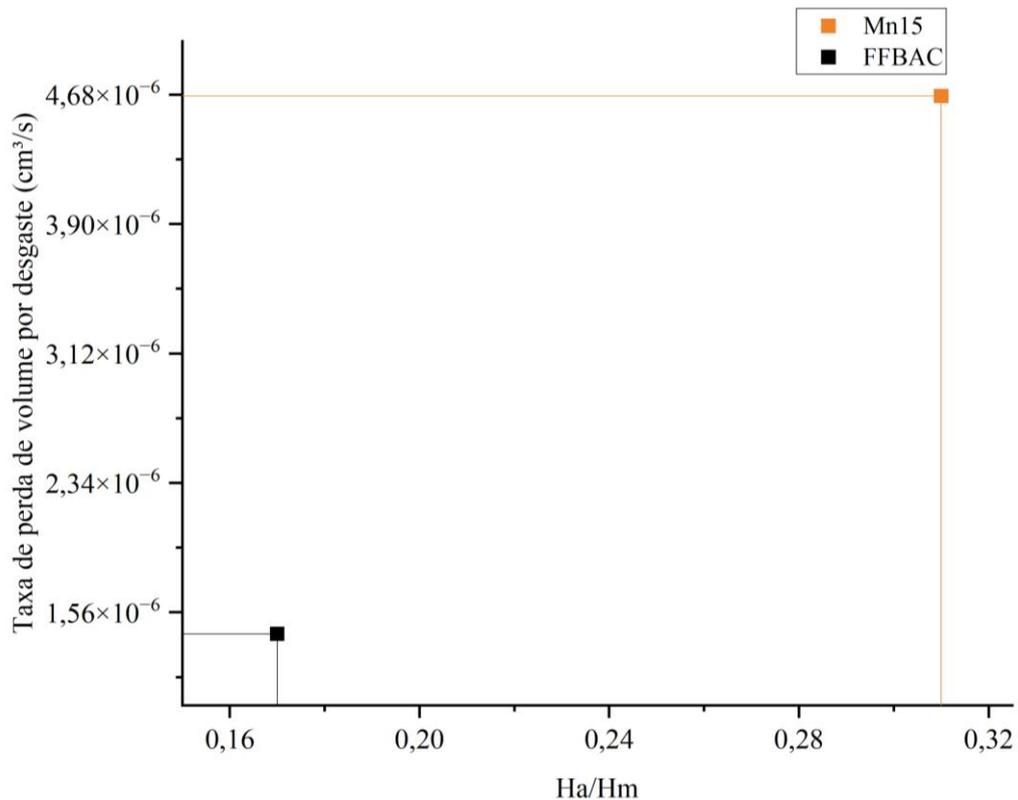
O abrasivo é menos duro que os dois materiais, e o desgaste tende ser predominantemente por deformação plástica superficial e o fator de desgaste K tende a ser baixo. Para o aço Mn15, o Ha/Hm é maior que o do ferro fundido, indicando que o abrasivo tem maior capacidade de penetrar e desgastar o aço, resultando em um fator de desgaste (K) maior.

Para o ferro fundido, o menor Ha/Hm implica em maior resistência ao desgaste, o que é consistente com o menor valor de K obtido. Isso demonstra como a dureza relativa entre abrasivo e material é um dos principais controladores da severidade do desgaste em sistemas abrasivos.

O abrasivo sendo mais macio que o material, demonstra que a capacidade de desgaste do abrasivo é limitada, ocorrendo principalmente por rolamento, movimento relativo do abrasivo sobre a superfície do material sem penetrá-lo significativamente. Embora o abrasivo ainda seja mais macio que o material, ele pode interagir de forma mais agressiva, provocando cortes superficiais e uma remoção de material mais significativa, como observado no aço Mn15.

O gráfico da Figura 49 mostra a curva perda de volume por desgaste em função da razão Ha/Hm.

Figura 49- Gráfico da taxa de perda de volume em função da razão Ha/Hm para o aço Mn15 e FFBAC.



Fonte : Elaborado pelo autor (2024)

A razão Ha/Hm pode ser usada para prever a tendência de desgaste dos materiais. Valores mais altos indicam uma maior capacidade do abrasivo de causar desgaste no material, resultando em uma maior taxa de perda de volume.

A taxa de perda de volume por desgaste observada confirma essa teoria: materiais com uma razão Ha/Hm maior apresentam taxas de desgaste mais altas.

Embora a razão Ha/Hm forneça uma indicação geral do comportamento de desgaste, é importante considerar que outros fatores, como a forma do abrasivo, a intensidade da carga aplicada, e as condições do ensaio (tempo, velocidade de movimento) também desempenham papéis cruciais no desgaste observado.

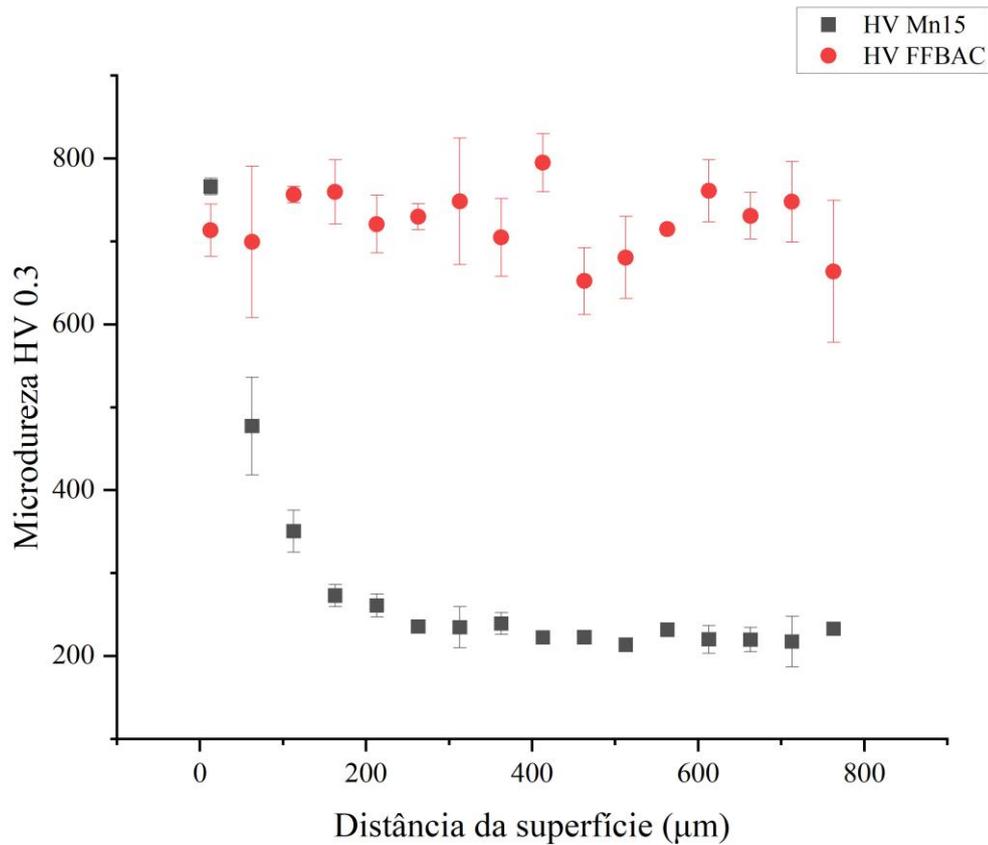
4.5 Perfil de microdureza após teste de desgaste

A Figura 50 apresenta os dados de perfil de microdureza da seção transversal a superfície de desgaste do aço Mn15 e FFBAC. À 13 μm de distância da superfície desgastada

o valor de microdureza do aço Mn15 foi de 766 HV, superando a microdureza próximo a superfície do FFBAC que obteve 713HV. De acordo com o gráfico, o FFBAC não ficou evidente o perfil de encruamento, necessitando de outras ferramentas de análise, como nanodureza, para avaliar com mais precisão esse comportamento. Já o aço Mn15 exibe comportamento diferente, possui maior valor HV à 13 μm da superfície desgastada e a medida em que se afasta da superfície os valores reduzem até estabilizarem. A profundidade de encruamento de acordo com o gráfico foi de 242 μm . Além disso, o desvio padrão do FFBAC é maior devido a não homogeneidade de sua microestrutura, onde se obtém valores menores quando as indentações ocorrem na matriz do material e valores HV superiores quando ocorrem nos carbonetos.

Andrade (2015) ao avaliar o perfil de microdureza do aço Hadfield desgastado no teste roda de borracha, obteve valor máximo à 0,8 μm de distância da superfície desgastada de aproximadamente 680 HV, utilizando abrasivos de 1,20 a 2,40 mm. Machado (2017) ao realizar o perfil de microdureza em aços Hadfield com 12 e 20 % Mn desgastados em um teste de britador de mandíbulas de laboratório, obteve valor máximo de microdureza de 715 à 0,2 mm de distância da superfície desgastada para a mandíbula fixa e 607 HV para a mandíbula móvel do aço Mn12, com profundidade de encruamento de aproximadamente 1,5 mm. O aço Mn20 obteve em torno de 681 HV tanto para a mandíbula fixa quanto para a móvel.

Figura 50- Gráfico de perfil de microdureza do aço Mn15 e FFBAC.

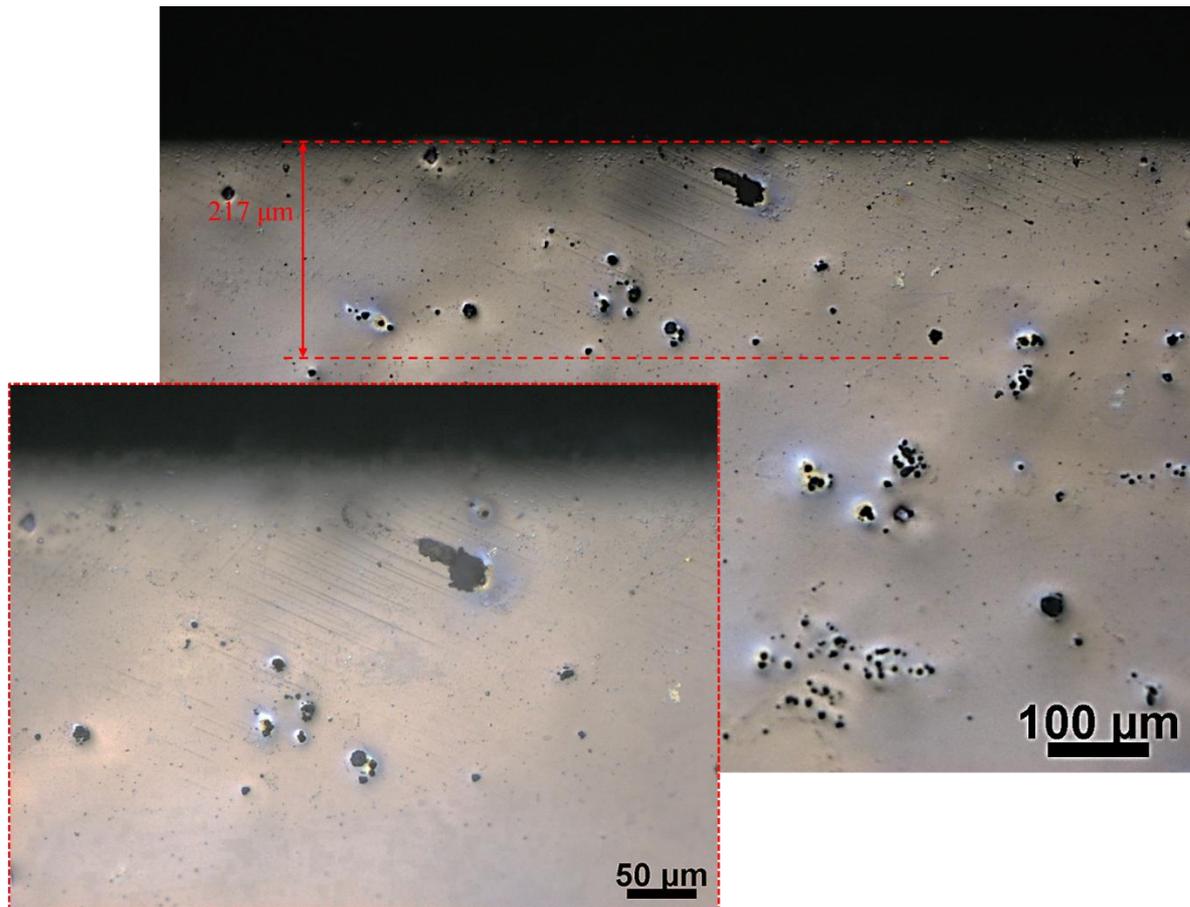


Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

4.5.1 Seção transversal do aço Mn15 e FFBAC

A Figura 51 mostra a micrografia da seção transversal do aço Mn15. As maclas de deformação geradas após os desgastes são visíveis até 217 µm de profundidade, abaixo da superfície de desgaste. De acordo com os valores de microdureza apresentados no gráfico da Figura 46, observa-se estabilidade de valores a partir de 230 µm. É interessante destacar também que a densidade de maclas geradas não foi alta em comparação a outros trabalhos realizados empregando outros testes. Chen et al (2018) ao analisar a seção transversal de aços Hadfield após teste de desgaste por deslizamento, observou que a densidade de maclas geradas e a profundidade de encruamento aumentava com o aumento da carga aplicada no teste. Possivelmente o incremento da carga no atual teste pode ser considerado como forma de aumentar a severidade do ensaio e investigar os efeitos na seção transversal e no comportamento de perda de massa.

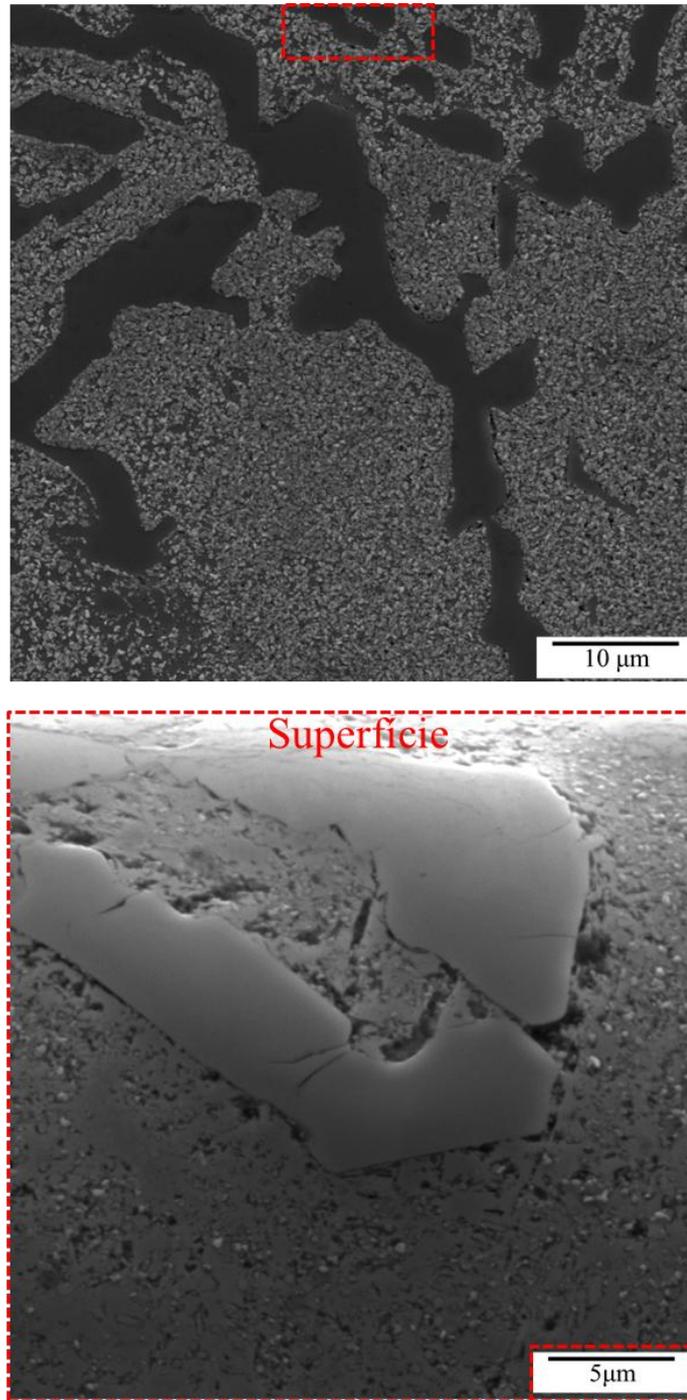
Figura 51-Micrografia da seção transversal do aço Mn15. Ampliação 100x. Ataque Nital 3%.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Como pode ser visto na imagem de MEV da Figura 52, o FFBCA apresentou evidências de deformação plástica na matriz, particularmente nas proximidades da superfície desgastada. A imagem superior, com ampliação de 5kx, mostra uma visão geral da seção transversal.

Figura 52- Imagem de MEV da seção transversal do FFBAC. Ampliação 5 kx.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na imagem inferior, com ampliação de 10kx, a análise foca na região adjacente à superfície desgastada, onde é possível observar a presença de pequenas trincas. Essas trincas são provavelmente decorrentes do teste de desgaste, indicando que os carbonetos, apesar de sua alta dureza, foram submetidos a tensões cíclicas que levaram à formação dessas fissuras iniciais.

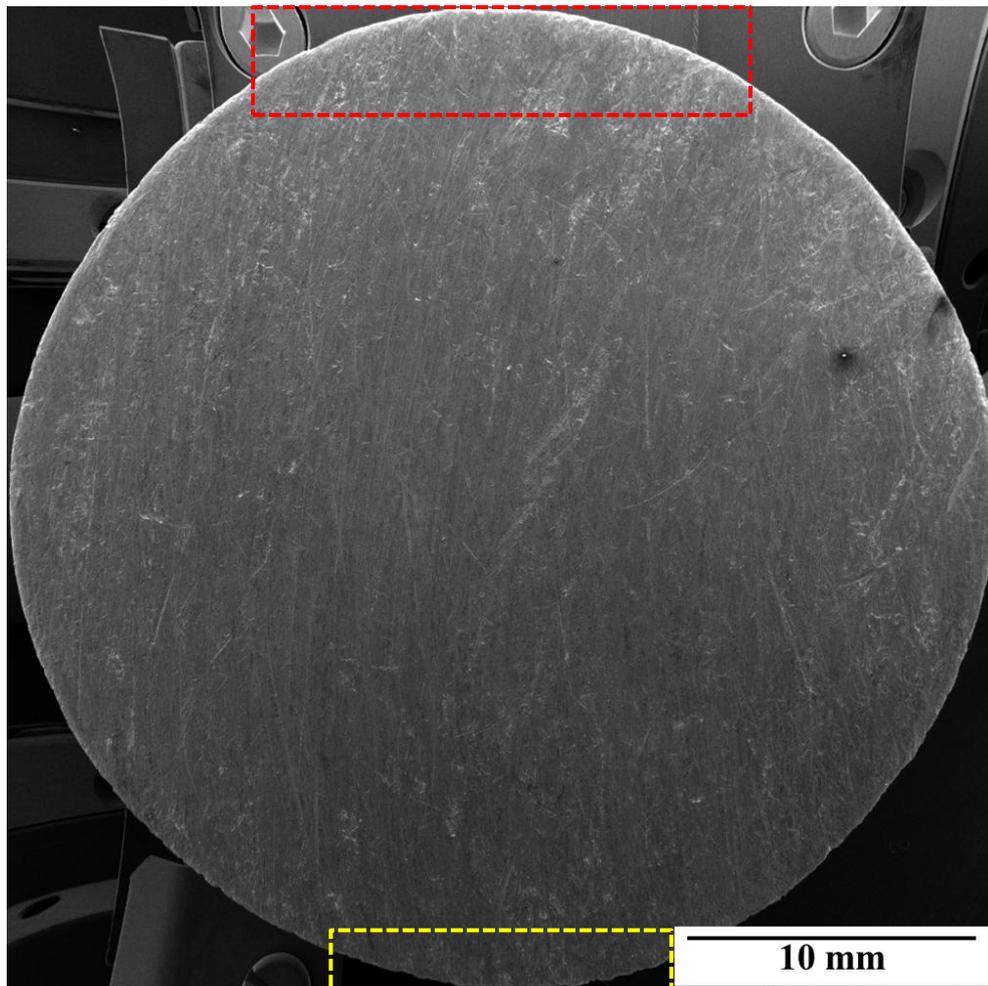
Esse fenômeno pode ser atribuído ao impacto repetido ou à abrasão durante o teste, o que gera tensões localizadas que superam a resistência dos carbonetos à fratura.

A ocorrência de deformação plástica na matriz e as microtrincas nos carbonetos sugerem uma interação complexa entre os diferentes componentes do FFBCA sob condições de desgaste, onde a matriz plástica absorve parte do impacto e os carbonetos mais rígidos resistem às deformações. Essa distribuição de tensões pode ser um fator-chave na durabilidade e no comportamento tribológico do material, uma vez que uma matriz pode ajudar a dissipar energia e minimizar o impacto direto nos carbonetos, prolongando a vida útil do material no teste.

4.6 Micromecanismo de desgaste

A imagem de MEV-SE da Figura 53 mostra a superfície do corpo de prova Mn15. A superfície desgastada enfatiza a direção e sentido dos riscos formados devido a mesma posição em que o corpo de prova foi inserido no porta amostras. Além disso, observa-se variações nos raios dos riscos gerados durante o desgaste, devido a mudança do raio ao longo do disco em direção ao centro indicando possível mudança na severidade do desgaste na superfície do corpo de prova devido a variação na velocidade tangencial. Na imagem está destacada a região de entrada (retângulo vermelho) e saída (retângulo amarelo) da amostra. De acordo com o movimento do disco, entrada é a região em que quando corpo de provas avança contra os abrasivos e impede momentaneamente a passagem deles, promovendo a aglomeração nesta área.

Figura 53 - Superfície desgastada do Mn15. Ampliação 9x



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.6.1 Micromecanismos de desgaste do aço Mn15

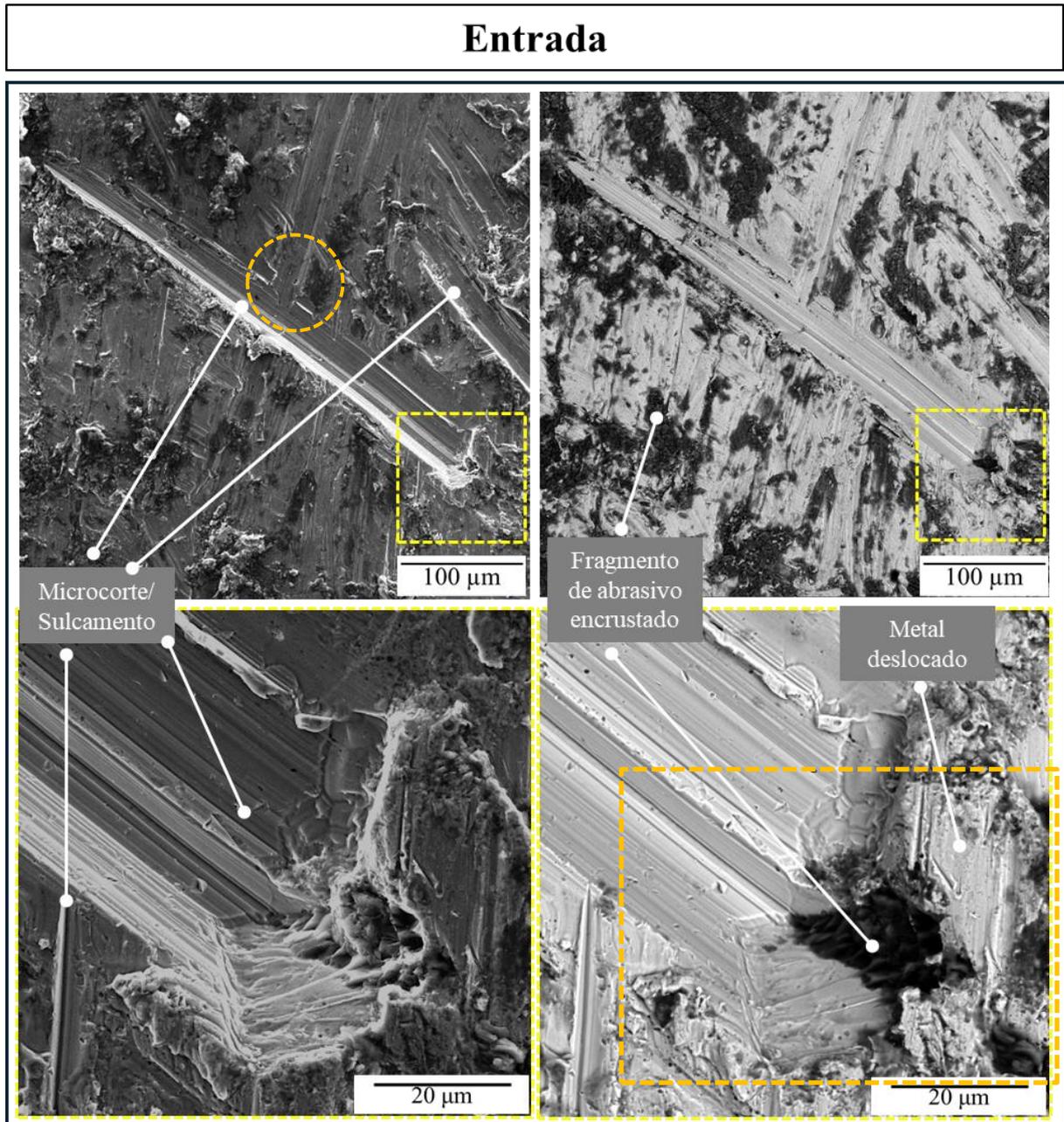
A Figura 54 mostra a imagem de MEV-SE e BSE da superfície desgastada da região de entrada da amostra. As ampliações exibidas são de 500 x (imagens acima) e 3000 x (imagens abaixo).

No modo SE, primeira imagem a esquerda, é possível observar características de desgaste abrasivo, como riscos e sulcos. Na superfície observa-se que houve deslocamento de material de dentro dos sulcos para as laterais, além de deformações plásticas, características de materiais dúcteis e fragmentação de material devido ao processo cíclico de endurecimento ou amolecimento, que pode ser ocasionado pelo aumento de temperatura nos pontos de contato da superfície da amostra com os abrasivos. Nas regiões de borda dos sulcos podem ser observados esse processo de fragmentação de material. Esse fenômeno leva à formação de partículas

desgastadas, que pode acentuar ainda mais o processo de desgaste. E apesar da capacidade de endurecimento por deformação que aço Mn15 possui, o aumento da dureza da superfície pode limitar a resistência à fratura durante o desgaste (CHEN et al., 2018). Além disso, foram observados também partículas abrasivas encrustadas na superfície da amostra. O retângulo de cor laranja destaca uma porção em que o sulco é interrompido por uma partícula abrasiva, impedindo que se prolongasse. Na primeira imagem a esquerda pode ser visualizado o caminho que uma partícula abrasiva percorreu. Claramente se vê o material deslocado para as laterais e o acúmulo como uma proa formado a frente do sulco. Na imagem ao lado direito no modo BSE na ampliação de 3000 x é possível ver a partícula abrasiva encrustada no metal.

É interessante notar as diferentes direções e sentidos em que os microcortes e sulcos são formados, este fato ressalta a dinâmica do teste. Analisando os danos causados na superfície, observa-se que há uma direção de deslizamento preferencial. Contudo, é bastante acentuado nas imagens as formações de outros riscos e sulcos em diferentes ângulos em relação a direção preferencial. Este fenômeno pode até mesmo aumentar os níveis de desgaste, pois quando um abrasivo percorre uma direção perpendicular ao sulco já formado, pode haver a fragmentação da borda formada na lateral do sulco, como destacado pelo círculo de cor laranja.

Figura 54-MEV-SE e BSE da superfície de entrada da amostra do aço Mn15. Imagens à esquerda modo SE e imagens à direita modo BSE. Ampliações 500x e 3000 x.

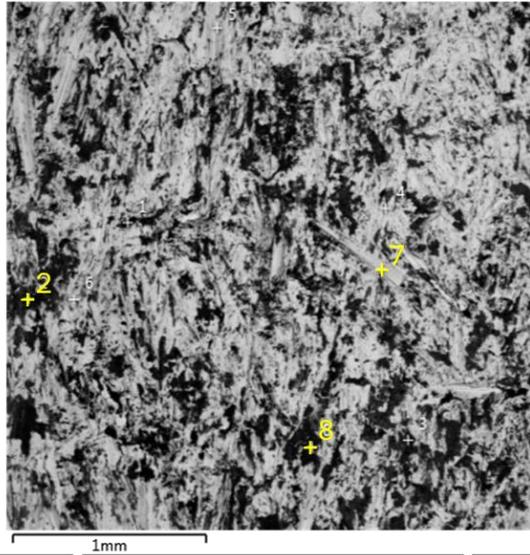


Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A imagem MEV-BSE apresentada na Figura 55 mostra a superfície de desgaste da amostra Mn15, logo abaixo a Figura 55 mostra a composição realizada por EDS em alguns pontos da superfície.

Com base nas composições químicas dos espectros, é provável que a superfície do material esteja coberta por uma mistura de óxidos e silicatos, possivelmente formados por reações com o ambiente, presença de fragmentos do abrasivo utilizado.

Figura 55- Imagem de MEV-BSE com análise de EDS da superfície de desgaste do aço Mn15.

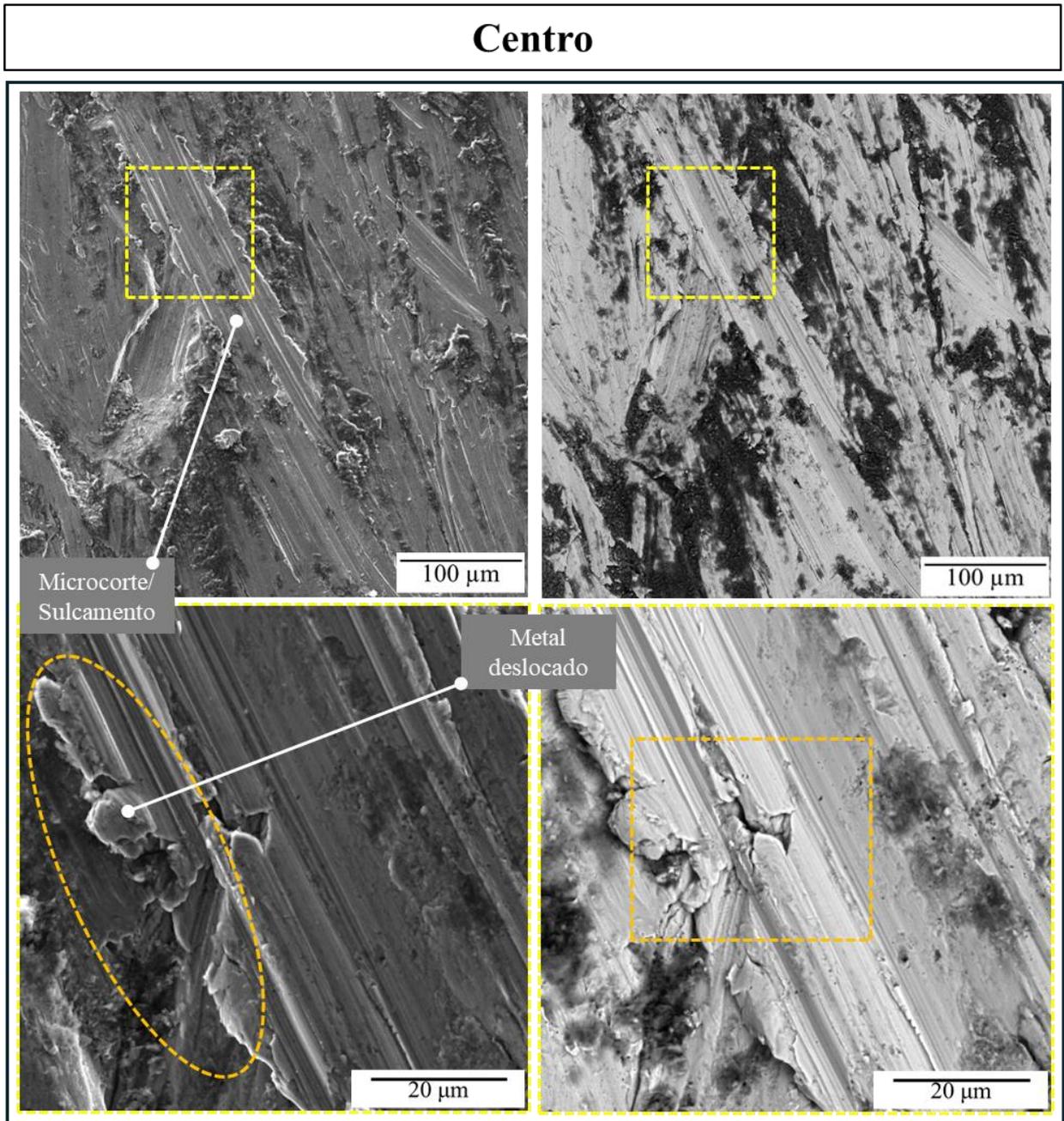


Espectro 2		Espectro 7		Espectro 8	
	% p		% p		% p
O	42.8	Fe	61.1	O	40.4
Si	16.9	O	11.9	Si	31.1
Fe	11.6	Mn	11.7	Fe	15.7
Al	7.8	Si	8.3	Al	7.9
C	7.7	C	7.0	Na	2.0
K	5.7			Mg	1.9
Mg	4.6			K	1.1
S	1.5				
Cu	1.4				

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A região do centro da amostra é exibida na Figura 56. A imagem superior e inferior a esquerda é imagem MEV-SE nas ampliações de 500 x e 3000 x respectivamente e ao lado direito MEV-BSE nas ampliações de 500 x e 3000 x.

Figura 56- MEV-SE e BSE da superfície do centro da amostra do aço Mn15. Imagens à esquerda modo SE e imagens à direita modo BSE. Ampliações 500x e 3000 x.



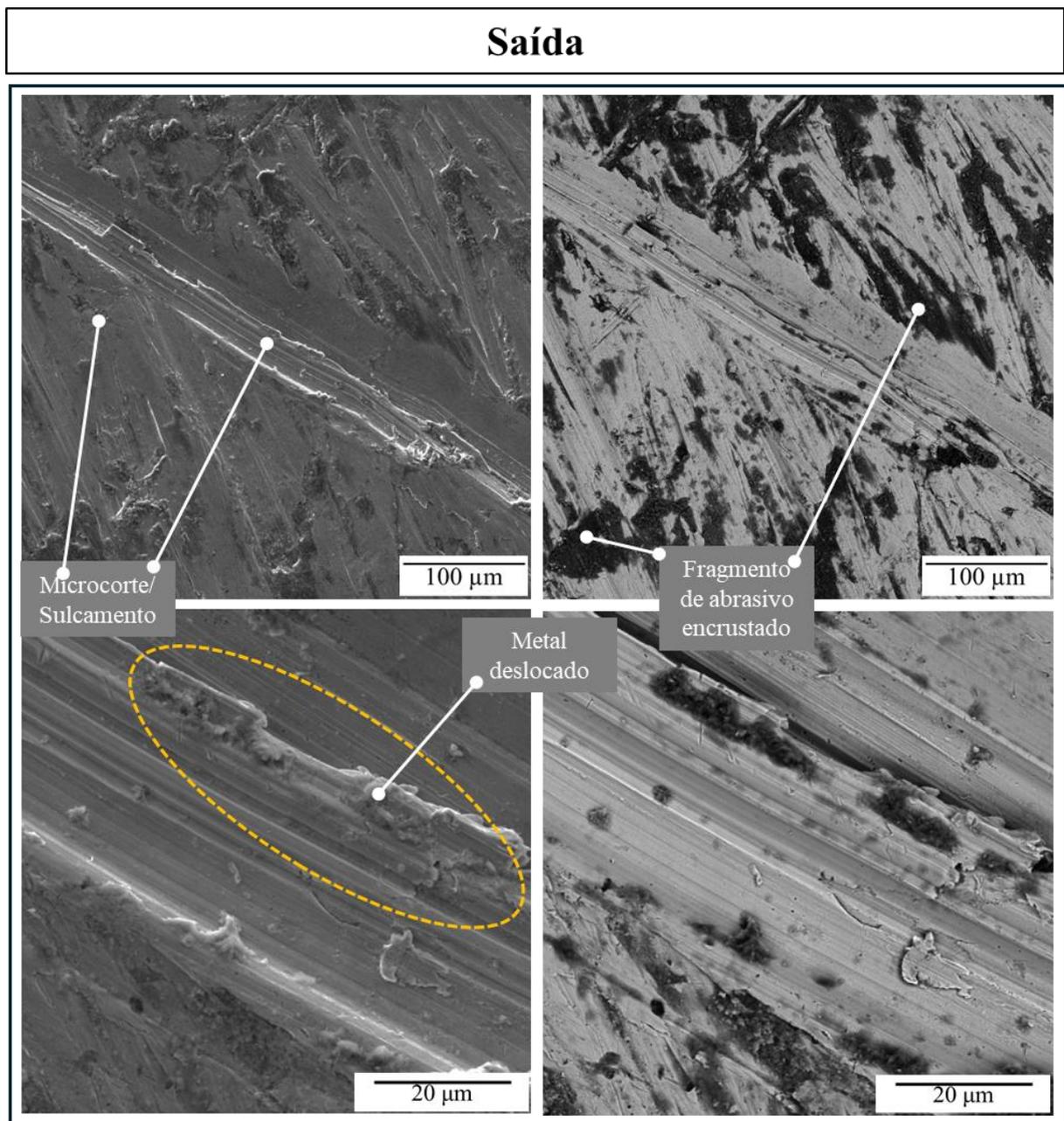
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Nas imagens é possível observar a provável fragmentação do metal deslocado das áreas internas dos sulcos para as laterais, além disso, é evidente também que as bordas são achatadas (marcação oval em laranja), devidas as sucessivas aplicações de carga que levaram a formação e deformação dos sulcos e bordas gerados pelo desgaste. Pode-se ver bastante microsulcamento/corte em diferentes sentidos, como observado na região de entrada. A área

destacada por um retângulo laranja exibe uma possível trinca gerada na borda achatada resultante de fadiga por carregamento cíclico.

A Figura 57 mostra o MEV-SE e BSE da região denominada saída da amostra do Mn15. As imagens à direita superior e inferior estão no modo SE nas ampliações de 500 x e 3000 x, respectivamente, e as imagens à esquerda estão no modo BSE nas ampliações de 500 e 3000 x.

Figura 57-MEV-SE e BSE da superfície da região de saída da amostra do aço Mn15. Imagens a esquerda modo SE e imagens à direita modo BSE. Ampliações 500x e 3000 x.



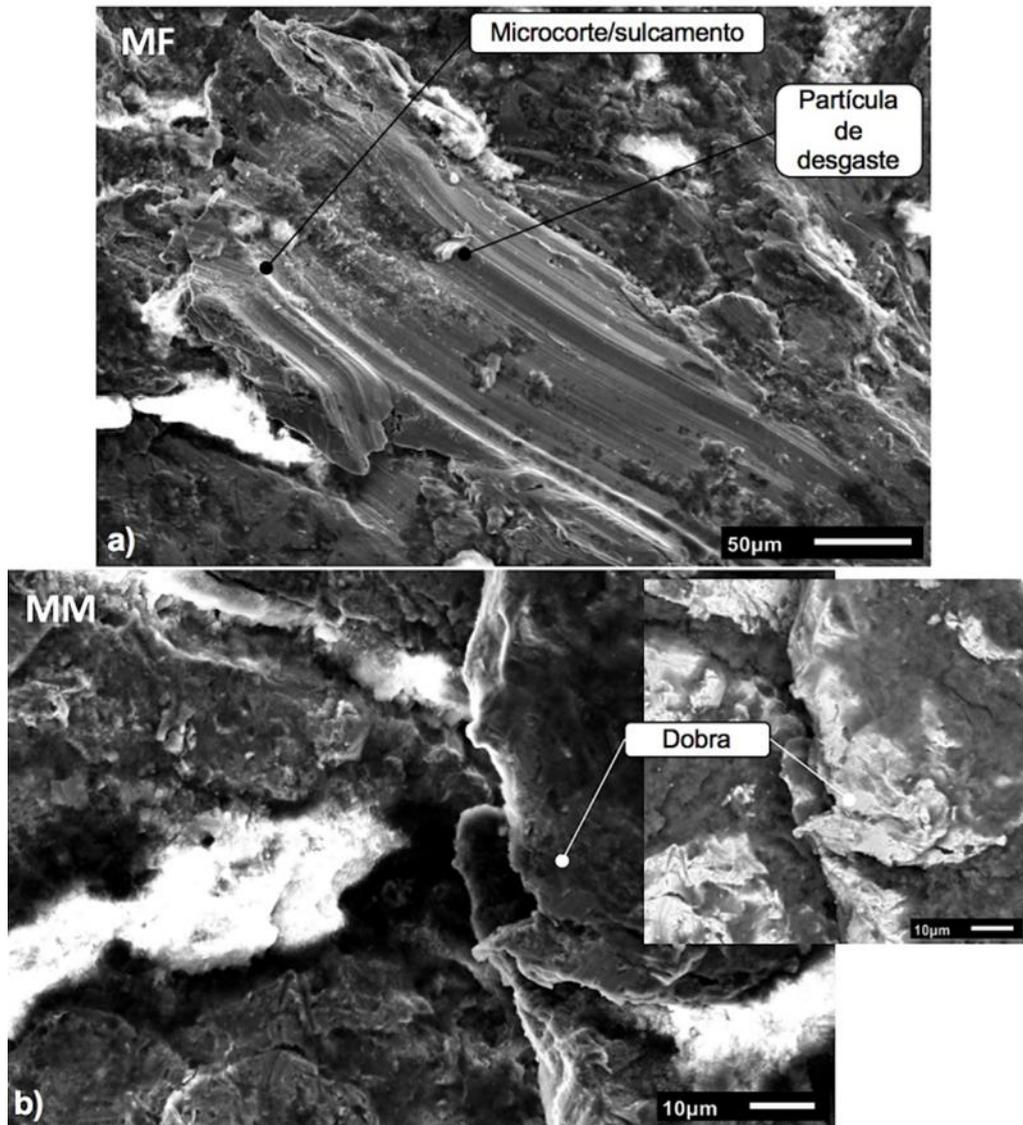
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

As imagens da saída da amostra exibem os mesmos mecanismos encontrados nas regiões exibidas nas Figuras anteriores, como microsulcamentos, microcortes e material abrasivo incrustados na superfície. Comparando as três regiões, não é notório diferenças na severidade do desgaste de uma região para outra e nem diferença relevante na predominância de micromecanismos entre as três áreas analisadas.

Machado (2017) avaliou a resistência ao desgaste abrasivo dos aços Hadfield com 12 e 20 % de Mn usando como teste o britador de mandíbulas laboratorial. Machado observou que entre as mandíbulas móvel e fixa houve semelhanças nos micromecanismos presentes, porém, na fixa houve majoritariamente a ocorrência de microsulcamento/corte, enquanto na mandíbula móvel observou-se maior presença de endentações. Esse resultado é bastante interessante quanto a possibilidade de avaliar materiais que requerem resistência ao desgaste abrasivo de alta tensão de contato.

A Figura 58 mostra os micromecanismos presentes nas mandíbulas móvel e fixa do aço Mn12. A partir da visualização da superfície, entende-se que os micromecanismos resultantes do teste PDFA são semelhantes ao da mandíbula fixa, com predominância de microsulcamento e microcorte.

Figura 58- Imagens de MEV da região da região de saída da mandíbula. Mandíbula fixa (a) e mandíbula móvel (b). Aço Mn20.

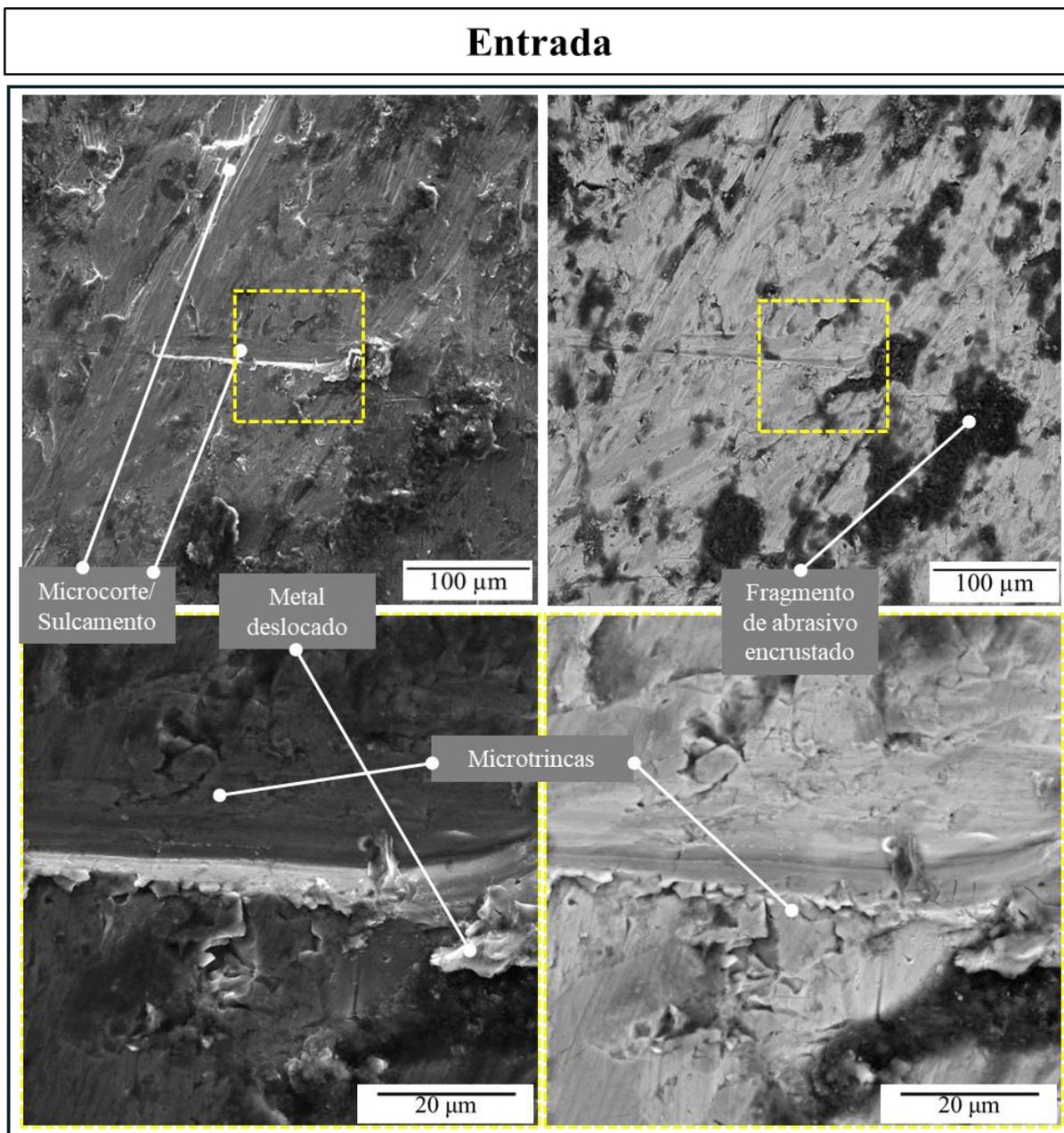


Fonte: Machado (2017)

4.6.2 Micromecanismos de desgaste FFBAC

As Figuras a seguir mostram as três regiões analisadas no corpo de prova de FFBAC. A primeira região a ser visualizada, a entrada, pode ser vista na Figura 59.

Figura 59-MEV-SE e BSE da superfície de entrada da amostra do FFBAC. Imagens à esquerda modo SE e imagens à direita modo BSE. Ampliações 500x e 3000 x.

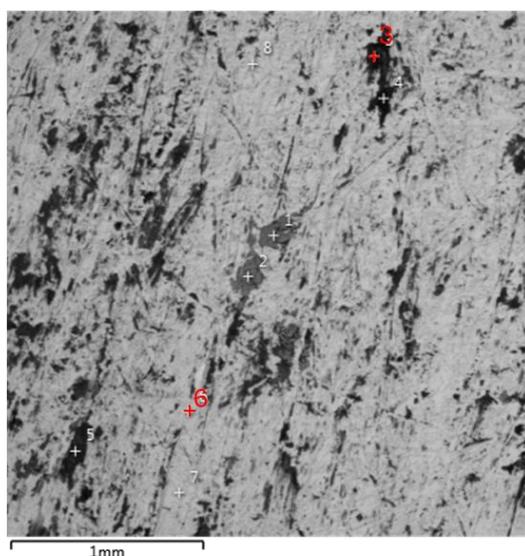


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Ao observar a imagem de MEV da Figura 59, é evidente a diferença existente entre a superfície desgastada do FFBAC e o aço Mn15. Enquanto o aço Mn15 apresentou em sua superfície sulcos aparentemente mais profundos, o FFBAC evidenciou maior presença de microtrincas e sulcos de menor largura e profundidade. Contudo, apresentou material abrasivo incrustado na superfície, assim como o Mn15.

Na Figura 60 é exibida a análise de composição química via EDS da superfície desgastada do FFBAC. De acordo com o exame da superfície, há possivelmente a presença de silicatos do material abrasivo utilizado.

Figura 60-MEV-EDS da superfície desgastada do FFBAC.



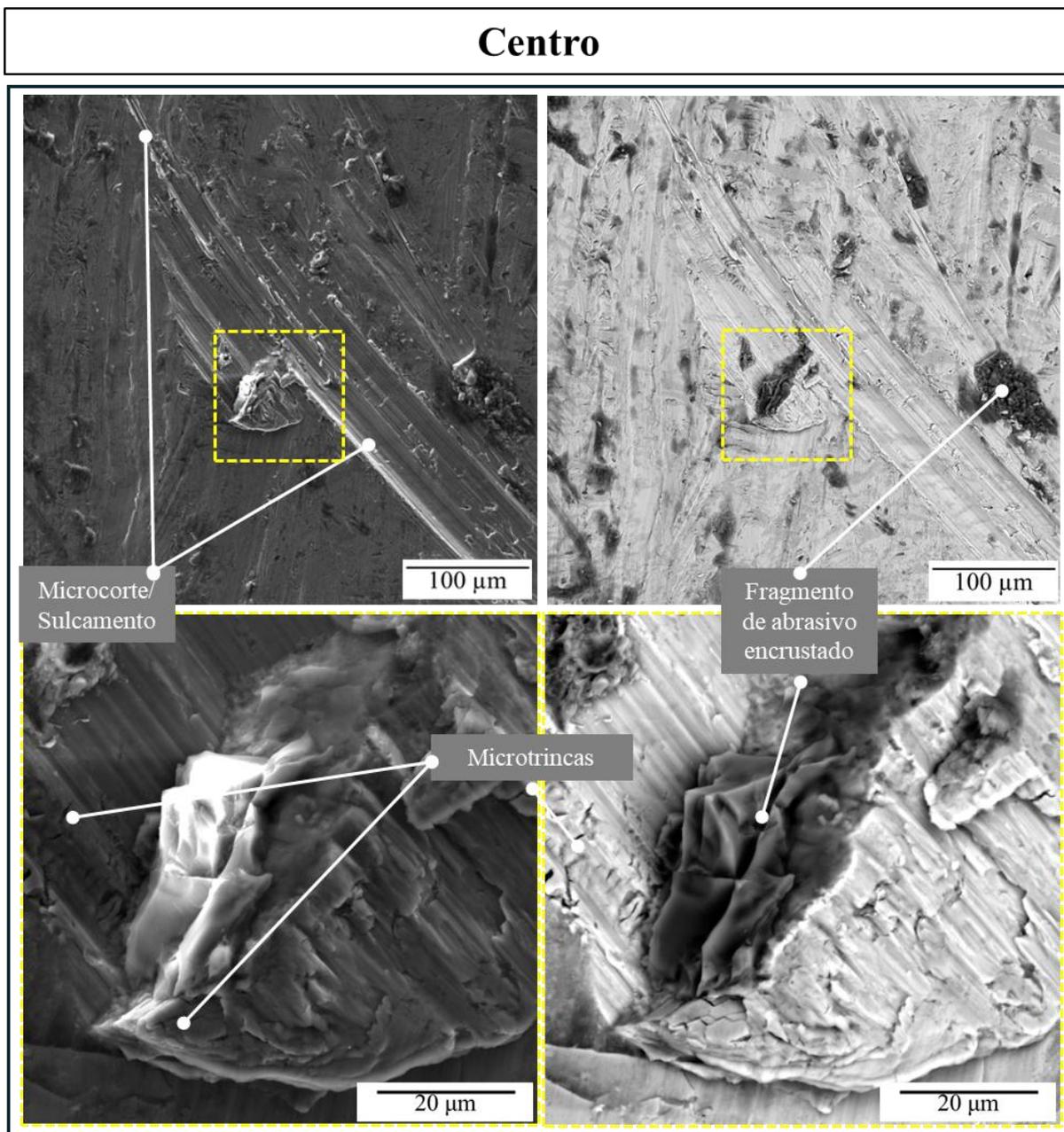
Espectro 3		Espectro 6	
	% p		% p
O	45.8	Fe	76.6
Si	21.3	O	8.3
Fe	11.6	Cr	8.0
Al	10.9	Si	3.1

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Em comparação a superfície do aço Mn15 (Figura 54), o FFBAC apresentou menor quantidade de material aderido à superfície.

A Figura 61 e 62 mostram as imagens MEV-SE e BSE das regiões denominadas centro e saída da amostra de FFBAC, respectivamente. As imagens à direita superior e inferior estão no modo SE nas ampliações de 500 x e 3000 x, respectivamente, e as imagens à esquerda estão no modo BSE nas ampliações de 500 e 3000 x.

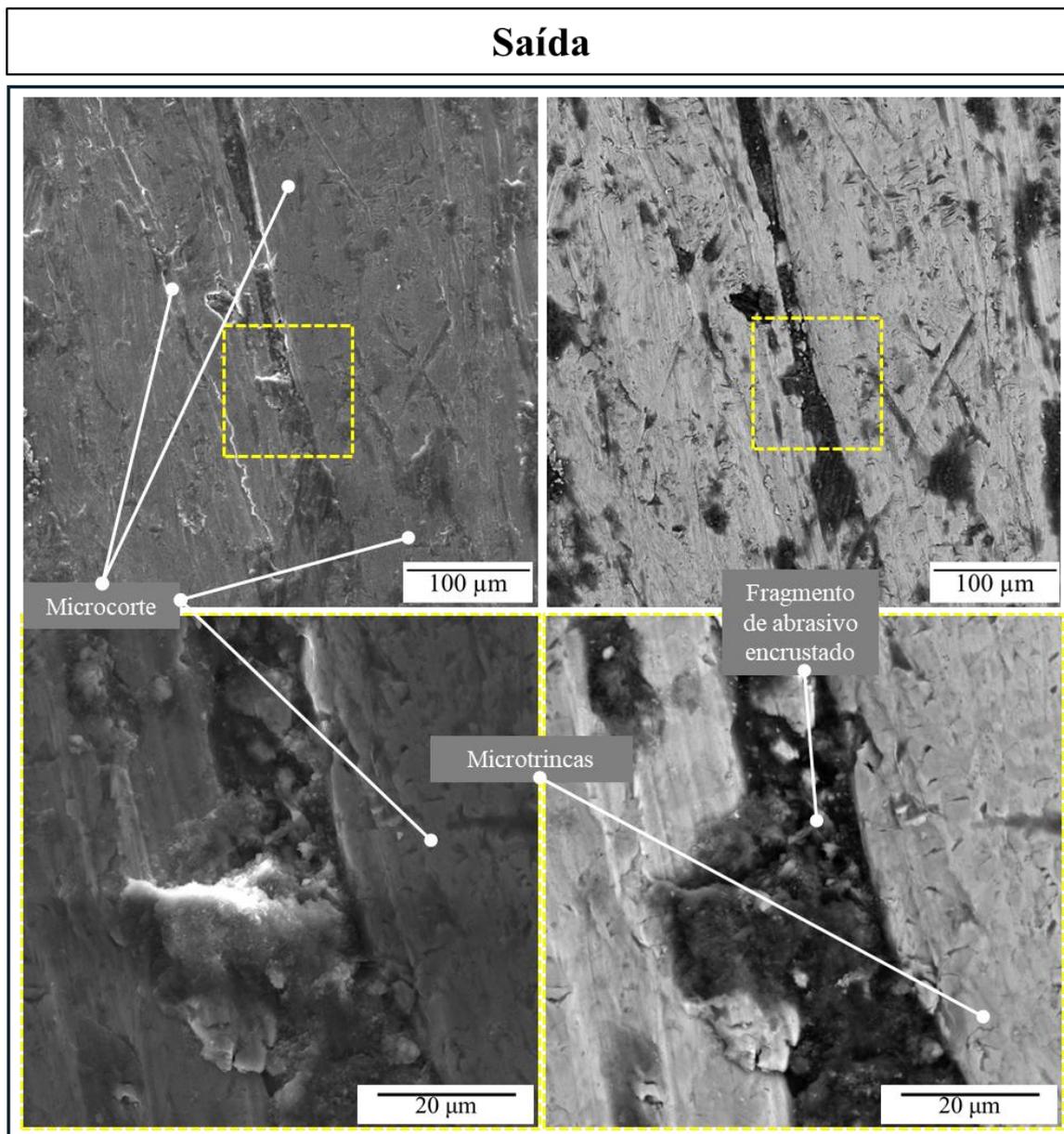
Figura 61- MEV-SE e BSE da superfície do centro da amostra do FFBAc. Imagens a esquerda modo SE e imagens à direita modo BSE. Ampliações 500x e 3000 x.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Observa-se na Figura 61 a presença de microsulcos, microcortes e microtrincas. O material abrasivo presente impediu a propagação de um dos sulcos, conforme destacado na figura, formando uma protuberância a frente do sulco, demonstrando resistência e que a presença de abrasivos aderidos a superfície pode. As bordas formadas ao lado dos sulcos devido ao deslocamento de material, são menores quando comparadas as bordas geradas pelos sulcos no aço Mn15.

Figura 62- MEV-SE e BSE da superfície de saída da amostra do FFBAC. Imagens à esquerda modo SE e imagens à direita modo BSE. Ampliações 500x e 3000 x.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Na Figura 62 é possível ver a formação de microcortes com material abrasivo incrustado. No corte em destaque observa-se que não há a presença de bordas tão proeminentes como visto nos sulcos destacados nas imagens anteriores.

As três regiões obtidas após desgaste não apresentaram variações relevantes em relação ao grau de severidade do desgaste e mudanças relevantes de micromecanismos de uma região para outra.

Contudo, há diferenças bastante significativas entre na forma e magnitude dos micromecanismos gerados na superfície entre os dois materiais. Na superfície do FFBAC os sulcos formados são visualmente mais estreitos e menos profundos quando comparados aos da superfície do aço Mn15. Há também, aparentemente, maior presença de microcortes no aço Mn15 e mais microtrincas no FFBAC. Além disso, houve maior deformação plástica no aço Mn15 e as bordas formadas às laterais dos sulcos são de maior volume e se mostram de forma mais contínua. Enquanto no FFBAC formaram-se bordas de volume reduzido e de forma descontínua, podendo ser característica de material mais duro e de menor tenacidade.

4.7 Interferometria

Os resultados da análise de interferometria são apresentados na Tabela 20. O aço 15 Mn teve valor superior para Sa e Sq, esse resultado pode ter relação com a maior capacidade de deformação plástica do material e, conseqüentemente, formação de sulcos com vales mais profundos e bordas mais altas que o FFBAC, como identificado nas imagens MEV.

Tabela 20- Interferometria do aço Mn15, FFBAC e do aço de referência D2.

Material	Sa (μm)	Sq (μm)	Str (%)
15Mn	1,9	2,6	17
FFBAC	1,1	1,6	16

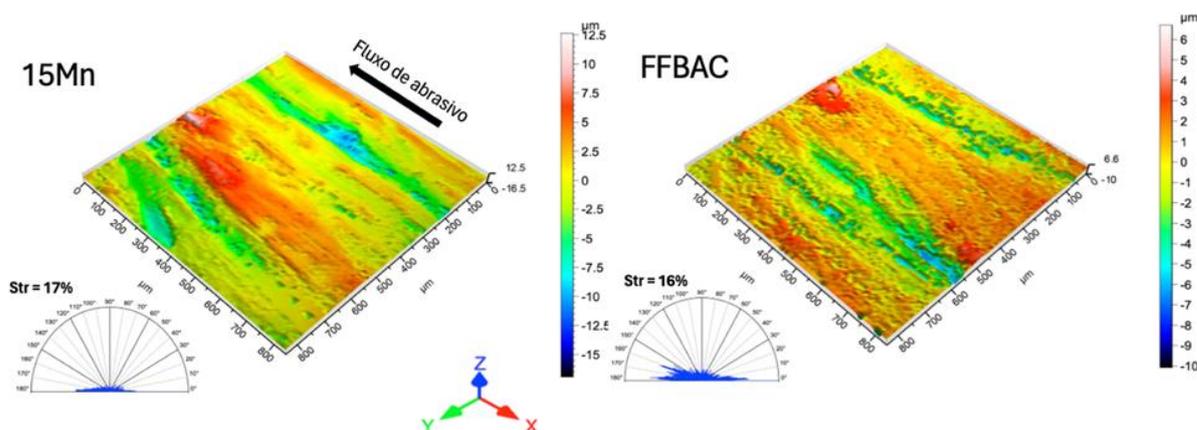
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O resultado da isotropia da textura superficial apresentou valores baixos, indicando uma textura anisotrópica. Essa característica anisotrópica sugere que os sulcos e ranhuras formados seguem a direção do fluxo de abrasivo, reforçando a ideia de direcionalidade imposta pelo movimento do contato, conforme também observado em outros trabalhos sobre desgaste abrasivo (MACHADO, 2017).

A configuração do ensaio, que envolve fratura de abrasivos e aplicação de força em um único sentido, favorece a formação de uma textura com orientação preferencial, criando áreas de deformação e trincamento que seguem essa direção.

A projeção 3D das superfícies, mostrada na Figura 63 com ampliação de 5%, evidencia visualmente essa anisotropia, onde os sulcos são formados predominantemente ao longo do fluxo do abrasivo.

Figura 63- Mapa 3D das superfícies desgastadas com orientação da textura superficial do Mn15 e FFBAC.



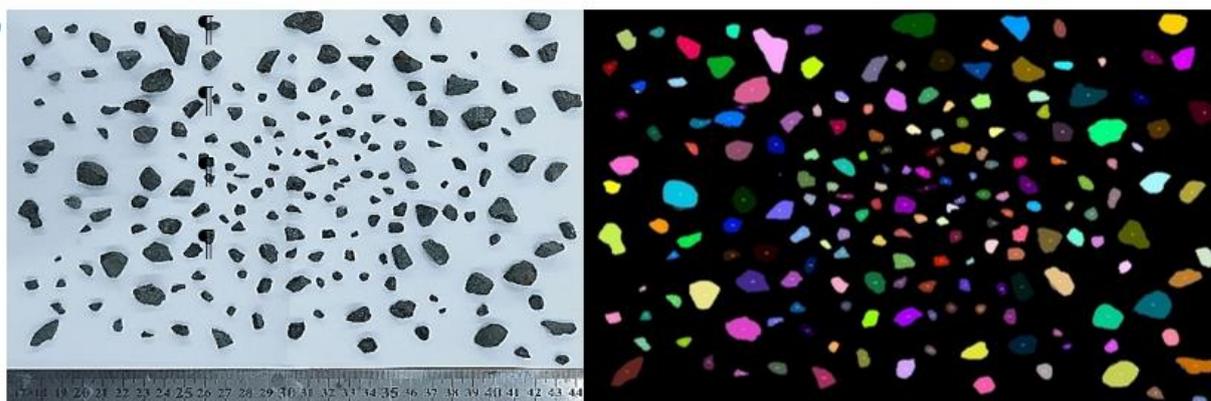
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

4.8 Classificação do desgaste abrasivo do teste PDFA

Foi utilizada a Tabela de classificação de desgaste abrasivo apresentada por Gates, citado no 2.1.2, Tabela 2, como uma das formas de classificar o desgaste abrasivo do teste empregado na atual pesquisa, por grau de severidade. Para isto, primeiramente foi verificada a circularidade das partículas de entrada no teste.

Os resultados de circularidade podem ser vistos nas Figura 64 e 65 e na Tabela 21. Na Figura 63 é apresentada a imagem tirada dos abrasivos (lado esquerdo) e a imagem gerada após contagem dos abrasivos no Image J (imagem ao lado direito).

Figura 64-Imagem dos abrasivos utilizada para obtenção da circularidade via Image J.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Foram analisadas o total de 186 partículas, conforme visto na Tabela 21. Hutchings e Shipway (1992) afirmam que quanto mais próximo o valor de circularidade estiver de 1, mais circular é a partícula, além disso, a forma da partícula pode alterar o grau de severidade do desgaste e os micromecanismos encontrados na superfície desgastada. A tabela mostra que aproximadamente 60% das partículas são moderadamente arredondadas. Em contraste, percentagens menores de partículas exibem maior angularidade (valores mais próximos de 0).

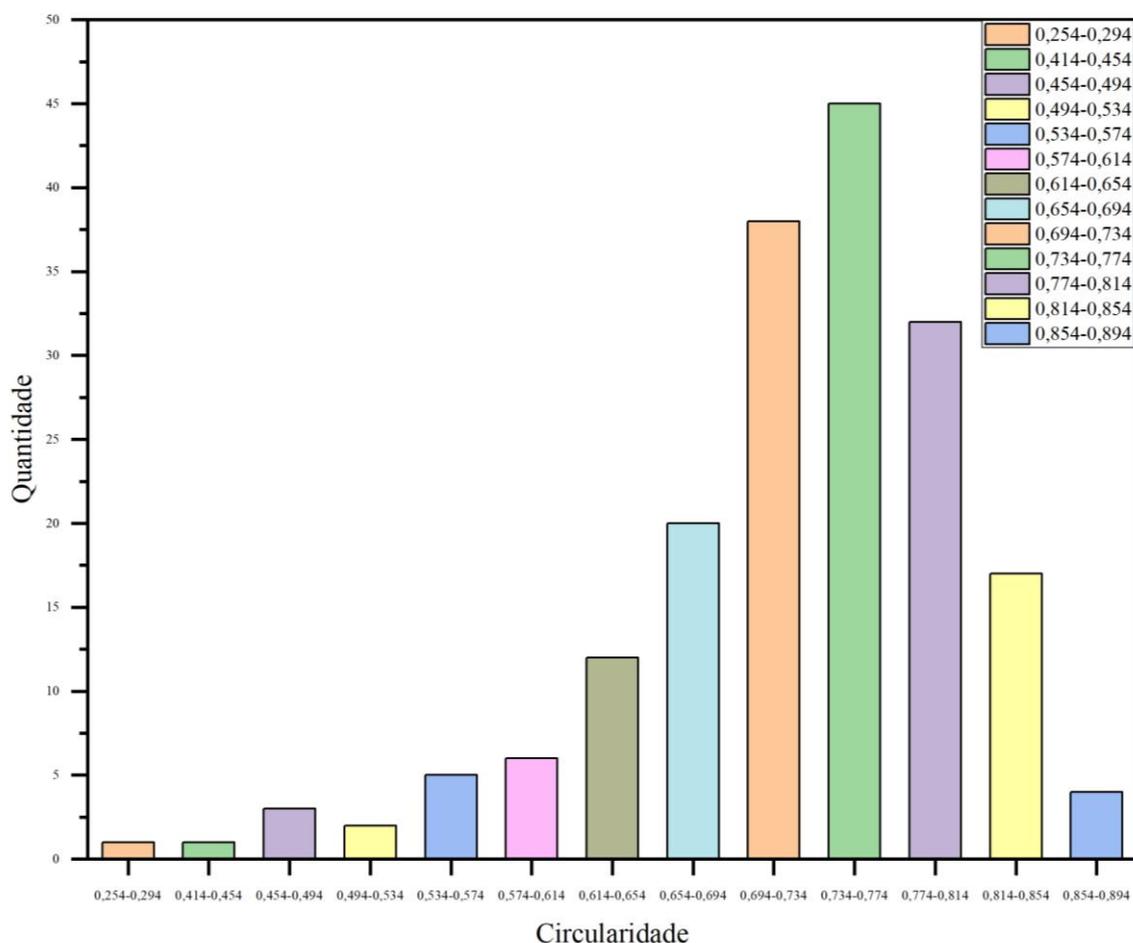
Tabela 21- Faixa de circularidade dos abrasivos de entrada no teste.

Faixa circularidade	Quantidade	%
0,254-0,294	1	1
0,414-0,454	1	1
0,454-0,494	3	2
0,494-0,534	2	1
0,534-0,574	5	3
0,574-0,614	6	3
0,614-0,654	12	6
0,654-0,694	20	11
0,694-0,734	38	20
0,734-0,774	45	24
0,774-0,814	32	17
0,814-0,854	17	9
0,854-0,894	4	2
Total Geral	186	100

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A Figura 65 mostra o gráfico de circularidade e a respectiva quantidade de abrasivos contidos nas faixas encontradas.

Figura 65-Gráfico de distribuição do fator de forma das partículas analisadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Os dados apresentados indicam que as partículas analisadas possuem, em sua maioria, formas moderadamente arredondadas (entre 0,694-0,734 e 0,734-0,774), fato relevante, pois, em estudos sobre desgaste por abrasão, partículas mais arredondadas tendem a produzir menos desgaste do que abrasivos com formato mais angulares.

Segundo a Tabela de classificação de desgaste abrasivo apresentada por Gates, o desgaste do atual teste pode ser classificado de severo a extremo, pois, as partículas empregadas no teste variam em seu tamanho, como já mencionado ao longo do trabalho e a forma dos abrasivos se aproximam tanto da forma circular quanto da angular. Quanto a restrição no modo de desgaste, pode ser considerado parcialmente restringido por contraface, devido ao movimento cíclico de avanço contra os abrasivos contidos no leito com um disco de borracha como base. A tensão de contato é forte o suficiente para gerar fratura de abrasivos assim como

causar deformações macroscópicas nos corpos de prova desgastados. Contudo, os mecanismos encontrados nas superfícies desgastadas mesclam os três graus de severidade da tabela de classificação, pois foram observados em todas as amostras dos dois materiais presença de microsulcamento, microcortes e microtrincas.

Gates ainda relata que a remoção de material depende fortemente das características do material. Além disso, o contracorpo (disco de borracha) sendo mais macio que o corpo (Mn15 e FFBC), permite aumentar a taxa de desgaste no corpo de prova, pois, as partículas abrasivas se incrustam no contracorpo inserindo ao sistema desgaste abrasivo a dois corpos, consideravelmente mais severo que a três corpos.

5 CONCLUSÕES

A pesquisa realizada para analisar a resistência ao desgaste abrasivo do aço Hadfield com 15 %Mn e ferro fundido branco alto cromo nas condições definidas via ensaio pino disco com fratura de abrasivo possibilitou formar as seguintes conclusões:

- Os parâmetros empregados permitiram boa análise dos materiais, assim como, boa dinâmica durante o teste, incluindo tempo de transição para o regime permanente;
- Os materiais avaliados, aço Hadfield Mn15 e FFBC, apresentaram diferentes taxas de desgaste, 0,0021 e 0,0006 g/min respectivamente, uma diferença de 3,5 vezes entre a taxa de desgaste do aço Hadfield e o FFBC estudados. Diesburg e Borik em 1974 em um ensaio de britador de mandíbula, obtiveram diferença de 3,2 vezes para um aço Hadfield e ferro fundido branco alto cromo;
- Os resultados do ANOVA indicou que o tipo de material foi o fator que apresentou a maior contribuição para a variação na perda de massa. O valor F foi 287,14, com um $P < 0,0001$, indicando que o efeito do material é altamente significativo;
- A interação entre material e tempo não foi significativa, sugerindo que a perda de massa é determinada principalmente pelo tipo de material;
- O perfil de microdureza mostrou que o aço Hadfield atingiu valores limites de dureza na superfície de 766 HV, estabilizando a 242 μm .
- O FFBC não apresentou variação significativa de microdureza ao longo do perfil analisado, indicando encruamento, devido o material ser heterogêneo, contudo, na imagem de MEV da seção transversal evidencia o fenômeno de encruamento.
- O ensaio PDFA reproduziu os micromecanismos de desgaste encontrados em equipamentos de fragmentação de minério, apresentando microsulcamento, microcortes e microtrincas.
- Não houve alteração significativa entre as três regiões analisadas na superfície dos dois materiais, mas houve diferenças relevantes entre os dois materiais;
- A análise por interferometria sustenta a direcionalidade imposta pela configuração do ensaio pino disco com fratura de abrasivo, e os resultados de S_a e S_q evidenciam a diferença no comportamento dos dois materiais quanto a profundidade dos microsulcos e microcortes gerados após o teste
- De acordo com a tabela de classificação de desgaste abrasivo apresentada, o teste PDFA pode ser classificado como desgaste abrasivo severo/extremo.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Alguns parâmetros do teste precisam de maior compreensão, necessitando de ensaios mais demorados, tempos de interrupção do teste mais curtos que permitam avaliar com maior acuracidade todos os aspectos relevantes que podem levar o teste a resultados precipitados.

- Realizar ensaios com paradas para pesagem dos corpos de provas na etapa de pré-teste para avaliar o comportamento de diferentes materiais, assim como refinar o tempo em que cada material entra no regime estacionário do desgaste.
- Para verificar a influência da variação de carga tanto nos abrasivos quanto no desgaste dos materiais, efetuar testes com variação de carga, mantendo os outros parâmetros empregados na atual pesquisa. Bem como variar rotação e manter o restante dos parâmetros atuais.
- Com o intuito de investigar a magnitude de interferência do contracorpo do sistema no grau de severidade do desgaste, realizar testes com discos de materiais diversos com diferentes durezas, avaliando a combinação e as alterações perceptíveis no sistema tribológico.

REFERÊNCIAS

- Agunsoye, J. O., Isaac, T. S., & Abiona, A. A. (2013). On the Comparison of Microstructure Characteristics and Mechanical Properties of High Chromium White Iron with the Hadfield Austenitic Manganese Steel. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 01(01), 24–28. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2013.11005>
- Anderson, A. E., Arnold, W. K., Institute, F., Brown, R. N., Chemical, D., Kenneth, U. S. A. •, Budinski, G., Burton, R. A., Davis, J. R., Associates, D., Fein, R. S., Associates, F., Glaeser Battelle, W. A., & Granger, D. A. (n.d.). *ASM HANDBOOK: Friction, lubrication, and Wear Technology*.
- ASTM G40. (2021). ASTM G40-21: Standard Terminology Relating to Wear and Erosion. *American Society for Testing and Materials*, i.
- Author, C., Jimmy Penagos, J., Author, F., of Authors, O., Pereira, J. I., Machado, P. C., Albertin, E., & Sinatora, A. (n.d.). *Elsevier Editorial System(tm) for Wear of Title: Synergetic effect of niobium and molybdenum on abrasion resistance of high chromium cast irons*.
- Bahadur. (1977). *The Economic Impact of Wear on Society*. <http://www.asme.org/about-asm>
- Bhushan, B. (n.d.). *Introduction to tribology*.
- Blickensderfer, R., Madsen, B. W., & Tylczak, J. H. (1985). COMPARISON OF SEVERAL TYPES OF ABRASIVE WEAR TESTS. *Wear of Materials: International Conference on Wear of Materials*.
- Castings, S., & Manganese, A. (n.d.). *Standard Specification for*. https://doi.org/10.1520/A0128_A0128M-93R17
- Chen, C., Lv, B., Ma, H., Sun, D., & Zhang, F. (2018). Wear behavior and the corresponding work hardening characteristics of Hadfield steel. *Tribology International*, 121, 389–399. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.01.044>
- Chowdhury, P., Canadinc, D., & Sehitoglu, H. (2017a). On deformation behavior of Fe-Mn based structural alloys. In *Materials Science and Engineering R: Reports* (Vol. 122). <https://doi.org/10.1016/j.mser.2017.09.002>

- Chowdhury, P., Canadinc, D., & Sehitoglu, H. (2017b). On deformation behavior of Fe-Mn based structural alloys. In *Materials Science and Engineering R: Reports* (Vol. 122, pp. 1–28). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2017.09.002>
- Dastur, Y. N., & Leslie, W. C. (n.d.). *Mechanism of Work Hardening in Hadfield Manganese Steel*.
- Designation: G40 – 22a.* (n.d.). <https://doi.org/10.1520/G0040-22A>
- Dodd, J. (1969). The role of cast alloys in resisting abrasion by cement clinker. *Wear*, *14*(4). [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(69\)90050-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(69)90050-7)
- Durand-Charre, Madeleine. (2004). *The microstructure of steels and cast irons*. Springer.
- Eyre, T. S. (1976). Wear characteristics of metals. *Tribology International*, *9*(5). [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(76\)90077-3](https://doi.org/10.1016/0301-679X(76)90077-3)
- Fabert, H. A. (1975). MANGANESE STEELS IN CRUSHING AND GRINDING SERVICE. *Met Eng Q*, *15*(4).
- Gates, J. D. (1998). Two-body and three-body abrasion: A critical discussion. *Wear*, *214*(1). [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(97\)00188-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(97)00188-9)
- Gwidon W. Stachowiak. (n.d.). *WEAR-MATERIALS, MECHANISMS AND PRACTICE*.
- Härkisaari, P. (2015). *Wear and Friction Effects on Energy Consumption in the Mining Industry*.
- Holmberg, K., & Erdemir, A. (2015). Global impact of friction on energy consumption, economy and environment. *FME Transactions*, *43*(3), 181–185. <https://doi.org/10.5937/fmet1503181H>
- Holmberg, K., Kivikytö-Reponen, P., Härkisaari, P., Valtonen, K., & Erdemir, A. (2017). Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry. *Tribology International*, *115*, 116–139. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.05.010>
- Huq, M. J., Shimizu, K., Kusumoto, K., & Purba, R. H. (2022). Three-Body Abrasive Wear Performance of High Chromium White Cast Iron with Different Ti and C Content. *Lubricants*, *10*(12). <https://doi.org/10.3390/lubricants10120348>
- Hutchings, I. M., & Shipway, P. (n.d.). *Tribology : friction and wear of engineering materials*.

Jafari, A., Dehghani, K., Bahaaddini, K., & Abbasi Hataie, R. (2018). Experimental comparison of abrasive and erosive wear characteristics of four wear-resistant steels. *Wear*, 416–417, 14–26. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.09.010>

Jafarian, H. R., Sabzi, M., Mousavi Anijdan, S. H., Eivani, A. R., & Park, N. (2021). The influence of austenitization temperature on microstructural developments, mechanical properties, fracture mode and wear mechanism of Hadfield high manganese steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.003>

Jost, H. P. (n.d.). *THE ECONOMIC IMPORTANCE OF TRIBOLOGY IN THE CONSERVATION OF ENERGY*.

Kahrobaee, S., & Zohourvahid Karimi, E. (2019). Characterisation of work-hardening in Hadfield steel using non-destructive eddy current method. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 34(2), 178–192. <https://doi.org/10.1080/10589759.2019.1581190>

Khonsari, M. M., Ghatrehsamani, S., & Akbarzadeh, S. (2021). On the running-in nature of metallic tribo-components: A review. In *Wear* (Vols. 474–475). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203871>

Lindroos, M., Apostol, M., Heino, V., Valtonen, K., Laukkanen, A., Holmberg, K., & Kuokkala, V. T. (2015). The deformation, strain hardening, and wear behavior of chromium-alloyed hadfield steel in abrasive and impact conditions. *Tribology Letters*, 57(3). <https://doi.org/10.1007/s11249-015-0477-6>

Ling, F. F., & Hart, W. (1983). *Fundamental Research on Tribology*. <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA125751.pdf>

Machado, P. (2017). *ANÁLISE MULTIESCALA DA ABRASÃO DE AÇOS AUSTENÍTICOS AO MANGANÊS APLICADOS EM BRITADORES DE MINÉRIO*.

Machado, P. C., Pereira, J. I., & Sinatora, A. (2021). Abrasion wear of austenitic manganese steels via jaw crusher test. *Wear*, 476. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203726>

Mathias Woydt, A., Tim Hosenfeldt, D., Luther, R., Scholz, C., Bässe Magna Powertrain GmbH, M., Christoph Wincierz, A., & Schulz Hamburg, J. (n.d.). *Wear protection and sustainability as cross-sectional challenges*. www.schmitt-language-solutions.de

OJALA, N. (n.d.). *Application Oriented Wear Testing of Wear Resistant Steels in Mining Industry*.

Panchal, K. (1605). Life Improvement of Hadfield manganese steel castings Characterization of nitriding on 304 L stainless steel View project Life Improvement of Hadfield manganese steel castings. *International Journal of Scientific Development and Research*, 1(5). www.ijdsr.org

Pourasiabi, H., & Gates, J. D. (2022). Effects of chromium carbide volume fraction on high-stress abrasion performance of NbC-bearing high chromium white cast irons. *Wear*, 498–499. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204312>

Rodrigues da Costa Adilson. (2022). Tribology in mining: Highlights in iron ore abrasiveness. *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, 7(2), 029–043. <https://doi.org/10.30574/wjaets.2022.7.2.0127>

Saha, G., Valtonen, K., Saastamoinen, A., Peura, P., & Kuokkala, V. T. (2020). Impact-abrasive and abrasive wear behavior of low carbon steels with a range of hardness-toughness properties. *Wear*, 450–451. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203263>

Sare, I. R., & Arnold, B. K. (1989). GOUGING ABRASION OF WEAR-RESISTANT ALLOY WHITE CAST IRONS. In *Wear* (Vol. 131).

Standard Specification for Abrasion-Resistant Cast Irons 1. (n.d.). https://doi.org/10.1520/A0532_A0532M-10R23

Terva, J., Teeri, T., Kuokkala, V. T., Siitonen, P., & Liimatainen, J. (2009). Abrasive wear of steel against gravel with different rock-steel combinations. *Wear*, 267(11), 1821–1831. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.02.019>

Tressia, G. (2015). *Resistência à abrasão de aço Hadfield para britadores – efeito do tamanho do abrasivo e do pH do meio.*

Valtonen, K. (n.d.). *Relevance of Laboratory Wear Experiments for the Evaluation of In-Service Performance of Materials.*

Venturelli, B. N., Albertin, E., & De Farias Azevedo, C. R. (2018). The effect of the austenite grain refinement on the tensile and impact properties of cast Hadfield steel. *Materials Research*, 21(5). <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2018-0069>

WEAR-MATERIALS, MECHANISMS AND PRACTICE. (n.d.).

Woydt, M. (2021). The importance of tribology for reducing CO2 emissions and for sustainability. *Wear*, 474–475. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203768>

Xiong, R., Peng, H., Wang, S., Si, H., & Wen, Y. (2015). Effect of stacking fault energy on work hardening behaviors in Fe-Mn-Si-C high manganese steels by varying silicon and carbon contents. *Materials and Design*, 85, 707–714. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.072>

Zum Gahr - microstructure_and_wear_of_materials. (n.d.).

APÊNDICE

Resultados dos testes preliminares

A Tabela 22 mostra os dados de um corpo de provas do aço Mn12. Este teste por ser preliminar, foi conduzido com parâmetros diferentes dos utilizados nos testes atuais. A pressão empregada foi de 3 bar equivalente a 247 N, rotação de 6,5 RPM e ciclo de 5/5 s e o tempo de interrupção do teste para limpeza e pesagem do corpo de prova foi de 5 min.

Tabela 22- Tabela de perda de massa do aço Mn12.

PESO INICIAL					
P1	P2	P3	P4	P5	MÉDIA
185,046	185,046	185,047	185,046	185,046	185,045
PESAGEM APÓS 5					
P1	P2	P3	P4	P5	MÉDIA
185,032	185,032	185,032	185,032	185,032	185,031
PESO APÓS 10 MIN					
P1	P2	P3	P4	P5	MÉDIA
185,026	185,026	185,025	185,026	185,026	185,025
PESO APÓS 15 MIN					
P1	P2	P3	P4	P5	MÉDIA
185,019	185,019	185,019	185,019	185,019	185,018
PESO APÓS 20 MIN					
P1	P2	P3	P4	P5	MÉDIA
185,01	185,01	185,01	185,01	185,009	185,009
PESO APÓS 25 MIN					
P1	P2	P3	P4	P5	MÉDIA
184,996	184,996	184,996	184,997	184,997	184,996
PESO APÓS 30 MIN					
P1	P2	P3	P4	P5	MÉDIA
184,988	184,987	184,987	184,987	184,987	184,986
PESO APÓS 35 MIN					
P1	P2	P3	P4	P5	MÉDIA
184,971	184,971	184,971	184,971	184,971	184,971
PESO APÓS 40 MIN					
P1	P2	P3	P4	P5	MÉDIA
184,957	184,958	184,958	184,958	184,958	184,957
PESO APÓS 45 MIN					
P1	P2	P3	P4	P5	MÉDIA
184,943	184,943	184,943	184,943	184,944	184,943
PESO APÓS 50 MIN					
P1	P2	P3	P4	P5	MÉDIA

184,925	184,925	184,925	184,925	184,926	184,925
---------	---------	---------	---------	---------	---------

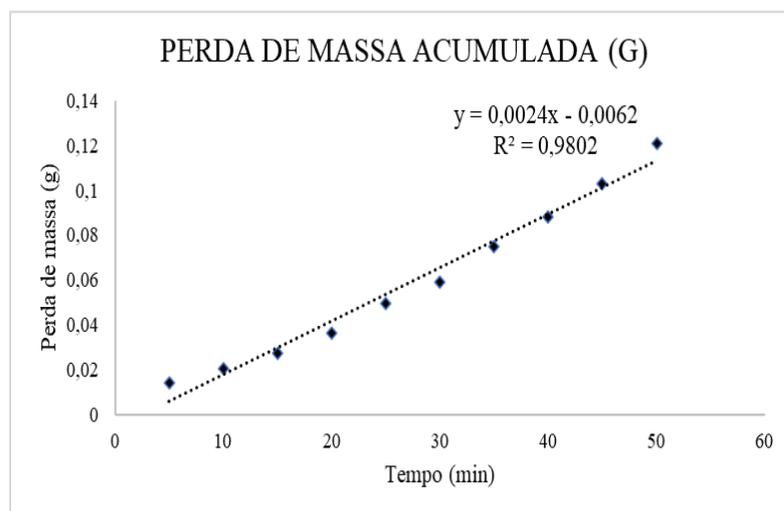
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Tabela 23 mostra a perda de massa (g) e a Figura 66 exibe o gráfico de perda de massa acumulada em gramas do aço Mn12.

Tabela 23- Perda de massa em g e mg do aço Mn12.

PERDA DE MASSA		
Tempo	g	mg
5	0,01422	14,22
10	0,00602	6,02
15	0,00698	6,98
20	0,00916	9,16
25	0,01302	13,02
30	0,0096	9,6
35	0,01586	15,86
40	0,01324	13,24
45	0,0147	14,7
50	0,01798	17,98
Total	0,12078	120,78

Figura 66- Gráfico de perda de massa acumulada.

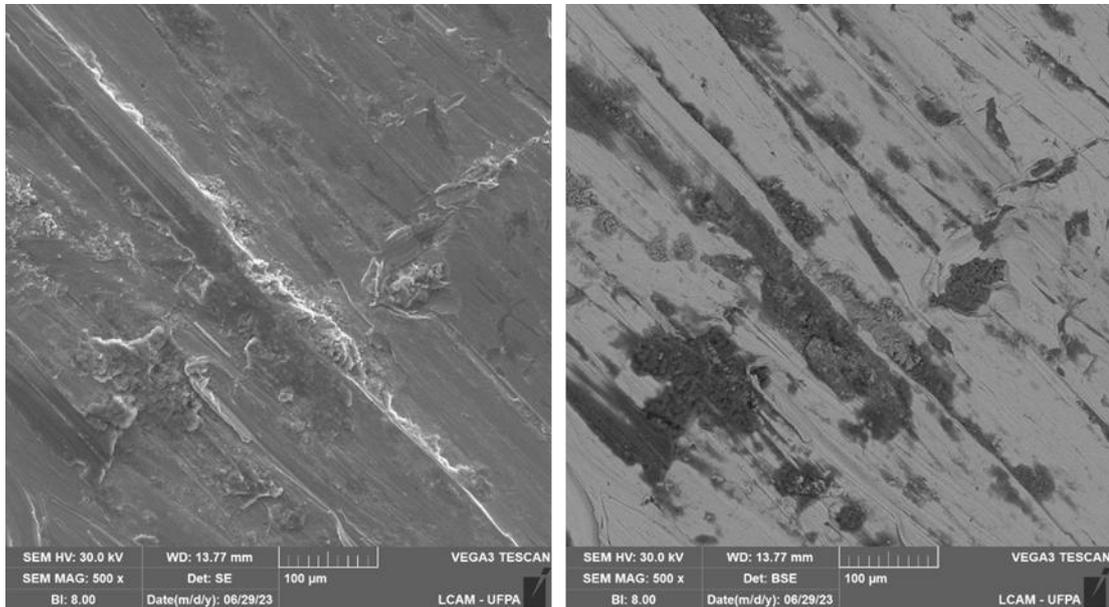


Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

As imagens de MEV estão sendo mostradas nas Figuras a seguir. As imagens mostram as modificações ocorridas na superfície ao longo dos 50 minutos de teste. A Figura 67 mostra

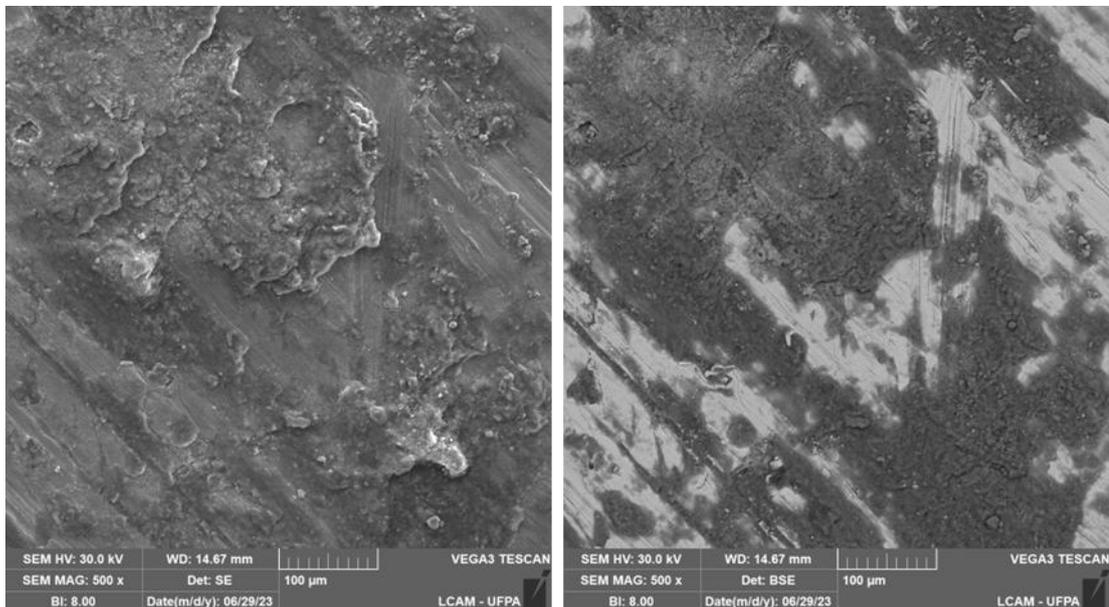
a superfície após os 10 primeiros minutos de teste. A partir da Figura 62 as imagens foram feitas a cada 5 minutos de teste. Todas as imagens foram realizadas na região central.

Figura 67- Imagem de MEV realizada após 10 minutos de teste do aço Mn12.



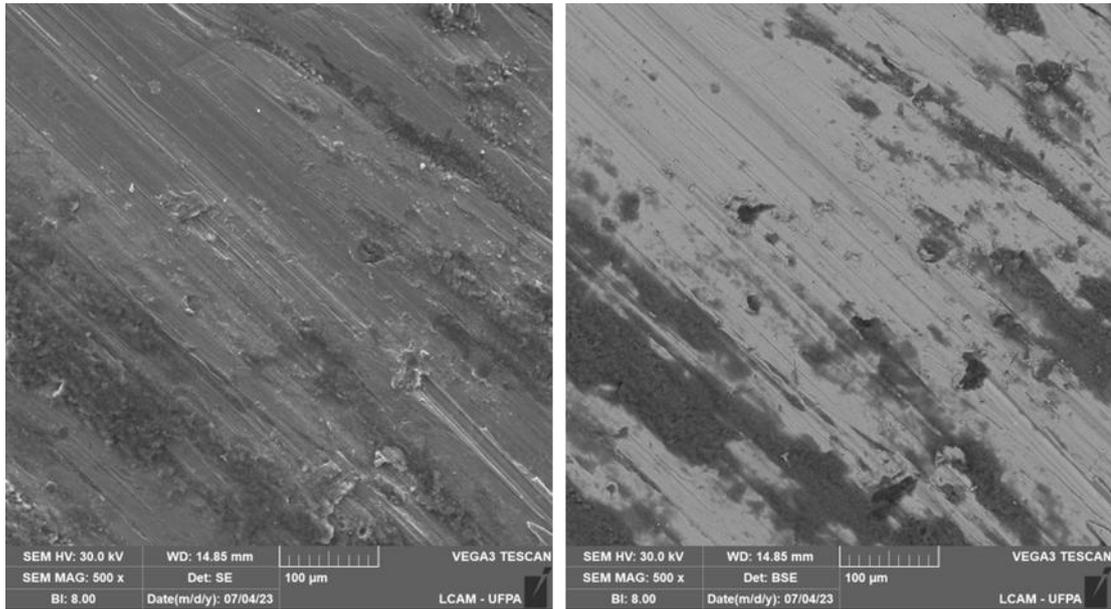
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 68- Imagem de MEV realizada após 15 minutos de teste do aço Mn12.



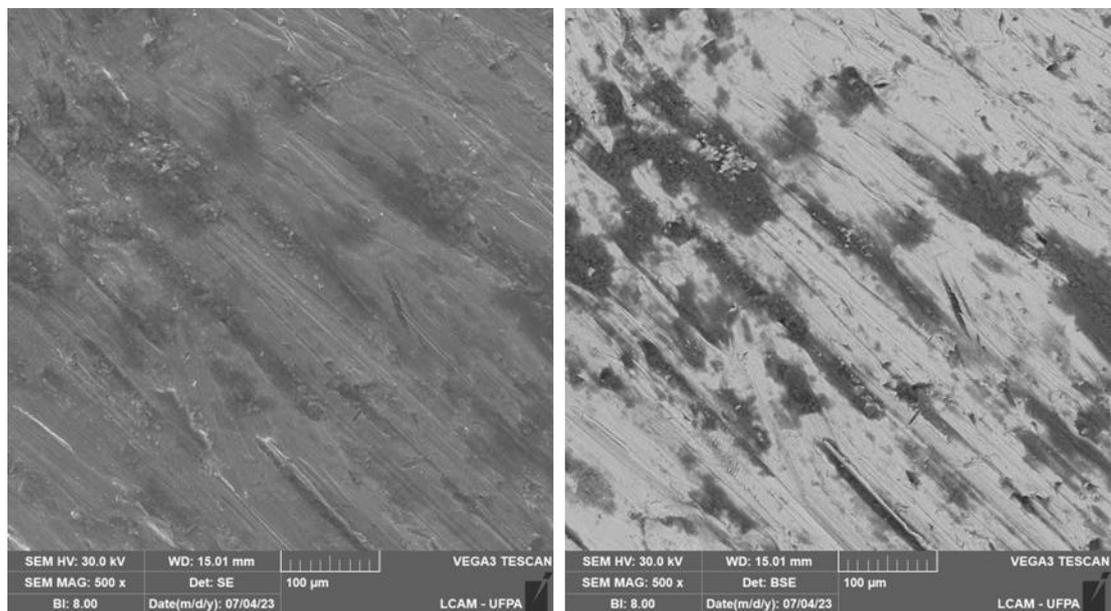
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 69- Imagem de MEV realizada após 20 minutos de teste do aço Mn12.



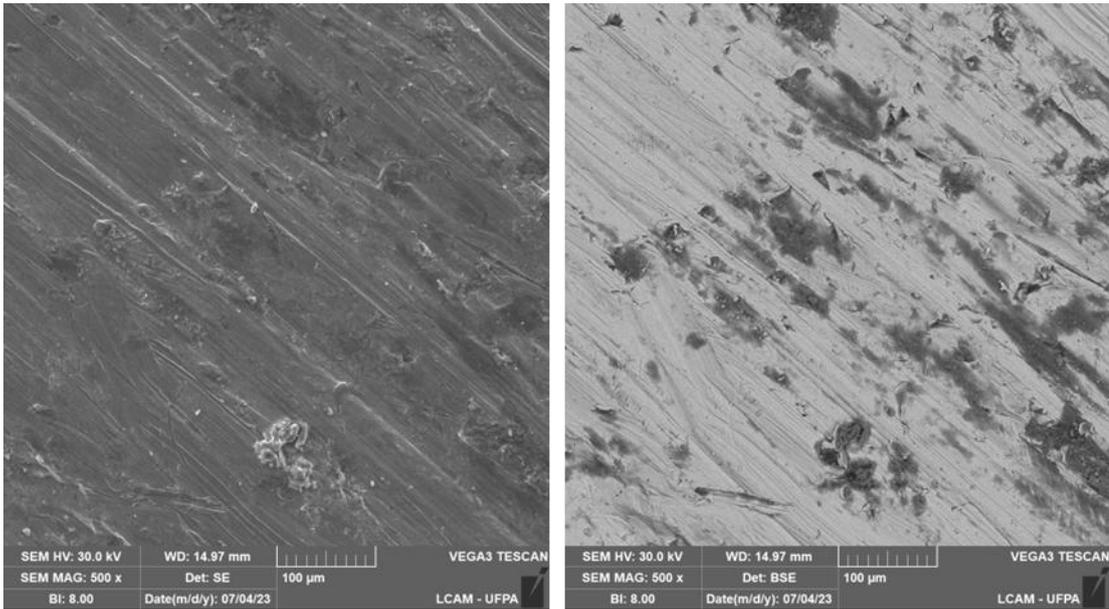
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 70-Imagem de MEV realizada após 25 minutos de teste do aço Mn12.-



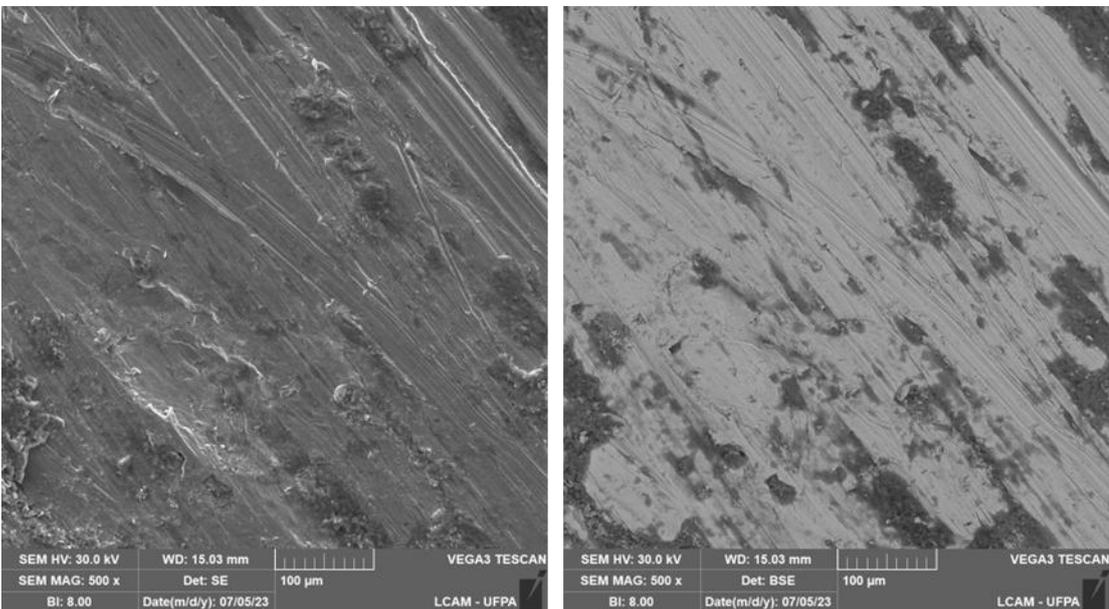
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 71-Imagem de MEV realizada após 30 minutos de teste do aço Mn12.



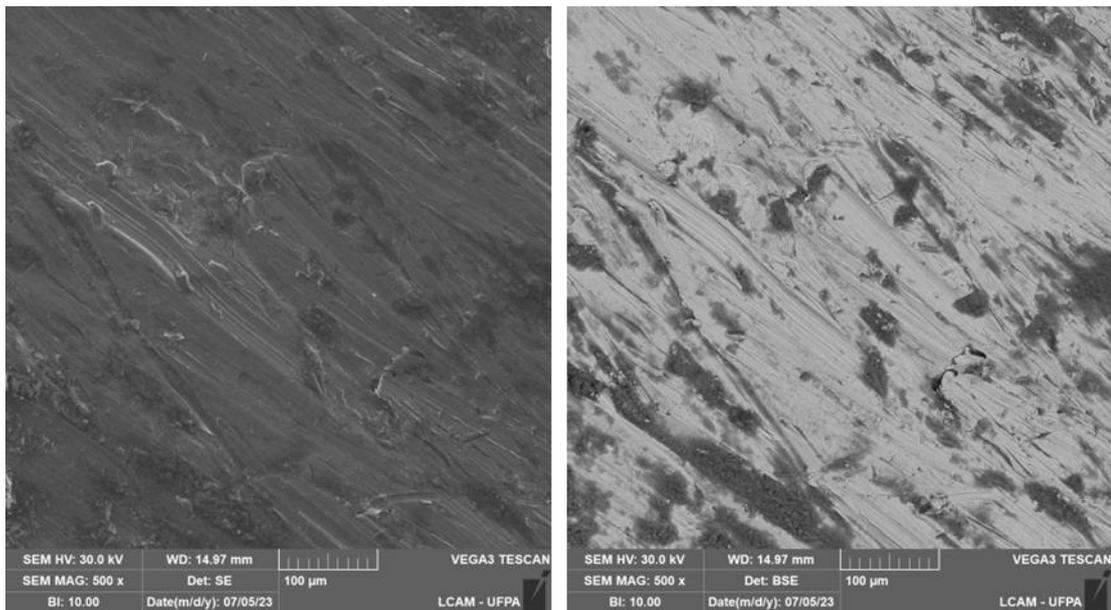
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 72-Imagem de MEV realizada após 35 minutos de teste do aço Mn12.



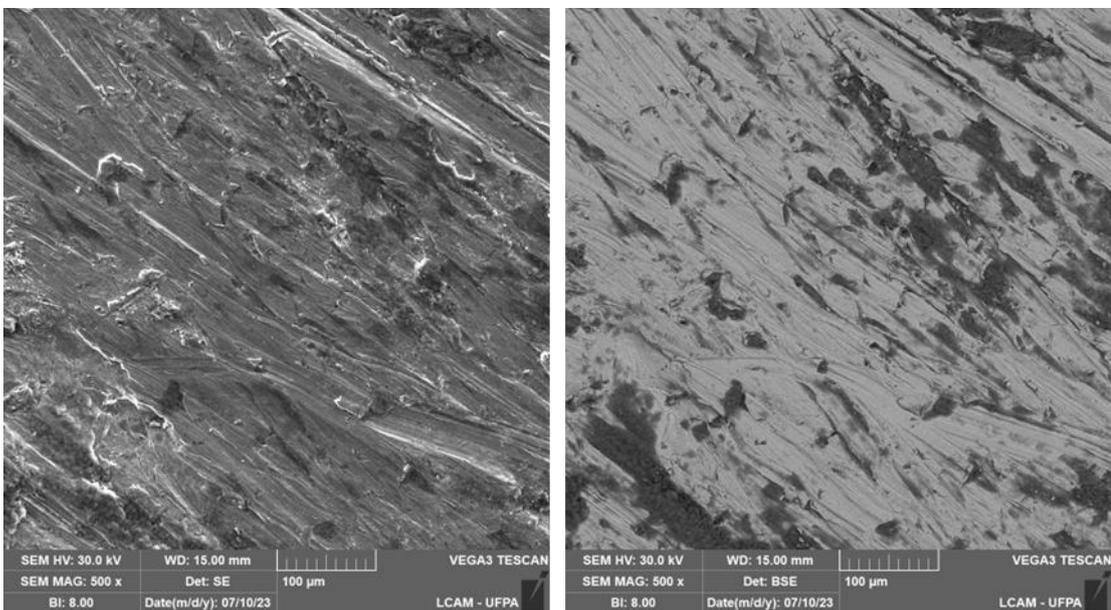
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 73-Imagem de MEV realizada após 40 minutos de teste do aço Mn12.



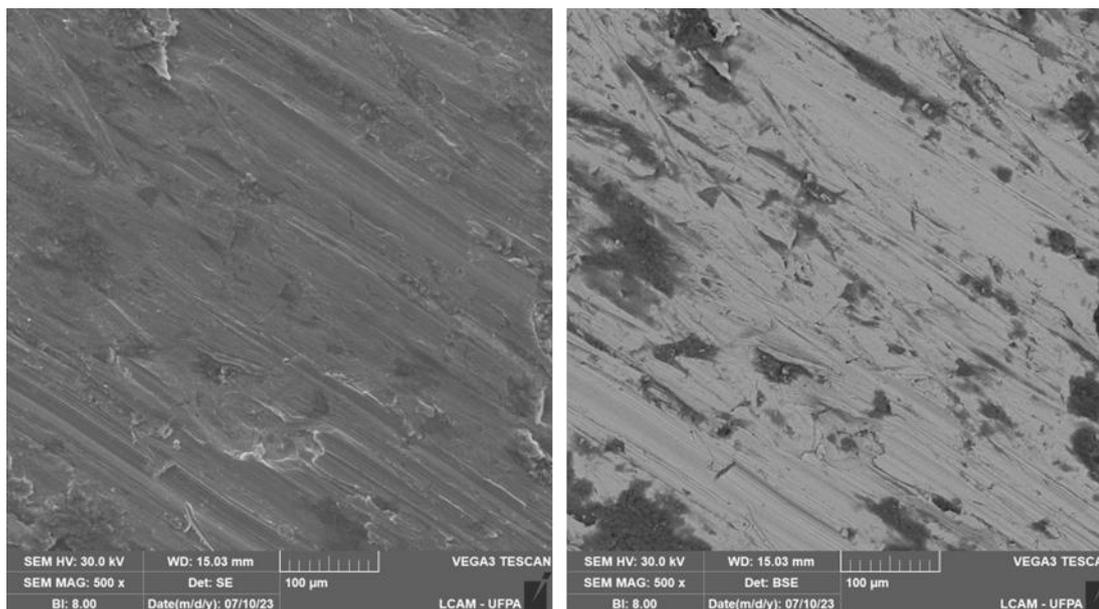
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 74-Imagem de MEV realizada após 45 minutos de teste do aço Mn12.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 75-Imagem de MEV realizada após 50 minutos de teste do aço Mn12.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A taxa de desgaste para o aço Mn12 com estes parâmetros foi de 0,0024 g/ min. Durante o teste foram gerados microsulcos, microcortes e microtrincas. Observa-se também deformação plástica e material abrasivo aderido à superfície. Contudo, dos primeiros minutos de teste até ao tempo final, não houve variações tão severas na magnitude dos micromecanismos encontrados na superfície desgastada da amostra, como pode ser visto nas imagens de MEV apresentadas.

A Tabela 24 mostra os resultados de perda de massa do Mn12 ensaiado com outros parâmetros, indicados no quadro abaixo. O tempo de parada para pesagem dos corpos de prova foi de 7,5 min, ou seja, a cada 7,5 min o ensaio era interrompido e então realizada as etapas descritas no tópico 3.1, sem a etapa de lixamento que é realizada somente antes de iniciar os testes.

Parâmetros utilizados: Pressão: 3 bar Carga aproximada: 247 N Velocidade de rotação: 16,1 RPM Ciclo: 2s em recuo 1,7 s de contato

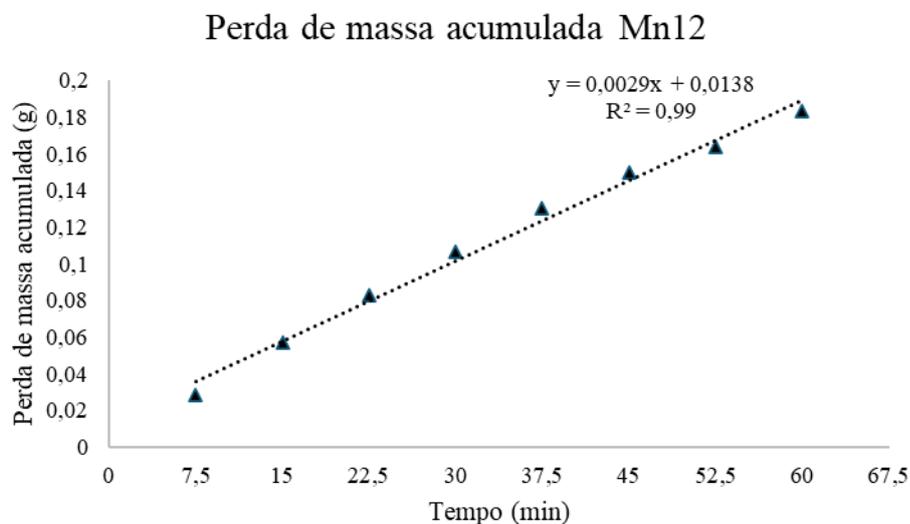
Tabela 24-Perda de massa do aço Mn12.

TEMPO (MIN)	MN12-a	MN12-b	MN12-c	MÉDIA	DP
7,5	0,03	0,023	0,029	0,028	0,003
15	0,033	0,025	0,028	0,028	0,003
22,5	0,030	0,022	0,024	0,025	0,004
30	0,031	0,021	0,018	0,023	0,006
37,5	0,025	0,021	0,023	0,023	0,001
45	0,011	0,018	0,011	0,013	0,003
52,5	0,018	0,018	0,022	0,019	0,002
60	0,020	0,018	0,019	0,019	0,0009
TOTAL				0,183	

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A Figura 76 mostra o gráfico de perda de massa acumulada. Com os parâmetros utilizados, a taxa de desgaste obtida após teste foi de 0,0029.

Figura 76- Gráfico de perda de massa acumulada do aço Mn12.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A Tabela 25 resume os parâmetros utilizados e a taxa de desgaste obtida.

Tabela 25-Parâmetros utilizados nos dois ensaios do aço Mn12.

Material	Pressão (bar)	Carga (N)	Rotação (RPM)	Ciclo (s)	Tempo de parada (min)	Tempo de teste (min)	Taxa de desgaste
Mn12	3	247	6,5	5/5	5	50	0,0024
Mn12	3	247	16,1	1,7/2	7,5	60	0,0029

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Duas amostras de aço perlítico foram ensaiadas durante 30 minutos com pressões diferentes. A amostra pg1 foi testada com 2 bar de pressão e o corpo de prova pg2 com 3 bar. Os resultados de perda de massa podem ser vistos na Tabela 26 .

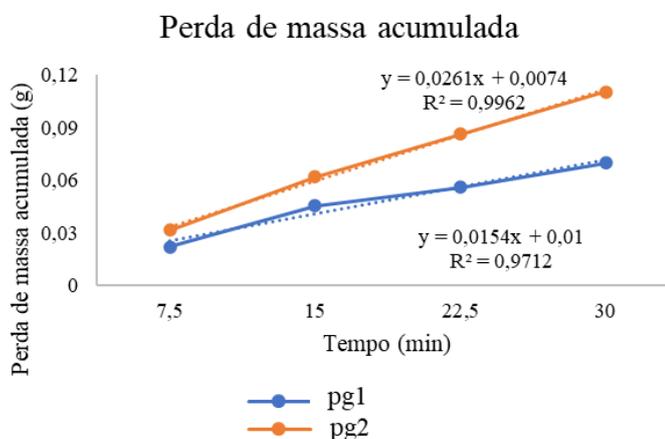
Tabela 26- Perda de massa do aço perlítico.

Tempo (min)	PM pg1	PM pg2
7,5	0,022233	0,031533
15	0,023333	0,030533
22,5	0,010467	0,024433
30	0,014033	0,0238

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A Figura 77 exibe o gráfico de perda de massa acumulada das amostras de aço perlítico.

Figura 77- Gráfico de perda de massa acumulada dos aços pg1(2bar) e pg2 (3bar).



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Para as amostras de aço perlítico, foram mantidos os mesmos parâmetros experimentais, alterando-se apenas a carga aplicada. No ensaio Pg1, foi utilizada uma pressão de 2 bar, enquanto no ensaio Pg2 a pressão foi ajustada para 3 bar. Observou-se uma diferença significativa entre as taxas de desgaste, com o ensaio Pg2 apresentando um valor 3,52 vezes maior que o Pg1. Esses resultados indicam que a carga aplicada desempenha um papel crucial na taxa de desgaste, evidenciando sua forte influência nesse contexto.

Os testes preliminares foram utilizados para conhecimento do equipamento e ajustes de parâmetros. Mas para melhor entendimento do teste se faz necessários mais ensaios e refinamento de dados.

