UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

João Paulo Costa Berci dos Santos

INVESTIGAÇÃO DO COMPORTAMENTO AO DESGASTE ABRASIVO DE LIGAS COMUMENTE APLICADAS PARA SUPERFÍCIES RESISTENTES AO DESGASTE

Ilha Solteira
2026

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

JOÃO PAULO COSTA BERCI DOS SANTOS

INVESTIGAÇÃO DO COMPORTAMENTO AO DESGASTE ABRASIVO DE LIGAS COMUMENTE APLICADAS PARA SUPERFÍCIES RESISTENTES AO DESGASTE.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr. José Gedael Fagundes Júnior
Orientador

Ilha Solteira
2026

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S237i

Santos, João Paulo Costa Berci dos.
Investigação do comportamento ao desgaste abrasivo de ligas comumente aplicadas para superfícies resistentes ao desgaste / João Paulo Costa Berci dos Santos. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
52 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2026

Orientador: José Gedael Fagundes Júnior

Inclui bibliografia

1. Desgaste abrasivo. 2. Microabrasão. 3. Coeficiente de desgaste. 4. Ligas de revestimento. 5. Revestimentos duros.

Sandra Montibeller-CRB-8/SP-011589/0

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O impacto potencial desta pesquisa é contribuir com os estudos sobre ligas de revestimento de aços Hardox 450, 500, 550, 600 e por soldagem FeCrCb 6713 e FeCrC 6710 para decisões de engenharia na indústria com maior praticidade e menor custo de aparato experimental, bem como, contribuir com trabalhos acadêmicos futuros no Departamento de Engenharia Mecânica.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The potential impact of this research is to contribute to studies on hardfacing alloys for Hardox 450, 500, 550, and 600 steels using FeCrCb 6713 and FeCrC 6710 welding overlays, aiding industrial engineering decisions with greater practicality and lower experimental setup costs, as well as supporting future academic work in the Department of Mechanical Engineering.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "Júlio de Mesquita Filho"

FACULDADE DE ENGENHARIA – CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA TRABALHO DE GRADUAÇÃO

TÍTULO: INVESTIGAÇÃO DO COMPORTAMENTO AO DESGASTE ABRASIVO DE LIGAS COMUMENTE APLICADAS COMO PARA SUPERFÍCIES RESISTENTE AO DESGASTE

ALUNO. JOÃO PAULO COSTA BERCI DOS SANTOS **RA:** 182055264

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSÉ GEDAEL FAGUNDES JÚNIOR

Aprovado (X) - Reprovado ( ) pela Comissão Examinadora

Nota: 7,5

Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br JOSE GEDAEL FAGUNDES JUNIOR
Data: 10/07/2026 [illegible]
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. José Gedael Fagundes Júnior
Presidente (Orientador)

Documento assinado digitalmente
gov.br LETICIA KAROLAYNE MOREIRA FIRMO
Data: 05/06/2026 17:37:56 -0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

MsC. Leticia Karolayne Moreira Firmo
Membro Avaliador 1

Documento assinado digitalmente
gov.br GABRIELLE SCHULTZ BRAZ
Data: 05/06/2026 17:46:21 -0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Engenheira Gabrielle Schultz Braz
Membro Avaliador 2

Ilha Solteira, 09 de junho de 2026.

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho ao meus pais que sempre me apoiaram, e a minha família que foi minha motivação e porto seguro durante todo meu desenvolvimento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha família: Pedro Nobile, Pedro Costa, João Iago Nobile; Isabelle Maria; Iracema Costa; Valmir Costa; Gustavo Berci; Isadora Berci; Elaine Santos; Otávio Santos, que sempre me acolheram e me apoiaram durante a graduação. Em especial, à minha mãe, Michele Regina da Costa; ao meu pai, Mário Rogério Bersi dos Santos; ao meu avô, Lazaro Pinheiro; e à minha avó, Maria Bersi, que são o meu alicerce e por quem hoje vivo o meu sonho.

Agradeço aos meus amigos de faculdade, com quem compartilhei a jornada e o sonho de nos tornarmos bacharéis, apoiando-nos mutuamente ao longo da graduação: Umberto Boranga, Elias Amaral, Matheus Barbosa, Vinicius Guimaraes, Nelson Caeteno, Guilherme Soler, Daniele Suzuki, Arthur Chabole, Cleiton Santos, Inaian Garcia e Miguel Martins.

Agradeço aos meus companheiros de república, com quem dividi momentos, decisões difíceis e alegrias, sempre buscando construir um lar no qual pudéssemos nos apoiar. Em especial: Antônio Leonardo Biagini, Vinicius Rosaboni, Leonardo Prado, Matheus Celestino, Igor Muller, Vitor Sano, Gabriel Messias, Tailan Malta, João Furlan, Thales Nascimento, Alexandre Vinicius, Pablo Carrara e João Arrais.

Agradeço aos meus amigos Lucca Lopes e Vitória Ikegami, grandes amizades que a graduação me proporcionou.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. José Gedael Fagundes Júnior, pelo apoio durante todo o desenvolvimento deste trabalho, e à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, por todo o suporte oferecido para que eu pudesse me desenvolver.

Por fim, a todos os citados, saibam que o sonho é alto e o percurso é longo, mas compreendi que a vida está na partilha ao longo do processo. Sou grato por tê-lo vivido com vocês e desejo que nossos caminhos se cruzem novamente!

RESUMO

O presente trabalho avalia o comportamento ao desgaste abrasivo de diferentes ligas de revestimento, incluindo a família de aços Hardox (450, 500, 550 e 600) e revestimentos de solda (FeCrCb e FeCrC), com o objetivo de subsidiar a seleção de materiais para aplicações industriais que exigem elevada resistência ao desgaste. Foram realizados ensaios de microabrasão por esfera fixa rotativa, conforme a norma ISO 26424, visando comparar o desempenho dos materiais analisados. A metodologia consistiu na preparação das amostras por lixamento e polimento, seguida da execução dos ensaios para formação de crateras de desgaste. O volume de material removido e o coeficiente de desgaste (K) foram determinados a partir das dimensões das crateras, obtidas por dois métodos distintos: medições ortogonais em microscópio óptico e análise por softwares de processamento de imagens (OriginPro). Os resultados indicaram que a liga FeCrCb 6713 apresentou a maior resistência ao desgaste, caracterizada pelo menor coeficiente K, enquanto o aço Hardox 450 apresentou o menor desempenho. A análise estatística demonstrou que não houve diferença significativa entre os métodos de medição utilizados, evidenciando a confiabilidade de ambas as abordagens. Verificou-se, ainda, que a ordem de resistência ao desgaste entre os materiais foi mantida nos dois métodos, confirmando a consistência dos resultados obtidos.

Palavras-chave: Desgaste abrasivo. Microabrasão. Coeficiente de desgaste. Ligas de revestimento. Revestimentos duros.

ABSTRACT

This study evaluates the abrasive wear behavior of different coating alloys, including the Hardox steel family (450, 500, 550, and 600) and weld overlays (FeCrCb and FeCrC), aiming to support material selection for industrial applications that require high wear resistance. Micro-abrasion tests with a fixed rotating ball were performed according to the ISO 26424 standard in order to compare the performance of the analyzed materials. The methodology consisted of sample preparation through grinding and polishing, followed by testing to generate wear craters. The volume of material removed and the wear coefficient (K) were determined from the crater dimensions, obtained using two different methods: orthogonal measurements with an optical microscope and image analysis using software (OriginPro). The results indicated that the FeCrCb 6713 alloy exhibited the highest wear resistance, characterized by the lowest wear coefficient K, while Hardox 450 steel showed the lowest performance. Statistical analysis revealed no significant difference between the measurement methods, indicating that both approaches are reliable. Furthermore, the ranking of wear resistance among the materials was consistent across both methods, confirming the reliability of the results.

Keywords: Abrasive wear. Micro-abrasion. Wear coefficient. coating alloys. Hardfacing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de Desgaste..... 18
Figura 2 - Dispositivo de esfera fixa 24
Figura 3 - Medição do diâmetro da calota através do software IC Measure.... 25
Figura 4 - Primeiro método: Diâmetro médio – Hardox 600 – Amostras..... 28
Figura 5 - Primeiro método: Diâmetro médio – Hardox 550 – Amostras..... 29
Figura 6 - Primeiro método: Diâmetro médio – Hardox 500 – Amostras..... 30
Figura 7 - Primeiro método: Diâmetro médio – Hardox 450 – Amostras..... 31
Figura 8 - Primeiro método: Diâmetro médio – FeCrCB 6713 – Amostras..... 32
Figura 9 - Primeiro método: Diâmetro médio – FeCrC 6710 – Amostras..... 33
Figura 10 - Segundo método: Três pontos – Hardox 600 – Amostras..... 37
Figura 11 - Segundo método: Três pontos – Hardox 550 – Amostras..... 38
Figura 12 - Segundo método: Três pontos – Hardox 500 – Amostras..... 39
Figura 13 - Segundo método: Três pontos – Hardox 450 – Amostras..... 40
Figura 14 - Segundo método: Diâmetro médio – FeCrCB 6713 – Amostras..... 41
Figura 15 - Segundo método: Diâmetro médio – FeCrC 6710 – Amostras..... 42
Figura 16 - Comparação das médias dos coeficientes de desgaste..... 45
Figura 17 - Diferença percentual (%) entre os 2 métodos..... 46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química dos aços Hardox (análise de cadinho) 21
Tabela 2 - Condições experimentais para o ensaio..... 27
Tabela 3 - Parâmetros utilizados para o ensaio..... 27
Tabela 4 - Diâmetros (d1 e d2) das calotas em milímetros..... 34
Tabela 5 - 1º Método: Desvios entre diâmetro vertical (d1) em relação ao horizontal (d2) em porcentagem (%)..... 34
Tabela 6 - 1º Método: Diâmetro médio (dm) em milímetros..... 35
Tabela 7 - 1º Método: Volume removido (Vr) em milímetros cúbicos..... 35
Tabela 8 - 1º Método: Coeficiente de desgaste (K) em milímetros cúbicos por Newton metro..... 36
Tabela 9 - 2º Método: Diâmetro (d) das calotas em milímetros..... 43
Tabela 10 - 2º Método: Volume removido (Vr) em milímetros cúbicos..... 43
Tabela 11 - 2º Método: Coeficiente de desgaste (K) em milímetros cúbicos por Newton metro..... 43
Tabela 12 - Médias, desvio padrão dos coeficientes de desgaste (K1 e K2) para os dois métodos de ensaio..... 44
Tabela 13 - Diferença percentual do coeficiente de desgaste entre os dois métodos de ensaio..... 46
Tabela 14 - Dureza Vickers da superfície para os materiais. Valores em Vickers (HV)..... 47
Tabela 15 - Comparação ordem de dureza entre a literatura e os resultados experimentais, a partir do coeficiente de desgaste k..... 48

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
ISO	International Organization for Standardization
DP	Desvio padrão da média
EM	Erro da média
SSAB	Swedish Steel Comércio de Aço Ltda
Unesp	Universidade Estadual Paulista

LISTA DE SÍMBOLOS

B	*Boro*
C	*Carbono*
Cr	*Cromo*
d	*Diâmetro*
d1	*Diâmetros verticais*
d2	*Diâmetros horizontais*
dm	*Diâmetro médio*
F	*Carga de teste*
Fe	*Ferro*
K	*Coeficiente de desgaste*
K1	*Coeficiente de desgaste método 1*
K2	*Coeficiente de desgaste método 2*
M	*Metais ligas*
Mn	*Manganês*
Mo	*Molibdênio*
Ni	*Níquel*
P	*Fósforo*
S	*Enxofre*
Sd	*Distância de deslizamento*
Si	*Silício*
V	*Vanádio*
Vr	*Volume removido*
W	*Tungstênio*

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**.....	14
1.1	Motivação.....	15
1.2	Objetivos.....	15
2	**REVISÃO DE LITERATURA.**.....	17
2.1	Desgaste de Superfícies.....	17
2.2	*Aços Hardox*.....	20
2.3	*Revestimento duro (Hardfacing)*	22
3	**METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO**.....	24
4	**RESULTADOS E DISCUSSÕES**.....	28
4.1	Resultados:1º Método – Diâmetro Médio.....	28
4.2	Resultados: 2º Método – Três pontos.....	36
4.3	Análise Estatística.....	44
4.4	Análise dos coeficientes.....	47
5	**CONCLUSÃO**.....	49
	REFERÊNCIAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

O desgaste de superfícies é um dos principais responsáveis por falhas e custos operacionais em plantas industriais nos setores de mineração, siderurgia, cimenteiro e sucroalcooleiro. Estudos clássicos e contemporâneos indicam que o desgaste, em especial o abrasivo, pode causar perdas econômicas significativas e comprometer a confiabilidade de equipamentos de manuseio e transporte de materiais a granel (GAHR, 1987). Paralelamente, relatórios e trabalhos acadêmicos ressaltam que a escolha correta de materiais e de técnicas de proteção de superfícies (revestimentos por soldagem hardfacing ou chapas de alta resistência à abrasão) é uma estratégia eficaz para mitigar essas perdas e ampliar a vida útil de componentes submetidos a regimes abrasivos severos.

A otimização dos processos produtivos é cada vez mais objeto de interesse dos diversos segmentos da indústria, impulsionada pela exigência de tornar as suas atividades economicamente viáveis e lucrativas. Para alcançar resultados expressivos tem-se observado o interesse crescente em fatores associados à redução de custos e aumento de produtividade mantendo-se a qualidade final do produto e atendendo às normas ambientais (CUNHA, 2018)

Dentre as soluções técnicas mais utilizadas destacam-se os revestimentos duros depositados por soldagem (sistemas Fe–C–Cr e Fe–C–Cr–B, entre outros) e as chapas laminadas de alta resistência à abrasão comercialmente conhecidas como Hardox. Revisões sobre processos de deposição e desempenho de overlays comprovam que a microestrutura (fração volumétrica e morfologia de carbonetos/boretos, matriz, tenacidade) e as propriedades mecânicas superficiais (dureza, tenacidade) controlam fortemente a resposta ao desgaste abrasivo. Além disso, fabricantes de aços resistentes à abrasão (SSAB, 2025) fornecem dados técnicos e recomendações de usinagem e soldagem que evidenciam a aplicabilidade prática desses materiais em equipamentos sujeitos a impacto e abrasão.

Para avaliações comparativas a resistência ao desgaste, tem os métodos laboratoriais G65 16 (ASTM, 2016), que é um ensaio com roda de borracha e areia, e métodos em microescala 26424 (ISO-26424, 2008), consiste no ensaio de microabrasão por esfera fixa, estes que são largamente utilizados, cada qual com vantagens e limitações dependendo do problema industrial a ser simulado. Outro é o ensaio em abrasômetro de tambor (*drum test*) também tem sido adotado para

reproduzir interações entre minérios e superfícies em condições de queda/impacto repetido, permitindo comparar múltiplos materiais em uma mesma carga de abrasivo.

A resistência ao desgaste abrasivo de uma superfície pode ser avaliada pela perda de massa e volume, quantificado pelo coeficiente de desgaste (K), que é estabelecido em função do tipo de ensaio aplicado. Entre os mais conhecidos, destaca-se o ensaio abrasivo de três corpos por roda de borracha, norma G65 16 (ASTM, 2016), que consiste no ensaio em que o corpo de prova é pressionado a uma carga (F) contra a superfície de um disco revestido com borracha, que apresenta uma dada velocidade de rotação, promovendo movimento relativo entre as superfícies; Nesta interface de contato das superfícies, ocorre a adição de sílica, e o desgaste promove a perda de massa do corpo de prova e a partir da densidade do material, pode se estabelecer o volume removido (V).

1.1 Motivação

O presente trabalho propõe investigar o comportamento ao desgaste abrasivo de ligas comumente aplicadas como superfícies resistentes ao desgaste, empregando ensaios de micro-abrasão (esfera fixa, conforme ISSO 26424) e uma matriz experimental com réplicas para garantia estatística dos resultados. A relevância acadêmica e industrial do tema reside na necessidade de gerar dados comparativos que auxiliem na seleção de materiais (revestimentos por soldagem vs. chapas Hardox) para aplicações reais, reduzindo custos de manutenção e aumentando a disponibilidade operacional de equipamentos. Estudos recentes demonstram que comparações diretas entre métodos e materiais (incluindo ensaios com cargas reais de abrasivo) oferecem informações mais confiáveis para decisões de projeto e manutenção.

1.2 Objetivos

O objetivo principal do presente trabalho é realizar o ensaio de desgaste com esfera fixa rotativa (ISO 26424) em diversas amostras metálicas de uso comum em aplicações onde a resistência ao desgaste abrasivo é um comportamento requerido. Entre os objetivos específicos podem se destacar:

- Preparar os corpos de prova com técnicas de preparação superficial envolvendo etapas de lixamento e polimento;
- Realização do ensaio de desgaste com esfera rotativa para obtenção das crateras de desgaste;
- Avaliação macroestrutural dos corpos de prova após o ensaio de desgaste utilizando o estereomicroscópio e softwares de medição;
- Análise estatística para confiabilidade dos resultados obtidos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Desgaste de superfícies

O desgaste tem sido motivo de preocupação há milhares de anos. Ainda na Idade da Pedra, os caçadores já precisavam considerar a importância de manter o fio de seus machados e facas de pedra (XU et al., 2025). Atualmente, o desgaste não é apenas uma das principais causas de falha em dispositivos mecânicos, mas também de gasto com manutenções.

Um dos problemas que mais aflige engenheiros e técnicos nas indústrias é como prolongar a vida útil de componentes em máquinas e equipamentos expostos a abrasão, sendo que, uma parada repentina leva ao prejuízo e sua manutenção não programada pode apresentar uma quebra do sistema produtivo e um custo muito elevado de manutenção para a empresa. Dessa forma, desgaste de superfícies, representa um desafio econômico e operacional significativo para indústrias como mineração, siderurgia e agronegócio (OLIVEIRA, 2015).

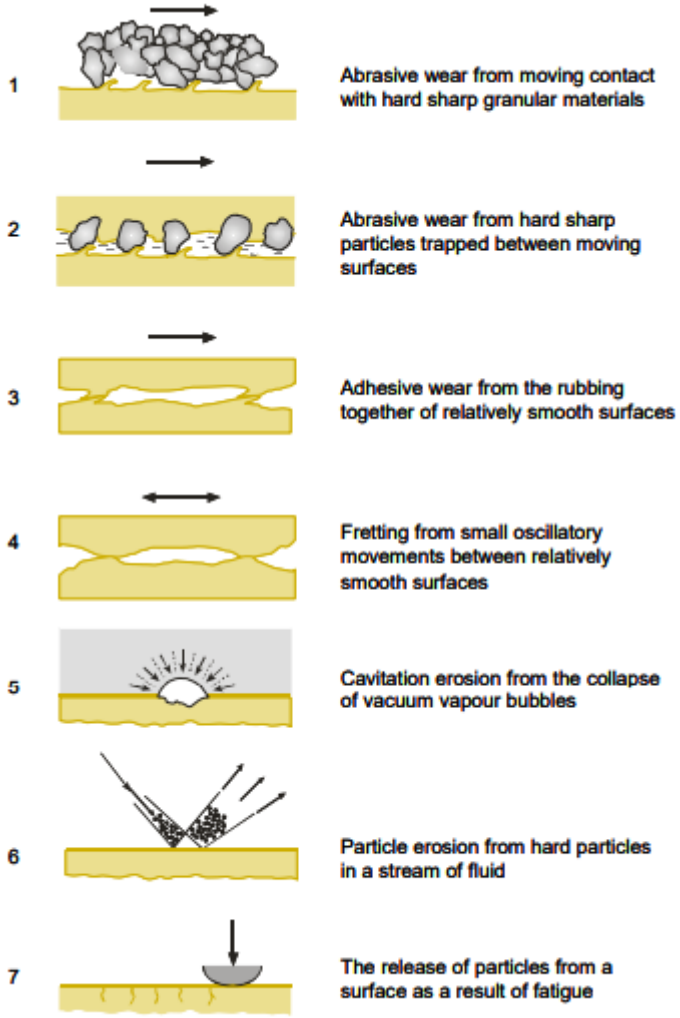
Desgaste é definido como o dano a uma superfície sólida, geralmente envolvendo a perda progressiva de material, devido ao movimento relativo entre essa superfície e uma substância ou substâncias em contato (XU et al., 2025). Isso não envolve apenas contato sólido-sólido, pois o termo “substância” também pode se referir a um fluido. Entre os diversos tipos de desgaste, como o adesivo, o erosivo e o corrosivo, o desgaste abrasivo é considerado um dos mais relevantes em aplicações industriais, representando parcela significativa das falhas de componentes submetidos a ambientes severos (ZEMLIK et al., 2024). A Figura 1 mostra 7 dos principais tipos de desgaste que podem ocorrer entre corpos.

Em geral, o desgaste está presente em situações em que há contato e movimento, e em alguns casos, ele possui vantagens e desvantagens; Cita-se como desvantagem o desgaste sofrido por uma ferramenta de corte, todavia, o desgaste que ela gera no material a ser usinado torna-se uma vantagem, assim como as operações de lixamento e polimento. Mas de um modo geral, o desgaste é visto como o “vilão da história” (Oliveira, 2015).

Quando temos duas superfícies se movimentando, com contato, uma em relação a outra teremos um prejuízo mecânico a uma das duas superfícies, gerando uma perda progressiva de material que em muitas situações, isto leva ao aumento

contínuo de folga entre as partes que se movimentam que causa um desequilíbrio do sistema como vibrações, fadiga do material, perda de vida útil e outros efeitos desvantajosos ao corpo mecânico.

Figura 1 – Tipos de Desgaste



Fonte: (GEE et al., 2020)

O desgaste abrasivo (Figura 1, item 1 e 2) ocorre quando partículas duras ou superfícies ásperas removem material por corte ou riscamento, produzindo sulcos, fragmentos de material ou, no caso de materiais dúcteis, cavacos. O desgaste adesivo (Figura 1, item 3) se caracteriza quando duas superfícies lisas deslizam entre si e regiões com micro rugosidades se aderem e arrancam material durante o movimento, esse tipo de atrito é comum em mancais e componentes mal lubrificados (GEE et al., 2020). O *Fretting* ou desgaste por micro movimentos (Figura 1, item 4) é um tipo especial de desgaste adesivo que ocorre devido a pequenos movimentos oscilatórios

entre superfícies em contato, gera pó fino oxidado e acentuamento da rugosidade superficial (GEE et al., 2020). O Desgaste por erosão (Figura 1, item 5 e 6) pode acontecer de duas formas: cavitação e partículas. Erosão por cavitação é causada pelo colapso de bolhas de vapor em fluidos e a erosão por partículas é causada por fluxo de fluido contendo partículas duras. O Desgaste por fadiga (Figura 1, item 7) ocorre devido tensões alternadas sobre o material ou ciclos extremos repetidos sobre o material, como aquecimento e resfriamento (GEE et al., 2020). É pertinente mencionar que nem sempre contato de dois corpos causa desgaste, afinal, pode ocorrer movimento de material sem a perda de massa. Isso é caracterizado como deformação plástica, alterando a geometria ou dimensão do corpo.

Frente ao desafio do desgaste, a engenharia de superfícies emprega duas estratégias principais que já são usadas nas indústrias de mineração, siderúrgica, sucroalcooleira e geração de energia: o uso de aços monolíticos de alta resistência a abrasão para o revestimento, como a família Hardox, e a aplicação de revestimentos duros compósitos por soldagem com ligas do sistema Fe-C-Cr e Fe-C-Cr-B. A seleção da solução ideal depende da compreensão dos mecanismos de desgaste e da relação entre a microestrutura do material e seu desempenho em serviço (CUNHA, 2018).
Para a caracterização da resistência ao desgaste, diversos métodos normatizados são empregados. Entre eles, destacam-se:

- ASTM G65 (ensaio da roda de borracha e areia): utilizado para caracterizar desgaste em macroescala.
- ISO 26424 (ensaio de microabrasão por esfera fixa): empregado para avaliar desgaste em microescala, permitindo análise detalhada das crateras formadas.

O método de microabrasão, utilizado neste trabalho, permite a observação direta das calotas de desgaste, que fornecem informações valiosas sobre o mecanismo predominante e a interação abrasivo-microestrutura (COLAÇO; PINTAUDE, 2022).

A seleção adequada de ligas resistentes ao desgaste possui impacto direto em custos operacionais, tempo de vida útil de equipamentos e sustentabilidade de processos produtivos. Por exemplo, alguns dos revestimentos estudados nesse trabalho são de vital importância em diversas áreas e é preciso ter um conhecimento da capacidade desses materiais para garantir eficiência e segurança. O uso de chapas Hardox em caminhões *off road*, britadores e moendas, bem como de revestimentos

Fe–Cr–C em moinhos e colhedoras, evidencia a importância tecnológica dessas soluções (HAWRYLUK et al., 2023).

2.2 Aços Hardox

O aço Hardox foi produzido pela primeira vez em 1970 pela SSAB-Oxelösund, na Suécia. Atualmente, a família de aços Hardox inclui 10 classes, os Hardox de alta performance: 500 Tuf, HiTuf, HiAce, HiTemp, Extreme e os Hardox de classe padrão: aços Hardox 450, 500, 550 e 600 (SSAB, 2021), o presente trabalho analisa os padrões, por serem os mais comumente usados como revestimento para peças e equipamentos na indústria como discutido nos trabalhos de Zemlik *et al.,* (2024) e Cunha (2018).

Os Aços Hardox, representam a principal abordagem monolítica para a resistência ao desgaste, sendo amplamente aplicados em equipamentos de mineração, construção e transporte. Estes aços de baixa liga possuem uma microestrutura predominantemente martensítica revenida, obtida através de um rigoroso processo de têmpera e revenimento. O aço Hardox 450 é recomendado como um aço estrutural altamente versátil, apresentando alta resistência ao impacto mesmo em temperaturas reduzidas. Ele é projetado para componentes de betoneiras, canhões de neve, contêineres, caçambas de escavadeiras e pás carregadeiras, garras, tesouras, caminhões de lixo, caminhões basculantes, tambores, rolos compactadores de asfalto, colhedoras, ferramentas de reciclagem, britadores e calhas (ZEMLIK et al., 2024). Os aços Hardox 500 e 550 são destinados a aplicações onde há desgaste severo com exigências limitadas de projeto estrutural, como chapas de revestimento de britadores e alimentadores, além de martelos utilizados na reciclagem (ZEMLIK et al., 2024). O Hardox 550 oferece maior durabilidade, substituindo os aços manganês. O Hardox 600 é adequado para serviços mais pesados, podendo ser cortado e soldado, e mantém resistência ao impacto satisfatória apesar de sua alta dureza. É utilizado, por exemplo, em moldes para fabricação de tijolos, revestimentos e placas de desgaste no transporte e processamento de minerais, em betoneiras e em lâminas e facas para reciclagem (ZEMLIK *et al.,* 2024).

A análise microestrutural revela que, com o aumento do grau do aço (do Hardox 450 para o 600), a estrutura martensítica se torna progressivamente mais fina e acicular. Este refinamento microestrutural está diretamente ligado a um aumento

previsível da dureza (de 489 HV para 563 HV, por exemplo), sendo esta uma propriedade que se correlaciona de forma confiável com a maior resistência ao desgaste abrasivo (BIAIOBRZESKA; KONAT, 2018).

A resistência ao desgaste não é ditada apenas pela dureza, mas pela arquitetura microestrutural, que idealmente combina fases duras para resistir à penetração e uma matriz tenaz para fornecer suporte mecânico e absorver energia de impacto, prevenindo a fratura ou o arrancamento das fases duras (CUNHA, 2018; GAHR, 1987). O refino do tamanho de grão, a homogeneidade da matriz e a distribuição de partículas duras desempenham papéis críticos. Zemlik et al. (2024) demonstraram que a redução do tamanho de grão em Hardox 500 aumentou significativamente sua resistência ao desgaste, não apenas pela elevação da dureza, mas também pela maior estabilidade microestrutural.

Além disso, a literatura demonstra que tratamentos térmicos controlados podem modificar significativamente a resistência ao desgaste, um estudo de Zemlik et al. (2024) revelou que o Hardox 500 submetido a distintas condições de têmpera apresentou variações expressivas de dureza e, consequentemente, de desempenho em ensaios abrasivos.

A Tabela 1 apresenta a composição química dos aços Hardox em uma análise de cadinho disponibilizada nas fichas técnicas de cada aço no site da SSAB. Os elementos fósforo (P) e enxofre (S) não são elementos de liga intencionais, provavelmente são resultados da análise de cadinho que consiste na determinação dos constituintes minerais ou inorgânicos (cinzas) restantes em uma amostra após ela ter sido incinerada.

Tabela 1 – Composição Química dos aços Hardox (análise de cadinho)

Elementos	Hardox 450	Hardox 500	Hardox 550	Hardox 600
C* (max %)	0,26	0,30	0,44	0,47
Si* (max %)	0,70	0,40	0,50	0,70
Mn* (max %)	1,60	1,30	1,30	1,50
P (max %)	0,025	0,020	0,020	0,015
S (max %)	0,010	0,010	0,010	0,010
Cr* (max %)	1,40	2,20	1,40	1,20
Ni* (max %)	1,50	2,0	1,40	2,50
Mo* (max %)	0,60	0,40	0,60	0,70
B* (max %)	0,005	0,005	0,004	0,005

Fonte: Adaptado (SSAB, 2026)

2.3 Revestimento duro *(Hardfacing)*

A outra solução estudada para combater a perda de matéria por desgaste é do revestimento duro *(hardfacing)*, que pode ser aplicado por soldagem ou metalização. É uma das soluções mais eficazes e econômicas para aumentar a resistência ao desgaste de peças de máquinas, gerando camadas duráveis contra abrasão, erosão, impacto e corrosão (DURMUS *et al,* 2018).

O principal fator que influencia a durabilidade do endurecimento na recuperação de peças e a escolha da tecnologia de revestimento duro é o tipo de metal depositado. As ligas do sistema Fe–Cr–C com alto teor de cromo são as mais amplamente utilizadas, devido à elevada fração volumétrica de precipitados de carbonetos (M_7C_3, M_3C_2 e $M_{23}C_6$) (LOZYNSKYI, 2024). As ligas mais comuns, do sistema Fe-C-Cr, formam uma microestrutura hipereutética com grandes carbonetos primários de cromo M_7C_3, $M_{23}C_6$, (RUTHERFORD; HUTCHINGS, 1997) de altíssima dureza (1600-1900 HV), imersos em uma matriz eutética de austenita e carbonetos finos. Esta combinação confere uma dureza superficial média (736 HV) e uma resistência ao desgaste superior às dos aços Hardox. No entanto, os metais de adição dessas ligas Fe–Cr–C com alto cromo trincam com facilidade durante o processo de hardfacing, o que impõe limitações à sua aplicação (LOZYNSKYI, 2024).

A formação de trincas ocorre porque o metal depositado sofre grande contração ao resfriar, mas essa contração é restringida pelo substrato, gerando elevadas tensões térmicas. As trincas aliviam parte dessas tensões, porém ainda permanecem tensões residuais internas significativas. Como consequência, o nível de tensões no revestimento pode ultrapassar a resistência do material, originando trincas distribuídas de forma relativamente uniforme na camada depositada (LOZYNSKYI, 2024).

Além disso, as tensões residuais podem causar trincas durante o uso, por meio de lascamentos. Para reduzir esse problema, é necessário aumentar a capacidade do metal depositado de aliviar tensões internas, principalmente ajustando a composição química, diminuindo a fração de carbonetos e adicionando elementos que aumentem a ductilidade. Entretanto, essas medidas tendem a diminuir a resistência ao desgaste abrasivo (JIAN, 2021).

As ligas do sistema Fe–C–B, por serem altamente resistentes ao desgaste abrasivo e apresentarem custo relativamente baixo, tornaram-se mais utilizadas nesse

meio (PRYSYAZHNYUK; DI TOMMASO, 2023). Atualmente, há numerosas pesquisas sobre ligas ternárias simples do sistema Fe–C–B, bem como ligas adicionalmente combinadas com elementos formadores de carbonetos, como Cr e outros elementos de liga (LOZYNSKYI, 2024).

O boro pode formar os seguintes compostos nessas ligas: monoboreto de ferro FeB, hemiboreto Fe_2B, $Fe_3(B,C)$ e o carboneto cúbico de boro $Fe_{23}(C,B)_6$. Na maioria dos casos, a maior parte do boro forma o hemiboreto Fe_2B, que é uma fase frágil. Isso se explica pela fragilidade intrínseca do Fe_2B devido à fraca ligação B–B ao longo da direção [002], o que leva a uma grande suscetibilidade das ligas ao boro à formação de trincas (LOZYNSKYI, 2024).

Kirkovska *et al.* (2020) mostraram que, entre os elementos de liga C, Cr, Mn, V, W e Mn + V, o maior aumento no módulo de indentação tanto do monoboreto FeB quanto do hemiboreto Fe_2B foi observado com a adição de cromo. Por outro lado, o menor módulo no caso do FeB formado em ligas Fe–B–X (X = C, Cr, Mn) foi medido na presença de carbono como elemento de liga, enquanto para o Fe_2B isso ocorreu em ligas contendo manganês.

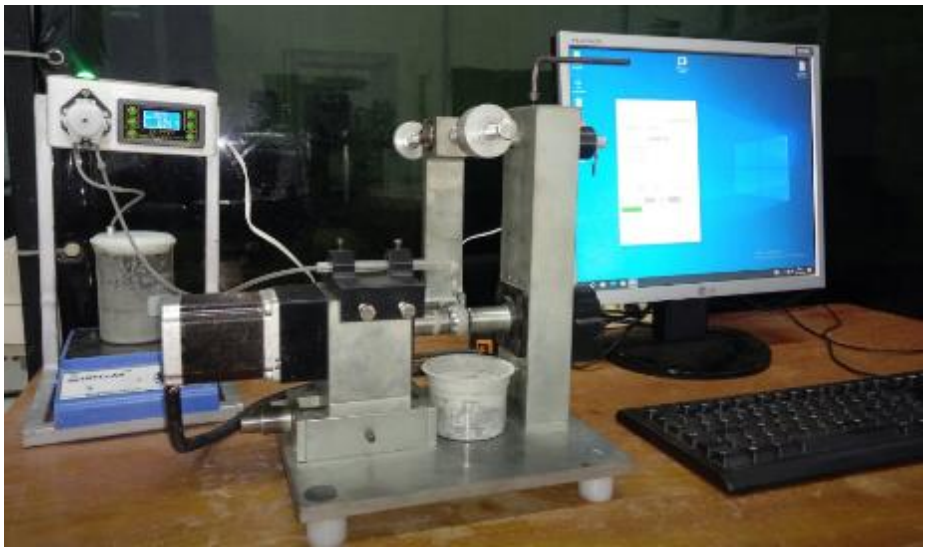
Isso explica o interesse dos pesquisadores atuais em ligas Fe–C–Cr–B. É necessário limitar os teores de carbono e manganês, mas no final, a adição de boro (sistema Fe-C-Cr-B) refina a microestrutura, forma boro-carbonetos complexos $M_{23}(C,B)_6$ e promove a transformação da matriz em martensita, resultando em uma dureza ainda maior (759 HV), porém com menor tenacidade (KIM *et al.*, 2009).

Dependendo do teor de elementos nas ligas do sistema Fe–C–Cr–B, podem se formar carbonetos, boretos e carbonoboretos. Estudos de Lentz, Röttger e Theisen (2020) sobre ligas Fe–C–Cr–B mostraram que a tenacidade à fratura, assim como a dureza da fase M_2B, podem ser aumentadas simultaneamente por meio do ajuste intencional do teor de Cr (até 5% em massa). O aumento das propriedades mecânicas pode ser explicado pela estrutura do hemiboreto Fe_2B, que é rearranjada de uma rede ortorrômbica para uma tetragonal. Nesse caso, o Fe_2B com rede tetragonal é menos frágil (LENTZ; ROTTGER; THEISEN, 2017).

3 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Ao a realizar os ensaios de desgaste, foi realizado dois métodos para a obtenção dos diâmetros. O primeiro, utilizou um dispositivo de esfera fixa, mostrado na Figura 2, construído com base na norma (ISO 26424, 2008), vinculado ao Departamento de Engenharia Mecânica. Para maior detalhamento do funcionamento da máquina e confecção do mecanismo estão descritos em (FERNANDES, 2019).

Figura 2 – Dispositivo de esfera fixa.



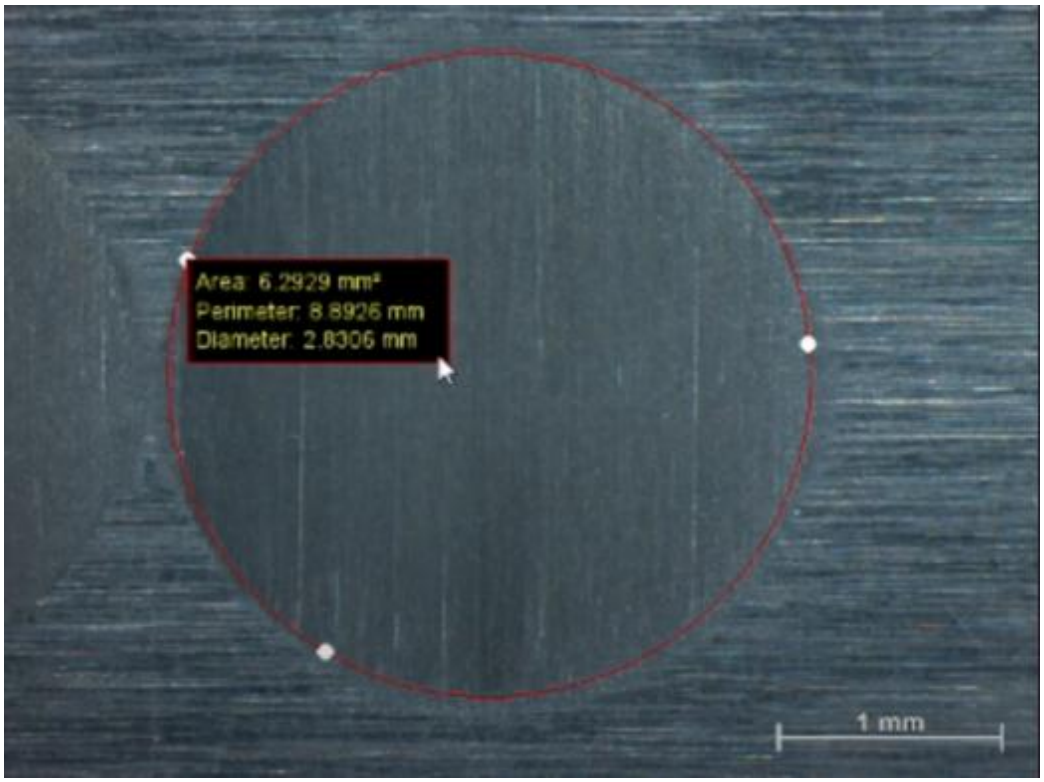
Fonte: (FAGUNDES, 2025)

O ensaio de microabrasão por esfera rotativa, descrito pela norma (ISO 26424, 2008), é utilizado para determinar a resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos aplicados em cerâmicas avançadas. O método baseia-se no contato de uma esfera rígida, geralmente confeccionada em aço temperado ou carbeto de tungstênio, contra a superfície revestida da amostra. A esfera é submetida a uma força normal (F), enquanto gira na presença de uma suspensão abrasiva composta por partículas, como sílica ou alumina, dispersas em um líquido. A interação entre a carga aplicada, o movimento rotacional e a ação das partículas abrasivas promovem a remoção gradual de material, resultando na formação de uma calota esférica de desgaste na superfície da amostra. Após a execução do ensaio, a cratera formada é analisada em microscópio óptico ou eletrônico. São medidos dois diâmetros ortogonais (d1 e d2), correspondentes às dimensões da calota nos eixos vertical e horizontal através do software. A partir desses valores, obtém-se o diâmetro médio da calota (dm), que é o

parâmetro utilizado nos cálculos subsequentes. Conhecendo-se o diâmetro médio da cratera e o raio (R) da esfera utilizada, determina-se o volume de material removido (Vr).

O segundo método utiliza uma ferramenta do software IC Measure que consiste em traçar três pontos na borda do círculo da calota. O software utiliza fotos para obter a medida calibrando na escala de 2 mm posta anteriormente no Microscópio, a Figura 3 mostra a obtenção de um diâmetro.

Figura 3 – Medição do diâmetro da calota através do software IC Measure.



Fonte: Elaborado pelo autor,2026.

O diâmetro obtido pelo software (2º método) ou pelo cálculo da média de diâmetros (1º método) é utilizado para calcular o volume removido, através da Equação 1, da mesma forma que é realizado com o primeiro método.

$$Vr = \frac{\pi d^4}{64\,R} \qquad (1)$$

em que V é o volume removido em milímetros cúbicos, d é o diâmetro médio da calota em milímetros e R é o raio da esfera também em milímetros.

Com o volume removido, calcula-se o coeficiente de desgaste (K), grandeza que quantifica a resistência ao desgaste do material. Para isso, utiliza-se a lei de

Archard descrita na Equação 2, que relaciona o volume perdido com as variáveis do ensaio:

$$Vr = K * F * Sd \quad (2)$$

em que F representa a força normal aplicada sobre a esfera, em Newtons, e S corresponde à distância de deslizamento, em metros, definida como o percurso total percorrido pela esfera em contato com a superfície da amostra. Rearranjando as Equações 1 e 2, obtém-se pela equação 3.

$$K = \frac{Vr}{F * Sd} \quad (3)$$

o coeficiente de desgaste K é expresso em milímetros cúbicos por Newton metro, representando a quantidade de material removido por unidade de carga e distância de deslizamento. Valores reduzidos de K indicam maior resistência ao desgaste, enquanto valores mais elevados refletem menor desempenho frente ao mecanismo abrasivo.

Para assegurar a confiabilidade dos resultados, recomenda-se a realização de múltiplas repetições do ensaio sob as mesmas condições experimentais. Dessa forma, obtêm-se valores médios e respectivos desvios-padrão para as variáveis de interesse Vr e K, permitindo uma análise estatística consistente. A partir desses dados, torna-se possível estabelecer comparações diretas entre diferentes revestimentos, identificando aqueles que apresentam maior resistência ao desgaste abrasivo e, consequentemente, maior potencial de aplicação em situações críticas de atrito e abrasão.

Para o presente trabalho, foram utilizadas as seguintes condições experimentais citadas na Tabela 2, foi utilizado também, a esfera de aço AISI 52100, com diâmetro de 25,4 milímetros, uma solução abrasiva utilizada composta de água destilada e carbonetos de silício com granulometria inferior a 10 µm, com a proporção de abrasivo/água de 0,5:1, Corpos de prova que foram utilizados anteriormente no abrasômetro com tambor rotativo com preparação a partir de etapas de lixamento e polimento e por fim, rotação da esfera foi estabelecida em 185 RPM para todas as amostras, conforme roteiro da Tabela 2.

Tabela 2 – Condições experimentais para o ensaio

Amostras	F (N)	Deslocamento (Sd)	Abrasivo (μm)	Réplicas
HARDOX 450	0,2	120	2000	5
HARDOX 500	0,2	120	2000	5
HARDOX 550	0,2	120	2000	5
HARDOX 600	0,2	120	2000	5
Solda A FeCrCB	0,2	120	2000	5
Solda B FeCrC	0,2	120	2000	5

Fonte: Elaborado pelo autor,2026.

Os parâmetros demonstrados na Tabela 3, que foram adotados para a realização dos ensaios de desgaste, definiram as condições experimentais padronizadas que garantem a repetitividade e a comparabilidade entre as diferentes amostras testadas. Assim, todos os resultados reportados neste trabalho foram obtidos sob essas mesmas condições de abrasivo, distância percorrida, força aplicada, esfera utilizada e equipamentos de medição.

Tabela 3 – Parâmetros utilizados para o ensaio

Parâmetro	Valor
Abrasivo	Sílica 2000
Distância (m)	120
Microscópio	Olz4
Diâmetro da esfera (mm)	25,4
Força (N)	0,2

Fonte: Elaborado pelo autor,2026.

Por fim, é feita uma análise estatística para apurar os resultados. Levando em consideração a média entre as 5 amostras, desvio padrão e erro da média nos dois métodos.

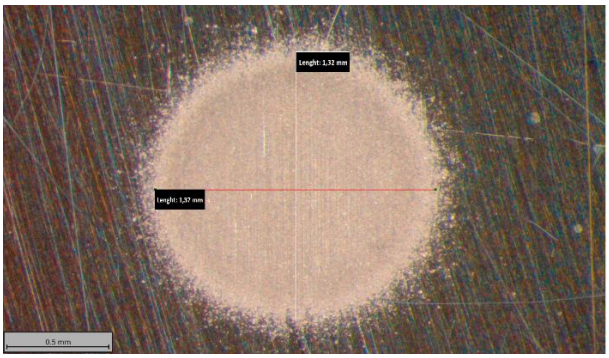
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados: 1º Método – Diâmetro Médio.

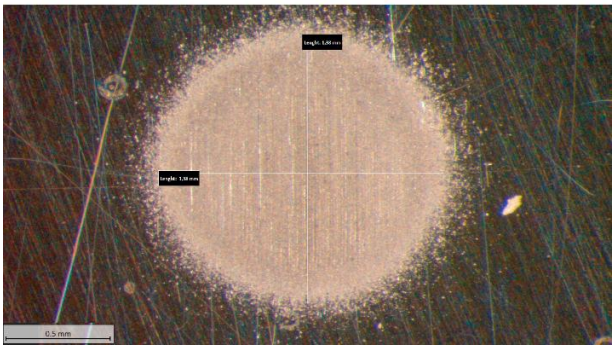
Nas Figuras de 4 até 9 está apresentado os diâmetros ortogonais medidos pelo microscópio óptico. A Tabela 4 apresenta as medidas dos diâmetros verticais (d1) e horizontais (d2) das calotas de cada amostra.

Na Figura 4, os itens (a), (b), (c), (d) e (e) apresentaram calotas com diâmetros horizontais semelhantes, quanto aos diâmetros verticais houve uma divergência apenas para a segunda amostra, item (b), com um valor menor que os demais.

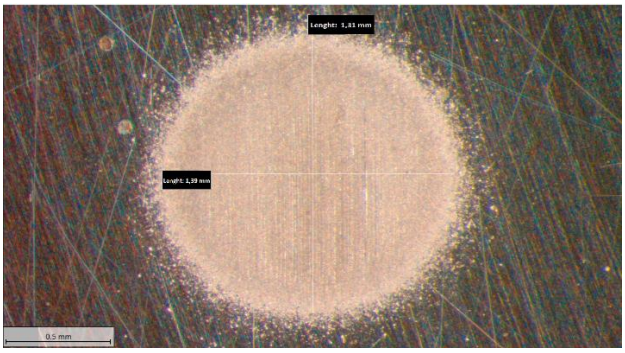
Figura 4 – Primeiro método: Diâmetro médio – Hardox 600 – Amostras.



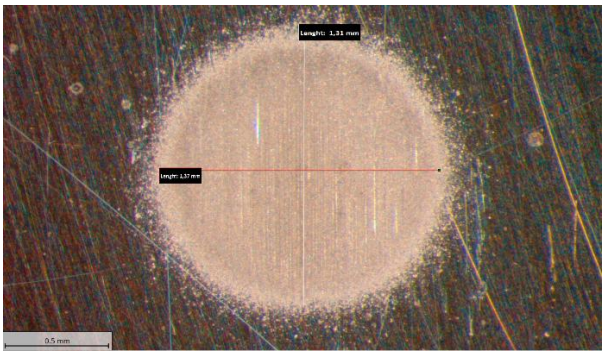
(a)



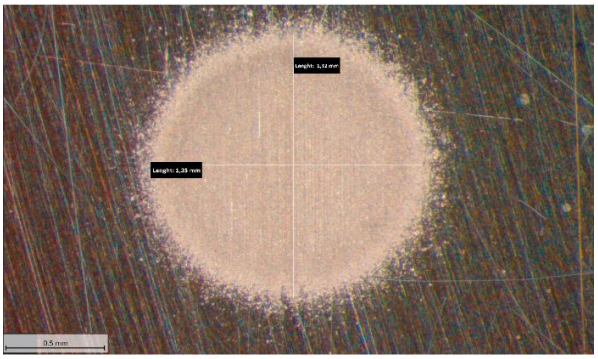
(b)



(c)



(d)

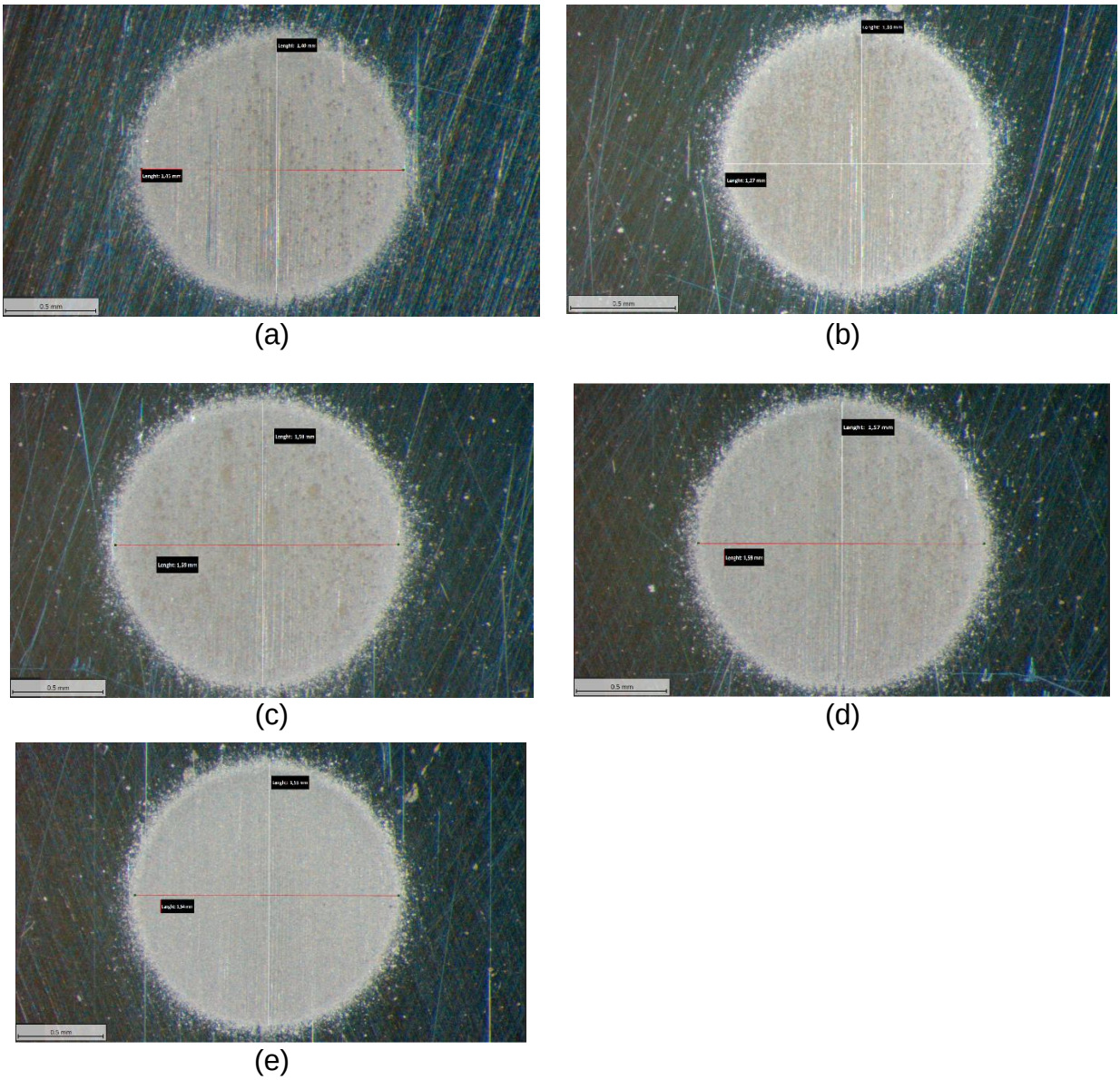


(e)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Dentre os itens na Figura 5, as amostras (a) e (b) demonstram diâmetros menores em comparação as amostras (c), (d) e (e).

Figura 5 – Primeiro método: Diâmetro médio – Hardox 550 – Amostras.



(a) (b)

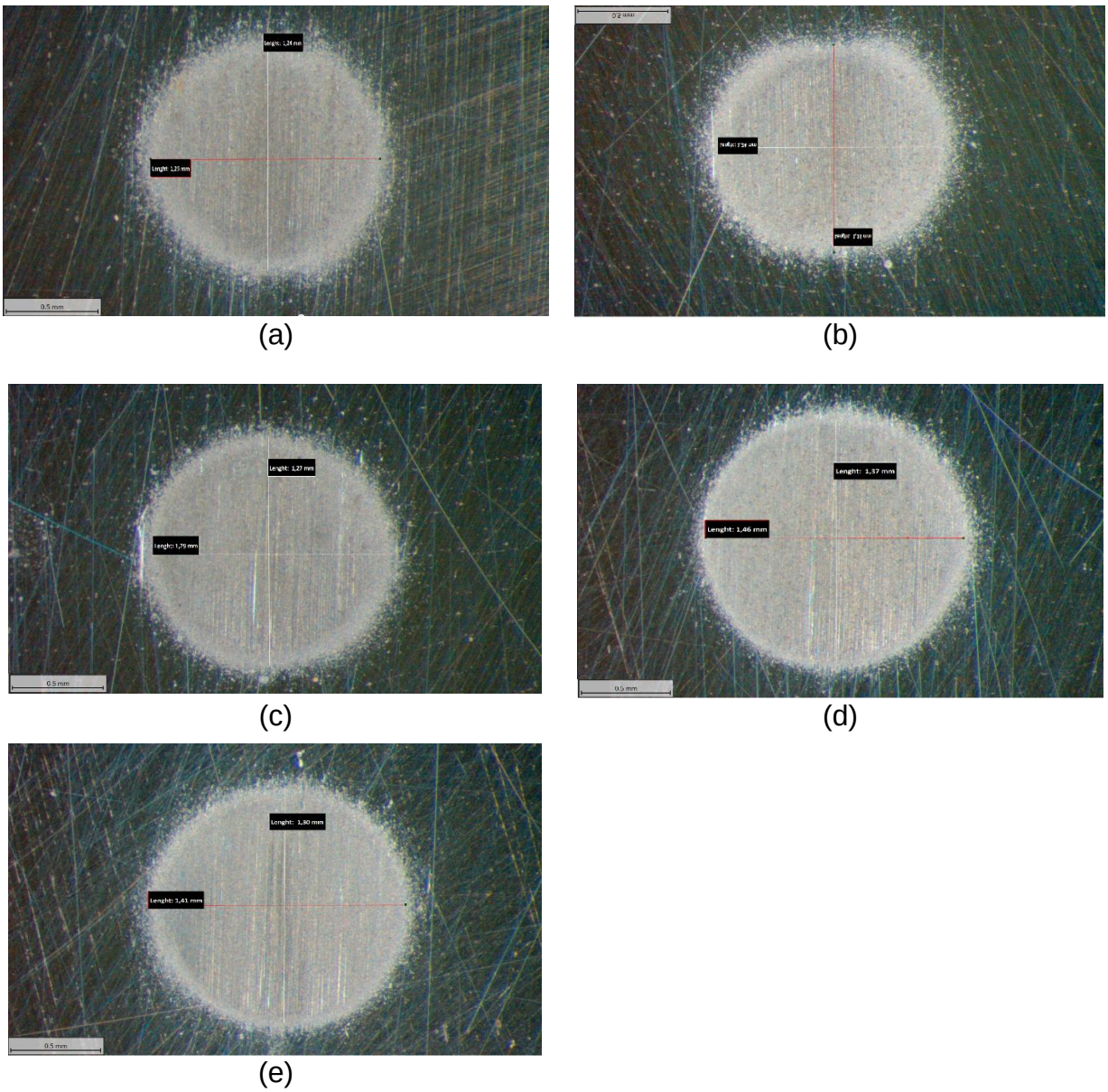
(c) (d)

(e)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Na Figura 6, as calotas das amostras (a) e (c) e (d) e (e) apresentaram diâmetros similares entre si, mas divergem ao observar esses pares, e ao analisar a amostra (b), o diâmetro vertical evidência uma divergência entre as demais, sendo o menor entre todas as amostras do material Hardox 500, visualmente percebe-se um achatamento vertical ocasionado pelo ensaio.

Figura 6 – Primeiro método: Diâmetro médio – Hardox 500 – Amostras.



(a) (b)

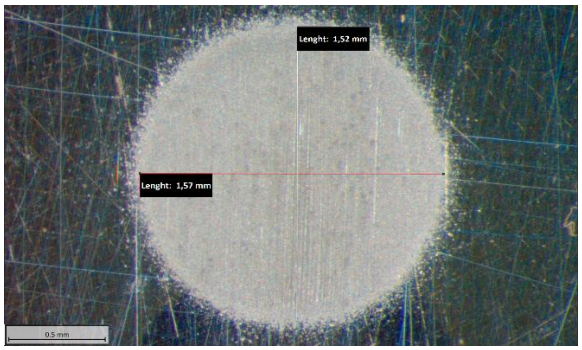
(c) (d)

(e)

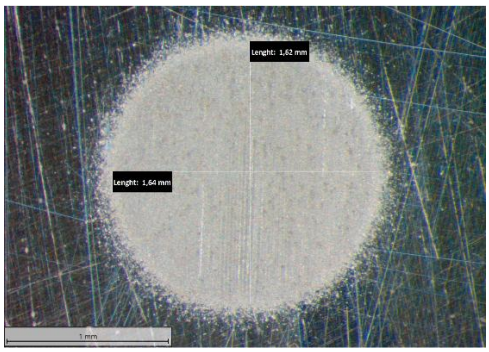
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

. Os diâmetros das amostras (a), (c), (d) e (e), na Figura 7, apresentaram medidas similares, com exceção da amostra (b), que evidenciaram valores maiores nos diâmetros.

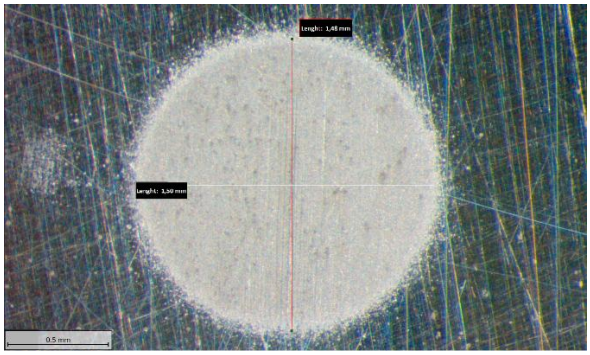
. Figura 7 – Primeiro método: Diâmetro médio – Hardox 450 – Amostras.



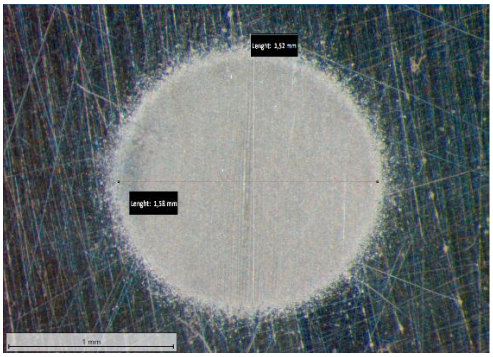
(a)



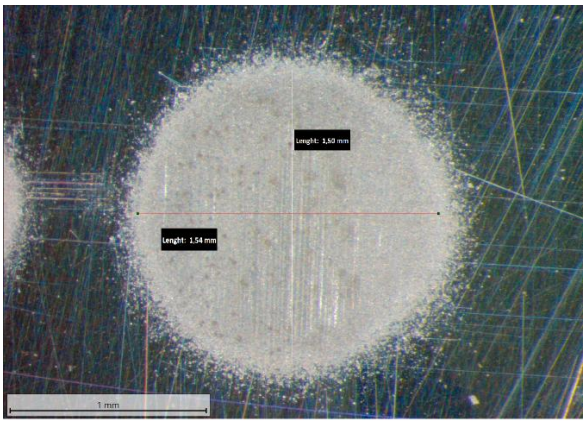
(b)



(c)



(d)

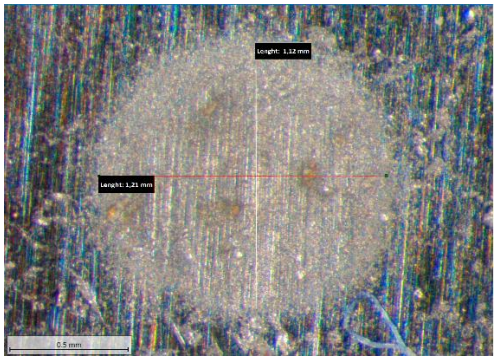


(e)

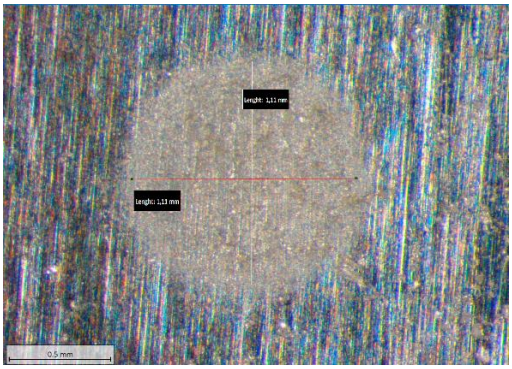
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

As amostras (c) e (e) e as (b) e (d), na Figura 8, apresentam diâmetros similares entre si, mas divergem ao comparar esses pares e ao analisar a amostra (a), o diâmetro horizontal é destacável um diâmetro menor comparado com as outras amostras.

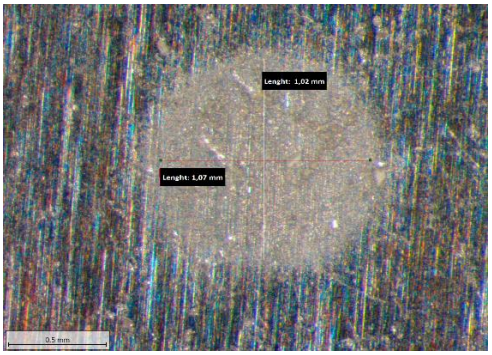
Figura 8 – Primeiro método: Diâmetro médio – FeCrCB 6713 – Amostras.



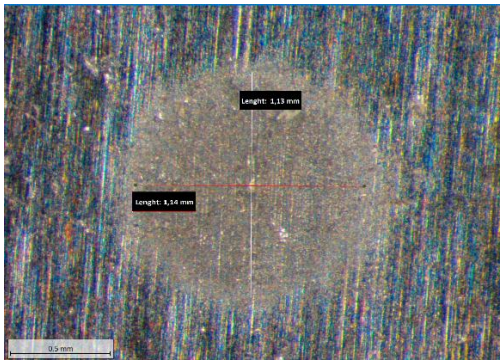
(a)



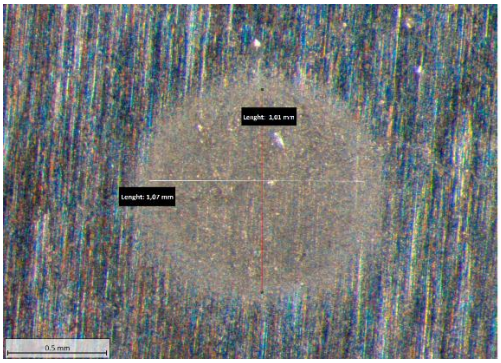
(b)



(c)



(d)

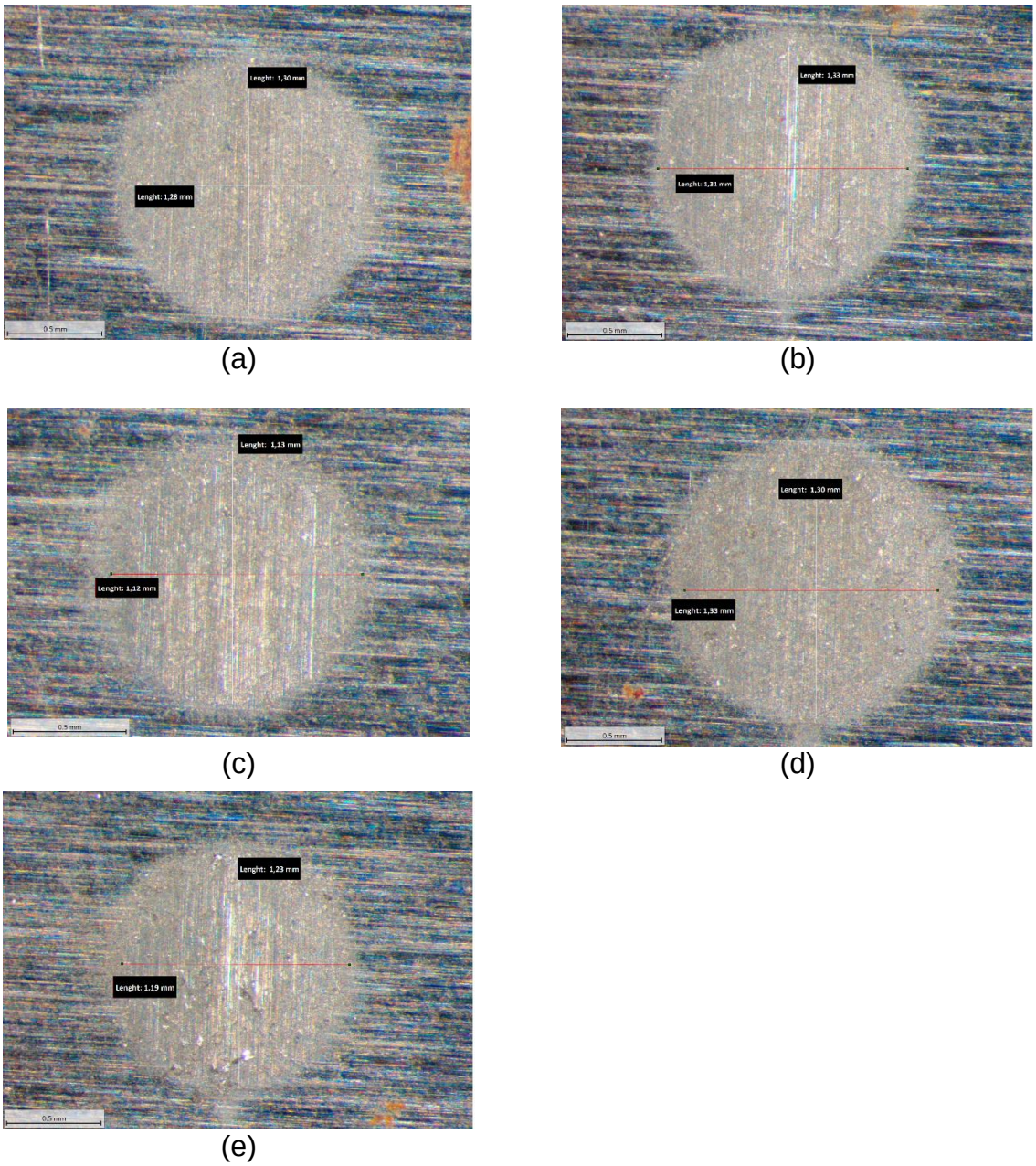


(e)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Na Figura 9, os diâmetros dos itens (a), (b) e (c) são semelhantes, entretanto, os valores das amostras (d) e (e) diferem entre si e entre as demais no conjunto de amostras do revestimento FeCrC 6710.

Figura 9 – Primeiro método: Diâmetro médio – FeCrC 6710 – Amostras.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Pelas as análises das cavidades em todas as figuras apresentam a abrasão de riscamento, evidenciada por risco verticais em direção ao movimento da esfera e a

concentração de abrasivo. Os diâmetros d1 e d2 das amostras estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Diâmetros (d1 e d2) das calotas em milímetros.

Amostra	Medida	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
HARDOX 600	d1	1,32	1,38	1,31	1,31	1,32
	d2	1,37	1,38	1,39	1,37	1,35
HARDOX 550	d1	1,40	1,33	1,59	1,57	1,53
	d2	1,45	1,27	1,59	1,59	1,54
HARDOX 500	d1	1,24	1,16	1,27	1,37	1,30
	d2	1,25	1,24	1,29	1,46	1,41
HARDOX 450	d1	1,52	1,62	1,48	1,52	1,50
	d2	1,57	1,64	1,50	1,58	1,54
FeCrCB 6713	d1	1,12	1,11	1,02	1,13	1,01
	d2	1,21	1,11	1,07	1,14	1,07
FeCrC 6710	d1	1,30	1,33	1,13	1,30	1,23
	d2	1,28	1,31	1,12	1,33	1,19

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Os desvios entre d1 e d2, segundo a norma ISO 26424, não pode ultrapassar 10% de divergência entre estes, conforme a Tabela 5 abaixo, conclui-se que as amostras apresentam resultados validos.

Tabela 5 – 1º Método: Desvios entre diâmetro vertical (d1) em relação ao horizontal (d2) em porcentagem (%).

Amostra	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
HARDOX 600	3,65	0,00	5,76	4,38	2,22
HARDOX 550	3,45	-2,36	0,00	1,26	0,65
HARDOX 500	0,80	6,45	1,55	6,16	7,80
HARDOX 450	3,18	1,22	1,33	3,80	2,60
FeCrCB 6713	7,44	0,00	4,67	0,88	5,61
FeCrC 6710	-1,56	-1,53	-0,89	2,26	-3,36

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Com os diâmetros d1 e d2 foi calculado os diâmetros médios descritos na Tabela 5.

Tabela 6 – 1º Método: Diâmetro médio (dm) em milímetros.

Amostra	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
HARDOX 600	1,345	1,380	1,350	1,340	1,335
HARDOX 550	1,425	1,285	1,590	1,580	1,535
HARDOX 500	1,245	1,200	1,280	1,415	1,355
HARDOX 450	1,545	1,630	1,490	1,550	1,520
FeCrCB 6713	1,165	1,110	1,045	1,135	1,040
FeCrC 6710	1,290	1,320	1,125	1,315	1,210

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Com o diâmetro médio, apresentado na Tabela 6, foi calculado o volume removido, conforme apresentado na Equação 1 e descrito na Tabela 7.

Tabela 7 – 1º Método: Volume removido (Vr) em milímetros cúbicos.

Amostra	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
HADOX 600	$1{,}26 \times 10^{-2}$	$1{,}40 \times 10^{-2}$	$1{,}28 \times 10^{-2}$	$1{,}25 \times 10^{-2}$	$1{,}23 \times 10^{-2}$
HADOX 550	$1{,}59 \times 10^{-2}$	$1{,}05 \times 10^{-2}$	$2{,}47 \times 10^{-2}$	$2{,}41 \times 10^{-2}$	$2{,}15 \times 10^{-2}$
HADOX 500	$9{,}29 \times 10^{-3}$	$8{,}41 \times 10^{-3}$	$1{,}04 \times 10^{-2}$	$1{,}55 \times 10^{-2}$	$1{,}20 \times 10^{-2}$
HADOX 450	$2{,}20 \times 10^{-2}$	$2{,}73 \times 10^{-2}$	$1{,}91 \times 10^{-2}$	$2{,}35 \times 10^{-2}$	$2{,}06 \times 10^{-2}$
FeCrCB 6713	$7{,}12 \times 10^{-3}$	$5{,}87 \times 10^{-3}$	$4{,}61 \times 10^{-3}$	$4{,}61 \times 10^{-3}$	$4{,}52 \times 10^{-3}$
FeCrC 6710	$1{,}07 \times 10^{-2}$	$1{,}17 \times 10^{-2}$	$6{,}19 \times 10^{-3}$	$1{,}16 \times 10^{-2}$	$8{,}29 \times 10^{-3}$

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Em seguida é calculado o coeficiente de desgaste, descrito na Equação 3. Os valores são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – 1º Método: Coeficiente de desgaste (K) em milímetros cúbicos por Newton metro.

Amostra	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
HARDOX 600	$2{,}11 \times 10^{-5}$	$2{,}34 \times 10^{-5}$	$2{,}14 \times 10^{-5}$	$2{,}08 \times 10^{-5}$	$2{,}05 \times 10^{-5}$
HARDOX 550	$2{,}66 \times 10^{-5}$	$1{,}76 \times 10^{-5}$	$4{,}12 \times 10^{-5}$	$4{,}01 \times 10^{-5}$	$3{,}58 \times 10^{-5}$
HARDOX 500	$1{,}55 \times 10^{-5}$	$1{,}34 \times 10^{-5}$	$1{,}73 \times 10^{-5}$	$2{,}58 \times 10^{-5}$	$2{,}17 \times 10^{-5}$
HARDOX 450	$3{,}67 \times 10^{-5}$	$4{,}55 \times 10^{-5}$	$3{,}18 \times 10^{-5}$	$3{,}72 \times 10^{-5}$	$3{,}44 \times 10^{-5}$
FeCrCB 6713	$1{,}19 \times 10^{-5}$	$9{,}78 \times 10^{-6}$	$7{,}68 \times 10^{-6}$	$1{,}07 \times 10^{-5}$	$7{,}54 \times 10^{-6}$
FeCrC 6710	$1{,}78 \times 10^{-5}$	$1{,}96 \times 10^{-5}$	$1{,}03 \times 10^{-5}$	$1{,}93 \times 10^{-5}$	$1{,}38 \times 10^{-5}$

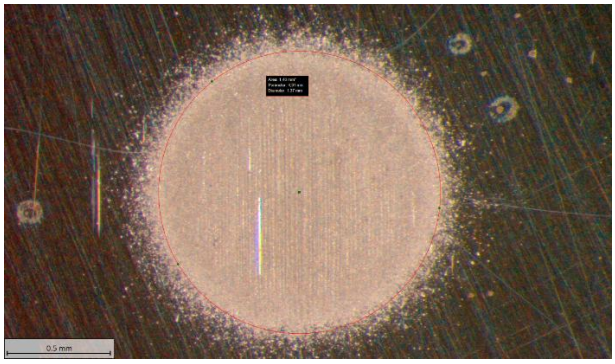
Fonte: Elaborado pelo autor,2026.

4.2 Resultados: 2º Método – Três pontos.

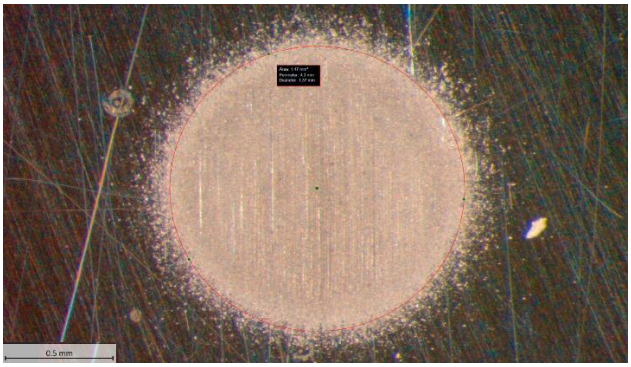
A Figura 10,11,12,13,14 e 15 apresentam as calotas das amostras de Hardox 600, Hardox 550, Hardox 500, Hardox 450, FeCrCB 6713, FeCrC 6710, todas as Figuras estão em escala de 2 mm, conforme demonstrado nas Figuras do primeiro método, foi utilizado o software IC Measure para medir o diâmetro, de maneira, a escolher 3 pontos coordenados de referência para obter a circunferência da área de remoção que mais se aproxima da fronteira de remoção.

Na Figura 10, as amostras (a) e (e) apresentaram diâmetro semelhantes e próximos as demais, e os valores do conjunto de amostra se aproximaram dos diâmetros verticais do primeiro método.

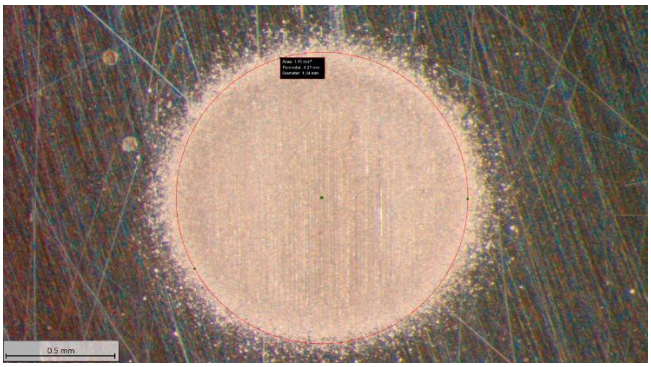
Figura 10 – Segundo método: Três pontos – Hardox 600 – Amostras.



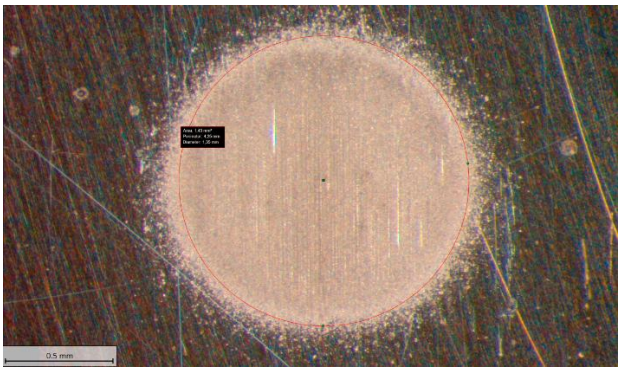
(a)



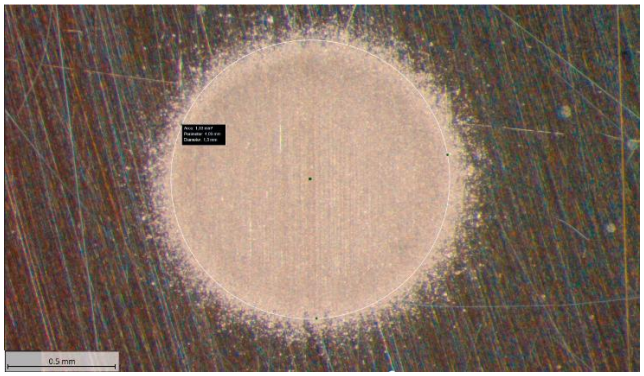
(b)



(c)



(d)

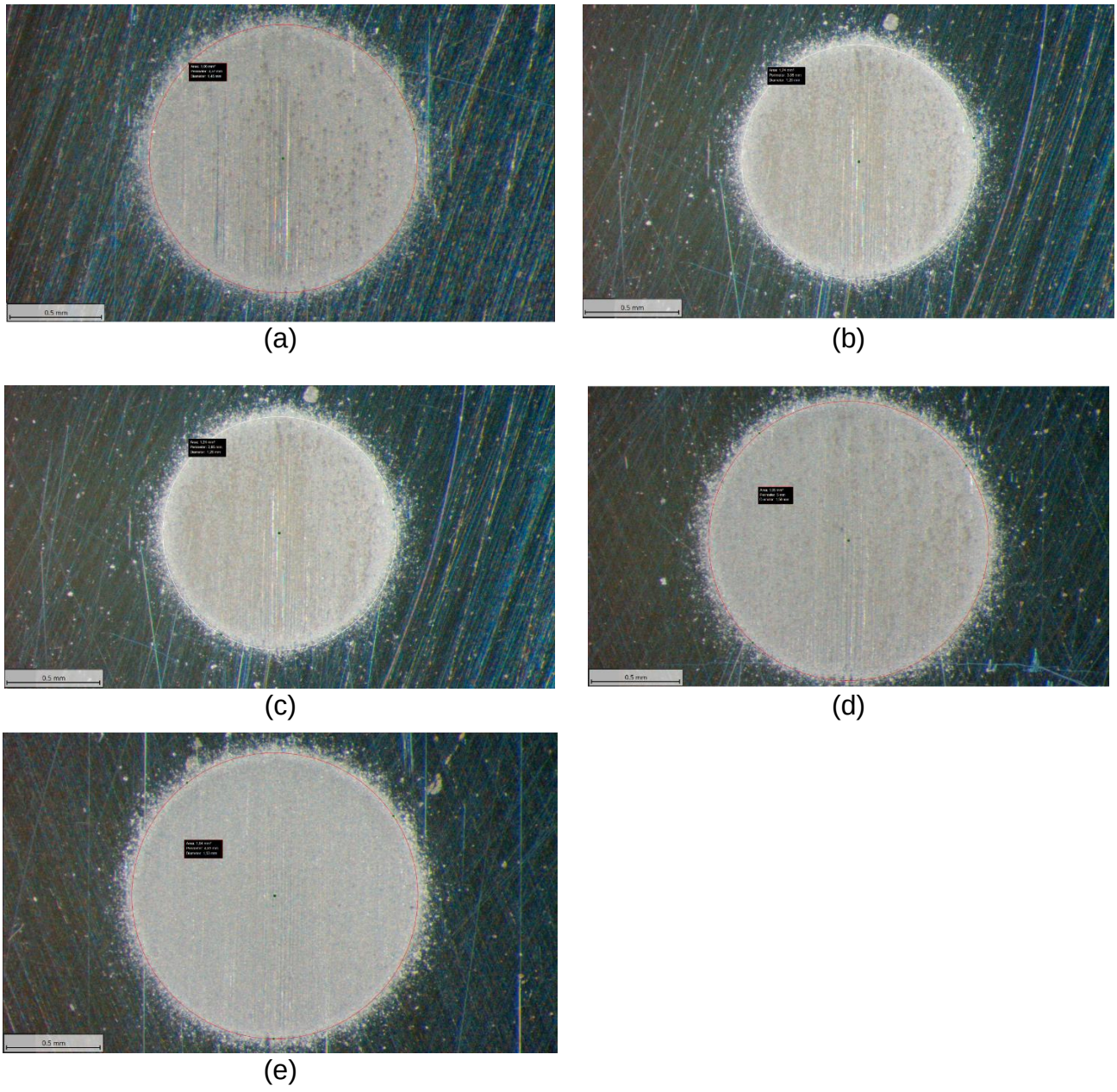


(e)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Na Figura 11, as amostras (a) e (b) apresentaram valores divergentes comparados ao conjunto de amostras Hardox 550, com valores de 1,26 mm e 1,45 mm de diâmetro, por sua vez, as amostras (c), (d) e (e) tiveram um desvio aparente menor em relação as duas primeiras.

Figura 11 – Segundo método: Três pontos – Hardox 550 – Amostras.



(a) (b)

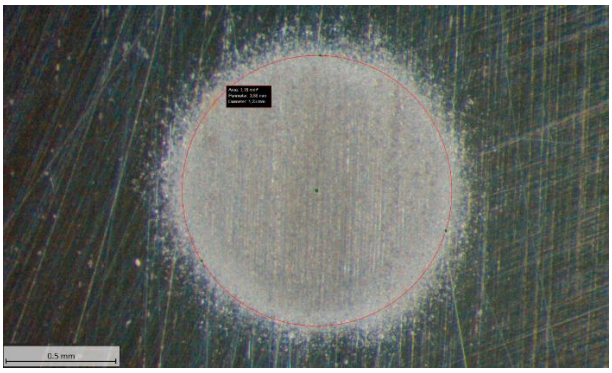
(c) (d)

(e)

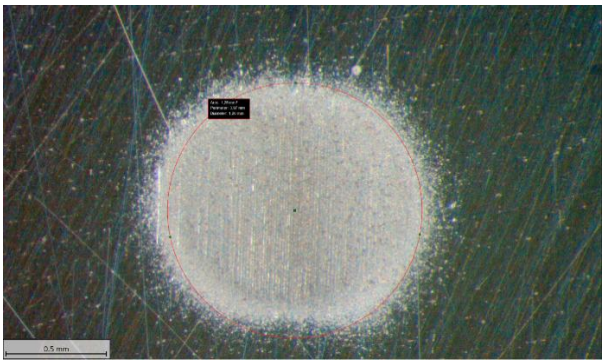
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Na Figura 12, amostra (a) apresentou um valor maior de diâmetro em relação as demais, entretanto as amostras (b), (c), (d) e (e) obtiveram menores desvios.

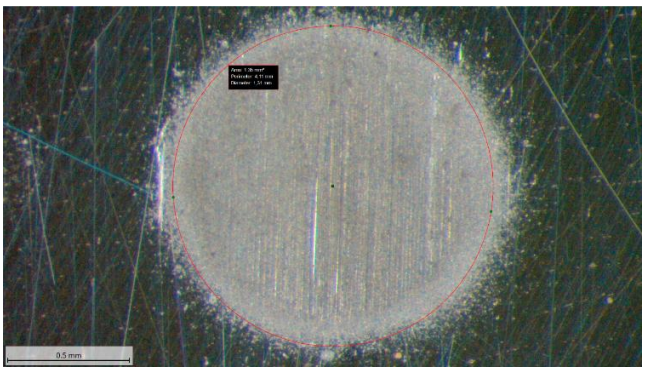
Figura 12 – Segundo método: Três pontos – Hardox 500 – Amostras.



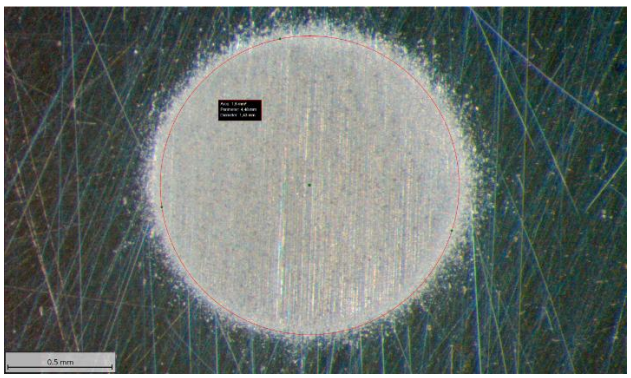
(a)



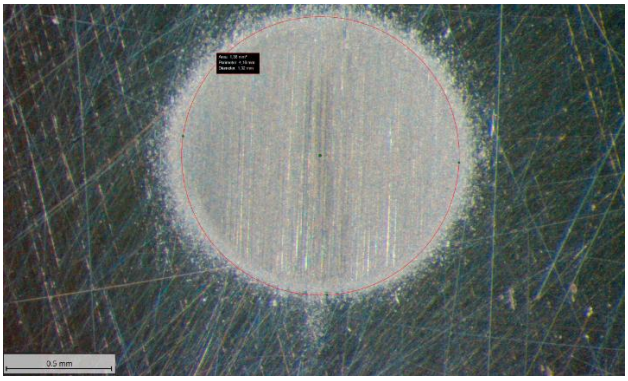
(b)



(c)



(d)

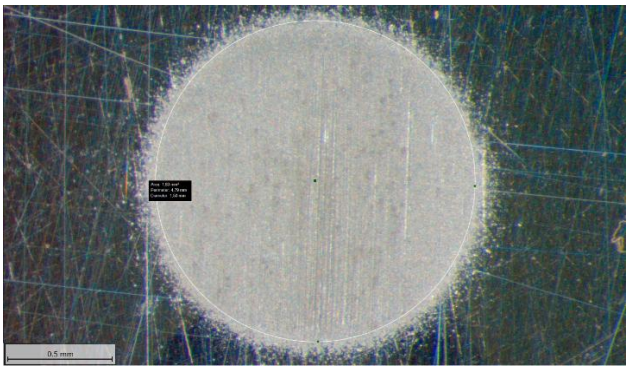


(e)

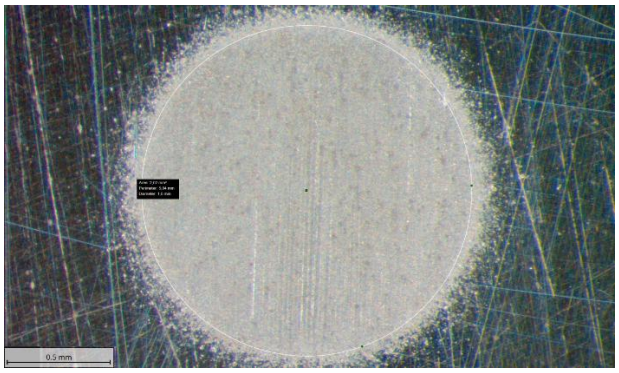
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

As amostras (b) e (c) tiveram uma diferença de comprimento maior evidenciada em comparação com as amostras (a), (d) e (e), na Figura 13.

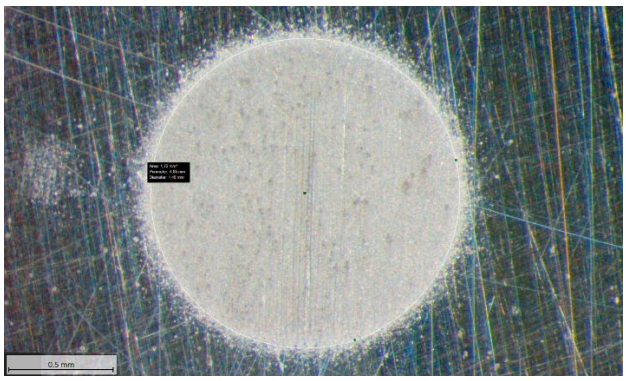
Figura 13 – Segundo método: Três pontos – Hardox 450 – Amostras.



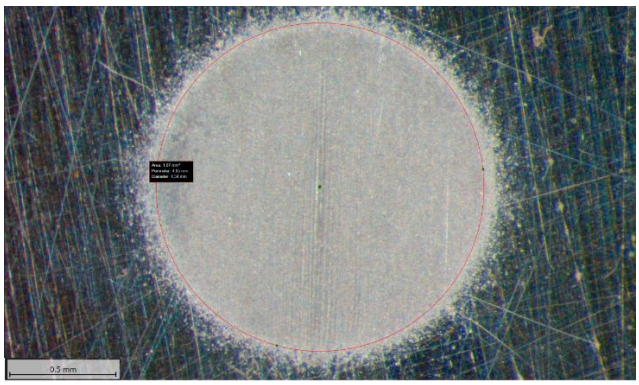
(a)



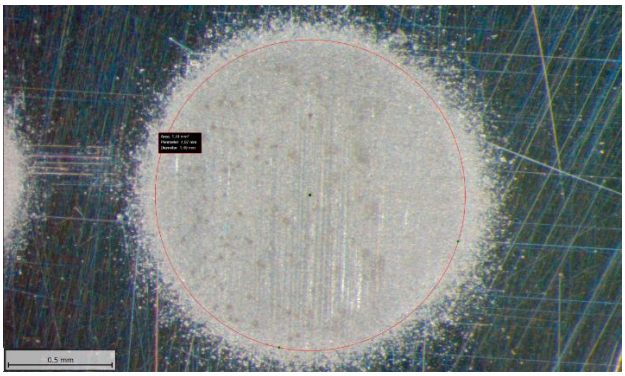
(b)



(c)



(d)

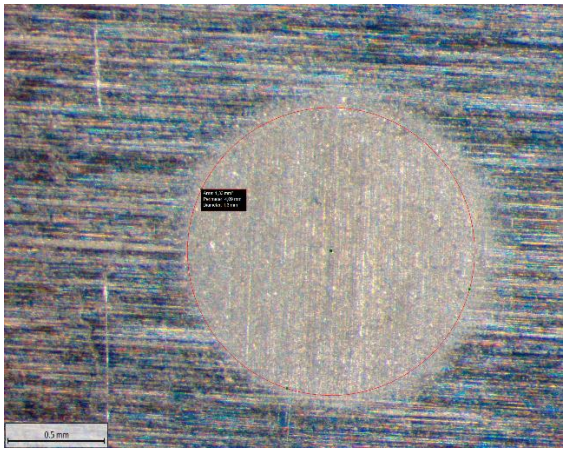


(e)

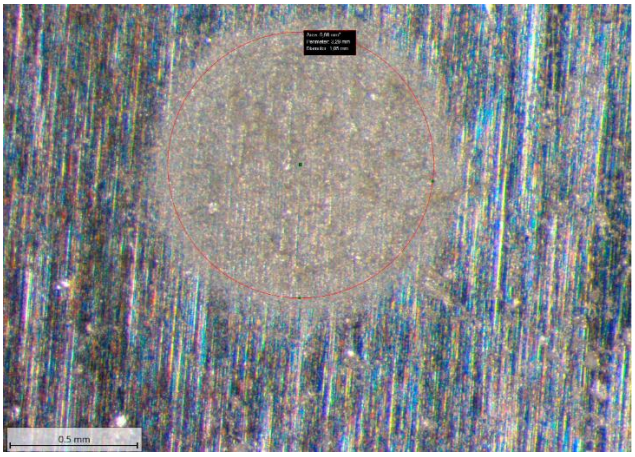
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Na Figura 14, as amostras têm uma variação mínima de diâmetro entre as amostras (a), (b), (c), (d) e (e) apresentando os menores valores entre todos os materiais estudados.

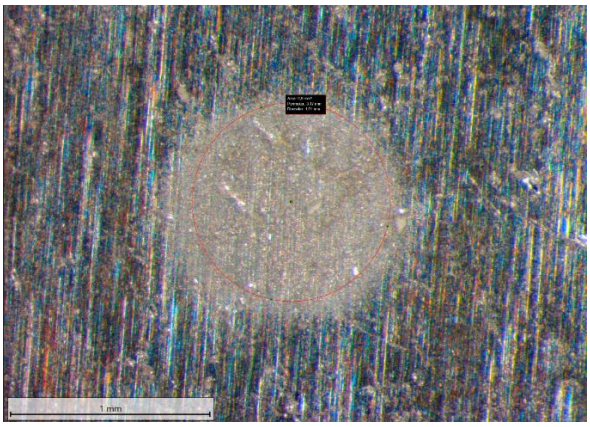
Figura 14 – Segundo método: Três pontos – FeCrCB 6713 – Amostras.



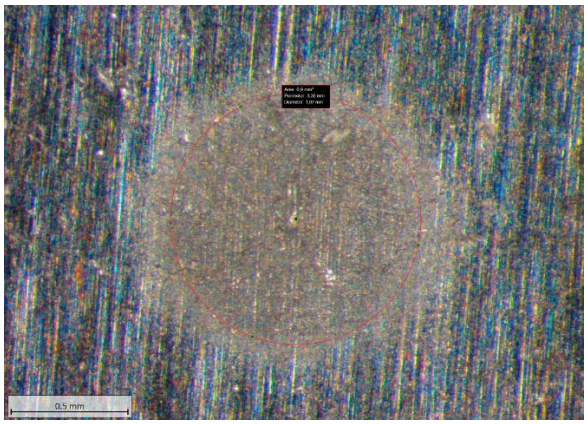
(a)



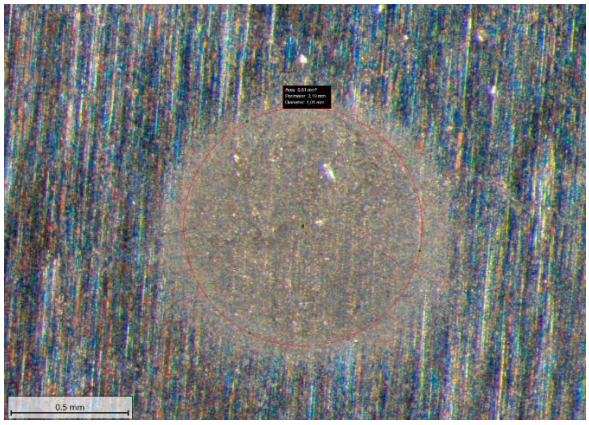
(b)



(c)



(d)

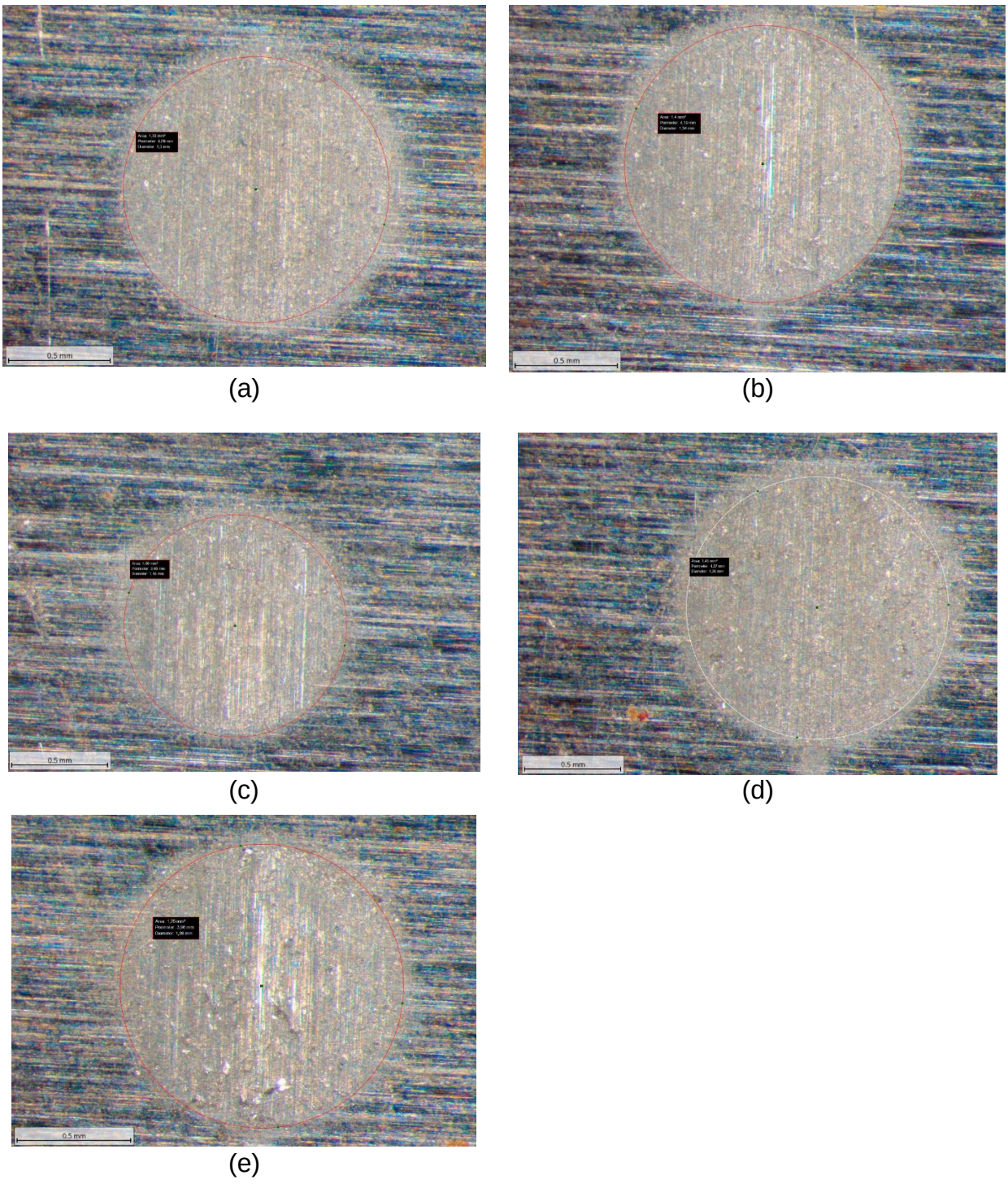


(e)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Na Figura 15, as amostras (c) e (e) apresentaram valores menores que as amostras (a), (b) e (d), estas tendo valores semelhantes. Assim como no primeiro método.

Figura 15 – Segundo método: Três pontos – FeCrC 6710 – Amostras.



(a) (b)

(c) (d)

(e)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

O diâmetro obtido foi utilizado para calcular o volume removido. Posteriormente, possibilitou calcular o coeficiente de desgaste. Esses valores foram dispostos nas Tabelas 9, 10 e 11 respectivamente.

Tabela 9 – 2º Método: Diâmetro (d) das calotas em milímetros.

Amostra	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
HARDOX 600	1,37	1,37	1,34	1,35	1,30
HARDOX 550	1,45	1,26	1,61	1,59	1,53
HARDOX 500	1,23	1,26	1,31	1,43	1,32
HARDOX 450	1,53	1,60	1,48	1,54	1,49
FeCrCB 6713	1,06	1,05	1,01	1,07	1,01
FeCrC 6710	1,30	1,34	1,16	1,36	1,26

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Tabela 10 – 2º Método: Volume removido (Vr) em milímetros cúbicos.

Amostra	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
HARDOX 600	$1{,}36 \times 10^{-2}$	$1{,}36 \times 10^{-2}$	$1{,}25 \times 10^{-2}$	$1{,}28 \times 10^{-2}$	$1{,}10 \times 10^{-2}$
HARDOX 550	$1{,}71 \times 10^{-2}$	$9{,}74 \times 10^{-3}$	$2{,}06 \times 10^{-2}$	$2{,}47 \times 10^{-2}$	$2{,}12 \times 10^{-2}$
HARDOX 500	$8{,}85 \times 10^{-3}$	$9{,}74 \times 10^{-3}$	$1{,}41 \times 10^{-2}$	$1{,}62 \times 10^{-2}$	$1{,}17 \times 10^{-2}$
HARDOX 450	$2{,}12 \times 10^{-2}$	$2{,}53 \times 10^{-2}$	$1{,}85 \times 10^{-2}$	$2{,}17 \times 10^{-2}$	$1{,}91 \times 10^{-2}$
FeCrCB 6713	$4{,}88 \times 10^{-3}$	$4{,}70 \times 10^{-3}$	$4{,}02 \times 10^{-3}$	$5{,}07 \times 10^{-3}$	$4{,}02 \times 10^{-3}$
FeCrC 6710	$1{,}10 \times 10^{-2}$	$1{,}25 \times 10^{-2}$	$7{,}00 \times 10^{-3}$	$1{,}32 \times 10^{-2}$	$9{,}74 \times 10^{-3}$

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Tabela 11 – 2º Método: Coeficiente de desgaste (K) em milímetros cúbicos por Newton metro

Amostra	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
HARDOX 600	$2{,}27 \times 10^{-5}$	$2{,}27 \times 10^{-5}$	$2{,}08 \times 10^{-5}$	$2{,}14 \times 10^{-5}$	$1{,}84 \times 10^{-5}$
HARDOX 550	$2{,}85 \times 10^{-5}$	$1{,}62 \times 10^{-5}$	$4{,}33 \times 10^{-5}$	$4{,}12 \times 10^{-5}$	$3{,}53 \times 10^{-5}$
HARDOX 500	$1{,}47 \times 10^{-5}$	$1{,}62 \times 10^{-5}$	$1{,}90 \times 10^{-5}$	$2{,}69 \times 10^{-5}$	$1{,}96 \times 10^{-5}$
HARDOX 450	$3{,}53 \times 10^{-5}$	$4{,}22 \times 10^{-5}$	$3{,}09 \times 10^{-5}$	$3{,}62 \times 10^{-5}$	$3{,}18 \times 10^{-5}$
FeCrCB 6713	$8{,}13 \times 10^{-6}$	$7{,}83 \times 10^{-6}$	$6{,}70 \times 10^{-6}$	$8{,}44 \times 10^{-6}$	$6{,}70 \times 10^{-6}$
FeCrC 6710	$1{,}84 \times 10^{-5}$	$2{,}08 \times 10^{-5}$	$1{,}17 \times 10^{-5}$	$2{,}20 \times 10^{-5}$	$1{,}62 \times 10^{-5}$

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

4.3 Análise Estatística

O ensaio comparativo entre os dois métodos de determinação do coeficiente de desgaste permitiu avaliar a consistência dos resultados obtidos. Para cada amostra, foram calculadas as médias, o desvio-padrão descrito pela Equação 4, onde x_i são os valores das amostras, x a média das amostras e n o número de amostras. Os dados estatísticos estão apresentados na Tabela 12.

Para o cálculo do desvio padrão, utilizou-se:

$$\mathrm{DP} = \sqrt{\frac{\sum(\mathrm{x_i}-\mathrm{x})^2}{\mathrm{n}-1}} \tag{4}$$

para verificar a significância das diferenças entre métodos, foi calculada a diferença percentual entre os dois métodos, descritos pelas Equação 5. Os resultados estão apresentados na Tabela 13 e ilustrados na Figura 17.

$$Diferença\ \% = \frac{|Método\ 1 - Método\ 2|}{(Método\ 1 + Método\ 2)/2} * 100 \tag{5}$$

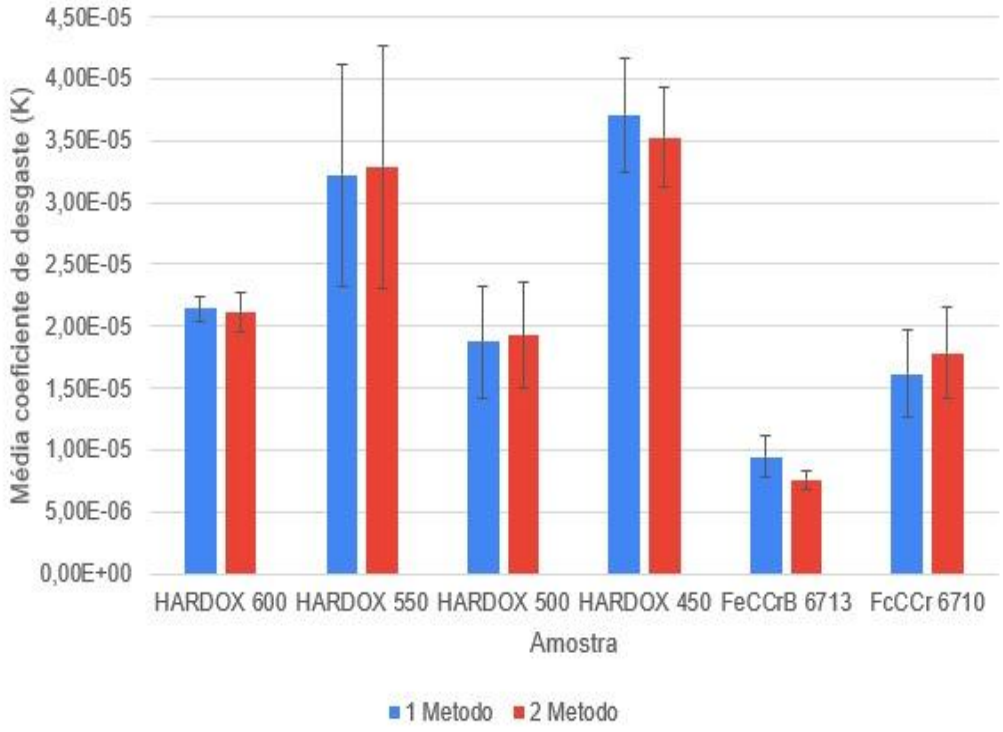
Tabela 12 – Médias, desvio padrão dos coeficientes de desgaste (K1 e K2) para os dois métodos de ensaio.

Amostra	Média K1	DP K1	Média K2	DP K2
HARDOX 600	$2{,}14 \times 10^{-5}$	$1{,}02 \times 10^{-6}$	$2{,}12 \times 10^{-5}$	$1{,}58 \times 10^{-6}$
HARDOX 550	$3{,}22 \times 10^{-5}$	$8{,}97 \times 10^{-6}$	$3{,}29 \times 10^{-5}$	$9{,}79 \times 10^{-6}$
HARDOX 500	$1{,}87 \times 10^{-5}$	$4{,}49 \times 10^{-6}$	$1{,}93 \times 10^{-5}$	$4{,}21 \times 10^{-6}$
HARDOX 450	$3{,}71 \times 10^{-5}$	$4{,}61 \times 10^{-6}$	$3{,}53 \times 10^{-5}$	$4{,}02 \times 10^{-6}$
FeCrCB 6713	$9{,}44 \times 10^{-6}$	$1{,}68 \times 10^{-6}$	$7{,}56 \times 10^{-6}$	$7{,}28 \times 10^{-7}$
FeCrC 6710	$1{,}62 \times 10^{-5}$	$3{,}57 \times 10^{-6}$	$1{,}78 \times 10^{-5}$	$3{,}67 \times 10^{-6}$

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Os métodos apresentam diferenças nos resultados, um comportamento esperado, à medida que o primeiro utiliza a melhor área circular a partir de dois diâmetros, um vertical e outro horizontal e o segundo método utiliza três pontos coordenados em relação ao centro para definir a melhor área, essa diferença é demonstrada na Figura 16. Houve uma diferença nos coeficientes finais, como já citado, onde os fatores dessa diferença podem ser aproximação para a melhor área circunferencial dos métodos, em áreas de remoção circular assimétricos observa-se uma maior divergência, outra hipótese são erros de paralaxe, pois os pontos do segundo métodos e os diâmetros são a critério do autor, e como citado por Oliveira (2015), há uma dificuldade em definir as fronteiras da calota pela dispersão do material abrasivo nessa área. A Figura 16 apresenta a comparação das médias dos coeficientes de desgaste dos dois métodos.

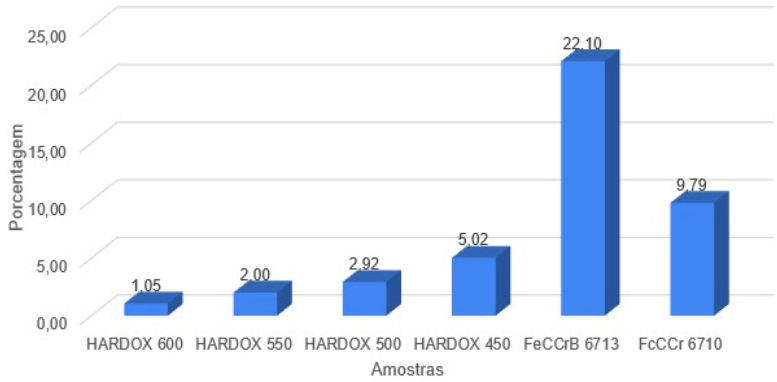
Figura 16 – Comparação das Médias dos Coeficientes de Desgaste.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Com tudo, para o objetivo do trabalho, essas diferenças não interferem na análise, como demonstra a Figura 17 e a Tabela 13:

Figura 17 – Diferença percentual (%) entre os 2 métodos.



Fonte: Elaborado pelo autor,2026.

Tabela 13– Diferença percentual do coeficiente de desgaste entre os dois métodos de ensaio.

Amostra	Dif. Percentual (%)
HARDOX 600	1,05
HARDOX 550	2,00
HARDOX 500	2,92
HARDOX 450	5,02
FeCrCB 6713	22,10
FeCrC 6710	9,79

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

As diferenças percentuais entre as médias dos coeficientes de desgaste, foram, na maioria dos casos, pequenas. Um destaque ocorreu para as amostras de FeCrCB 6713, que apresentou diferença percentual relativamente alta, de 22,10 %.

4.4 Análise dos coeficientes

As ligas FeCrCB 6713 e FeCrC 6710 apresentaram menores K, $9{,}44 \times 10^{-6}\ \frac{mm^3}{Nm}$ e $1{,}78 \times 10^{-5}\ \frac{mm^3}{Nm}$, respectivamente. Segundo Cunha (2018), isso ocorre devido a formação de carbonetos em sua composição que aumenta a dureza de ambos, com o elemento Boro sendo o maior facilitador na formação de carbonetos no FeCrCB 6713, mas para o abrasometro de tambor houve uma divergência em relação a perda de massa em que a liga FeCrCB 6713 obteve maior remoção de material que FeCrC 6710, mesmo que a dureza seja maior, segundo Cunha (2018, pg 85), ocorre devido a fragilidade por tricas de alivio de tensão e baixa ductibildade, mas os resultados obtidos no presente trabalho foi de volumes maiores removidos nas amostras FeCrCB 6713, concluindo que o abrasometro de tambor remover material por impacto e riscamento, sendo mais agressivo que o abrasometro de esfera rotativa.

Em relação as ligas HARDOX, as ordens de grandezas de microdureza obtidas por Cunha (2018, pg. 79) para 9,708 N de solicitação utilizando um abrasometro de tambor, foi em ordem de maior para o menor o HARDOX 600, 550, 500, 450, respectivamente, isso é devido a maior refino dos cristais de martensitas (CUNHA, M. C, 2018). A tabela 14 apresenta esses valores:

Tabela 14 – Dureza Vickers da superfície para os materiais. Valores em Vickers (HV).

Dureza Superficial						
Carga: 9,807 N			Tempo:15 s			
Identação	H450	H500	H550	H600	Liga A	Liga B
D1	489	536	542	559	720	746
D2	490	521	553	556	772	720
D3	488	513	548	559	697	720
D4	488	517	558	570	720	865
D5	488	505	530	569	772	746
Dmédia [HV]	488,6	518,4	546,2	562,6	736,2	759,4
DesvPad	0,9	11,5	10,8	6,4	34,0	60,4

Fonte: CUNHA (2018)

Os resultados obtidos neste trabalho reproduziram a mesma ordem de microdureza, com exceção do HARDOX 500, que houve uma maior resistência ao desgaste dentre o grupo, como demonstrado na Tabela 15, hipótese que a microestrutura superficial tem maior influência para forças menores, onde seria necessária uma análise metalógrafa superficial.

Tabela 15 – Comparação ordem de dureza, a partir do coeficiente de desgaste k.

Ordem de microdureza	Microdureza superficial [HV]	Ordem de Dureza (Experimental)	Valor de K (Experimental) $[\frac{mm^3}{Nm}]$
FeCrCB 6713	759,4	FeCrCB 6713	$7{,}56 \times 10^{-6}$
FeCrC 6710	736,2	FeCrC 6710	$1{,}78 \times 10^{-5}$
HARDOX 600	562,6	**HARDOX 500**	$1{,}93 \times 10^{-5}$
HARDOX 550	546,2	HARDOX 600	$2{,}12 \times 10^{-5}$
HARDOX 500	518,4	HARDOX 550	$3{,}29 \times 10^{-5}$
HARDOX 450	488,6	HARDOX 450	$3{,}53 \times 10^{-5}$

Fonte: Elaborado pelo autor,2026.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo principal investigar e comparar o comportamento ao desgaste abrasivo de diferentes ligas metálicas de aplicação industrial, nomeadamente os aços da família Hardox (450, 500, 550 e 600) e revestimentos de solda dos tipos FeCrC e FeCrCB, obtendo as seguintes conclusões:

- A liga de solda FeCrCb 6713 demonstrou consistentemente o desempenho mais elevado, apresentando o menor coeficiente de desgaste (K) e, consequentemente, a maior resistência à abrasão sob as condições de ensaio. No extremo oposto, o aço HARDOX 450 revelou ser o material com a menor resistência a essa solicitação, obtendo a hierarquia de resistência ao desgaste: HARDOX 450, HARDOX 550, HARDOX 600, HARDOX 500, FeCrC 6710 e FeCrCB 6713;
- A liga de revestimento HARDOX 500 obteve um comportamento desviante do que encontrado na literatura e pelo catálogo do fabricante, é sugerido realizar mais ensaios em todas as amostras repetindo as condições do experimento e um estudo metalógrafo na amostra para entender esse comportamento nesta amostra.
- Após resultados, foi determinado que não existem diferenças estatisticamente significativas entre os resultados obtidos por ambas as abordagens. O aço Hardox 450, teve a maior divergência entre os dois métodos, com 5,2%, enquanto isso, os revestimentos de solda tiveram uma diferença maior, com o FeCrCB 6713 apresentando 22,1% e FeCrC 6710 com 9,79%, estas ligas tem durezas elevadas refletida pelos seus coeficientes de desgaste, o que dificulta a formação de uma fronteira nítida da área de remoção, isso influenciou na delimitação dos pontos de referência para aproximação geométrica.

REFERÊNCIAS

ASTM. ASTM G65-16: Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus. West Conshohocken, 2016.

BIALOBRZESKA, B.; KONAT, Ł. Comparative analysis of abrasive-wear resistance of brinar and hardox steels. Tribologia, v. 272, p. 7–16, 2018.

COLAÇO, F. H. G.; PINTAUDE, G. Wear regimes of Fe–Cr–C hardfacing alloys in microscale abrasion tests. Tribology Letters, v. 70, art. 47, 2022. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11249-022-01590-7. Acesso em: 12 dez. 2025.

CUNHA, M. C. Análise comparativa da resistência ao desgaste abrasivo utilizando um abrasômetro de tambor de revestimentos duros depositados por soldagem de aços Hardox. 2018. 150 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

DURMUŞ, H. et al. Wear performance of Fe-Cr-C-B hardfacing coatings: dry sand/rubber wheel test and ball-on-disc test. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, v. 77, p. 37-43, 2018. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436818304013. Acesso em: 12 dez. 2025.

FERNANDES, D. de J. Desenvolvimento de máquina de ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa. 2019. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

GAHR, K. H. Z. Microestructure and wear of materials. Amsterdam: Elsevier, 1987. 560 p. (Tribology series, 10).

GEE, M. G. et al. Ball cratering or micro-abrasion wear testing of coatings. Teddington: National Physical Laboratory, 2020. (Good Practice Guide, 57). Disponível em: https://www.npl.co.uk/resources/gpgs/ball-cratering-or-micro-abrasion-wear-testing. Acesso em: 12 dez. 2025.

HAWRYLUK, M. et al. Comparative Analysis of the Wear of NC11LV and Hardox 600 Steel Used in Tools for Extrusion of Clay Strands in the Process of Producing Ceramic Roof Tiles. Materials, v. 16, n. 1, art. 293, 2023. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1944/16/1/293. Acesso em: 12 dez. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 26424:2008: Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) — Determination of the abrasion resistance of coatings by a micro-scale abrasion test. Geneva, 2008.

JIAN, Y. et al. Three-body abrasive wear behaviors and mechanism analysis of Fe–B–C cast alloys with various Mn contents. Journal of Materials Research and Technology, v. 14, p. 1301–1311, 2021. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785421006979. Acesso em: 12 dez. 2025.

KIM, J. H. et al. The effect of boron on the abrasive wear behavior of austenitic Fe-based hardfacing alloys. Wear, v. 267, p. 1415–1419, 2009. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164809001872. Acesso em: 12 dez. 2025.

KIRKOVSKA, I. et al. The influence of the third element on nano-mechanical properties of iron borides FeB and Fe_2B formed in Fe–B–X (X = C, Cr, Mn, V, W, Mn + V) alloys. Materials, v. 13, art. 4155, 2020. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32962094/. Acesso em: 12 dez. 2025.

LENTZ, J.; RÖTTGER, A.; THEISEN, W. Microstructures, heat treatment, and properties of boron-alloyed tool steels. Steel Research International, v. 91, art. 1900416, 2020. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/srin.201900416. Acesso em: 12 dez. 2025 .

LENTZ, J.; RÖTTGER, A.; THEISEN, W. Hardness and modulus of Fe_2B, $Fe_3(C,B)$, and $Fe_{23}(C,B)_6$ borides and carboborides in the Fe–C–B system. Materials Characterization, v. 135, p. 192–202, 2017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1044580317310422. Acesso em: 12 dez. 2025.

LOZYNSKYI, V. et al. Prediction of phase composition and mechanical properties Fe–Cr–C–B–Ti–Cu hardfacing alloys: modeling and experimental validations. Heliyon, v. 10, e25199, 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024012301. Acesso em: 12 dez. 2025.

OLIVEIRA, D. L. de. Construção de um equipamento de ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa para análise do desgaste em revestimento duro aplicado por soldagem. 2015. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2015.

PRYSYAZHNYUK, P.; DI TOMMASO, D. The thermodynamic and mechanical properties of Earth-abundant metal ternary boride $Mo_2(Fe,Mn)B_2$ solid solutions for impact- and wear-resistant alloys. Materials Advances, v. 4, p. 3822–3838, 2023. Disponível em: https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2023/ma/d3ma00313b. Acesso em: 12 dez. 2025.

SSAB. Hardox® wear plate, the unrivaled choice for extreme wear challenges. 2025. Disponível em: https://www.ssab.com/en/brands-and-products/hardox. Acesso em: 10 dez. 2025.

XU, R. et al. Rubber wear: history, mechanisms, and perspectives. 2025. Disponível em: https://arxiv.org/abs/2503.19494v1. Acesso em: 12 dez. 2025.

ZEMLIK, M. et al. Comparison of abrasive wear resistance of Hardox steel and Hadfield cast steel. Applied Sciences, v. 14, p. 11141, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3390/app142311141. Acesso em: 12 dez. 2025.

ZEMLIK, M. et al. The influence of grain size on the abrasive wear resistance of Hardox 500 steel. Applied Sciences, v. 14, p. 11490, 2024. Disponível em: https://www.mdpi.com/2076-3417/14/24/11490. Acesso em: 12 dez. 2025.