



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS BLUMENAU
COORDENADORIA ESPECIAL DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Marcos Gabriel Oliveira de Souza

**Avaliação do reuso de areia no Ensaio de Desgaste Abrasivo aplicado ao aço AISI 420
com diferentes durezas**

Blumenau

2025

Marcos Gabriel Oliveira de Souza

**Avaliação do reuso de areia no Ensaio de Desgaste Abrasivo aplicado ao aço AISI 420
com diferentes durezas**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Materiais do Centro ou Campus Blumenau da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel(a) em Engenharia de Materiais.

Orientador(a): Prof. Márcio Roberto da Rocha

Blumenau

2025

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Oliveira de Souza, Marcos Gabriel
Avaliação do reuso de areia no Ensaio de Desgaste
Abrasivo aplicado ao aço AISI 420 com diferentes durezas /
Marcos Gabriel Oliveira de Souza ; orientador, Márcio
Roberto da Rocha, 2025.
81 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau,
Graduação em Engenharia de Materiais, Blumenau, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia de Materiais. 2. Aço inox martensítico 420.
3. Desgaste por abrasão. 4. Norma ASTM G65.. I. Roberto da
Rocha, Márcio . II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia de Materiais. III. Título.

Marcos Gabriel Oliveira de Souza

Avaliação do reuso de areia no Ensaio de Desgaste Abrasivo aplicado ao aço AISI 420 com diferentes durezas.

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de engenheiro de Materiais e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia de Materiais

Blumenau, 10 de dezembro de 2025.

Banca examinadora

[Dotted box for signature]

Prof. Márcio Roberto da Rocha

[Dotted box for signature]

Prof.(a) Daniel Cunha,

Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

[Dotted box for signature]

Prof.(a) Leonardo Ulian Lopes,

Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

[Dotted box for signature]

Aluno: Marcos Gabriel Oliveira de Souza,

Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Blumenau, 2025.

Dedico este trabalho aos meus queridos pais, Marcos Paulo e Maria Elenilza, que sempre foram minha base, meu apoio e minha inspiração. Cada conquista desta trajetória é reflexo do cuidado e da dedicação de vocês.

AGRADECIMENTOS

Ao longo desta jornada, muitas pessoas contribuíram para que este momento se tornasse realidade.

Expresso minha gratidão à UFSC e aos professores, pelo conhecimento transmitido, pelas oportunidades oferecidas, pelas reflexões provocadas e pela qualidade do ensino que recebi.

Agradeço profundamente à minha família, meus pais, Marcos Paulo e Maria Elenilza, e minha irmã, Maria Gabrielly por serem a base de tudo. Viemos juntos de Manaus sem nada, enfrentamos altos e baixos, desafios e incertezas, sempre unidos e guiados pelo amor, pelo apoio incondicional e pela força que encontramos uns nos outros. Foi essa união que me sustentou e tornou possível chegar até aqui, formando-me hoje em Engenharia.

À minha noiva, Ágata Freitas, expresso minha profunda gratidão por tê-la em minha vida. Obrigado pelo carinho, pela paciência, pela parceria inabalável e por estar ao meu lado em cada etapa desta caminhada.

Manifesto também minha sincera gratidão ao meu orientador, Prof. Márcio Roberto da Rocha, pela confiança, pela dedicação e pelas valiosas orientações ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Estendo meus agradecimentos à equipe do Laboratório de Materiais — Daniel, Michael, Atos e Gustavo pelas orientações, pela paciência e por toda a ajuda recebida ao longo do tempo.

Agradeço ainda aos meus sogros, Rosane e André, e às minhas cunhadas, Janine, Iasmin e Natasha, pelo apoio, acolhimento, incentivo e carinho constantes.

Registro também meu carinho e gratidão às minhas amigas Fernanda Capoani, cujo companheirismo foi tão grande que se tornou também minha sócia e Luiza Coan, minha parceira ao longo do curso, pela amizade, apoio, presença e colaboração que tanto significaram durante esta trajetória.

Por fim, deixo meu reconhecimento a todos que estiveram presentes nessa caminhada. Minha sincera gratidão

“Caminhamos com pouco, mas carregávamos tudo: a força do amor, o silêncio dos sacrifícios e a esperança que acendia nossos passos.”
(Freitas, 2025)

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade de reutilização da areia de sílica em ensaios de abrasão do tipo areia em roda de borracha, conforme a norma ASTM G65, para verificar o número máximo de reutilizações sem comprometer a confiabilidade dos resultados. Também se investigou a influência da dureza do aço inox martensítico AISI 420 sobre o desgaste, utilizando corpos de prova com duas durezas diferentes e estes seriam sensíveis ao reuso da areia. Os ensaios foram conduzidos em laboratório, reutilizando a mesma areia em ciclos consecutivos, permitindo analisar alterações na morfologia e distribuição de tamanho das partículas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), granulometria por peneiramento, presença de fraturas e alterações na pista de ensaio. Os efeitos da reutilização foram correlacionados com os resultados de perda de massa dos corpos de prova, rugosidade da superfície e dureza, identificando o ponto em que a eficácia do abrasivo se tornava insuficiente. A pesquisa forneceu critérios objetivos para a definição do limite de reutilizações da areia, apresentando uma perspectiva integrada entre desempenho do material, confiabilidade dos resultados e comportamento do abrasivo em ensaios tribológicos.

Palavras-Chave: Aço inox martensítico 420; Desgaste por abrasão; Norma ASTM G65.

ABSTRACT

This work aimed to evaluate the feasibility of reusing silica sand in rubber wheel abrasion tests, according to ASTM G65, determining the maximum number of reuses without compromising the reliability of the results. The influence of the hardness of martensitic stainless steel AISI 420 on wear was also investigated, using specimens with two different hardness levels. The tests were performed in the laboratory, reusing the same sand in consecutive cycles, allowing the analysis of changes in grain morphology by scanning electron microscopy (SEM), particle size distribution by sieving, grain fracture, and wear track alterations. The effects of sand reuse were correlated with mass loss of the specimens, surface roughness, and hardness, identifying the point at which the abrasive efficiency became insufficient. The study provided objective criteria for defining the sand's reuse limit, offering an integrated perspective on material performance, test reliability, and abrasive behavior in tribological assays.

Keywords: Martensitic stainless steel 420; Abrasive wear; ASTM G65 standard.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Percentual de tipos de desgastes.....	21
Figura 2 – Desgaste abrasivo de dois corpos	23
Figura 3 – Característica do movimento dos grãos no desgaste de três corpos	24
Figura 4 – Rolamento da partícula entre as superfícies.....	34
Figura 5 – Representação do corte das amostras.	41
Figura 6 – Microestrutura do Aço inox 420 após tempera a 1038°C. Ampliação de 500x	43
Figura 7 – Microestrutura do Aço inox 420 após tempera a 998°C. Ampliação de 500x.	43
Figura 8 – Vista frontal da máquina de abrasão por roda de borracha conforme ASTM G65.....	50
Figura 9 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).	52
Figura 10 – Preparação da amostra para Metalização.....	52
Figura 11 – Variação da perda de massa do aço inoxidável martensítico 420 temperado a 1038°C e a 998°C, em função do número de reutilizações do abrasivo de sílica no ensaio de desgaste abrasivo	54
Figura 12 – Morfologia da areia em estado de recebimento registrada por MEV (30× 200x).	58
Figura 13 – Morfologia da areia após a primeira reutilização, para a amostra tratada a 1038°C x 998°C, registrada por MEV (35×).	60
Figura 14 – Morfologia da areia após a terceira reutilização, para a amostra tratada a 1038°C x 998°C, registrada por MEV (35×).	60
Figura 15 – Morfologia da areia após a quinta reutilização, para a amostra tratada a 1038°C x 998°C, registrada por MEV (35×).	60
Figura 16 – Morfologia da areia após a décima reutilização, para a amostra tratada a 1038°C x 998°C, registrada por MEV (35×).	61
Figura 17 - Mudança granulométrica da areia para os ciclos mais impactantes A 998°c (1 ^a ,3 ^a ,5 ^a e 10 ^a)	66
Figura 18 - Mudança granulométrica da areia para os ciclos mais impactantes A 1038°c (1 ^a ,3 ^a ,5 ^a e 10 ^a)	66
Figura 19 – Morfologia do centro da pista, após o primeiro ensaio para a amostra tratada a 1038°C x 998°C, registrada pelo MEV (1000x).....	70

Figura 20 – Morfologia do centro da pista, após o terceiro ensaio para a amostra tratada a 1038°C x 998°C, registrada pelo MEV (1000x).....	70
Figura 20 – Morfologia do centro da pista, após o quinto ensaio para a amostra tratada a 1038°C x 998°C, registrada pelo MEV (1000x).....	71
Figura 20 – Morfologia do centro da pista, após o décimo ensaio para a amostra tratada a 1038°C x 998°C, registrada pelo MEV (1000x).....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades da areia de sílica.....	27
Tabela 2 – Propriedades dos abrasivos.....	28
Tabela 3 – Tabela de interação do abrasivo com os materiais	39
Tabela 4 – Custos dos abrasivos mais comuns.....	40
Tabela 5 - Composição química típica do aço inoxidável AISI 420	45
Tabela 6 – Dureza das amostras tratadas a 1038°C e a 998°C.....	47
Tabela 7 - Tabela para areia nova conforme ABIFA CEMP 081.....	48
Tabela 8 - Variação do percentual de perda de massa das peças tratadas a 1038°C.	55
Tabela 9 - Variação do percentual de perda de massa das peças tratadas a 998°C.	55
Tabela 10 – Comparação da distribuição granulométrica em AFS (Módulo de finura).	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Área da partícula
Ai	Inteligência Artificial
B	Ângulo de inclinação formado pela partícula em relação ao plano
D	Dimensão
Ed	Energia de Desgaste
F	Fator de forma
F	Força normal aplicada
H	Dureza do material da superfície
h	Espaçamento
K	Coefficiente de desgaste
L	Distância percorrida
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MF	Módulo de finura, em AFS
n	Eficiência de conversão do trabalho em desgaste
P	Perímetro da partícula
V	Volume de material removido
Wabrasivo	Trabalho realizado pelo abrasivo
ΣP	Somatória dos produtos
ΣRP	Somatória da retenção em porcentagens

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVO.....	17
1.1.1 Objetivos gerais.....	17
1.1.2 Objetivos específicos.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 TRIBOLOGIA: FUNDAMENTOS, ESCOPO E RELEVÂNCIA.....	18
2.2 DESGASTE	19
2.3 DESGASTE ABRASIVO EM COMPONENTES METÁLICOS: PERSPECTIVA NACIONAL.....	19
2.4 TIPOS DE DESGASTE ABRASIVO	20
2.4.1 Desgaste Abrasivo de Dois Corpos	21
2.4.2 Desgaste Abrasivo de Três Corpos	23
2.5 TIPOS DE ABRASIVOS E SUAS INTERAÇÕES COM O AÇO	25
2.5.1 PROPRIEDADES DA SÍLICA (SiO ₂)	26
2.5.2 Granulometria.....	27
2.5.3 Grau de Abrasão	28
2.5.4 Teoria de Archard para o Desgaste Abrasivo.....	29
2.6 FATOR DE FORMA E DINÂMICA DAS PARTÍCULAS	32
2.7 VARIÁVEIS QUE AFETAM O DESGASTE ABRASIVO	35
2.8 ENSAIO DE ABRASÃO POR RODA DE BORRACHA.....	36
3 MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	41
3.2 DUREZA E MICRODUREZA DO INOX 420	45
3.3 CARACTERIZAÇÃO DA AREIA NOVA	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5 CONCLUSÃO	75
REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

O desgaste abrasivo é um dos principais mecanismos de falha em componentes metálicos utilizados em ambientes industriais severos. Processos que envolvem atrito e partículas duras em movimento relativo, como nos sistemas de bombeamento e válvulas das indústrias petroquímica e de mineração, impõem condições de operação que demandam materiais de elevada resistência mecânica e estabilidade superficial. Para que o desgaste abrasivo ocorra, é necessário considerar diversos fatores relacionados às características das superfícies em contato. No caso do desgaste por dois corpos, o principal fator determinante é a rugosidade das superfícies, uma vez que as asperezas influenciam diretamente a remoção de material. Já na abrasão por três corpos, em que partículas sólidas atuam como elementos intermediários entre as superfícies, o fator de forma das partículas, assim como seu tamanho e dureza, exerce papel fundamental na intensidade e no mecanismo de desgaste.

Entre os materiais comumente empregados nessas aplicações, destaca-se o aço inoxidável martensítico 420, que combina boa resistência à corrosão com propriedades mecânicas superiores após tratamentos térmicos específicos, como têmpera e revenimento.

Segundo Paiva e Pinedo (2025), o comportamento tribológico do aço inoxidável martensítico está diretamente associado à sua microestrutura, a qual pode ser controlada por meio de ajustes na temperatura de austenitização e na taxa de resfriamento. Esses autores apontam que variações no tratamento térmico afetam significativamente a dureza e a resistência ao desgaste do material, influenciando sua adequação para aplicações sob condições abrasivas intensas. Dessa forma, o estudo de amostras tratadas em duas temperaturas distintas, para gerar diferentes padrões de microestrutura e dureza, nos permite ver o efeito sobre a análise da reutilização da areia em cenários distintos de condições de desgaste.

Paralelamente à busca por desempenho mecânico superior, há uma crescente preocupação com a sustentabilidade dos processos metalúrgicos, especialmente quanto ao manejo e à destinação dos resíduos sólidos gerados durante ensaios e processos de desgaste abrasivo. O material abrasivo

comumente utilizado — como a areia de sílica padronizada — sofre degradação ao longo dos ensaios, resultando em resíduos finos que, se descartados de forma inadequada, podem causar impactos ambientais relevantes, como a contaminação de solos e cursos d'água.

De acordo com Menegotti e Dias (2025), a adoção de práticas baseadas nos princípios da economia circular representa uma alternativa viável e necessária para a indústria metalúrgica moderna. A reutilização e o reaproveitamento de materiais residuais não apenas reduzem o consumo de recursos naturais, mas também minimizam a geração de resíduos e os custos associados ao seu descarte. Nesse contexto, a reutilização da areia abrasiva proveniente de ensaios de desgaste apresenta-se como uma oportunidade de aliar eficiência experimental e responsabilidade ambiental, desde que a qualidade e a eficácia do abrasivo reaproveitado sejam devidamente avaliadas.

De acordo com as normas aplicáveis ao ensaio de desgaste com roda de borracha, recomenda-se a utilização de aproximadamente 20 kg de abrasivo por sequência de ensaio, garantindo assim a repetibilidade e a estabilidade das condições de abrasão. Entretanto, os resultados obtidos neste estudo demonstram que a reutilização controlada da areia, quando respeitados os limites de degradação granulométrica e de perda de massa, não compromete a confiabilidade do ensaio. Dessa forma, torna-se possível reduzir significativamente o consumo total de abrasivo, resultando em uma economia monetária relevante quando comparada ao procedimento tradicional de uso único. Essa prática apresenta-se como uma alternativa viável e sustentável, especialmente em rotinas laboratoriais de alta demanda.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivos gerais

Avaliar o efeito da reutilização da areia abrasiva no ensaio de desgaste por roda de borracha (ASTM G65), investigando as alterações físicas, granulométricas e morfológicas decorrentes de múltiplos ciclos de uso. Como forma de validação desses efeitos, analisar se e como a reutilização do abrasivo influencia os resultados de desgaste em amostras de aço inoxidável martensítico AISI 420 submetidas a dois níveis distintos de dureza.

1.1.2 Objetivos específicos

- Submeter as amostras ao ensaio de desgaste abrasivo por roda de borracha e areia de sílica (ASTM G65), quantificando a perda de massa e calculando a taxa de desgaste.
- Realizar o tratamento térmico de têmpera do aço inoxidável 420 em duas temperaturas (998 °C e 1038 °C), seguido de caracterização microestrutural e mecânica.
- Avaliar as mudanças ocorridas na areia abrasiva após os ensaios, por meio de granulometria e microscopia.
- Discutir a viabilidade do reaproveitamento do abrasivo em novos ensaios ou em aplicações alternativas, considerando critérios técnicos e ambientais
- Caracterizar as amostras por microscopia óptica, dureza Rockwell e microdureza Vickers, estabelecendo correlação entre microestrutura e dureza.
- Analisar os mecanismos de desgaste predominantes por meio da observação das superfícies ensaiadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TRIBOLOGIA: FUNDAMENTOS, ESCOPO E RELEVÂNCIA

A tribologia é a ciência que estuda a interação de superfícies em movimento relativo, envolvendo os fenômenos de atrito, desgaste e lubrificação (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). O termo tem origem no grego *tribos* (“esfregar, friccionar”) e foi oficialmente cunhado por Sir Peter Jost na década de 1960, em um relatório que destacou os elevados custos econômicos associados a perdas por atrito, desgaste e corrosão (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2014).

Dentro de um tribossistema, entende-se que o comportamento tribológico não é uma simples propriedade de material, mas sim uma resposta do conjunto que envolve as superfícies em contato, o meio lubrificante (quando presente), além das condições de carga, velocidade, temperatura e ambiente (ASM INTERNATIONAL, 1992).

Entre os componentes centrais da tribologia estão o atrito, caracterizado como a força que se opõe ao movimento relativo entre superfícies; o desgaste, entendido como a perda ou deslocamento de material superficial em razão de interações mecânicas, químicas ou físico-químicas; e a lubrificação, que consiste na introdução de um meio sólido, líquido ou gasoso para reduzir o contato direto entre superfícies, diminuindo o atrito e aumentando a vida útil dos componentes (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Esses três elementos interagem de maneira complexa, visto que a lubrificação pode alterar o regime de atrito e minimizar o desgaste, dependendo diretamente de fatores como carga, velocidade e viscosidade do lubrificante (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2014).

A importância da tribologia é evidenciada pelo seu impacto no desempenho, durabilidade e eficiência de sistemas mecânicos. Estima-se que uma parte significativa da energia consumida na indústria seja dissipada por atrito e desgaste, representando custos elevados e redução de produtividade. A aplicação de princípios tribológicos permite aumentar a vida útil de componentes, reduzir custos de manutenção, diminuir o consumo energético e minimizar falhas prematuras. Além disso, por envolver fundamentos de mecânica, ciência dos materiais, química, física e engenharia de superfícies, a tribologia constitui um campo essencialmente multidisciplinar, fornecendo base para a compreensão do

desgaste e para aplicações práticas em diferentes setores industriais (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017; STACHOWIAK; BATCHELOR, 2014).

2.2 DESGASTE

O desgaste é um dos principais fenômenos de degradação de materiais, caracterizado pela perda progressiva de material da superfície sólida em decorrência de interações mecânicas, químicas ou físico-químicas com o meio ou com outros corpos. Esse processo está diretamente relacionado à vida útil de componentes e equipamentos, sendo fator determinante para custos de manutenção, substituição de peças e eficiência operacional (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

De modo geral, o desgaste pode ser classificado em diferentes mecanismos, como abrasivo, adesivo, corrosivo e fadiga superficial. O desgaste abrasivo, em especial, ocorre quando partículas duras ou protuberâncias asperizam a superfície de um material, promovendo corte ou deformação plástica. Esse mecanismo está intimamente relacionado ao uso e reaproveitamento de materiais particulados, como resíduos de areia, que podem atuar como agentes abrasivos em sistemas industriais (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2014).

2.3 DESGASTE ABRASIVO EM COMPONENTES METÁLICOS: PERSPECTIVA NACIONAL

O desgaste abrasivo é um dos principais modos de falha em componentes metálicos utilizados em ambientes industriais severos, como mineração, perfuração, transporte de partículas e sistemas hidráulicos contaminados. Esse fenômeno ocorre quando partículas duras — livres ou fixas — deslizam ou impactam contra a superfície de um material, promovendo a remoção progressiva de massa. A severidade do desgaste depende tanto das características do abrasivo quanto das propriedades do material base, como dureza, tenacidade, microestrutura e presença de fases duras (HUTCHINGS, 1992).

No Brasil, esse tipo de desgaste é especialmente relevante na indústria de mineração, setor que representa cerca de 5% do PIB nacional e cuja

eficiência operacional depende diretamente da durabilidade dos equipamentos. Nesse contexto, estudos como o de Scopel (2017) tornam-se fundamentais ao investigar materiais com melhor desempenho em condições severas. O autor analisou o comportamento do aço ASTM 4140 após diferentes tratamentos térmicos e observou que o revenimento a 350 °C proporciona maior resistência ao desgaste abrasivo devido à formação de uma microestrutura mais dura e homogênea. Essa melhoria é particularmente importante porque esse tipo de aço é amplamente empregado em componentes críticos, como os dentes de conchas de escavadeiras hidráulicas, que estão entre os elementos mais expostos à abrasão durante o carregamento de rochas.

Outro por Araújo (2022) avaliou o desgaste abrasivo em tubulações de rejeito de mineração de ferro, utilizando a norma ASTM G75. A pesquisa demonstrou que a geometria das partículas abrasivas e a velocidade de transporte influenciam diretamente na taxa de perda de massa dos dutos em polietileno de alta densidade (PEAD), afetando sua vida útil e exigindo estratégias de monitoramento e manutenção preventiva.

Trabalhos como o de Silva (2021), no CEFET-MG, investigaram revestimentos metálicos aplicados por soldagem em equipamentos de mineração. Os ensaios de abrasão segundo a norma ASTM G65 revelaram que ligas hardfacing ricas em cromo apresentam excelente resistência ao desgaste, embora possam ser suscetíveis a trincas em ambientes com impacto. A escolha adequada do revestimento, portanto, deve considerar não apenas a dureza, mas também a tenacidade e o tipo de esforço envolvido.

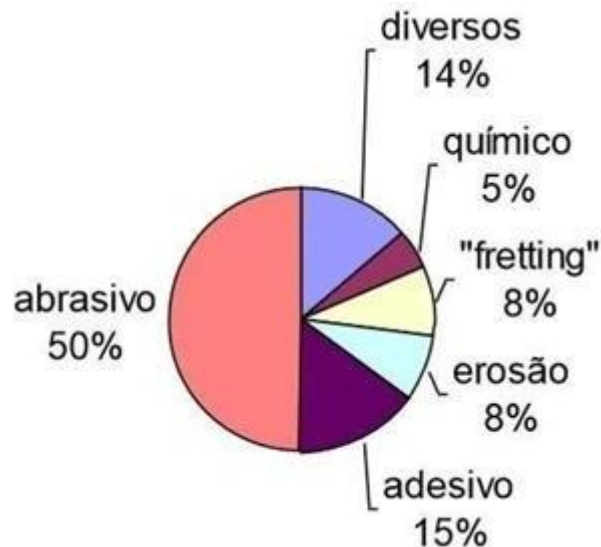
Esses estudos complementam os fundamentos clássicos de Hutchings (1992), oferecendo uma visão aplicada às condições industriais e reforçando a importância da caracterização dos mecanismos de desgaste para a seleção e desenvolvimento de materiais mais duráveis.

2.4 TIPOS DE DESGASTE ABRASIVO

A classificação dos tipos de desgaste abrasivo é fundamental para compreender os diferentes mecanismos envolvidos no processo de desgaste e para orientar a escolha adequada de materiais resistentes em aplicações industriais. Essa categorização permite diferenciar os modos de ação das

partículas abrasivas, como o desgaste por corte, arranhamento e fragmentação, possibilitando o desenvolvimento de estratégias específicas para minimizar perdas e aumentar a durabilidade dos componentes, a Figura 1 nos mostra um gráfico apresentado no Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração por Maxsuell (2003). Esses dados nos mostram a importância do estudo em relação aos materiais abrasivos.

Figura 1 - Percentual de tipos de desgastes.



Fonte: Adaptado de GONÇALVES, *et.al.*, 2003.

2.4.1 Desgaste Abrasivo de Dois Corpos

O desgaste abrasivo de dois corpos ocorre quando dois materiais sólidos entram em contato direto sob pressão e movimento relativo, resultando na remoção de material de uma das superfícies, geralmente a menos resistente. Ao contrário do desgaste de três corpos, em que partículas soltas atuam como meio abrasivo entre duas superfícies, o mecanismo de dois corpos envolve contato direto, em que uma superfície atua como abrasiva sobre a outra (Silva *et al.*, 2021).

Esse tipo de desgaste é frequentemente observado em engrenagens, ferramentas de corte, pistões e superfícies deslizantes, onde existe atrito direto entre componentes metálicos ou entre metal e material compósito (Moreira *et al.*, 2020). O mecanismo predominante pode variar entre microcorte, microfissuramento, adesão local e até plastificação superficial, dependendo das

condições de carga, velocidade, rugosidade e propriedades mecânicas dos materiais envolvidos (Araújo *et al.*, 2022).

A severidade do desgaste de dois corpos está diretamente relacionada à dureza relativa entre os materiais, bem como à presença de irregularidades ou asperezas proeminentes na superfície abrasiva. Estudos recentes mostraram que materiais com maior tenacidade e dureza superficial tendem a apresentar melhor resistência ao desgaste, especialmente quando combinados com tratamentos térmicos ou revestimentos superficiais (Oliveira *et al.*, 2021).

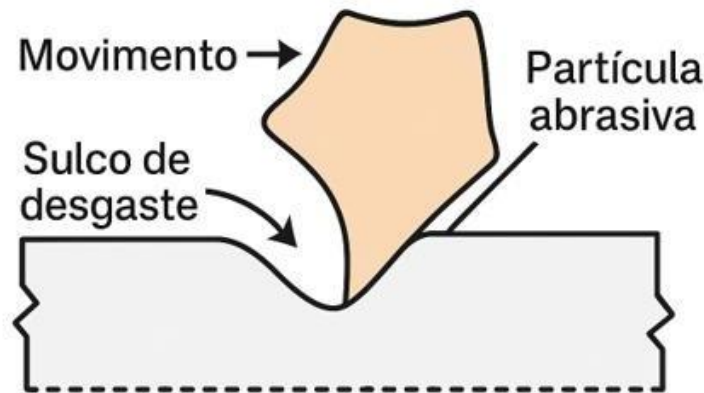
Além disso, o padrão de desgaste pode ser influenciado por fatores como temperatura de operação, lubrificação, umidade relativa do ar e até mesmo pela orientação dos grãos da microestrutura do material (Rodrigues *et al.*, 2023). Ensaio padronizados como o pino sobre disco são amplamente utilizados para avaliar o comportamento tribológico de superfícies sob condições controladas de dois corpos.

O estudo de Moreira *et al.*, (2020) investigou o comportamento de aços endurecidos em contato com cerâmicas técnicas, evidenciando que o desgaste ocorre primariamente por microcorte quando a cerâmica apresenta pontas afiadas. Já em contextos em que ambos os materiais têm dureza semelhante, ocorre desgaste mútuo com formação de óxidos triboquímicos. Em pesquisa mais recente, Rodrigues *et al.* (2023) analisaram revestimentos aplicados via HVOF e verificaram redução de até 60% no volume de desgaste em relação ao substrato não revestido.

Este tipo de desgaste é considerado mais severo, pois há maior concentração de energia por área de contato conforme a Figura 2 pode-se ver esquematizado o desgaste entre dois corpos.

Figura 2 - Desgaste abrasivo de dois corpos.

Desgaste Abrasivo de Dois corpos



Fonte: elaborado pelo autor

Características: abrasão localizada, maior profundidade de corte, desgaste mais previsível conforme ilustrado na Figura 2.

2.4.2 Desgaste Abrasivo de Três Corpos

O desgaste abrasivo de três corpos ocorre quando partículas soltas atuam como meio abrasivo entre duas superfícies em movimento relativo, de modo que o desgaste envolve tanto a superfície abrasiva (as partículas) quanto as superfícies em contato, com partículas se movendo livremente, rolando ou sendo arrastadas, causando microcorte, arranhões, fragmentações e fadiga superficial (Li *et al.*, 2023). Esse mecanismo é comum em aplicações onde há transporte de material sólido ou uso de abrasivo solto, como em forros de moinhos, revestimentos de máquinas de esmagamento, transporte de sedimentos em polpas minerais, ou no uso de abrasivos durante processos industriais (Hu *et al.*, 2022; Yuan *et al.*, 2022).

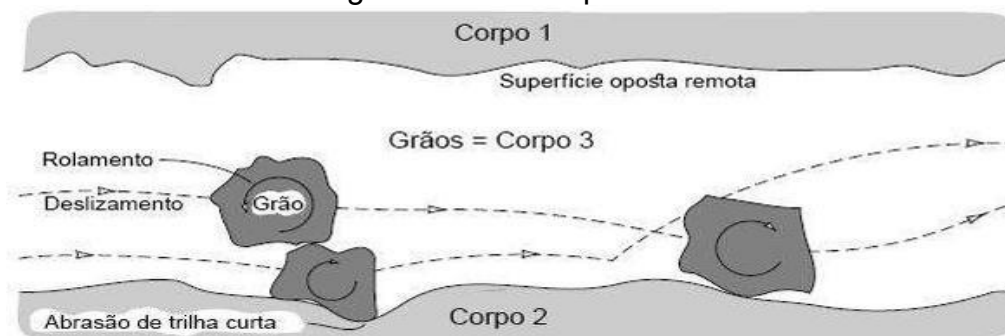
Estudos recentes demonstram que o desempenho de materiais sujeitos ao desgaste de três corpos depende fortemente da fração de partículas duras, tamanho das partículas, sua forma, velocidade de deslizamento ou rolamento, bem como das propriedades físicas do material base – dureza, tenacidade, microestrutura e a distribuição de fases reforçadas, isto é, a forma como partículas duras (como carbonetos, nitretos ou intermetálicos) se dispersam na matriz metálica. Uma distribuição mais homogênea e bem dispersa dessas fases

favorece maior resistência ao desgaste, enquanto distribuições irregulares criam regiões frágeis suscetíveis à microfratura e ao sulcamento (Hu *et al.*, 2022; Purba *et al.*, 2023). Por exemplo, o revestimento WC-10Cr₃C₂-12Ni para placas de desgaste de moinho apresentou significativa resistência ao desgaste abrasivo de três corpos, destacando que partículas mais duras e alta dureza do revestimento reduzem a taxa de desgaste (Hu *et al.*, 2022). Em outro estudo, ligas fundidas multicomponentes com altas quantidades de Cr, V, Mo, W e Co mostraram que o acréscimo de Ti melhora a fração de carbonetos, o que eleva a resistência ao desgaste de três corpos, desde que não haja excesso que fragilize as partículas de carboneto ou prejudique a coesão (Purba; Shimizu; Kusumoto, 2023).

Além disso, o desgaste de três corpos pode envolver modos combinados de remoção de material: microcorte pelas partículas, arranhões, impacto intermitente, esmagamento/fragmentação das partículas abrasivas, e abrasão mecânica causada por partículas soltas. Em casos de ambientes com abrasivo úmido ou com mistura de fluido (slurry), a lubrificação ou a presença de fluido pode alterar o comportamento, reduzindo ou modificando os mecanismos dominantes do desgaste (Li *et al.*, 2023).

Portanto, para engenharia de materiais, é fundamental considerar não só a dureza do corpo de prova, mas também a qualidade, o tipo e a história das partículas abrasivas, assim como variáveis operacionais como velocidade, carga, distância de deslizamento para projetar componentes com robustez adequada frente a desgaste abrasivo de três corpos, na Figura 3 tem-se esquematizado o sistema do desgaste abrasivo de três corpos.

Figura 3 – Característica do movimento dos grãos no desgaste de três corpos.



Adaptado de STACHOWIAK (1993), apud BANDEIRA, F. M. (2017).

Exemplo prático: bolas de moinho, sistemas de transporte pneumático. Características: abrasão difusa, menor profundidade de corte, desgaste menos previsível.

2.5 TIPOS DE ABRASIVOS E SUAS INTERAÇÕES COM O AÇO

Os abrasivos mais utilizados em ensaios laboratoriais e aplicações industriais incluem o óxido de alumínio (Al_2O_3), a sílica (SiO_2), o carbetto de silício (SiC) e, em casos mais específicos, o zircônio (ZrO_2) e o diamante sintético. Cada um desses abrasivos apresenta características próprias de dureza, morfologia, tenacidade e comportamento sob impacto, que influenciam diretamente os mecanismos de desgaste induzidos nos materiais metálicos, em especial os aços (Souza *et al.*, 2023).

A sílica, utilizada no presente estudo, possui dureza intermediária, variando entre 1000 e 1200 HV, dependendo de sua forma (amorfa ou cristalina), além de apresentar morfologia irregular. Essa combinação favorece o mecanismo de microcorte superficial, especialmente quando as partículas impactam sob ângulos rasos. Por outro lado, abrasivos como o Al_2O_3 e o SiC apresentam durezas superiores (cerca de 1800 HV e 2500 HV, respectivamente), sendo capazes de promover remoções volumétricas mais agressivas, como fraturas por tração e deformações severas, sobretudo em materiais com microestrutura frágil ou presença de descontinuidades (Silva; Oliveira; Pinedo, 2022).

Além da dureza, a forma e o tamanho das partículas abrasivas são determinantes nos modos de desgaste. Grãos angulosos ou com arestas vivas geram cortes mais profundos e localizados, contribuindo para perda de material por cisalhamento superficial. Em contraste, partículas arredondadas ou esféricas atuam predominantemente por deformação plástica e fadiga superficial, especialmente em ciclos prolongados ou sob baixas cargas (Alves *et al.*, 2021). Ensaios com diferentes granulometrias demonstraram que partículas menores tendem a induzir desgaste por polimento ou micro cavitação, enquanto partículas maiores intensificam a ação erosiva.

O aço 420, quando adequadamente tratado termicamente, apresenta uma matriz martensítica com carbonetos de cromo finamente distribuídos, conferindo-

lhe elevada dureza (superior a 500 HV) e resistência ao desgaste por abrasão moderada. No entanto, se o revenimento for inadequado, o material pode tornar-se excessivamente frágil ou apresentar tensões residuais que favorecem a nucleação de trincas (Pinedo, 2025).

Estudos recentes mostraram que a resposta do aço 420 frente a diferentes abrasivos depende não apenas da dureza relativa entre material e abrasivo, mas também da estabilidade térmica da fase martensítica, da distribuição dos carbonetos e da espessura da camada endurecida. Por exemplo, em testes com sílica, verificou-se que o aço temperado e revenido de forma otimizada apresentou até 30% menos perda de massa em comparação com amostras apenas temperadas, o que evidencia o papel do revenimento na redistribuição de tensões e na coalescência de carbonetos (Souza *et al.*, 2023).

Compreender as interações entre tipos de abrasivos e os substratos metálicos é essencial para o desenvolvimento de materiais e tratamentos que maximizem a resistência ao desgaste, especialmente em ambientes industriais onde diferentes tipos de partículas estão em constante interação com superfícies metálicas críticas.

2.5.1 PROPRIEDADES DA SÍLICA (SiO₂)

A sílica (SiO₂) é amplamente utilizada como abrasivo em diversos processos industriais devido às suas propriedades físicas e químicas, destacando-se pela alta dureza e resistência química. Na aplicação específica em ensaios abrasivos com roda de borracha, a granulometria e o grau de abrasão da sílica são fatores determinantes para a eficiência do desgaste e repetibilidade dos resultados, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades da areia de sílica.

Propriedade	Descrição / Valor típico	Relevância para o ensaio
Fase cristalina	Quartzo	Determina dureza e comportamento de fratura.
Dureza (escala Mohs)	7	Alta dureza garante capacidade abrasiva consistente.
Densidade	2,65 g/cm ³	Influencia a energia de impacto das partículas durante o ensaio.
Granulometria típica utilizada	150–250 µm (malha 60–100)	Faixa que fornece bom equilíbrio entre remoção de material e estabilidade do leito abrasivo.
Forma das partículas	Predominantemente angulosa (quartzo triturado)	A angularidade aumenta a agressividade no corte.
Resistência química	Alta, especialmente a ácidos	Garante estabilidade e baixa alteração química ao longo dos ciclos.
Mecanismo de desgaste predominante	Microfratura frágil e arredondamento progressivo	Relacionado ao desgaste observado nas imagens de MEV.
Tendência de geração de finos	Moderada/alta após múltiplos ciclos	Afeta a eficiência abrasiva e altera a distribuição granulométrica.
Estabilidade térmica	Até ~1000 °C	As condições de ensaio não afetam quimicamente a sílica.

Adaptado de HUTCHINGS, I. M. (2017)

2.5.2 Granulometria

A granulometria da sílica empregada em ensaios abrasivos normalmente varia entre 150 µm e 600 µm (aproximadamente 100 a 40 mesh), sendo esta faixa adequada para gerar abrasão controlada e uniforme na superfície testada. A distribuição granulométrica influencia diretamente o comportamento abrasivo, pois partículas maiores podem causar maior desgaste por impacto, enquanto partículas menores tendem a promover um desgaste mais uniforme e contínuo.

2.5.3 Grau de Abrasão

O grau de abrasão da sílica está intimamente relacionado à sua dureza, medida na escala de Mohs entre 6 e 7, o que a torna um abrasivo eficaz para materiais de dureza inferior ou similar. Além disso, a estrutura cristalina da sílica (quartzo) proporciona alta resistência ao desgaste, mantendo a integridade das partículas durante o processo abrasivo. Em ensaios com roda de borracha, a abrasividade da sílica contribui para simular condições reais de desgaste, especialmente em superfícies metálicas e compostos poliméricos, na Tabela 2 pode-se ver propriedades da areia de sílica em comparação a outros abrasivos comuns.

Tabela 2 - Propriedades dos abrasivos

Propriedade	Sílica (SiO ₂)	Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	Carboneto de Silício (SiC)	Granadas (Garnet)
Dureza (Mohs)	6 – 7	9	9,5	7 – 8
Densidade (g/cm ³)	2,2 – 2,65	3,95 – 4,05	3,2 – 3,3	3,9 – 4,1
Forma das partículas	Angular	Angular	Angular	Angular
Resistência química	Alta	Alta	Alta	Alta
Custo	Baixo	Médio	Alto	Médio
Aplicações típicas	Jateamento, polimento, filtração	Jateamento, polimento, revestimentos	Jateamento, polimento, revestimentos	Jateamento, polimento, filtração

Fonte: elaborado pelo autor.

A sílica é quimicamente estável e resistente à maioria dos agentes químicos, o que a torna adequada para ensaios que envolvem ambientes corrosivos ou contaminantes. A densidade da sílica varia entre 2,2 e 2,65 g/cm³, dependendo da forma cristalina (quartzo, tridimita, cristobalita), e sua dureza confere resistência ao desgaste da partícula, garantindo longevidade no uso abrasivo. Além disso, a sílica apresenta baixa absorção de água, o que evita alterações no comportamento abrasivo em condições ambientais variadas.

2.5.4 Teoria de Archard para o Desgaste Abrasivo

A teoria mais utilizada para quantificar o desgaste abrasivo é a Lei de Archard (1953), que relaciona o volume de material removido com a força aplicada, distância percorrida e dureza do material desgastado.

A equação é dada por:

$$V = \frac{K.F.L}{H} \quad (1)$$

onde:

- V = volume de material removido (mm³)
- K = coeficiente de desgaste (adimensional), que depende do sistema abrasivo
- F = força normal aplicada (N)
- L = distância de deslizamento (m)
- H = dureza do material da superfície (Pa)

Esse modelo mostra que o desgaste é diretamente proporcional à carga e distância e inversamente proporcional à dureza do material.

Fatores que influenciam o Coeficiente de Desgaste K

- Características do abrasivo (dureza, tamanho, forma)
- Propriedades do material da superfície (microestrutura, dureza)
- Condições ambientais (temperatura, umidade)
- Tipo de contato (deslizamento, impacto)
- Energia e Trabalho no Desgaste Abrasivo

Outra abordagem teórica considera o desgaste como a energia necessária para

remover material. Segundo estudos recentes, a energia de desgaste pode ser expressa como:

$$Ed = W_{abrasivo} * n \quad (2)$$

onde:

- $W_{abrasivo}$ = trabalho realizado pelo abrasivo
- n = eficiência de conversão do trabalho em desgaste (variável do sistema)
-

Essa perspectiva permite analisar o desgaste com base na termodinâmica e mecânica dos materiais.

Outros princípios que são interessantes serem mencionados são a Teoria de Degradação Abrasiva, ou também chamada Fragmentação progressiva, que diz que o uso repetido em testes abrasivos, os grãos de areia (sílica) sofrem desgaste por fratura ou arredondamento das bordas, modificando suas características mecânicas e morfológicas. Isso afeta diretamente o mecanismo de corte e o volume de desgaste produzido.

A teoria da fragmentação progressiva considera que a eficiência abrasiva decai à medida que as partículas perdem sua geometria padrão. O trabalho de Hutchings e Shipway (2017) explica que partículas angulares promovem mais desgaste do que partículas arredondadas ou fraturadas. Logo após determinado número de ciclos, a areia reutilizada pode continuar sendo usada, desde que mantenha a forma angular e granulometria adequada, podendo inclusive ser classificada e peneirada para remoção de finos.

A Teoria da Eficiência abrasiva reduzida

A eficiência abrasiva (η) representa a proporção da energia de atrito convertida efetivamente em remoção de material. Com o desgaste do abrasivo, essa eficiência tende a cair:

$$\eta = \frac{V}{F \cdot L} \quad (3)$$

Onde:

- V = volume removido
- F = força normal
- L = distância percorrida

Com a degradação da areia, η tende a diminuir, mas pode ser monitorada experimentalmente. Se os valores permanecerem dentro de uma faixa aceitável, o reaproveitamento é viável, reduzindo custos e impactos ambientais.

Alguns estudos (ex.: Liu *et al.*, 2024) indicam que após 2–3 ciclos de uso, os abrasivos sofrem uma degradação inicial, mas depois estabilizam em uma nova condição de trabalho, com variação controlada no volume de desgaste. Essa estabilização pode ser explorada para estabelecer protocolos de reutilização controlada.

Outro conceito importante é o da passivação abrasiva, onde partículas quebradas geram finos que se acumulam na interface abrasiva, atuando como lubrificantes sólidos ou partículas de preenchimento, reduzindo o desgaste efetivo.

Segundo Rastegar *et al.* (2023), quando mais de 20% da massa abrasiva é composta por partículas abaixo de 100 μm , há uma queda significativa na taxa de desgaste.

Logo como implicação prática o reaproveitamento da areia deve incluir peneiramento periódico para remover finos acumulados.

Por fim para justificar o reaproveitamento do abrasivo em testes com roda de borracha, recomenda-se com base em trabalhos já apresentados:

- Análise granulométrica após cada ciclo (peneiramento a seco)
- Microscopia de forma de partícula (verificação de perda de arestas das partículas)
- Controle da massa abrasiva total usada (conforme ASTM G65 ou ISO 4649)
- Testes de validação comparando o volume de desgaste com abrasivo novo vs. Reaproveitado

2.6 FATOR DE FORMA E DINÂMICA DAS PARTÍCULAS

O fator de forma das partículas abrasivas desempenha papel decisivo no mecanismo de desgaste, influenciando diretamente a eficiência de corte, a severidade das trilhas produzidas e a taxa de remoção de material. Segundo Hutchings (2017), partículas com geometrias mais angulares tendem a promover desgaste abrasivo mais intenso, pois apresentam maior capacidade de penetrar e sulcar a superfície do material. Em contraste, partículas arredondadas ou com bordas suavizadas apresentam menor agressividade, resultando em desgaste predominantemente por rolamento, o que reduz significativamente a taxa de remoção de massa.

Para caracterizar a influência da forma das partículas, Hutchings e Shipway (2017) propõem uma relação baseada na circularidade ou esfericidade das partículas, descrita pelo parâmetro fator de forma (F), definido pela equação:

$$F = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (4)$$

Onde:

- F = fator de forma (adimensional), associado à circularidade/esfericidade da partícula.
- A = área projetada da partícula (mm² ou μm²).
- P = perímetro da partícula (mm ou μm).

Estudos recentes reforçam a importância do fator de forma no comportamento abrasivo. Zhang *et al.* (2021) observaram que partículas de sílica com bordas vivas apresentaram aumento de até 40% na taxa de desgaste quando comparadas a partículas de mesma granulometria, porém mais arredondadas. Correia e Miranda (2022) destacam ainda que a deterioração da forma das partículas ocorre de forma acelerada após múltiplas reutilizações, reduzindo o desempenho abrasivo e ocasionando queda de eficiência do ensaio.

Observa-se também que a evolução do fator de forma está diretamente relacionada ao fenômeno de fratura frágil das partículas durante o uso, principalmente quando submetidas a tensões de impacto repetitivas. Hutchings

(2017) destaca que abrasivos frágeis, como a sílica, tendem a se fragmentar em partículas menores e mais arredondadas conforme são reutilizados, resultando em mudança gradual do mecanismo de desgaste de microcorte (cutting) para microsulcamento e microfadiga (ploughing). Essa transição explica a redução progressiva da perda de massa observada em ensaios com múltiplos reaproveitamentos.

A dinâmica das partículas abrasivas durante o desgaste de três corpos desempenha papel fundamental na definição do mecanismo de remoção de material. Quando confinadas entre duas superfícies — como no ensaio de roda de borracha e areia — as partículas podem exibir comportamentos distintos, alternando entre rolamento, deslizamento, giro irregular e impacto, cada qual resultando em diferentes intensidades de desgaste. Hutchings e Shipway (2017) descrevem que a forma, dureza, granulometria e energia aplicada sobre o abrasivo determinam qual desses movimentos será predominante.

No regime inicial, quando as partículas são mais angulares e preservam seus vértices, o comportamento predominante é o microcorte (cutting), em que as partículas tendem a rolar parcialmente, mas com forte componente de deslizamento e penetração na superfície metálica. Neste estágio, o movimento é assimétrico: a partícula gira, mas simultaneamente raspa a superfície, removendo material por cisalhamento localizado. Como consequência, a taxa de desgaste é mais elevada.

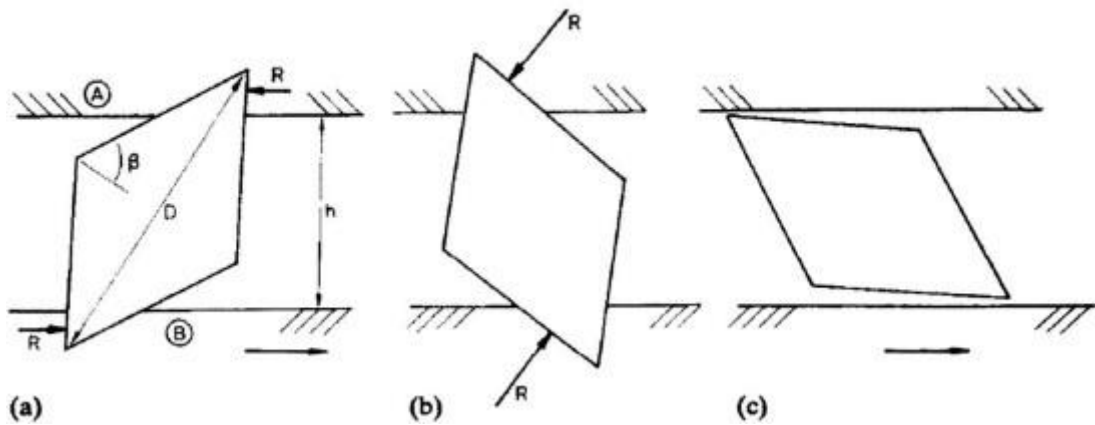
A interação entre as partículas abrasivas e as superfícies também pode ser compreendida a partir da análise geométrica do movimento relativo entre os corpos. Segundo Hutchings (2016), a capacidade de uma partícula penetrar, rolar ou deslizar entre as superfícies depende diretamente do seu fator de forma e da razão entre sua dimensão característica (D) e a distância entre as superfícies (h). A relação entre esses parâmetros determina se a partícula atuará com comportamento agressivo — promovendo corte efetivo — ou com comportamento mais suave, predominando rolamento e micro deslizamento.

Matematicamente, Hutchings propõe que o ângulo de ataque β e a geometria da partícula controlam o modo de interação, influenciando a profundidade de penetração e a força normal transmitida à superfície. Assim, partículas mais alongadas ou angulares tendem a se orientar de modo a maximizar o atrito e o desgaste, enquanto partículas mais arredondadas

favorecem o rolamento, reduzindo o desgaste abrasivo.

A Figura 5 ilustra diferentes modos de interação de uma partícula alojada entre superfícies em movimento relativo. Em (a), a partícula assume uma posição inclinada, impondo forças reativas R nos pontos de contato e permitindo a formação de um ângulo β que determina o grau de penetração. Em (b), observa-se a rotação espontânea da partícula, induzida pela instabilidade geométrica, enquanto em (c) a partícula alcança uma posição de menor interferência, favorecendo o rolamento. Essa dinâmica exemplifica como a combinação entre forma, orientação e espaço disponível determina a severidade da abrasão.

Figura 4 - Rolamento da partícula entre as superfícies.



Fonte: Adaptado de Carvalho (2018).

Hutchings demonstra que a condição geométrica que determina a estabilidade da partícula entre as superfícies pode ser expressa pela seguinte relação fundamental:

$$\left(\frac{D}{h}\right) = \sec\beta \quad (5)$$

Onde:

D = dimensão característica da partícula (por exemplo, diagonal ou maior comprimento)

h = espaçamento entre as superfícies em contato

β = ângulo de inclinação formado pela partícula em relação ao plano de referência $\sec \beta = \secante \text{ do } \text{ângulo } \beta$, definida como $1/\cos \beta$, relacionando a geometria da partícula com sua estabilidade entre as superfícies

À medida que o abrasivo se fragmenta e os vértices são desgastados, seu comportamento se torna mais próximo do rolamento puro, reduzindo a capacidade de corte. Partículas mais arredondadas tendem a girar livremente entre as superfícies, promovendo um desgaste mais brando, frequentemente classificado como microsulcamento (ploughing). Estudos de Zhang et al. (2021) demonstram que partículas de sílica com maior circularidade apresentam menor tendência a penetrar

na superfície, atuando principalmente como esferas rolantes, redistribuindo tensões e diminuindo a profundidade dos sulcos.

Além da forma, a densidade de organização das partículas entre as partículas afeta diretamente seu comportamento dinâmico. Em ciclos avançados de reutilização, a geração de finos aumenta a densidade de empilhamento na superfície, o que restringe o movimento individual das partículas. Conforme ressaltado por Correia e Miranda (2022), essa condição leva a uma redistribuição de forças entre o conjunto de partículas, reduzindo os eventos de fratura e diminuindo a energia dissipada em cada partícula individual. Em consequência, o desgaste tende a se estabilizar em patamares mais baixos, fenômeno frequentemente observado em ensaios que reutilizam abrasivos por muitos ciclos.

A viscosidade e o fluxo do abrasivo também influenciam a dinâmica do sistema. Partículas maiores e angulares apresentam maior capacidade de se intertravar, impedindo o rolamento livre; já partículas pequenas e arredondadas fluem de maneira mais uniforme, distribuindo-se com maior mobilidade entre as superfícies. Essa transição de comportamento explica o declínio progressivo na perda de massa registrado experimentalmente conforme a areia é reutilizada — a cinética das partículas evolui de um regime agressivo para um regime amortecido.

Portanto, a dinâmica das partículas abrasivas é resultado de um equilíbrio entre morfologia, granulometria, energia mecânica e densidade de empacotamento

2.7 VARIÁVEIS QUE AFETAM O DESGASTE ABRASIVO

O desgaste abrasivo da roda de borracha em ensaios é influenciado por diversas variáveis que afetam a taxa e o mecanismo de desgaste. Entre as

principais, destacam-se:

- Pressão de contato: A força aplicada entre a roda de borracha e o corpo de prova determina a intensidade do contato abrasivo, influenciando diretamente a taxa de desgaste (ASTM G65, 2017).
- Velocidade de deslizamento: O aumento da velocidade relativa entre a roda e o material promove maior taxa de remoção de material, devido ao aumento da energia cinética e do número de interações abrasivas por unidade de tempo (Liu et al., 2025).
- Tipo e granulometria do abrasivo: O tamanho, forma e dureza das partículas abrasivas impactam a agressividade do desgaste; partículas mais angulares e duras aumentam o efeito abrasivo (Hutchings e Shipway, 2017).
- Composição e propriedades da borracha: A dureza, elasticidade e resistência ao desgaste da roda influenciam sua durabilidade e o padrão do desgaste abrasivo (Silva e Souza, 2023).
- Condições ambientais: Temperatura, umidade e presença de contaminantes podem alterar as propriedades da borracha e do abrasivo, afetando o desgaste (Tanaka e Yamamoto, 2024).

A compreensão e o controle dessas variáveis são essenciais para garantir a repetibilidade e a confiabilidade dos ensaios abrasivos.

2.8 ENSAIO DE ABRASÃO POR RODA DE BORRACHA

O ensaio de abrasão por roda de borracha é amplamente utilizado para determinar a resistência ao desgaste abrasivo de materiais metálicos, polímeros e revestimentos, fornecendo dados essenciais para seleção de materiais em aplicações industriais sujeitas a desgaste intenso, como componentes de maquinário, estruturas e revestimentos protetivos (Liu et al., 2025).

As principais normas que regulam esse ensaio são:

- ASTM G65 – Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus (2017): norma internacional mais utilizada que estabelece o método para determinar o volume de desgaste produzido por abrasão seca utilizando areia padrão e roda de borracha.

- ISO 4649 – Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of abrasion resistance using a rotating cylindrical drum device (2018): norma que especifica o procedimento para avaliar resistência ao desgaste de borrachas vulcanizadas ou termoplásticas, utilizando um tambor rotativo com material abrasivo.

Este teste simula condições reais de desgaste, combinando a ação de partículas abrasivas com o contato dinâmico contra uma roda de borracha, o que proporciona uma avaliação confiável da resistência ao desgaste sob condições controladas. A reprodução fiel do desgaste por partículas permite o desenvolvimento de materiais mais duráveis, redução de custos de manutenção e otimização de processos industriais (Silva e Souza, 2023).

Nos ensaios de desgaste abrasivo por roda de borracha, a norma ASTM G65 estabelece uma vazão de alimentação de areia sílica entre 300 e 400 g/min, garantindo a padronização das condições de ensaio. Considerando que procedimentos típicos utilizam tempos de teste variando entre 10 e 30 minutos, o consumo total de abrasivo pode chegar a aproximadamente 3 a 12 kg por ensaio, dependendo da vazão adotada e do procedimento específico. Esse volume relativamente elevado evidencia que o uso de areia nova a cada teste representa um custo operacional significativo, além de gerar maior demanda por reposição de material e descarte adequado

Esse consumo representa um custo financeiro significativo e uma questão ambiental, visto que o descarte dos abrasivos usados pode gerar resíduos que necessitam de tratamento adequado para evitar contaminação ambiental. Por isso, o reaproveitamento do abrasivo residual torna-se uma alternativa sustentável e economicamente viável.

Trabalhos recentes demonstram que a sílica utilizada em ensaios abrasivos mantém propriedades abrasivas relevantes após ciclos controlados de reaproveitamento, desde que monitoradas variáveis como granulometria e forma das partículas (Liu *et al.*, 2025; Rastegar *et al.*, 2023).

A reutilização pode ser efetivada por meio de processos simples como peneiramento para remoção de finos e homogeneização da granulometria,

reduzindo a necessidade de abrasivo novo e minimizando impactos ambientais, além de preservar a fidelidade dos resultados (Hutchings e Shipway, 2017; Rastegar *et al.*, 2023).

Dessa forma, o reaproveitamento do abrasivo contribui para a sustentabilidade dos ensaios, reduz custos laboratoriais e alinha a prática às políticas ambientais atuais, sem comprometer a qualidade técnica dos ensaios.

A tabela 3 apresenta uma comparação entre diferentes materiais submetidos ao ensaio de abrasão por roda de borracha, dados da literatura, considerando variações nos abrasivos utilizados, granulometria, tempo de ensaio, dureza dos materiais e perda de material abrasivo. Essa análise permite compreender a influência da dureza e do tratamento térmico na resistência ao desgaste abrasivo, além de fornecer um panorama sobre o consumo e a eficiência dos abrasivos empregados, fundamental para justificar estratégias de reaproveitamento do material abrasivo nos ensaios.

Tabela 3 - Tabela de interação do abrasivo com os materiais

Parâmetro	Abrasivo	Granulometria (µm)	Tempo do ensaio (min)	Material testado	Dureza (HB)	Perda de material (mg)	Referência
Ensaio padrão ASTM G65	Areia sílica	150–600	45	Aço carbono	200	120–150	ASTM G65-17 (2017)
Ensaio com abrasivo reaproveitado	Areia sílica reutilizada	150–600	45	Aço carbono	200	130–160	Liu et al., 2025
Ensaio comparativo	Óxido de alumínio	100–300	40	Aço inoxidável 420 temperado a 1038 °C (sem revenimento)	~580	40–55	Silva e Souza, 2023; Tanaka e Yamamoto, 2024
Aço inox 420 temperado a 998 °C (sem revenimento)	Areia sílica	150–600	45	Aço inoxidável 420	~520	50–65	Tanaka e Yamamoto, 2024
Aço inox martensítico mais duro (ex.: 440C)	Areia sílica	150–600	45	Aço inox martensítico	~600	35–50	Hutchings e Shipway, 2017
Aço inox martensítico menos duro (ex.: 410)	Areia sílica	150–600	45	Aço inox martensítico	~400	70–90	Liu et al., 2025
Ensaio com abrasivo fino	Sílica fina	50–150	50	Aço liga	220	100–130	Rastegar et al., 2023
Ensaio em material duro	Carbeto de tungstênio	10–100	30	Aço ferramenta	700	20–30	Hutchings e Shipway, 2017

Fonte: elaborado pelo autor

O aço inox 420 temperado a 1038 °C, com dureza elevada, demonstra melhor desempenho abrasivo em comparação a tratamentos térmicos inferiores e a outros aços com dureza menor. Essa relação reforça a importância do controle dos parâmetros de ensaio e do abrasivo utilizado para garantir resultados confiáveis. Ademais, a variabilidade na perda de material e granulometria do abrasivo evidencia o potencial para otimizar o consumo de abrasivo, justificando a proposta de reaproveitamento do resíduo de areia como prática sustentável e economicamente vantajosa em ensaios subsequentes.

Ao considerarmos os custos envolvidos por ensaio nos testes de abrasão por roda de borracha, obtém-se um valor estimado teórico fundamentado em

normas e estudos anteriores de referência, conforme segue a Tabela 4.

Tabela 4 - Custos dos abrasivos mais comuns

Abrasivo	Consumo médio (g/ensaio)	Custo médio (R\$/kg)	Custo médio por ensaio (R\$)	Fonte / Referência
Areia sílica nova	800	15	12	ASTM G65-17 (2017); Liu et al., 2025
Areia sílica reaproveitada (após peneiramento)	800	5,00 (estimado)	4	Rastegar et al., 2023
Óxido de alumínio	600	45	27	Silva e Souza, 2023
Sílica fina	700	20	14	Rastegar et al., 2023

Fonte: tabela elaborada pelo autor

A análise do consumo médio de abrasivos em ensaios de abrasão por roda de borracha revela custos significativos, especialmente ao se utilizar abrasivos de maior valor agregado, como o óxido de alumínio. A reutilização da areia sílica residual, mesmo considerando custos reduzidos relacionados a processos de peneiramento e controle de granulometria, apresenta potencial de redução do custo do abrasivo em até 66%, conforme estimativas baseadas em preços médios de mercado e literatura.

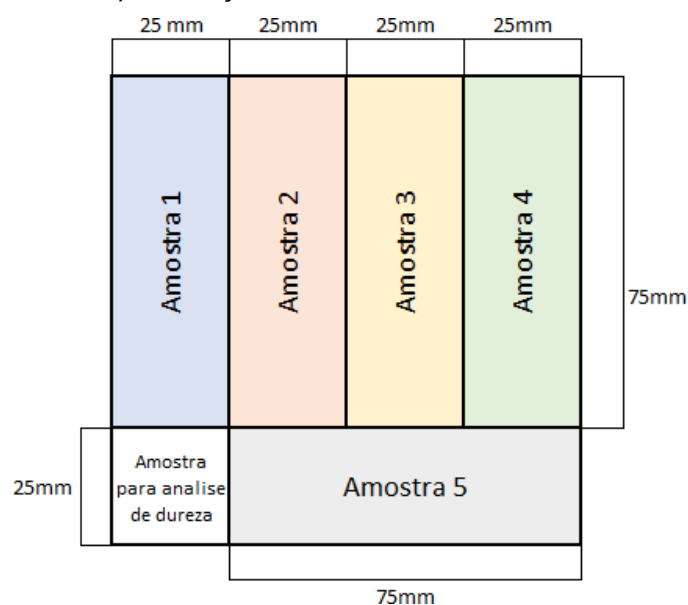
3 MATERIAIS E MÉTODOS

O material selecionado para a realização dos ensaios de abrasão foi o aço inoxidável martensítico AISI 420, fornecido em forma de chapa pela empresa Inox do Brasil. Esse aço foi escolhido em função de sua ampla aplicação em componentes sujeitos ao desgaste e de sua resposta ao tratamento térmico da têmpera, características que o tornam adequado para estudos comparativos de resistência à abrasão.

3.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para a execução dos ensaios de abrasão, foram adquiridas chapas de aço inoxidável martensítico AISI 420 com dimensões de 100 × 100 mm e espessura de 4 mm. A partir de cada chapa, foram confeccionados cinco corpos de prova com dimensões de 75 × 25 mm, sendo quatro orientados na posição vertical (“em pé”) e um na posição horizontal (“deitado”) conforme Figura 5.. Além disso usamos o pedaço que sobrou 25mm x 25mm para uma análise previa de dureza pós tempera, validando o processo.

Figura 5 - Representação do corte das amostras.



Fonte: elaborado pelo autor

No total, foram utilizadas duas chapas, resultando em dez corpos de

prova, cada corpo de prova pode ser usado em ambos os lados, totalizando 20 ensaios, 10 amostras austenitizadas em 998°C e 10 amostras austenitizadas em 1038°C. O processo de corte foi realizado utilizando serra de fita e o cutoff com refrigeração, garantindo precisão dimensional e evitando o superaquecimento do material durante o seccionamento.

Os tratamentos térmicos foram realizados nos fornos do Laboratório de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O processo consistiu na têmpera das amostras em duas temperaturas de austenitização, sendo elas 1038°C e 998°C. Com tempo de 1 hora de patamar para posterior resfriamento em óleo agitado. As amostras não foram submetidas a revenimento, de modo a preservar a máxima dureza obtida após a têmpera.

Além disso, a escolha por não realizar o revenimento permitiu minimizar a influência de fatores microestruturais associados à revenimento, como a precipitação de carbonetos secundários ou a redução das tensões internas, garantindo que a análise dos resultados fosse principalmente atribuída à variação da abrasividade do meio ensaiado, e não a diferenças de propriedades intrínsecas do material metálico.

As amostras foram preparadas de forma a garantir uma superfície uniforme e isenta de interferências que pudessem comprometer as análises subsequentes. O preparo envolveu o lixamento sequencial conforme as recomendações da norma, utilizando lixas de granulometrias 80, 120, 220, 360, 600 e 1200 Mesh. Esse procedimento proporcionou uma superfície com acabamento, assegurando a uniformidade e a reprodutibilidade das condições iniciais entre as amostras.

Após o tratamento térmico e a preparação adequada das superfícies, as observações microestruturais revelaram que as amostras apresentaram uma microestrutura predominantemente martensítica, típica do aço inoxidável AISI 420 submetido à têmpera direta. A martensita formada caracteriza-se por elevada dureza e baixa tenacidade e a presença de uma pequena fração de austenita retida.

Conforme análise para esse aço nota-se a presença de uma pequena fração de austenita retida. As figuras 6 e 7 mostram o padrão microestrutural desenvolvido nas amostras

Figura 6 - Microestrutura do Aço inox 420 após tempera a 1038°C. Ampliação de 500x



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 7 - Microestrutura do Aço inox 420 após tempera a 998°C. Ampliação de 500x.



Fonte: elaborado pelo autor

Ao analisar as microestruturas, observa-se nitidamente a presença predominante de ripas de martensita, especialmente evidente na amostra temperada a 1038 °C, acompanhada por um percentual de austenita retida. O mesmo comportamento é identificado na amostra temperada a 998 °C, porém com uma quantidade ligeiramente menor de austenita retida, o que é coerente com a menor temperatura de têmpera e a consequente redução da solubilização de carbono na matriz.

As ripas de martensita apresentam-se bem definidas e com morfologia uniforme, sem aspecto grosseiro, indicando a formação adequada dessa fase durante o tratamento térmico. Dessa forma, pode-se concluir que o processo de têmpera foi efetivamente conduzido em ambas as amostras, resultando em microestruturas conformes e adequadas para a continuidade das análises de desgaste abrasivo.

Para a realização deste trabalho foram utilizadas 10 amostras de aço inoxidável martensítico AISI 420, com composição química típica Conforme Tabela 5

Tabela 5 - Composição química típica do aço inoxidável AISI 420

Elemento	Faixa típica (% em peso)	Observações
Carbono (C)	0,30 – 0,40	Essencial para endurecimento por têmpera; influencia a formação de martensita.
Cromo (Cr)	12,0 – 14,0	Responsável pela resistência à corrosão e estabilidade da martensita.
Silício (Si)	≤ 1,00	Desoxidante; pode influenciar ligeiramente dureza e temperabilidade.
Manganês (Mn)	≤ 1,00	Melhora forjabilidade e contribui para estabilidade da austenita.
Fósforo (P)	≤ 0,040	Impureza controlada; teores altos prejudicam ductilidade.
Enxofre (S)	≤ 0,030	Impureza; versões "420F" podem ter S elevado (0,15–0,35%) para usinabilidade.
Níquel (Ni)	≤ 1,00 (traços)	Não é elemento primário, mas pode aparecer em pequenas quantidades.
Ferro (Fe)	Balance	Elemento base.

Fonte: elaborado pelo autor

Esse material amplamente empregado em componentes sujeitos a desgaste abrasivo devido à sua alta dureza e boa resistência. Para os ensaios de abrasão a três corpos, cada uma das 10 amostras (5 temperadas a 998°C e 5 a 1038°C) foi utilizada em duas regiões distintas, uma em cada face totalizando 10 ensaios independentes por condição térmica. As amostras apresentavam dimensões finais de 75 × 25 × 4 mm, sendo todas lixadas até 1200 Mesh antes dos testes, garantindo superfícies planas e uniformes.

3.2 DUREZA E MICRODUREZA DO INOX 420

Os ensaios de dureza e microdureza foram realizados inicialmente em um corpo de prova piloto, retirado de uma pequena seção do mesmo material e tratado termicamente em conjunto com as demais amostras. Essa etapa teve

como objetivo principal verificar a eficácia do processo de têmpera, assegurando que as condições de aquecimento, tempo de patamar e resfriamento estivessem adequadas para a obtenção da microestrutura martensítica esperada.

Após o tratamento térmico, essa amostra de referência foi submetida ao preparo metalográfico. O processo iniciou-se com o corte da amostra em dimensões adequadas para o embutimento, utilizando baquelite, o que garantiu um melhor manuseio durante as etapas seguintes. Em seguida, realizou-se o lixamento sequencial utilizando lixas de granulometrias 80, 120, 220, 360, 600 e 1200 Mesh. Posteriormente, a amostra foi polida em pano de feltro com pastas de alumina nas granulometrias de 0,5 μm e 0,3 μm . Após o polimento, procedeu-se ao ataque químico utilizando o reagente Vilella cuja composição consiste em 1 g de ácido pícrico, 5 mL de ácido clorídrico e 100 mL de álcool etílico. Esse reagente é amplamente empregado na caracterização microestrutural de aços carbono, aços ligados e aços inoxidáveis martensíticos, por promover ataque preferencial da martensita e evidenciar a presença de carbonetos e contornos de grão.

Foram realizados os ensaios de dureza e microdureza utilizando um microdurômetro, aplicando cargas controladas e registrando os valores obtidos em diferentes regiões da superfície. A partir dos resultados obtidos na amostra piloto, foi possível confirmar a efetividade do processo de têmpera. Os valores de dureza medidos em forma de perfil variaram entre 39,28 HRC e 52,19 HRC, faixa que está em concordância com os valores reportados na literatura para o aço inoxidável martensítico AISI 420 submetido à têmpera sem revenimento. Esses resultados indicam que o tratamento térmico foi realizado de forma adequada, resultando na formação predominante de martensita, fase responsável pelo aumento significativo da dureza do material.

Para um contexto geral de compreensão dos dados, se tem necessário as durezas de cada amostras, conforme tabela 6.

Tabela 6 – Dureza das amostras tratadas a 1038°C e a 998°C

Amostra 1038°C	Dureza (HRC)	Amostra 998°C	Dureza (HRC)2
Amostra 1	43	Amostra 1	42
Amostra 2	44	Amostra 2	46
Amostra 3	44	Amostra 3	47
Amostra 4	44	Amostra 4	46
Amostra 5	44	Amostra 5	43
Amostra 6	46	Amostra 6	45
Amostra 7	44	Amostra 7	46
Amostra 8	44	Amostra 8	44
Amostra 9	44	Amostra 9	44
Amostra 10	45	Amostra 10	49

Fonte: elaborado pelo autor

Com a validação do processo térmico, deu-se início à preparação das superfícies das demais amostras destinadas aos ensaios de abrasão. Esse preparo foi fundamental para assegurar que todas as amostras apresentassem condições superficiais uniformes, permitindo uma análise comparativa precisa do comportamento abrasivo sob diferentes condições de reutilização da areia.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DA AREIA NOVA

Foi utilizada, nos ensaios de abrasão, areia nova fornecida pela Mineração Nilson, com granulometria entre AFS 50 e 70 Mesh, faixa que está de acordo com as especificações recomendadas pela norma ASTM G65

Para garantir a uniformidade dos parâmetros iniciais e assegurar a reprodutibilidade dos resultados, realizou-se o peneiramento da areia nova antes do primeiro uso. O procedimento foi conduzido em peneirador vibratório, utilizando peneiras com aberturas de 500 µm, 250 µm, 180 µm, 125 µm, 90 µm e 75 µm, seguindo a sequência decrescente de malhas.

Esse processo permitiu a separação granulométrica e a classificação das partículas, possibilitando a seleção de uma fração padronizada da areia para os ensaios. O controle granulométrico foi essencial para reduzir variações experimentais e garantir que eventuais mudanças observadas nos testes seguintes fossem devidas à reutilização do abrasivo, e não a diferenças no tamanho das partículas, logo abaixo na Tabela 7, o resultado da caracterização da areia nova utilizada no processo.

Tabela 7 - Tabela para areia nova conforme ABIFA CEMP 081.

PENEIRAS		Peso peneira vazia (g)	Peso peneira + material (g)	Retenção (g)	Retenção(%)	Fatores	Produto
MALHA (mm)	N° Malha						
0,500	35	321	321,0162	0,0162	0%	25	0
0,250	60	300	342,9155	42,9155	43%	45	1935
0,180	80	283	318,0835	35,0835	35%	60	2100
0,165	120	310	331,4814	21,4814	21%	65	1365
0,125	170	275	275,6028	0,6028	1%	85	85
0,075	200	283	283	0	0%	140	0
Prato	Prato	330	330	0	0%	300	0
			Soma	100,0994	ΣRP = 100%		ΣP = 5485

Fonte: elaborado pelo autor

Pode-se observar uma concentração de 99% entre 250 µm e 125 µm, que eram valores esperados, validando assim a utilização desta areia como nova para o início do processo. Conforme norma, com os resultados de produto e retenção pode-se chegar ao número AFS encontrado.

$$MF = \frac{\sum P}{\sum RP}$$

(6)

Onde:

MF = Módulo de finura, em AFS;

ΣP = Somatória dos produtos;

ΣRP = Somatória da retenção em porcentagens.

$$MF = \frac{5485}{100} = 54,85 \text{ AFS}$$

O Módulo de Finura AFS é um índice numérico que representa a granulometria média ponderada de um conjunto de partículas, nesse caso, de um abrasivo ou areia. O valor ≈ 55 AFS obtido representa um material de granulometria intermediária, não muito fina e não muito grossa.

O equipamento utilizado para o ensaio, composto por uma roda de borracha de 228 mm de diâmetro, que gira em contato direto com a amostra, sob

uma força normal controlada de 130 N, aplicada por um sistema de pesos. O abrasivo é depositado continuamente entre a roda e a amostra por meio de um funil de alimentação superior, conectado a um bocal de direcionamento que regula o fluxo de areia.

A vazão do abrasivo foi previamente calibrada, resultando em 305 ± 10 g/min, determinada pela massa do material que passa pelo bocal durante 60 segundos de operação. O número de rotações da roda foi controlada por um tacômetro digital integrado ao equipamento, sendo ajustado para 6.000 rotações por ensaio, garantindo a padronização da distância de deslizamento e da energia de atrito aplicada em cada teste.

A perda de massa foi obtida por meio da medição das amostras antes e após o ensaio, utilizando a mesma balança analítica MG314Ai com precisão de 0,0001 g. Esses valores foram posteriormente empregados como parâmetro para a análise de desempenho entre as diferentes reutilizações dos abrasivos utilizados. Após cada teste, a areia foi coletada, peneirada e reutilizada conforme o número de ciclos definidos (nova, 1x, 2x ... até 10x), permitindo a análise da influência do desgaste e fragmentação do abrasivo sobre a perda de massa das amostras.

3.1 PROCEDIMENTO DE ENSAIO DA RODA DE BORRACHA

O ensaio de desgaste abrasivo a três corpos foi conduzido conforme a norma ASTM G65-16, utilizando o equipamento de roda de borracha, representado na Figura

8. Esse método tem como princípio a fricção controlada entre uma amostra metálica, uma roda de borracha e um fluxo constante de material abrasivo, permitindo quantificar a perda de massa e, posteriormente, estimar a perda volumétrica do material.

Figura 8 - Vista frontal da máquina de abrasão por roda de borracha conforme ASTM G65, utilizada para avaliar a resistência ao desgaste das amostras



Fonte: elaborado pelo autor

Antes dos ensaios, todas as amostras foram devidamente identificadas e limpas com álcool isopropílico para remoção de resíduos e partículas soltas. Cada amostra, com dimensões de $75 \times 25 \times 4$ mm, foi fixada firmemente no suporte da máquina, garantindo o contato uniforme com a roda de borracha.

A força aplicada durante o ensaio foi mantida constante em 130 N, utilizando o sistema de contrapeso do próprio equipamento, conforme especificado na norma.

A roda de borracha utilizada apresentou diâmetro médio de 228 mm, largura de 12 mm e dureza de 60 Shore A. O fluxo de abrasivo foi ajustado e medido previamente por pesagem direta, determinando-se a vazão média de 305 ± 10 g/min.

O abrasivo foi composto por areia de sílica nova e reutilizada, com granulometria controlada entre 50 e 70 mesh (AFS 50), proveniente da Mineração Nilson. A cada ciclo de reutilização, a areia era peneirada novamente com peneiras de 500 μm , 250 μm , 180 μm , 125 μm , 90 μm e 75 μm , para acompanhamento da alteração granulométrica após o uso.

Cada ensaio foi realizado com 6.000 rotações da roda, correspondendo a

uma distância linear padronizada de desgaste conforme norma de ensaio por *roda de borracha* (ASTM G65) de 4309 metros(m) sobre a superfície da amostra. O fluxo de abrasivo foi liberado continuamente pelo funil superior, sendo direcionado para o ponto de contato entre a amostra e a roda.

Durante o teste, o equipamento manteve velocidade e carga constantes, assegurando reprodutibilidade entre as medições, houve uma parada entre cada ensaio, período necessário para promover o resfriamento do disco.

Ao término do ensaio, a amostra foi cuidadosamente limpa com jato de ar comprimido e álcool isopropílico, removendo completamente o abrasivo aderido. Em seguida, foi novamente pesada em uma balança analítica de precisão de 0,0001 g, registrando-se a perda de massa em relação ao valor inicial.

Cada face das amostras foi ensaiada uma única vez, totalizando 20 ensaios (10 amostras × 2 lados). O mesmo abrasivo foi reutilizado sucessivamente, registrando-se as variações em sua composição granulométrica após cada etapa de ensaio.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS ABRASIVOS

Após cada ciclo de ensaio, o abrasivo utilizado foi cuidadosamente coletado e armazenado em recipientes identificados de acordo com o número de reutilizações (areia nova, reutilizada 1x, 2x, até 10x). Essa etapa teve como objetivo monitorar as alterações físicas e morfológicas do material abrasivo ao longo dos sucessivos usos no ensaio de desgaste.

O ensaio foi conduzido em peneirador mecânico com tempo de vibração controlado de 15 minutos, e o percentual retido em cada peneira foi determinado pela massa retida em cada peneira.

Os resultados foram expressos em percentagem retida acumulada, permitindo a construção de curvas de distribuição granulométrica para cada nível de reutilização da areia. Essas curvas possibilitaram observar a tendência de fragmentação dos grãos e a conseqüente alteração no comportamento abrasivo do material ao longo do uso.

Com o objetivo de identificar mudanças morfológicas das partículas de areia após múltiplas reutilizações, amostras selecionadas (nova, reutilizada 3x, 6x e 10x) foram submetidas à análise em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

de modelo JCM- 7000 Neo Scope Benchtop SEM, disponível no Laboratório LMCA/Blumenau, na UFSC conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)



Fonte: elaborado pelo autor

Antes da análise, as partículas foram fixadas em suportes metálicos com fita condutiva de carbono e metalizadas na JEOL Smart Coater DII-29030SCTR com uma fina camada de ouro (espessura aproximada de 10 nm) para garantir a condutividade elétrica necessária à aquisição das imagens conforme Figura 10.

Figura 10 - Preparação da amostra para Metalização



Fonte: elaborado pelo autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta etapa serão analisadas as taxas de desgaste obtidas em cada ensaio, correlacionando-as com os parâmetros experimentais e com as condições de tratamento térmico aplicadas às amostras. Além disso, será avaliado o comportamento do material abrasivo, em especial o tamanho médio e a circularidade das partículas, após os ciclos de ensaio.

Esses resultados, associados aos valores de perda de massa registrados para cada amostra, permitirão mensurar o nível de eficiência do ensaio em relação ao reaproveitamento do abrasivo, possibilitando identificar eventuais variações no desempenho do teste decorrentes da degradação ou da alteração morfológica das partículas de areia. Dessa forma, busca-se compreender não apenas o comportamento tribológico do aço inoxidável martensítico 420, mas também a viabilidade técnica e experimental da reutilização do material abrasivo como proposta de otimização sustentável do ensaio.

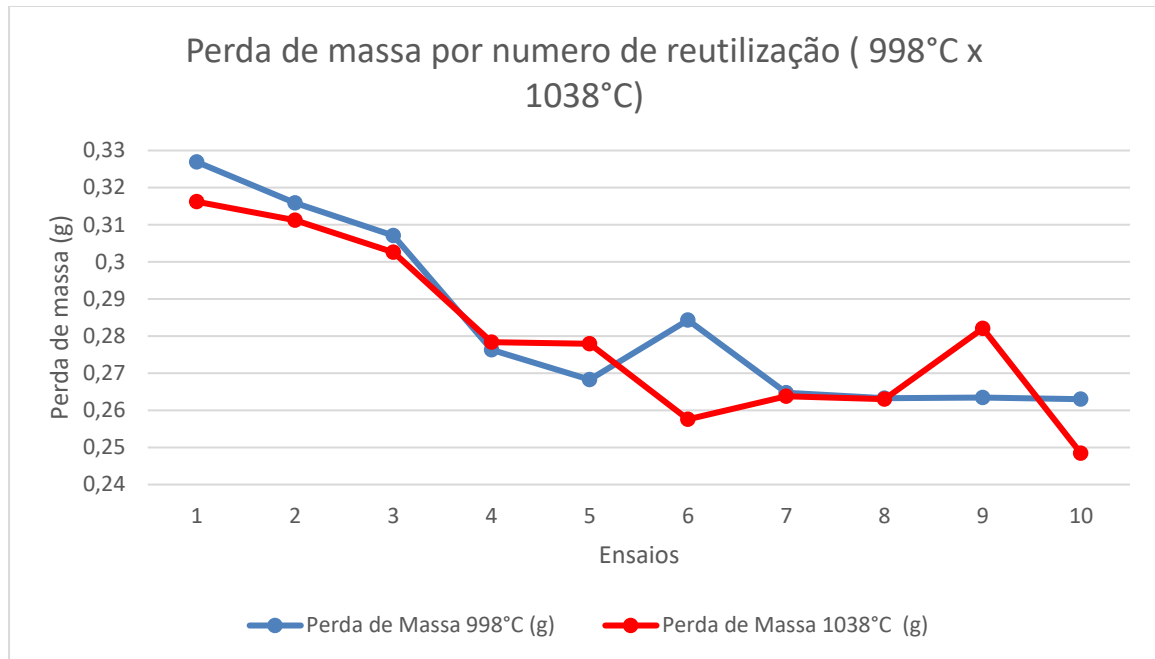
4.1 PERDA DE MASSA

A estatísticas foram conduzidas com o objetivo de avaliar a consistência dos resultados obtidos e identificar possíveis variações em perda de massa entre os ciclos de ensaio. A partir desses dados, foi elaborado um gráfico comparativo da perda de massa das amostras em cada ciclo de reutilização do abrasivo, permitindo visualizar de forma clara a tendência de desgaste em função do número de reaproveitamentos. Essa abordagem possibilita verificar a influência direta da degradação do material abrasivo sobre a eficiência do ensaio e o comportamento tribológico das amostras.

A Figura 11 apresenta a variação da perda de massa das amostras em relação ao número de reutilizações do abrasivo para as amostras de inox temperadas a 1038 °C e a 998°C. Esse gráfico foi construído a partir dos valores experimentais obtidos, possibilitando observar a evolução do desgaste do aço inoxidável martensítico 420 conforme o abrasivo de sílica é reaproveitado. A representação gráfica permite identificar tendências, como a redução gradual da perda de massa nas primeiras reutilizações, seguida por uma estabilização, indicando uma possível estabilização do abrasivo às condições do ensaio devido

ao teor de finos que alteram a abrasividade da sílica.

Figura 11 - Variação da perda de massa do aço inoxidável martensítico 420 temperado a 1038°C e a 998°C, em função do número de reutilizações do abrasivo de sílica no ensaio de desgaste abrasivo.



Observa-se, na Figura 11, uma tendência de redução gradual da perda de massa das amostras com o aumento do número de reutilizações do abrasivo. Nos primeiros ciclos, o abrasivo apresenta partículas com arestas mais definidas e elevada capacidade de corte, resultando em maiores taxas de desgaste. À medida que é reutilizado, ocorre o arredondamento e a fragmentação das partículas, reduzindo sua agressividade e, conseqüentemente, a perda de massa das amostras.

Esse comportamento indica uma diminuição da eficiência abrasiva ao longo dos ciclos, porém sugere também a possibilidade de reaproveitamento controlado do abrasivo, desde que o desempenho se mantenha dentro de limites aceitáveis. Com o intuito de quantificar de forma mais precisa a influência da reutilização do abrasivo sobre a eficiência do ensaio, elaborou-se a Tabela 8 e 9, que apresenta os valores de perda de massa das amostras tratadas a 1038 °C e 998°C respectivamente, juntamente com a variação percentual em relação ao primeiro ensaio. Essa análise numérica complementa a interpretação gráfica, permitindo observar de maneira objetiva a redução progressiva na perda de massa ao longo dos ciclos de reaproveitamento do material abrasivo, na Tabela

8 e 9 pode-se ver a tabela correspondente ao gráfico da Figura 11.

Tabela 8 - Variação do percentual de perda de massa das peças tratadas a 1038°C.

Reutilização	Perda de Massa (g)	Variação em relação à 1ª (%)
1	0,3162	0,00%
2	0,3112	-1,58 %
3	0,3026	-4,30 %
4	0,2784	-11,95 %
5	0,2779	-12,13 %
6	0,2576	-18,51 %
7	0,2638	-16,58 %
8	0,263	-16,80 %
9	0,2821	-10,77 %
10	0,2484	-21,41 %

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 9 - Variação do percentual de perda de massa das peças tratadas a 998°C.

Reutilização	Perda de Massa (g)	Variação em relação à 1ª (%)
1	0,3269	0
2	0,3159	-3,36 %
3	0,3071	-6,07 %
4	0,2763	-15,47 %
5	0,2683	-17,95 %
6	0,2843	-13,04 %
7	0,2647	-19,03 %
8	0,2633	-19,45 %
9	0,2634	-19,42 %
10	0,263	-19,53 %

Fonte: elaborado pelo autor

Analisando a Tabela 8, 9 e o Gráfico da Figura 11, observa-se que a perda

de massa apresenta tendência de redução gradual com o aumento do número de reutilizações, evidenciando a diminuição da capacidade abrasiva da areia. A partir da quarta reutilização, a redução ultrapassa 10 % em ambos os casos, e a partir da sexta, a queda excede 15 % para as amostras tratadas a 998°C, limite que, conforme relatado em estudos anteriores classificaria a areia utilizada como velha ou envelhecida, enquanto as amostras tratadas a 1038°C só atingiram esse pico de 15% na sexta reutilização, com isso fica perceptível que a amostra com dureza menor sofre maior interferência do reuso da areia, quando comparada a amostra de maior dureza deste trabalho.

Com o uso repetido, ocorre a fragmentação das partículas de sílica e o arredondamento de suas arestas, reduzindo a agressividade do material e, conseqüentemente, sua capacidade de remoção de material da superfície metálica. Esse comportamento é consistente com o desgaste progressivo das partículas abrasivas, que tendem a perder sua forma angular e se tornarem mais arredondadas com o uso contínuo, reduzindo assim sua capacidade de remoção de material. Além disso, a fragmentação das partículas pode contribuir para essa queda de desempenho, reforçando a importância de se estabelecer um limite de reaproveitamento seguro do abrasivo.

De acordo com Menegotti e Dias (2025), uma diminuição superior a 15% na perda de massa pode ser interpretada como um indicativo de envelhecimento do abrasivo, refletindo na perda de sua eficiência de corte. Assim, a partir do quarto ciclo de reutilização, o material já pode ser considerado parcialmente degradado para as amostras de 998°C e esse estado só foi alcançado na sexta reutilização para as amostras a 1038°C como visto anteriormente.

Apesar de pequenas oscilações nos ciclos seguintes possivelmente relacionadas à variabilidade natural do fluxo abrasivo e à distribuição granulométrica, nota-se que a tendência de estabilização ocorre entre a sétima e décima reutilização, onde a perda de massa se mantém em torno de 16% a 20%. Esses resultados reforçam que, a abrasividade do abrasivo é estabilizada após um determinado número de ciclos, apresentando desempenho significativamente inferior ao material novo, esse padrão de desgaste será mostrado no tópico de análise do MEV.

4.2 ANÁLISE MORFOLÓGICA DOS ABRASIVOS

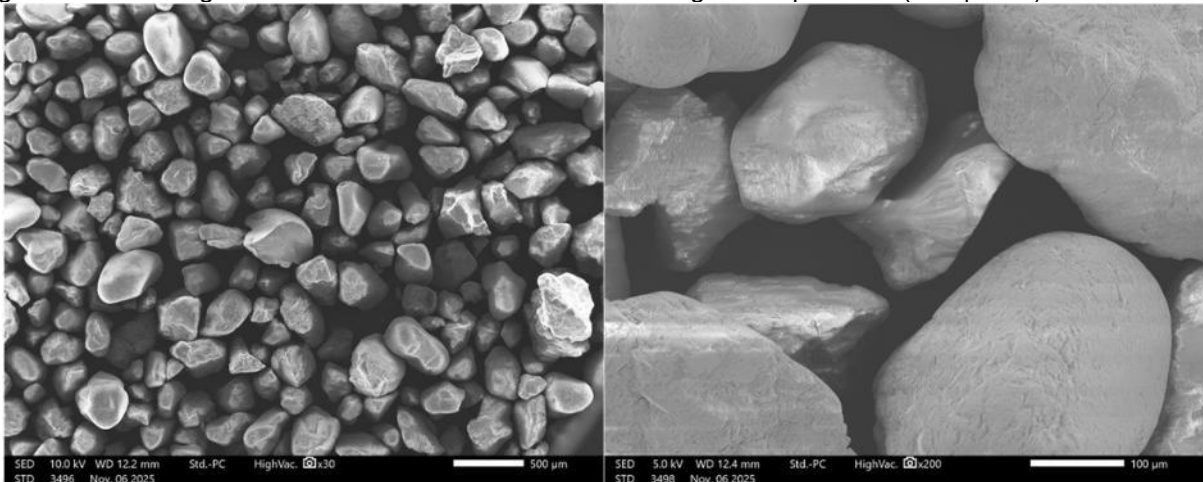
Com base nos resultados apresentados anteriormente no gráfico de perda de massa observa-se que as primeiras reutilizações do abrasivo (1^a, 2^a e 3^a) ainda se mantêm dentro de um comportamento considerado positivo, apresentando perda de massa controlada e uma degradação granulométrica compatível com o esperado para o início do processo de desgaste. Em outras palavras, nessas etapas iniciais, a areia preserva boa parte de sua eficiência abrasiva, o que justifica uma análise detalhada dessas condições.

Dessa forma, optou-se por direcionar a caracterização microestrutural no MEV especialmente para as reutilizações 1^o ensaio e 3^o ensaio, por representarem esse estágio inicial de uso, no qual o abrasivo ainda possui desempenho satisfatório e mudanças superficiais começam a surgir de forma mais sutil.

Por outro lado, conforme demonstrado nos mesmos resultados, a partir das reutilizações mais avançadas ocorre uma nova estabilização, porém fora do padrão aceitável de desempenho abrasivo. Nessas condições, o material já evidencia degradação significativa, refletida tanto na maior perda de massa das amostras quanto na alteração expressiva da distribuição de tamanhos das partículas.

Para compreender esse estágio crítico de deterioração, foram selecionadas também as reutilizações 5^x e 10^x, representando respectivamente um nível intermediário e um nível avançado de desgaste da areia. Essas condições permitem uma avaliação clara da progressão dos danos superficiais e da perda de angularidade, associado diretamente ao declínio do desempenho observado, para acompanhar essa progressão temos as imagens do MEV da areia nova, 1^o ensaio, 3^o ensaio, 5^o ensaio e 10^o ensaio.

Figura 12 - Morfologia da areia em estado de recebimento registrada por MEV (30× | 200x).



Fonte: elaborado pelo autor

A imagem obtida no MEV da areia nova conforme a Figura 12, revela partículas com morfologia predominantemente angular, típica de areias naturais pouco processadas. As superfícies apresentam textura relativamente lisa, com rugosidades e microfraturas distribuídas de forma irregular. Esse aspecto demonstra que as partículas passaram apenas por processos mecânicos e naturais de fraturamento, mantendo ainda boa parte de suas características originais de aresta, as microfraturas evidentes causadas pelo contato entre elas podem ser observadas.

A distribuição das formas mostra uma mistura de partículas mais arredondados e outros mais irregulares, porém sem sinais marcantes de deformações severas ou lascamentos intensos. Além disso, observa-se uniformidade dimensional razoável, sugerindo que o lote de areia possui um controle granulométrico adequado antes do uso no ensaio de abrasão.

No conjunto, essa morfologia inicial é importante pois estabelece a condição de referência para comparação com os grãos reutilizados. As características vistas aqui a superfícies menos danificadas, maior integridade das arestas e rugosidade moderada que representam o estado ideal da areia ao iniciar o ensaio, permitindo identificar posteriormente como o processo abrasivo modifica o formato, a integridade e a textura das partículas ao longo das reutilizações.

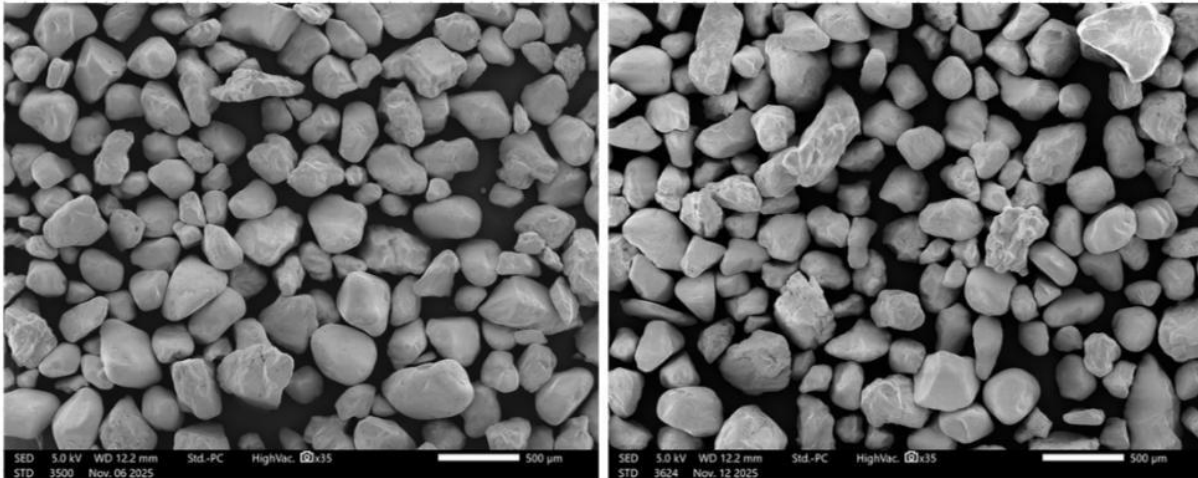
Para complementar a avaliação morfológica inicial, foi realizada uma ampliação aproximada de 200× da mesma amostra de areia nova. Essa

aproximação permite observar com maior clareza as características superficiais, bem como detalhes das arestas, porosidades e regiões de fratura presentes nos grãos. Enquanto a visão geral em baixa magnificação fornece um panorama da distribuição de formas e tamanhos, o aumento para 200× possibilita identificar características mais sutis que influenciam diretamente o comportamento abrasivo das partículas. Dessa forma, esta etapa oferece uma base mais detalhada para futuras comparações com as areias reutilizadas, evidenciando como as superfícies e geometrias são modificadas ao longo dos ciclos de abrasão.

Na ampliação de 200× é possível observar com maior nitidez as mesmas características identificadas na análise geral, porém agora com um nível de detalhe que evidencia melhor a natureza das superfícies. Os particulados apresentam morfologia predominantemente irregular, com arestas bem definidas e superfícies rugosas, típicas de areia nova não submetida a esforços mecânicos. Nota-se também a presença de pequenas fraturas naturais e micro projeções que contribuem para o seu alto potencial abrasivo, reforçando o comportamento observado nos ensaios iniciais.

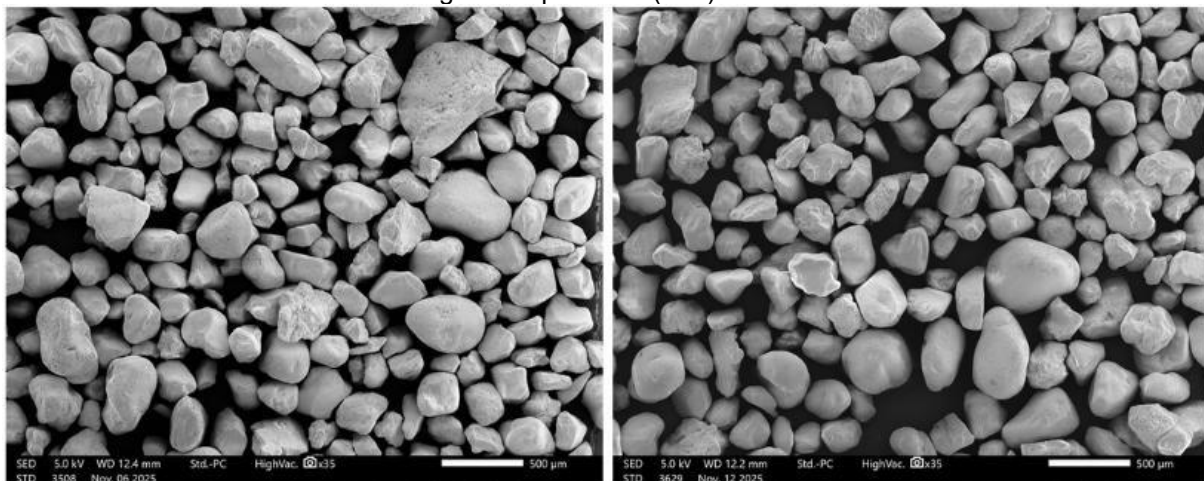
Assim, essa análise destaca o estado inicial da areia, evidenciando a textura e as irregularidades que caracterizam sua ação abrasiva antes de sofrer qualquer alteração no processo, a seguir temos as imagens do MEV para as reutilizações com perfis mais relevantes, sendo elas a primeira, terceira, quinta e décima reutilização. Essas análises serão responsáveis por representar o perfil de degradação do material.

Figura 13 - Morfologia da areia após a primeira reutilização, para a amostra tratada a 1038°C x 998°C, registrada por MEV (35x).



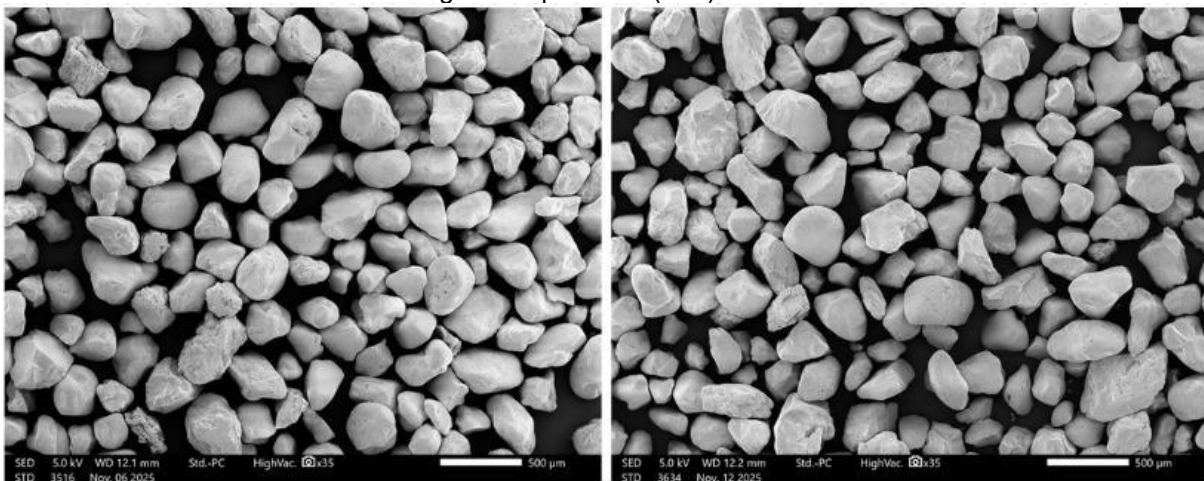
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 14 - Morfologia da areia após a terceira reutilização, para a amostra tratada a 1038°C x 998°C, registrada por MEV (35x).



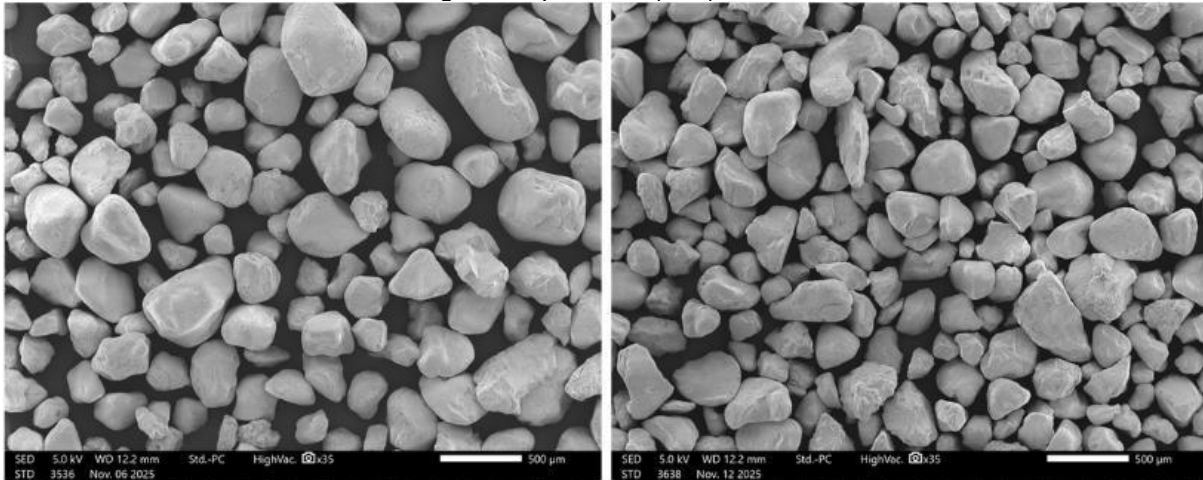
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 15 - Morfologia da areia após a quinta reutilização, para a amostra tratada a 1038°C x 998°C, registrada por MEV (35x).



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 16 - Morfologia da areia após a décima reutilização, para a amostra tratada a 1038°C x 998°C, registrada por MEV (35×).



Fonte: elaborado pelo autor

Nas partículas após a primeira reutilização conforme Figura 13, já se observam alterações sutis, mas significativas em relação a granulometria, quando comparadas ao estado original, alguns grãos começam a apresentar bordas menos definidas, sugerindo o início do processo de microfratura e arredondamento superficial causado pelo impacto repetido e pela compressão no contato abrasivo, a quantidade de partículas finas, resultante das fraturas começa a se evidenciar de forma mais expressiva.

As alterações morfológicas quando comparada à areia nova. Muitos dos cantos vivos presentes originalmente nos grãos começam a apresentar maior arredondamento, indicando o início do processo de desgaste abrasivo. Da mesma forma, os padrões de quebra, antes mais definidos e retilíneos, tornam-se visivelmente mais ondulados, resultado típico da ação repetida das superfícies de contato durante o ensaio.

Várias partículas apresentam planos de fratura, bordas serrilhadas e perda parcial das superfícies facetadas típicas do abrasivo novo. A presença de regiões lascadas e microfraturas ao longo das bordas indica que o abrasivo sofreu colapso por impacto e cisalhamento durante o contato repetido com a superfície metálica da amostra.

Essas mudanças morfológicas mostram que, mesmo após apenas uma reutilização, as partículas começam a perder sua nitidez geométrica, evoluindo para formas mais arredondadas e menos angulares. Esse comportamento é característico de abrasivos não metálicos submetidos a ciclos repetidos de

desgaste, nos quais microimpactos sucessivos promovem a fragmentação inicial, seguida por um progressivo suavizamento das arestas, fenômeno amplamente descrito na literatura clássica de abrasão (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Esses sinais de desgaste inicial indicam que, embora a estrutura macro permaneça preservada, a superfície dos grãos já começa a registrar os efeitos do uso, o que tende a evoluir de forma mais evidente nas reutilizações subsequentes.

Na terceira reutilização conforme Figura 14, já é possível observar uma transformação marcante no estado das partículas. Uma parte significativa das partículas apresenta superfícies mais lisas e suavizadas, consequência natural do desgaste contínuo provocado pelo atrito contra o corpo-de-prova e pela colisão entre partículas durante o ensaio, mais evidente nas partículas do ensaio das amostras a 1038°C. Esse comportamento é coerente em ambos os casos com o descrito por

Paiva e Pinedo (2025), que destacam que abrasivos submetidos a ciclos repetidos tendem a sofrer arredondamento progressivo devido à perda dos vértices mais frágeis. Em contrapartida, uma fração das partículas segue um comportamento distinto: devido ao acúmulo de tensões mecânicas e fadiga superficial, alguns grãos entram em colapso, resultando em fragmentos quebrados, de morfologia irregular, com cantos vivos, lascas destacadas e elevada aspereza. Esse mecanismo de fratura é amplamente associado ao desgaste de três corpos e também é mencionado por Menegotti e Dias (2025), que destacam que a fragmentação irregular tende a ocorrer quando partículas frágeis são submetidas a cargas repetidas, resultando na geração de finos e geometrias caóticas.

Além disso, torna-se perceptível um aumento expressivo de finos, consequência direta da fragmentação das partículas maiores, resultado que converge com a tendência apresentada no peneiramento. Segundo Paiva e Pinedo (2025), a formação de partículas muito finas reduz a eficiência do processo abrasivo, pois esses fragmentos passam a atuar mais como enchimento do que como agentes efetivos de desgaste.

Esses resultados reforçam que a degradação do abrasivo é dominada pelos mecanismos tribológicos do ensaio e não depende significativamente da condição térmica da amostra metálica ensaiada, já que os resíduos gerados em

ambas as temperaturas apresentam evolução morfológica praticamente equivalente.

Com a análise das amostras na quinta reutilização conforme Figura 15, verifica-se que as partículas apresentam tamanho visivelmente menor quando comparadas à areia nova e às primeiras reutilizações. Esse comportamento está em total concordância com os resultados de granulometria obtidos por peneiramento que será mostrado mais tarde, onde a fração retida nas malhas mais finas aumenta progressivamente com o número de ciclos. A morfologia das partículas já apresenta sinais claros de degradação acumulada. Observa-se que o conjunto granulométrico se torna visivelmente mais fino, com predominância de partículas pequenas resultantes de fraturas progressivas o comportamento coerente com os resultados obtidos nas peneiras.

Foi observado que neste estágio há uma quantidade elevada de partículas quebradas e fragmentos finos, que aparecem em abundância. Estes finos possuem morfologia irregular, com bordas irregulares e padrões de fratura mais caóticos, sugerindo colapso estrutural decorrente dos ciclos repetidos de impacto térmico e mecânico, mais evidentes na amostra tratada a 998°C.

Entre as partículas maiores ainda presentes, nota-se um padrão diferente das reutilizações anteriores: embora permaneçam angulares, muitas apresentam superfícies parcialmente planarizadas, como se tivessem passado por microdesgastes sucessivos que aplainam pequenos trechos da superfície. As pontas tornam-se menos definidas, mais arredondadas, e há uma tendência à redução do “poder cortante” da areia, o que indica diminuição da agressividade abrasiva.

De modo geral, a areia reutilizada 5 vezes apresenta um conjunto heterogêneo e parte constituída por fragmentos finos frágeis e outra por grãos desgastados, menos afiados e mais suavizados, refletindo uma condição avançada de fadiga do material abrasivo.

A décima reutilização conforme Figura 16, representa o limite extremo de uso da areia dentro das condições avaliadas, funcionando como um cenário de “abuso” do material. Nesse estágio, espera-se que os efeitos cumulativos do desgaste abrasivo, impacto mecânico e degradação térmica estejam plenamente desenvolvidos, resultando em alterações significativas na morfologia, na granulometria e no estado geral das partículas. Assim, a análise desta amostra

torna-se fundamental para compreender até que ponto a areia perde suas características funcionais e deixa de atender aos requisitos mínimos para o processo.

Na ampliação de 35 \times , observa-se que a morfologia geral da areia após dez reutilizações apresenta um nível elevado de degradação. A presença de partículas finas aumenta de forma muito evidente, indicando intensa fragmentação ao longo dos ciclos, como houve a metalização não se é possível identificar fragmentos de borracha do disco, porém em relação as primeiras reutilizações, a decima os resíduos estão com uma cor mais escura de forma bem evidentes. Além disso, é possível identificar um grande número de partículas quebradas e irregularmente fraturados.

Um ponto observado nas amostras reutilizadas dez vezes assim também visto a partir do sétimo reutilização é a tendência das partículas finas a se aglomerarem, formando pequenos conjuntos compactados entre si. Esse comportamento é esperado do ponto de vista físico: partículas muito pequenas possuem maior área superficial específica, o que intensifica forças de interação de baixa energia e principalmente forças de Van der Waals, atração eletrostática residual e até efeitos de umidade ambiente, que atuam como ponte de ligação. Por essa razão, os finos passam a aderir uns aos outros e também às partículas maiores, alterando drasticamente a fluidez e o comportamento abrasivo do conjunto, logo para controle de vazão no ensaio tivemos que controlá-lo de forma mais rigorosa, com dois a três testes de vazão.

Quando esses finos se acumulam entre as partículas maiores, ocorre um efeito de preenchimento, reduzindo a exposição das arestas ainda ativas. Isso faz com que a areia perca grande parte de sua efetividade e deixe de apresentar a ação de micro corte típica desejada no ensaio de abrasão. Em outras palavras, o material deixa de remover massa por corte e passa a deslizar com maior suavidade, efeito semelhante ao que a literatura descreve como "*respaw*" ou reempacotamento das partículas, no qual o abrasivo perde seu caráter cortante e assume um comportamento mais polido e rolante, isso será evidente na análise das pistas desgastadas das amostras.

Esse fenômeno é amplificado pelo fato de que, após muitos ciclos, a maior parte dos grãos está não apenas menor, mas também mais arredondada, com redução expressiva de cantos vivos. Ao mesmo tempo, os fragmentos quebrados

e altamente irregulares coexistem com essas partículas mais lisas, criando um sistema heterogêneo que favorece ainda mais o empacotamento e a formação de aglomerados.

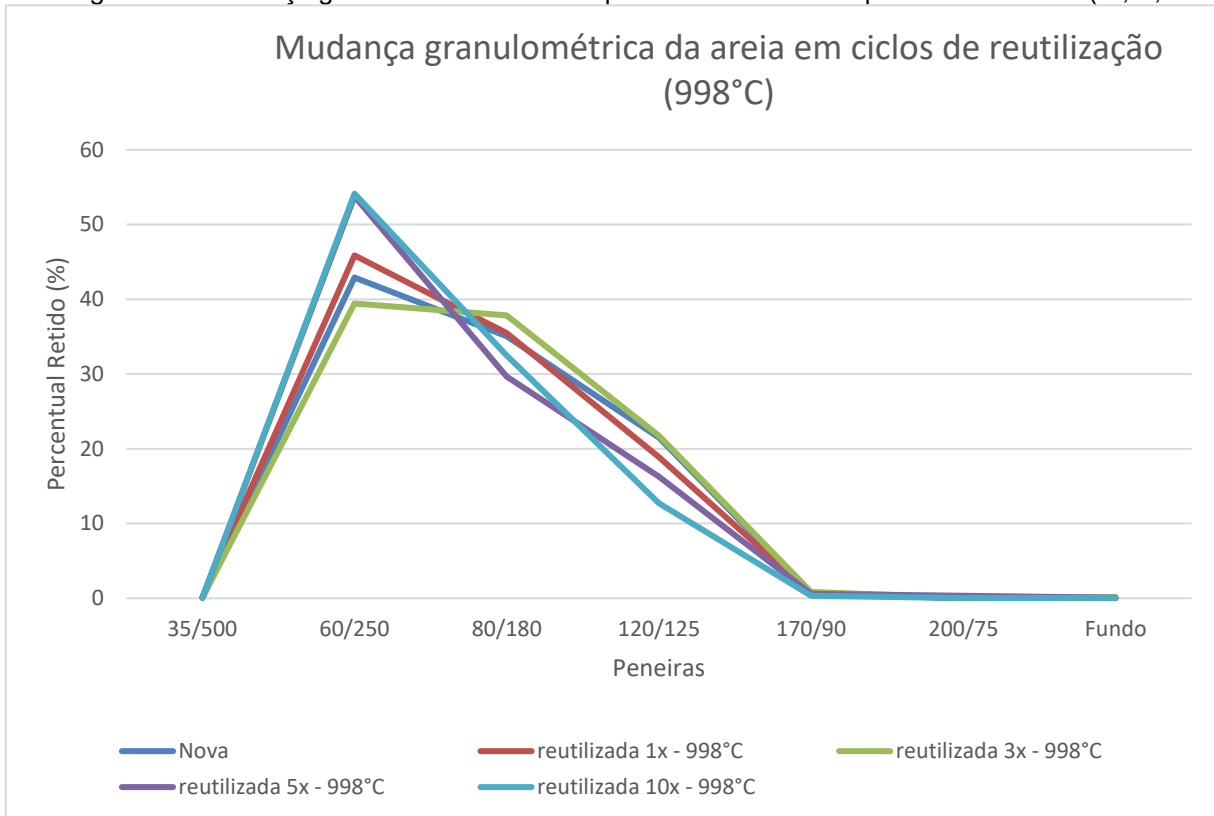
A consequência direta desse processo é uma perda extrema da capacidade abrasiva, confirmada tanto pela morfologia observada quanto pelos resultados de perda de massa. Com menos arestas cortantes expostas e uma fração crescente de finos aglomerados, a areia deixa de agir como um abrasivo efetivo e passa a atuar quase como um *“lubrificante particulado”*, reduzindo a eficiência do desgaste e tornando o ensaio praticamente inviável após essa quantidade de reutilizações.

4.3 ANÁLISE DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

A caracterização granulométrica reforça o diagnóstico observado no MEV: a diminuição progressiva do tamanho das partículas, acompanhada do aumento da fração de pó, correlaciona-se diretamente com a queda de desempenho medida quantitativamente. Para as amostras submetidas às condições mais severas, a redistribuição granulométrica apresenta tendência de estabilização em faixas mais finas, indicando que a areia passa a atuar mais como material de polimento do que como abrasivo efetivo.

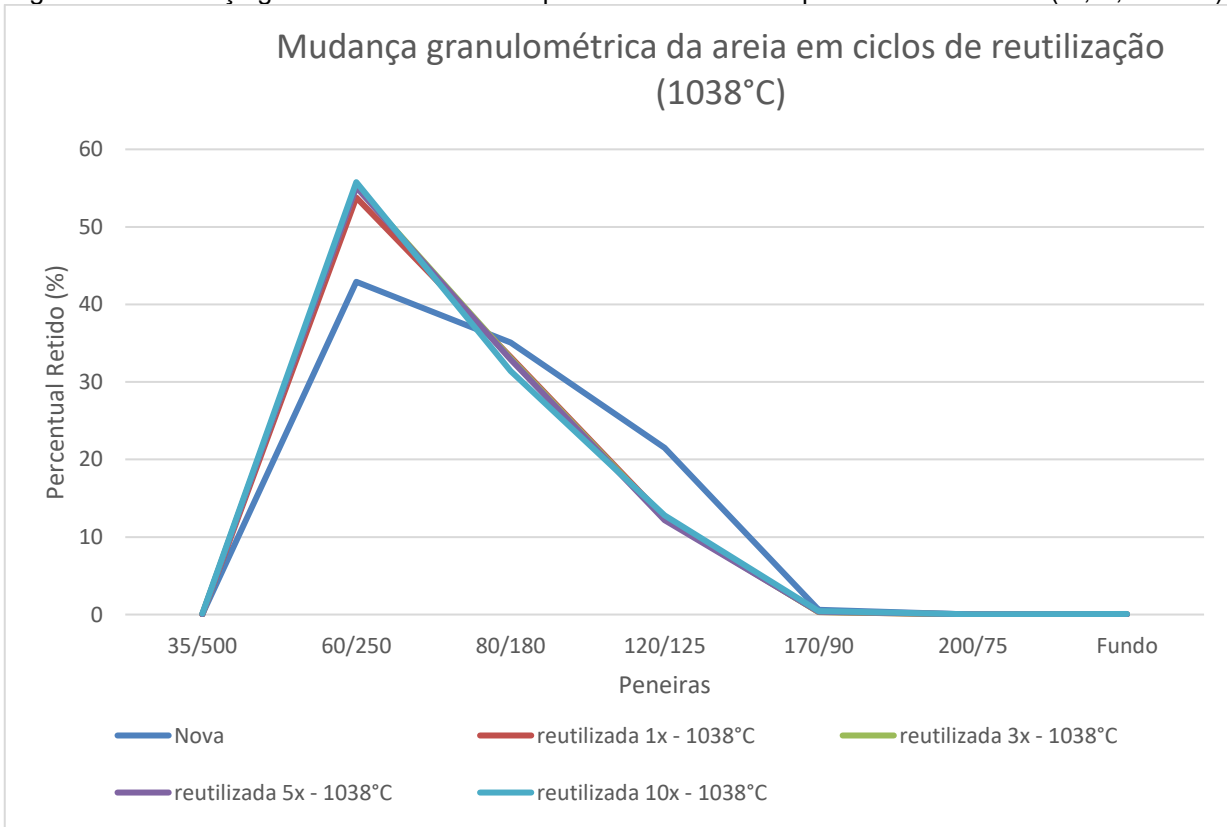
Assim, a integração entre o critério quantitativo (>15% de queda), a evolução morfológica das partículas (MEV) e a redistribuição granulométrica permite estabelecer uma fronteira técnica clara para a reutilização. Essa abordagem integrada evidencia que o fim da vida útil do abrasivo não ocorre apenas pela perda do tamanho original dos grãos, mas principalmente pela combinação entre desgastes superficiais, fragmentação progressiva e acúmulo de finos que prejudicam o mecanismo de corte. Dessa forma, o uso conjunto das três metodologias fornece uma avaliação mais robusta, precisa e tecnicamente fundamentada da eficiência abrasiva ao longo dos ciclos.

Figura 17 - Mudança granulométrica da areia para os ciclos mais impactantes A 998°C (1ª, 3ª, 5ª e 10ª).



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 18 - Mudança granulométrica da areia para os ciclos mais impactantes a 1038°C (1ª, 3ª, 5ª e 10ª).



Fonte: elaborado pelo autor

A distribuição granulométrica apresentada na Figura 17 e 18 evidencia uma tendência consistente de redução do tamanho médio das partículas ao longo dos ciclos de reutilização do abrasivo. O pico de retenção na peneira 60/250, que já é dominante na condição de areia nova, mantém-se como a fração predominante mesmo nas reutilizações de 5× e 10×, tanto para amostras tratadas a 998 °C quanto a 1038 °C. Esse comportamento indica que, embora ocorra fragmentação progressiva das partículas maiores, o processo tende a convergir para um equilíbrio granulométrico, no qual grande parte das partículas se estabiliza em tamanhos intermediários.

Em vários ciclos, observa-se um aumento acentuado da fração 60/250, fenômeno que é explicado porém não comprovado pela perda na quantidade de finos decorrente do ensaio, enquanto temos uma tendência a aglomeração das partículas, durante o processo os finos são ejetados do sistema, se encontrando nas paredes do reservatório e até mesmo nem chegam a participar da reutilização, desta forma o AFS tende a diminuir, e no contexto granulométrico geral tendemos a ter partículas se acumulando em 60/250 que seria uma média entre os particulados.

Em vários ciclos, observa-se um aumento acentuado da fração 60/250, fenômeno que sugere a quebra de partículas originalmente presentes na peneira 35/500, as quais migram para tamanhos intermediários devido aos mecanismos de fratura induzidos pelo ensaio. Esse efeito é compatível com a redução paralela da massa retida na peneira 35/500, sobretudo nos primeiros ciclos, quando a abrasão é mais severa e a degradação inicial do abrasivo é mais intensa.

As frações mais finas (120/125, 170/90 e 200/75) exibem um comportamento mais estável, com variações de menor magnitude ao longo das reutilizações. A tendência geral é de pequena redução desses finos com o aumento dos ciclos, o que pode estar associado a dois mecanismos complementares já descritos na literatura para o ensaio ASTM G65:

1. Perda de partículas muito finas por aderência à roda de borracha, ao corpo de prova ou ao sistema de exaustão, diminuindo sua permanência no circuito abrasivo;
2. Aglomeração parcial desses finos, formando agregados que passam a ser classificados em frações intermediárias, especialmente a 80/180.

O comportamento observado no fundo, com aumentos pontuais nos ciclos iniciais reforça a ocorrência de fragmentação primária das partículas. Entretanto, com o avanço das reutilizações, essa fração fina tende a diminuir, indicando que o sistema atinge um novo estado de equilíbrio, no qual a taxa de geração de finos é compensada por sua perda ou reclassificação.

Quando a granulometria é analisada por meio do índice AFS (Módulo de finura), apresentado anteriormente, observa-se novamente essa tendência de estabilização. O AFS conforme Tabela 10, confirma uma redução gradual, porém de baixa expressividade, refletindo a predominância de partículas em faixas intermediárias e a menor presença de finos ultrapequenos. Essa convergência granulométrica é coerente com a diminuição da perda de massa das amostras a partir de ciclos intermediários, uma vez que abrasivos mais finos e arredondados tendem a produzir desgaste menos agressivo.

Tabela 10 - Comparação da distribuição granulométrica em AFS (Módulo de finura).

Reutilização	AFS – Amostra a 1038°C	AFS – Amostra a 998°C
Nova (0x)	59,29	59,29
1x	55,29	58,34
2x	56,75	59,46
3x	55,11	60,46
4x	57,84	59,36
5x	55,13	56,83
6x	55,37	55,97
7x	54,65	59,16
8x	54,45	54,44
9x	55,27	56,74
10x	55,24	55,33

Fonte: elaborado pelo autor

A amostra tratada a 998 °C apresentou desempenho superior em termos de Módulo de finura AFS quando comparada à amostra temperada a 1038 °C. Isso pode ser observado pelos resultados de perda de massa obtidos nos ensaios. Embora a hipótese inicial previsse que a peça mais dura (1038 °C) levaria à fratura precoce das partículas e, portanto, a uma perda acelerada da eficiência do abrasivo, os resultados experimentais mostraram o contrário conforme mostrado anteriormente e na Tabela 7 e 8 a redução relativa na perda

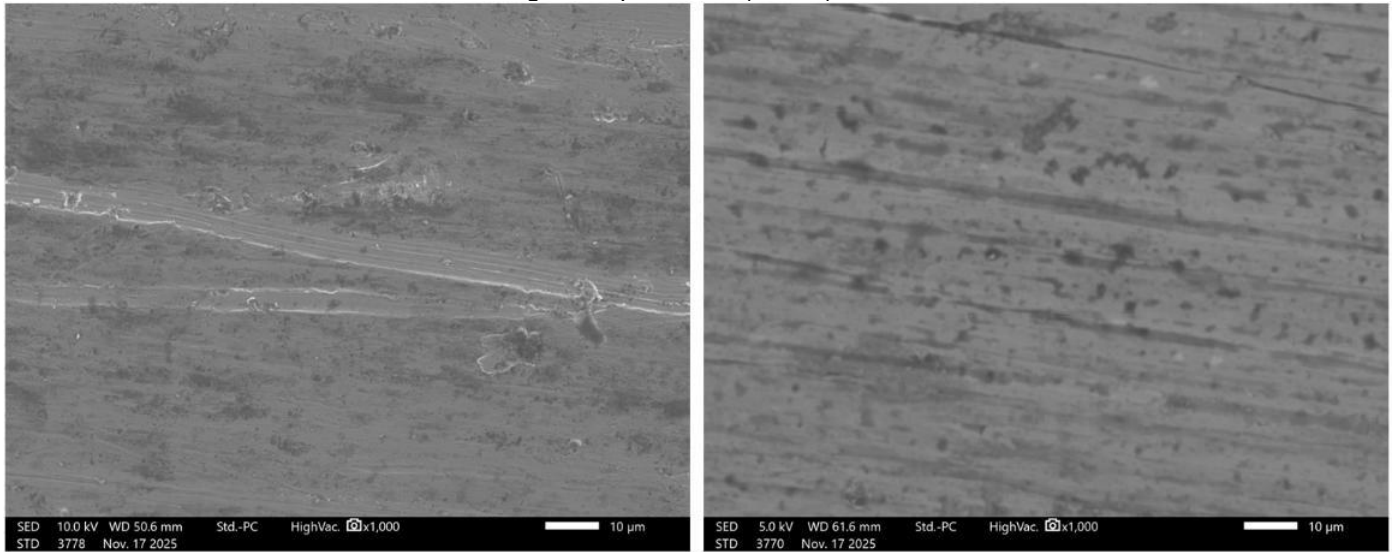
de massa ultrapassou 15% mais cedo nas amostras tratadas a 998 °C (4º ciclo) do que nas tratadas a 1038 °C (6º ciclo).

As micrografias mostraram que a eficiência abrasiva não está associada apenas à quebra dos grãos, mas também à evolução da morfologia das superfícies. Nos primeiros ciclos, mesmo com perdas de massa ainda elevadas, já é possível identificar sinais de desgaste superficial, como arredondamento das arestas, formação de estrias e microtrincas. Esses mecanismos são precursores da queda de eficiência e antecedem a fragmentação mais severa. Conforme os ciclos avançam, há aumento expressivo da quantidade de partículas finas e fragmentos irregularmente quebrados, cuja presença é confirmada tanto pelo MEV quanto pela redução dos diâmetros médios obtidos nas análises granulométricas. Esses finos tendem a se aglomerar e empacotar entre os grãos maiores, reduzindo a capacidade de corte por limitar o contato efetivo das arestas abrasivas com a superfície ensaiada.

4.4 IMAGENS DAS PISTAS DE DESGASTE

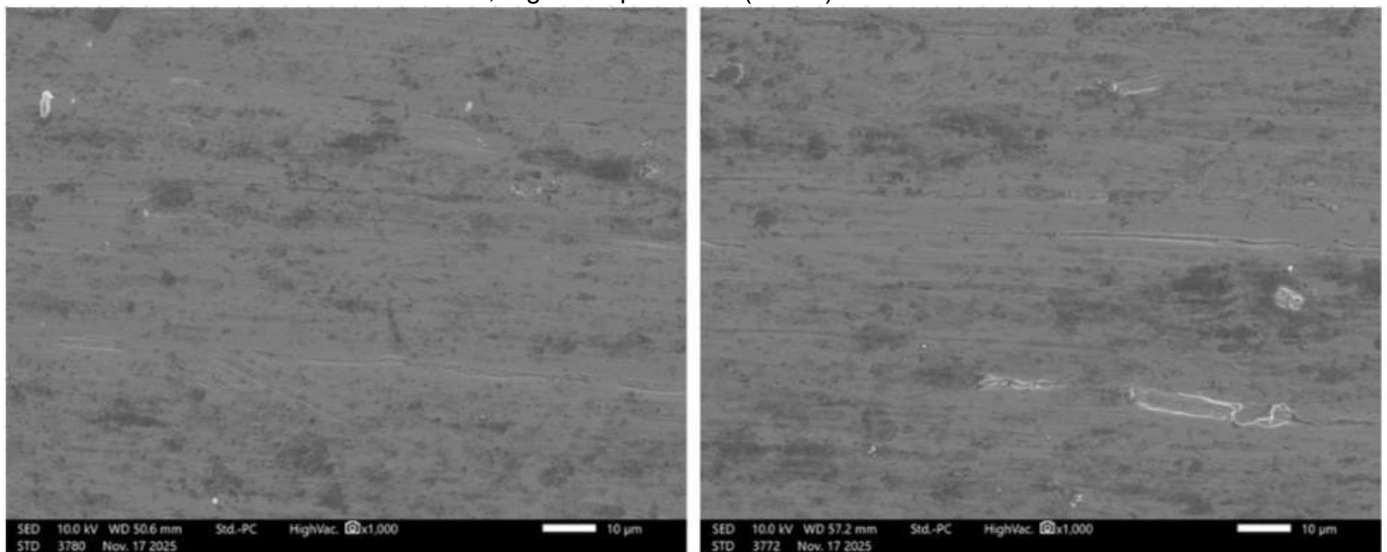
Como forma de análise complementar das amostras, também foi realizada a caracterização das pistas de desgaste, essa região gerada no contato abrasivo durante o ensaio. A observação dessas pistas em microscopia eletrônica de varredura (MEV) é essencial, pois permite identificar os mecanismos de desgaste atuantes, como microcorte, microlascamento, deformação plástica, adesão localizada e incrustação de partículas de sílica. Além disso, a análise morfológica da pista possibilita verificar a uniformidade do ensaio, detectar possíveis concentrações de tensão na superfície e avaliar a interação entre o material da amostra e os resíduos abrasivos. Dessa forma, o MEV das pistas não apenas complementa os resultados de perda de massa, mas também fornece evidências diretas sobre como o material responde ao desgaste e como os mecanismos evoluem ao longo dos ciclos de reutilização do abrasivo, abaixo temos as imagens tiradas do MEV para as pistas.

Figura 19 - Morfologia do centro da pista, após o primeiro ensaio para a amostra tratada a 1038°C x 998°C, registrada pelo MEV (1000x).



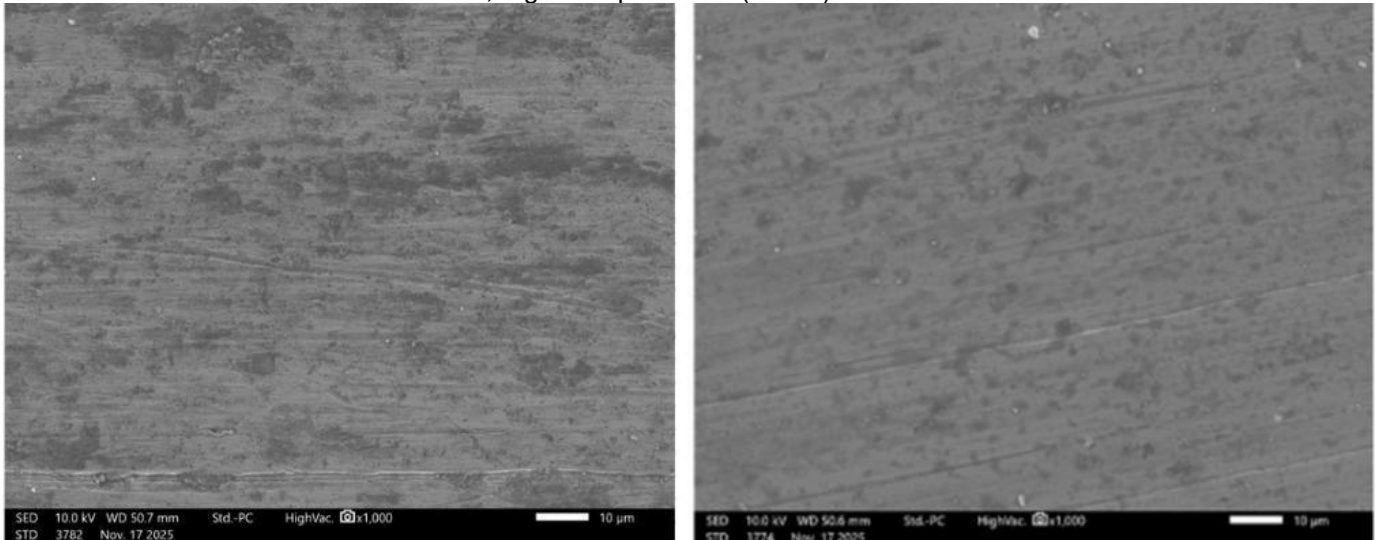
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 20 - Morfologia do centro da pista, após o terceiro ensaio para a amostra tratada a 1038°C x 998°C, registrada pelo MEV (1000x).



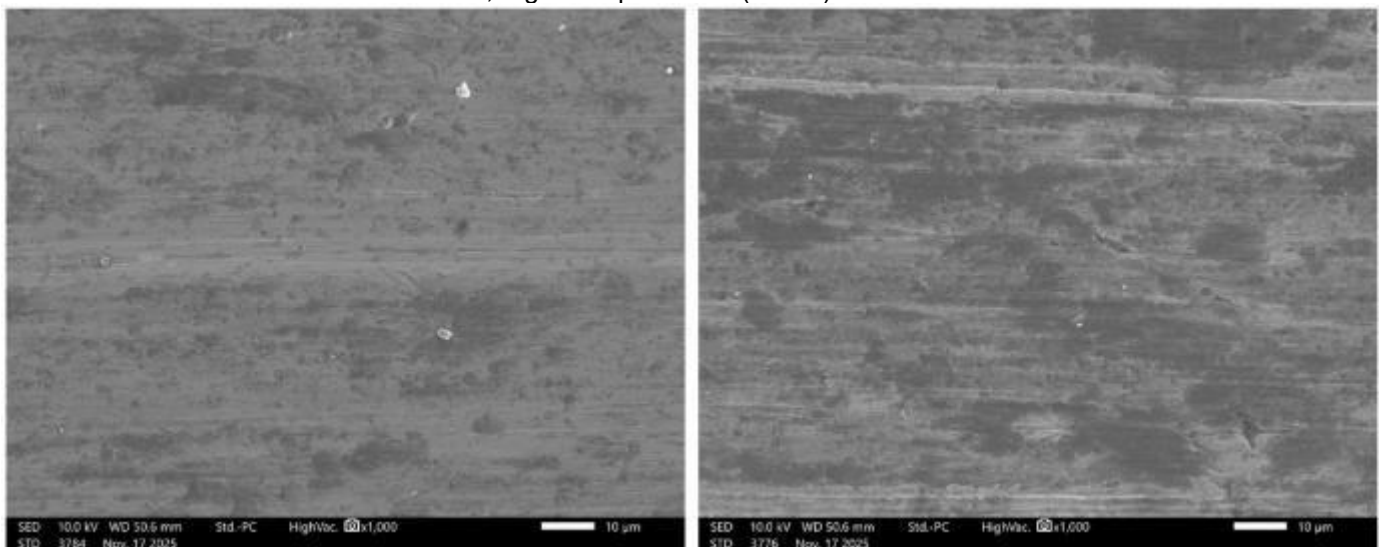
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 21 - Morfologia do centro da pista, após o quinto ensaio para a amostra tratada a 1038°C x 998°C, registada pelo MEV (1000x).



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 22 - Morfologia do centro da pista, após o décimo ensaio para a amostra tratada a 1038°C x 998°C, registada pelo MEV (1000x).



Fonte: elaborado pelo autor

As imagens das pistas de desgaste obtidas por MEV após o primeiro ensaio, Figura 19, revelam diferenças importantes entre as amostras tratadas a 998 °C (direita) e 1038 °C (esquerda), refletindo o efeito da dureza e da microestrutura na interação com o abrasivo durante o ensaio.

Na amostra tratada a 1038 °C (imagem à esquerda), observa-se a presença de sulcos mais definidos e contínuos, características típicas de um mecanismo predominante de microcorte. Além disso, é possível notar regiões com deformação plástica localizada e pequenos fragmentos destacáveis,

indicando que a superfície sofreu ação mais agressiva das partículas abrasivas. Essa resposta é coerente com a maior quantidade de austenita retida esperada nessa condição, que tende a reduzir a dureza final e aumentar a suscetibilidade ao sulcamento profundo.

Por outro lado, a amostra tratada a 998 °C (imagem à direita) apresenta uma superfície com sulcos mais rasos e menos contínuos, bem como uma aparência geral mais homogênea. A presença de marcas finas e paralelas, sem grandes regiões de deformação localizada, sugere um mecanismo de desgaste mais suave, caracterizado predominantemente por micropolimento ou microcorte menos severo. Esse comportamento está alinhado com a maior dureza obtida na têmpera a 998 °C, que favorece maior resistência à penetração das partículas abrasivas.

- 998 °C → maior rugosidade (1,54–2,75 μm) favorece a retenção de detritos acelerando o empacotamento dos finos e arredondamento dos pontos vivos, reduzindo a capacidade de corte;
- 1038 °C → menor rugosidade (0,05–0,70 μm) aumenta a incrustação deformação plástica o que permite que mesmo os fragmentos gerados por fratura da areia continuem atuando como abrasivos ativos por mais ciclos.

De modo geral, a comparação entre as duas condições mostra que o aumento da temperatura de austenitização para 1038 °C resultou em uma superfície mais vulnerável ao ataque abrasivo, enquanto o tratamento a 998 °C proporcionou maior resistência ao desgaste, refletida na morfologia menos danificada da pista.

As imagens obtidas após o terceiro ensaio de desgaste, Figura 20, mostram pistas significativamente mais homogêneas em comparação com os estágios iniciais de abrasão, indicando que o regime de desgaste já se estabilizou após sucessivas passagens do abrasivo.

Observa-se que ambas as superfícies apresentam sulcos finos e contínuos, distribuídos de forma relativamente uniforme ao longo da área analisada. Isso indica predominância do microcorte leve, com menor evidência de deformação plástica localizada quando comparado aos primeiros ensaios. A superfície apresenta também pequenos pontos escuros e regiões discretas de microfratura superficial, que podem estar associados ao impacto de partículas

menores ou à ação combinada de partículas fragmentadas presentes após várias reutilizações.

É possível notar que os sulcos tendem a ser mais suaves e menos aprofundados, o que sugere duas interpretações importantes:

- Abrasivo mais degradado: após o terceiro ciclo, a areia utilizada já apresenta maior proporção de partículas menores e com arestas menos agudas, reduzindo a severidade do desgaste.
- Transição para regime de desgaste mais estável: com a diminuição progressiva das partículas grandes e mais agressivas, o desgaste tende a se tornar mais repetitivo e menos severo.

Além disso, não se observam sulcos largos nem regiões extensas de remoção abrupta de material na amostra tratada a 1038°C, reforçando que o abrasivo já perdeu parte significativa de sua capacidade de fragmentação e penetração, enquanto ainda conseguimos ver esses fenômenos na amostra tratada a 998°C, o que condiz com os resultados de perda de massa e MEV das partículas. Por outro lado, analisando em um âmbito geral essas observações corroboram a tendência geralmente relatada na literatura, na qual os primeiros ciclos representam a fase de maior degradação do abrasivo, enquanto ciclos posteriores tendem a gerar pistas menos agressivas e mais uniformes, influenciando diretamente a taxa de desgaste obtida.

As imagens obtidas após a décima reutilização da areia, Figura 22, evidenciam uma mudança expressiva no padrão de desgaste das amostras, indicando um regime abrasivo significativamente menos severo. As pistas mostram sulcos muito mais rasos e descontínuos, com redução marcante da nitidez das marcas características do microcorte, quando comparadas aos ensaios anteriores.

A superfície apresenta um aspecto mais “alisado”, com predomínio de microabrasão por fadiga e microdesgaste superficial, sugerindo que as partículas de sílica já se encontram bastante degradadas. Após dez ciclos, a maior parte das partículas maiores e mais angulares já foi fragmentada, restando um conjunto predominante de partículas finas, arredondadas e com menor capacidade de penetrar no material. Isso reduz a energia aplicada localmente e,

consequentemente, a severidade dos sulcos.

Também se observa a presença de regiões mais escuras e áreas levemente polidas, indicativas de:

- Rolamento predominante das partículas (em vez de corte),
- Baixa ocorrência de fratura frágil da superfície,
- Menor remoção volumétrica de material,
- Distribuição mais homogênea das cargas abrasivas, típica de abrasivos muito finos.

Os sulcos mais evidentes aparecem como linhas finas e longas, porém pouco profundas, reforçando que a ação abrasiva ocorre principalmente por microdeslizamento e não mais por microcorte agressivo. Esse comportamento confirma que, após múltiplas reutilizações, o abrasivo perde sua efetividade inicial tanto na capacidade de fragmentação quanto na capacidade de gerar desgaste significativo. Consequentemente, a taxa de desgaste tende a diminuir, assim como a severidade das marcas observadas nas pistas.

5 CONCLUSÃO

Ao relacionar as mudanças granulométricas observadas com o critério de queda de eficiência, verificou-se que a amostra tratada a 998 °C ultrapassa o limite de 15% de redução já na quarta reutilização, enquanto a amostra tratada a 1038 °C mantém sua eficiência até aproximadamente o sexto ciclo. Essa diferença pode ser explicada principalmente pela interação entre a dureza da peça ensaiada e a rugosidade superficial do material. No caso da amostra a 998 °C, a maior rugosidade (1,54–2,75 μm) favorece a retenção de detritos e a deformação plástica, acelerando o empacotamento dos finos e o arredondamento dos pontos vivos da areia, o que reduz a capacidade de corte. Já a amostra a 1038 °C, com rugosidade menor (0,05– 0,70 μm), permite maior incrustação e quebra dos pontos vivos, fazendo com que os fragmentos gerados por fratura continuem atuando como abrasivos ativos por mais ciclos.

As observações realizadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) confirmam essa interpretação. Nas primeiras reutilizações predominam grãos ainda angulares, com desgaste superficial moderado. À medida que os ciclos avançam, surgem fraturas irregulares, partículas finas aglomeradas, perda acentuada das arestas cortantes, superfícies mais lisas devido à abrasão repetida e maior heterogeneidade entre grãos inteiros e fragmentados. Esses fenômenos microestruturais coincidem diretamente com a redistribuição granulométrica observada nos gráficos, reforçando que a queda da eficiência abrasiva resulta da combinação simultânea do arredondamento e desgaste superficial dos grãos, fragmentação progressiva, aumento da fração de finos, empacotamento que bloqueia o contato abrasivo efetivo e diminuição do poder de corte global.

Dessa forma, a análise integrada dos métodos utilizados demonstra que a vida útil da areia de sílica não depende apenas da fratura dos grãos, mas de um balanço complexo entre degradação morfológica, redistribuição granulométrica e interação com o material ensaiado. Os resultados permitem estabelecer um critério de descarte mais preciso e tecnicamente fundamentado, oferecendo uma contribuição significativa para a otimização de ensaios de abrasão e para a definição de limites de reutilização da areia sem comprometer a confiabilidade dos resultados.

REFERÊNCIAS

ALVES, Maria Bernadete Martins; ARRUDA, Susana Margareth. Como fazer referências: bibliográficas, eletrônicas e demais formas de documento. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Biblioteca Universitária, c2001. Documento não publicado.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10520: informação e documentação: citações em documentos: apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6024: informação e documentação: numeração progressiva das seções de um documento escrito: apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2012a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6027: informação e documentação – sumário – apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2012b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14724: informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Normas de apresentação tabular. Rio de Janeiro: IBGE, 1993. Disponível em:
<http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/monografias/GEBIS%20-%20RJ/normastabular.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico. Rio de Janeiro, [2010]. Disponível em:
<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/educacao/9662-censo-demografico-2010.html?=&t=resultados>. Acesso em: 29 mar. 2022.

SACCOL, Amarolinda Zanela; REINHARD, Nicolau. Tecnologias de informação

móveis, sem fio e ubíquas: definições, estado-da-arte e oportunidades de pesquisa. RAC: Revista de Administração Contemporânea, v.11, n.4, 2007.

SANTA CATARINA. Secretaria de Estado do Planejamento.

[Indicadores de Educação]: número de Escolas da Rede Estadual – Total. Santa Catarina, [2015]. Disponível em: https://sites.google.com/a/spg.sc.gov.br/portal/indicadores/ind_educacao/instituicoes-de-ensino/escolas/rede-estadual. Acesso em: 28 mar. 2022.

AQUARO, D. Erosion due to the impact of solid particles of materials resistant at high temperature. *Meccanica*, v. 41, p. 539-551, 2006. Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11012-006-9002-1>. Acesso em: 13 out. 2025.

HOCKEY, B. J.; WIEDERHORN, S. M. Erosion of Brittle Materials by Solid Particle Impact. In: BRADT, R. C.; HASSELMAN, D. P. H.; LANGE, F. F. (Eds.). *Fracture*

Mechanics of Ceramics. Boston: Springer, 1978. p. 379-402. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4615-7017-2_22. Acesso em: 13 out. 2025.

SCHNEEMANN, K. Abrasion and Erosion. *Elementos de Máquinas*, 2012. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/68767220/abrasion-and-erosion>. Acesso em: 13 out. 2025.

EDIRIWEERA, M.; CHLADEK, J.; RATNAYAKE, C. Effect of impact angle, exposure time, and particle size on impact erosion. *Particulate Science and Technology*, v. 39,

n. 1, p. 10-18, 2019. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02726351.2019.1663328>. Acesso em: 13 out. 2025.

ABOUEL-KASEM, A. Particle Size Effects on Slurry Erosion of 5117 steels. *J. Tribol.*,

v. 133, n. 1, 2011. Disponível em:
<https://www.asmedigitalcollection.asme.org/tribology/article-abstract/133/1/014502/468707>. Acesso em: 13 out. 2025.

ARAÚJO, M. D.; SANTOS, L. A.; FERREIRA, T. R. Estudo comparativo do desgaste abrasivo de dois corpos em superfícies tratadas termicamente. *Revista Matéria*, v. 27, n. 2, p. 1-10, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/XYZ123>. Acesso em: 13 out. 2025.

MOREIRA, G. M. et al. Estudo tribológico do desgaste abrasivo entre metais e cerâmicas técnicas. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 9, n. 6, p. 13487–13495, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785420308412>. Acesso em: 13 out. 2025.

OLIVEIRA, R. C.; LIMA, F. A.; CORRÊA, E. C. Influência de revestimentos duros aplicados por aspersão térmica no desgaste por atrito seco. *Surface and Coatings Technology*, v. 426, 127789, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127789>. Acesso em: 13 out. 2025.

RODRIGUES, F. J. et al. Efeito do tratamento superficial na resistência ao desgaste por deslizamento em contato de dois corpos. *Tribology International*, v. 180, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X23000217>. Acesso em: 13 out. 2025.

SILVA, R. L.; GOMES, J. R.; PEREIRA, F. M. Análise comparativa entre desgaste de dois e três corpos utilizando ensaio pin-on-disk. *Revista Brasileira de Eng. Mecânica*, v. 43, n. 1, p. 45–53, 2021. Disponível em: <https://www.rbem.org.br/2021/v43n1/desgaste-pin-on-disk>. Acesso em: 13 out. 2025.

HU, Q.; JI, D.; SHEN, M.; ZHUANG, H.; YAO, H.; ZHAO, H.; GUO, H.; ZHANG, Y.

Three-Body Abrasive Wear Behavior of WC-10Cr₃C₂-12Ni Coating for Ball Mill Liner Application. *Materials*, v. 15, n. 13, 4569, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma15134569>. Acesso em: 13 out. 2025. [MDPI](#)

PURBA, R. H.; SHIMIZU, K.; KUSUMOTO, K. Three-Body Abrasive Wear-Resistance Characteristics of a 27Cr-Based 3V-3Mo-3W-3Co Multicomponent White Cast Iron with Different Ti Additions. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, v. 7, n. 1, 21, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jmmp7010021>. Acesso em: 13 out. 2025. [MDPI](#)

YUAN, W.; WANG, H.; GUO, Q.; WANG, W.; ZHU, Y.; YU, J.; YANG, X. Study on Wear Mechanism of Helical Gear by Three-Body Abrasive Based on Impact Load. *Materials*, v. 15, n. 12, 4135, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma15124135>. Acesso em: 13 out. 2025. [MDPI](#)

LI, Y.; SCHREIBER, P.; SCHNEIDER, J. et al. Tribological mechanisms of slurry abrasive wear. *Friction*, v. 11, p. 1079-1093, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40544-022-0654-1>. Acesso em: 13 out. 2025. link.springer.com

ALVES, Rodrigo Henrique; SILVA, Danilo Martins; FERREIRA, André Luiz. Influência da morfologia de abrasivos no desgaste de ligas metálicas. *Revista Matéria*, Rio de Janeiro, v. 26, n. 3, p. e-12500, 2021. DOI: 10.1590/S1517-707620210003. Acesso em: 15 out. 2025.

PINEDO, Carlos Eduardo. Estudo das interações tribológicas entre aço inoxidável martensítico e abrasivos não metálicos. *Revista Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, São Paulo, v. 22, n. 1, p. 56–63, 2025. ISSN 1517-8048. Acesso em: 15 out. 2025.

SILVA, Amanda Costa da; OLIVEIRA, Tiago Luiz de; PINEDO, Carlos Eduardo. Efeitos de abrasivos cerâmicos no desgaste abrasivo de aços tratados termicamente. *Materials Research*, São Carlos, v. 25, n. 4, p. e20220081, 2022. DOI: 10.1590/1980- 5373-MR-2022-0081. Acesso em: 15 out. 2025.

SOUZA, Lucas Henrique de; FERNANDES, Bruno Cássio; RODRIGUES, Marcos Vinícius. Influência do tipo de abrasivo no comportamento ao desgaste de aços temperados. *Revista Científica da Engenharia Mecânica*, Curitiba, v. 10, n. 2, p. 45– 52, 2023. ISSN 2447-4269. Acesso em: 15 out. 2025.

CASILA INFRACON. *Silica Sand – Composition and Characteristics*. Disponível em: <https://casilainfra.com/portfolio/silica-sand-composition-and-characteristics/>. Acesso em: 15 out. 2025.

NICCHU CO., LTD. *Silica Sand*. Disponível em: <https://www.blast.co.jp/english/index.php/abrasive/detail/14>. Acesso em: 15 out. 2025.

HAHN, H.; KIM, J.; LEE, S. *Granulometric and Abrasive Properties of Silica Sand for Industrial Applications*. *Journal of Materials Science*, v. 58, n. 3, p. 1234–1245, 2024. DOI: 10.1007/s11041-024-01567-2.

ARCHARD, J. F. *Contact and rubbing of flat surfaces*. *Journal of Applied Physics*, v. 24, n. 8, p. 981-988, 1953. DOI: 10.1063/1.1721448. Disponível em: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1721448>. Acesso em: 15 out. 2025.

SILVA, R. F.; SOUZA, M. R. *Fatores que influenciam o desgaste abrasivo: revisão teórica*. *Revista Brasileira de Engenharia Mecânica*, v. 28, n. 2, p. 150-163, 2023. Disponível em: <https://www.rbem.eng.br/vol28num2/silva2023>. Acesso em: 15 out. 2025.

TANAKA, K.; YAMAMOTO, H. *Energy analysis of abrasive wear processes*. Tribology International, v. 172, p. 107837, 2024. DOI: 10.1016/j.triboint.2023.107837.

HUTCHINGS, I. M.; SHIPWAY, P. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. 3. ed. Butterworth-Heinemann, 2017.

RASTEGAR, M.; POURAKBAR, S.; TAHERI, M. *Effect of Fine Particles on Abrasive Efficiency in Rubber Wheel Tests*. Tribology International, v. 185, p. 108512, 2023. DOI: 10.1016/j.triboint.2023.108512.

ASTM G65-17. *Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*. ASTM International, 2017. Disponível em: <https://www.astm.org/g0065-17.html>. Acesso em: 15 out. 2025.

ASTM G65-17. *Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*. ASTM International, 2017. Disponível em: <https://www.astm.org/g0065-17.html>. Acesso em: 15 out. 2025.

ISO 4649:2018. *Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of abrasion resistance using a rotating cylindrical drum device*. International Organization for Standardization, 2018. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/69026.html>. Acesso em: 15 out. 2025.

CORREIA, L.; MIRANDA, M. Evolution of Abrasive Particle Morphology in Multi-Cycle Wear Testing. *Wear*, v. 488–489, p. 204110, 2022.

ZHANG, Y. et al. Influence of Particle Shape on Abrasive Wear Resistance of Metallic Materials. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 11, p. 124–135, 20