

ANÁLISE DO DESGASTE POR DESLIZAMENTO OSCILATÓRIO DE LIGA DE ALUMÍNIO UTILIZADA PARA EPIS DE MONTANHISMO

**Daniel Strieder Beier, daniel.beier@edu.pucrs.br
Prof. Dr. Carlos Alexandre dos Santos.**

Resumo. *A segurança na prática de esportes é fundamental para torná-los cativantes para um maior número de indivíduos. Em modalidades envolvendo a travessia em neve e gelo, utiliza-se equipamentos de proteção individual (EPIs) que desempenham a função de prevenção de escorregamentos e quedas. Por conta do seu papel crucial, esses EPIs precisam ser fabricados a partir de materiais que possuam resistência adequada aos desafios em ambientes extremos. O objetivo deste trabalho foi realizar um estudo sobre os efeitos do desgaste por deslizamento oscilatório no alumínio 6061 na condição T6 (endurecido por precipitação – solubilizado e envelhecido artificialmente), liga amplamente utilizada na fabricação de diversos EPIs para montanhismo devido à sua leveza e resistência mecânica. A metodologia adotada inclui a revisão teórica das propriedades da liga, análise das normas aplicáveis para determinação dos parâmetros de teste e a preparação de corpos de prova para a realização dos ensaios laboratoriais. Foi avaliado o volume aproximado de material desgastado para dois cenários de aplicação de carga normal: 1 N e 5 N. Os ensaios realizados demonstraram que, sob condições de temperatura e umidade laboratoriais, o volume de material desgastado nas amostras da liga de alumínio 6061-T6 sofre direta influência da carga aplicada. Os resultados também indicaram uma diminuição no coeficiente de atrito cinético com o aumento da carga.*

Palavras-chave: *travessia em neve e gelo, equipamentos de proteção individual (EPIs), alumínio 6061-T6, resistência mecânica, coeficiente de atrito cinético.*

1. INTRODUÇÃO

A prática de atividades esportivas atende a uma ampla gama de necessidades relacionadas ao desenvolvimento multilateral da personalidade e com a melhoria de competências, com impacto direto no aumento da qualidade de vida (Julian-Doru, Vasilica e Maria, 2014). Quando se fala em esportes de inverno, praticados em neve e gelo, destacam-se especialmente os benefícios cardiovasculares, o aumento da circulação sanguínea e a queima intensiva de calorias (Axonlab, 2023). Tais benefícios, juntamente a uma maior acessibilidade e disseminação de informação, têm levado esportes como caminhada em trilha, escalada e montanhismo a alcançarem maior popularidade, resultando em um maior número de visitantes em ambientes de montanha.

Esses esportes em ambientes extremos podem ser classificados como recreação de risco (Robinson, 1992) e atraem profissionais e turistas de aventura em busca de desafio, escapismo, reconhecimento, locus de controle, realização e/ou catarse (Pomfret, 2006). Impulsionada por avanços tecnológicos na construção de equipamentos e uma crescente popularidade desde a década de 1950, a acessibilidade a tais esportes tem sido cada vez maior. Em estudo conduzido pelo Ministério da Cultura, Turismo e Aviação Civil do Nepal (2023), país conhecido pelo intenso fluxo de turismo voltado à prática de atividades ao ar livre em neve e gelo, o número de turistas em 2019 foi de 1,2 milhão, incremento de cerca de 160% em relação aos 460.000 no ano 2000. No Reino Unido, 14% das escolas ofereceram montanhismo como uma das atividades esportivas curriculares em 2010, o dobro comparado aos 7% no ano de 2004 (Department for Education, 2010); no Brasil, 11 estados já possuem suas agremiações filiadas à Confederação Brasileira de Montanhismo e Escalada (CBME, 2024). Tamanha popularização proporcionou ao turismo de aventura em ambientes

de montanha tornar-se elemento chave para a economia de diversos países, favorecendo o surgimento de novos produtos na indústria, com foco em segurança e praticidade, a partir dos avanços tecnológicos em materiais e métodos de fabricação.

Esportes de inverno são geralmente ao ar livre, de alta carga energética e, portanto, envolvem riscos inerentes, resultando em inúmeras quedas e colisões (Nicotra, *et al.*, 2014). De forma a evitar escorregamentos e mitigar os riscos de lesões provenientes de eventuais quedas, utiliza-se EPIs projetados para oferecerem aderência e suporte para escaladas e travessias. Kublak (2014) destaca que equipamentos de montanha não são estáticos, ou seja, nem sempre utiliza-se o mesmo conjunto, pois cada situação pode requerer instrumentos técnicos específicos; e a responsabilidade da escolha é atribuída ao indivíduo, requerendo uma cuidadosa análise que leve em consideração as necessidades e o peso. Neste trabalho, foi estudada a liga de alumínio 6061-T6, amplamente utilizada na fabricação desses equipamentos elementares para montanhismo e outros esportes que envolvam travessia em neve e gelo, como crampons, bastões de caminhada, mosquetões, *piolets* ou piquetas de gelo, parafusos de gelo, entre outros.

O segmento de EPIs é fundamental para o mercado de esportes de inverno e possui um crescimento projetado a uma taxa anual composta (CAGR) de 7% entre 2022 e 2027 (Pragma, 2023). Isso resulta em incentivos para o aumento da pesquisa em *design*, materiais e métodos de fabricação, e o posterior desenvolvimento de novos produtos. O objetivo deste estudo é aprofundar o entendimento do comportamento da liga de alumínio 6061 na condição T6 em relação à resistência ao desgaste por deslizamento oscilatório em ambiente controlado. Esse aprofundamento visa contribuir para a segurança na prática do montanhismo e outros esportes de inverno, bem como oferecer dados relevantes para a ciência dos materiais e indústria esportiva.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

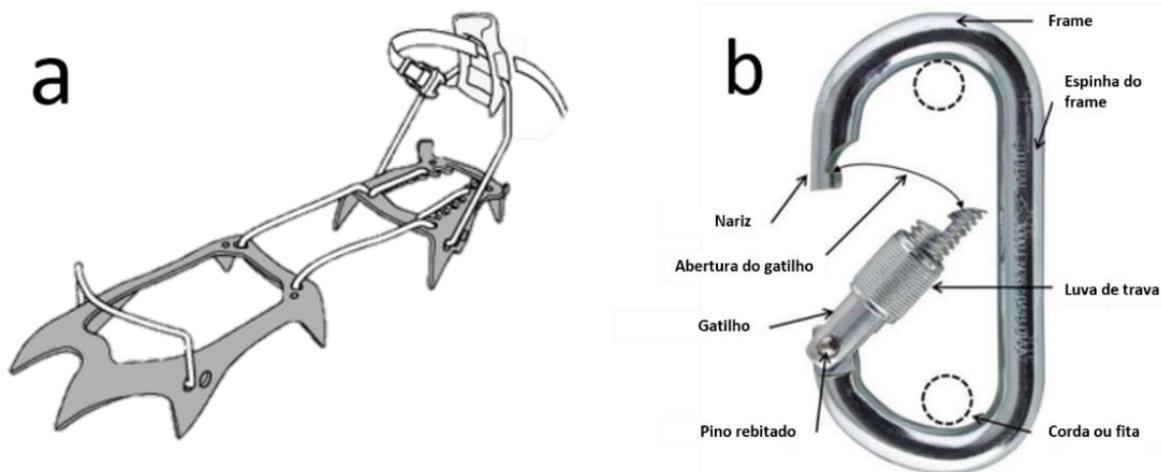
2.1. EPIs para a Prática de Montanhismo

Erpelding e Schumann (2009) classificaram os equipamentos de montanhismo em 11 categorias: proteção UV, ferramentas de navegação, suprimentos de emergência, roupas, nutrição, calçados, equipamento especializado de escalada pessoal, equipamento técnico de equipe, noturnos, efeitos pessoais, habilidades e treinamento (intangíveis). A liga de alumínio 6061-T6, objeto deste estudo, compõe equipamentos englobados pelas categorias especializadas de escalada pessoal e técnicos de equipe. Devido ao alto grau de esforço físico e à necessidade de constante caminhada em terrenos irregulares, o desenvolvimento dos EPIs move-se na direção da leveza e miniaturização (Li; Pan; Yunpeng, 2021), devendo, também, manterem suas propriedades mecânicas ao serem constantemente expostos a condições de baixa temperatura, alta umidade e atrito com superfícies abrasivas. Quando atletas são obrigados a cruzar corredores de neve ou cumes, crampons, ou seja, estruturas metálicas em forma de garras colocadas sob as botas, são utilizados (Bortolan, *et al.*, 2023). Crampons são geralmente fabricados inteiramente a partir de ligas de alumínio pertencentes às séries 6xxx ou 7xxx, ou com algumas partes em aço inoxidável pertencentes às séries 300 ou 400, dependendo da destinação, sendo os modelos inteiramente em alumínio recomendados para cenários que envolvam apenas travessias em neve, e aqueles com partes em aço mais apropriados para escalada em gelo e rocha.

Mosquetões são componentes vitais em sistemas de proteção contra quedas utilizados em diversas áreas, como espeleologia, construção civil, arboricultura, indústria, operações de resgate/evacuação, etc. (Burduhos-Nergis, *et al.*, 2019). Quando o escalador perder a pegada, esse equipamento atua como mecanismo de segurança, impedindo quedas que resultariam em lesões graves ou, por vezes, morte (Graham, 2001). Mosquetões geralmente são utilizados em ambientes severos, com alta variação de temperatura e altamente corrosivos, necessitando serem fabricados a partir de materiais com refratariedade e boa resistência à corrosão (Burduhos-Nergis, *et al.*, 2018). Apesar de haver no

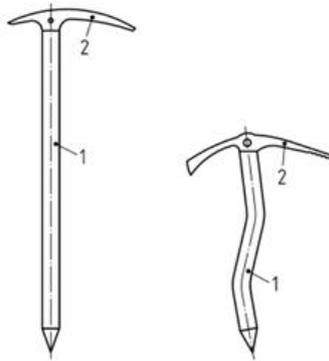
mercado mosquetões que utilizem materiais compósitos como matéria-prima, os mais comuns são fabricados a partir de ligas de alumínio ou aço (Burduhos-Nergis, *et al.*, 2019). Assim como nos crampons, também pode-se optar pela combinação de diferentes ligas para a produção de um modelo de mosquetão. A combinação da liga 7075-T6 para a produção da espinha (principal parte estrutural do mosquetão, que sofre maior carga de tração) com a liga 6061-T6 para o gatilho é muito comum em modelos comercializados. A Figura 1 ilustra um modelo de crampon e um modelo de mosquetão.

Figura 1. (a) Crampon automático Petzl Leopard LLF (Petzl, 2023); (b) Mosquetão oval e seus componentes (British Standards Institution, 2013).



Outro equipamento de proteção individual elementar para a prática de montanhismo é o *piolet* ou piqueta de gelo. *Piolets* são ferramentas manuais destinadas para movimento sobre neve ou gelo e compostas por, no mínimo, um cabo e uma picareta (CEN, 2011). Sua versatilidade permite que sejam utilizadas tanto no ascenso quanto no descenso e, dependendo da posição de empunhadura, podem servir para caminhada, escavação ou como martelo (Higson, 2012). Instituições normativas internacionais como a UIAA (International Climbing and Mountaineering Federation) e CEN (European Committee for Standardization) estabelecem normas e diretrizes para equipamentos e prática de esportes ao ar livre, porém não definem de forma direta algum conjunto específico de materiais a serem utilizados na sua fabricação, ficando a cargo do fabricante a definição da combinação adequada visando a durabilidade e leveza do equipamento. Para Higson (2012), no caso das piquetas, os requisitos para a escolha do material devem considerar fatores como a resistência mecânica, capacidade de manutenção de suas propriedades em baixas temperaturas e a sua relação custo-densidade. Nas piquetas comercializadas, geralmente utiliza-se o alumínio em suas ligas 6061-T6 ou 7075-T6 para a fabricação da haste e o aço inoxidável AISI 316 para a cabeça e o *spike* (ponteira). Os dois tipos mais comuns de piquetas estão ilustrados na Figura 2. À esquerda, o modelo geralmente utilizado para caminhada; à direita, o utilizado para escalada.

Figura 2. Piquetas e seus principais componentes: haste (1) e cabeça (2) (CEN, 2011).



Além dos EPIs mencionados, existem diversos outros amplamente utilizados no montanhismo que também possuem a liga de alumínio 6061 como um de seus principais materiais. Esses equipamentos são desenvolvidos para atender às exigências indispensáveis para o seu desempenho em ambientes extremos. A seguir, são apresentados alguns exemplos adicionais, com destaque para suas funções.

- Bastões de caminhada: esses EPIs estão sendo utilizados com uma frequência cada vez maior por conta da sua comprovada contribuição para a redução do esforço nas articulações, conforme estudo conduzido por Kumar, et al., (2009). Os bastões de caminhada auxiliam na distribuição do peso durante as ações musculares excêntricas, reduzindo as chances de dano muscular induzido pelo exercício (DMIE) (Howatson e Someren, 2008).
- Parafusos de gelo: são ferramentas que servem como âncora para escalada em gelo, especialmente em paredes verticais (Bedogni e Manes, 2012). São mais comuns aqueles fabricados em aço, porém também é possível encontrar modelos fabricados em alumínio.

2.2. Liga de Alumínio 6061-T6

Ligas de alumínio da série 6xxx têm sido amplamente utilizadas nas indústrias de esportes e recreação, aeroespacial, naval, automotiva, entre outras, por conta da sua alta usinabilidade, soldabilidade, razão resistência-peso, resistência à erosão e custo relativamente baixo. A liga 6061 combina magnésio (cerca de 1,0%) e silício (cerca de 0,5%) – por vezes adicionados com uma variedade de outros elementos, incluindo Ferro, Cobre, Cromo, Zinco, Manganês e Titânio – em uma matriz de alumínio, conforme ilustrado na Tabela 1. A designação T6 significa que a liga de alumínio 6061 foi submetida a um tratamento térmico de solubilização seguido por resfriamento rápido (têmpera) e envelhecimento artificial. O envelhecimento artificial permite que o material alcance a desejada dureza por precipitação (Kopec, et al., 2024; Ferreira, et al., 2023).

Tabela 1. Composição química da liga de alumínio 6061 (ASTM, 2020).

Limites para a Composição Química	
Liga 6061	Composição, %
Silício	0,40-0,8
Ferro	0,7
Cobre	0,15-0,40
Manganês	0,15
Magnésio	0,8-1,2
Cromo	0,04-0,35
Zinco	0,25
Titânio	0,15
Outros Elementos total	0,05
Total	0,15
Alumínio	restante

O alumínio é leve, possuindo uma densidade de 2,7 g/cm³, aproximadamente um terço da densidade das ligas metálicas ferrosas comerciais. Com exceção do magnésio, é o mais leve entre os metais comuns. Além disso, é não-tóxico e altamente resistente à corrosão em quaisquer temperaturas de trabalho. Ainda, o alumínio pode ser fundido para tomar praticamente qualquer forma e submetido a uma série de tratamentos superficiais (Tan e Radzai, 2009). Somando-se essas características ao seu preço/kg acessível e à melhoria das suas propriedades mecânicas e de dureza proporcionada pelo tratamento térmico T6, é fácil entender por que a liga de alumínio 6061-T6 é tão utilizada na fabricação de EPIs para a prática de montanhismo e outras atividades que envolvam travessia em neve e gelo. Suas qualidades a tornam uma excelente opção de material estrutural para equipamentos de entrada, que visam oferecer o melhor custo-benefício para seus compradores.

2.3. Ensaio de Microdureza Vickers (HV)

O ensaio de microdureza Vickers é utilizado para a caracterização de materiais metálicos devido à sua precisão e aplicabilidade em superfícies reduzidas ou finas. O método utiliza uma ponta de diamante em formato de pirâmide que aplica uma carga controlada sobre a superfície do material, gerando uma impressão cuja diagonal é medida para cálculo da dureza (ASTM E 384, 2022). O cálculo da dureza é feito automaticamente pelo *software* do equipamento por meio da Eq. (1):

$$HV = \frac{1,8544 \cdot F}{d^2} \quad (1)$$

onde F é a força de aplicação em kgf, e d é o comprimento médio, em mm, das diagonais da microindentação deixada pela ponta de diamante. O valor obtido reflete a resistência do material à deformação plástica local (Duarte, *et al.*, 2020; Silva, *et al.*, 2008).

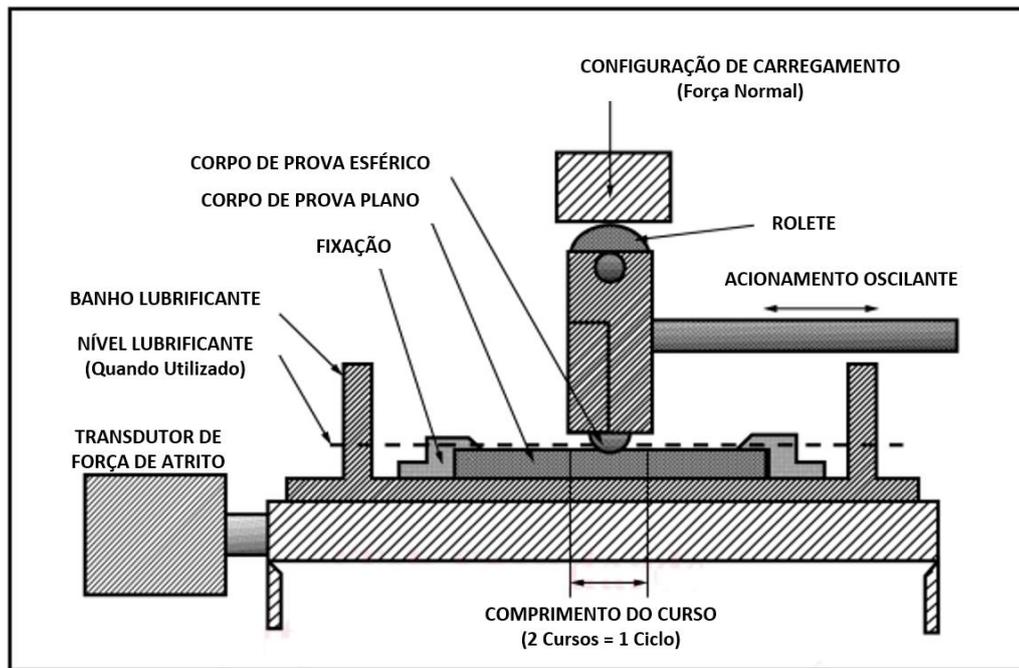
2.4. Ensaio de Desgaste por Deslizamento Oscilatório

Esse método de teste envolve dois corpos de prova, um que contenha uma superfície lisa e plana (chamado de corpo) e outro que possua pelo menos uma de suas extremidades em formato de esfera (chamado de contracorpo) que desliza contra a face plana do outro corpo de prova. Esses corpos de prova movem-se de forma linear e de um lado para o outro entre si sob condições pré-determinadas.

Neste método de teste, a carga é aplicada verticalmente para baixo através do corpo de prova esférico contra o outro corpo de prova montado de forma horizontal. A carga normal, curso do

deslocamento, frequência e tipo de oscilação, temperatura, lubrificantes (se necessário), duração do teste e condições atmosféricas (incluindo a umidade relativa) são pré-definidos pelo usuário. Alterações dimensionais tanto para a esfera quanto para a amostra plana são utilizadas para calcular o volume e taxa de desgaste. As forças de atrito são medidas durante o teste e podem ser usadas para avaliar mudanças nas condições de contato ou no coeficiente de atrito cinético em função do tempo. (ASTM G 133, 2016). Um diagrama esquemático do teste é apresentado na Figura 3.

Figura 3. Esquemático teste de desgaste por deslizamento oscilatório (ASTM G 133, 2016).



A distância total percorrida, em metros, pela esfera durante o teste pode ser determinada pela Eq. (2):

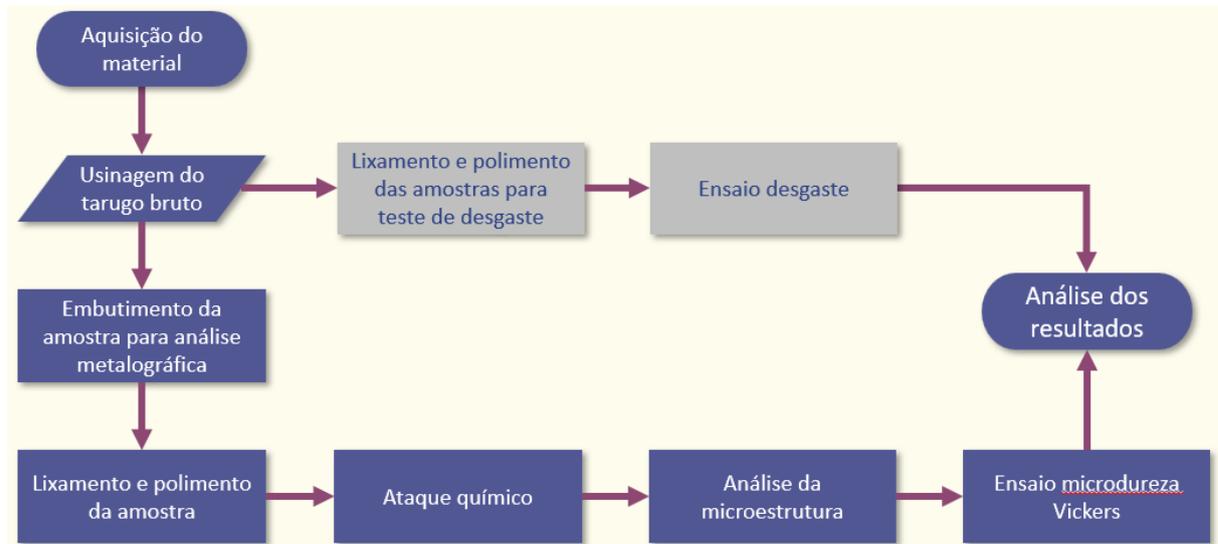
$$DIST_{TOTAL} = \frac{f \cdot (2 \cdot curso) \cdot (t_{total} \cdot 60)}{1000} \quad (2)$$

onde $DIST_{TOTAL}$ = distância total percorrida pelo corpo esférico, em metros, f = frequência, em Hz e t = tempo total de duração do teste, em minutos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 4 detalha as etapas do processo metodológico adotado. De forma subsequente, cada tópico seguinte detalha a metodologia que abrange a preparação das amostras para a análise microestrutural e ensaio de desgaste, a realização do ensaio de microdureza Vickers (HV) e a realização do ensaio de desgaste por deslizamento oscilatório. Todos os procedimentos aqui descritos foram conduzidos no Laboratório de Materiais (LAMAT) da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

Figura 4. Fluxograma da metodologia de pesquisa (Autor, 2024).



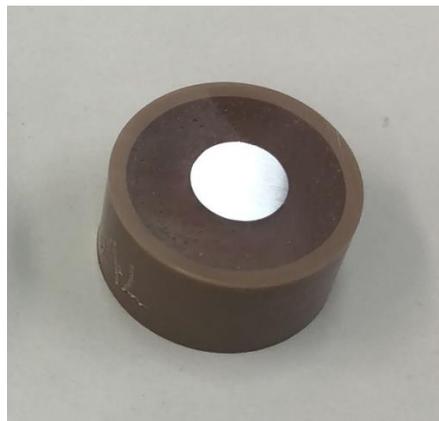
3.1. Análise Microestrutural da Liga de Alumínio 6061-T6 no Estado de Recebimento

Para a análise microestrutural da liga de alumínio 6061-T6 foi preparada uma amostra com diâmetro aproximado de 9,9 mm e espessura aproximada de 3,0 mm, usinada e cortada da barra de material comercial no estado de recebimento. A preparação da amostra seguiu um conjunto de procedimentos para garantir a suavidade da superfície. Primeiramente, a amostra foi embutida em resina para facilitar seu manuseio. Em seguida, foi feito um lixamento mecânico em lixas de granulometria progressivamente fina, na seguinte ordem: 80, 220, 320, 400, 600 e 1200.

Após o lixamento, a amostra foi polida em uma poltriz rotativa com a adição de abrasivos de alumina. Inicialmente, utilizou-se partículas de 1,0 μm e, posteriormente, 0,3 μm , com o objetivo de eliminar irregularidades na superfície e arranhões visíveis (Figura 5). Por fim, para destacar os precipitados e fases presentes na microestrutura em alto contraste, foi realizado o ataque químico com solução de água régia, conforme recomendado pela norma ASTM E407 (1999).

Após a revelação da microestrutura pelo ataque químico, foram realizadas análises em microscópio óptico marca Olympus, modelo PGM, que permite ampliações de 50x, 100x, 200x, 500x e 1000x, com sistema de aquisição de imagens por câmera digital CCD e software TCapture® de tratamento de imagens.

Figura 5. Amostra embutida, lixada e polida, pronta para a realização do ataque químico (Autor, 2024).

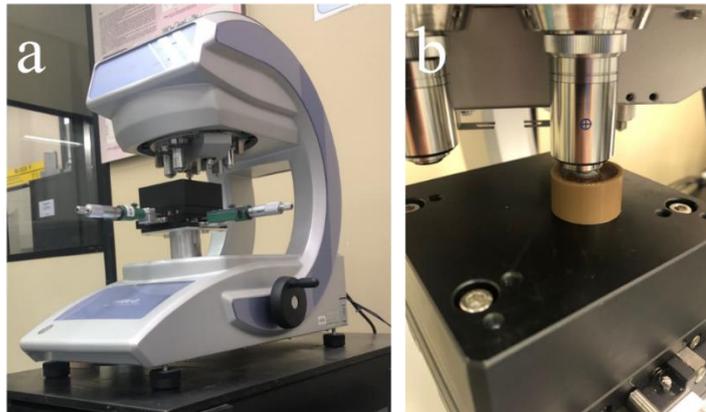


3.2. Realização do Ensaio de Microdureza Vickers (HV)

Após a análise da microestrutura, a amostra foi encaminhada para o teste de microdureza Vickers (HV). A medição foi conduzida no microdurômetro Shimadzu série HMV-G 21DT (Figura 6). Seguindo as diretrizes estabelecidas pela norma ASTM E384 (2022), foram realizadas seis microindentações em locais diferentes da superfície da amostra, utilizando como parâmetros para o teste uma carga de 1000 g e um tempo de aplicação de 15 segundos.

O processo de medição de cada microindentação foi facilitado pelo sistema de detecção digital automática do equipamento, necessitando apenas de pequenos ajustes manuais. Os valores obtidos para a microdureza Vickers e os parâmetros de teste foram registrados e organizados em forma de tabela para posterior análise.

Figura 6. (a) Microdurômetro Vickers. (b) Amostra em posição para início do teste (Autor, 2024).



3.3. Realização do Ensaio de Desgaste por Deslizamento Oscilatório

Para o ensaio de desgaste por deslizamento oscilatório foram preparados 4 corpos de prova, também com dimensões aproximadas 9,9 mm de diâmetro e 3,0 mm de espessura. O processo foi similar à preparação da amostra para a análise microestrutural, porém sem as etapas de embutimento em resina e ataque químico. Dois desses corpos de prova podem ser observados na Figura 7. Após a preparação, as amostras foram, então, posicionadas no tribômetro Ducom HFRR 4.2 (Figura 8). Os parâmetros de teste foram configurados no software WINDUCOM 2010 de maneira ilustrada na Tabela 2 e seguiram as diretrizes da norma ASTM G133 (2016). A esfera de prova escolhida é fabricada em zircônia e possui diâmetro de 6 mm.

Figura 7. Corpos de prova em alumínio 6061-T6 para ensaio de desgaste por deslizamento oscilatório (Autor, 2024).



Figura 8. Tribômetro configurado para início do teste na amostra 1, com carga de 1 N (Autor, 2024).



Tabela 2. Parâmetros selecionados para o teste de desgaste por deslizamento oscilatório (Autor, 2024).

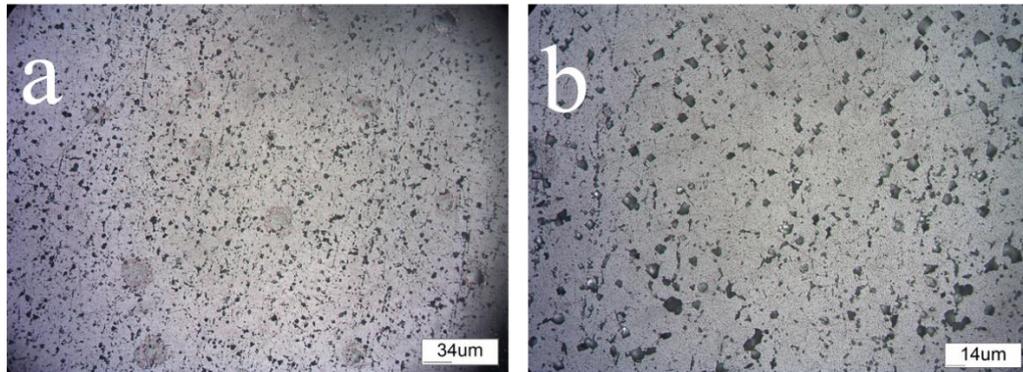
Amostra	Carga (N)	Curso (mm)	Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)	Duração (min)
1	1	1,0	50	25	65	34
2	1	1,0	50	25	65	34
3	5	1,0	50	25	65	34
4	5	1,0	50	25	65	34

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Microestrutura da Liga de Alumínio 6061-T6 no Estado de Recebimento

A microestrutura da liga de alumínio 6061-T6 comercial no estado de recebimento é apresentada na Figura 9. A análise revelou a presença de uma matriz de alumínio (com estrutura cristalina cúbica de face centrada - CFC), com precipitados dispersos na microestrutura. Conforme reportado por Laughlin e Hono (2014), estes precipitados observados provavelmente são do tipo β' (Mg_2Si), formados durante o processo de envelhecimento e que dão à liga suas propriedades mecânicas características. A distribuição dos precipitados é uniforme, o que indica um processo de tratamento térmico adequado. Outro detalhe é que os contornos de grão se apresentam apenas parcialmente revelados, muito provavelmente em função do grau de refinamento da microestrutura.

Figura 9. Microestrutura da liga de alumínio 6061-T6 como recebida. (a) Sob aumento de 200x. (b) Sob aumento de 500x (Autor, 2024).



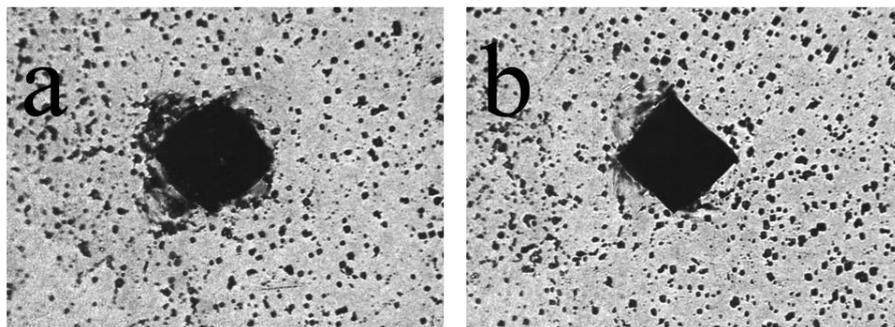
4.2. Avaliação das Microindentações Vickers

Os resultados das medições das microindentações na amostra de alumínio 6061-T6 podem ser visualizados na Tabela 3, bem como os valores máximo, mínimo, médio e desvio padrão. A Figura 10 ilustra as microindentações para a medição n° 2 (valor máximo) e n° 6 (valor mínimo). A dureza obtida encontra-se compatível com as propriedades típicas da liga 6061 após o tratamento térmico T6, indicando eficácia no fortalecimento do material.

Tabela 3. Microdureza Vickers (HV) medida para cada microindentação (Autor, 2024).

N° Medição	Carga (N)	Tempo Aplicação (s)	Dureza (HV)		
1	9,807	15	101,3	Máximo:	106,1
2	9,807	15	106,1	Mínimo:	98,0
3	9,807	15	103,7	Média:	101,7
4	9,807	15	98,5	Desvio Padrão:	3,100
5	9,807	15	102,5		
6	9,807	15	98,0		

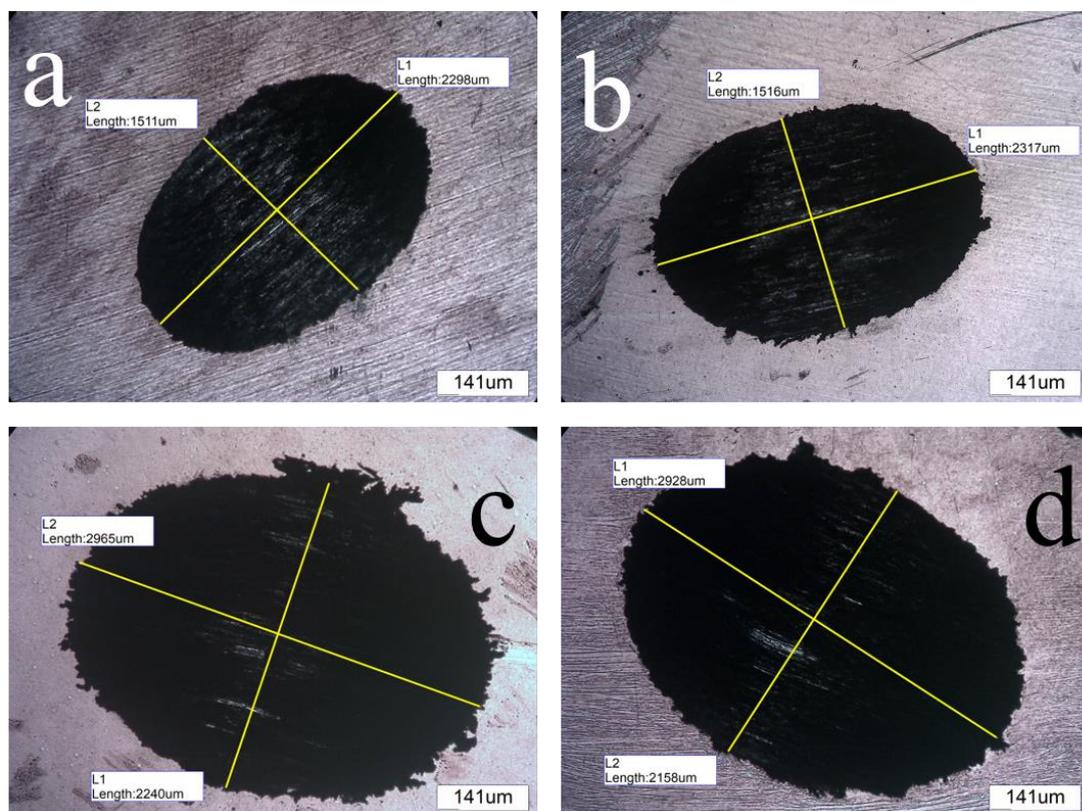
Figura 10. Comparativo entre as microindentações: (a) Medição n° 2. (b) Medição n° 6 (Autor, 2024).



4.3. Análise das Pistas de Desgaste Produzidas pelo Deslizamento Oscilatório

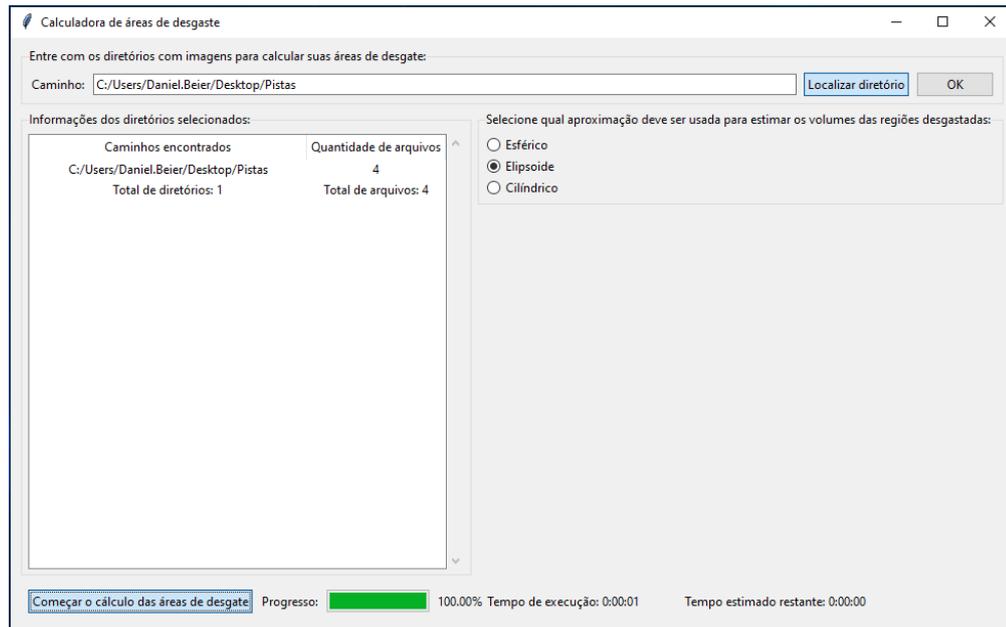
Após a finalização dos ensaios de desgaste, todos os corpos de prova foram levados até o microscópio óptico para análise e medição das pistas formadas pelo atrito da esfera de zircônia com o alumínio. As pistas foram, então, medidas em seu comprimento e largura, conforme mostra a Figura 11, para comparação dos resultados entre as cargas de 1 N e 5 N. Por conta da maior pressão de contato, as amostras submetidas ao ensaio com carga normal de 5 N apresentaram uma pista com área superficial aproximadamente 50% maior.

Figura 11. Avaliação do comprimento e largura das pistas resultantes do atrito entre a esfera de prova e os corpos de prova em alumínio, aumento de 50x. (a) Amostra 1 – carga 1 N. (b) Amostra 2 – carga 1 N. (c) Amostra 3 – carga 5 N. (d) Amostra 4 – carga 5 N (Autor, 2024).



Após a avaliação das dimensões lineares de cada pista, foi utilizada a Calculadora de Áreas de Desgaste, um software desenvolvido por alunos de graduação do curso de Ciência da Computação da PUCRS em parceria com o LAMAT, para calcular o volume total aproximado de desgaste. O software realiza o cálculo através da identificação do contorno da área desgastada pela comparação de contraste de cores. A Figura 12 mostra a interface do software, as únicas entradas necessárias são o diretório onde as imagens estão localizadas e a figura geométrica que o software deve considerar para o cálculo do volume total de desgaste aproximado (esférico, elipsoide ou cilíndrico).

Figura 12. Interface de usuário da Calculadora de Áreas de Desgaste (Autor, 2024).



A Figura 13, por sua vez, demonstra que o software é capaz de identificar a área desgastada com precisão. Para o cálculo do volume total aproximado de desgaste, foi utilizada a figura geométrica elipsoide. Os resultados são, então, exportados para uma planilha e apresentados na Tabela 4.

Figura 13. Área de desgaste na Amostra 3 delimitada pela linha de contorno contínua (Autor, 2024).

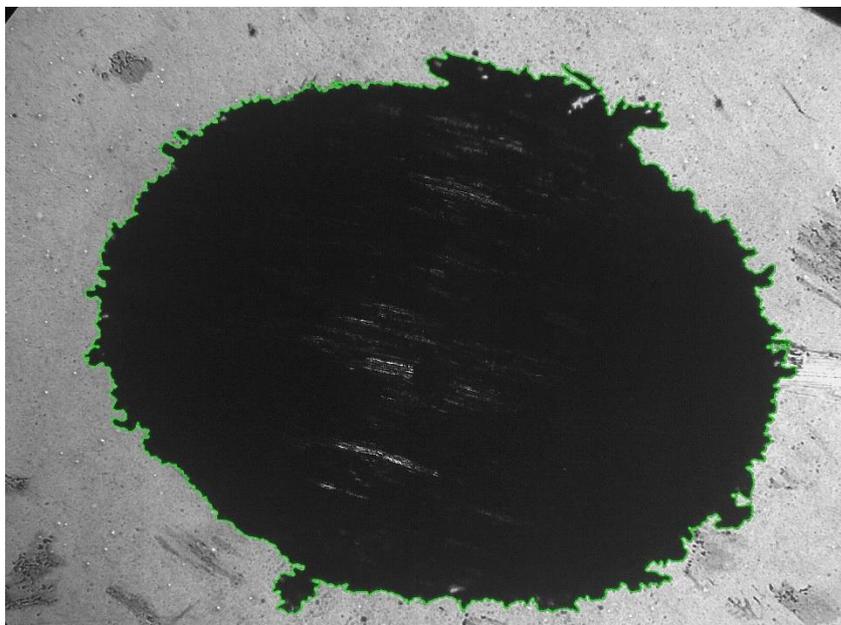


Tabela 4. Volume de desgaste total aproximado em mm^3 (Autor, 2024).

Amostra	Carga (N)	Volume desgastado (mm^3)
1	1	0,103
2	1	0,105
3	5	0,449
4	5	0,370

4.4. Análise do Coeficiente de Atrito Cinético

As Figuras 14, 15, 16 e 17 ilustram os gráficos plotados a partir da coleta dos dados de coeficiente de atrito cinético (μ_c) entre a esfera de prova, em zircônia, e os corpos de prova, em alumínio. É possível observar uma pequena anomalia nas primeiras leituras do ensaio da amostra 3, fato este que ocorreu devido a um problema na fixação de um dos parafusos do mecanismo de vibração do tribômetro. A falha foi rapidamente detectada e corrigida, normalizando as leituras para o restante do ensaio. Percebe-se, também, que há uma tendência de estabilização a partir de 2 minutos do início dos testes. Portanto, para calcular o coeficiente de atrito cinético médio para cada amostra, considerou-se o intervalo de tempo entre 2 e 34 minutos. Todos os testes foram configurados para salvarem os dados de coeficiente de atrito cinético a cada 0,5 segundos, aproximadamente, resultando, ao longo dos 34 minutos de teste, entre 3760 e 3820 leituras para cada ensaio. A Tabela 5 apresenta o coeficiente de atrito cinético médio para cada ensaio.

Figura 14. Coeficiente de atrito cinético em função do tempo para a amostra 1 (Autor, 2024).

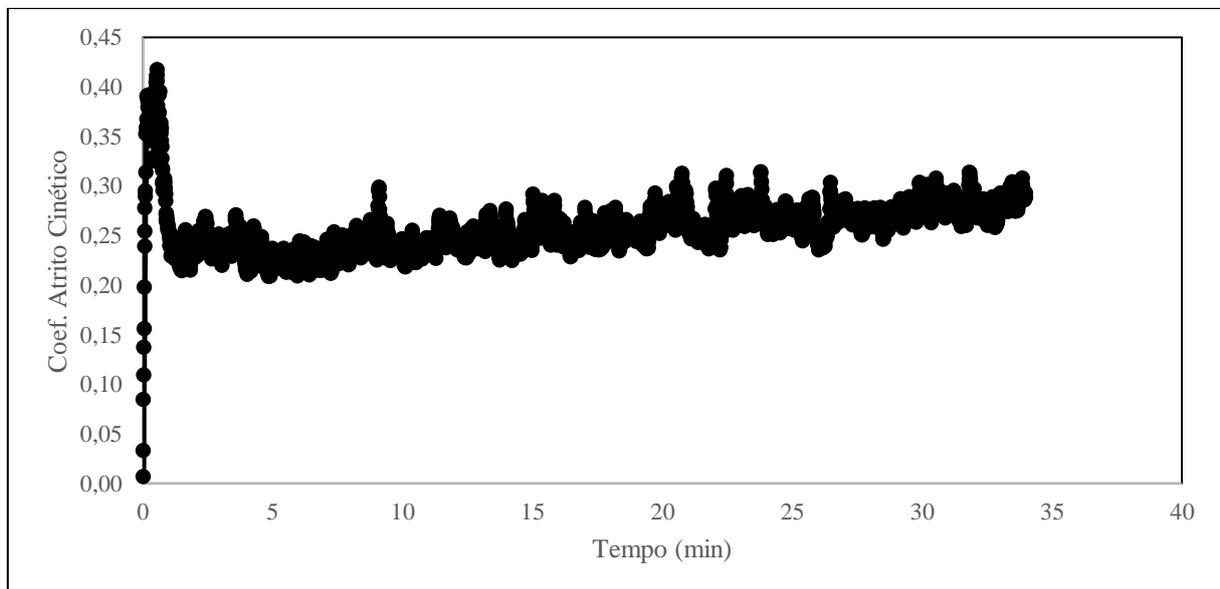


Figura 15. Coeficiente de atrito cinético em função do tempo para a amostra 2 (Autor, 2024).

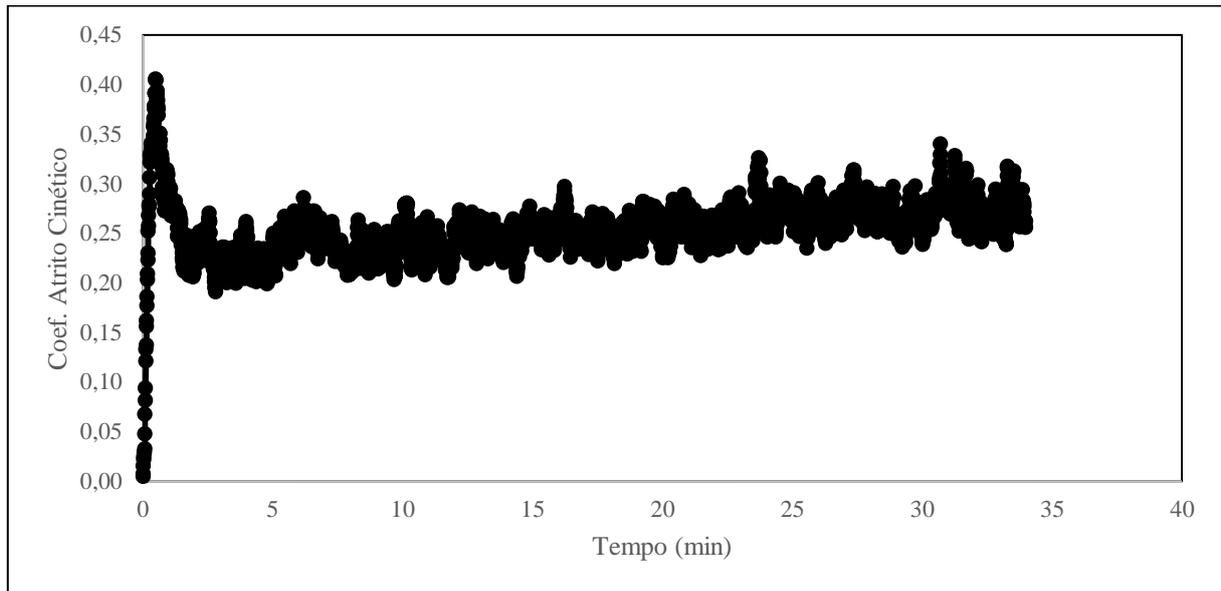


Figura 16. Coeficiente de atrito cinético em função do tempo para a amostra 3 (Autor, 2024).

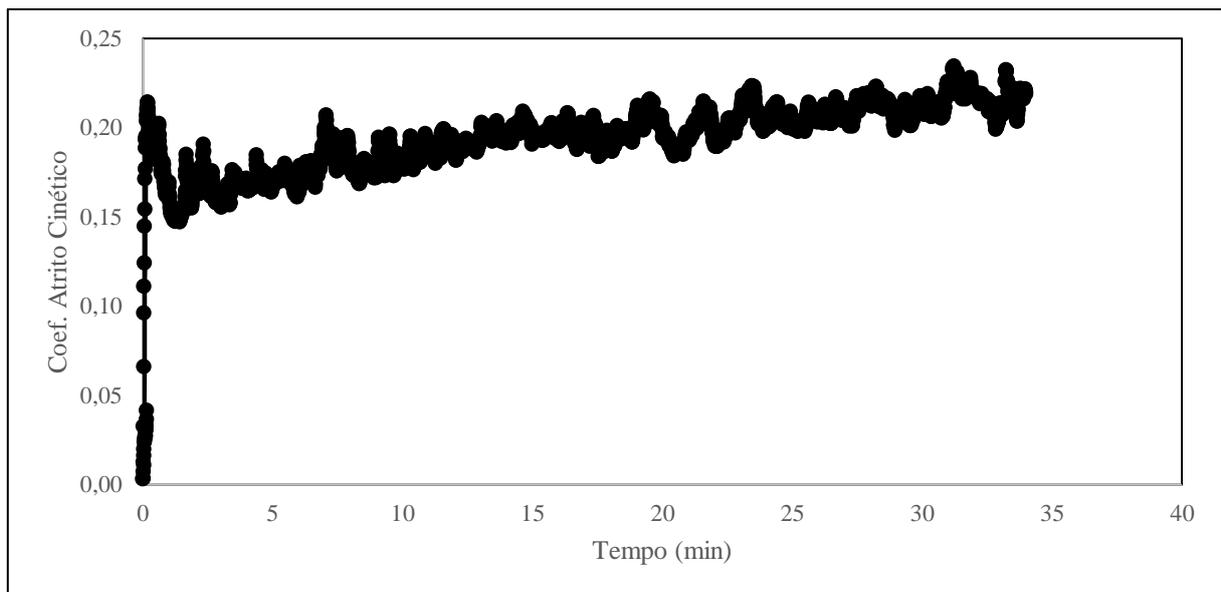


Figura 17. Coeficiente de atrito cinético em função do tempo para a amostra 4 (Autor, 2024).

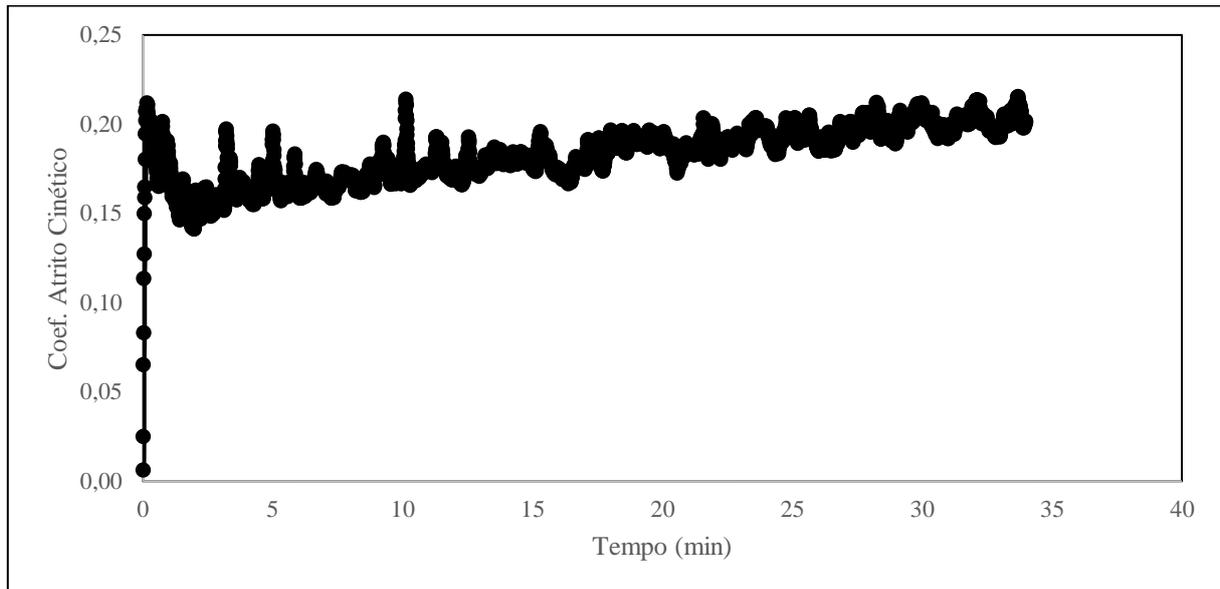


Tabela 5. Coeficiente de atrito cinético médio em cada amostra (Autor, 2024).

Amostra	Carga (N)	Coef. Atrito Cinético Médio
1	1	0,255
2	1	0,253
3	5	0,196
4	5	0,183

Para os corpos de prova submetidos à carga de 1 N, o coeficiente de atrito cinético médio foi de 0,254, enquanto, para os corpos de prova submetidos à carga de 5 N, o coeficiente médio foi de 0,190. Esse comportamento pode indicar que, sob maior carga, as superfícies de contato entre o corpo de prova e a esfera de zircônia se comportam de maneira a reduzir o atrito, possivelmente devido ao aumento da área de contato e à maior deformação das superfícies, o que pode facilitar o deslizamento.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram analisadas as propriedades microestruturais, de dureza e de desgaste da liga de alumínio 6061-T6 em condições específicas de temperatura e umidade. A configuração microestrutural está em conformidade com as propriedades mecânicas observadas no ensaio de dureza, que apresentou valores dentro do intervalo usual entre 95 e 110 HV.

Com base nos resultados obtidos a partir do ensaio de desgaste, foi possível observar que o comportamento da liga de alumínio 6061-T6 durante ensaios de tribologia é significativamente influenciado pela carga aplicada. O volume de material desgastado foi substancialmente maior nos corpos de prova submetidos à carga de 5 N, apresentando um incremento de, aproximadamente, 0,306 mm³ em relação aos corpos de prova submetidos à carga menor. As menores leituras para o coeficiente de atrito cinético nos ensaios onde utilizou-se a carga de 5 N podem ser atribuídas ao encruamento do material.

É importante ressaltar que, embora a motivação para este estudo tenha partido da ampla utilização desse material em equipamentos de proteção individual para a prática de montanhismo, os parâmetros de teste adotados apresentam limitações e não devem ser tomados como representações

das condições reais enfrentadas durante a prática desse esporte. Para tal, seria necessário maior aprofundamento em simulações que sejam capazes de reproduzir de forma mais fiel as características do ambiente de montanha. Apesar dessas limitações, os ensaios forneceram dados relevantes sobre a resistência ao desgaste da liga de alumínio 6061-T6 frente à aplicação de pequenas cargas em temperatura e umidade controlados, o que pode ser relevante para praticantes do esporte e fabricantes de equipamentos na escolha desse material visando um equilíbrio entre peso, resistência e durabilidade.

Sugere-se explorar a resistência ao desgaste da liga de alumínio 6061-T6 simulando movimentos amplos e irregulares, com a inserção de abrasivos ou contaminantes externos, replicando de forma mais precisa os efeitos de abrasão e corrosão aos quais os equipamentos de proteção individual mencionados neste trabalho estão sujeitos durante sua utilização. Além disso, seria relevante realizar ensaios sob diferentes condições climáticas e de umidade, bem como em intervalos de tempo mais prolongados, para avaliar o comportamento a longo prazo do material, proporcionando uma análise mais robusta de sua durabilidade.

6. AGRADECIMENTOS

Gostaria de manifestar minha mais profunda gratidão aos meus pais, que, em todos os momentos da minha trajetória – não só acadêmica, mas de vida – forneceram a mais sólida base de apoio que alguém poderia desejar. Esse momento que estou vivendo só é possível por tudo o que fizeram por mim.

Agradeço ao meu professor e orientador, Prof. Dr. Carlos Alexandre dos Santos, por sua dedicação e disponibilidade para me ajudar a concluir este trabalho, mesmo frente às dificuldades enfrentadas ao longo do semestre.

Agradeço aos técnicos do Laboratório de Materiais da PUCRS, Juliana e Gustavo, pela disponibilidade e auxílio na preparação das amostras e realização dos ensaios descritos neste trabalho.

Agradeço, também, a todos os professores da PUCRS com os quais tive o grande prazer de aprender.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

IULIAN-DORU, Tudor; VASILICA, Grigore; MARIA, Tudor. The importance of group sports activities in adult lifelong education and in improving the quality of life. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, v. 117, p. 9-15, 2014.

The health benefits of winter sports. Disponível em: <https://www.axonlab.com/blog/the-health-benefits-of-winter-sports?srsltid=AfmBOopx2q-LRCUIPAw45v1Qxb5E0nC5gUX6AJGNfppncYN52u8eHnF0>. Acesso em: 17 set. 2024.

ROBINSON, David W. A descriptive model of enduring risk recreation involvement. *Journal of Leisure Research*, v. 24, n. 1, p. 52-63, 1992.

POMFRET, Gill. Mountaineering adventure tourists: a conceptual framework for research. *Tourism management*, v. 27, n. 1, p. 113-123, 2006.

MINISTRY OF CULTURE, TOURISM & CIVIL AVIATION. Nepal Tourism Statistics 2022. Kathmandu, 2023.

DEPARTMENT FOR EDUCATION. PE and Sport Survey 2009/10. Londres, 2010.



CONFEDERAÇÃO BRASILEIRA DE MONTANHISMO E ESCALADA. Sobre a CBME. Disponível em: <<https://cbme.org.br/novo/sobre-a-cbme/>>. Acesso em: 17 set. 2024.

NICOTRA, Marco, et al. Thermo-mechanical and impact properties of polymeric foams used for snow sports protective equipment. *Procedia engineering*, v. 72, p. 678-683, 2014.

KUBLAK, Thomas. *Mountaineering Methodology-Part 2-Gear and Accessories*. Prague. Tomas Kublak-MMPublishing, 2014. E-book.

PRAGMA MARKET RESEARCH. 2022-2027 Global and Regional Mountaineering Equipment Industry Status and Prospects Professional Market Research Report Standard Version. Dallas: Pragma Market Research, 2023.

KOPEC, Mateusz, et al. Mechanical response of 6061-T6 aluminium alloy subjected to dynamic testing at low temperature: experiment and modelling. *International Journal of Impact Engineering*, v. 185, 2024.

FERREIRA, Moniel de Oliveira, et al. Análise microestrutural e avaliação das superfícies de fratura em quadro de bicicleta com junta soldada em liga de alumínio 6061-T6. *Latin American Journal of Development*, Curitiba, v. 5, n. 2, p. 775-792, 2023. DOI: 10.46814/lajdv5n2-023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM B308/B308M: Standard specification for aluminium-alloy 6061-T6 standard structural profiles. West Conshohocken, 2020.

TAN, Chee Fai; RADZAI, Said Mohd. Effect of hardness test on precipitation hardening aluminium alloy 6061-T6. *Chiang Mai Journal of Science*, v. 36, n. 3, p. 276-286, 2009.

ERPELDING, Mat; SCHUMANN, Scott. *Mountaineering*.

LI, Ming; PAN, Yang; ZOU, Yunpeng. Application and optimization design of titanium alloy in sports equipment. In: *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2021. p. 012011.

BORTOLAN, Lorenzo, et al. Development of equipment for ski mountaineering, a new Olympic event. *Applied Sciences*, v. 13, n. 9, p. 5339, 2023.

BURDUHOS-NERGIS, D. P., et al. Materials types and selection for carabiners manufacturing: A review. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2019. p. 012027.

GRAHAM, Jon. *CARABINER TESTING*. 2001.

NERGIŞ, DP Burduhos, et al. Structural analysis of Carabiners Materials used at Personal Protective equipments. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2018. p. 012040.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 13089: Mountaineering equipment - Ice tools - Safety Requirements and test methods. Brussels, 2011.

HIGSON, James. *Materials Selection Assignment - Ice Axe*. 2012.



KUMAR, AJ Shyam et al. The pattern of ankle fractures sustained by outdoor activities at the Snowdonia National Park, North Wales, United Kingdom. *Foot and ankle surgery*, v. 15, n. 3, p. 144-145, 2009.

HOWATSON, Glyn; VAN SOMEREN, Ken A. The prevention and treatment of exercise-induced muscle damage. *Sports medicine*, v. 38, p. 483-503, 2008.

BEDOGNI, Vittorio; MANES, Andrea. An experimental investigation of the effect of the placement angle on the collapse of ice screw anchors. *Engineering Failure Analysis*, v. 26, p. 139-150, 2012.

DUARTE, F. B. et al. Caracterização microestrutural e ensaios de dureza de ligas metálicas. *Revista Científica UniFOA*, v. 16, n. 1, 2020.

SILVA, G. M.; FEISTE, A. Aplicação de ensaios de dureza para avaliação de tratamentos térmicos. *Revista UniFOA*, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G133: Standard test method for linearly reciprocating ball-on-flat sliding wear. West Conshohocken, 2016.

LAUGHLIN, David E.; HONO, Kazuhiro (Ed.). *Physical metallurgy*. Newnes, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E407: Standard practice for microetching metals and alloys. West Conshohocken, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E384: Standard test method for microindentation hardness of materials. West Conshohocken, 2022.