

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

HENRIQUE DE CASTRO AUGUSTO ALVARENGA

**SOBRE O ESTUDO DO ULTRA-BAIXO COEFICIENTE DE ATRITO
EM MATERIAIS CERÂMICOS**

**VITÓRIA
2011**

HENRIQUE DE CASTRO AUGUSTO ALVARENGA

**SOBRE O ESTUDO DO ULTRA-BAIXO COEFICIENTE DE ATRITO
EM MATERIAIS CERÂMICOS**

Projeto de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.
Orientador: Cherlio Scandian.

VITÓRIA

2011

HENRIQUE DE CASTRO AUGUSTO ALVARENGA

**SOBRE O ESTUDO DO ULTRA-BAIXO COEFICIENTE DE ATRITO
EM MATERIAIS CERÂMICOS**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em _____ de _____ de 2011

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Cherlio Scandian
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Flávio José da Silva
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Prof. Dr. Marcelo Camargo S. de Macêdo
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Dedico esta obra a meus familiares pelo apoio incondicional, e aos amigos e professores, por terem sido parte fundamental desta jornada.

RESUMO

Este trabalho descreve os ensaios realizados para a obtenção de um ultra-baixo coeficiente de atrito ($\mu < 0,01$) com o par composto por nitreto de silício (Si_3N_4) e óxido de alumínio (Al_2O_3), a partir do deslizamento lubrificado com água e da obtenção de superfícies ultra-lisas. A formação destas superfícies fornece uma lubrificação hidrodinâmica através de filmes finos do lubrificante, sendo estes suficientes para evitar qualquer contato entre as asperezas. A utilização da água torna este estudo mais interessante, por se tratar de um elemento barato e abundante. Estas cerâmicas são classificadas como cerâmicas de engenharia, pois possuem propriedades adequadas, que favorecem a possibilidade de uso estrutural destes materiais num futuro próximo.

Palavras-Chave: Ultra-baixo coeficiente de atrito; Nitreto de silício; Óxido de alumínio; Atrito; Desgaste; Lubrificação; Água.

ABSTRACT

This work describes tests conducted in order to obtain an ultra low friction coefficient ($\mu < 0,01$), from the water lubricated sliding of silicon nitride (Si_3N_4) against aluminum oxide (Al_2O_3) and the obtainment of very smooth surfaces. The formation of these surfaces allows a hydrodynamic lubrication through very thin films of lubricant, being enough to avoid any asperities contact. The lubrication with water makes this study more interesting, being a cheap and abundant element as it is. These ceramics are classified as engineering ceramics, as a result of their adequate properties that provide a possible structural use of them in a close future.

Keywords: Ultra low friction coefficient; Silicon Nitride; Aluminum oxide; Friction; Wear; Lubrication; Water.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução temporal do coeficiente de atrito do Si_3N_4 prensado a quente no ar, submetido a diferentes cargas (velocidade de deslizamento, 1 mm/s; hemisfério, 3 mm de raio; deslizando sobre planos): ●, 2 N; ○, 10 N; ▲, 20 N; △, 30 N.	14
Figura 2 - Evolução temporal do coeficiente de atrito do Si_3N_4 sobre Si_3N_4 em função da rugosidade (velocidade de deslizamento, 1 mm/s; hemisfério, 3 mm de raio; deslizando sobre planos): ▲, $R_a = 5 \times 10^{-8}$ m; ○, $R_a = 4 \times 10^{-7}$ m; ■, $R_a = 4 \times 10^{-7}$ m.	14
Figura 3 - Efeitos da velocidade de deslizamento no coeficiente de atrito do Si_3N_4 e SiC em água.	16
Figura 4 - Perfilometria das trilhas de desgaste (a) pino de Si_3N_4 /disco de Si_3N_4 , (b) pino de SiC/disco de SiC, (c) pino de SiC/disco de Si_3N_4 e (d) pino de Si_3N_4 /disco de SiC.	17
Figura 5 - Coeficiente de atrito e condutividade elétrica em função da distância deslizada a 20 °C.	18
Figura 6 - Coeficiente de atrito e condutividade elétrica em função da distância deslizada a 80 °C.	19
Figura 7 - Partícula de sílica coloidal hidratada com a dupla camada elétrica.	20
Figura 8 - - Diferentes tipos de grupos hidroxila na superfície da sílica amorfa, sendo (a) superfície vizinha hidratada e (b) superfície composta por hidroxilas.	21
Figura 9 - O efeito da velocidade de deslizamento e carga normal no tempo de estabilização para o nitreto de silício deslizando sobre ele mesmo em água. (1) 3 N, 120 mm/s; (2) 3N, 60 mm/s; (3) 5 N, 120 mm/s; (4) 5 N, 60 mm/s.	22
Figura 10 - Coeficiente de atrito em função do tempo para o par Al_2O_3 - Si_3N_4 deslizando em água, com o pH controlado. (a) pH 3 e 4; (b) pH 5 e 6; (c) pH 7 e 8,5; (d) pH 10 e 12.	23
Figura 11 - Discos de aço sendo lixados, para retirada das marcas de oxidação.	25
Figura 12 - Discos de aço sendo lavados em água corrente.	26
Figura 13 - Discos de alumina e de aço colados, resfriando sobre o aquecedor.	26
Figura 14 - Retificadora plana de marca Mello modelo RTP-2.	27

Figura 15 - Limpeza da esfera com água corrente e detergente neutro.	28
Figura 16 - Limpeza do disco com água corrente e detergente neutro.....	29
Figura 17 - Banho ultrasônico por 30 minutos, mergulhados em acetona.	29
Figura 18 - 850 mL de água deionizada utilizada para os ensaios.	32
Figura 19 - Agitador rotativo de alta rotação, para quebra dos aglomerados de sílica pirogênica amorfa.	32
Figura 20 - Variação do coeficiente de atrito com o tempo para o primeiro ensaio: $V = 1 \text{ m/s}$ e $W = 5,5 \text{ kgf}$	37
Figura 21 - Variação do coeficiente de atrito com o tempo para o segundo ensaio: $V = 1 \text{ m/s}$ e $W = 3,5 \text{ kgf}$	38
Figura 22 - Variação do coeficiente de atrito com o tempo para o terceiro ensaio: $V = 0,5 \text{ m/s}$ e $W = 3,5 \text{ kgf}$	39
Figura 23 - Variação do coeficiente de atrito com o tempo para o quarto ensaio: $V = 0,5 \text{ m/s}$ e $W = 5,5 \text{ kgf}$	40
Figura 24 - Variação do coeficiente de atrito com o tempo para o quinto ensaio: $V = 1 \text{ m/s}$ e $W = 5,5 \text{ kgf}$, água com sílica dissolvida.	41
Figura 25 - Calota formada na esfera de nitreto de silício no quinto ensaio.	42
Figura 26 - Trilha formada no disco de alumina no quinto ensaio.	42
Figura 27 - Variação do coeficiente de atrito com o tempo para o sexto ensaio: $V = 1 \text{ m/s}$ e $W = 5,5 \text{ kgf}$, água com pH 3.	43
Figura 28 - Calota formada na esfera de nitreto de silício no sexto ensaio.	44
Figura 29 - Trilha formada no disco de alumina no sexto ensaio.	45
Figura 30 - Variação do coeficiente de atrito com o tempo para o sétimo ensaio: $V = 1 \text{ m/s}$ e $W = 5,5 \text{ kgf}$, água com pH 12.	46
Figura 31 - Calota formada na esfera de nitreto de silício no sétimo ensaio.	47
Figura 32 - Trilha formada no disco de alumina no sétimo ensaio.	47
Figura 33 - Coeficiente de atrito em função do tempo para os quatro primeiros ensaios.	48
Figura 34 - Comparação entre coeficiente de atrito obtido ao final dos ensaios e o desgaste nas esferas.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros dos ensaios.....	34
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍGLAS

UBCA	Ultra-Baixo Coeficiente de Atrito
USP	Universidade de São Paulo
LFS	Laboratório de Fenômenos de Superfície
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
PTFE	Politetrafluoretileno

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	Coeficiente de atrito
R_q	Rugosidade rms
F	Força de atrito
W	Carga Normal
C	Condutividade elétrica
V	Velocidade linear
ω	Velocidade angular
R	Raio do disco
r	Raio da esfera
D	Diâmetro da calota formada na esfera
V_e	Volume desgastado na esfera

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3	MÉTODOS E EXPERIMENTOS.....	24
3.1	MATERIAIS	24
3.1.1	USINAGEM	24
3.1.2	LIMPEZA.....	28
3.1.3	INSTALAÇÃO	30
3.1.4	ÁGUA.....	30
3.2	MÉTODO.....	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
5	CONCLUSÃO.....	51
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1 INTRODUÇÃO

O estudo do ultra-baixo coeficiente de atrito (UBCA) tem crescido muito nos últimos 20 anos, devido ao comportamento intrigante quanto à sua formação, obtenção e as possíveis aplicações futuras. Estes valores, que conceitualmente são da ordem de milésimos, podem ser obtidos através do deslizamento das chamadas cerâmicas de engenharia (cerâmicas com valor de Dureza Vickers acima de 15 GPa e Tenacidade à Fratura acima de $4 \text{ MPa.m}^{1/2}$) lubrificadas com água, o que torna este estudo ainda mais interessante, já que a água é um lubrificante de baixo custo, fácil obtenção e não poluente.

O tema ainda possui algumas divergências: para alguns pesquisadores (TOMIZAWA; FISCHER, 1987), o regime ocorre graças a uma lubrificação hidrodinâmica, através da formação destas superfícies muito lisas, que permitiria que um filme fino de água fosse capaz de evitar qualquer contato entre asperezas e suportar toda a carga no contato, enquanto que para outros autores (XU; KATO, 2000), a lubrificação é mista, sendo parte hidrodinâmica, também graças à formação destas superfícies de baixa rugosidade, e parte limítrofe, como resultado do desgaste triboquímico, com consequente formação de íons que são adsorvidos nas superfícies dos materiais deslizantes. Através da formação da dupla camada elétrica, cria-se uma força repulsiva entre estes íons adsorvidos, gerando uma lubrificação limítrofe. Outras questões também carecem de estudos mais profundos, como o processo inicial do deslizamento que leva ao regime de ultra-baixo atrito, a possibilidade do emprego de diferentes tipos de água e de cerâmicas, entre outros.

Neste trabalho, foram realizados 7 ensaios com o par Si_3N_4 e Al_2O_3 no tribômetro Plint TE67, na Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), para verificação experimental do processo, possível obtenção do regime de ultra-baixo coeficiente de atrito e verificação da influência de parâmetros como carga aplicada, velocidade de deslizamento, pH da água utilizada para lubrificação e aditivação. Este projeto de graduação consistirá numa breve revisão bibliográfica de alguns trabalhos, na

apresentação dos métodos de ensaio, nos resultados obtidos, nas discussões sobre os mesmos e numa conclusão.

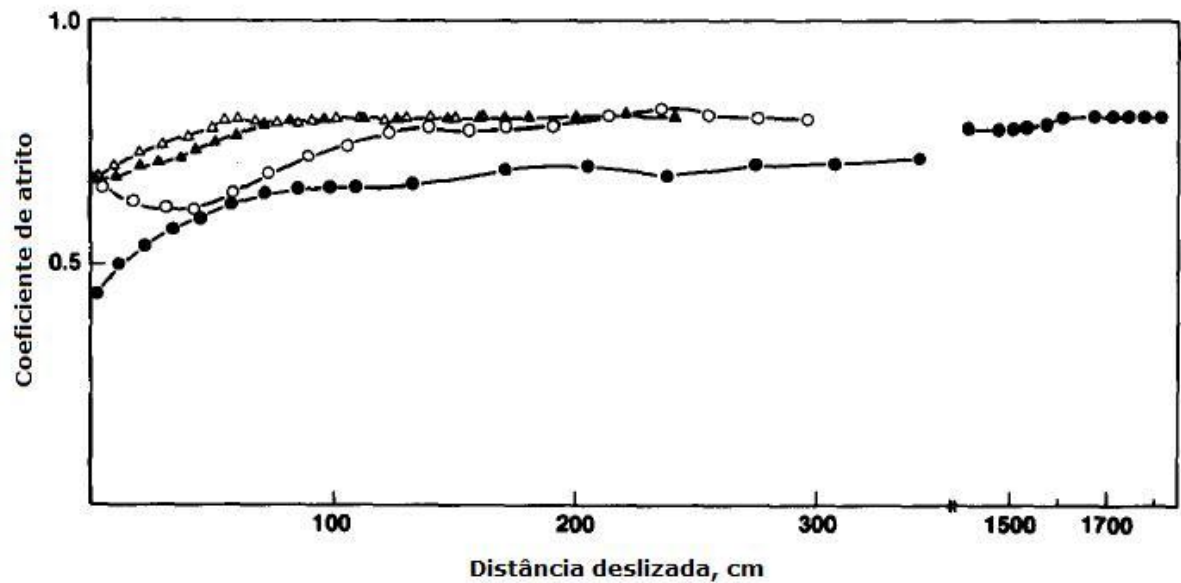
Segue que, em trabalhos futuros, deverá ser feita uma melhor verificação da influência destes parâmetros, através da realização de mais ensaios. É necessário ainda estudar mais profundamente o regime que precede a estabilização, também chamado de runnig-in, já que os fenômenos que acontecem nele tem características ainda desconhecidas e, no entanto, sabe-se que ele tem papel fundamental na obtenção ou não do regime de ultra-baixo coeficiente de atrito e no tempo necessário para a estabilização.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os primeiros estudos relacionados ao comportamento das cerâmicas avançadas quanto ao desgaste e ao atrito em ambientes contendo umidade foram realizados por Tomizawa e Fischer (1985), que fizeram ensaios na configuração pino-disco com pares similares de nítreto de silício (Si_3N_4). Foi observada a influência de parâmetros como carga (entre 2 N e 30 N), rugosidade (de 0,05 μm a 0,4 μm) e condições do ambiente (argônio e ar, variando-se a umidade de 0% a 98%, nitrogênio seco, oxigênio seco, água e óleo lubrificante comercial). As figuras 1 e 2 ilustram o efeito da carga e da rugosidade iniciais no tempo de estabilização do coeficiente de atrito. Nota-se que para cargas mais altas, o tempo necessário para estabilização do coeficiente de atrito é menor. Vale salientar que o gráfico apresenta um corte no eixo das abcissas, para mostrar que a distância deslizada necessária para a estabilização no caso da carga de 2 N foi bem maior que para os outros casos.

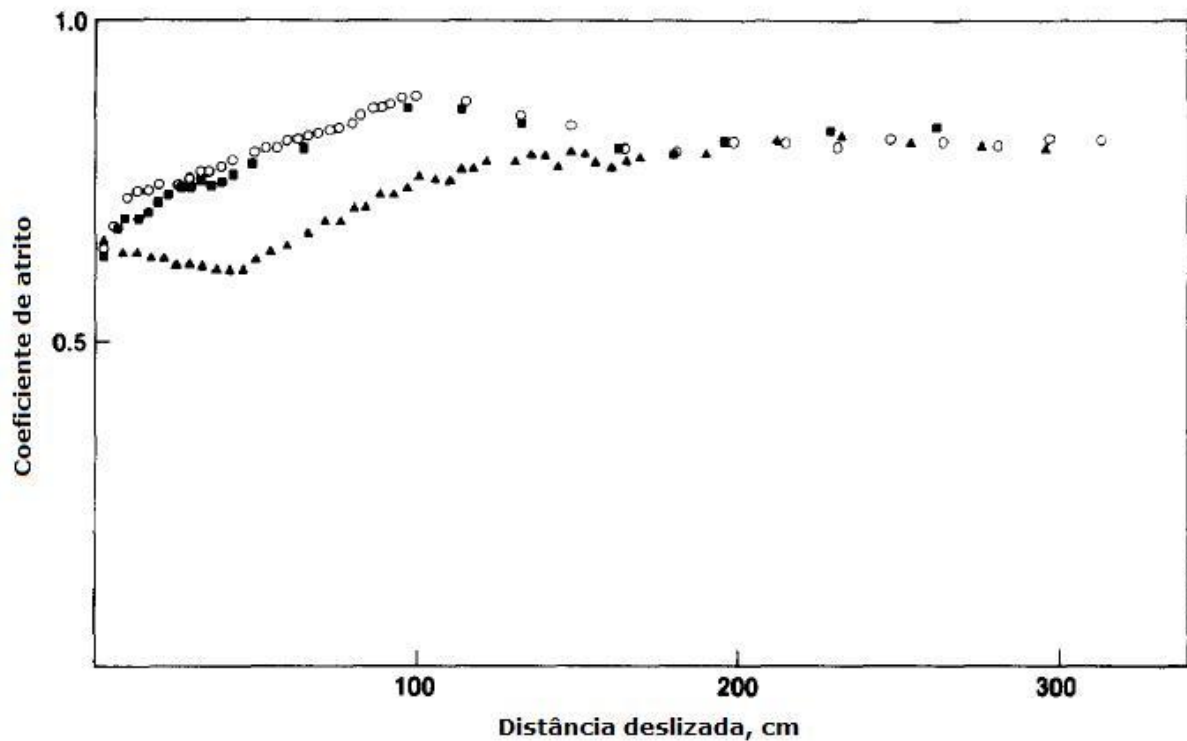
Para pequenas distâncias deslizadas, observou-se que o menor valor da rugosidade inicial levou a um menor valor de coeficiente de atrito no início, mas após a estabilização, estes valores ficaram similares. Nota-se ainda que para os maiores valores de rugosidade, ocorreu um pico inicial, que foi procedido da estabilização do coeficiente de atrito.

Figura 1 - Evolução temporal do coeficiente de atrito do Si_3N_4 sobre Si_3N_4 no ar, submetido a diferentes cargas (velocidade de deslizamento, 1 mm/s; hemisfério, 3 mm de raio; deslizando sobre planos): ●, 2 N; ○, 10 N; ▲, 20 N; △, 30 N.



Fonte: (TOMIZAWA; FISCHER, 1985).

Figura 2 - Evolução temporal do coeficiente de atrito do Si_3N_4 sobre Si_3N_4 no ar, em função da rugosidade (velocidade de deslizamento, 1 mm/s; hemisfério, 3 mm de raio; deslizando sobre planos): ▲, $R_a = 5 \times 10^{-8}$ m; ○, $R_a = 4 \times 10^{-7}$ m; ■, $R_a = 4 \times 10^{-7}$ m.



Fonte: (TOMIZAWA; FISCHER, 1985).

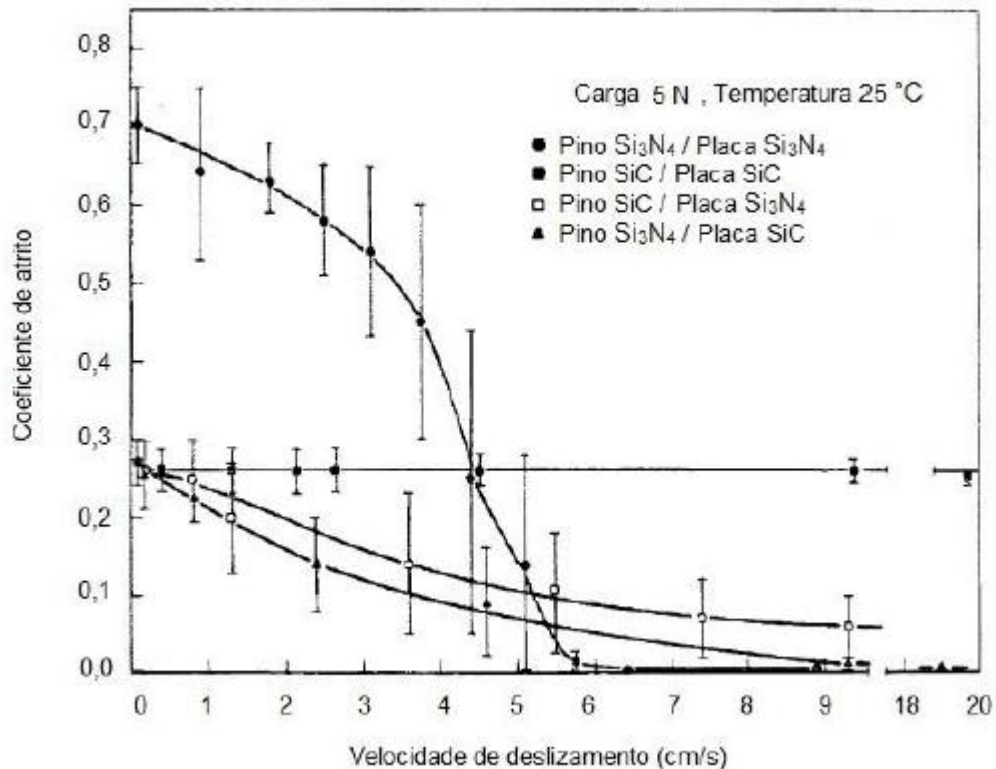
Tomizawa e Fischer (1985) não obtiveram valores de ultra-baixo coeficiente de atrito em seus ensaios, mas concluíram que a presença de água ou de ambientes úmidos reduz consideravelmente os valores de desgaste correspondentes. Através de microscopia ótica e eletrônica da trilha formada no disco e da superfície do pino, eles observaram que a presença de um ambiente úmido afeta não só no volume de desgaste, mas também em seu mecanismo de operação. Em ambientes gasosos, o desgaste é exclusivamente por fratura frágil, enquanto em ambientes com 98% de umidade e na água, o desgaste é predominantemente triboquímico.

Tomizawa e Fischer (1985) formularam ainda que o desgaste menor do nitreto de silício (Si_3N_4) quando comparado ao óxido de alumínio (Al_2O_3) se deve possivelmente à formação de uma camada de filme protetora que não era determinável, mas que provavelmente era de sílica amorfa hidratada.

Na sequência, Tomizawa e Fischer (1987) realizaram experimentos na configuração pino-disco utilizando nitreto de silício (Si_3N_4) e carbeto de silício (SiC), com um pino estacionário e um disco girante. As cargas de 5 N e 10 N foram aplicadas por um peso morto, a velocidade de deslizamento foi variada de 0,1 cm/s a 20 cm/s e as superfícies deslizantes estavam submersas em água deionizada. Todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente.

Em conformidade com os experimentos realizados dois anos antes, o desgaste do par Si_3N_4 - Si_3N_4 mostrou-se consideravelmente baixo. No entanto, obteve-se um resultado ainda mais importante: um ultra-baixo coeficiente de atrito, menor ou igual a 0,002, sendo que este valor era limitado pela precisão da célula de carga utilizada. Para as configurações utilizando o pino de SiC , os valores de coeficiente de atrito mantiveram-se relativamente altos, e na configuração pino de nitreto de silício e disco de carbeto de silício, obteve-se $\mu < 0,01$. A figura 3 mostra o comportamento do coeficiente de atrito para os diferentes pares utilizados com a variação da velocidade de deslizamento (TOMIZAWA; FISCHER, 1987).

Figura 3 - Efeitos da velocidade de deslizamento no coeficiente de atrito do Si₃N₄ e SiC em água.



Fonte: (TOMIZAWA; FISCHER, 1987).

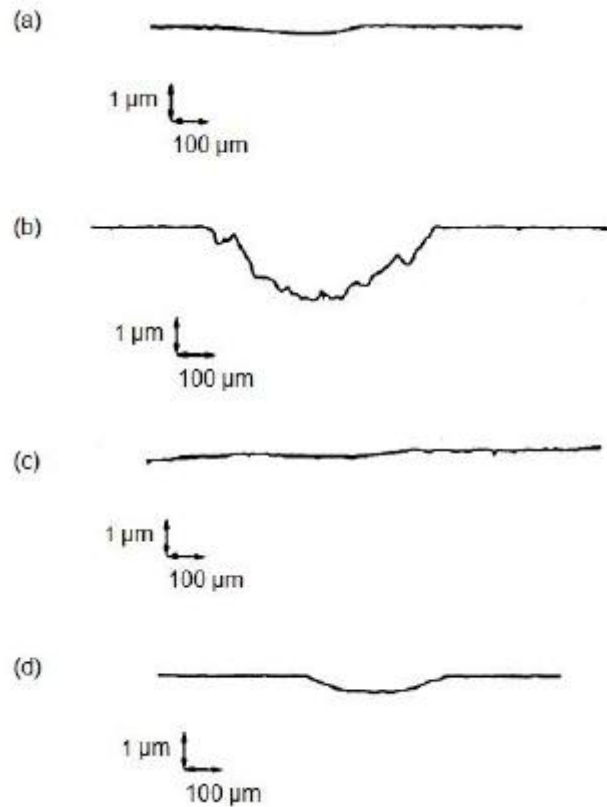
Concluiu-se que estes valores ultra-baixos de coeficiente de atrito para o nitreto de silício foram conseguidos através da obtenção de superfícies ultra lisas no deslizamento, devido a um desgaste triboquímico do par, com a dissolução do material e formação de sílica coloidal hidratada. As equações que descrevem este fenômeno estão apresentadas a seguir (TOMIZAWA; FISCHER, 1987).



Com a diminuição considerável da rugosidade média das superfícies deslizantes em decorrência deste desgaste triboquímico, que foi estimada como menor que 10 nm, seria possível a obtenção de uma lubrificação hidrodinâmica, com filmes de espessura mínima estimada em 70 nm, possibilitando o regime de UBCA. A figura 4 mostra o perfil das trilhas formadas no deslizamento dos quatro pares cerâmicos, ao final dos ensaios. Percebe-se que não há formação de uma superfície muito lisa

para o carbeto de silício (SiC), o que corrobora a teoria da lubrificação puramente hidrodinâmica do par similar Si_3N_4 - Si_3N_4 (TOMIZAWA; FISCHER, 1987).

Figura 4 - Perfilometria das trilhas de desgaste (a) pino de Si_3N_4 /disco de Si_3N_4 , (b) pino de SiC/disco de SiC, (c) pino de SiC/disco de Si_3N_4 e (d) pino de Si_3N_4 /disco de SiC.

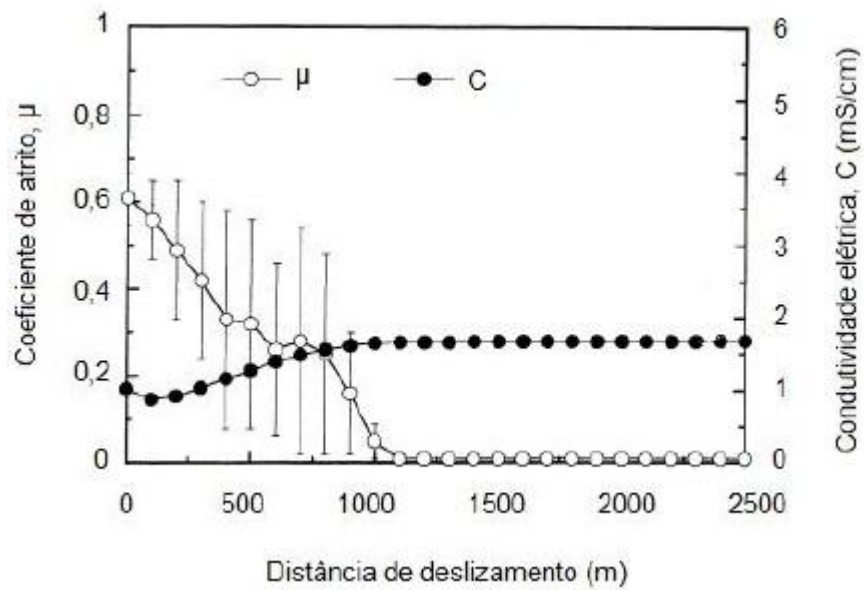


Fonte: (TOMIZAWA; FISCHER, 1987).

Em seguida, Xu e Kato (2000) realizaram ensaios com nitreto de silício na configuração pino-disco, e investigaram melhor a formação de uma camada triboquímica quando este material desliza contra si mesmo na presença de água. Variou-se a carga (3 N e 5 N), velocidade (30 mm/s, 60 mm/s e 120 mm/s) e temperatura (20 °C, 50 °C e 80 °C). A carga foi aplicada por um peso morto, e a temperatura foi variada com um aquecedor. A condutividade elétrica foi medida durante todo o ensaio, com o intuito de compreender a dinâmica das mudanças na concentração de íons na água. As figuras 5 e 6 ilustram o comportamento do coeficiente de atrito e da condutividade elétrica do meio com a distância deslizada, a 20 °C e a 80 °C respectivamente. Percebe-se que quando há uma diminuição considerável no coeficiente de atrito ($\mu < 0,03$), o valor da condutividade elétrica se

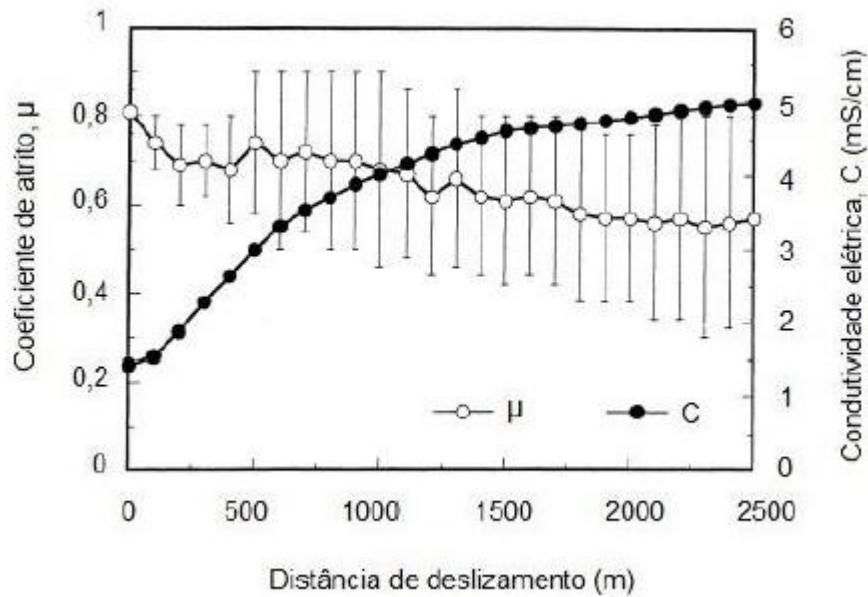
estabiliza, enquanto que para valores não tão pequenos ($\mu = 0,6 - 0,7$), a condutividade elétrica se mantém crescente durante todo o ensaio. Isto implica que a concentração de íons gerados aumenta com o atrito, e que o monitoramento da condutividade elétrica pode ser usado para estimar a dinâmica do processo de atrito (XU; KATO, 2000).

Figura 5 - Coeficiente de atrito e condutividade elétrica em função da distância deslizada a 20 °C.



Fonte: (XU; KATO, 2000).

Figura 6 - Coeficiente de atrito e condutividade elétrica em função da distância deslizada a 80 °C.



Fonte: (XU; KATO, 2000).

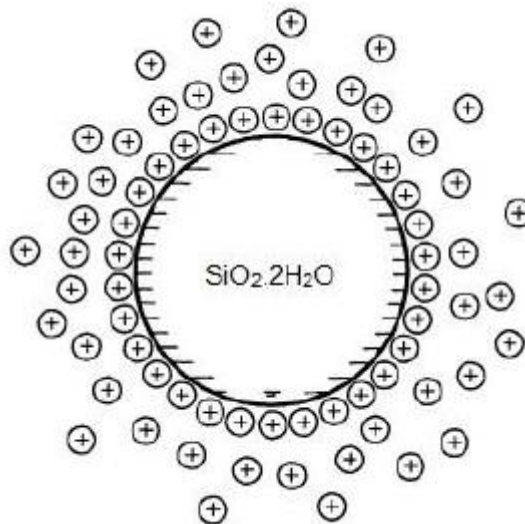
A formação de uma superfície muito lisa também é citada pelos pesquisadores como uma das premissas na obtenção do UBCA. No entanto, através de formulações matemáticas, eles concluíram que para uma lubrificação totalmente hidrodinâmica, a viscosidade necessária do lubrificante deveria ser, pelo menos, uma ordem de grandeza maior que a da água. Desta forma, eles concluíram que a lubrificação não poderia ser puramente hidrodinâmica (XU; KATO, 2000).

Através de resultados e observações, concluiu-se que a formação da camada de sílica segue quatro etapas: Grandes partículas de desgaste são geradas sob altas pressões de contato; Estas partículas são retidas na interface, esmagadas e transformadas em partículas menores; Durante o esmagamento, algumas partículas reagem com a água e formam sílica coloidal hidratada (Figura 7) através de triboativação; A sílica coloidal é adsorvida nas superfícies deslizantes e age como uma camada lubrificante. Esta camada fornece uma lubrificação limítrofe para o par deslizante, e mesmo que seja localmente removida, é rapidamente substituída por outras partículas dispersas na água, garantindo, desta forma, a continuidade do baixo atrito (XU; KATO, 2000).

A sílica coloidal hidratada forma uma dupla camada elétrica em sua superfície, o que garante a repulsão entre partículas similares que serão adsorvidas através de ligações secundárias de Van der Waals nas superfícies do par cerâmico (XU; KATO, 2000).

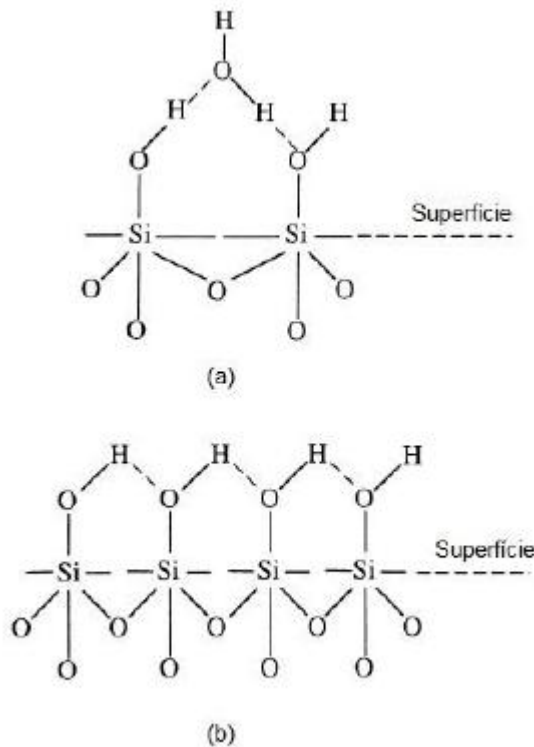
A figura 8 mostra um modelo desta sílica hidratada amorfa. As ligações de hidrogênio podem ser facilmente rompidas, o que leva a uma baixa resistência ao cisalhamento na superfície da sílica. Este fato é tido como o mais importante no por que da sílica formar uma excelente lubrificante (XU; KATO, 2000).

Figura 7 - Partícula de sílica coloidal hidratada com a dupla camada elétrica.



Fonte: (XU; KATO, 2000).

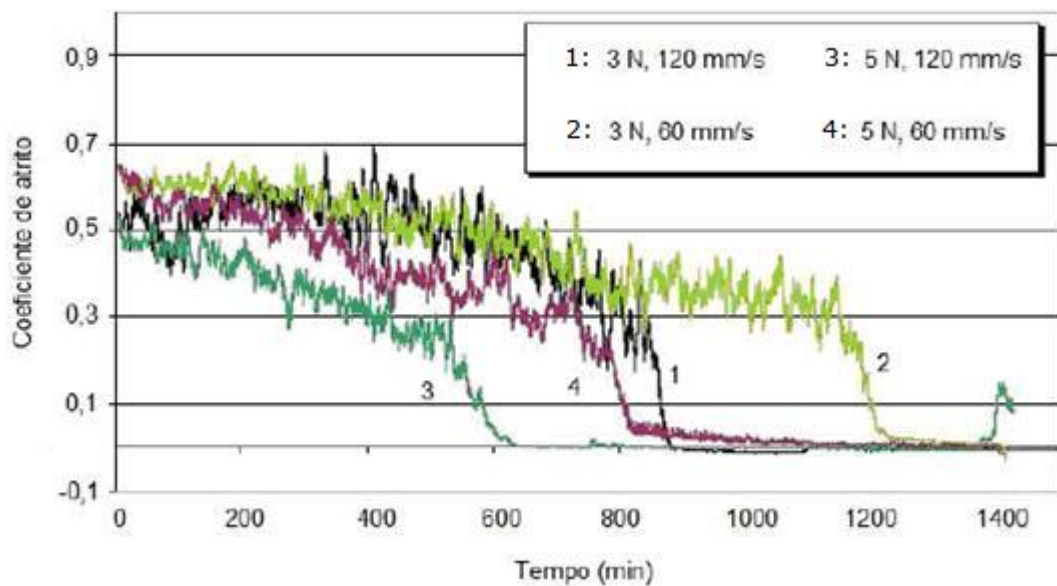
Figura 8 - Diferentes tipos de grupos hidroxila na superfície da sílica amorfa, sendo (a) superfície vizinha hidratada e (b) superfície composta por hidroxilas.



Fonte: (XU; KATO, 2000).

Jahanmir, Ozmen e Yves (2004) fizeram ensaios em um tribômetro na configuração esfera-disco e analisaram a influência da rugosidade e dos parâmetros carga e velocidade no tempo de running-in do coeficiente de atrito. A rugosidade média da esfera era de 2 nm, enquanto que para o disco foram utilizadas 2 nm para os polidos e 50 nm para os lapidados, aproximadamente. No caso dos discos lapidados, foram variados os parâmetros carga (3 N e 5 N) e velocidade (60 mm/s e 120 mm/s), e foi feita a análise dos tempos de estabilização (Figura 9). Obteve-se menor tempo para carga de 5 N e velocidade de 120 mm/s, e observou-se também que a carga prevalece sobre a velocidade, ou seja, cargas maiores correspondem a um menor tempo de running-in, o que está de acordo com a literatura em geral.

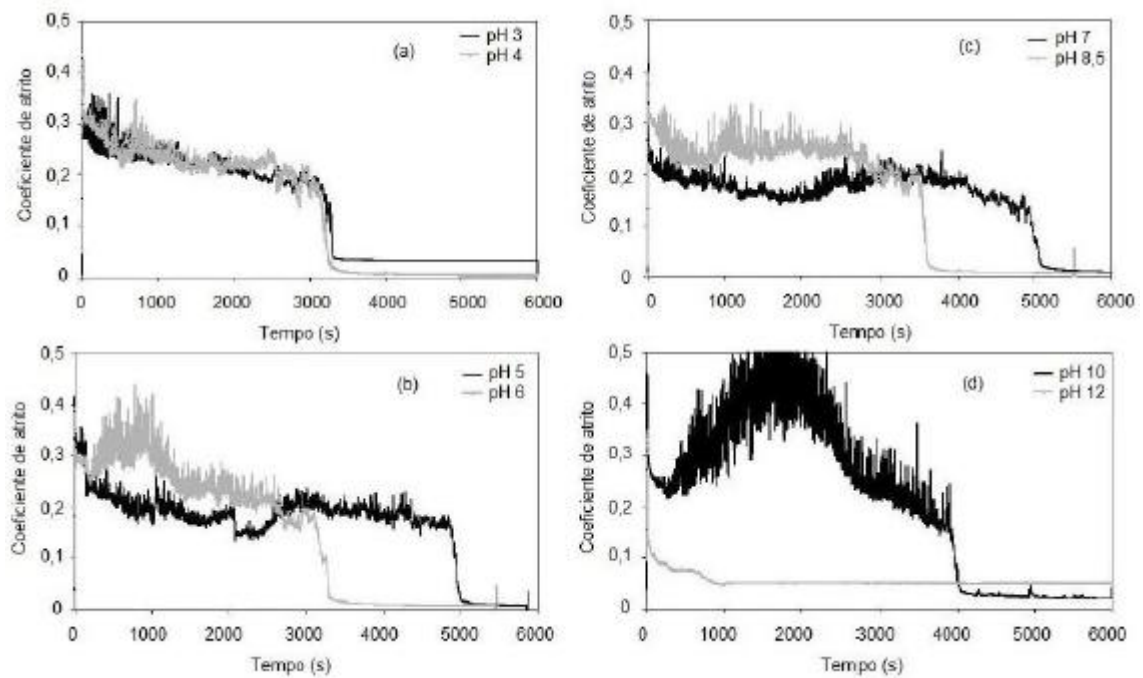
Figura 9 - O efeito da velocidade de deslizamento e carga normal no tempo de estabilização para o nitreto de silício deslizando sobre ele mesmo em água.



Fonte: (JAHANMIR; OZMEN; YVES, 2004).

Finalmente, Oliveira, Santos e Sinatora (2011) estudaram o par dissimilar $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$ num tribômetro com configuração esfera-disco, utilizando carga de 54,25 N aplicada por peso morto e velocidade de 1 m/s. Variou-se também o pH da água, entre 3 e 12. Os resultados mostraram que para valores de pH menores que 4 e maiores que 11, não foi possível obter-se o regime de ultra-baixo coeficiente de atrito. Isto ocorre devido às alterações na dupla camada elétrica formada nas partículas de sílica coloidal hidratada. Para pH pequeno (~ 3), as forças repulsivas que agem acima das partículas de sílica coloidal diminuem, resultando numa aglomeração destas e na perda de capacidade para suportar a carga. Para valores altos ($\text{pH} > 10$), a solubilidade da sílica cresce exponencialmente, de forma que estas partículas deixam de formar interações eletrostáticas com outras partículas e com as superfícies. (Figura 10).

Figura 10 - Coeficiente de atrito em função do tempo para o par $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Si}_3\text{N}_4$ deslizando em água, com o pH controlado. (a) pH 3 e 4; (b) pH 5 e 6; (c) pH 7 e 8,5; (d) pH 10 e 12.



Fonte: (OLIVEIRA; SANTOS; SINATORA, 2011).

Oliveira, Santos e Sinatora (2011) também investigaram a influência do pH da água no tempo de estabilização do regime. Observou-se uma variação mais acentuada para o pH 12, que apresentou tempo de running-in consideravelmente menor que os outros, de apenas 1500 s contra uma média de 4500 s.

3 MÉTODOS E EXPERIMENTOS

Para os ensaios de ultra-baixo coeficiente de atrito realizados no Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), utilizou-se a máquina Plint, modelo Microcontroled TE67 PIN ON DISC MACHINE, do Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS).

3.1 MATERIAIS

As amostras consistiam em uma esfera de nitreto de silício e um disco de óxido de alumínio. A esfera foi adquirida no mercado, e possuía diâmetro de 7/16" (aproximadamente 11,11 mm). Esta ficava presa por um porta esfera de aço inoxidável 316L ao cabeçote da Plint, e era ligada a uma célula de carga com precisão de 0,1 N e com capacidade de 5 Kgf.

O disco de alumina possuía diâmetro de 2" (aproximadamente 50,8 mm), um furo no centro com diâmetro de 9 mm e espessura entre 7 e 9 mm. Sua rugosidade rms (R_q) era 299 nm. Os discos podiam apresentar pequenas variações nestas características, devido ao processo de fabricação. Eles foram obtidos a partir do pó de alumina (AKS-3030A, Sumitomo Chemical Co., Japan) ultra-puro com 750 ppm de MgO, e processado no Centro de Ciências e Tecnologia de Materiais do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN).

3.1.1 USINAGEM

São utilizados discos de aço para a retificação das amostras, pois a fixação da peça na retificadora é feita através de atração magnética e, portanto, não é possível retificar os discos cerâmicos diretamente. Estes discos de aço, com diâmetro um pouco maior que os discos de óxido de alumínio, são primeiramente lixados, para retirada de marcas de oxidação, na Politriz (Figura 11). Em seguida, são lavados em

água corrente (Figura 12), e depois colocados em um aquecedor, com os discos de alumina sobre eles, à temperatura de 200 °C. Após cerca de 20 minutos, utiliza-se uma cola para junção dos discos. Com ajuda de uma luva térmica, passa-se a cola na superfície do disco de aço e prende-se o disco de óxido de alumínio sobre ele. Os dois são colocados sobre a chapa desligada, e permanecem sobre o aquecedor durante algumas horas, para que o resfriamento seja lento e não ocorram trincas no disco de alumina e a cola seque de forma que não se solte durante a usinagem (Figura 13).

Figura 11 - Discos de aço sendo lixados, para retirada das marcas de oxidação.



Fonte: Autor.

Figura 12 - Discos de aço sendo lavados em água corrente.



Fonte: Autor.

Figura 13 - Discos de alumina e de aço colados, resfriando sobre o aquecedor.



Fonte: Autor.

Na sequência, os discos são finalmente levados para a usinagem numa retificadora plana de marca Mello modelo RTP-2 (Figura 14). O objetivo da usinagem é a retirada das marcas e defeitos causados na fabricação e em ensaios anteriores, uma vez que o disco é reutilizado em outros ensaios. Foi usado um rebolo D25 (com tamanho médio de diamante entre 32 e 52 μm), da marca Winter. Inicialmente foram retirados 60 μm em passes de 15 μm , e posteriormente mais 15 μm em passes de 5 μm , com uma velocidade de corte menor, a fim de se obter um melhor acabamento superficial.

Figura 14 - Retificadora plana de marca Mello modelo RTP-2.



Fonte: Autor.

Após a retificação, os discos são lapidados, para que sua superfície apresentasse uma rugosidade isotrópica. Utilizou-se uma Politriz automática da Struers Tegra Pol – 25 e Tegra Force – 5, um disco de cobre e uma solução contendo partículas de diamante. Para se obter superfícies com R_q de 299 nm, segundo a norma ISO 4287, foi utilizada uma suspensão de diamantes com tamanhos médios de 15 μm . Os discos de cobre e de alumina rodavam em sentidos opostos, enquanto a solução contendo diamante era adicionada em forma de spray, a cada 120 segundos. O processo é lubrificado continuamente com álcool etílico.

3.1.2 LIMPEZA

Após a preparação do disco de alumina e da esfera de nitreto de silício, era necessário limpá-los adequadamente, para que não houvesse impurezas nas superfícies que poderiam interferir nos processos relativos ao ensaio. Era necessário limpar também quatro outras peças que estariam em contato com o corpo e contra corpo durante o teste: o porta esfera e sua porca, o porta disco e o parafuso de fixação do disco. Todos eles foram lavados com água e sabão líquido (Figuras 15 e 16), e colocados em dois frascos: um com o corpo e contra corpo, e outro com as partes metálicas, ambos com acetona. Os vasilhames foram levados para um banho ultra-sônico por 30 minutos (Figura 17). Em seguida, as peças foram secadas com auxílio de um secador de cabelo e instaladas na Plint. O manuseio das partes após o banho ultra-sônico foi todo feito com auxílio de luvas descartáveis, para evitar possível contaminação.

Figura 15 - Limpeza da esfera com água corrente e detergente neutro.



Fonte: Autor.

Figura 16 - Limpeza do disco com água corrente e detergente neutro.



Fonte: Autor.

Figura 17 - Banho ultra-sônico por 30 minutos, mergulhados em acetona.



Fonte: Autor

3.1.3 INSTALAÇÃO

O porta disco foi instalado, e em seguida, o disco. No furo do disco, colocou-se uma arruela de politetrafluoretileno (PTFE), que funcionava como vedação para o parafuso, que foi rosqueado em seguida. Com isso, evitou-se infiltração de água nas partes internas da máquina através da rosca do parafuso. Após o aperto, era necessário verificar o paralelismo entre a superfície do disco e o cabeçote da esfera. Utilizou-se um relógio comparador da Mitutoyo para esta verificação, com precisão de 1 μm . O ponto mais baixo da superfície foi localizado e marcado. Com o auxílio de calços de cerca de 30 μm de espessura, o paralelismo foi certificado. Para que ele fosse satisfatório, a variação de altura deveria ser de, no máximo, 25 μm .

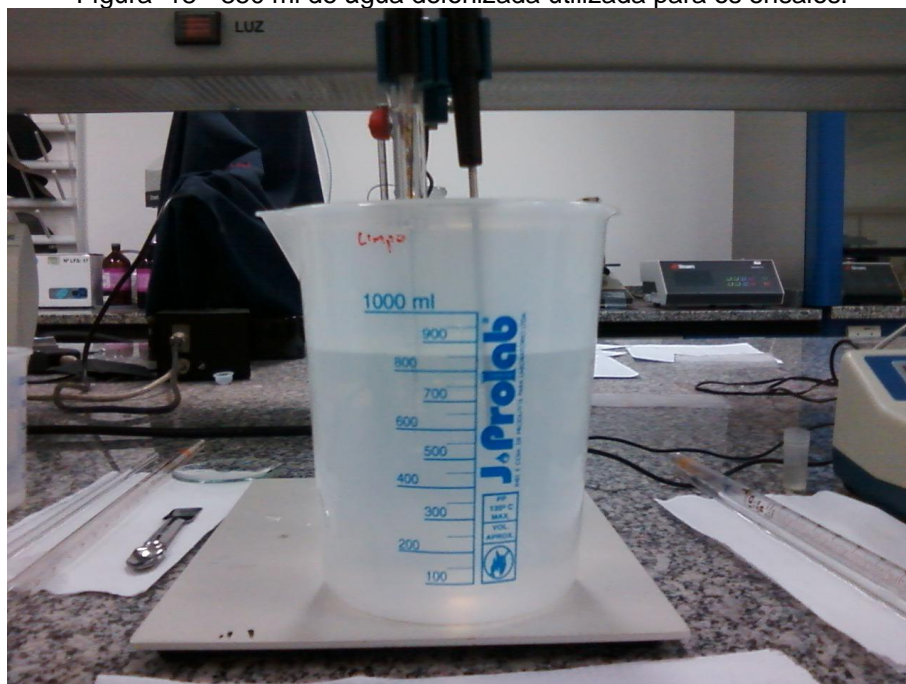
Com o disco de alumina instalado, era necessário instalar o porta esfera e a esfera de nitreto de silício. Os mesmos também deveriam ser manuseados sem contato manual. O porta esfera é colocado antes, e depois a esfera, junto com a porca. Após serem colocados no cabeçote, eles devem ser rosqueados com duas chaves, uma para segurar e outra para apertar, de modo a não solicitar a célula de carga com um torque superior àquele que ela suporta. Para este ajuste, é necessário estar com o software da Plint ligado, para que seja possível a visualização desta solicitação. Por fim, este aparato porta esfera e esfera é preso com auxílio de elásticos de dinheiro, que o seguram e não permitem o contato entre a esfera e o disco antes do início do ensaio.

3.1.4 ÁGUA

Com corpo e contra corpo instalados, era necessário fazer a verificação da água de lubrificação. A água utilizada nestes ensaios era deionizada. Foram feitas também mudanças quanto às propriedades químicas da água, como pH e aditivação. Em um dos ensaios realizados, foi utilizada água deionizada com sílica (Si_2O) pirogênica amorfa, de fabricação da Degusa, tipo Aerosil® 200, de comportamento hidrofílico,

numa concentração de 0,028 g/l. Esta sílica foi adicionada à 850 ml de água (Figura 18). A preparação desta água com sílica dissolvida consistia também em uma checagem e controle anterior do pH da água. Para tanto, utilizou-se um pHmetro Gehaka modelo PG2000 , que utiliza dois metais, um livre e outro confinado em um vidro contendo cloreto de potássio (KCl). Este equipamento é calibrado através de duas soluções de pH padrão, limpo com água destilada, e em seguida, mergulhado na água deionizada, para verificação do pH. O pH necessário para realização do ensaio com sílica dissolvida é 8,5 e, no entanto, encontrou-se um valor de 9. Era necessário, portanto, reduzir o pH da solução. Para isto, fez-se uso de uma solução 0,1 M de hidróxido de sódio (NaOH). Como o peso molecular do NaOH é 40, adicionou-se 0,4 g à 100 ml de água deionizada em um frasco plástico, e adicionou-se a esta mistura com auxílio de uma pipeta aos 850 ml de água. Em seguida, foram colocadas 0,0238 g de sílica pirogênica, de acordo com a proporção de 0,028 g/l. Ao final, adicionou-se cloreto de sódio (NaCl) na proporção de 0,001 M, o que de acordo com seu peso molecular (58,44) e com a quantidade de líquido da mistura (850 ml), resultou em 0,05 g de NaCl. O cloreto de sódio tem como objetivo catalisar as reações da sílica e aumentar a quantidade de cargas na solução. As massas do NaOH, NaCl e da sílica pirogênica foram pesadas numa balança Mettler Tolleo AB204. Por fim, a solução final foi misturada com um agitador rotativo sob alta rotação por aproximadamente 5 minutos, para quebra dos aglomerados (Figura 19).

Figura 18 - 850 ml de água deionizada utilizada para os ensaios.



Fonte: Autor.

Figura 19 - Agitador rotativo de alta rotação, para quebra dos aglomerados de sílica pirogênica amorfa.



Fonte: Autor.

Outros dois tipos de água foram usados nos outros ensaios: uma com pH 3 e outra com pH 12. A água com pH 12 foi obtida com a adição de NaOH, conforme explicada no parágrafo anterior. Já a água com pH 3 foi obtida com uma solução 0,1 M de ácido clorídrico (HCl). O HCl usado estava em uma concentração de 36,5 %, portanto, através de contas estequiométricas, resultou em 0,84 ml do ácido para 100 ml de água. Este ácido fraco foi adicionado paulatinamente à água deionizada e o pH foi medido constantemente, até a obtenção do valor de pH 3.

Após o acerto da água utilizada em cada ensaio, o erlenmeyer contendo o lubrificante foi fixado ao lado da Plint, e mangueiras de polietileno foram instaladas para fazer a transmissão do fluido até a interface do par cerâmico. Para a transmissão do lubrificante, foi usada uma bomba peristáltica. Antes do início de cada ensaio, o sistema de lubrificação era limpo, através da passagem de água pelas mangueiras e pelas superfícies das cerâmicas com o motor ligado a uma rotação de 400 rpm. Esta água era retirada com outro recipiente e descartada. Para os ensaios, utilizou-se sempre 500 ml de água, que passava por um sistema fechado, sendo succionada pela bomba, lançada sobre o contato disco-esfera, vazada por um orifício lateral da cuba (modelo TE67/LE Lubricant Enclosure), e recolocada no erlenmeyer.

3.2 MÉTODO

Após a limpeza do sistema de água, foi necessário setar a máquina com os parâmetros desejados através do software controlador do tribômetro COMPEND 2000. Carga, velocidade de rotação e tempo são inseridos no computador para obtenção dos dados. Os ensaios consistiam de algumas etapas. A primeira durava apenas 2 segundos, ainda com o motor desligado, para dar início à eletrônica da máquina. A segunda era maior, 120 segundo. Nesta etapa, o motor é ligado e sua rotação é estabilizada. A terceira etapa é a mais importante, e também a mais longa. São 5500 segundos (aproximadamente 1,5 h) de coleta de dados como força de atrito, temperatura de contato e pressão de contato. Através da força de atrito, o software calcula o coeficiente de atrito (Equação 3), que era instantaneamente

plotado em um gráfico em função do tempo (frequência de 1 Hz). Logo no início desta etapa, o peso morto é colocado sobre o cabeçote, e os elásticos de dinheiro são retirados para que o contato se estabeleça. Por fim, a quarta etapa, que dura 120 segundos, e a quinta, que dura apenas 10 segundos, para retirada da carga e finalização do ensaio.

$$\mu = F/W \quad (3)$$

Para o ajuste das velocidades, era escolhido inicialmente o raio da trilha (um disco poderia ser aproveitado várias vezes, variando-se este raio e criando várias trilhas numa mesma superfície), e em função deste raio, era calculada a rotação que resultaria na velocidade linear desejada, de acordo com a equação 4.

$$V = \omega R \quad (4)$$

Para os ensaios, utilizou-se cargas de 5,5 Kgf e 3,5 Kgf, e velocidades de 1 e 0,5 m/s. No primeiro ensaio, a configuração foi carga 5,5 Kgf e velocidade de 1 m/s. O segundo, a carga foi de 3,5 Kgf e velocidade 1 m/s. No terceiro, utilizamos 3,3 Kgf e 0,5 m/s, e na quarta, 5,5 Kgf e 0,5 m/s. Para os ensaios seguintes, a carga e velocidade eram as mesmas, 5,5 Kgf e 1 m/s, no entanto variou-se a água para lubrificação. Assim sendo, o quinto utilizou água com sílica pirogênica amorfa, na proporção de 0,028 g/l. No sexto, a água teve seu pH alterado para 3, e finalmente o sétimo, com pH 12. Um resumo destes parâmetros e de seus respectivos ensaios é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros dos ensaios.

Ensaio	Velocidade (m/s)	Carga normal (Kgf)	pH	Adição na água
1	1	5,5	8,5	-
2	0,5	3,5	8,5	-
3	1	3,5	8,5	-
4	0,5	5,5	8,5	-
5	1	5,5	8,5	Sílica pirogênica
6	1	5,5	3	-
7	1	5,5	12	-

Fonte: Autor.

O COMPEND 2000 organiza os dados em uma planilha que, ao final do ensaio, é utilizada para gerar o gráfico com os valores de coeficiente de atrito em função do tempo. Em algumas das amostras, foi possível realizar verificações posteriores, como aspectos da trilha. Para isto, foi utilizada a máquina Nikon SMZ 800.

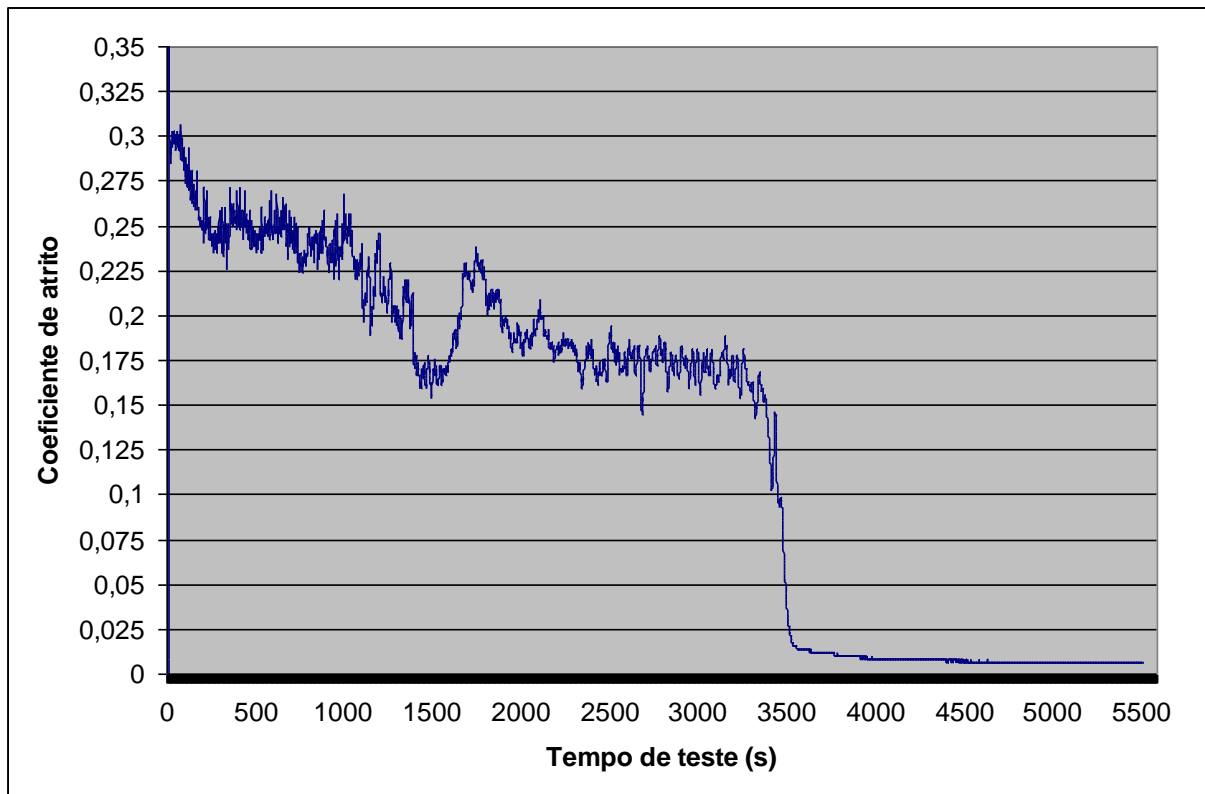
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos nos ensaios são mostrados em ordem crescente, de acordo com a tabela 1. Eles são apresentados em forma de gráficos, com o coeficiente de atrito variando em função do tempo, em segundos. Para os últimos três ensaios, obteve-se, além do gráfico, fotos da trilha formada no disco e da calota formada na esfera. Através da calota pode-se calcular o volume desgastado nas esferas de acordo com as equações 5 e 6, e através da foto da trilha, pode-se analisar qualitativamente a trilha formada.

$$h = r - \sqrt{r^2 - \frac{D^2}{4}} \quad (5)$$

$$V_E = \frac{\pi h}{6} (3D^2 + h^2) \quad (6)$$

Figura 20 - Variação do coeficiente de atrito com o tempo para o primeiro ensaio: $V = 1 \text{ m/s}$ e $W = 5,5 \text{ kgf}$.

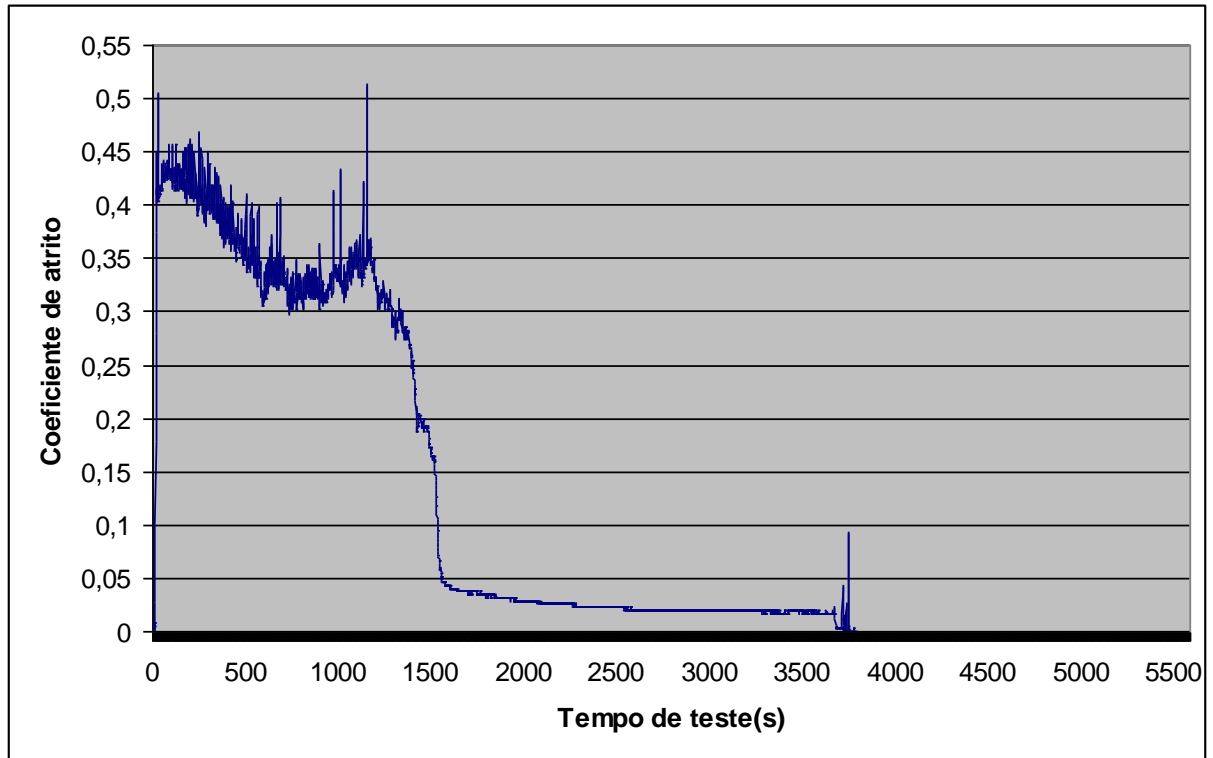


Fonte: Autor.

O coeficiente de atrito alcançado ao final do primeiro ensaio (Figura 20) foi de 0,006, ou seja, um ultra-baixo coeficiente de atrito, conforme Tomizawa e Fischer (1987), Xu e Kato (2000) e Oliveira, Santos e Sinatora (2011).

O tempo de running-in foi de aproximadamente 3500 s. Comparado ao trabalho de Oliveira, Santos e Sinatora (2011), o tempo de runnig-in deste ensaio foi similar (3600 s e 3500s, respectivamente), o que confirma o resultado dos mesmos.

Figura 21 - Variação do coeficiente de atrito com o tempo para o segundo ensaio: $V = 1 \text{ m/s}$ e $W = 3,5 \text{ kgf}$.

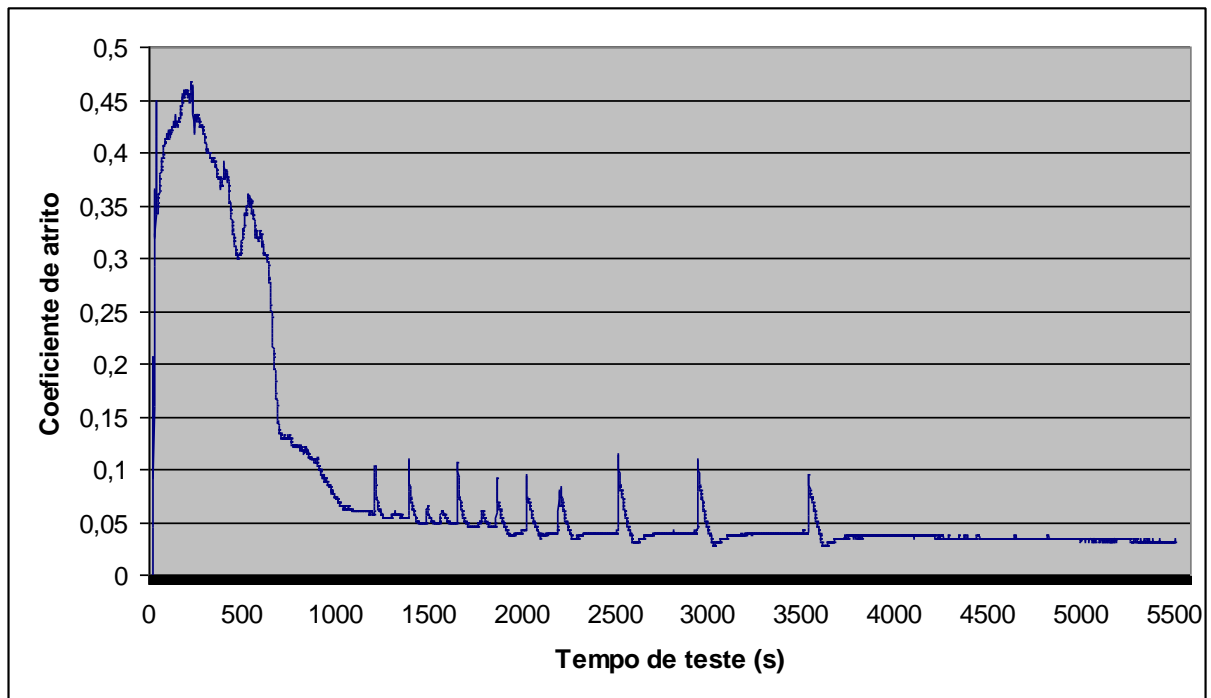


Fonte: Autor

O coeficiente de atrito alcançado ao final do segundo ensaio (Figura 21) foi de 0,02, ou seja, um baixo coeficiente de atrito.

Este ensaio foi terminado com aproximadamente 3700 s, para que fosse possível a realização de um terceiro ensaio. Isto não afetou nos resultados, já que o regime já havia sido estabilizado com 1500 s.

Figura 22 - Variação do coeficiente de atrito com o tempo para o terceiro ensaio: $V = 0,5 \text{ m/s}$ e $W = 3,5 \text{ kgf}$.



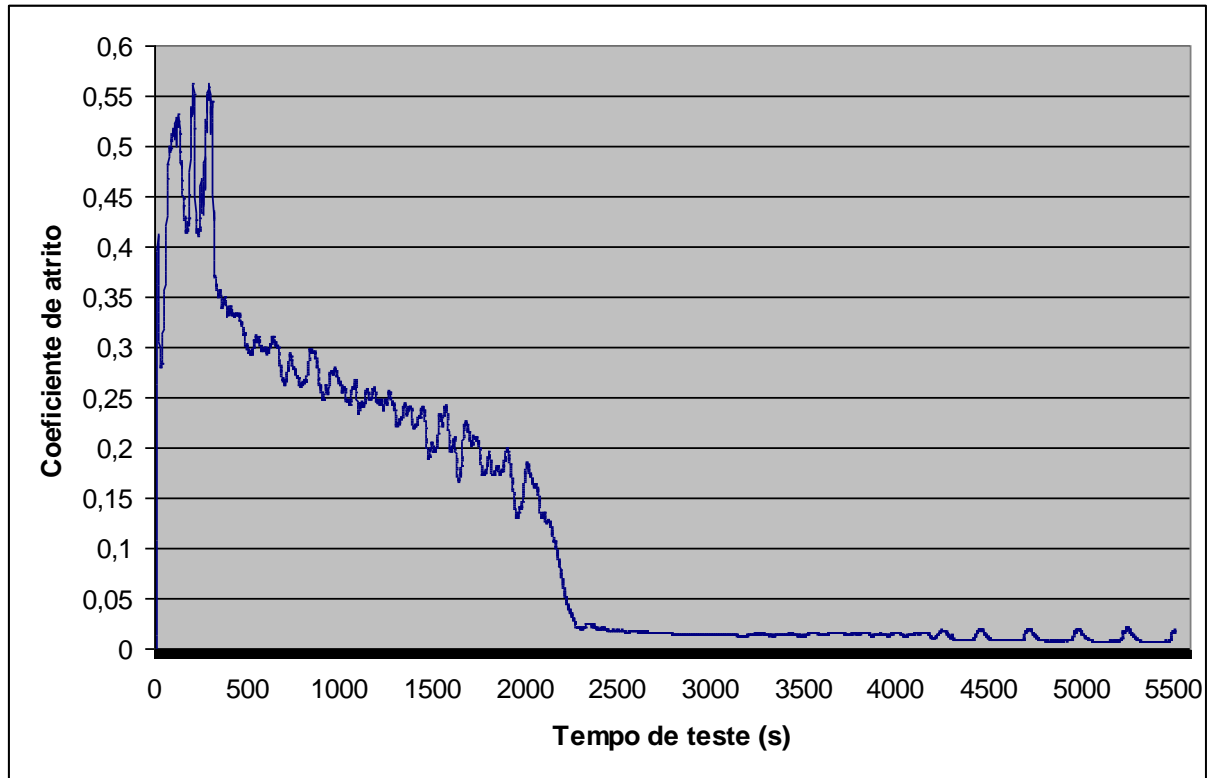
Fonte: Autor.

O coeficiente de atrito alcançado ao final do terceiro ensaio (Figura 22) foi de 0,04, ou seja, um baixo coeficiente de atrito.

O tempo de running-in foi de aproximadamente 1000 s.

Este ensaio teve um comportamento não muito usual, pois mesmo após a estabilização do regime houveram alguns picos, caracterizados por um desgaste mecânico e por valores momentaneamente mais altos de coeficiente de atrito. Eles se tornaram mais espaçados com o decorrer do ensaio, mas não é possível afirmar que haveria uma completa extinção destes picos com cerca de 3600 s.

Figura 23 - Variação do coeficiente de atrito com o tempo para o quarto ensaio: $V = 0,5 \text{ m/s}$ e $W = 5,5 \text{ kgf}$.



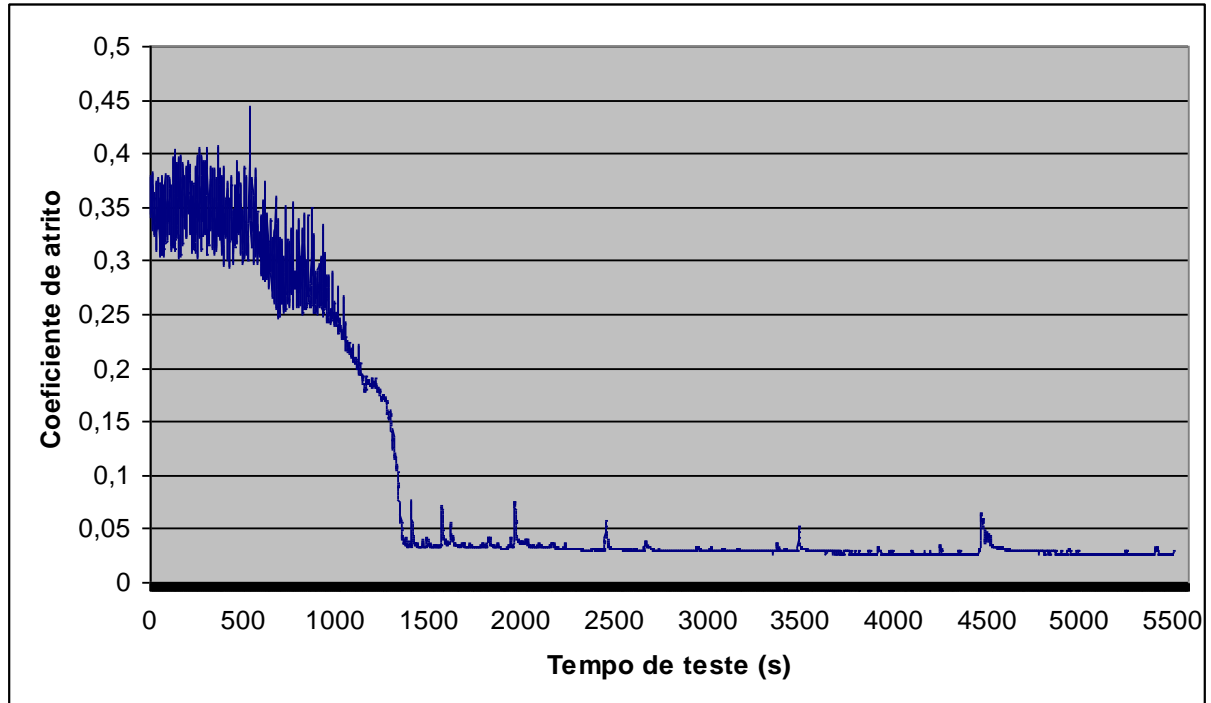
Fonte: Autor

O coeficiente de atrito alcançado ao final do quarto ensaio (Figura 23) foi de 0,02, ou seja, um baixo coeficiente de atrito.

Este gráfico teve um comportamento também não muito usual. A partir de 500 s, o gráfico começa a ter uma diminuição gradativa do coeficiente de atrito, mas ainda caracterizada pelo desgaste mecânico. Vale ressaltar ainda que houveram pequenos picos de coeficiente de atrito, mesmo após a estabilização do regime, similar ao terceiro ensaio. Estes picos acontecem com uma frequência mais regular, comparados aos similares ocorridos no ensaio anterior.

O tempo de runnig-in foi de aproximadamente 2300 s.

Figura 24 - Variação do coeficiente de atrito com o tempo para o quinto ensaio: $V = 1$ m/s e $W = 5,5$ kgf, água com sílica dissolvida.

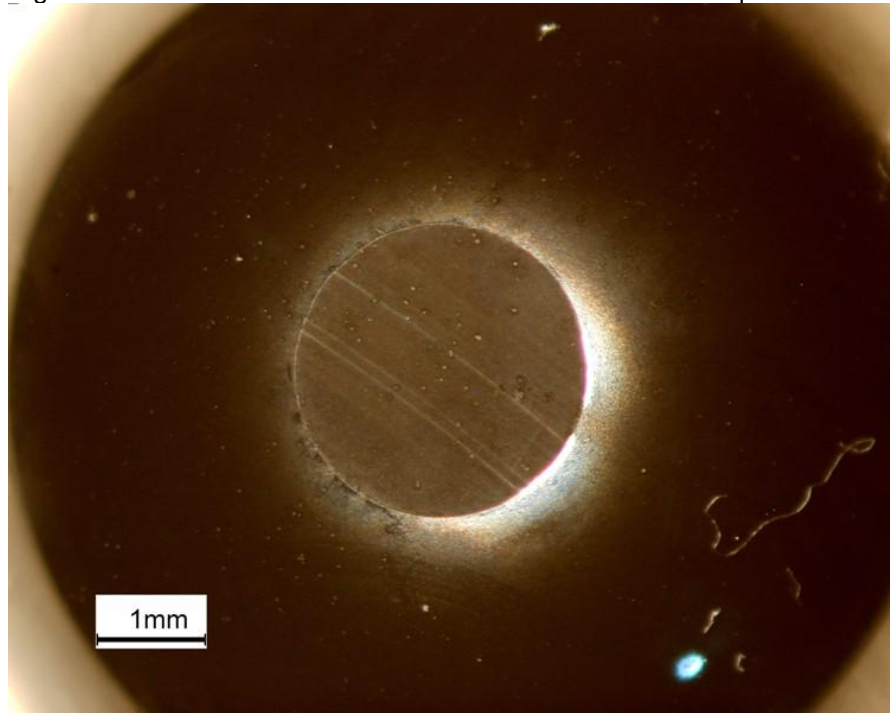


Fonte: Autor.

O coeficiente de atrito alcançado ao final do quinto ensaio (Figura 24) foi de 0,03, ou seja, um baixo coeficiente de atrito.

A diminuição do tempo de running-in esperada com a adição de sílica à água de lubrificação foi confirmada, quando comparada ao ensaio similar: de 3500 s para 1300 s, aproximadamente.

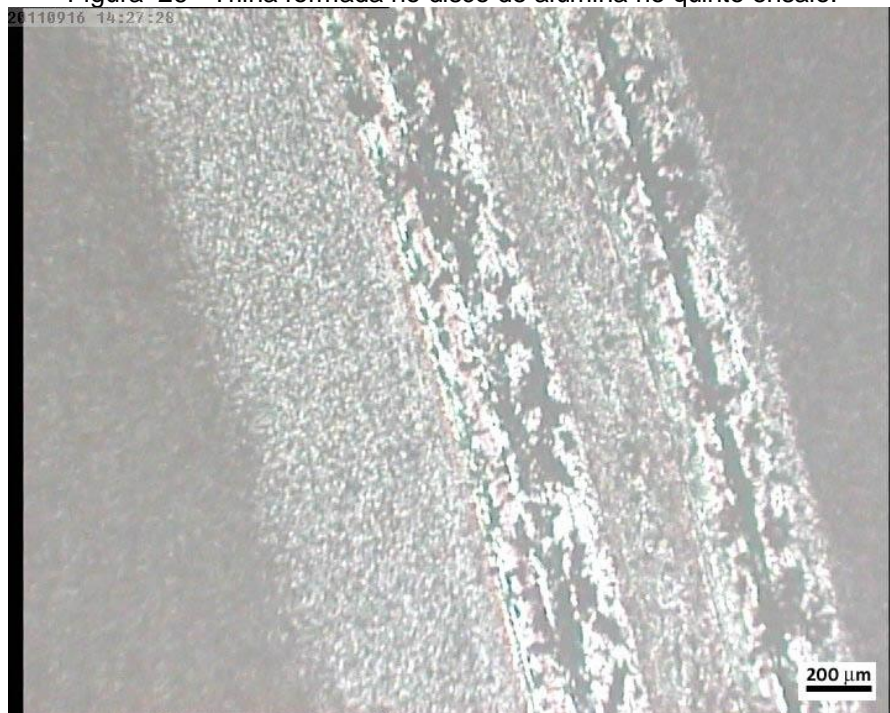
Figura 25 - Calota formada na esfera de nitreto de silício no quinto ensaio.



Fonte: Autor.

Com o raio da esfera de 11,11 mm e com o diâmetro da calota de 2,77 mm, foi possível calcular o volume desgastado na esfera (Figura 25), que foi de $33,40 \text{ mm}^3$.

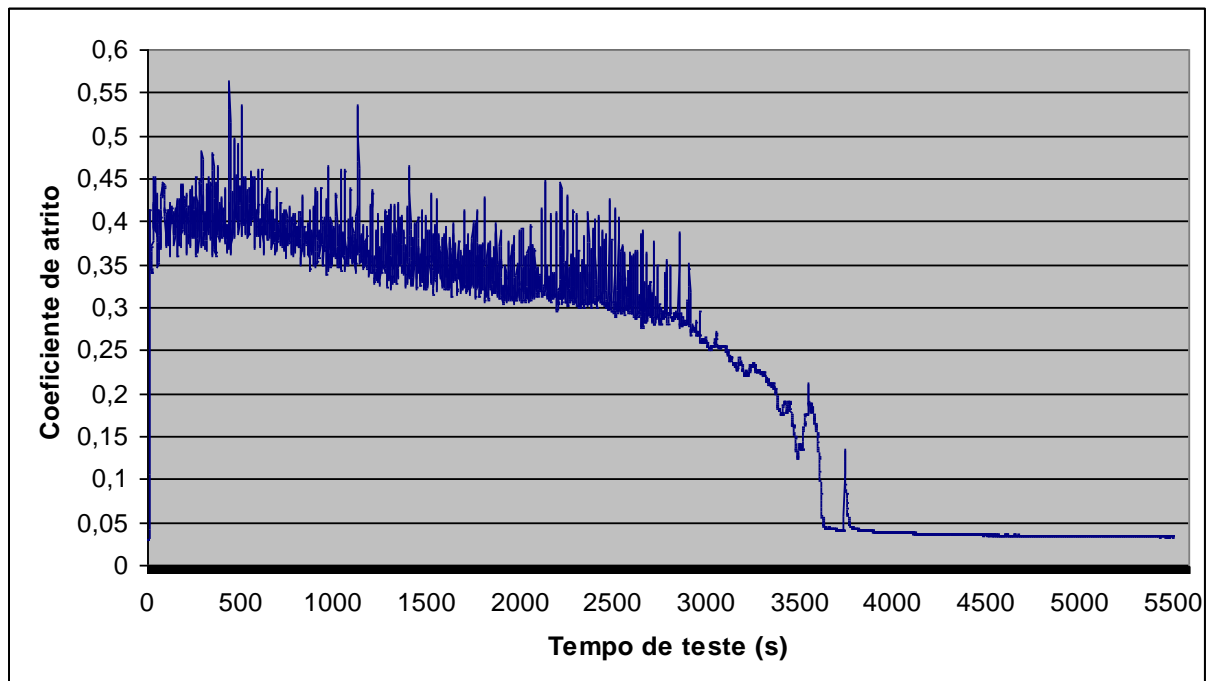
Figura 26 - Trilha formada no disco de alumina no quinto ensaio.



Fonte: Autor.

A trilha (Figura 26) apresentou uma superfície com partes lisas, caracterizadas pela parte mais uniforme, e partes mais rugosas, caracterizadas pelo lado mais irregular. Podemos afirmar, portanto, que não foi obtida uma superfície ultra-lisa, e sim uma superfície irregular.

Figura 27 - Variação do coeficiente de atrito com o tempo para o sexto ensaio: $V = 1 \text{ m/s}$ e $W = 5,5 \text{ kgf}$, água com pH 3.

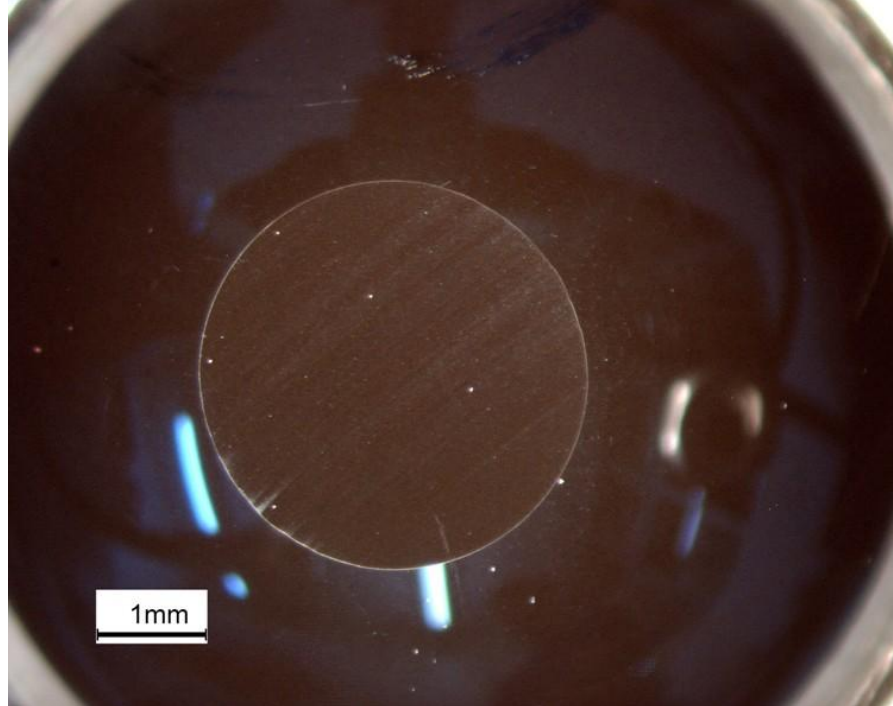


Fonte: Autor.

O coeficiente de atrito alcançado no final do sexto ensaio (Figura 27) foi de 0,03, ou seja, um baixo coeficiente de atrito.

O tempo de running-in foi de aproximadamente 3600 s.

Figura 28 - Calota formada na esfera de nitreto de silício no sexto ensaio.



Fonte: Autor.

O diâmetro da calota formada na esfera é de 3,50 mm, e, portanto, o volume desgastado na esfera (Figura 28) foi de $67,38 \text{ mm}^3$.

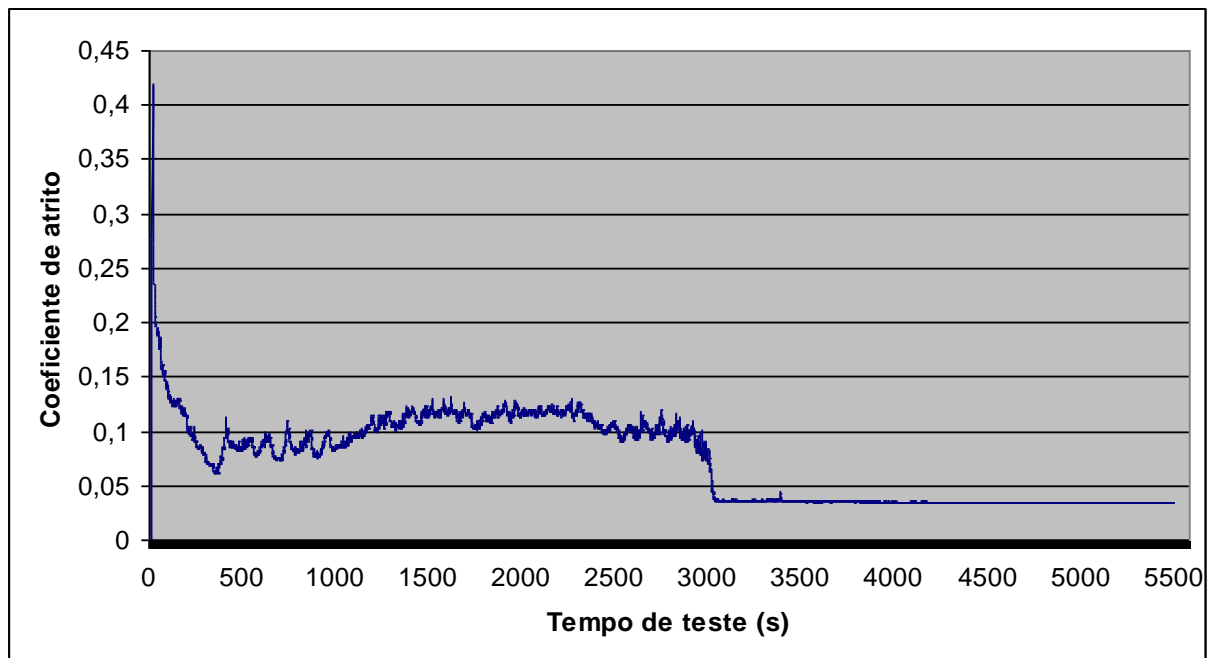
Figura 29 - Trilha formada no disco de alumina no sexto ensaio.



Fonte: Autor.

A trilha apresentou uma superfície rugosa, caracterizada pelas partes irregulares apresentadas acima (Figura 29). Portanto, o disco não apresentou uma superfície ultra-lisa, e sim uma superfície bastante irregular.

Figura 30 - Variação do coeficiente de atrito com o tempo para o sétimo ensaio: $V = 1 \text{ m/s}$ e $W = 5,5 \text{ kgf}$, água com pH 12.



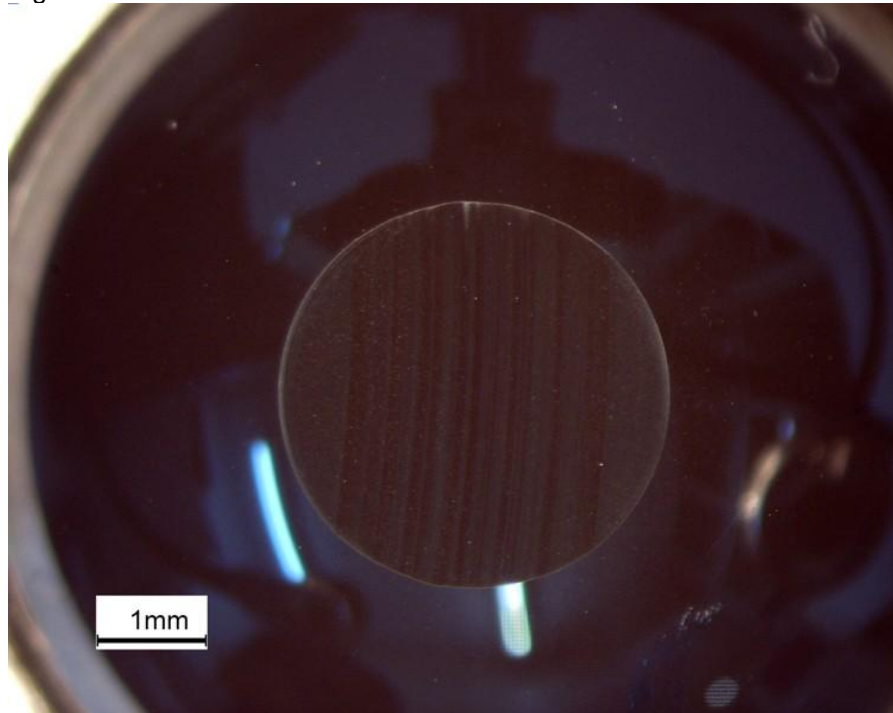
Fonte: Autor.

O coeficiente de atrito alcançado no final do sétimo ensaio (Figura 30) foi de 0,03, ou seja, um baixo coeficiente de atrito.

Para o ensaio com pH 12, percebe-se que o coeficiente de atrito permaneceu num patamar mais baixo o tempo todo, em relação aos outros ensaios.

O tempo de running-in foi de aproximadamente 3000 s.

Figura 31 - Calota formada na esfera de nitreto de silício no sétimo ensaio.



Fonte: Autor.

O diâmetro da calota formada na esfera é de 3,55 mm e, portanto, o volume desgastado na esfera (Figura 31) foi de 70,31 mm³.

Figura 32 - Trilha formada no disco de alumina no sétimo ensaio.



Fonte: Autor.

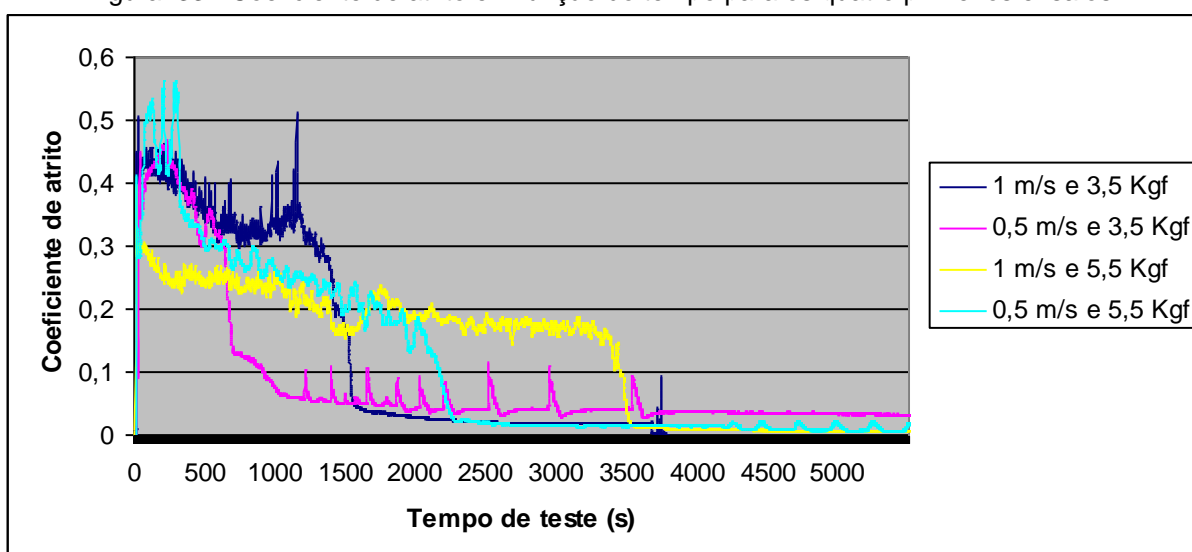
A trilha apresentou uma superfície lisa, caracterizada pela parte uniforme da figura acima. Vale ressaltar que esta trilha seria a mais indicada para a formação de uma lubrificação hidrodinâmica, conforme previsto por Tomizawa e Fischer (1987). No entanto, ela não foi suficiente para fornecer as condições necessárias para que o UBCA ocorresse.

Os ensaios realizados com pH 3 e pH 12 não resultaram em um ultra-baixo coeficiente de atrito. Quando a água possuiu pH 12, o tempo de running-in foi menor, ao ser comparado ao ensaio com pH 3. Estes resultados confirmam resultados anteriores, de acordo com Oliveira, Santos e Sinatora (2011).

O insucesso de seis dos sete ensaios na obtenção do ultra-baixo coeficiente de atrito pode ser consequência de inúmeros fatores, como contaminação das amostras, variação nas características dos discos, erros na instalação dos componentes, entre outros.

A comparação entre os resultados dos quatro primeiros ensaios com relação ao tempo de estabilização é mostrada na figura 33.

Figura 33 - Coeficiente de atrito em função do tempo para os quatro primeiros ensaios.



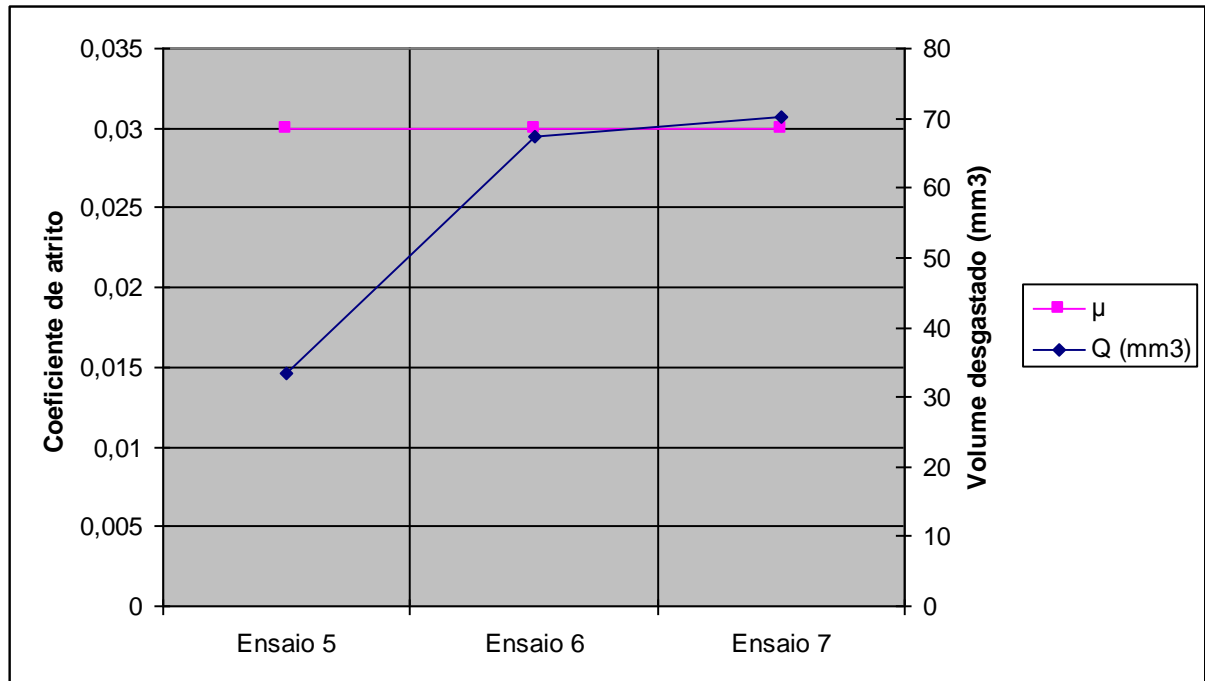
Fonte: Autor.

Nota-se que o maior tempo de estabilização ocorreu para os parâmetros carga de 5,5 kgf e velocidade de deslizamento de 1 m/s. Observou-se ainda que a diminuição da carga, ou da velocidade, ou de ambas reduz o tempo de estabilização, para a água com pH 8,5.

Os resultados esperados dos quatro primeiros ensaios quanto ao tempo de running-in em função dos parâmetros velocidade de deslizamento e carga quando comparados ao trabalho de Jahanmir, Ozmen e Yves (2004) não foram obtidos. Uma das possíveis causas dessa dissimilaridade é a diferença entre os materiais cerâmicos empregados.

Os resultados entre os coeficientes de atrito quando o regime é estabilizado e a relação entre estes valores e os valores de desgaste, para os três últimos ensaios, é mostrado na figura 34. Observa-se que não há relação direta entre o coeficiente de atrito com o desgaste. Vale ressaltar ainda que no sétimo ensaio, o coeficiente de atrito manteve-se o tempo inteiro em um patamar menor de atrito, e mesmo assim, resultou nas maiores taxas de desgaste. Isto desmente completamente a idéia errônea de que uma alta taxa de desgaste é sempre proveniente de um alto atrito.

Figura 34 - Comparação entre coeficiente de atrito obtido ao final dos ensaios e o desgaste nas esferas.



Fonte: Autor.

5 CONCLUSÃO

Foi obtido o ultra-baixo coeficiente de atrito somente no primeiro ensaio (carga de 5,5 kgf e velocidade de deslizamento de 1 m/s), sendo este de 0,006. Nos outros ensaios foram obtidos baixos coeficientes de atrito, da ordem de centésimos.

Observou-se que a diminuição da carga ou da velocidade diminuiu o tempo de estabilização, conforme mostrado nos 4 primeiros ensaios, sendo que com a menor carga e a menor velocidade de deslizamento (3,5 kgf e 0,5 m/s, respectivamente), obteve-se o menor tempo (aproximadamente 1000 s). No entanto, para nenhum destes ensaios com valores de carga e velocidade diferentes de 5,5 kgf e 1 m/s obteve-se um regime de UBCA.

A variação do pH influenciou no tempo de running-in e no volume desgastado, conforme observado nos últimos dois ensaios.

A sílica dissolvida à água diminui o tempo de running-in, se for comparada ao primeiro ensaio, que possui parâmetros similares. No entanto, não foi obtido um ultra-baixo coeficiente de atrito neste ensaio.

Para trabalhos futuros, é necessário investigar melhor a influência dos parâmetros carga aplicada e velocidade de deslizamento, através da realização de mais ensaios, além das características do running-in, que é, sem dúvida, parte fundamental na obtenção do UBCA e no tempo necessário para a estabilização do regime.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 BALARINI JR., R. Estudo do ultrabaixo coeficiente de atrito no par cerâmico Si₃N₄-Al₂O₃ em água. **Projeto de graduação**, 2011.
- 2 JAHANMIR, S.; OZMEN, Y.; YVES, L. K. Water lubrication of silicon nitride in sliding. **Tribology letters**, v. 17, 2004, p. 409-417
- 3 OLIVEIRA, R. P.; SANTOS, E.; SINATORA, A. Influence of Ph lubricant (water) in the friction coefficient in sliding of Si₃N₄-Al₂O₃. **COBEM**, 2011.
- 4 TOMIZAWA H.; FISCHER T.E. Friction and Wear of Silicon Nitride and silicon carbide in water: hydrodynamic lubrication at low sliding velocity obtained by tribochemical wear. **ASLE Trans.**, v. 30 1987, p. 41-46.
- 5 TOMIZAWA H.; FISCHER T.E. Interaction of Tribochemistry and Microfracture in the Friction and Wear of Silicon Nitride. **Wear**, v. 105 1985, p. 29-45.
- 6 XU, J.; KATO K. Formation of tribochemical layer of ceramics sliding in water and its role for low friction. **Wear**, v. 245, 2000, p. 61-75.