ROBERTO PEREIRA DE OLIVEIRA

Estudo tribológico da alumina – atrito e desgaste na lubrificação com água

São Paulo

2017

ROBERTO PEREIRA DE OLIVEIRA

Estudo tribológico da alumina – atrito e desgaste na lubrificação com água

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia Mecânica de Projeto e Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Amilton Sinatora

São Paulo

2017

Autorizo a reprodução e a divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de Julho de 2017

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

Catalogação-na-publicação

Oliveira, Roberto P.
Estudo tribológico da alumina – atrito e desgaste na lubrificação com água / R. P. Oliveira -- versão corr. -- São Paulo, 2017.
201 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Atrito 2.Desgaste e Lubrificação 3.Alumina 4.Deslizamento em cerâmica 5.Água I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

Dedicatória

Para Família e

Amigos

Agradecimentos

Agradeço ao professor Amilton Sinatora, pela orientação, amizade e confiança demonstrada durante todo este trabalho, além de transmitir sempre muito incentivo.

Aos Professores Roberto Martins de Souza, Izabel F. Machado e Deniol K. Tanaka, pelo incentivo e discussões.

Ao Professor Cherlio Scandian, pelas discussões proveitosas.

Aos Professores Humberto Yoshimura, Tiago Cousseau e Maria Cristina Farias pelas discussões e sugestões proveitosas.

Ao meu Amigo Eliel Santos pelo apoio em todas as etapas deste trabalho e por ter me apresentado o Laboratório de Fenômenos de Superfície.

Como correria o sério risco de injustamente esquecer alguém, sem citar nominalmente agradeço aos amigos, companheiros e colegas, enfim todos que de alguma forma contribuíram ou contribuem para a família do Laboratório de Fenômenos de Superfície.

A todos os técnicos que passaram e aos continuam trabalhando no Laboratório de Fenômenos de Superfície, pela sua presteza e dedicação.

Aos Pesquisadores, alunos e funcionários dos laboratórios do IPEN, IPT, IQUSP, EPUSP, UFABC e seus departamentos que nos acolheram em todas as etapas do trabalho.

A todos os meus amigos que de alguma forma me ajudaram nessa empreitada.

Aos meus familiares, que ajudaram a trilhar o caminho até aqui.

Resumo

O objetivo deste trabalho, foi investigar o comportamento tribológico – atrito, desgaste e regime de lubrificação – do par cerâmico alumina – alumina no deslizamento em água, e verificar a possibilidade de atingir valores mais baixos de coeficiente de atrito (menor que o obtido anteriormente na literatura $\mu \approx 0,2$); para tanto foram estudados: o efeito da velocidade, o efeito da carga, o efeito da adição de modificadores de atrito na água e o efeito de rugosidade inicial do disco. As hipóteses que nortearam a escolha dessas variáveis foram de que a obtenção de baixos coeficientes de atrito decorreria de um sistema de lubrificação hidrodinâmico, através do efeito das variáveis mecânicas, e/ou um sistema de lubrificação limítrofe gerado por uma camada de baixa resistência ao cisalhamento, avaliado pelos efeitos das variáveis químicas. Além dessas variáveis, também foram estudadas as equações que regem os sistemas lubrificados, a fim de tentar ter um melhor entendimento sobre o regime de lubrificação. Os ensaios foram realizados na configuração de ensaio tribológico esfera sobre disco sob carga normal entre 24,7 N e 100,3 N e velocidade de deslizamento entre 0,1 m/s e 2 m/s. A água utilizada nos ensaios foi filtrada, destilada e deionizada; os modificadores de atrito utilizados foram a sílica coloidal amorfa, o hidróxido de alumínio e o carbeto de silício. As esferas de alumina foram adquiridas comercialmente, e os discos de alumina foram provenientes de trabalhos anteriores. Todos os materiais foram caracterizados quanto às suas propriedades físicas e mecânicas. Nos ensaios preliminares, o sistema atingiu, após 100 horas de ensaio (360000 metros), valores de coeficiente de atrito da ordem de $\mu \approx 0,08$, menores do que os encontrados na literatura. Quando os ensaios foram realizados com a maior velocidade, o sistema atingiu coeficientes de atrito menores que 0,02. Os ensaios com menor rugosidade inicial apresentaram maiores valores de coeficiente de atrito. Analisando todos os resultados teóricos e experimentais, foi possível verificar que para o par alumina – alumina, o regime de lubrificação provavelmente é o regime misto, parcialmente hidrodinâmico e parcialmente limítrofe. Ademais a partir dos dados experimentais foi possível construir previsões teóricas para o coeficiente de atrito e de desgaste.

Palavras-Chave: Atrito. Desgaste. Alumina. Deslizamento. Cerâmica. Água.

Abstract

The objective of this work was to investigate the tribological behavior – friction, wear and lubrication regime – on the sliding of alumina – alumina ceramic pair in water, and to verify the possibility of reaching low friction coefficient (lower than previously obtained in the literature $\mu \approx 0.2$). The effect of the velocity, the effect of the load, the effect of the addition of friction modifiers on the water and the initial roughness effect of the disc were studied. The hypothesis that guided the choice of these variables were that the low friction coefficients would result from a hydrodynamic lubrication system and/or a boundary lubrication system generated by a low shear stress layer. In addition to these variables, the equations that governed the lubricated systems were also studied in order to try to have a better understanding of the lubrication regime. The tests were carried out in the tribological test configuration ball on disc under normal load between 24.7 N and 100.3 N and sliding velocity between 0.1 m/s and 2 m/s. The water used in the tests was filtered, distilled and deionized, the friction modifiers used were amorphous colloidal silica, aluminum hydroxide and silicon carbide. The alumina balls were commercially purchased, and the alumina discs were derived from previous works. All materials were characterized for their physical and mechanical properties. In the preliminary tests, the system reached, after 100 hours of test (360000 meters), values of friction coefficient $\mu \approx 0{,}08$. These values were smaller than the one found in the literature. When the tests were carried out with the highest speed, the system reached coefficients of friction lower than 0.02. The tests with lower initial roughness showed higher coefficient of friction. Analyzing all the theoretical and experimental results, it was possible to verify that for the alumina – alumina pair the lubrication regime is probably the mixed, partially hydrodynamic and partially boundary regime. From the experimental data, it was also possible to construct theoretical predictions for the coefficient of friction and wear.

Key Words: Friction. Wear. Alumina. Sliding. Ceramics. Water.

Lista de Ilustrações

Figura 1.1 – Efeito da substituição de balancins metálicos por balancins de cerâmica na resistência ao desgaste. Fonte: adaptado de (3).....23

Figura 2.1 – Célula unitária do corundum. Esferas pretas ânions O2-e cinzas cátions Al3+. Fonte: adaptado de (23).....28
Figura 2.2 – Diagrama de fases da água. Fonte: Adaptado de (26).....30
Figura 2.3 – A) Teoria do regime de lubrificação hidrodinâmico (adaptado de 45) e B) Teoria do regime de lubrificação misto (adaptado de 15).....36
Figura 2.4 – Comportamento típico do coeficiente de atrito durante os ensaios com hidrossol, linha preta, e sob água pura, linha vermelha. Fonte: retirado de (6).....37
Figura 2.5 – Média dos valores do coeficiente de atrito em função do pH obtidos durante o regime permanente de UBCA. Fonte: retirado de (1).....38
Figura 2.6 – Comparação entre ensaios realizados com esferas de nitreto de silício e esferas de alumina sobre um disco de alumina, lubrificado com água. a) esfera de nitreto de silício e b) esfera de alumina. Fonte: Autor.....39
Figura 2.7 – Comparação entre ensaios realizados com esferas de nitreto de silício e esferas de alumina sobre um disco de alumina, lubrificado com água. a) esfera de nitreto de silício e b) esfera de alumina.(obs. Escalas diferentes) Fonte: Autor.....40
Figura 2.8 – Formação de alumina (ou hidróxido de alumínio) em função da temperatura. Fonte: adaptado de (41).....41
Figura 2.9 – Diagrama de fases alumina – água. Fonte: adaptado de (41).....42
Figura 2.10 – Coeficiente de atrito em função da distância e do acabamento superficial para vários lubrificantes no par alumina – alumina. Fonte: adaptado de (49).....46
Figura 2.11 – Coeficiente de atrito em função do pH para o par alumina – alumina lubrificado com água em diferentes pH's. Fonte: adaptado de (51).....47
Figura 2.12 – Capacidade de carga em função do parâmetro K. Fonte: adaptado de (3).….49
Figura 2.13 – Contato esfera plano. Fonte: adaptado de (3).....52
Figura 2.14 – Mapa de regime de lubrificação. Fonte: Adaptado de (3).....59
Figura 2.15 – Geometria de contato circular. Fonte: adaptado de (3).....67

Figura 3.1 – Sequência de preparação e caracterização das amostras. Fonte: Autor.....72
Figura 3.2 – Superfície do disco após processo com suspensão de diamante de 15 μm – disco não polido. Fonte: Autor.....74
Figura 3.3 – Superfície do disco após processo com suspensão de diamante de 1 μm – disco polido. Fonte: Autor.....74

Figura 3.4 – Aparato utilizado para determinação da massa aparente. Fonte: Autor.....77
Figura 3.5 – Exemplo de uma impressão Vickers (Disco de Alumina, carga 50 kgf). Fonte: Autor.....79
Figura 3.6 – Representação gerada a partir das microdurezas realizadas no disco. Fonte: Autor.....81
Figura 3.7 – Curva típica de obtida no ensaio de microdureza na determinação do módulo de elasticidade. Fonte: adaptado de (7).....82
Figura 3.8 – Microfotografias das esferas utilizadas para determinar a porosidade. Fonte: Autor.....84
Figura 3.9 – ângulo de molhabilidade em uma superfície. Fonte: adaptado de (66).....86
Figura 3.10 – a) foto de uma gota de água sobre o Disco b) foto de uma gota de água sobre a esfera. Fonte: Autor.....87
Figura 3.11 – coeficiente de atrito mínimo que o equipamento consegue distinguir em função da carga aplicada (sistema peso morto). Fonte: Autor.....89
Figura 3.12 – Aparato experimental. Fonte: Autor.....90
Figura 3.13 – Detalhes das esferas, dos discos e da cuba, antes da montagem do ensaio. Fonte: Autor.....91
Figura 3.14 – Marcas típicas das trilhas deixadas nos discos pelo deslizamento. Fonte: Autor.....94
Figura 3.15 – Foto de uma calota típica deixada nas esferas. Fonte: Autor.....95
Figura 3.16 – Exemplo de imagem usada para a determinação do volume desgastado nos discos. Fonte: Autor.....97
Figura 3.17 – Calota formada na superfície da esfera após o desgaste. Fonte: Autor.....98

Figura 4.1 –Gráfico de dureza dos materiais. Fonte: Autor.....102
Figura 4.2 – parâmetros de rugosidade no disco. Fonte: Autor.....105
Figura 4.3 – parâmetros de rugosidade na esfera. Fonte: Autor.....105
Figura 4.4 – parâmetros de rugosidade inicial para o disco de alumina. Fonte: Autor.....106
Figura 4.5 – imagens tiradas a partir de um microscópio óptico da superfície inicial do disco. Fonte: Autor.....107
Figura 4.6 – parâmetros de rugosidade inicial para o disco de alumina. Fonte: Autor.....108
Figura 4.7 – imagens tiradas a partir de um microscópio óptico da superfície inicial do disco polido. Fonte: Autor.....108
Figura 4.8 – parâmetros de rugosidade inicial para a esfera de alumina. Fonte: Autor.....109
Figura 4.9 – imagens tiradas a partir de um microscópio óptico da superfície inicial da esfera. Fonte: Autor.....110
Figura 4.10 – Isotropia da superfície do disco. Fonte: Autor.....110

Figura 4.11 – Isotropia da superfície da esfera. Fonte: Autor.....111
Figura 4.12 – Representações 3D mostrando as superfícies do disco e da esfera antes e após os ensaios. Fonte: Autor.....112
Figura 4.13 – Comparação entre os perfis médios do disco e da esfera antes dos ensaios. Fonte: Autor.....113
Figura 4.14 – Microestrutura do disco. Fonte: Autor.....114
Figura 4.15 – Microestrutura da esfera. Fonte: Autor.....114
Figura 4.16 – Volume de vazios na superfície do disco. Fonte: Autor.....116
Figura 4.17 –Volume de vazios na superfície da esfera. Fonte: Autor.....116
Figura 4.18 – Difratograma do disco em comparação com o padrão de alfa alumina (corundum). Fonte: Autor.....117
Figura 4.19 – Difratograma da esfera em comparação com o padrão de alfa alumina (corundum). Fonte: Autor.....117
Figura 4.20 – Absorbância da Água. Fonte: Autor.....119
Figura 4.21 – Ensaios preliminares de coeficiente de atrito no par Al2O3 – Al2O3 (2 horas de teste). Fonte: Autor.....121
Figura 4.22 – Ensaio preliminar de coeficiente de atrito no par dissimilar Al2O3 – Al2O3. Fonte: Autor.....122
Figura 4.23 – coeficiente de atrito em função da posição do disco no ensaio padrão. Fonte: Autor.....123
Figura 4.24 – coeficiente de atrito em função da posição do disco no ensaio padrão. Fonte: Autor.....124
Figura 4.25 – Curvas de coeficiente de atrito no ensaio padrão. Fonte: Autor.....125
Figura 4.26 – Perfil de rugosidade formado na esfera e no disco. Fonte: Autor.....127
Figura 4.27 – Representação 3D da trilha de desgaste no ensaio padrão. Fonte: Autor.....128
Figura 4.28 – fotomicrografia da calota esférica formada no ensaio. Fonte: Autor.....129
Figura 4.29a – Microfotografia da trilha formada no disco. Fonte: Autor.....129
Figura 4.30 – Comparação entre ensaios com esferas de nitreto de silício e esferas de alumina. Fonte: Autor.....130
Figura 4.31 – Comparação do coeficiente de atrito final entre ensaios com esferas de nitreto de silício e esferas de alumina. Fonte: Autor.....131
Figura 4.32 – Representação 3D da trilha formada no disco. Fonte: Autor.....132
Figura 4.33 – Microfotografias das trilhas formadas no disco. Acima esfera de nitreto de silício e abaixo esfera de alumina. Fonte: Autor.....133
Figura 4.34 – microfotografias das calotas formadas nas esferas. Na esquerda esfera de nitreto de silício e na direita esfera de alumina. Fonte: Autor.....133
Figura 4.35 – Coeficiente de atrito em função do tempo no deslizamento do par alumina –

alumina nos ensaios com diferentes velocidades. Fonte: Autor.....134
Figura 4.36 – Coeficiente de atrito em função da distância no deslizamento do par alumina – alumina nos ensaios com diferentes velocidades. Fonte: Autor.....135
Figura 4.37 – Coeficiente de atrito no final dos ensaios. Fonte: Autor.....136
Figura 4.38 – Parâmetros de rugosidade no disco. Fonte: Autor.....136
Figura 4.39 – Parâmetros de rugosidade na esfera. Fonte: Autor.....137
Figura 4.40 – Taxa de desgaste em função do efeito da velocidade. Fonte: Autor.....138
Figura 4.41 – Microfotografia das calotas formadas nas esferas após o ensaio em função da velocidade. Fonte: Autor.....139
Figura 4.42 – Microfotografia das trilhas formadas nos discos após o ensaio em função da velocidade. Fonte: Autor.....139
Figura 4.43 – Deslizamento do par alumina – alumina com diferentes cargas iniciais. Fonte: Autor.....140
Figura 4.44 – coeficiente de atrito no final dos ensaios. Fonte: Autor.....141
Figura 4.45 – Parâmetros de rugosidade no disco após os ensaios. Fonte: Autor.....142
Figura 4.46 – Parâmetros de rugosidade na esfera após os ensaios. Fonte: Autor.....142
Figura 4.47 – Taxa de desgaste em função da carga aplicada. Fonte: Autor.....143
Figura 4.48 – Microfotografias das calotas e das trilhas formadas no ensaio de variação de carga. Fonte: Autor.....144
Figura 4.49 – Deslizamento do par alumina – alumina com variação da rugosidade inicial. Fonte: Autor.....145
Figura 4.50 – Coeficiente de atrito no final dos ensaios. Fonte: Autor.....146
Figura 4.51 – Parâmetros de rugosidade no disco após o ensaio. Fonte: Autor.....147
Figura 4.52 – Parâmetros de rugosidade na esfera após o ensaio. Fonte: Autor.....148
Figura 4.53 – Taxa de desgaste após o ensaio. Fonte: Autor.....149
Figura 4.54 – Microfotografias do disco e da esfera no ensaio polido. Fonte: Autor.....150
Figura 4.55 – Coeficiente de atrito no deslizamento do par alumina – alumina com adição de modificadores de atrito. Fonte: Autor.....151
Figura 4.56 – Coeficiente de atrito nos últimos minutos do deslizamento do par alumina – alumina com de modificadores de atrito. Fonte: Autor.....153
Figura 4.57 – Parâmetros de rugosidade nos discos após os ensaios. Fonte: Autor.....154
Figura 4.58 –Parâmetros de rugosidade nas esferas após os ensaios. Fonte: Autor.....154
Figura 4.59 – Taxa de desgaste nos ensaios. Fonte: Autor.....156
Figura 4.60 – Perda de massa em função do tempo. Fonte: Autor.....157
Figura 4.61 – Taxa de desgaste em função do tempo. Fonte: Autor.....158
Figura 4.62 – Curva média de ensaio padrão com incerteza e linha de tendência. Fonte: Autor.....161

Figura 4.63 – valores médios de coeficiente de atrito para ensaios com variação de carga. Fonte: Autor.....163
Figura 4.64 – FC em função do fator de normalização de carga. Fonte: Autor.....164
Figura 4.65 – valores médios de coeficiente de atrito para ensaios com variação de velocidade. Fonte: Autor.....166
Figura 4.66 – Função FV em função da velocidade do ensaio. Fonte: Autor.....168
Figura 4.67 – Comparação entre as curvas simuladas e curvas de ensaios. Fonte: Autor..169
Figura 4.68 – previsão teórica para os ensaios feitos a 1 m/s com o efeito da carga.....170
Figura 4.69 – Pressão de contato em função da velocidade. Fonte: Autor.....172
Figura 4.70 – Pressão de contato em função da carga. Fonte: Autor.....173
Figura 4.71 – curva de Stribeck em função da carga. Fonte: Autor.....174
Figura 4.72 – curva de Stribeck em função da pressão de contato. Fonte: Autor.....174
Figura 4.73 – Comparação entre espessura de filme e rugosidade combinada. Fonte: Autor. 176
Figura 4.74 – Coeficiente de atrito em função da razão de suporte de carga e da tensão de cisalhamento da camada limítrofe. Fonte: Autor.....179
Figura 4.75 – espessura de filme em função da velocidade e do parâmetro α. Fonte: Autor. 181
Figura 4.76 – Temperatura flash média (K) em função do tempo (escala logarítmica). Fonte: Autor.....183
Figura 4.77 – Temperatura flash máxima (K) em função do tempo. Fonte: Autor.....183
Figura 4.78 – Espectro Ramam realizado fora da trilha de desgaste(disco não polido). Fonte: Autor.....184
Figura 4.79 – Espectro Ramam realizado dentro da trilha de desgaste. Fonte: Autor.....185

Figura 8.1 – Parâmetros k1,k2 e k3 em função do parâmetro k0. Fonte: Adaptado de (3)..199
Figura 8.2 – Parâmetros k4 e k5 em função do parâmetro k2/k1. Fonte: Adaptado de (3)..199

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Propriedades típicas da alumina em várias temperaturas.....29
Tabela 2.2 – Propriedades da água à pressão constante (1 atm) – fase líquida.....32
Tabela 2.3 – Coeficiente de atrito do par Al2O3 – Al2O3 ao longo da história. (T – Temperatura, HR – Umidade Relativa, seco – Atmosfera aberta).....44
Tabela 2.4 – Coeficientes para o cálculo da temperatura flash.....68
Tabela 3.1 – Variáveis do processo de polimento.....75
Tabela 3.2 – Variáveis do processo de polimento do disco polido.....75
Tabela 4.1 – Densidade dos materiais.....100
Tabela 4.2 – Dureza Vickers e Rockwell C dos materiais ensaiados.....101
Tabela 4.3 – Módulo de elasticidade dos materiais.....102
Tabela 4.4 – Tenacidade a fratura dos materiais.....103
Tabela 4.5 – parâmetros de rugosidade iniciais das superfícies.....104
Tabela 4.6 – parâmetros de rugosidade finais das superfícies.....104
Tabela 4.7 – rugosidades médias combinadas (Sq) das superfícies.....104
Tabela 4.8 – Porcentagem da área superficial coberta por poros e parâmetro vv inicial.....115
Tabela 4.9 – Tamanho e distribuição dos grãos na superfície do disco e da esfera.....115
Tabela 4.10 – Porcentagem em masa dos elementos constituintes do disco e da esfera.. .118
Tabela 4.11 – Propriedades químicas da água antes do ensaio.....118
Tabela 4.12 – ângulo de molhabilidade do disco e da esfera com água deionizada.....120
Tabela 4.13 – número de voltas por segundo em função do raio da trilha e da velocidade. 124
Tabela 4.14 – Variáveis de processo utilizadas nos ensaios padrão.....125
Tabela 4.15 – Parâmetros de rugosidade e isotropia antes a após os ensaios padrão.....126
Tabela 4.16 – Valores de porosidade superficial após o ensaio padrão.....127
Tabela 4.17 – Taxa de desgaste e pressão de contato final.....128
Tabela 4.18 – Taxa de desgaste no disco de alumina.....131
Tabela 4.19 – Velocidades utilizadas nos ensaios.....134
Tabela 4.20 – Rugosidade combinada em função da velocidade.....137
Tabela 4.21 – Taxa de desgaste e pressão de contato em função do efeito da velocidade. 138
Tabela 4.22 – Cargas utilizadas nos ensaios.....140
Tabela 4.23 – Rugosidade combinada.....143
Tabela 4.24 – Taxa de desgaste e pressão de contato após os ensaios.....143
Tabela 4.25 – Rugosidade Combinada após o ensaio.....148
Tabela 4.26 – Taxa de desgaste e pressão de contato.....149
Tabela 4.27 – Parâmetros utilizados nos ensaios.....151

Tabela 4.28 – Parâmetro de rugosidade combinada.....155
Tabela 4.29 – Taxa de desgaste e pressão de contato no final do ensaio.....156
Tabela 4.30 – Regressões e coeficientes de determinação para a curva de taxa de desgaste em função do tempo (Disco).....159
Tabela 4.31 – Regressões e coeficientes de determinação para a curva de taxa de desgaste em função do tempo (esfera).....159
Tabela 4.32 – Tempo e taxa de desgaste onde a curva de regressão faz um ângulo de 0,05º com o eixo x.....160
Tabela 4.33 – Valores de tempo segundo a equação 4.13.....162
Tabela 4.34 – Diferença média do coeficiente de atrito em relação ao ensaio padrão.....163
Tabela 4.35 –Função Fc para os três pontos de ensaios.....164
Tabela 4.36 – Diferença média de coeficiente de atrito entre os ensaios com variação de velocidade.....166
Tabela 4.37 – Função FV em função da velocidade do ensaio.....167
Tabela 4.38 – parâmetros inicias de Hertz, Hamrock e Dowson.....171
Tabela 4.39 – parâmetros obtidos a partir da teoria de lubrificação hidrodinâmica.....175
Tabela 4.40 – Valores de espessura de filme obtidos a partir do modelo elastohidrodinâmico. 177
Tabela 4.41 – Valores de espessura de filme no modelo elastohidrodinâmico, com efeito da rugosidade.....178
Tabela 4.42 – Coeficiente de atrito e espessura mínima de filme no regime misto.....180
Tabela 4.43 – Temperaturas flash no início e no final do ensaio.....182

Lista de abreviaturas, acrônimos e siglas

3D – terceira dimensão

ADC – *Analogic to digital converter* (Conversor analógico digital)

ASCII – *American Standard Code for Information Interchange*

ASTM – American Society for Testing and Materials

BET – *Brunauer, Emmett, Teller* (Teoria de Adsorção Multimolecular)

CCTM – Centro de ciência e tecnologia de materiais

COF – *Coefficient of friction*

CQUIM – Laboratório de Análises Químicas

EDS – *Energy Dispersive System*

EHD – Elastohidrodinâmica

EHL – lubrificação Elastohidrodinâmica

EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

HD – Lubrificação Hidrodinâmica

ICP-OES – espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente

IPEN – instituto de pesquisas energéticos e nucleares

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

IQUSP – Instituto de Química da Universidade de São Paulo

ISO – *International Organization for Standardization*

JIS – *Japanese Industrial Standards*

LFS – Laboratório de Fenômenos de Superfície

LMEf – Laboratório de microestrutura e ecoeficiência de materiais

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

PTFE – politetrafluoretileno

UBCA – ultrabaixo coeficiente de atrito

UFABC – Universidade Federal do ABC

USP – Universidade de São Paulo

Lista de Símbolos

A – absorbância

a_{ESF} – raio da calota formada na esfera (m)

a – semieixo maior da elipse de contato em m;

AA – porcentagem de absorção de água

A_C – área da calota (m²)

A_G – Área media de um grão m²;

A_T – área analisada total m²;

b – semieixo menor da elipse de contato em m;

B – tamanho do contato (m);

c – comprimento médio da trinca dado em (m);

COF – coeficiente de atrito;

d - distância entre planos paralelos de átomos no cristal (m)

D – diâmetro da calota (m);

d_1 – diagonal 1 do losango formado na marca de dureza (m)

d_2 – diagonal 2 do losango formado na marca de dureza (m)

d_E – diâmetro médio das esferas medida em m;

D_G – Diâmetro médio de um grão (m).

D_{IST} – Distancia percorrida em m

d_M – média das diagonais do losango formado na marca de dureza (m)

E – módulo de elasticidade dado em (Pa);

E' – módulo de Young reduzido em Pa;

E_A – módulo de Young da esfera em Pa;

E_B – módulo de Young do disco em Pa;

F – força de atrito.

f(t) - taxa de desgaste em função do tempo.

F_C – função denominada fator de carga.

F_V – função denominada fator de velocidade.

G – parâmetro de material adimensional;

G_E – parâmetro de elasticidade adimensional.

G_V – Parâmetro de viscosidade adimensional;

h_{Esf} – altura da calota (m).

h – espessura de filme (m);

H – parâmetro de filme adimensional HD;

h_0 – espessura de filme mínima HD (m);

h_1 – espessura de filme na entrada HD (m);

H_C – espessura de filme no centro do contato adimensional EHL;

h_C – espessura de filme no centro do contato EHL (m);

h_D – espessura média dos discos medida em m;

H_{min} – espessura de filme mínima adimensional EHL;

h_{min} – espessura de filme mínima EHL (m);

H_V – Dureza Vickers (Pa);

$(H_C)_{liso}$ – espessura de filme no centro do contato adimensional sem considerar a rugosidade;

$(h_C)_{liso}$ – espessura de filme no centro do contato sem considerar a rugosidade (m);

$(H_{min})_{liso}$ – espessura de filme mínima adimensional sem considerar a rugosidade;

$(h_{min})_{liso}$ – espessura de filme mínima sem considerar a rugosidade (m);

I – intensidade da luz transmitida

I_0 – intensidade de luz incidente.

k – parâmetro de elipticidade adimensional;

K – razão de convergência.

k_0, k_1, k_2, k_3, k_4 e k_5 – coeficientes de contato

K_{IC} – tenacidade à fratura dada em ($Pa.m^{1/2}$);

K_T – condutividade térmica (W/mK);

L – tamanho do contato (m);

L_a – razão de carga de aspereza;

L_p – número de Peclet;

m – massa média das amostras em gramas;

m_i – Massa imersa.

m_S – Massa seca;

m_u – Massa úmida;

n – número de ordem da difração.

N, L', N' – Coeficientes de cálculo;

N_A – número de grãos por área;

$N_{interceptado}$ – número de grãos parcialmente incluídos na área analisada;

$N_{interno}$ – número de grãos totalmente incluídos na área analisada;

n_P – número de perfis determinados no disco.

P – carga aplicada na endentação Vickers;

p – Pressão em Pa;

PA – porcentagem de porosidade aparente

P_{max} – Pressão de contato máxima em Pa;

P_{med} - Pressão de contato media em Pa;

p_y – limite de escoamento;

Q – Calor gerado (W);

q – taxa de calor gerado;

Q_x – taxa de escoamento de lubrificante.

r – raio da esfera;

R – raio da trilha desgastada;

R' – raio reduzido de curvatura em m;

R^2 – coeficiente de determinação.

R_A – Raio da esfera em m;

R_D – raio externo médio dos discos medido em m;

r_D – raio médio do furo dos discos medido em m.

R_{n1n2} – raio de curvatura do corpo n1 na direção n2.

S – tensão de cisalhamento na camada limítrofe (Pa);

S_{comb} – rugosidade combinada do disco e da esfera (m);

S_i – i-ésima área obtida do i-ésimo perfil;

S_{qA} – rugosidade quadrática média do corpo A (m);

S_{qB} – rugosidade quadrática média do corpo B (m);

S_{qdisco} – rugosidade quadrática média do disco (m).

S_{qesf} – rugosidade quadrática média da esfera (m);

t – tempo;

T_D – Taxa de desgaste em (mm³)/(Nm);

T_{fa} – temperatura flash media;

T_{fmax} – temperatura flash máxima;

U – parâmetro de velocidade adimensional;

u – velocidade (m/s);

u_A – velocidade do corpo "A" (m/s);

u_B – velocidade do corpo "B" (m/s);

V – dureza adimensional;

V_C – volume de um dos corpos;

V_D – volume desgastado no disco;

V_{DES} - Volume desgastado(seja na esfera ou no disco) em mm³;

V_{Disco} – volume médio dos discos em m³;

V_E – volume desgastado na esfera;

V_{Esfera} – volume médio das esferas em m³;

W – carga normal aplicada (N);

W° – capacidade de carga adimensional;

W_A – parâmetro de carga adimensional;

W_b – carga suportada pela lubrificação limítrofe (N);

W_h – carga suportada pela lubrificação hidrodinâmica (N);

W_L – capacidade de carga;

z – Profundidade onde ocorre a máxima tensão de cisalhamento em m.

$\bar{\varepsilon}$ e $\bar{\xi}$ – Integrais elípticas simplificadas;

$\hat{H}_C$ – espessura de filme central adimensional;

$\hat{H}_{min}$ – espessura mínima de filme adimensional;

$\bar{k}$ – Parâmetro de elipticidade simplificado.

α – razão de suporte de carga (limítrofe);

α_1, β_1 e γ_1 – coeficientes;

α_a e λ_b – parâmetros de cálculo;

α_{PV} – coeficiente de pressão-viscosidade (m²/N);

δ – Máxima deflexão em m;

η e η_0 – viscosidade do lubrificante (Pas)

θ – ângulo entre o feixe e o plano de incidência;

λ – comprimento de onda incidente;

Λ – parâmetro que caracteriza a razão entre a espessura mínima de filme e a rugosidade composta da superfície.

μ – coeficiente de atrito.

ρ – densidade do material em kg/m³

ρ_C – Densidade do corpo;

ρ_L – Densidade do líquido;

σ_A – calor específico (J/kgK).

σ – Desvio padrão das alturas das superfícies (m);

Φ – ângulo entre o plano que contém o raio mínimo de curvatura do corpo "A" e o plano que contém o raio mínimo de curvatura do corpo "B".

χ - difusividade térmica (m²/s);

ν_A – Coeficiente de Poisson da esfera;

ν_B – Coeficiente de Poisson do disco;

τ_{max} – Máxima tensão de cisalhamento em Pa;

Sumário

1 Introdução....22
1.1 Objetivos....25
2 Revisão Bibliográfica....26
2.1 Materiais Cerâmicos....26
2.2 Óxido de Alumínio (Alumina)....27
2.3 Água....29
2.3.1 Viscosidade....31
2.4 Tribologia de Materiais cerâmicos....33
2.4.1 Regime de baixo atrito em cerâmicas lubrificadas com água....34
2.4.2 Tribologia em Óxido de Alumínio....39
2.4.3 Formação do Hidróxido de Alumínio....40
2.4.3.1 Hidróxido de alumínio....40
2.4.3.2 Formação de Hidróxido de alumínio por reação triboquímica....42
2.4.4 Coeficiente de atrito no par Alumina – Alumina....43
2.5 Modelos matemáticos para o cálculo de parâmetros de lubrificação....48
2.5.1 Lubrificação Hidrodinâmica....48
2.5.1.1 Espessura de Filme na lubrificação hidrodinâmica....49
2.5.1.2 Parâmetros de contato....50
2.5.1.2.1 Distribuição de pressão....50
2.5.1.2.2 Capacidade de carga....51
2.5.1.2.3 Força de atrito....51
2.5.1.2.4 Coeficiente de atrito....51
2.5.1.2.5 Taxa de escoamento de lubrificante....52
2.5.2 Parâmetros de Hertz, Hamrock e Dowson para Contato elíptico entre dois corpos elásticos....52
2.5.3 Lubrificação Elastohidrodinâmica (EHL)....56
2.5.3.1 Espessura de filme em EHL....56
2.5.3.2 Correções no regime de lubrificação EHL....58
2.5.3.2.1 Isoviscoso rígido....59
2.5.3.2.2 Piezoviscoso rígido....60
2.5.3.2.3 Isoviscoso elástico....60
2.5.3.2.4 Piezoviscoso Elástico....61
2.5.3.3 Efeito da rugosidade em lubrificação EHL....61
2.5.4 Regime de lubrificação misto....63

2.5.5 Efeito da rugosidade nos regimes de lubrificação....64
2.6 Temperatura Flash em contato circular....65
3 Materiais e Métodos....70
3.1 Materiais....70
3.2 Metodologia de ensaios empregada....71
3.3 Métodos....71
3.3.1 Usinagem....72
3.3.2 Polimento....73
3.3.3 Caracterização das Propriedades Físicas, químicas e mecânicas....75
3.3.3.1 Determinação das Densidades....75
3.3.3.1.1 Método Geométrico....76
3.3.3.1.2 Método de Arquimedes....77
3.3.3.2 Dureza....78
3.3.3.2.1 Dureza Vickers....78
3.3.3.2.2 Dureza Rockwell C....80
3.3.3.3 Tenacidade à fratura....80
3.3.3.4 Módulo de elasticidade....81
3.3.3.5 Microestrutura inicial e tamanho de grão....82
3.3.3.6 Porosidade inicial e após os ensaios....83
3.3.3.7 Análise por espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES)....84
3.3.3.8 Análise de absorbância da água....85
3.3.3.9 Análise de molhabilidade através do experimento de gota séssil....85
3.3.3.10 Parâmetros de Hertz, Hamrock e Dowson....87
3.3.3.11 Difração de raios-X....87
3.3.4 Caracterização tribológica....88
3.3.4.1 Preparação do tribômetro....88
3.3.4.2 Preparação das amostras....90
3.3.4.3 Preparação da água....91
3.3.4.4 Ensaios preliminares....92
3.3.4.5 Ensaios tribológicos....92
3.3.5 Caracterização dos materiais ensaiados....93
3.3.5.1 Determinação dos perfis de rugosidade e de forma....93
3.3.5.2 Determinação dos diâmetros das calotas formadas nas esferas....95
3.3.5.3 Determinação do volume desgastado nas amostras....95
3.3.5.4 Taxa de desgaste e perda de massa....97

3.3.5.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....97
3.3.5.6 Espectroscopia Ramam.....99
4 Resultados e discussão.....100
4.1 Determinação das densidades dos materiais.....100
4.2 Determinação das propriedades mecânicas.....101
4.2.1 Determinação da dureza Vickers (H_V) e Rockwell C (H_{RC}).....101
4.2.2 Determinação do módulo de elasticidade (E).....102
4.2.3 Determinação da tenacidade a fratura (K_{IC}).....103
4.3 Parâmetros iniciais dos ensaios.....103
4.3.1 Rugosidade superficial inicial.....103
4.3.2 Superfície inicial – disco 'não polido'.....105
4.3.3 Superfície inicial disco 'polido'.....107
4.3.4 Superfície inicial da esfera.....109
4.3.5 Isotropia da superfície.....110
4.3.6 Contato inicial entre o disco e a esfera.....112
4.3.7 Análise de porosidade e microestrutura inicial.....113
4.3.8 Análise de Difratometria de raios-X e EDS (Espectroscopia de raios-X por dispersão em energia).....116
4.3.9 Água preparada para o ensaio.....118
4.3.10 Análise de molhabilidade através do método da gota séssil.....120
4.4 Resultados dos ensaios tribológicos.....120
4.4.1 Ensaios preliminares.....120
4.4.2 Interpretação dos sinais de atrito no deslizamento do par Al_2O_3 – Al_2O_3 em água deionizada.....123
4.4.3 Ensaio Padrão.....124
4.4.3.1 Rugosidade no ensaio Padrão.....126
4.4.3.2 Desgaste no ensaio Padrão.....128
4.4.3.3 Comparação entre os ensaios Alumina – Alumina e Alumina – nitreto de silício 129
4.4.3.3.1 Desgaste relativo e comparação entre os ensaios Alumina – Alumina e Alumina – nitreto de silício.....131
4.4.4 Efeito da velocidade.....134
4.4.4.1 Parâmetros de rugosidade no efeito da velocidade.....136
4.4.4.2 Desgaste relativo ao efeito da velocidade.....137
4.4.5 Efeito da carga.....140
4.4.5.1 Parâmetros de rugosidade Efeito da carga.....141

4.4.5.2 Desgaste relativo ao Efeito da carga.....143
4.4.6 Efeito de rugosidade inicial do disco (Acabamento superficial).....145
4.4.6.1 Parâmetros de rugosidade efeito da rugosidade inicial do disco.....146
4.4.6.2 Desgaste relativo ao Efeito da rugosidade inicial do disco.....149
4.4.7 Efeito da Adição de Modificadores de atrito (sílica coloidal e/ou carbeto de silício e/ou hidróxido de alumínio) no coeficiente de atrito.....150
4.4.7.1 Parâmetros de rugosidade relativo ao efeito da Adição de Modificadores de atrito 153
4.4.7.2 Desgaste relativo ao Efeito da Adição de Modificadores de atrito.....155
4.5 Efeito do tempo na perda de massa e Modelo teórico para a taxa de desgaste.....157
4.6 Modelo de comportamento da curva de atrito no ensaio padrão.....160
4.6.1 Modelagem para o efeito da carga aplicada.....162
4.6.2 Modelagem para o efeito da velocidade.....165
4.7 Comparação entre o modelo e as curvas provenientes dos ensaios.....168
4.8 Análise crítica do modelo.....171
4.8.1 Parâmetros de Hertz, Hamrock e Dowson.....171
4.8.2 Curva de Stribeck.....173
4.8.3 Discussão dos resultados com base no modelo hidrodinâmico de lubrificação175
4.8.4 Discussão dos resultados com base no modelo elastohidrodinâmico de lubrificação.....176
4.8.4.1 Discussão dos resultados com base no Modelo elastohidrodinâmico de lubrificação com correção para o efeito de rugosidade.....178
4.8.5 Discussão dos resultados com base no modelo misto de lubrificação.....179
4.8.5.1 Temperatura flash.....182
4.8.5.2 Espectroscopia Ramam.....184
4.9 Discussão Geral.....185
5 Conclusões.....190
6 Sugestão para trabalhos Futuros.....192
7 Referências Bibliográficas.....193
8 Apêndice.....199
8.1 Apêndice 1.....199
8.2 Apêndice 2.....200

1 Introdução

Os materiais cerâmicos de alto desempenho, como a alumina, nitreto de silício, carbeto de silício, a zircônia entre outros, possibilitam aplicações nas mais diversas áreas do conhecimento, tais como a aeroespacial, a eletrônica, a nuclear, a indústria de próteses e outras, onde passaram a exigir materiais com características específicas superiores as atuais soluções. Esses materiais, que são desenvolvidos a partir de matérias-primas sintéticas de altíssima pureza, por meio de processos rigorosamente controlados, são conhecidos como cerâmicas avançadas (1)(2).

Os cerâmicos avançados para aplicações estruturais são uma classe de materiais que incluem uma vasta gama de compostos inorgânicos, muitos com propriedades refratárias, que são fabricados a partir do aquecimento do material de base, normalmente em forma de pó a uma temperatura elevada onde ocorre a sinterização (3). O resultado deste processo é um material que pode possuir alta dureza (H_V > 15 GPa), boa tenacidade à fratura (K_{Ic} > 4 MPa $m^{1/2}$)(1), boa resistência química, e em alguns casos, resistência ao desgaste muito maior do que a maioria dos metais (4)(5), com isso há expectativas que eles possam ser usados como novas peças funcionais em componentes tribológicos, tais como componentes de válvulas, motores, selos mecânicos, rolamentos, turbinas a gás, ferramentas de corte, entre outras, abrindo perspectivas quanto ao uso desses materiais em diversas outras aplicações práticas (6)(7). Um exemplo da alta resistência ao desgaste pode ser ilustrado por um conjunto de balancim e excêntrico de um motor de combustão interna (3). Esta montagem, em particular, é uma das principais causas de problemas de desgaste do motor por causa da combinação de temperatura elevada, deslizamento e altas-tensões nos contato. Medições experimentais de desgaste combinado (desgaste do corpo somado ao desgaste do contracorpo) em balancins sinterizados feitos em aço e em nitreto de silício são mostradas na Figura 1.1.

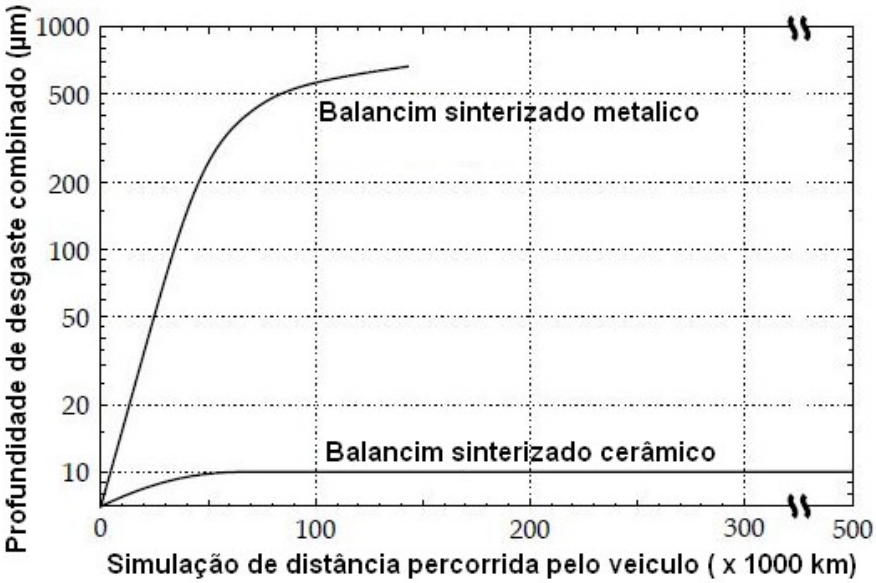

Figura 1.1 – Efeito da substituição de balancins metálicos por balancins de cerâmica na resistência ao desgaste. Fonte: adaptado de (3).

Fica evidenciado, a partir da figura 1.1, que a substituição do metal por nitreto de silício fez com que o desgaste praticamente cessasse após um período inicial de desgaste.

Uma vantagem adicional do uso desses materiais está na possibilidade do uso da água como lubrificante, algo que diminuiria a quantidade de óleos e graxas produzidas e utilizadas em componentes sujeitos aos efeitos do atrito e do desgaste.

A tribologia é a ciência que estudo o atrito, o desgaste, a lubrificação e as consequências relacionadas a esses temas.

Um dos principais aspectos da tribologia é o estudo do atrito. Quando dois materiais estão em contato e há um movimento relativo entre eles, atua sobre esses corpos uma força dissipativa, que tende a retardar o movimento. A esta, damos o nome de força de atrito.

A quantidade adimensional conhecida como coeficiente de atrito, uma razão entre a força normal e a força de atrito, evoluiu a partir do trabalho de muitos filósofos, cientistas e engenheiros, em particular, Da Vinci, Amontons, e Coulomb. Esses pensadores tentaram racionalizar a resistência ao deslizamento entre corpos sólidos em contato através de uma lei universal (8).

O desgaste de uma superfície está relacionado com interações entre a própria superfície e um outro elemento de desgaste, que normalmente é outra

superfície, ou seja, está ligado à remoção e/ou a deformação do material sobre a superfície como resultado da ação mecânica, oxidativa ou triboquímica da superfície opositora (9).

Diminuir o coeficiente de atrito em componentes mecânicos significa diminuir a quantidade de energia gasta para que esses equipamentos funcionem, ou seja, aumentar a eficiência energética e diminuir impactos ambientais derivados de suas fontes. Analogamente, diminuir o desgaste afetaria diretamente a diminuição de energia gasta para o conserto de um componente ou a confecção de um novo item.

A técnica mais utilizada para diminuir o coeficiente de atrito e o desgaste nos componentes mecânicos, que usualmente são confeccionados de ligas metálicas como o aço ou o ferro fundido, é a utilização dos lubrificantes, que reduzem esses valores ao funcionar como terceira parte alterando o contato entre as superfícies. Os lubrificantes, na maioria dos casos graxas, óleos minerais ou óleos sintéticos, de uma maneira geral prejudicam a sustentabilidade do nosso planeta.

Uma das alternativas que começou a ser estudada ena segunda metade do século XX (10), foi a utilização de matérias-primas baseadas em materiais cerâmicos avançados lubrificados com água em lugar dos tradicionais metais, onde o desgaste e atrito excessivo em altas temperaturas podem se tornar um problema. Além disso, com essa alternativa o descarte do lubrificante seria menos impactante.

O coeficiente de atrito $\mu < 0,01$ tem sido observado por diversos autores em cerâmicas a base silício e lubrificadas com água. Alguns desses autores atribuem o fato à lubrificação hidrodinâmica causada pela superfície ultralisa adquirida após um tempo de deslizamento (10) (11) (12) (13). Outros autores dizem que uma camada de sílica coloidal formada por uma reação triboquímica, entre o nitreto de silício e a água, gera uma camada que possibilita uma lubrificação mista, auxiliada pela superfície polida (14) (15). Esta última hipótese foi reforçada em 2008 com o trabalho de Ferreira (6), que atingiu o regime de baixo atrito na faixa de $\mu = 0,002$ a $\mu = 0,004$ com um par dissimilar contendo $Si_3N_4 – Al_2O_3$, comprovando que a sílica adsorvida na superfície da alumina e do nitreto de silício também foi associada a valores baixos de coeficiente de atrito. Essa hipótese foi depois reafirmada pelo fato de ocorrer os baixos valores de coeficiente de atrito em certas regiões de pH (entre 3 e 10) que estão associados aos balanços de carga elétrica superficial da sílica coloidal próximo ao ponto de zero carga (1).

Em estudos anteriores, onde o corpo e o contra corpo eram constituídos de óxido de alumínio, esses valores mais baixos de coeficiente de atrito não foram atingidos (16)(17)(18)(19)(20)(21), apesar do fato de alguns autores afirmarem que há a formação triboquímica de hidróxido de alumínio, que seria uma camada com propriedades parecidas com a sílica (6).

O óxido de alumínio ou alumina, dentre os materiais cerâmicos avançados, é um dos mais estudados em várias áreas do conhecimento, inclusive nos estudos tribológicos, devido à facilidade de obtenção de sua matéria-prima, derivado da produção de alumínio metálico, e devido as suas características como estabilidade química, alta dureza e sua técnica de fabricação ser bastante difundida (7)(6).

Muitos autores no passado e ainda no presente, como Zum Gahr (16), Asanabe (17), Peter Blau (18), entre outros, estudaram ou estudam o par alumina – alumina e para esses autores o coeficiente de atrito para o par alumina – alumina quando lubrificado com água é considerado praticamente constante para o ensaio esfera sobre disco ou pino sobre disco em $\mu \approx 0,2$ e no ensaio com movimento alternado em $\mu \approx 0,1$, ressaltando que o regime de lubrificação para esse sistema é hidrodinâmico, e com taxas de desgaste baixas.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho foi estudar o mecanismo tribológico que atua na alumina, uma cerâmica difundida e de baixo custo, lubrificado com água, através da técnica de ensaio: deslizamento esfera sobre disco com alteração de variáveis mecânicas e químicas, e comparar com os mecanismos de atrito adotados pela literatura e com os mecanismos de atrito das cerâmicas a base de silício. Adicionalmente pretendeu-se verificar a possibilidade de se alcançar um baixo valor de coeficiente de atrito (menor do que o já obtido na literatura $\mu \approx 0,2$ no ensaio esfera sobre disco) devido aos potenciais ganhos de energia em sistemas mecânicos.

2 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica será aprofundada no aspecto de entendimento da alumina e da água e da interação tribológica entre esses materiais com foco na compreensão dos regimes de lubrificação e na formação de hidróxidos de alumínio.

2.1 Materiais Cerâmicos

Os materiais cerâmicos são sólidos inorgânicos, não metálicos, geralmente compostos por elementos metálicos e não metálicos ou semimetálicos. Podem ter caráter de ligação química variando de iônico a covalente, e uma estrutura cristalina, parcialmente cristalina ou amorfas.

Os materiais cerâmicos, quando comparados com metais e polímeros, têm algumas propriedades mais atraentes. Isso faz com que eles se tornem uteis para algumas aplicações específicas (1).

As características mais importantes de materiais cerâmicos são em geral:

a) Baixa condutividade elétrica;
b) Baixa condutividade térmica;
c) Baixa densidade;
d) Baixa ductilidade;
e) Baixa permeabilidade magnética;
f) Podem ser opacos, translúcidos ou transparentes;
g) Resistência a altas temperaturas;
h) Resistência à compressão;
i) Resistência ao desgaste;
j) Resistência à corrosão.

Cerâmicas podem ser classificadas em tradicionais ou avançadas. Cerâmicas tradicionais são geralmente utilizadas na construção civil (ex.: tijolos e telhas), em utensílios domésticos (ex.: louças e pias) ou em decoração (ex.: vasos e esculturas) e são constituídas, nestes casos, de argila ou sílica. Cerâmicas avançadas são constituídas de matérias primas puras e selecionadas, produzidas por processos altamente controlados, e geralmente, têm propriedades mecânicas superiores às tradicionais.

Os materiais cerâmicos avançados, como uma classe de materiais de engenharia, tendem a ser uma promessa para gerar novas tecnologias. Cerâmicos já foram chamados os materiais do futuro, uma vez que podem ser derivados de

quartzo e sílica, que compreende cerca de 25% da crosta terrestre, em comparação com apenas 1% para todos os metais(22).

Cerâmicos avançados são materiais ideais para aplicações onde se quer evitar desgaste em ambientes severos, e também como isolantes em aplicações eletrônicas, assim como em dispositivos de micromecânica, micromotores, etc. Porém, devido à sua fragilidade, é fundamental que o material seja utilizado em condições adequadamente projetadas a fim de que não ocorram falhas catastróficas. Portanto, um importante pré-requisito para o uso generalizado de cerâmica seria um bom design de confiança no que diz respeito às condições de operação (22).

Embora a tenacidade destas cerâmicas não seja suficientemente elevada para dar confiabilidade à estrutura de uma máquina, a dureza e a resistência à compressão são suficientemente elevadas para a construção de tribo elementos. O baixo atrito e o pouco desgaste dos tribo-elementos cerâmicos são melhores vistos em funcionamento a altas velocidades, elevadas temperaturas ou em meios corrosivos e erosivos(5).

2.2 Óxido de Alumínio (Alumina)

O óxido de alumínio ou Alumina, de fórmula química Al_2O_3, é um material cerâmico avançado bastante estudado devido a sua técnica de obtenção e fabricação ser dominada a bastante tempo e devido às suas ótimas características mecânicas, elétricas, térmicas, químicas e tribológicas.

A fase alotrópica mais estável recebe o nome de α – alumina e apresenta caráter predominantemente iônico e na forma monocristalina a α – alumina é denominada safira (1).

O *corundum* ou α-alumina policristalina possui estrutura cristalina trigonal descrita como sendo ânions O^{2-} arranjados num empacotamento hexagonal, no qual dois terços dos sítios octaédricos são ocupados por cátions de Al^{3+} ficando, desta forma, rodeados por seis ânions O^{2-}, como mostrado na figura 2.1. Os íons de oxigênio encontram-se nas camadas A e B; na camada C encontram-se os íons de alumínio e os sítios desocupados(6).

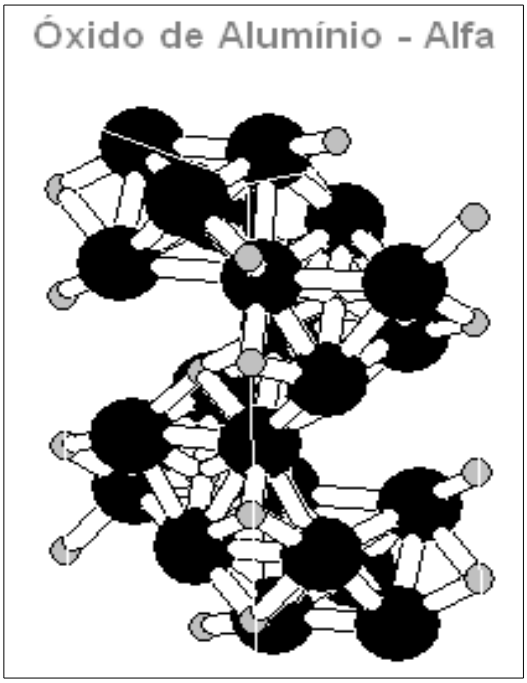

Figura 2.1 – Célula unitária do corundum. Esferas pretas ânions O^{2-}e cinzas cátions Al^{3+}.
Fonte: adaptado de (23).

Um dos processos mais utilizados para obtenção do óxido de alumínio, o processo Bayer, utiliza os hidróxidos e tri-hidróxidos de alumínio provenientes da digestão[1] da bauxita, tornando a alumina um material abundante e de baixo custo (6).

Com o objetivo de eliminar porosidades e crescimentos exagerado dos grãos, os estudos consagraram a adição do composto MgO (óxido de magnésio) à alumina, como um inibidor deste comportamento prejudicial às propriedades mecânicas.

Algumas propriedades da alumina são colocadas na tabela 2.1.

1 A digestão da Bauxita consiste na adição de hidróxido de sódio, sob condições controladas, a fim de dissolver o hidróxido de alumínio na bauxita e reduzir o teor de sílica, para garantir pureza adequada aos produtos finais [17] [18].

Tabela 2.1 – Propriedades típicas da alumina em várias temperaturas.

Propriedade [unidade]	20 °C	500 °C	1000 °C	1200 °C
Módulo volumétrico [GPa]	257 (50)	247	237	233
Resistência a compressão [GPa]	3,0 (5)	1,6	0,7	0,4
Taxa de Fluência [10^{-9} s^{-1}] a 150 MPa	0	0	4	280
Densidade [g/cm^3]	3,984 (2)	3943	3891	3868
Módulo de elasticidade [GPa]	416 (30)	390	364	354
Resistência a flexão [MPa]	380 (50)	375	345	300
Tenacidade a fratura [MPa $m^{1/2}$]	3,5 (5)	3	2,7	2,6
Coeficiente de atrito [-] a 2 GPa (seco)	0,40 (5)	0,8	0,4	-
Dureza (Vickers, 1 kgf) [GPa]	15 (2)	8,5	4,6	3,7
Parâmetro de rede a (hexagonal) [Å]	4,761 (3)	4777	4797	4806
Parâmetro de rede c (hexagonal) [Å]	12,991 (7)	13040	13102	13129
Razão de Poisson [-]	0,231 (1)	237	244	247
Módulo de cisalhamento [GPa]	169 (1)	158	146	142
Calor específico [J/kg·K]	755 (15)	1165	1255	1285
Resistência a tração [MPa]	267 (30)	267	243	140
Condutividade térmica [W/m·K]	33 (2)	11,4	7,22	6,67
Difusividade térmica [cm2/s]	0,111 (20)	0,03	0,02	0,01
Expansão térmica a 0 °C [10^{-6} K^{-1}]	4,6 (2)	7,1	8,1	8,3
Coeficiente de desgaste (Log_{10}) [-] a 2 GPa	– 6 (1)	– 4	– 6	-
Módulo de Weibull [-]	11 (4)	11	11	11
Limite de escoamento [GPa]	15.4	-	-	-

Fonte: adaptado de (24) (25).

Além de ter uma boa estabilidade química, alta dureza e sua técnica de obtenção ser bastante difundida, este material possui propriedades tribológicas promissoras; por estes motivos, este foi o material utilizado neste trabalho.

2.3 Água

A água é um recurso natural muito abundante e vem continuamente sendo estudada como lubrificante em sistemas cerâmicos, devido a sua disponibilidade, baixo custo, estabilidade em seu fornecimento e suas características ambientais.

A molécula de água contém um átomo de oxigênio e dois átomos de hidrogênio conectados por ligações do tipo covalentes. A água está na fase líquida à

temperatura ambiente, mas muitas vezes coexiste na Terra com o seu estado sólido, o gelo e seu estado gasoso, o vapor de água, como pode ser visto no diagrama de fases da água apresentado na figura 2.2.

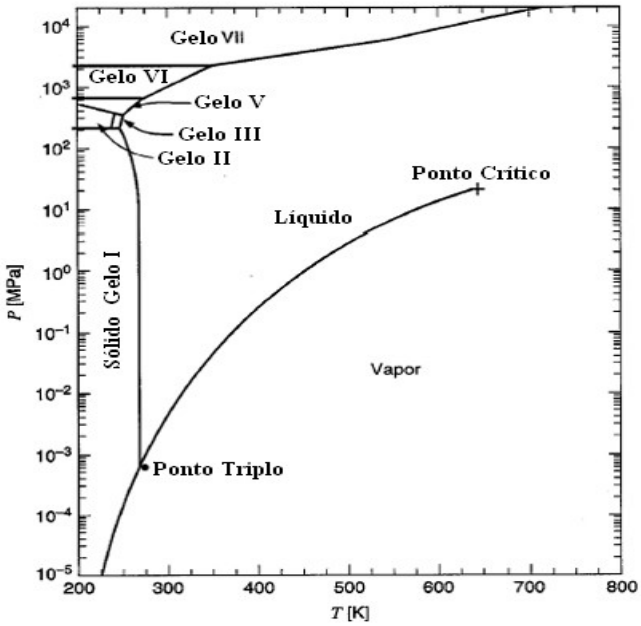

Figura 2.2 – Diagrama de fases da água. Fonte: Adaptado de (26).

Uma característica importante da água é a sua natureza polar. As moléculas de água formam um ângulo, com os átomos de hidrogênio nas pontas e os átomos de oxigênio no vértice. Uma vez que o oxigênio tem maior eletronegatividade que o hidrogênio, o lado da molécula que contém o átomo de oxigênio tem uma carga mais negativa. Uma molécula com tal diferença de carga é chamada de molécula dipolar.

As diferenças de carga fazem com que as moléculas de água sejam atraídas por outras moléculas polares. Essa atração é conhecida como pontes de hidrogênio. Embora as pontes de hidrogênio sejam interações relativamente fracas, comparadas com as ligações covalentes entre os átomos de hidrogênio e de oxigênio nas moléculas de água, são responsáveis por uma série de propriedades físicas da água (27).

A água também é um bom solvente, devido à sua polaridade. Quando um composto iônico ou polar entra na água é rodeado por moléculas de água. O tamanho relativamente pequeno das moléculas de água normalmente permitem que muitas moléculas de água se agreguem a uma molécula do soluto. Os dipolos parcialmente negativos em uma extremidade da água são atraídos para os componentes de carga positiva do soluto e vice-versa. Em geral, as substâncias

iônicas e polares como ácidos, álcoois e sais são relativamente solúveis em água e substâncias apolares, como gorduras e óleos, não são. Moléculas apolares ficam juntas na água, pois é energeticamente mais favorável para essas moléculas de água fazer pontes de hidrogênio entre si do que fazer interações de van der Waals com moléculas apolares (27).

A água seria, à primeira vista, considerada não condutora de eletricidade. Entretanto, é possível detectar uma pequena corrente fluindo através da água quando aparelhos bastante sensíveis são usados. Esta pequena condutância evidencia a presença de íons que provém da própria dissociação da água (28).

A formação desses íons pode ser descrita pela equação (2.1).

$$2\ H_2O\ (l)\ H_3O^+\ (aquoso) + OH^-\ (aquoso) \qquad (2.1)$$

2.3.1 Viscosidade

A viscosidade é a propriedade associada à resistência que o fluido oferece a deformação por cisalhamento. De outra maneira pode-se dizer que a viscosidade corresponde ao atrito interno nos fluidos devido, basicamente, às interações intermoleculares sendo, em geral, função da temperatura. É comumente percebida como a resistência ao escoamento.

Na tabela 2.2 são apresentadas algumas propriedades físicas da água (29).

Tabela 2.2 – Propriedades da água à pressão constante (1 atm) – fase líquida.

Temperatura (ºC)	Densidade (kg/m³)	Viscosidade (Pa.s)	Condutividade Térmica (W/m.K)
10	999,70	0,001306	0,58
11	999,61	0,001269	0,58
12	999,50	0,001234	0,58
13	999,38	0,001200	0,59
14	999,25	0,001168	0,59
15	999,10	0,001138	0,59
16	998,95	0,001108	0,59
17	998,78	0,001080	0,59
18	998,60	0,001053	0,59
19	998,41	0,001027	0,60
20	998,21	0,001002	0,60
21	998,00	0,000978	0,60
22	997,77	0,000954	0,60
23	997,54	0,000932	0,60
24	997,30	0,000911	0,61
25	997,05	0,000890	0,61
26	996,79	0,000870	0,61
27	996,52	0,000851	0,61
28	996,24	0,000832	0,61
29	995,95	0,000815	0,61
30	995,65	0,000797	0,62

Fonte: referencia (29)

A variação de densidade entre 10 °C e 30 °C é de 0,5 %, entretanto a viscosidade varia uma ordem de grandeza, aproximadamente 61 % nesse mesmo intervalo, indicando que a viscosidade da água apesar de baixa quando comparada a um óleo é bastante dependente da temperatura, sendo uma variável que necessita ser controlada, uma vez que propriedades tribológicas normalmente dependem da viscosidade do lubrificante.

Outra variável importante nos sistemas tribológicos é o coeficiente de pressão – viscosidade, que avalia quanto a viscosidade se altera com a pressão. Esse valor para água é de 7,5 x 10^{-10} mm²/N (30).

2.4 Tribologia de Materiais cerâmicos

Os materiais cerâmicos avançados são estudados há algum tempo para aplicações tribológicas devido às suas propriedades como: as fortes ligações químicas (covalentes ou iônicas) que mantêm os seus átomos ligados levando a ter propriedades como a elevada dureza, a resistência à compressão e a resistência ao desgaste, a retenção de suas propriedades mecânicas a elevadas temperaturas, a resistência às reações químicas, a baixa densidade, a elevada rigidez e as propriedades dielétrica, diamagnéticas e diatérmicas. Suas desvantagens incluem baixa resistência à fratura, custo de processamento de matérias-primas, e os custos de fabricação, uma vez que para produção desses elementos utilizam-se matérias-primas puras, sinterizadas a altas temperaturas.

A cerâmica mais utilizada para fins tribológicos é a alumina (óxido de alumínio, Al_2O_3), isso se deve a sua popularidade a seus relativamente baixos custos de produção e ao domínio da técnica de purificação dos pós, principalmente pelo fato de ser a matéria prima para obtenção de alumínio.

Dados obtidos por Peterson e Murray mostram que o comportamento tribológico de materiais cerâmicos é muito influenciado pela carga, temperatura e meio (31). Os autores concluíram que em baixas cargas, a cerâmica pode deslizar sem aumentar o número de trincas na superfície. A presença de umidade adsorvida e a formação de películas de óxido, também foram relatadas como tendo o efeito de diminuir o coeficiente de atrito(10)(32). O efeito da temperatura no atrito e no desgaste de vários materiais cerâmicos têm sido estudado por vários pesquisadores (33)(34)(35)(36)(37), demonstrando que os valores das variáveis tribológicas variam em extensa faixa em função desse parâmetro. Todos os resultados relatados indicam que o comportamento tribológico desses materiais é complexo e dependente da composição e estrutura do material, bem como das condições de teste.

As reações triboquímicas ocorrem frequentemente no desgaste de materiais cerâmicos. Nestes processos, as reações não ocorrem espontaneamente e ocorrem a baixas velocidades. As reações são catalisadas pela alta pressão e/ou pelas altas temperaturas que existem nas interfaces. Assim a alumina pode reagir com a umidade na atmosfera para formar hidróxido de alumínio(6)(38), o nitreto de silício pode oxidar para formar sílica ou pode reagir com a umidade para formar amônia (4)

(15). Reações triboquímicas podem ter um efeito benéfico, se o produto de reação resultante for estável, formando uma camada que separa corpo e contracorpo reduzindo o atrito e o desgaste, através de forças eletrostáticas que aumentam a separação entre as superfícies(39)(40)(1), ou através da formação de uma camada lubrificante de baixa tensão de cisalhamento(15)(6). Reações triboquímicas também podem ser prejudiciais, se a taxa de reação for elevada e o produto da reação for facilmente removido do sistema, aumentando a taxa de desgaste e de atrito(41)(3).

2.4.1 Regime de baixo atrito em cerâmicas lubrificadas com água

Na segunda metade do século passado, Rawcliffe (42) realizou uma extensa revisão sobre a utilização da água como lubrificante em diversas configurações de sistemas mecânicos compostos por materiais metálicos. Nela, o deslizamento entre ligas à base de níquel, à base de cobalto e cromo (Estelite ou Estelita – *Stellite*) e aços inoxidáveis austeníticos resultou em coeficientes de atrito cinemático na faixa de 0,20 a 0,40.

Na década de 1980 foi verificado experimentalmente que, em sistemas deslizantes cerâmicos lubrificados com água, pode-se diminuir este coeficiente de atrito em até 100 vezes, em relação aos dados obtidos por Rawcliffe, isto é, obter valores de até 0,002 (32). Valores de coeficiente de atrito na ordem de milésimos na escala macroscópica muitas vezes são chamados de ultrabaixo coeficiente de atrito, UBCA (6)(43)(44)(36), ou Superlubricidade (43), e sua ocorrência entre componentes mecânicos em máquinas e outros equipamentos é de grande interesse, pois significa uma diminuição nas perdas de energia geradas pelo atrito e pelo desgaste.

A publicação do trabalho de Tomizawa e Fischer (32) sobre o deslizamento entre o par nitreto de silício – nitreto de silício no qual estimaram valores de coeficiente de atrito aproximadamente de 0,002, motivou vários pesquisadores a estudar o tema.

Segundo Tomizawa e Fischer (32), em velocidades de deslizamento superiores a 0,065 m/s foi possível atingir o regime de lubrificação hidrodinâmica. Segundo os autores a causa para o baixo valor de coeficiente de atrito obtido foi devido a obtenção de superfícies “muito lisas” provenientes das reações triboquímicas entre o nitreto de silício e a água e com isto possibilitar o regime

hidrodinâmico de lubrificação com uma espessura de filme estimada em 70 nm.

Ainda hoje, a causa do UBCA apresentado entre pares de nitreto de silício e carbeto de silício em água é explicada por diversas teorias diferentes, dentre elas podemos destacar as seguintes:

a) Teoria do regime de lubrificação hidrodinâmico – Nesta teoria (45) a sustentação dos corpos é feita apenas pelas forças hidrodinâmicas geradas pela combinação entre carga e velocidade nos corpos, os efeitos foram verificados em nitreto de silício e carbeto de silício, conforme figura 2.3 – A;
a) Teoria do regime de lubrificação misto (15) – Nesta teoria parte da sustentação é hidrodinâmica e parte da sustentação é feita através de uma camada gerada por reações triboquímicas. Esta camada estaria no regime de lubrificação limítrofe e teria uma baixa tensão de cisalhamento que afetaria os valores de coeficiente de atrito e desgaste. Este fenômeno foi estudado principalmente em cerâmicas a base de silício, conforme figura 2.3 – B;
b) Teoria da superfície recoberta com filmes óxidos com terminações de hidrogênio (39) – onde o baixo atrito estaria relacionado com as interações de repulsão eletrostática entre as duas superfícies cobertas com filmes de óxido com terminações de hidrogênio. A fim de alcançar tal condição de baixo atrito, as superfícies devem ser desgastadas para desenvolver um elevado grau de conformidade e uma marca de desgaste de tamanho suficiente para reduzir a pressão de contato;
c) Teoria da dupla camada elétrica formada em torno da sílica (40) – A partir da equação de Reynolds modificada para levar em conta o efeito da dupla camada elétrica gerada em torno da sílica, foi determinado que a dupla camada elétrica aumenta significativamente o valor de espessura de filme, fato que diminui o coeficiente de atrito e desgaste quando o filme de lubrificação hidrodinâmica é menor que 100 nm.

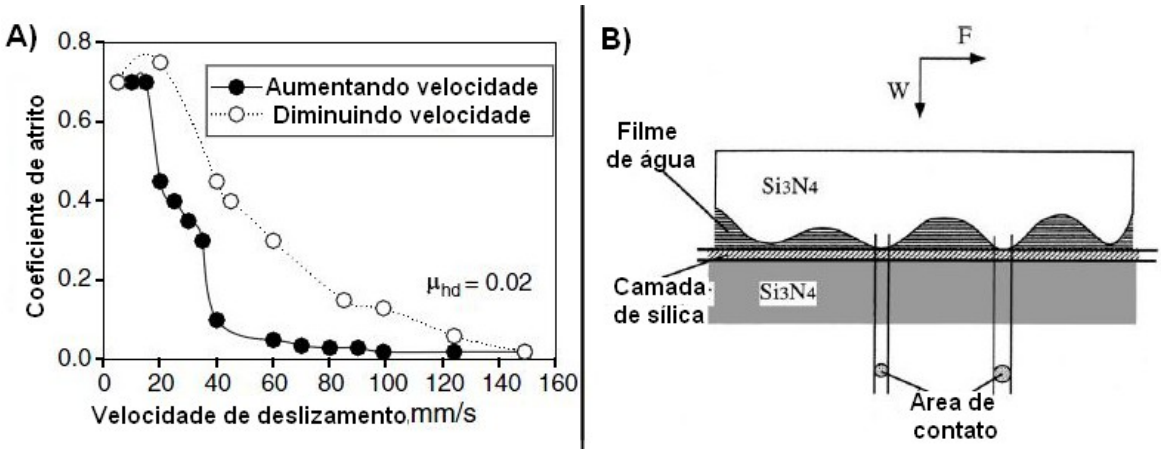

Figura 2.3 – A) Teoria do regime de lubrificação hidrodinâmico (adaptado de 45) e B) Teoria do regime de lubrificação misto (adaptado de 15).

No entanto, nenhuma das teorias citadas é totalmente aceita pela maioria dos pesquisadores do tema.

Como se viu, valores muito baixos de coeficiente de atrito, na faixa de milésimos, e os fenômenos a eles relacionados têm sido observados entre pares similares de cerâmicas covalentes contendo Si, isto é, nitreto de silício e/ou carbeto de silício quando deslizadas em água (10)(11)(12)(13)(14)(15)(32). Contudo, em ensaios tribológicos com os mesmos parâmetros de ensaio entre cerâmicas à base de óxidos não se atingiu o UBCA, como por exemplo, para a alumina, que segundo vários autores apresenta no regime permanente durante o deslizamento em água o valor de coeficiente de atrito cinemático de aproximadamente 0,25 (13)(16)(19)(20)(21)(33). Segundo vários trabalhos da literatura (13)(15)(39)(46), o UBCA somente ocorre após a formação de uma tribocamada estável de sílica na superfície das cerâmicas que pode ser descrita pela equação 2.2 (4):

$$Si_3N_4 + 6H_2O \leftrightarrow 3SiO_2 + 4NH_3 \qquad (2.2)$$

O notável baixo valor de coeficiente de atrito apresentado entre pares similares de nitreto de silício ou carbeto de silício em relação aos pares similares de alumina aparentemente está relacionado com a formação dos produtos da reação com a água na superfície destas cerâmicas. No caso da alumina a reação com a água promove a formação de trihidróxido de alumínio que apesar da baixa taxa de cisalhamento não reduz o atrito para o nível UBCA (6)(41).

O deslizamento em água de pares cerâmicos dissimilares é pouco estudado.

Andersson em 1992 (20) realizou experiências entre o par dissimilar alumina deslizando contra carbeto de silício e o coeficiente de atrito aparentemente não estabilizou e não apresentou nenhuma tendência para o comportamento de qualquer uma das cerâmicas, pois até o final do experimento oscilou dentro da faixa de aproximadamente 0,02 a 0,25.

No entanto, a possibilidade de substituição de um elemento do par no mancal de deslizamento cerâmico de nitreto de silício por alumina, que é uma cerâmica mais difundida, mais aplicada e de menor custo em comparação ao nitreto de silício e o carbeto de silício, em deslizamento na água, foi apontada após a publicação de um estudo sobre o comportamento reológico de uma suspensão de alumina em água com adição de sílica coloidal (47). Neste trabalho a observação da mudança no comportamento eletroforético possibilitou o cálculo do potencial Zeta e isto indicou que a alumina em meio aquoso com adição de sílica coloidal apresentava comportamento de superfície semelhante à da sílica. Uma explicação para este comportamento é que em água a superfície da alumina fica recoberta por sílica. A hipótese que a formação de uma camada estável rica em sílica na superfície da alumina durante o deslizamento contra o nitreto de silício em água seria capaz de proporcionar UBCA foi comprovada por Ferreira (6). Na Figura 2.4 apresenta-se o comportamento do coeficiente de atrito cinemático do par alumina – nitreto de silício durante o deslizamento em água pura e com adição de sílica coloidal, hidrossol.

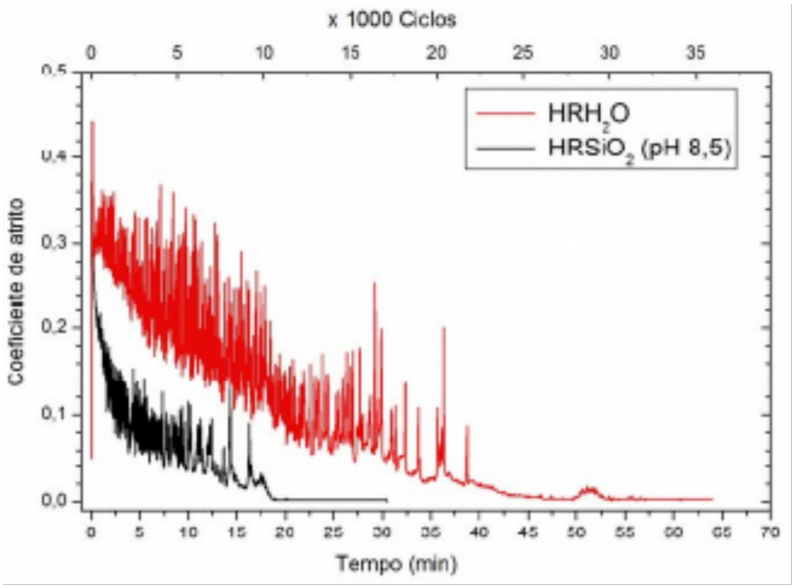

Figura 2.4 – Comportamento típico do coeficiente de atrito durante os ensaios com hidrossol, linha preta, e sob água pura, linha vermelha. Fonte: retirado de (6).

Na figura 2.4 encontram-se duas importantes evidências experimentais do trabalho, a obtenção de coeficientes de atrito entre 0,002 e 0,004 para um par cerâmico dissimilar (Al_2O_3 – Si_3N_4) e o emprego de hidrossol para acelerar a obtenção destes baixos valores de coeficiente de atrito, como sugerido por (15).

Para explicar estes resultados foi levantada a hipótese de que a capacidade de lubrificação da sílica coloidal amorfa no meio aquoso consistiu em duas ações distintas. De um lado, na interface com a alumina, a sílica coloidal ligar-se-ia ao trihidróxido de alumínio. De outro, ela permaneceria dispersa no líquido alterando suas propriedades lubrificantes devido a formação de uma camada difusa.

Posteriormente foram obtidos outros resultados importantes, como a confirmação do fato de se obter um UBCA com um par dissimilar (Al_2O_3 – Si_3N_4) e a constatação de que esse fenômeno ocorre em uma faixa específica de pH (1). Para pH's menores que três e maiores que 12 não ocorre o UBCA, apoiando a teoria de que uma camada rica em sílica fica adsorvida nas superfícies, possibilitando um baixo coeficiente de atrito somente em regiões onde a sílica permanece em estado coloidal, como demonstrado na figura 2.5.

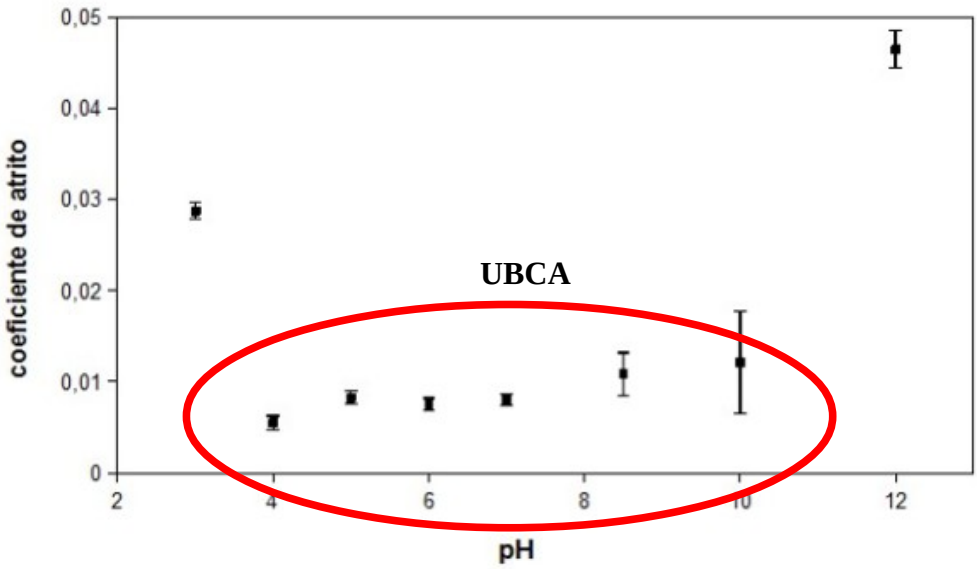

Figura 2.5 – Média dos valores do coeficiente de atrito em função do pH obtidos durante o regime permanente de UBCA. Fonte: retirado de (1).

Com o intuito de entender por que o coeficiente de atrito no deslizamento de alumina contra alumina não atingiu valores milesimais, revisou-se a literatura sobre o tema, apresentada a seguir.

2.4.2 Tribologia em Óxido de Alumínio

A alumina tem sido usada desde o século passado em muitas aplicações, tais como revestimento de fornos. Nos dias atuais este material está sendo empregado cada vez mais para a construção de elementos de máquinas, tais como mancais (48). Este material pode operar numa larga gama de temperaturas e em diferentes condições ambientais. Isto só se tornou possível a partir de resultados de investigações sobre muitos aspectos do comportamento de desgaste e atrito nas últimas três décadas. Em particular alguma ênfase foi dada para a lubrificação.(19)(20)(21)(33)(49)(50)(51)(52)

O atrito, o desgaste e o regime de lubrificação envolvem vários fenômenos complexos que dependem de parâmetros dinâmicos do sistema (como velocidade, carga, acelerações e solicitações dinâmicas), parâmetros do material (como composição química, microestrutura, topografia tenacidade a fratura e dureza) e parâmetros ambientais (como temperatura, composição da atmosfera e umidade) (53).

Como resultado podem ser produzidos vários tipos de superfícies de desgaste para a alumina, desde superfícies extremamente rugosas (no caso onde o contra corpo foi nitreto de silício – figura 2.6 a e figura 2.7 a) até superfícies extremamente lisas (no caso onde o contra corpo foi alumina – figura 2.6 b e figura 2.7 b).

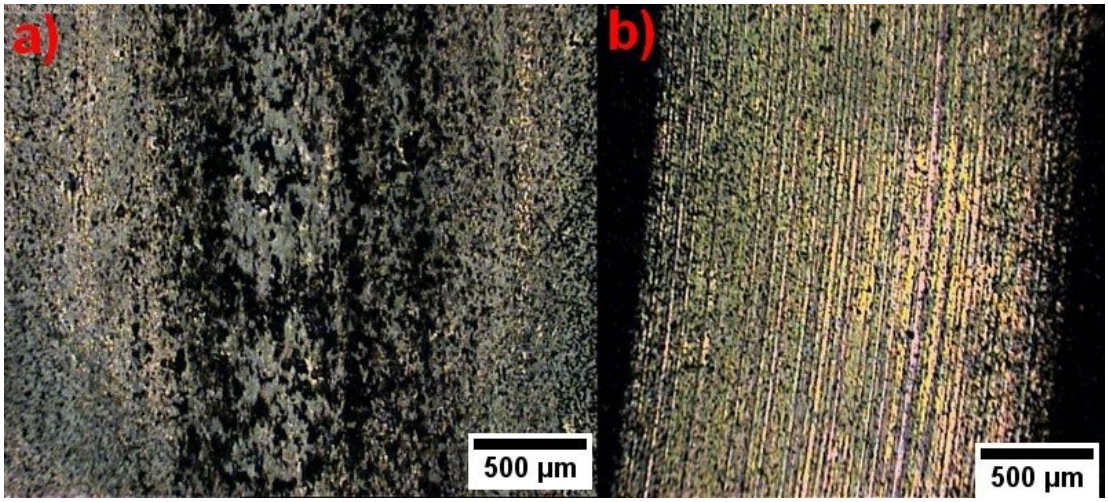

Figura 2.6 – Comparação entre ensaios realizados com esferas de nitreto de silício e esferas de alumina sobre um disco de alumina, lubrificado com água. a) esfera de nitreto de silício e b) esfera de alumina. Fonte: Autor.

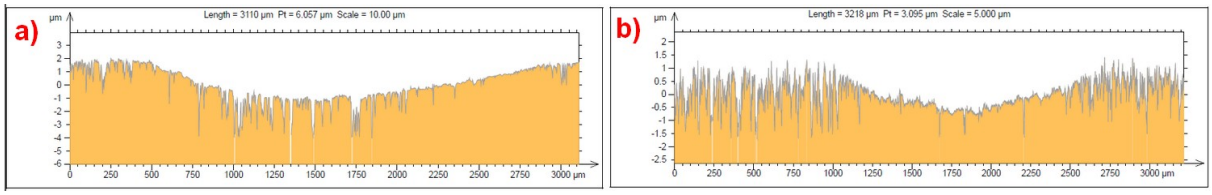

Figura 2.7 – Comparação entre ensaios realizados com esferas de nitreto de silício e esferas de alumina sobre um disco de alumina, lubrificado com água. a) esfera de nitreto de silício e b) esfera de alumina.(obs. Escalas diferentes) Fonte: Autor.

A água e/ou a umidade e as partículas soltas (formadas pela quebra das asperezas ou pelo destacamento dos grãos) podem afetar o desgaste da alumina negativamente ou positivamente. O efeito mais benéfico desses materiais é a formação de uma tribocamada sobre a superfície que atua como um lubrificante (53) (3). No entanto, se a profundidade da camada hidratada for excessivamente grande, ocorre uma forma de desgaste onde essa camada é continuamente retirada da superfície (3).

2.4.3 Formação do Hidróxido de Alumínio

2.4.3.1 Hidróxido de alumínio

O tri-hidróxido de alumínio, $Al(OH)_3$, também chamado de alumina hidratada, é encontrado na natureza na forma do mineral gibbsita e em suas três formas polimorfas mais raras a bayerita, doyleita e nordstrandita. A gibbsita tem uma estrutura típica de hidróxido metálico (como por exemplo o hidróxido de sódio, de potássio ou magnésio) com ligações de hidrogênio. Ela é constituída por duas camadas de grupos hidroxila com íons de alumínio ocupando dois terços dos sítios octaédricos (38).

O hidróxido de alumínio está relacionado com o óxido hidróxido de alumínio, AlO(OH) e com o óxido de alumínio, Al_2O_3, diferindo apenas pela perda ou acréscimo de água. Hidróxido de alumínio em pó que tenha sido aquecido a uma temperatura elevada, sob condições cuidadosamente controladas, é conhecido como alumina ativada e é usado como um dessecante, adsorvente, na purificação de gases e na purificação de água(6)(38).

O caminho para a desidratação térmica da alumina, ou seja, a transformação

do hidróxido de alumínio em óxido de alumínio, é complexo e considerado reversível. A reversão do processo pode ser realizado através de reações triboquímicas, como mostrado na figura 2.8.

Alfa-alumina, ou corundum, é a alumina estável não hidratada que é o produto final das reações de desidratação. Quando analisamos a figura 2.8 o caminho de transição a é favorecido para o ar úmido, tamanhos de partículas grandes e uma reação rápida, enquanto o caminho b (figura 2.8) é favorecido para partículas pequenas, taxas de reação lenta e ar seco. Boehmita e diaspore são mono-hidróxidos de alumínio Al(OH) (41).

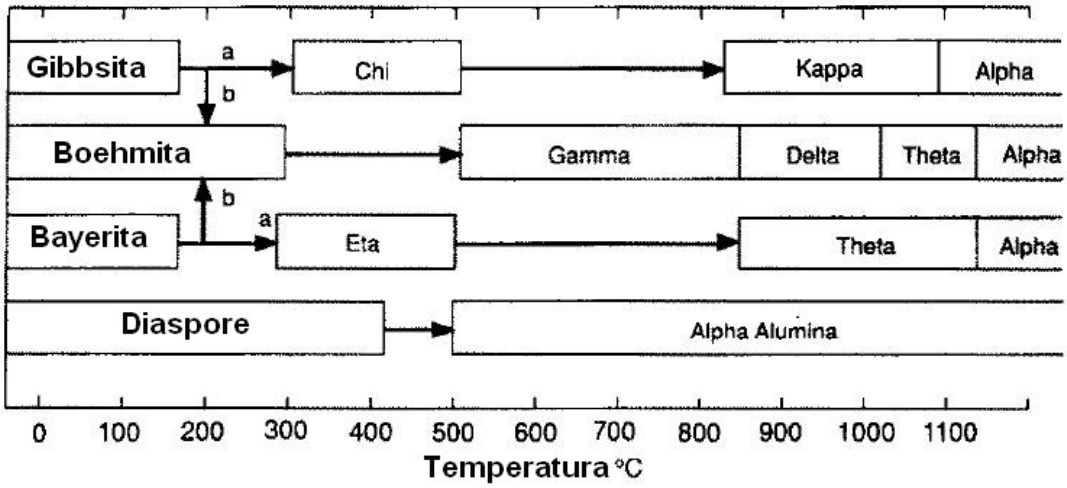

Figura 2.8 – Formação de alumina (ou hidróxido de alumínio) em função da temperatura.
Fonte: adaptado de (41).

Também pode-se considerar o diagrama de fases Al_20_3 – H_20 na figura 2.9, mostrando que em pressões e temperaturas elevadas, os hidróxidos são estáveis com a formação de bayerita favorecida em baixas temperaturas, e boehmita em temperaturas mais alta (41).

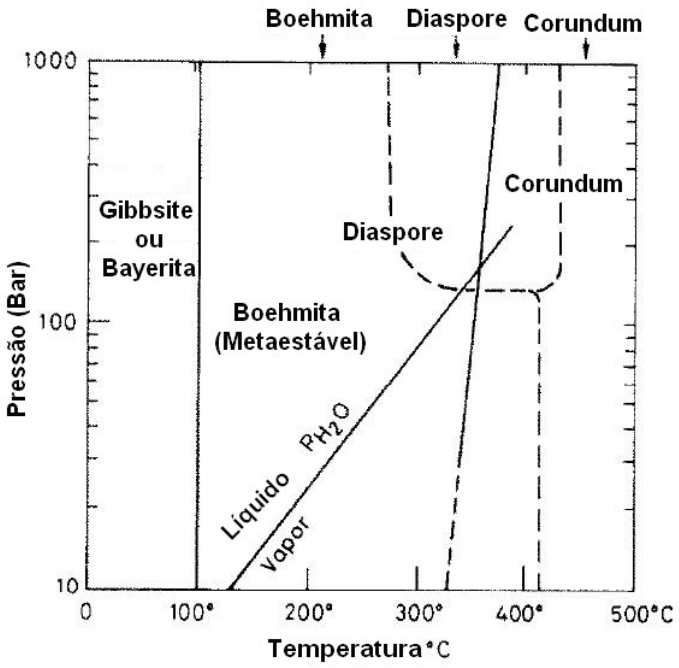

Figura 2.9 – Diagrama de fases alumina – água. Fonte: adaptado de (41).

A partir das figuras 2.8 e 2.9 é possível perceber que para a transformação da alumina imersa em água em trihihidróxidos de alumínio é necessário uma condição específica, como altas temperaturas e pressões.

2.4.3.2 Formação de Hidróxido de alumínio por reação triboquímica

Quando comparado com ensaios feitos com ar seco, os ensaios realizados com alumina em ar úmido ou água tem seus valores de coeficiente de atrito e de taxa de desgaste menores, chegando em alguns casos em diferenças de ordens de grandeza (16)(41)(19)(33)(54)(55)(56). Segundo M. G. Gee (41) isso pode indicar que há uma reação entre a alumina e a água presente no ar que proporciona essa diferença.

Para alguns autores o hidróxido de alumínio formado por reações triboquímicas foi um ator importante para a ocorrência da diminuição da taxa de desgaste e do coeficiente de atrito, além de produzir uma superfície com menor rugosidade(41)(19).

Para ocorrer a formação de filmes de hidróxido de alumínio, a condição prévia mais importante é a presença de debris de pequenos tamanhos provenientes do desgaste de alumina. Esta massa de debris localizada entre as superfícies é forçada

para dentro das depressões (poros ou vales de rugosidade) onde sob a ação das elevadas temperaturas (causadas pelo atrito entre as superfícies) e pressões ocorreria uma reação para formar o hidróxido. Este processo continua até que o filme de hidróxido preencha a maior parte da superfície original (41).

Segundo dados da literatura a provável razão para esta camada diminuir o coeficiente de atrito e de desgaste está no fato dessa fina camada proteger a superfície de desgaste contra fraturas intergranular e/ou intragranular e da sua mais baixa tensão de cisalhamento (15)(41)(19).

2.4.4 Coeficiente de atrito no par Alumina – Alumina

O coeficiente de atrito no par alumina-alumina já foi estudado por vários autores como Zum Gahr (16), Asanabe (17), Peter Blau (18), entre outros. Os dados de alguns autores encontram-se resumidos na tabela 2.3 em ordem cronológica.

Em 1989 Sasaki (19) encontrou no ensaio pino sobre disco com ar seco um valor de coeficiente de atrito $\mu = 0,75$ e quando utilizou uma atmosfera rica em água obteve $\mu = 0,4$ já no ensaio lubrificado com água obteve um coeficiente de atrito $\mu = 0,3$. O autor concluiu em seu trabalho que a umidade do ar influenciava, diminuindo o valor de coeficiente de atrito e desgaste, uma vez que havia a adsorção de moléculas de água e a posterior quebra das ligações de hidrogênio durante o ensaio. Já em ensaios lubrificados com água ele atribuiu as baixas taxas de desgaste ao regime de lubrificação hidrodinâmico.

Ainda em 1989 Zum Gahr (16) obteve coeficientes de atrito entre 0,1 e 2,2 e concluiu que apesar de haver abrasão entre os corpos e os debris que ocasionam o aumento do coeficiente de atrito e desgaste, o par alumina-alumina obteve a menor taxa de desgaste quando comparado com outros materiais cerâmicos e/ou metálicos testados por ele.

Tabela 2.3 – Coeficiente de atrito do par Al_2O_3 – Al_2O_3 ao longo da história. (T – Temperatura, HR – Umidade Relativa, seco – Atmosfera aberta).

Autor (ano)/ (fonte)	Tipo de ensaio/ geometria da amostra	Meio/ Lubrificação	Coeficiente de atrito (μ)	Carga (N)/ velocidade (m/s)/ distância percorrida (m)
Asanabe (1987)/ (17)	Movimento Rotativo Pino sobre anel	Lubrificado com óleo	0,1	(400 kgf/cm²)/ 1/ -
Sasaki (1989)/ (19)	Movimento Rotativo Pino sobre disco	Atmosfera de Nitrogênio ou oxigênio	0,7	10/ 0,4/ 1256
		Vácuo	0,8	3/ 0,1/ -
		Seco 0% HR	0,75	10/ 0,4/ 1256
		Seco 100% HR	0,4	10/ 0,4/ 1256
		Lubrificado com água	0,3	50/ 0,1 – 0,8/ 1256
Zum Gahr (1989) / (16)	Movimento Rotativo Pino sobre anel	Seco	2,2	10/ 0,77/ 8700
		Seco limpando a trilha	1,6	10/ 0,77/ 8700
		Lubrificado com água	0,2	200/ 0,77/ 8700
		Lubrificado com óleo	0,1	200/ 0,77/ 8700
Peter Blau (1991) / (18)	Movimento Rotativo Esfera sobre disco	Seco	0,35	10/ 0,1/ 1000
Peter Anderson (1992)/ (20)	Movimento Rotativo Pino sobre disco	Lubrificado com água	0,2	10/ 0,1/ 2500
Löffeelbein, et al.(1993)/ (21)	Movimento Rotativo Pino sobre disco	Lubrificado com água	0,25	22/ 0,1/ 2000
		Lubrificado com água em diversos valores de pH	0,15 (pH 3 e 13)	22/ 0,1/ 2000
		Seco	0,45	22/ 0,1/ 2000
Ming-Chang (1993)/ (33)	Movimento alternativo Esfera sobre disco	Seco	0,94 (T=50 ºC)	15-50/ 0,05/ 180
		Lubrificado com água	0,43 (T=50 ºC)	15-50/ 0,05/ 180
		Seco	0,77 (T=600 ºC)	15-50/ 0,05/ 180
		Atmosfera de Nitrogênio	0,74 (T=600 ºC)	15-50/ 0,05/ 180
Wong (1998)/ (57)	Movimento Rotativo Pino sobre disco	Lubrificado com água	$0,13 < \mu < 0,2$	15-50/ 0,05/ 180

Dulias et al. (2002)/ (49)	Movimento alternativo cilindro sobre plano	Seco (superfície não polida)	0,6	60/ 0,16/ -
		Seco (Superfície polida)	0,8	60/ 0,16/ -
		Lubrificado com água	0,3 (polida e não polida)	60/ 0,16/ -
		Lubrificado com isoctano (superfície não polida)	0,8	60/ 0,16/ -
		Lubrificado com isoctano (Superfície polida)	0,3	60/ 0,16/ -
Kalin et al. (2003) (2006)/ (50)(51)	Movimento alternativo Pinos Hemisféricos sobre disco	Lubrificado com água em diversos valores de pH	0,2 (pH 0,85 e 13)	50/ 0,014/ 100
			0,55 (4<pH<9,5)	50/ 0,014/ 100
Olofsson et al. (2009)/ (52)	Movimento Rotativo Esfera sobre disco	Seco	0,6	1/ 0,1/ 3,14 – 3141,6
		20%<HR<60%	0,45	1/ 0,1/ 12,56 – 3141,6
		Lubrificado com água	0,2	1/ 0,1/ 12,56 – 3141,6

Fonte: Autor.

Em 1991 Peter Blau (18) no ensaio esfera sobre disco a seco encontrou um valor de coeficiente de atrito μ = 0,35. Os autores atribuíram os resultados aos mecanismos de nucleação de trincas e ao desgaste abrasivo, causado pelos debris principalmente no disco, onde houve um desgaste maior do que na esfera.

Em 1992 Peter Anderson (20) no ensaio pino sobre disco lubrificado com água encontrou μ = 0,2. Neste trabalho o autor concluiu que o deslizamento entre o par alumina – alumina tem melhores resultados tribológicos que quando se utiliza algum metal como contra corpo.

Em 1993 Löffeelbein, et al.(21) realizaram ensaios pino sobre disco lubricado com água em diferentes pH's e seco onde obtiveram coeficientes de atrito entre 0,15 e 0,45. Os autores observaram que o valor de coeficiente de atrito pouco muda em ralação ao tempo. Eles atribuíram esses valores aos filmes de hidróxido de alumínio formado que possuem tensão de cisalhamento maiores que a do óxido de silício

formado quando o desgaste envolve nitreto de silício. Quando foram utilizadas soluções com diferentes valores de pH's, os autores não notaram diferenças nos comportamentos do runnuing-in.

Ainda em 1993 Ming-Chang (33) et al., no ensaio em movimento alternativo na configuração esfera sobre disco, com variação de temperatura, a seco conseguiu μ = 0,94 e lubrificado com água μ = 0,43. Neste trabalho os autores concluem que em baixas temperaturas há um polimento da superfície e um desgaste abrasivo, enquanto em altas temperaturas há fadiga, delaminação, desgaste triboquímico e desgaste adesivo para justificar os coeficientes de atrito e desgaste.

Em 1998 Wong (57) concluiu após obter coeficientes de atrito no ensaio com Movimento Rotativo e configuração Pino sobre disco em torno de 0,13 que era possível conseguir um coeficiente de atrito menor que os obtidos anteriormente na literatura (μ =0,2) com uma combinação de pressão de contato e velocidades de deslizamento convenientes.

Em 2002 Dulias et al. (49) no ensaio de movimento alternado cilindro sobre plano conseguiu a seco μ = 0,6 quando foi utilizada uma superfície não polida e 0,8 na superfície polida. No ensaio lubrificado com água μ = 0,3 tanto na superfície não polida quanto na superfície polida e no ensaio lubrificado com isoctano na superfície polida μ = 0,3 e na amostra que tinha superfície não polida μ = 0,8. Em suas conclusões os autores disseram que a qualidade do acabamento superficial e cargas aplicadas determinaram os valores de coeficiente de atrito e tempo de running-in como mostrado na figura 2.10, onde as curvas pretas indicam acabamento 'polido' e as curvas cinzas acabamento não polido; em a) temos ensaios sem lubrificante com umidade relativa em 50%, em b) temos ensaio lubrificado com água e em c) temos ensaio lubrificado com isoctano.

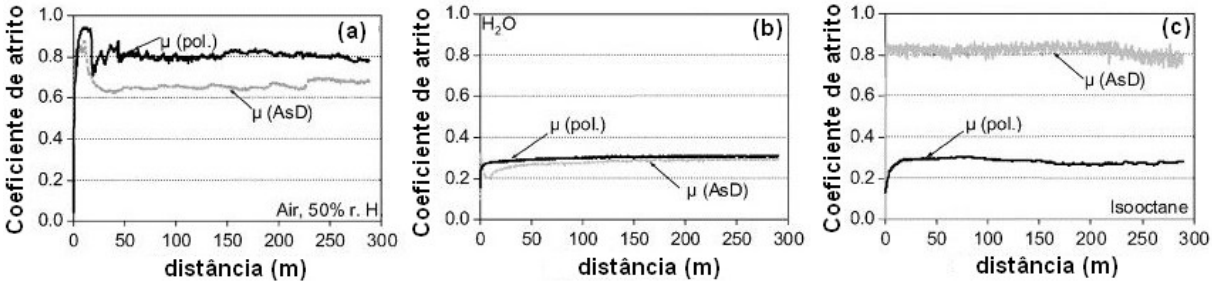

Figura 2.10 – Coeficiente de atrito em função da distância e do acabamento superficial para vários lubrificantes no par alumina – alumina. Fonte: adaptado de (49).

Em 2003 e 2006 Kalin et al.(50)(51) realizando ensaios na configuração movimento alternativo lubrificado com água com diversos valores de pH obtiveram coeficientes de atrito μ entre 0,2 e 0,55. Os valores de coeficiente de atrito mais altos foram obtidos com valores de pH entre 4 e 10, enquanto os valores mais baixos foram obtidos em pH's 1 e 13, como mostrado na figura 2.11; é possível também perceber uma tendência de maior oscilação nos resultados quando foram realizados ensaios com pH por volta de 8. Nas conclusões os autores creditam esse fenômeno às tribocamadas formadas entre pH 4 e 10 e devido aos balanços de cargas elétricas próximo ao ponto de zero carga, geradas pela dupla camada elétrica nos compostos oriundos das reações triboquímicas, para a elevação das rugosidades e dos coeficientes de atrito. Este fenômeno também foi estudado para cerâmicas a base de silício(1).

Em 2009 Olofsson et al.(52) no ensaio esfera sobre disco obtiveram no ensaio a seco μ = 0,6 e no lubrificado com água μ = 0,2. Os autores atribuem os valores de coeficiente de atrito e de baixa taxa de desgaste em ensaios lubrificados aos tribofilmes formados pela aglomeração ou tribosinterização dos debris gerados no começo do ensaio.

Como é possível verificar com auxílio da literatura, o coeficiente de atrito para o par alumina-alumina quando lubrificado com água é considerado por muitos autores constante, sendo que para o ensaio esfera sobre disco ou pino sobre disco em aproximadamente μ ≈ 0,2 (16)(19)(20)(21) e no ensaio com movimento alternado em μ ≈ 0,2 (49)(50)(51)(52). Além disso vários autores citam várias explicações para o comportamento do atrito e do desgaste, tornando esse tema importante aberto a maiores investigações.

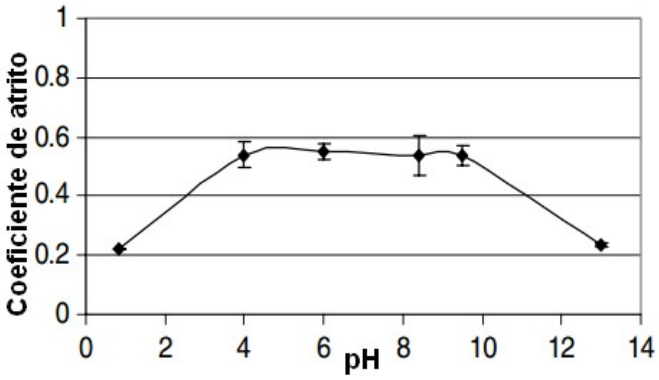

Figura 2.11 – Coeficiente de atrito em função do pH para o par alumina – alumina lubrificado com água em diferentes pH's. Fonte: adaptado de (51).

2.5 Modelos matemáticos para o cálculo de parâmetros de lubrificação

Na maioria das aplicações de engenharia, os processos de controle são muito complicados para serem facilmente descritos por equações matemáticas exatas. Nos processos reais existem muitos fatores e variáveis que interagem simultaneamente tornando tal descrição extremamente difícil. Logo, obter uma equação para fenômenos e situações reais sempre foi extremamente difícil. A solução para esse dilema foi criar aproximações empíricas para o estudo desses fenômenos, incluindo a fluidodinâmica. As primeiras aproximações estudadas, como disse o matemático John Newman (3), não tinham nada a ver com fluidos reais. A situação mudou dramaticamente com a introdução de computadores, quando sistemas mecânicos puderam ser estudados de forma mais detalhada através de simulações e teste de modelos.

2.5.1 Lubrificação Hidrodinâmica

A principal peça para o estudo da lubrificação hidrodinâmica é a equação de Reynolds. Esta equação precisa ser convenientemente simplificada para se poder obter expressões que podem ser usadas em problemas hidrodinâmicos. As simplificações usadas são listadas abaixo (3):

a) As forças internas do corpo são negligenciadas;
b) A pressão é constante através do filme;
c) Não há deslizamento nas fronteiras;
d) O lubrificante se comporta como um fluido newtoniano;
e) O fluxo é laminar;
f) A inércia do fluido é negligenciada;
g) A densidade do fluido é constante;
h) A viscosidade é constante em todo o filme gerado.

A partir destas simplificações foi possível calcular parâmetros importantes para a compreensão do atrito entre pares cerâmicos lubrificados com água como por exemplo a espessura do filme de água ou coeficiente de atrito esperado.

2.5.1.1 Espessura de Filme na lubrificação hidrodinâmica

Para o cálculo da espessura de filme foi utilizada a expressão 2.3 (45)(3), uma das simplificações da equação de Reynolds, em conjunto com o gráfico da figura 2.12.

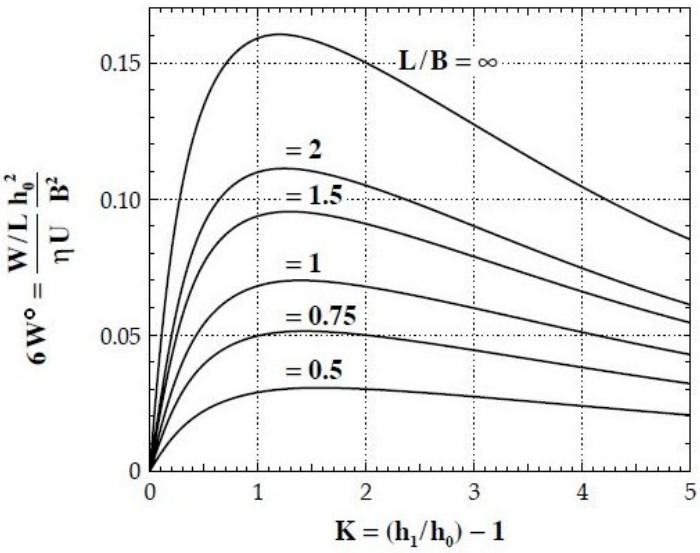

Figura 2.12 – Capacidade de carga em função do parâmetro K. Fonte: adaptado de (3)

$$6W° = \frac{W h_0^2}{\eta u B^2 L} \tag{2.3}$$

Onde:

W° – capacidade de carga adimensional;

W – carga (N);

u – velocidade (m/s);

B – comprimento do contato (m);

L – largura do contato (m);

η – viscosidade (Pas);

h_0 – espessura mínima de filme (m);

h_1 – espessura de filme na entrada (m);

K – razão de convergência.

O gráfico da figura 2.12 representa a capacidade de carga adimensional (W°) em função da razão de convergência (K) para um mancal quadrado em vários valores de L/B. Segundo Jordi (45) para um mancal elíptico os valores de 6W° são 60% dos valores de um mancal quadrado.

No caso cujo deslizamento contra um plano resulte numa calota de diâmetro D, a equação se simplifica pois B = L = D e L/B = 1 onde D é o diâmetro da calota formada.

2.5.1.2 Parâmetros de contato

A partir de simplificações da equação de Reynolds, para algumas situações específicas, como no caso do contato linear, podemos utilizar as equações 2.4 a 2.9 para determinar a Distribuição de pressão, a Capacidade de carga, a Força de atrito, o coeficiente de atrito e a taxa de escoamento de lubrificante.

Apesar de o contato esfera plano gerar uma calota circular (L/B = 1), as equações 2.4 a 2.9 foram concebidas para um mancal infinito (L/B>3). Portanto para os cálculos desses parâmetros foi utilizada a razão L/B>3, onde L e B são as dimensões do mancal sendo respectivamente seu comprimento e largura.

Mesmo não sendo as equações adequadas para o cálculo no caso esfera – plano, estas serão utilizadas para estimar os parâmetros de atrito no sistema (3).

2.5.1.2.1 Distribuição de pressão

$$\boxed{p=\frac{6u\eta B}{Kh_0}\left(-\frac{1}{h}+\frac{h_0}{h^2}\frac{(K+1)}{(K+2)}+\frac{1}{h_0(K+2)}\right)} \qquad (2.4)$$

$$\boxed{K=\frac{(h_1-h_0)}{h_0}} \qquad (2.5)$$

Onde:

p – Pressão (Pa);

u – velocidade (m/s);

B – tamanho do contato (m);

η – viscosidade (Pa.s);

h – espessura de filme (m);

h_0 – espessura mínima de filme (m);

h_1 – espessura de filme na entrada (m);

K – razão de convergência.

2.5.1.2.2 Capacidade de carga

$$W_L = \frac{6 u \eta B^2 L}{K^2 h_0^2}\left(-\ln(K+1) + \frac{2K}{(K+2)}\right) \quad (2.6)$$

Onde:

W_L – capacidade de carga (N);

L – tamanho do contato (m);

O máximo dessa função ocorre quando K=1,2, como mostrado na figura 2.12. A máxima capacidade de carga ocorre quando h_1= 2,2 h_0 (3).

2.5.1.2.3 Força de atrito

$$F = \frac{u \eta BL}{h_0}\left(\frac{6}{(K+2)} - \frac{4\ln(K+1)}{K}\right) \quad (2.7)$$

Onde:

F – força de atrito (N).

2.5.1.2.4 Coeficiente de atrito

$$\mu = \frac{F}{W_L} \quad (2.8)$$

Onde:

μ – coeficiente de atrito.

O mínimo dessa função ocorre quando K=1,55. Logo o coeficiente de atrito mínimo é dado quando K =1,55 (3).

2.5.1.2.5 Taxa de escoamento de lubrificante

$$\boxed{Q_x = uh_0 L\left(\frac{K+1}{K+2}\right)} \tag{2.9}$$

Onde:

Q_x – taxa de escoamento de lubrificante (m³/s).

2.5.2 Parâmetros de Hertz, Hamrock e Dowson para Contato elíptico entre dois corpos elásticos.

Os Contatos elípticos são encontrados em sólidos que têm diferentes relações entre os raios de curvatura em planos ortogonais. Neste caso a área de contato é descrita por uma elipse. Exemplo disto são as esferas de rolamentos. Uma ilustração desta forma de contato é mostrado na Figura 2.13.

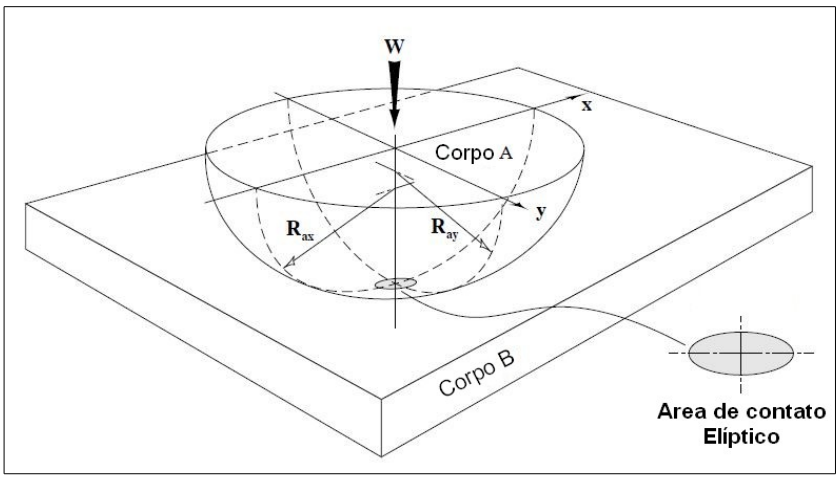

Figura 2.13 – Contato esfera plano. Fonte: adaptado de (3)

As aplicações da teoria de Hertz engloba o contato elíptico em várias situações, neste caso específico utilizamos o contato esfera plano.

Portanto baseando-se no modelo de contato de Hertz para um sistema esfera plano, podemos calcular os parâmetros iniciais de contato, levando em consideração as seguintes suposições e simplificações da teoria (3):

a) Os materiais em contato são homogêneos e o limite de elasticidade não foi excedido;

b) A tensão de contato é causada pela carga, que é normal ao plano de contato tangente o que efetivamente significa que não existem forças tangenciais que atuam entre os sólidos;

c) A área de contato é muito pequena em comparação com as dimensões dos sólidos;

d) Os materiais estão em repouso e em equilíbrio;

e) O efeito da rugosidade da superfície é negligenciável.

A partir dessas podemos estimar o raio da área de contato circular inicial (a), a Pressão de contato máxima (P_{max}), a Pressão de contato média (P_{med}), a máxima deflexão (δ), a Máxima tensão de cisalhamento (τ_{max}) e a Profundidade onde ocorre a máxima tensão de cisalhamento (z).(3) dadas pelas equações 2.10 a 2.18. Para todos os cálculos consideramos o corpo com índice “A” como sendo a esfera e o corpo com índice “B” como sendo o disco.

$$a = k_1 \left(\frac{3WR'}{E'} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{2.10}$$

$$b = k_2 \left(\frac{3WR'}{E'} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{2.11}$$

$$P_{max} = \frac{3W}{2\pi a^2} \tag{2.12}$$

$$P_{med} = \frac{W}{\pi a^2} \tag{2.13}$$

$$\delta = 0{,}52\, k_3 \cdot \left(\frac{W^2}{E'^2 R'} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{2.14}$$

$$\tau_{max} = k_4 \cdot P_{max} \approx \frac{1}{3} \cdot P_{max} \tag{2.15}$$

$$z = k_5 \cdot a \tag{2.16}$$

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{1-\upsilon_A^2}{E_A} + \frac{1-\upsilon_B^2}{E_B} \right] \tag{2.17}$$

E no caso do contato esfera plano temos:

$$\boxed{\frac{1}{R'}=\frac{2}{R_A}\Rightarrow R'=\frac{R_A}{2}} \tag{2.18}$$

Onde:

W – Carga aplicada em N;

R' – raio reduzido de curvatura em m;

E' – módulo de Young reduzido em Pa;

E_A – módulo de Young da esfera em Pa;

E_B – módulo de Young do disco em Pa;

R_A – Raio da esfera em m;

ν_A – Coeficiente de Poisson da esfera;

ν_B – Coeficiente de Poisson do disco;

a – semieixo maior da elipse de contato em m;

b – semieixo menor da elipse de contato em m;

P_{max} – Pressão de contato máxima em Pa;

P_{med} – Pressão de contato média em Pa;

δ – Máxima deflexão em m;

τ_{max} – Máxima tensão de cisalhamento em Pa;

z – Profundidade onde ocorre a máxima tensão de cisalhamento em m.

No caso do contato circular os valores de a e b são iguais. Os parâmetros k_1, k_2, k_3, k_4 e k_5 são coeficientes de contato, obtidos em gráficos plotados em função do coeficiente k_0. Os gráficos dos coeficientes de contato encontram-se no apêndice 1. O coeficiente k_0 é dado pela expressão 2.19.

$$\boxed{k_0=\frac{\left[\left(\frac{1}{R_{Ax}}-\frac{1}{R_{Ay}}\right)^2+\left(\frac{1}{R_{Bx}}-\frac{1}{R_{By}}\right)^2+2\left(\frac{1}{R_{Ax}}-\frac{1}{R_{Ay}}\right)\left(\frac{1}{R_{Bx}}-\frac{1}{R_{By}}\right)\cos 2\Phi\right]^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{1}{R_{Ax}}+\frac{1}{R_{Ay}}+\frac{1}{R_{Bx}}-\frac{1}{R_{By}}\right)}} \tag{2.19}$$

Onde:

Φ – é o ângulo entre o plano que contém o raio mínimo de curvatura do corpo "A" e o plano que contém o raio mínimo de curvatura do corpo "B".

R_{n1n2} – é o raio de curvatura do corpo n_1 na direção n_2.

No caso do contato esfera plano os valores de R_{Bn2} tendem a infinito levando a uma simplificação da fórmula dada na expressão 2.20.

$$k_0 = \frac{\left(\frac{1}{R_{Ax}} - \frac{1}{R_{Ay}}\right)}{\left(\frac{1}{R_{Ax}} + \frac{1}{R_{Ay}}\right)} \tag{2.20}$$

Um desenvolvimento posterior muito útil na avaliação dos parâmetros de contato é devido à Hamrock e Dowson, que utilizou o método da regressão linear a partir do método dos mínimos quadrados para derivar expressões simplificadas para calcular as integrais elípticas necessárias aos cálculos em contatos hertzianos. As fórmulas derivadas aplicam-se a qualquer contato eliminando a necessidade de utilizar métodos numéricos ou gráficos. As fórmulas estão resumidas nas expressões entre 2.21 e 2.28. Embora elas sejam apenas aproximações, as diferenças entre os valores calculados e as previsões das análises hertzianas são muito pequenas.

$$a = \left(\frac{6\bar{k}^2 \bar{\varepsilon}\, W R'}{\pi E'}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{2.21}$$

$$b = \left(\frac{6\bar{\varepsilon}\, W R'}{\pi \bar{k} E'}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{2.22}$$

$$P_{max} = \frac{3W}{2\pi a b} \tag{2.23}$$

$$P_{med} = \frac{W}{\pi a b} \tag{2.24}$$

$$\delta = \bar{\xi}\left[\left(\frac{4{,}5}{\bar{\varepsilon} R'}\right)\left(\frac{W}{\pi \bar{k} E'}\right)^2\right]^{\frac{1}{3}} \tag{2.25}$$

$$\bar{\varepsilon} = 1{,}0003 + 0{,}5968\frac{R_x}{R_y} \tag{2.26}$$

$$\bar{\xi} = 1{,}5277 + 0{,}6023 \cdot \ln\left(\frac{R_y}{R_x}\right) \tag{2.27}$$

$$\bar{k} = 1{,}0339 \cdot \left(\frac{R_y}{R_x}\right)^{0{,}636} \tag{2.28}$$

Onde:

$\bar{\varepsilon}$ e $\bar{\xi}$ – São as integrais elípticas simplificadas;

$\bar{k}$ – é o parâmetro de elipticidade simplificado.

No caso esfera – plano os valores de R_x, R_{Ax}, R_y, R_{Ay} são todos iguais a R_A (raio de curvatura da esfera), devido às expressões 2.29 e 2.30.

$$\frac{1}{R_x}=\frac{1}{R_{Ax}}-\frac{1}{R_{Bx}}=\frac{1}{R_{Ax}}\Rightarrow R_x=R_{Ax} \tag{2.29}$$

$$\frac{1}{R_y}=\frac{1}{R_{Ay}}-\frac{1}{R_{By}}=\frac{1}{R_{Ay}}\Rightarrow R_y=R_{Ay} \tag{2.30}$$

2.5.3 Lubrificação Elastohidrodinâmica (EHL)

A lubrificação Elastohidrodinâmica pode ser definida como uma forma de lubrificação hidrodinâmica em que a deformação elástica dos corpos em contato e as alterações da viscosidade com a pressão desempenham papéis fundamentais. A deformação dos corpos têm de ser levadas em conta no modelo básico de lubrificação elastohidrodinâmica. O mesmo acontece com as alterações de viscosidade, devido à pressão. Se suspeitava da existência da lubrificação elastohidrodinâmica bem antes que ela pudesse ser provada ou descrita usando conceitos científicos específicos. Na década de 1940 uma quantidade substancial de trabalho foi dedicado a resolver a lubrificação elastohidrodinâmica e o primeiro modelo realista que proporcionou uma solução aproximada para espessura de filme elastohidrodinâmico foi proposto por Ertel e Grubin. Verificou-se que a combinação de três efeitos eram importantes: a lubrificação hidrodinâmica, a deformação elástica das superfícies e o aumento da viscosidade do lubrificante sob pressões extremas. Este regime de lubrificação é referido na literatura como lubrificação elastohidrodinâmica que é comumente abreviado para EHL ou EHD(3).

2.5.3.1 Espessura de filme em EHL

Os três principais efeitos na formação de filmes em lubrificação elastohidrodinâmica são:

a) A formação do filme hidrodinâmico,
b) A modificação da geometria do filme por deformação elástica,

c) A modificação da viscosidade e a reologia do lubrificante sob pressão.

Todos esses efeitos atuam simultaneamente gerando e provocando a mudança da geometria dos filmes elastohidrodinâmicos.

Uma análise mais exata da lubrificação elastohidrodinâmico (EHL) foi feita por Hamrock e Dowson (3). Os resultados desta análise são as fórmulas para o cálculo da espessura mínima de filme em contatos EHL. As fórmulas obtidas por Hamrock e Dowson aplicam-se a qualquer contato, como o pontual, o linear ou o elíptico, e são rotineiramente utilizados em cálculos de espessura de filme EHL. As fórmulas são expressas pelas expressões 2.31 a 2.38.

$$\boxed{\frac{h_C}{R'}=2{,}69\left(U\right)^{0{,}68}\left(G\right)^{0{,}53}\left(W_A\right)^{-0{,}067}\left(1-0{,}61\,e^{-0{,}73k}\right)} \tag{2.31}$$

$$\boxed{\frac{h_0}{R'}=3{,}63\left(U\right)^{0{,}68}\left(G\right)^{0{,}49}\left(W_A\right)^{-0{,}073}\left(1-e^{-0{,}68k}\right)} \tag{2.32}$$

$$\boxed{u=\frac{u_A+u_B}{2}} \tag{2.33}$$

$$\boxed{H=\frac{h}{R'}} \tag{2.34}$$

$$\boxed{G=\left(\alpha_{PV}E'\right)} \tag{2.35}$$

$$\boxed{U=\left(\frac{u\eta_0}{E'R'}\right)} \tag{2.36}$$

$$\boxed{W_A=\frac{W}{E'R'^2}} \tag{2.37}$$

$$\boxed{k=\frac{a}{b}} \tag{2.38}$$

Onde:

h_C – espessura de filme no centro do contato (m);

h_0 – espessura de filme mínima (m);

u – velocidade na entrada da superfície (m/s);

u_A – velocidade do corpo “A” (m/s);

u_B – velocidade do corpo “B” (m/s);

η_0 – viscosidade do lubrificante (Pa.s);

E' – módulo de Young reduzido (Pa);

α_{PV} – é o coeficiente de pressão-viscosidade (m²/N);

W – carga normal aplicada (N);

k – parâmetro de elipticidade adimensional;

H – parâmetro de filme adimensional;

U – parâmetro de velocidade adimensional;

G – parâmetro de material adimensional;

W_A – parâmetro de carga adimensional.

2.5.3.2 Correções no regime de lubrificação EHL

Apesar das expressões para o cálculo do filme EHL formuladas por Hamrock e Dowson, que dão uma boa previsão quando envolvem deformações elásticas e mudanças relevantes na viscosidade, existem aplicações onde essas variações são menos pronunciadas, ainda assim o regime de lubrificação pode ser considerado EHL. Em geral, há quatro regimes bem definidos na Lubrificação Elastohidrodinâmica. Cada um destes regimes é caracterizado pelas condições de operação e pelas propriedades do material que podem gerar mudanças na geometria do filme e na viscosidade do lubrificante. Equações exatas para a espessura mínima de filme foram desenvolvidos para cada um destes regimes que são:

a) Isoviscoso rígido
b) Piezoviscoso rígido
c) isoviscoso elástico
d) Piezoviscoso Elástico

Uma maneira simples de identificar qual o regime de lubrificação EHL temos foi proposta por Hamrock e Dowson como um mapa de regimes de lubrificação. Um exemplo desse mapa é mostrado na figura 2.14, para k=1.

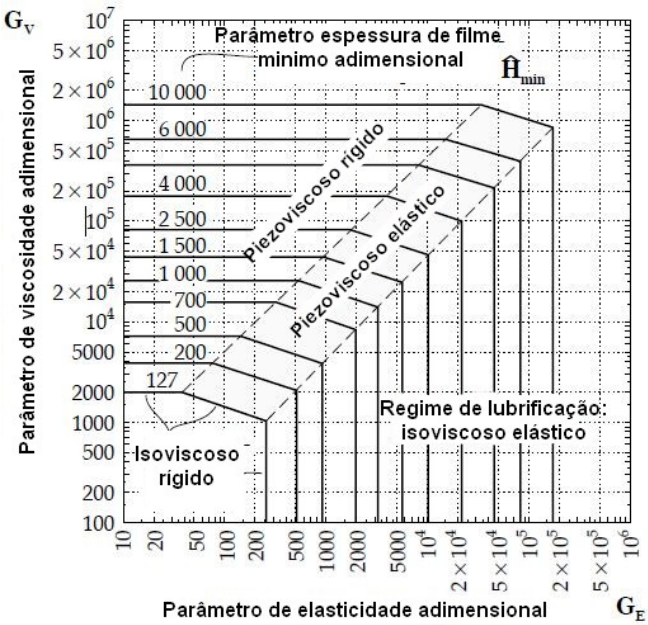

Figura 2.14 – Mapa de regime de lubrificação. Fonte: Adaptado de (3)

2.5.3.2.1 Isoviscoso rígido

Nesse regime, as deformações elásticas são pequenas e podem ser negligenciadas. A pressão máxima do filme lubrificante é demasiadamente baixa para aumentar significativamente a viscosidade do lubrificante. A espessura de filme é dada pelas fórmulas 2.39 a 2.42.

$$\hat{H}_{min}=\hat{H}_C=128\,\alpha_a\lambda_b^2\left[0{,}131\tan^{-1}\left(\frac{\alpha_a}{2}\right)+1{,}683\right]^2 \tag{2.39}$$

$$\hat{H}=H\left(\frac{W_A}{U}\right)^2 \tag{2.40}$$

$$\alpha_a=\frac{R_B}{R_A}\approx 0{,}955\cdot k \tag{2.41}$$

$$\lambda_b=\left(1+\frac{0{,}698}{k}\right)^{-1} \tag{2.42}$$

Onde:

$\hat{H}_{min}$ – espessura mínima de filme adimensional;

$\hat{H}_C$ – espessura de filme central adimensional;

α_a e λ_b – parâmetros de cálculo.

2.5.3.2.2 Piezoviscoso rígido

Nesse regime, as deformações elásticas são muito pequenas e podem ser desprezadas mas as pressões no filme são suficientemente altas para aumentar significativamente a viscosidade do lubrificante no contato. A espessura de filme é dada pelas fórmulas 2.43 a 2.44.

$$\boxed{\hat{H}_{min}=\hat{H}_C=1{,}66\,G_V^{\frac{2}{3}}\left(1-e^{-0{,}68k}\right)} \tag{2.43}$$

$$\boxed{G_V=\frac{GW_A^3}{U^2}} \tag{2.44}$$

Onde:

G_V – Parâmetro de viscosidade adimensional.

2.5.3.2.3 Isoviscoso elástico

Nesse regime, as deformações elásticas de superfícies de contato tem uma contribuição considerável para a espessura do filme gerado. As pressões no filme são baixas para aumentar a viscosidade do lubrificante ou a viscosidade do lubrificante é relativamente insensível à pressão. A espessura de filme é dada pelas fórmulas 2.45 a 2.47.

$$\boxed{\hat{H}_{min}=8{,}70\,G_E^{0{,}67}\left(1-0{,}85\,e^{-0{,}31k}\right)} \tag{2.45}$$

$$\boxed{\hat{H}_C=11{,}15\,G_E^{0{,}67}\left(1-0{,}72\,e^{-0{,}28k}\right)} \tag{2.46}$$

$$G_E = \frac{W^{\frac{8}{3}}}{U^2} \tag{2.47}$$

Onde:

G_E – parâmetro de elasticidade adimensional.

2.5.3.2.4 Piezoviscoso Elástico

Nesse regime, a espessura do filme é controlada pela ação combinada da deformação elástica na superfície e a elevação da viscosidade do lubrificante. A espessura de filme é dada pelas fórmulas 2.48 a 2.49.

$$\hat{H}_{min} = 3{,}42\, G_V^{0{,}49}\, G_E^{0{,}17} \left(1 - e^{-0{,}68k}\right) \tag{2.48}$$

$$\hat{H}_C = 3{,}61\, G_V^{0{,}53}\, G_E^{0{,}13} \left(1 - 0{,}61\, e^{-0{,}73k}\right) \tag{2.49}$$

2.5.3.3 Efeito da rugosidade em lubrificação EHL

Em 2015 Masjedi e Khonsari (58) apresentaram modificações no modelo EHL para incluir efeitos da rugosidade no cálculo de espessura de filme. Um modelo numérico para contato elíptico levou em consideração a equação modificada de Reynolds, a deformação elástica das superfícies e o contato elasto-plástico das asperezas para determinar as espessuras de filme central e mínima, assim como a razão de carga das asperezas.

Para determinar os valores de espessura de filme foram utilizadas como parâmetros de entrada as equações de Hamrock e Dowson modificadas como mostrado nas expressões 2.50 e 2.51.

$$\left(H_C\right)_{liso} = \frac{\left(h_C\right)_{liso}}{R'} = 3{,}672\, W_A^{-0{,}045k^{0{,}18}}\, U^{0{,}663\,k^{0{,}025}}\, G^{0{,}502k^{0{,}064}} \left(1 - 0{,}573\, e^{-0{,}74k}\right) \tag{2.50}$$

$$\left(H_{min}\right)_{liso} = \frac{\left(h_{min}\right)_{liso}}{R'} = 1{,}637\, W_A^{-0{,}09\,k^{-0{,}15}}\, U^{0{,}711\,k^{-0{,}023}}\, G^{0{,}65\,k^{-0{,}045}} \left(1 - 0{,}974\, e^{-0{,}676k}\right) \tag{2.51}$$

Onde:

$(h_C)_{liso}$ – espessura de filme no centro do contato sem considerar a rugosidade (m);

$(h_{min})_{liso}$ – espessura de filme mínima sem considerar a rugosidade (m);

$(H_C)_{liso}$ – espessura de filme no centro do contato adimensional sem considerar a rugosidade;

$(H_{min})_{liso}$ – espessura de filme mínima adimensional sem considerar a rugosidade;

A partir dessas expressões e de outros parâmetros listados abaixo, foi possível determinar as equações nas expressões 2.52 a 2.55.

$$H_C = \frac{h_C}{R'} = (H_C)_{liso} \times \left(1 + 0{,}025\,\sigma^{-1{,}248} V^{0{,}119} W_A^{-0{,}133} U^{-0{,}884} G^{-0{,}977} k^{0{,}081}\right) \quad (2.52)$$

$$H_{min} = \frac{h_{min}}{R'} = (H_{min})_{liso} \times \left(1 + 0{,}141\,\sigma^{-1{,}073} V^{0{,}149} W_A^{-0{,}044} U^{-0{,}828} G^{-0{,}954} k^{-0{,}395}\right) \quad (2.53)$$

$$L_a = 10\, W_A^{-0{,}083} U^{0{,}143} G^{0{,}314} \left[\ln\left(1 + \sigma^{-4{,}689} V^{0{,}509} W_A^{-0{,}501} U^{-2{,}90} G^{-2{,}870}\right)\right] \quad (2.54)$$

$$V = \frac{H_V}{E'} \quad (2.55)$$

Onde:

h_C – espessura de filme no centro do contato (m);

h_{min} – espessura de filme mínima (m);

H_C – espessura de filme no centro do contato adimensional;

H_{min} – espessura de filme mínima adimensional;

L_a – razão de carga de aspereza;

σ – Desvio padrão das alturas das superfícies (m);

V – dureza adimensional;

H_V – Dureza Vickers (Pa);

Segundo os autores os valores obtidos quando comparados com simulações numéricas, mostram um erro na casa de 2 %.

2.5.4 Regime de lubrificação misto

Em 2000 Xu e Kato (15) tentaram explicar os valores de coeficiente de atrito em cerâmicas a base de silício por uma combinação entre o regime hidrodinâmico e o regime limítrofe; em sua hipótese o regime de lubrificação hidrodinâmico não era suficiente para manter a sustentação do sistema, cabendo a uma camada de baixa tensão de cisalhamento (no caso deste trabalho seria o hidróxido de alumínio formado por reação triboquímica) a complementação dessa sustentação. A partir dessas premissas os autores deduziram as expressões 2.56 a 2.61 para análise de espessura de filme e de coeficiente de atrito.

$$(1-\alpha)W = C_W\left(\frac{\eta u D^3}{h_0^2}\right) \tag{2.56}$$

$$\alpha = \frac{W_b}{W} = \frac{W_b}{W_b + W_h} \tag{2.57}$$

$$C_W = \frac{6}{(m-1)^2}\left[\ln m - \frac{2(m-1)}{m+1}\right] \tag{2.58}$$

$$m = \frac{h_1}{h_0} \tag{2.59}$$

Onde:

α – razão de suporte de carga (limítrofe);

W – carga total aplicada (N);

W_b – carga suportada pela lubrificação limítrofe (N);

W_h – carga suportada pela lubrificação hidrodinâmica (N);

η – viscosidade do lubrificante (Pa.s);

u – velocidade da superfície (m/s);

D – diâmetro da calota (m);

h_0 – espessura de filme mínima (m);

h_1 – espessura de filme na entrada (m).

Para análise de coeficiente de atrito foram utilizadas as expressões 2.60 e 2.61, onde uma parte da expressão 2.60 representa a sustentação hidrodinâmica e outra parte representa a sustentação da camada limítrofe.

A porcentagem de efeito limítrofe no valor do coeficiente de atrito depende do parâmetro α, ou seja, com α = 0,1 temos 10% do efeito de sustentação causado pela camada e 90% causado pela lubrificação hidrodinâmica, com α = 0,9 temos 90 % do efeito de sustentação causado pela camada e 10% causado pela lubrificação hidrodinâmica.

$$\mu=(1-\alpha)\left(\frac{C_{Fo}}{\sqrt{C_W}}\right)\sqrt{\frac{\eta u D}{W}}+\frac{\alpha S}{H} \tag{2.60}$$

$$C_{Fo}=\frac{4\cdot\ln m}{m-1}-\frac{6}{m+1} \tag{2.61}$$

Onde:

μ – coeficiente de atrito;

S – tensão de cisalhamento na camada limítrofe (Pa);

H – Dureza do substrato (Pa).

2.5.5 Efeito da rugosidade nos regimes de lubrificação

Quando se avalia a espessura de filme nos regimes de lubrificação assume-se que as superfícies são lisas, ou seja, sem rugosidade ou asperezas. Na prática, no entanto, as superfícies são rugosas. Se as asperezas de superfície são da mesma altura ou maiores que a espessura de filme formada não há nenhuma separação entre as superfícies.

A variação da espessura de filme em função da rugosidade da superfície foi melhor caracterizada por um parâmetro proposto por Tallian (3), onde a relação da espessura mínima de filme com a rugosidade combinada das duas superfícies em contato é definido pela expressão 2.62.

$$\Lambda=\frac{h_0}{\left(S_{qA}^2+S_{qB}^2\right)^{0,5}} \tag{2.62}$$

Onde:

h_0 – espessura mínima de filme (m);

S_{qA} – rugosidade quadrática média do corpo A (m);

S_{qB} – rugosidade quadrática média do corpo B (m);

Λ – parâmetro que caracteriza a razão entre a espessura mínima de filme e a rugosidade composta da superfície.

A partir dos valores de Λ foi possível estabelecer as seguintes relações (3):

a) Λ < 1 - deformação na superfície acompanhada de desgaste excessivo;
b) 1 < Λ < 1,5 – fragmentação da superfície e presume-se que a rugosidade original da superfície foi suprimida pela extrema deformação plástica das asperezas;
c) 1,5 < Λ < 3 – alguns debris podem ocorrer, no entanto, isso não prejudicará o deslizamento ou resultar em corrosão;
d) 3 < Λ < 4 – desgaste mínimo pode ser esperado sem debris;
e) Λ > 4 – separação das superfícies é completa por uma película de filme lubrificante.

Este parâmetro foi utilizado neste trabalho como critério para avaliar as separações entre as superfícies em todos os regimes de lubrificação.

2.6 Temperatura Flash em contato circular

A temperatura do contato da superfície tem um forte efeito sobre os regimes de lubrificação. As temperaturas elevadas diminuem a viscosidade do lubrificante e geralmente diminuem o coeficiente de pressão-viscosidade 'α_{PV}'. Apesar de atuar localmente na temperatura, uma redução em qualquer um destes parâmetros reduzirá a espessura de filme aumentando ou criando contato entre as superfícies. Temperaturas excessivamente elevadas também podem interferir com alguns mecanismos auxiliares de lubrificação como por exemplo a ativação de reações triboquímicas.

As temperaturas nas interfaces entre os sólidos em contato e em movimento são conhecidas como “temperatura de conjunção de superfície”(3). É possível calcular esta temperatura aplicando as leis de conservação de energia e

transferência de calor, pois a maior parte da energia dissipada durante o processo de atrito é convertida em calor, resultando em um aumento significativo da temperatura da superfície local.

Uma variável adimensional da velocidade na qual a “fonte de calor” se move através da superfície é denominada número de Peclet (L_P) e foi introduzida como um critério que permite a diferenciação entre vários regimes. O número de Peclet é um indicador da penetração de calor no sólido em contato, isto é, descreve se existe tempo suficiente para a distribuição da temperatura superficial do contato difundir no sólido estacionário. Um número de Peclet mais elevado indica uma velocidade de transferência de calor superficial mais elevada para características de material constantes. A seguir estão listados valores para o número de Peclet e suas características.

a) Quando $L_P < 0{,}1$ uma superfície se move muito lentamente em relação à outra. Existe tempo suficiente para que a distribuição de temperatura do contato seja estabelecida no corpo estacionário. Neste caso, a situação aproxima-se da condução em estado estacionário (3),

b) Quando $0{,}1 < L_P < 5$ uma superfície move-se mais rapidamente com respeito à outra e um modelo de transferência lenta de calor é assumido.

c) Quando $L_P > 5$ uma superfície se move rapidamente em relação à outra e um sistema para uma fonte de calor em movimento rápido é modelado. Não há tempo suficiente para que a distribuição da temperatura do contato seja estabelecida no corpo estacionário e as Equações de difusão de calor linear normal à superfície são aplicadas(3). A profundidade ao qual o calor penetra no corpo estacionário é muito pequena em comparação com as dimensões de contato.

O número de Peclet é apresentado na expressão 2.63 e 2.64.

$$L_P = \frac{u\,a}{2\,\chi} \tag{2.63}$$

$$\chi = \frac{K_T}{\rho\,\sigma_A} \tag{2.64}$$

Onde:

L_P – é o número de Peclet;

u – velocidade (m/s);

a – dimensão do contato (m);

χ - difusividade térmica (m²/s);

K_T – condutividade térmica (W/mK);

ρ – densidade (kg/m³);

σ_A – calor específico (J/kgK).

Para desenvolver as fórmulas de temperatura instantânea na superfície para um contato circular, assumiu-se que a porção da superfície em contato é aproximadamente igual ao raio de contato a. A geometria do contato é mostrada na Figura 2.15.

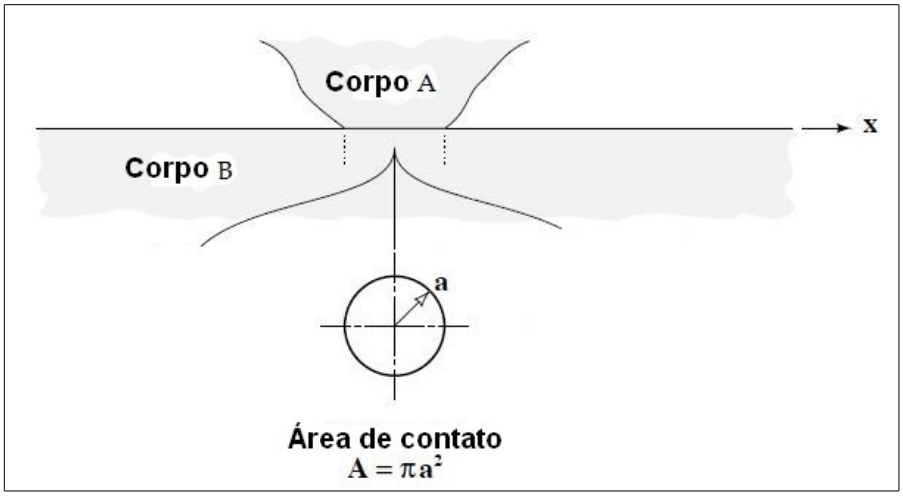

Figura 2.15 – Geometria de contato circular. Fonte: adaptado de (3)

As fórmulas para o cálculo da temperatura flash média e máxima para contatos circulares em várias faixas de velocidade estão resumidas nas equações 2.65 a 2.74.

L_P < 0,1

$$T_{fa}=0{,}5\,N\,L_P=\frac{\pi\,q\,a}{4\,K_T}=0{,}25\,\frac{\mu\,W\,|U_A-U_B|}{K_T\,a} \tag{2.65}$$

$$T_{fmax}=0{,}25\,N'\,L'=0{,}222\,\frac{\mu\,U}{K_T}\,(p_y\,W)^{0{,}5} \tag{2.66}$$

0,1 < L_P < 5

$$T_{fa}=0{,}5\,\alpha\,N\,L_P=\alpha_1\frac{\pi q a}{4K_T}=0{,}25\,\alpha_1\frac{\mu W|U_A-U_B|}{K_T a} \tag{2.67}$$

$$T_{fmax}=0{,}25\,\beta_1 N'L'=0{,}222\,\beta_1\frac{\mu U}{K_T}(p_y W)^{0{,}5} \tag{2.68}$$

L_P > 5

$$T_{fa}=0{,}435\,N\,L_P^{0{,}5}=\frac{\pi q}{3{,}251\,K_T}\left(\frac{\chi a}{U}\right)^{0{,}5}=0{,}308\,\frac{\mu W|U_A-U_B|}{K_T a}\left(\frac{\chi}{U a}\right)^{0{,}5} \tag{2.69}$$

$$T_{fmax}=0{,}435\,\gamma_1 N'L'^{0{,}5}=0{,}726\,\gamma_1\mu\,p_y\left(\frac{U}{K_T\rho\sigma}\sqrt{\frac{W}{p_y}}\right)^{0{,}5}=1{,}64\,T_{fa} \tag{2.70}$$

$$N=\frac{\pi q}{\rho\sigma_A u} \tag{2.71}$$

$$q=\frac{Q}{\pi a^2}=\frac{\mu W|u_A-u_B|}{\pi a^2} \tag{2.72}$$

$$L'=\frac{u}{2\chi}\left(\frac{W}{\pi p_y}\right)^{0{,}5} \tag{2.73}$$

$$N'=\frac{\pi\mu p_y}{\rho\sigma_A} \tag{2.74}$$

A tabela 2.4 mostra os valores dos coeficientes α, β, γ em função do número de Peclet.

Tabela 2.4 – Coeficientes para o cálculo da temperatura flash.

Coeficiente	Valor	Número de Peclet
α_1	0,85	0,1
	0,35	5
β_1	0,95	0,1
	0,5	5
γ_1	0,72	5
	0,92	100
	1	>100

Fonte: Adaptado de (3).

Onde:

T_{fa} – temperatura flash média;

T_{fmax} – temperatura flash máxima;

μ – coeficiente de atrito.

W – carga normal aplicada (N);

p_y – limite de escoamento;

u – velocidade;

α_1, β_1, γ_1 – coeficientes;

N, L', N' – Coeficientes;

q – taxa de calor gerado;

Q – Calor gerado (W).

3 Materiais e Métodos

Os procedimentos experimentais foram executados no Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, Laboratório de microscopia eletrônica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, Instituto de Química da Universidade de São Paulo – IQUSP, Laboratórios multiusuários da Universidade Federal do ABC – UFABC, Laboratório de microestrutura e ecoeficiência de materiais (LMEf) do Departamento de Engenharia civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, no Laboratório de Análises Químicas (CquiM) e no laboratório de microscopia do instituto de pesquisas tecnológicas do estado de São Paulo – IPT e no Centro de ciência e tecnologia de materiais (CCTM) do instituto de pesquisas energéticos e nucleares – IPEN.

3.1 Materiais

Para os ensaios tribológicos foi usada a configuração esfera sobre disco, onde foram utilizadas esferas de alumina feitas sob encomenda (Swiss Jewel Company, EUA), as esferas usadas tinham tolerância geométrica grade 10 com o diâmetro de 7/16″ (11,112 mm). Os discos utilizados foram feitos de alumina com diâmetro de 51,8 mm. Foram produzidos com o pó (AKS-3030A, Sumitomo Chemical Co., Japan) ultrapura com 750 ppm de MgO, por Ferreira (6), no Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.

Os discos e as esferas foram caraterizados quanto à densidade, dureza, módulo de elasticidade, tenacidade à fratura e rugosidade.

A sílica pirogênica utilizada foi de fabricação da Degussa, tipo Aerosil® 200, apresenta comportamento hidrofílico, com área específica de 200 ± 25 m^2/g medida pelo método BET, tamanho médio da partícula primaria 12 nm, pureza 99,8% (dados do fabricante).

Para a lubrificação foi utilizada água filtrada, destilada e deionizada.

3.2 Metodologia de ensaios empregada

Para se atingir os objetivos desse trabalho foi proposta, planejada e executada uma série de ensaios que visavam conhecer os mecanismos de lubrificação, atrito e desgaste do par alumina – alumina lubrificado com água e de se obter valores de coeficiente de atrito menores que os relatados na literatura. Visando isolar uma a uma as variáveis apontadas na literatura como responsáveis pelos baixos valores de coeficiente de atrito de pares cerâmicos contendo sílica, foram realizados os seguintes ensaios:

Efeito da adição de modificadores de atrito (sílica coloidal e/ou hidróxido de alumínio – da marca labSinth – e/ou carbeto de silício – tamanho médio de grão de #2000) – Uma vez que em ensaios com cerâmicas a base de silício, uma das possíveis causas para uma diminuição do coeficiente de atrito e do desgaste seria a formação de uma camada rica em sílica coloidal a partir de reações triboquímicas com o nitreto de silício ou carbeto de silício e em ensaios onde há alumina, também há a formação de hidróxidos de alumínio por reação triboquímica. Em ambos os casos as camadas geradas provocariam uma sustentação adicional alterando o regime de lubrificação (lubrificação mista).

Efeito de rugosidade inicial do disco – Uma superfície com rugosidades diferentes pode interferir no tempo de running-in, diminuindo o tempo para se obter uma superfície superpolida, que em alguns casos foi apontada como responsável pelo baixo coeficiente de atrito nos materiais cerâmicos (45).

Efeito da variação de velocidade – A variação de velocidade pode nos dar um *insight* sobre a porção hidrodinâmica do regime de lubrificação desse par.

Efeito da variação de carga – assim como na variação de velocidade a variação de carga pode nos dizer algo sobre o regime de lubrificação.

3.3 Métodos

O esquema abaixo (figura 3.1) mostra a sequência de preparação e caracterização das amostras utilizadas no ensaio.

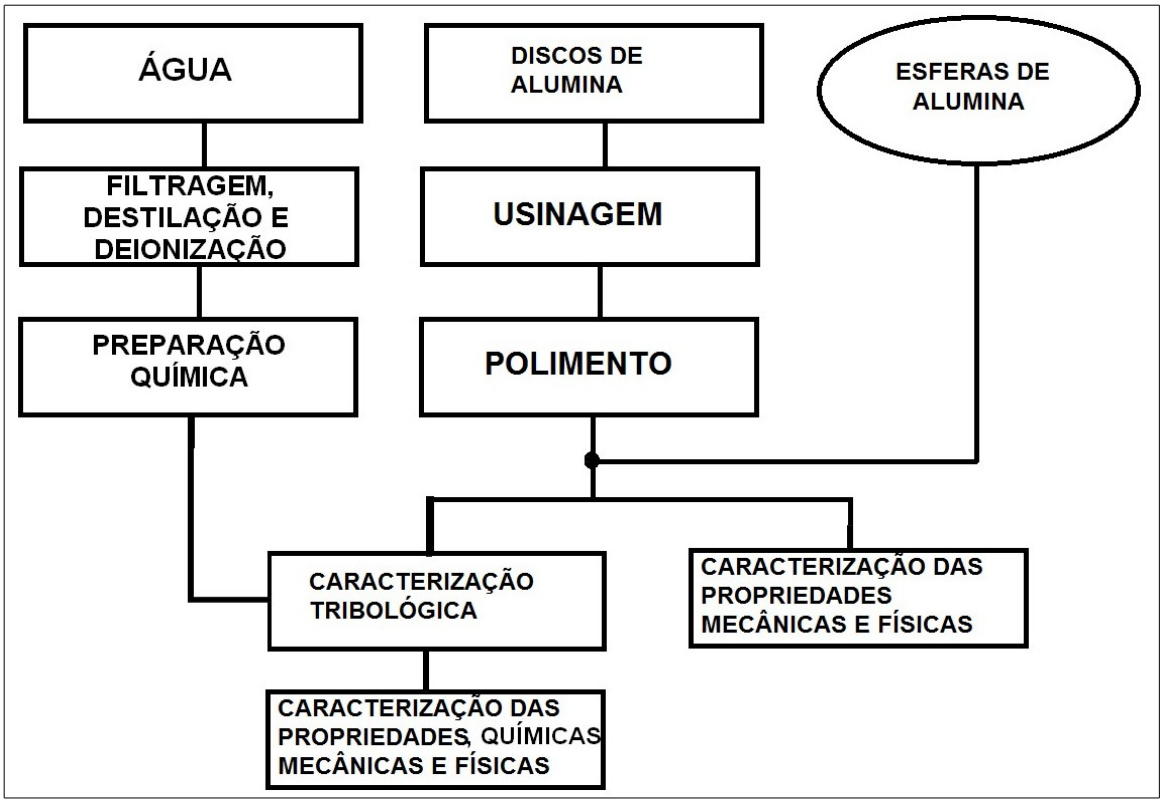

Figura 3.1 – Sequência de preparação e caracterização das amostras. Fonte: Autor.

3.3.1 Usinagem

Como os discos foram reaproveitados de ensaios anteriores, houve a necessidade da retirada das marcas e defeitos deixados pelas trilhas de desgaste, assim como para garantir que os discos encontravam-se com um baixo erro geométrico (paralelismo entre as superfícies). Para tanto foram usinados numa retificadora plana de marca Mello modelo RTP-2. Foi utilizado, para esse trabalho, um rebolo D25 (com tamanho médio de grão de diamante entre 32-52 μm), 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 conseguir um melhor acabamento superficial. Após o processo de retificação, os discos foram lavados com água e detergente neutro. Após a lavagem foram observadas marcas longitudinais no sentido do movimento de rotação do rebolo, nas superfícies dos discos.

3.3.2 Polimento

Para que a superfície apresentasse uma topografia de rugosidade isotrópica foi utilizado um processo de polimento, onde a amostra e o disco de polimento giravam em sentidos opostos. Deste modo os discos já retificados foram polidos numa politriz automática Struers Tegra Pol – 25 e Tegra Force – 5 sobre um disco de cobre metálico e/ou panos de polimento dependendo do tamanho das partículas de diamante, com a adição de lubrificante.

Foram produzidas dois tipos de superfícies com rugosidade quadrática média (Sq) 0,538 ± 0,014 μm e 0,233 ± 0,029 μm, segundo a norma ISO 4287 e ISO 25178 determinadas nos equipamentos rugosímetro Mitutoyo SJ-201P, perfilômetro de contato Kosaka, Surfcorder – 1700α e no perfilômetro óptico Taylor Hobson, CCI-MJ.

Para produção do primeiro tipo de superfície – mais rugosa, aqui descrita como superfície não polida para facilitar o entendimento – foi utilizada suspensão de diamante policristalino com tamanho médio de 15 μm. Para a segunda superfície – menos rugosa, aqui descrita como superfície polida para facilitar o entendimento – além do diamante de 15 μm, foi utilizada suspensão de diamante policristalino com tamanho médio de 9 μm e suspensões de diamante monocristalino com tamanhos médios de 6 μm, 3 μm e 1 μm. As suspensões foram adicionadas ao sistema na forma de spray, em intervalos de 120 segundos e a utilização do lubrificante (álcool etílico) foi em fluxo contínuo.

Na fotografia abaixo (figuras 3.2 e 3.3) foi possível observar a remoção total das marcas deixadas pelo rebolo, restando uma superfície de acabamento isotrópico. Outros dados sobre a superfície inicial dos discos e da esfera são dados nos tópicos 4.3 e 4.4.

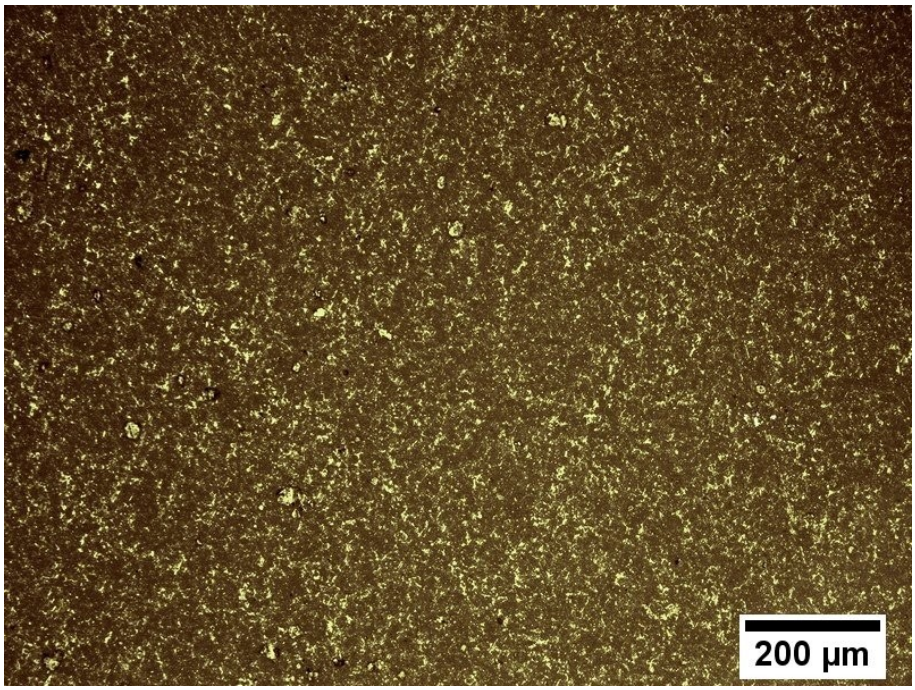

Figura 3.2 – Superfície do disco após processo com suspensão de diamante de 15 µm – disco não polido. Fonte: Autor.

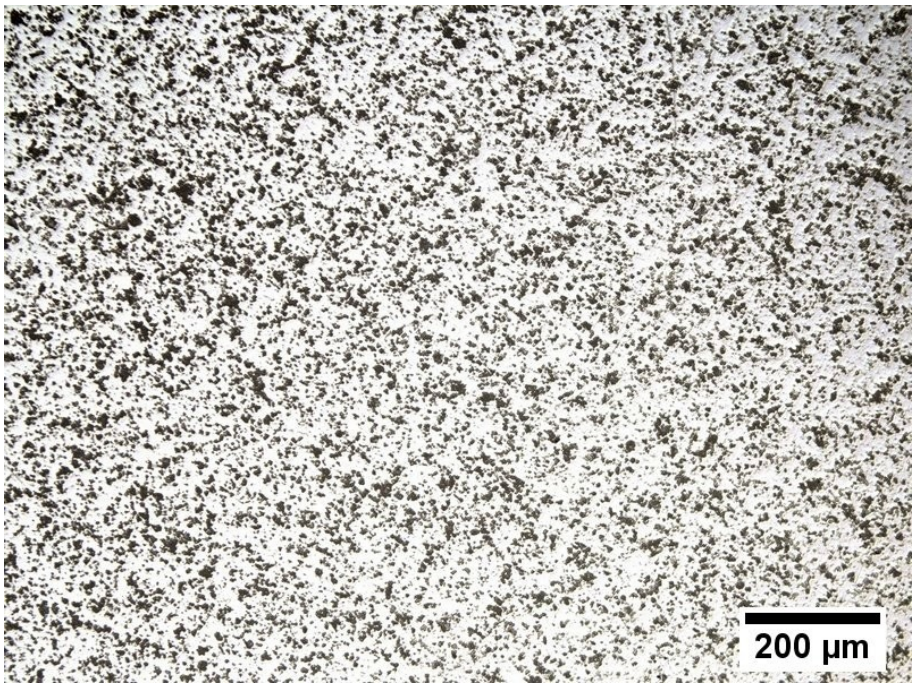

Figura 3.3 – Superfície do disco após processo com suspensão de diamante de 1 µm – disco polido. Fonte: Autor.

Nas tabelas 3.1 e 3.2 estão descritas as variáveis do processo.

Tabela 3.1 – Variáveis do processo de polimento

Velocidade do disco de cobre	40 rpm
Carga aplicada (pneumática)	15 N
Intervalo de aplicação da suspensão de diamante	120 segundos
Diâmetro do disco de cobre	250 milímetros
Tempo de preparação de cada face	15 minutos
Rugosidade final da superfície (Sq)	0,538 ± 0,014 µm

Fonte: Autor.

Tabela 3.2 – Variáveis do processo de polimento do disco polido.

Processo (tamanho do diamante) (µm)	**9**	**6**	**3**	**1**
Velocidade do disco (rpm)	110	120	150	200
Carga aplicada (pneumática por amostra) (N)	15	15	15	15
Intervalo de aplicação da suspensão de diamante (s)	120	120	120	120
Superfície de polimento (250 mm)	Disco de cobre	Pano de polimento	Pano de polimento	Pano de polimento
Tempo de preparação de cada face (min)	15	30	60	60
Rugosidade final da superfície (Sq) (µm)			0,233 ± 0,029	

Fonte: Autor.

3.3.3 Caracterização das Propriedades Físicas, químicas e mecânicas

Para a determinação das propriedades mecânicas, as amostras foram cortadas (ISOMET 5000 com disco de corte 15 LC marca Buehler) e embutidas em baquelite (Simplimet 3000 marca Buehler); em seguida foram polidas com suspensão de diamante em ordem decrescente de tamanho médio de grão 15, 9, 6, 3, 1 µm, respectivamente. Para a determinação da densidade nenhuma preparação especial precisou ser feita nas amostras.

3.3.3.1 Determinação das Densidades

De maneira geral, a densidade de materiais de geometria regular é medida pelo método geométrico que consiste na razão entre a massa e o volume das amostras.

No caso de materiais porosos, como os materiais cerâmicos, um método mais eficiente para a determinação da densidade deve ser utilizado.

O método de Arquimedes (287 a.C. - 212 a.C.), que utiliza os princípios do empuxo e da hidrostática, não é afetado por fatores como porosidade e geometria irregular para determinar a densidade, determinando valores mais precisos e mais próximos aos valores encontrados nas densidades teóricas dos materiais.

3.3.3.1.1 Método Geométrico

As densidades das esferas e dos discos foram medidas pelo método geométrico, portanto, foram escolhidas aleatoriamente 12 esferas e dois discos. Para cada esfera, e para cada disco foi adquirida sua massa numa balança Metller Tolledo AB204 e suas dimensões com um micrômetro Mitutoyo modelo 293-801 e com um paquímetro Mitutoyo modelo CD-8″CX-B, as medidas foram realizadas 6 vezes em posições aleatórias para determinar o erro. Para determinar as densidades geométricas aparentes das amostras, foram utilizadas as equações 3.1, 3.2 e 3.3.

$$\boxed{\rho = \frac{m}{V_C}} \tag{3.1}$$

$$\boxed{V_{Esfera} = \frac{4}{3}\pi d_E^3} \tag{3.2}$$

$$\boxed{V_{Disco} = \pi h_D \left(R_D^2 - r_D^2 \right)} \tag{3.3}$$

Onde:

ρ – densidade do material em kg/m³

m – massa média das amostras em kg;

V_{Esfera} – volume médio das esferas em m³;

V_{Disco} – volume médio dos discos em m³;

V_C – volume de um dos corpos em m³;

d_E – diâmetro médio das esferas medida em m;

h_D – espessura média dos discos medida em m;

R_D – raio externo médio dos discos medido em m;

r_D – raio médio do furo dos discos medido em m.

3.3.3.1.2 Método de Arquimedes

As densidades, a porcentagem de absorção de água e a porosidade aparente das amostras também foram determinadas pelo método de Arquimedes ou gravimétrico (ou densidade aparente) a título de comparação de resultados (59) (60).

Esse método foi tido como mais preciso (em relação ao método geométrico), pois leva em consideração os poros abertos existentes nas amostras, e não depende da geometria do corpo de prova. Como o método não considera os poros fechados ainda pode existir algumas imprecisões quanto ao resultado real.

Para o ensaio foi escolhida uma esfera de alumina e um fragmento de um dos discos de alumina. As amostras foram secas a uma temperatura de 45°C por 48 horas e pesadas numa balança analítica Metller Tolledo AB204 com precisão de 0,0001 g (determinação da massa seca m_s). Em seguida, as amostras foram mergulhadas em água e aquecidas até o ponto de ebulição da água, permanecendo nessa temperatura por aproximadamente uma hora, para eliminação do restante do ar remanescente nos poros do material. O próximo passo foi a determinação da massa aparente ou massa imersa do material (m_i) através do aparato da figura 3.4, onde a massa da amostra suspensa e mergulhada em foi medida.

Figura 3.4 – Aparato utilizado para determinação da massa aparente. Fonte: Autor.

A determinação da massa úmida (m_u) foi feita após a retirada do material da

água. A amostra foi suspensa e a água que escorreu de sua superfície foi seca por um pano úmido. Neste caso supõe-se que toda a água nos poros abertos permaneceu lá.

Para a determinação da densidade foi utilizada a equação 3.4 (59) (60).

$$\rho_C = \frac{m_s}{m_u - m_i} \rho_L \tag{3.4}$$

Onde:

ρ_C – Densidade do corpo;

ρ_L – Densidade do líquido;

m_S – Massa seca;

m_u – Massa úmida;

m_i – Massa imersa.

A densidade do líquido (água) foi obtido da tabela 2.2.

Para determinação da porcentagem de absorção de água foi utilizada a equação (3.5).

$$AA = \frac{m_U - m_S}{m_S} \cdot 100 \tag{3.5}$$

Onde:

AA – porcentagem de absorção de água

Para determinação da porcentagem de porosidade aparente foi utilizada a equação (3.6).

$$PA = \frac{m_U - m_S}{m_U - m_I} \cdot 100 \tag{3.6}$$

Onde:

PA – porcentagem de porosidade aparente

3.3.3.2 Dureza

3.3.3.2.1 Dureza Vickers

A dureza dos materiais na escala Vickers foi determinada segundo a norma ASTM C1327 – 15 (*Standard Test Method for Vickers Indentation Hardness of Advanced Ceramics)*, onde um penetrador piramidal de diamante foi comprimido

contra o material com uma força P. A dureza foi determinada pela relação da força aplicada e a área de impressão dada pelas medidas das diagonais da impressão. A impressão, quando vista ao microscópio óptico, tem a geometria de um losango retangular de diagonal d, como mostrado na figura 3.5. A dureza Vickers (HV) foi dada pelo quociente da carga P pela área de contato, segundo as equações 3.7 e 3.8 (61).

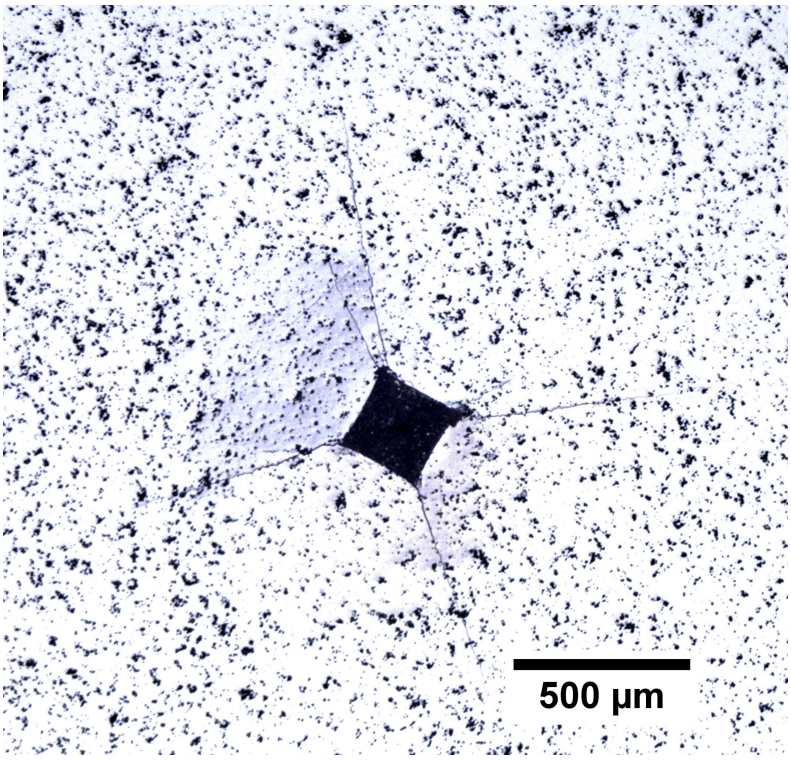

Figura 3.5 – Exemplo de uma impressão Vickers (Disco de Alumina, carga 50 kgf). Fonte: Autor.

$$d_M = \frac{d_1 + d_2}{2} \tag{3.7}$$

$$H_V = \frac{2 \cdot P \cdot sen\left(\frac{136°}{2}\right) \cdot (0{,}009807)}{d_M^2} = \frac{0{,}01819 \cdot P}{d_M^2} \tag{3.8}$$

Onde:

H_V – dureza Vickers dada em (GPa);

P – carga aplicada dada em (N);

d_M – média das diagonais, d_1 e d2 dadas em (m).

As medidas foram realizadas 5 vezes em cada amostra, ou seja, 5

impressões foram realizadas, utilizando um macrodurômetro Buehler modelo 1900-2100. Foram utilizados carregamentos de 1, 5, 10, 20, 30 e 50 kgf com manutenção de cada carregamento por 20 segundos.

3.3.3.2.2 Dureza Rockwell C

O ensaio Rocwell C utiliza a profundidade de penetração, sob uma carga constante, como medida de dureza. Utiliza um penetrador cônico de diamante com 120º e carga de 150 kgf (61). As medidas foram realizadas 5 vezes em cada amostra, utilizando um macrodurômetro Buehler modelo 1900-2100.

3.3.3.3 Tenacidade à fratura

Uma das formas de calcular a tenacidade à fratura é com base nas impressões do ensaio de dureza Vickers. Foram feitas 10 impressões, utilizando um macrodurômetro Buehler modelo 1900-2100 com carga de 30 kgf ou 50 kgf de modo que fosse possível observar as trincas. Foi respeitado o critério de que as trincas tivessem, pelo menos, duas vezes e meia o comprimento da diagonal da impressão (62). Para a determinação do K_{IC}, tomou-se a média dos comprimentos das trincas e foi aplicado a equação abaixo (3.9), segunda a norma JIS R 1607 (*testing methods for fracture toughness of fine ceramics at room temperature*) de 1995.

Um exemplo de trinca pode ser visto na figura 3.5.

$$K_{IC} = 0{,}018 \left(\frac{E}{H_V} \right)^{1/2} \frac{P}{c^{3/2}} \qquad (3.9)$$

Onde:

K_{IC} – tenacidade à fratura dada em ($Pa.m^{1/2}$);

c – comprimento médio da trinca dado em (m);

E – módulo de elasticidade dado em (Pa);

H_V – dureza Vickers dada em (Pa).

P –acarga da endentação (N).

3.3.3.4 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade foi determinado pela curva de carregamento e descarregamento num ensaio de dureza.

O módulo de elasticidade e a microdureza foram obtidos em superfícies selecionadas, com o uso de um nanoendentador modelo TI-950 Triboindenter marca Hisitron, que permite o uso de uma carga máxima de 2 N com um penetrador tipo Berkovich.

A figura 3.6 mostra as microendentações feitas no disco para obtenção do módulo de elasticidade e microdureza. Foi utilizada uma carga de 10 mN em uma parte da superfície livre de porosidade e com a menor interferência possível dos riscos gerados no polimento, a fim de não afetar as medidas. Devido o fato de as microendentações não considerarem os poros, os contornos de grão os riscos gerados no polimento, entre outros, os valores de microdureza tendem a ser maiores que os valores de macrodureza.

O módulo de elasticidade foi obtido por meio da curva carga em função da profundidade. A figura 3.7 apresenta uma curva típica, onde uma reta foi traçada tangente a curva de descarregamento passando pelo ponto da máxima carga, cujo coeficiente angular (S) é chamado rigidez e se relaciona com o módulo elástico do sistema (E_r) por meio da equação (3.10), a A é área de impressão. O módulo elástico (E) do material é obtido em função do seu coeficiente de Poisson (ν) e do módulo elástico e do coeficiente de Poisson do penetrador, (E_p) e (ν_p), respectivamente, por meio da equação (3.11).

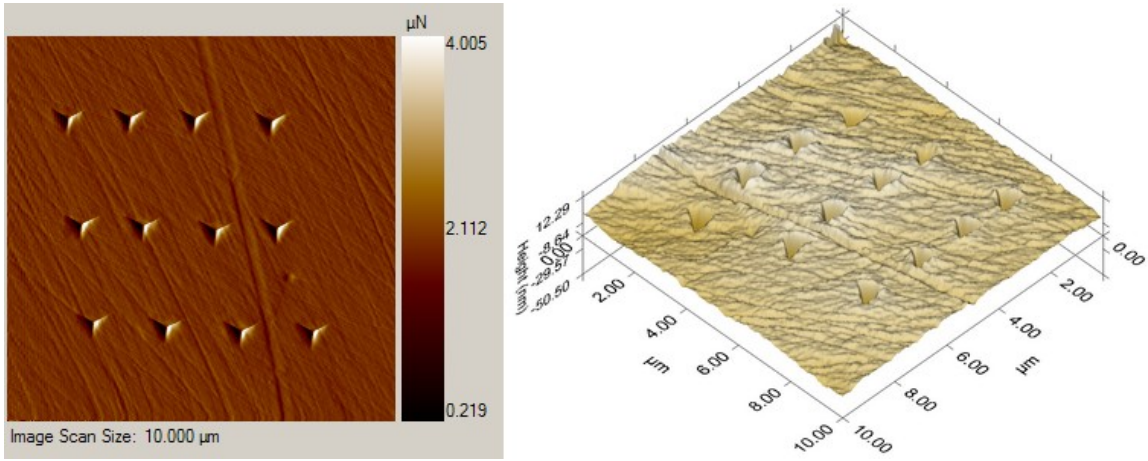

Figura 3.6 – Representação gerada a partir das microdurezas realizadas no disco. Fonte: Autor.

$$E_r = \sqrt{\frac{\pi}{A}} \cdot \frac{S}{2} \tag{3.10}$$

$$\frac{1}{E_r} = \frac{(1-\nu^2)}{E} + \frac{(1-\nu_p^2)}{E_p} \tag{3.11}$$

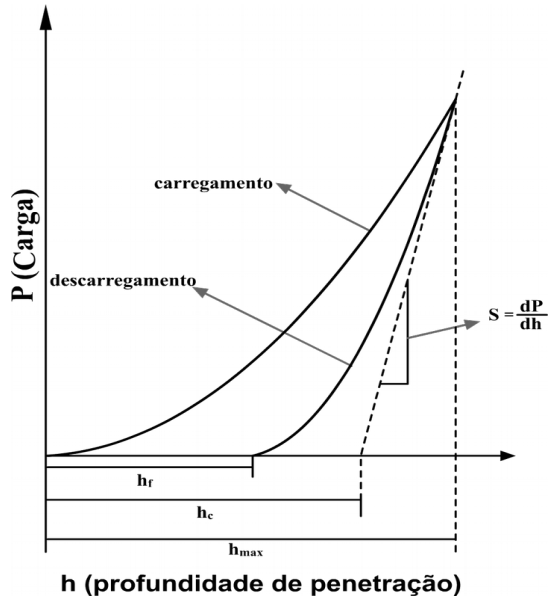

Figura 3.7 – Curva típica de obtida no ensaio de microdureza na determinação do módulo de elasticidade. Fonte: adaptado de (7).

3.3.3.5 Microestrutura inicial e tamanho de grão

A microestrutura inicial (imagens, tamanho e distribuição dos grãos) das amostras foi obtida empregando-se de microscopia óptica confocal (Microscópio confocal a laser Olympus OLS 4100) após um ataque térmico a 1400°C por 15 minutos (Forno Fortelab FE 1700).

Para determinação do tamanho de grão foi utilizado o método planimétrico segundo a norma ASTM E112 (*Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*), onde obtêm-se o número de grãos dentro de uma área conhecida, sejam eles totalmente incluídos ou parcialmente incluídos dentro dessa área. A partir desse número de grãos e do valor da área, aplicam-se as fórmulas (3.12 a 3.14).

$$N_A = \frac{N_{interno} + \frac{N_{interceptado}}{2}}{A_T} \tag{3.12}$$

$$A_G = \frac{A_T}{N_{interno} + \frac{N_{interceptado}}{2}} \tag{3.13}$$

$$D_G = 2 \cdot \sqrt{\frac{A_G}{\pi}} \tag{3.14}$$

Onde:

N_A – número de grãos por área;

$N_{interno}$ – número de grãos totalmente incluídos na área analisada;

$N_{interceptado}$ – número de grãos parcialmente incluídos na área analisada;

A_T – área analisada;

A_G – Área média de um grão;

D_G – Diâmetro médio de um grão.

3.3.3.6 Porosidade inicial e após os ensaios

A partir de 10 microfotografias obtidas através de microscopia óptica com 5 aumentos diferentes (duas com cada aumento) das esferas e dos discos foi possível estimar a porosidade em porcentagem de área com auxílio do software analisador de imagem, Imaje J (63).

A figura 3.8 mostra um exemplo de imagem obtida para realização do cálculo de porosidade. Em a) temos a superfície original após o ensaio com poros. Em b) temos a superfície com a marcação feita pelo software para cálculo da porcentagem superficial de poros.

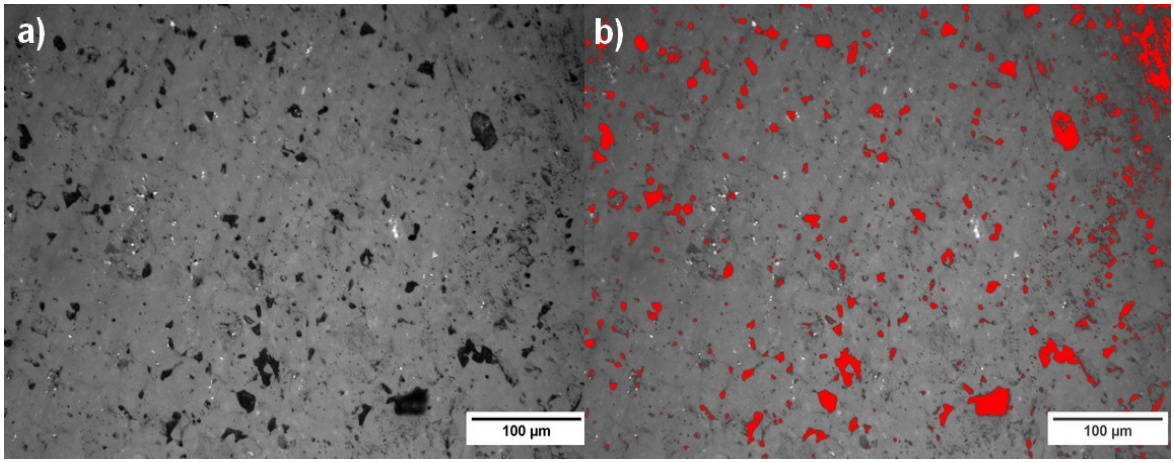

Figura 3.8 – Microfotografias das esferas utilizadas para determinar a porosidade. Fonte: Autor.

Após os ensaios, foi realizada a mesma análise nas trilhas de desgaste e superfície desgastada das esferas para comparação.

3.3.3.7 Análise por espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES)

ICP-AES (Inductively Coupled Plasma – Atomic Emission Spectrometry), em português Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente, é uma técnica de análise que faz uso de uma fonte de excitação de plasma de argônio à alta temperatura (7.000 – 10.000 K) para produzir, em uma amostra introduzida sob forma de neblina no centro do plasma, átomos excitados que emitem radiação em comprimentos de onda na faixa de 125 a 950 nm, característicos dos elementos nela presentes.

As radiações emitidas, após conveniente separação de seus comprimentos de onda por sistemas ópticos, têm suas intensidades respectivas medidas por meios de detectores de radiação específicos e correlacionadas às concentrações correspondentes através de curvas de calibração obtidas pela medição prévia de Padrões Certificados de Referência.

Esta técnica foi utilizada para determinar destrutivamente em baixas concentrações alguns metais presentes na água que poderiam influenciar os regimes de lubrificação e desgaste.

3.3.3.8 Análise de absorbância da água.

A absorbância é a capacidade dos materiais em absorver radiações em uma frequência específica. Usualmente, tal propriedade é empregada na análise de soluções.

A absorbância A é dada pela expressão 3.15 onde I é a intensidade da luz com um comprimento de onda específico λ e que é passada por uma amostra (intensidade da luz transmitida) e I_0 é a intensidade da luz antes que entre na amostra (intensidade da luz incidente).

$$A_\lambda = -\log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right) \tag{3.15}$$

As medidas de absorbância e transmitância são frequentemente usadas, uma vez que a absorbância é proporcional à espessura de uma amostra e a concentração de uma substância contida nesta, por sua vez a transmitância $\left(\frac{I}{I_0}\right)$, varia exponencialmente com a espessura e a concentração (64).

A análise de absorbância foi utilizada para determinar se após os ensaios houve uma deposição significativa de resíduos (debris) na água.

3.3.3.9 Análise de molhabilidade através do experimento de gota séssil

Dentre o estudo de coloides, muito se destaca a medição do ângulo de molhabilidade entre uma gota do líquido e a superfície no qual ela repousa. Este ângulo foi definido como o ângulo entre um plano tangente a uma gota do líquido e um plano contendo a superfície onde o líquido se encontra depositado como mostrado na figura 3.9. Logo, a molhabilidade de uma superfície depende do equilíbrio termodinâmico entre este sistema de três interfaces: sólido, líquido e vapor(65).

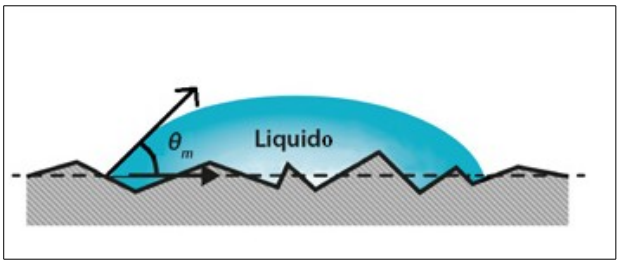

Figura 3.9 – ângulo de molhabilidade em uma superfície. Fonte: adaptado de (66).

Quanto menor o ângulo de espalhamento ou ângulo de molhabilidade (θ_m) maior será a coesão entre o líquido e a superfície do sólido fazendo com que, por exemplo, em um ensaio tribológico o lubrificante seja acondicionado nos poros do material e nos vales produzidos pelo processo de acabamento e seja melhor aderido a superfície. Normalmente a relação entre ângulo de molhabilidade e interação entre superfícies com a água é dada por:

a) $\theta_m = 0°$ – Superfície perfeitamente hidrofílica;
b) $0° < \theta_m < 90°$ – Superfície Hidrofílica;
c) $90° \leq \theta_m < 180°$ – Superfície Hidrofóbica;
d) $\theta_m = 180°$ – Superfície perfeitamente Hidrofóbica.

Por se tratar de um ensaio lubrificado com água torna-se extremamente importante saber o comportamento em relação a molhabilidade dos discos e da esfera em contato com água.

Os testes foram realizados com o intuito de verificar se houve alteração da interação das superfícies com a água do ensaio.

O ensaio consiste em colocar uma gota de água em cima das superfícies e determinar o ângulo de contato líquido – sólido a partir de uma linha de referência como mostrado na figura 3.10. Para tanto foi utilizado um Goniômetro (SL200A – KINO). Para realização dos ensaios foi utilizada água deionizada a partir de uma agulha de 4 mm². Foram feitos testes sobre as superfícies não ensaiadas dos discos, uma superfície ensaiada do disco e uma esfera cortada na metade a fim de se obter uma superfície plana.

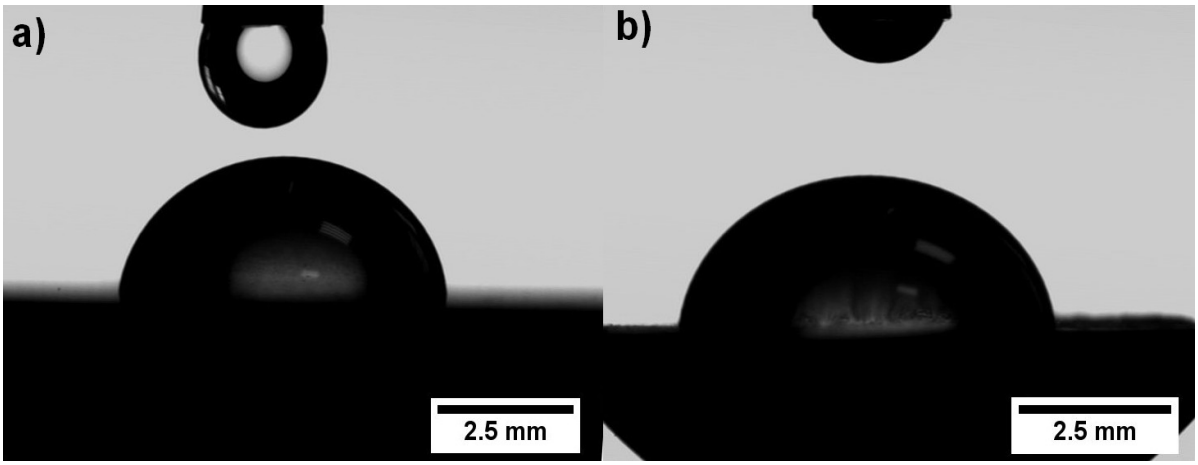

Figura 3.10 – a) foto de uma gota de água sobre o Disco b) foto de uma gota de água sobre a esfera. Fonte: Autor.

3.3.3.10 Parâmetros de Hertz, Hamrock e Dowson

Os parâmetros de contato de Hertz, Hamrock e Dowson foram calculados de acordo com as expressões 2.10 a 2.30, situadas no capítulo revisão bibliográfica.

3.3.3.11 Difração de raios-X

A difratometria de raios-X corresponde a uma das principais técnicas de caracterização microestrutural de materiais cristalinos, encontrando aplicações em diversos campos do conhecimento.

Dado que os comprimentos de onda dos raios-X são aproximadamente iguais às distâncias entre os planos atômicos dos sólidos cristalinos, quando um feixe de raios-X incide em um sólido cristalino ocorre um espalhamento coerente, ou seja, a radiação é absorvida pelo elétron e em seguida reemitida, mantendo suas fases e energias iniciais, havendo apenas uma mudança de trajetória, portanto cada elétron do material funciona como um centro de emissão de raios-X.

Se os átomos do material estiverem arranjados de maneira sistemática, pode-se verificar que as relações de fase entre os espalhamentos tornam-se periódicas e que efeitos da difração podem ser observados em vários ângulos (67)(68).

As condições para que ocorra a difração dependem da diferença de caminho e do comprimento de onda da radiação incidente, que são expressas pela lei de Bragg como mostrado na expressão 3.16.

$$n\lambda = 2\,d\,sen\theta \qquad (3.16)$$

Onde:

d - distância entre planos paralelos de átomos no cristal (nm);

θ – ângulo entre o feixe e o plano de incidência;

λ – comprimento de onda incidente (nm);

n – número inteiro (ordem da difração).

A difração de raios-X foi utilizada para determinar se havia predominância da fase alfa-alumina nos discos e esferas.

Para realização das medidas foi utilizado um Difratômetro de Raios-X D8 Focus, Bruker AXS.

3.3.4 Caracterização tribológica

Os ensaios foram realizados num tribômetro da marca Plint, modelo *Microcontroled TE67 PIN ON DISC MACHINE* na configuração esfera contra disco segundo a norma ASTM G99 (*Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus) e* ASTM G40 *(Standard Terminology Relating to Wear and Erosion)* lubrificados com água filtrada, destilada e deionizada, utilizando uma cuba de aço inoxidável, originalmente construída para realizar o ensaio onde o contato entre os materiais seria submerso. Em todos os ensaios foram utilizados discos de alumina e esferas de alumina. A aquisição de dados foi realizada com software controlador do tribômetro COMPEND 2000.

3.3.4.1 Preparação do tribômetro

Para a realização dos ensaios os discos foram fixados no tribômetro por meio de um parafuso protegido por uma arruela de politetrafluoretileno (PTFE). A água do ensaio permanecia em um recipiente tipo Erlenmeyer de vidro e uma bomba peristáltica mantinha um fluxo constante sobre a superfície do disco através de mangueiras de polietileno e/ou silicone® (polisiloxano), cerca de 12 litros por hora. Foi necessário o emprego desse sistema, uma vez que o pequeno volume da cuba (aproximadamente 120 mL) e o fato da água não circular poderiam dificultar a

homogeneização dos compostos formados e/ou adicionando durante o ensaio. Ao passar pela superfície do disco a água era retida na cuba (modelo TE67/LE Lubricant Enclosure) e retornava ao Erlenmeyer, mantendo um circuito fechado. A esfera, presa a um suporte próprio era pressionada contra o disco em movimento, com uma carga do tipo peso morto, previamente aferida. A força de atrito foi adquirida através de uma célula de carga que suporta uma carga máxima de 5 kgf ± 2%. Os dados foram obtidos por um ADC (Conversor analógico digital) de 12 bits, que nos permite uma resolução máxima de 0,0119 ± 0,0017 N. O gráfico da figura 3.11 mostra o coeficiente de atrito mínimo que o equipamento consegue distinguir em função da carga aplicada (sistema peso morto). A partir da análise do gráfico e desconsiderando os valores negativos, podemos ver que para a menor carga utilizada nesse trabalho (pouco maior que 20 N) o coeficiente de atrito mínimo (mínima resolução possível com esse equipamento) foi de aproximadamente 0,004, substancialmente menor que os valores de coeficiente de atrito obtidos, validando os resultados obtidos. A taxa aquisição de dados para quase todos os ensaios foi a média 100 pontos a cada 10 segundos, totalizando aproximadamente 36000 dados. Para ensaios realizados com duração de 6 a 12 horas a taxa de aquisição foi a média de 10 pontos a cada segundo e em ensaios de uma hora de duração a taxa de aquisição foi de 10 pontos por segundo.

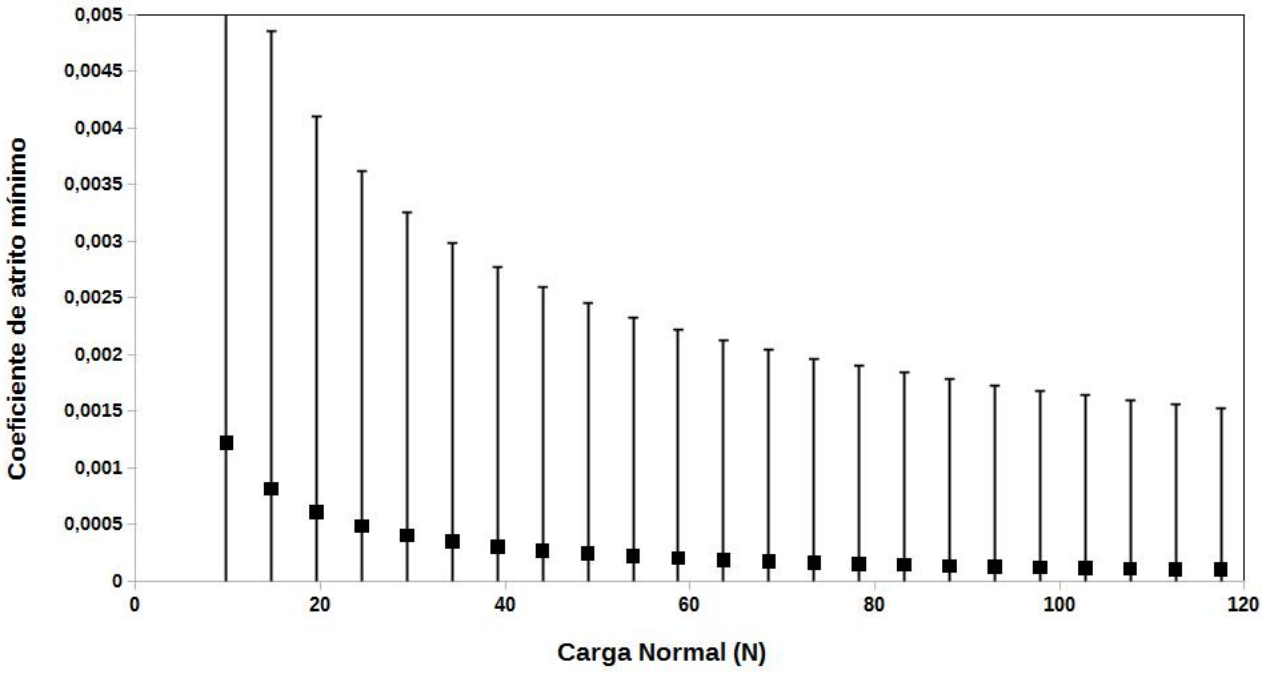

Figura 3.11 – coeficiente de atrito mínimo que o equipamento consegue distinguir em função da carga aplicada (sistema peso morto). Fonte: Autor.

A figura 3.12 mostra imagens da montagem do equipamento. Nas fotos (a) e (c) foi mostrado em destaque a bomba peristáltica e o frasco tipo erlenmeyer de vidro onde ficava armazenada a água. Na foto (b) tem-se em detalhe o peso morto e as mangueiras por onde passavam a água do ensaio. Na foto (d) tem-se um detalhe do cabeçote da máquina com o disco montado.

Na figura 3.13 tem-se uma visão mais detalhada dos porta esferas e das esferas de alumina (a) (b) (e), assim como os discos de alumina (b) (c) (d) (f) e o suporte que acomodava o disco na máquina durante o ensaio (c) (d). Na figura (g) tem-se um detalhe geral da cuba. Na foto (f) tem-se um detalhamento do suporte utilizado para retificação dos discos.

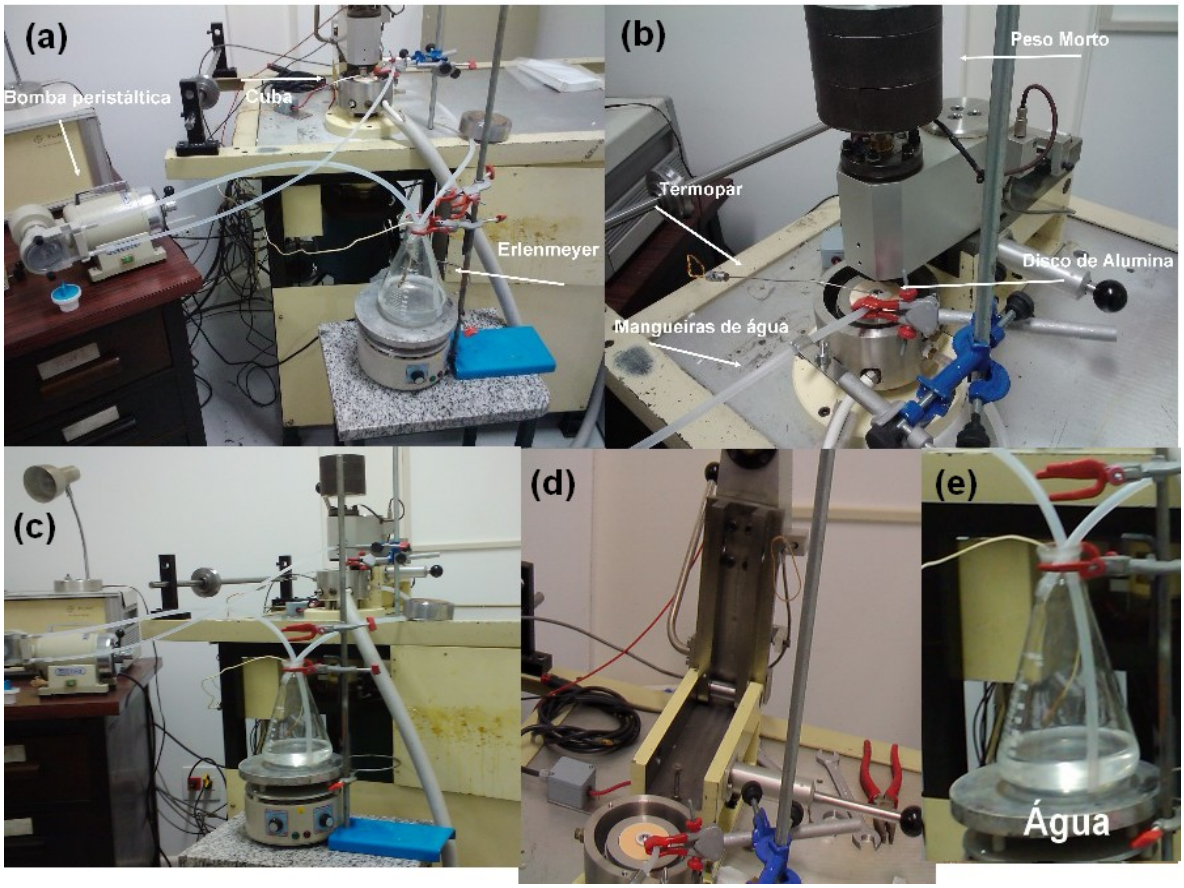

Figura 3.12 – Aparato experimental. Fonte: Autor.

3.3.4.2 Preparação das amostras

Com o intuito de retirar possíveis resíduos do sistema, deixados pelos processos precedentes, os materiais antes de serem montados no tribômetro passaram por um processo de limpeza. Tanto as esferas quanto discos, foram

lavados com esponja e sabão neutro sob água corrente e secos. Em seguida foram realizados banhos ultrassônicos, com as amostras imersas em acetona, por 30 minutos. Após esse procedimento as amostras foram manipuladas sem contato manual.

Figura 3.13 – Detalhes das esferas, dos discos e da cuba, antes da montagem do ensaio.

Fonte: Autor.

3.3.4.3 Preparação da água

Uma vez que a intenção desses ensaios foi estudar o sistema tribológico e verificar a possibilidade da obtenção de um regime baixo coeficiente de atrito no ensaio lubrificado, a preparação da água se torna uma tarefa importante deste trabalho.

Para preparação da água foram utilizados dois filtros (filtro rápido e filtro de carvão ativado marca Quimis), um destilador (tipo pilsen marca Quimis modelo

Q341-25) e um deionizador (com colunas separadas marca Quimis modelo Q380S), posteriormente, a água foi acondicionada em um recipiente de polietileno. Para determinar a condutividade da água foi utilizado um condutivimetro marca Digimed modelo Dm32.

Foram estudados os fluidos água (destilada e deionizada), e aquasol de sílica e/ou carbeto de silício e/ou hidróxido de alumínio.

Em alguns ensaios foi adicionado Hidróxido de sódio (0,1 M) e/ou ácido clorídrico (0,1 M) à solução, para se obter um melhor controle no valor de pH. Para tanto foi utilizado um pH-metro digital Gehaka modelo PG2000 para executar a aferição do valor do pH.

No sistema onde foi adicionado outros compostos, os mesmos foram pesados numa balança Metller Tolledo AB204 e adicionada na água em um béquer e para a quebra dos aglomerados, misturada com um agitador mecânico rotativo (marca Fiston modelo 713 com uma hélice modelo naval feita em aço inoxidável), sob alta rotação(entre 2000 e 3000 rpm) por aproximadamente 25 minutos, seguida de uma verificação do pH do meio.

3.3.4.4 Ensaios preliminares

Primeiramente, foram realizados ensaios para verificar a tendência de queda do coeficiente de atrito no deslizamento lubrificado com água do par Al_2O_3 – Al_2O_3, e também para instituir parâmetros para os demais ensaios.

3.3.4.5 Ensaios tribológicos

Antes de começar o ensaio, o disco foi colocado em rotação e a bomba peristáltica foi ligada, como intuito de retirar o ar no interior das mangueiras e de iniciar o ensaio com a superfície molhada.

O ensaio foi iniciado colocando-se o disco em rotação e esperando a velocidade atingir o patamar pré determinado (velocidade de deslizamento entre 0,10 e 2,00 ± 0,03 m/s). Quando a velocidade se estabilizava, a esfera era colocada em contato com o disco suavemente, evitando o impacto. Em seguida foi adicionada a carga, em forma de peso morto, com valor entre 2,52 kgf e 10,25 kgf, que somado à carga gerada pelos componentes internos da máquina atinge valores entre 24,7 N

e 100,3 N.

Quando não ocorria imprevistos (como interrupção inadvertida de fornecimento de energia) o ensaio ocorria por 360000 segundos. Após esse período o peso morto foi retirado do aparato, a esfera era retirada do contato com o disco e a bomba peristáltica foi desligada nessa ordem.

Para otimização da quantidade de discos utilizados, uma vez que a quantidade foi limitada e a preparação dos mesmos foram demasiadamente demoradas e custosas, foi empregado o uso de três diferentes raios para a trilha de desgaste. Foram utilizados os valores de 15 mm 19 mm e 23 mm.

O ensaio foi registrado em arquivos de microcomputador em padrão ASCII (*American Standard Code for Information Interchange)*, para posterior análise.

3.3.5 Caracterização dos materiais ensaiados

Após os ensaios tribológicos os discos, as esferas e algumas amostras de água foram caracterizados, principalmente com a determinação dos perfis de rugosidade e com a determinação do volume desgastado. A figura 3.14 mostra aspectos típicos dos discos na região da trilha, após ensaio.

3.3.5.1 Determinação dos perfis de rugosidade e de forma

Após os ensaios foram determinados os perfis de rugosidade e alguns parâmetros de rugosidade da trilha formada no disco e das calotas formadas nas esferas. Para isso foi utilizado um rugosímetro Surfcorder SE 1700 α da marca Kosakalab e Taylor Hobson CCI-MJ sem uso de filtros para a aquisição dos dados. Para determinar os parâmetros de rugosidade das superfícies desgastadas foram utilizados os softwares dos equipamentos e os dados foram tratados segundo as normas ISO 4287 (*Geometrical Product Specifications (GPS) -- Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters*) e ISO 25178 (*Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal)*.

Para a análise de rugosidade da superfície foi gerada uma imagem digital das superfícies dos discos e das esferas. Após a obtenção dos dados pelos equipamentos, os valores foram tratados utilizando o software *TalyMap®* (*Digitalsurf*), através das seguintes operações: nivelamento, remoção de forma,

zoom na região de interesse, novo nivelamento, nova remoção de forma, *thresholding* (99,5%-0,5%), filtro gaussiano robusto, obtenção da perfil de isotropia da superfície, obtenção da curva Abbot-Firestone, obtenção dos parâmetros de rugosidade (Sq, Sa, Sk, Spk, Svk, Vv).

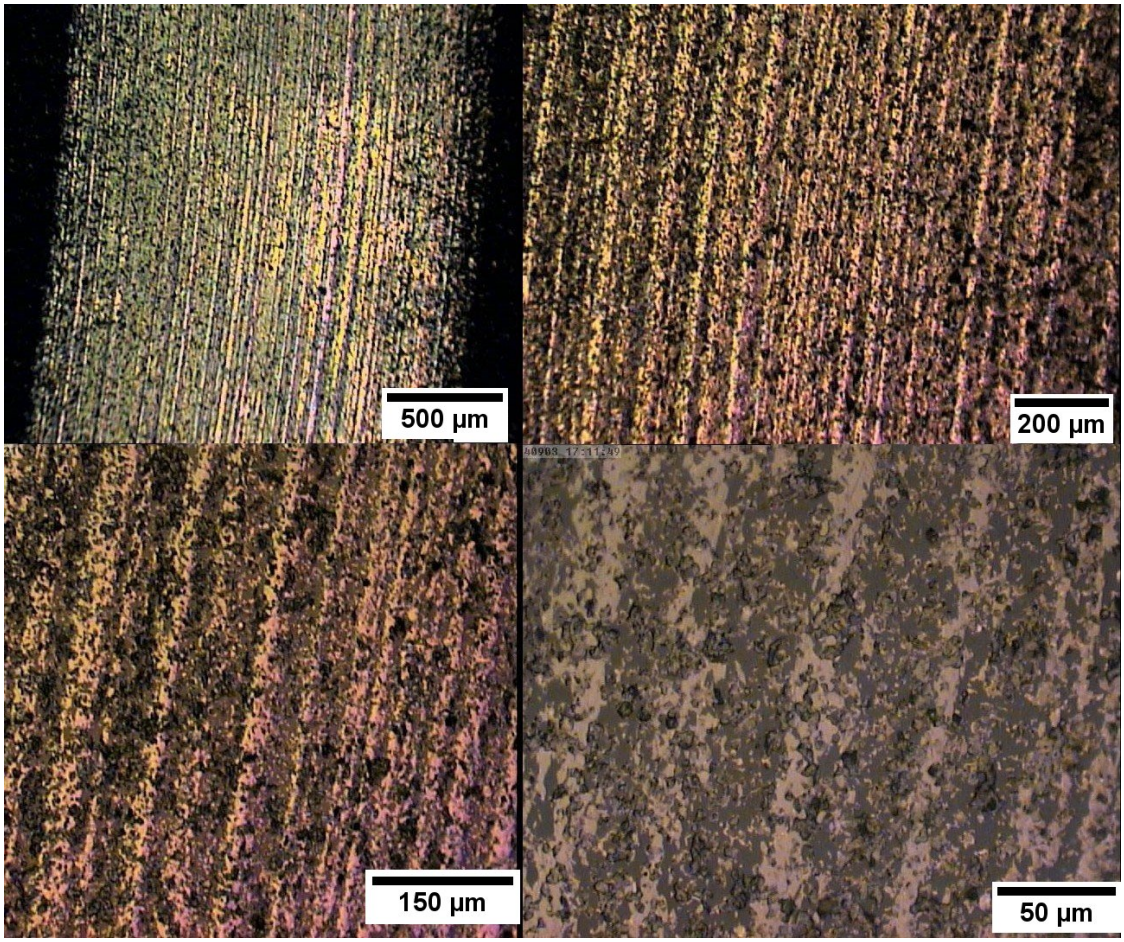

Figura 3.14 – Marcas típicas das trilhas deixadas nos discos pelo deslizamento. Fonte: Autor.

Para o cálculo da rugosidade combinada, foi utilizado o parâmetro Sq a partir da expressão 3.17.

$$S_{comb} = \sqrt{S_{qesf}^2 + S_{qdisco}^2} \tag{3.17}$$

Onde:

S_{comb} é a rugosidade combinada do disco e da esfera (m);

S_{qesf} é a rugosidade quadrática média da esfera (m);

S_{qdisco} é a rugosidade quadrática média do disco (m).

3.3.5.2 Determinação dos diâmetros das calotas formadas nas esferas

Foram feitas imagens das calotas formadas nas esferas em um estereoscópio NIKON SMZ 800 e/ou no microscópio Olympus BX60M, como exemplificado na figura 3.15. O diâmetro das calotas foi determinado por análise de imagem, utilizando o software ImageJ (63). Foram adquiridos 10 valores da área da calota para cada imagem. Com isso foi calculada uma média desses valores de área, e com o valor médio foi determinado o diâmetro da calota pela equação (3.18).

$$D = 2\sqrt{\frac{A_C}{\pi}} \tag{3.18}$$

Onde: D é o diâmetro da calota e A_C é a área da calota.

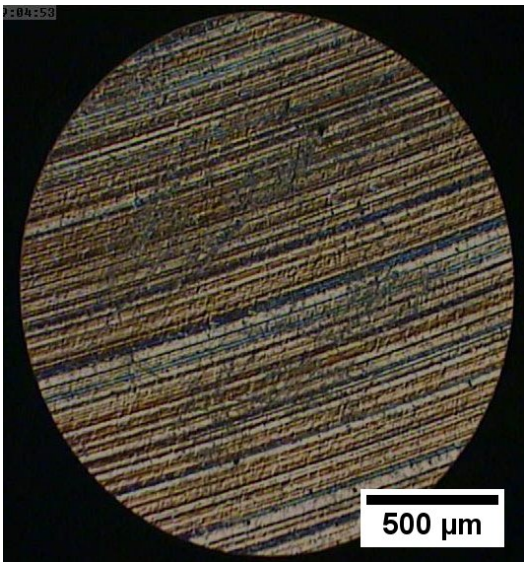

Figura 3.15 – Foto de uma calota típica deixada nas esferas. Fonte: Autor.

3.3.5.3 Determinação do volume desgastado nas amostras

O volume desgastado nas esferas foi calculado segundo a norma ASTM G 99. Com o valor do diâmetro da calota determinado foram utilizadas as equações 3.19 e 3.20:

$$V_E = \frac{\pi\, h_{Esf}}{6}\left(3 \cdot a_{ESF}^2 + h_{Esf}^2\right) \tag{3.19}$$

$$h_{Esf} = r \pm \sqrt{r^2 - a_{ESF}^2} \quad (3.20)$$

Onde:

V_E – volume desgastado na esfera;

a_{ESF} – raio da calota;

r – raio da esfera;

h_{Esf} – altura da calota.

O volume desgastado nos discos foram determinados com o uso dos perfis (perfilometria de contato e perfilometria óptica) das trilhas desgastadas. Os dados gerados para obtenção dos perfis e parâmetros de rugosidade foram reutilizados para determinar o volume desgastado no disco.

Após a obtenção dos dados pelos equipamentos os valores foram tratados utilizando o software TalyMap® (Digitalsurf), através das seguintes operações: nivelamento, zoom na região de interesse, rotação para alinhamento das trilhas de desgaste, novo nivelamento, interpolação para obtenção de pontos não medidos, thresholding (99,5%-0,5%), obtenção do perfil perpendicular a trilha, cálculo da área de desgaste, como demonstrado na figura 3.16. Para aproximar o tamanho da trilha de desgaste, foi utilizado como referência o diâmetro da marca formada na esfera.

Neste trabalho, levando em consideração o fato de a profundidade da trilha ser uniforme ao redor do disco, foram determinados 10 perfis em cada disco além do perfil médio da trilha e então foram calculados os desgastes nos discos com a equação (3.21).

$$V_D = \frac{2\pi R}{n_P} \sum_{i=1}^{i=n_P} S_i \quad (3.21)$$

Onde:

V_D é o volume desgastado no disco;

R é o raio da trilha desgastada;

S_i é i-ésima área obtida do i-ésimo perfil;

n_P é o número de perfis determinados no disco.

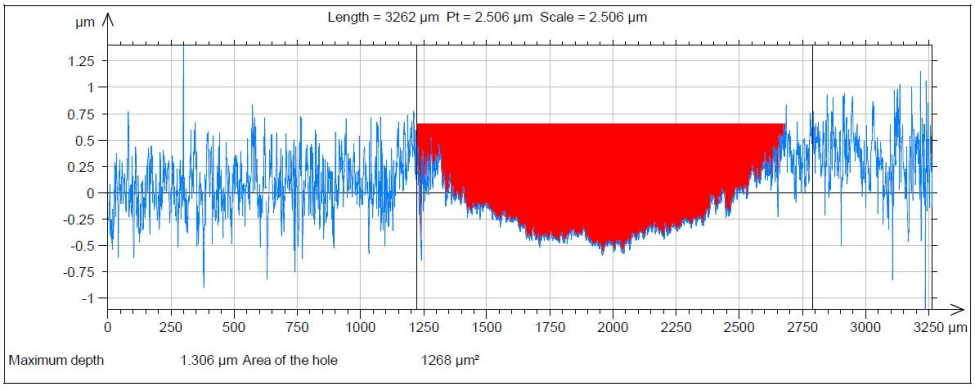

Figura 3.16 – Exemplo de imagem usada para a determinação do volume desgastado nos discos. Fonte: Autor.

3.3.5.4 Taxa de desgaste e perda de massa

Com o intuito de comparar os valores de desgaste obtido foi utilizado como parâmetro a taxa de desgaste que foi calculada a partir da equação 3.22.

$$\boxed{T_D = \frac{V_{DES}}{W \cdot D_{ist}}} \tag{3.22}$$

Onde:

T_D – Taxa de desgaste em (mm³)/(Nm);

V_{DES} - Volume desgastado (seja na esfera ou no disco) em mm³;

W – Carga aplicada durante o ensaio em N;

D_{IST} – Distancia percorrida em m

Para o cálculo da perda de massa foi utilizada a expressão 3.1.

3.3.5.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura é uma técnica utilizada em várias áreas do conhecimento devido a sua capacidade de fornecer informações de detalhe, com aumentos que podem chegar até 300.000 vezes. A imagem de microscopia eletrônica de varredura é formada pela incidência de um feixe de elétrons no material, sob vácuo. A incidência do feixe de elétrons promove a emissão de vários tipos de radiação, tais como: elétrons secundários, retroespalhados, Auger e absorvidos, assim como raios-X característicos e de catodoluminescência. Em geral,

a imagem eletrônica de varredura representa em tons de cinza o mapeamento e a contagem de elétrons secundários (SE – *secondary electrons*) e/ou retroespalhados (BSE – *backscattered electrons*) emitidos pelo material analisado.

Ao MEV pode ser acoplado o sistema denominado EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*), o qual possibilita a determinação da composição química, qualitativa e semiquantitativa das amostras, a partir da leitura das emissões de raios-X característicos. O limite de detecção é da ordem de 1%, mas pode variar de acordo com as especificações utilizadas durante a análise, como o tempo de contagem, por exemplo. Dentre as vantagens do sistema EDS, destacam-se os perfis e mapas de composição química que possibilitam o estudo mais aprofundado dos materiais.

Uma das vantagens da utilização do MEV/ EDS é a rapidez e facilidade na preparação das amostras(68)(69).

Para a análise por MEV foi utilizado o equipamento Microscópio Eletrônico de Varredura Compacto JSM-6010LA da marca JEOL.

A figura 3.17 mostra exemplos de imagens feitas por microscopia eletrônica de varredura.

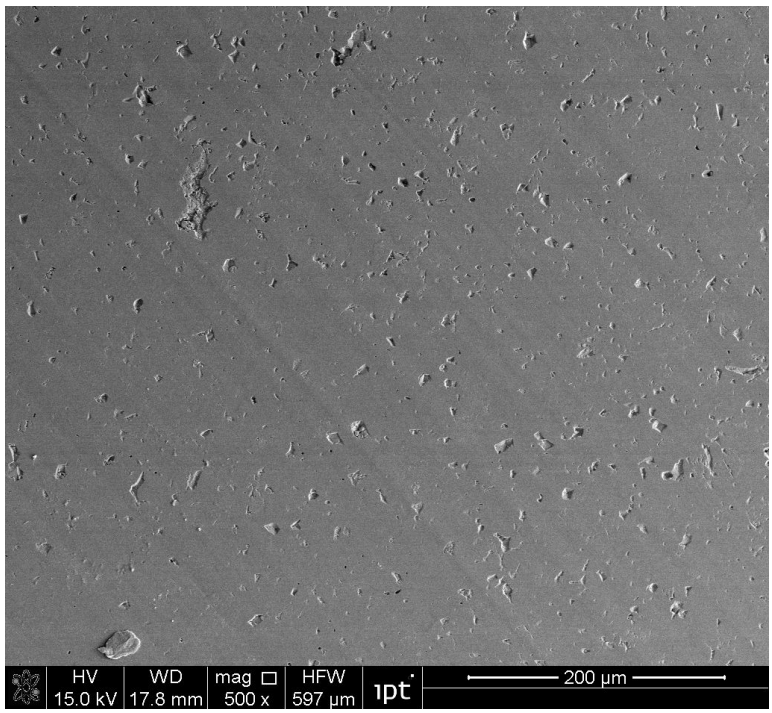

Figura 3.17 – Calota formada na superfície da esfera após o desgaste. Fonte: Autor.

3.3.5.6 Espectroscopia Ramam

Espectroscopia Ramam é uma técnica que usa uma fonte monocromática de radiação eletromagnética na qual, ao atingir um objeto é absorvida e posteriormente retransmitida, ou seja, espalhada por ele, gerando radiação de mesma energia ou de energia diferente da incidente. Uma pequena parcela da radiação incidente sofre um espalhamento inelástico (com frequência ou comprimento de onda diferente da incidente), analisando esta radiação é possível obter informações importantes sobre a composição química do objeto a partir da diferença entre a energia incidente e a energia espalhada.

A diferença de energia entre a radiação incidente e a espalhada é proporcional à energia com que átomos presentes na área estudada estão vibrando e essa frequência de vibração permite descobrir como os átomos estão ligados, ter informação sobre a geometria molecular, sobre como as espécies químicas presentes interagem entre si e com o ambiente, entre outras coisas. É por esse motivo que essa ferramenta é tão poderosa, permitindo inclusive a diferenciação de polimorfos, isto é, substâncias que tem diferentes estruturas e, portanto, diferentes propriedades, apesar de terem a mesma fórmula química.

Como não há somente um tipo de vibração, uma vez que geralmente as espécies químicas presentes são complexas, a radiação espalhada inelasticamente é constituída por um número muito grande de diferentes frequências (ou componentes espectrais) as quais precisam ser separadas e ter sua intensidade medida. O gráfico que representa a intensidade da radiação espalhada em função de sua energia (dada em uma unidade chamada de número de onda e expressa em cm^{-1}) é a forma usual de um espectro Ramam (70)(71).

4 Resultados e discussão

Os resultados foram apresentados nos itens de 4.1 a 4.4 na seguinte ordem: determinação das propriedades dos materiais, resultados dos ensaios tribológicos (coeficiente de atrito e desgaste) e regimes de lubrificação. Nos itens 4.5 a 4.8 foi realizada uma discussão e uma análise teórica sobre os dados obtidos, sistemas de lubrificação e modelos que descrevem os fenômenos. No item 4.9 foi realizado uma discussão geral sobre o trabalho.

Todos os valores das incertezas, são calculadas segundo a análise estatística de dados experimentais e teoria de erros (72) (73).

4.1 Determinação das densidades dos materiais

Na tabela 4.1 são apresentados os resultados das densidades aparentes dos materiais obtidos pelo método de Arquimedes e da densidade geométrica, além de valores de absorção de água e porosidade aparente calculados através do método de Arquimedes.

Tabela 4.1 – Densidade dos materiais.

	Disco	**Esfera**
Absorção de Água (AA) %	0,023	0,048
Porosidade Aparente (PA) %	0,092 ± 0,007	0,184 ± 0,034
Densidade aparente (g/cm³)	3,93 ± 0,28	3,79 ± 0,27
Densidade geométrica (g/cm³)	3,938 ± 0,025	3,854 ± 0,005

Fonte: Autor.

Nos resultados da tabela nota-se que há uma diferença entre os valores verificados pelo método geométrico e pelo método de Arquimedes, este fato está relacionado ao método geométrico não considerar a porosidade do material, ao contrário do método de Arquimedes. Como mostrado na tabela 2.1(24) a densidade da alumina tem valor de 3,984 ± 0,002 g/cm³, ou seja, considerando a densidade aparente a esfera tem densidade 95,1 % da teórica e o disco 98,6%.

4.2 Determinação das propriedades mecânicas

Determinaram-se os valores de dureza Vickers, do módulo de elasticidade e da tenacidade à fratura, apresentados a seguir.

4.2.1 Determinação da dureza Vickers (H_V) e Rockwell C (H_{RC})

Os resultados obtidos na determinação da dureza Vickers e Rockwel C estão apresentados na tabela 4.2 e sumarizados no gráfico da figura 4.1.

Tabela 4.2 – Dureza Vickers e Rockwell C dos materiais ensaiados.

	Disco		**Esfera**	
Carga (kgf)	**Vickers (GPa)**	**Rockwell C**	**Vickers (GPa)**	**Rockwell C**
1	16,12 ± 0,74	77,10 ± 0,96	12,65 ± 0,35	72,53 ± 0,45
5	17,14 ± 0,20	78,40 ± 0,28	13,11 ± 0,85	73,15 ± 1,11
10	15,88 ± 0,17	76,77 ± 0,23	12,30 ± 0,52	72,13 ± 0,66
20	16,98 ± 0,20	78,27 ± 0,28	11,98 ± 0,24	71,68 ± 0,32
30	16,51 ± 0,17	77,60 ± 0,25	11,94 ± 0,40	71,65 ± 0,50
50	16,27 ± 0,13	77,29 ± 0,20	-	-
Dado fornecido pelo fabricante	-	-	15,7	-

Fonte: Autor.

Como foi possível ver na tabela a dureza do disco foi maior que a dureza da esfera. Entretanto os valores dos dois corpos estão próximos do valor tido pela literatura como sendo o da alumina (H_{v1kgf} = 15 ± 2) (24)).

Com cargas de 50 kgf as marcas formadas na esfera são extremamente disformes, fazendo com que seja impossível determinar sua dureza.

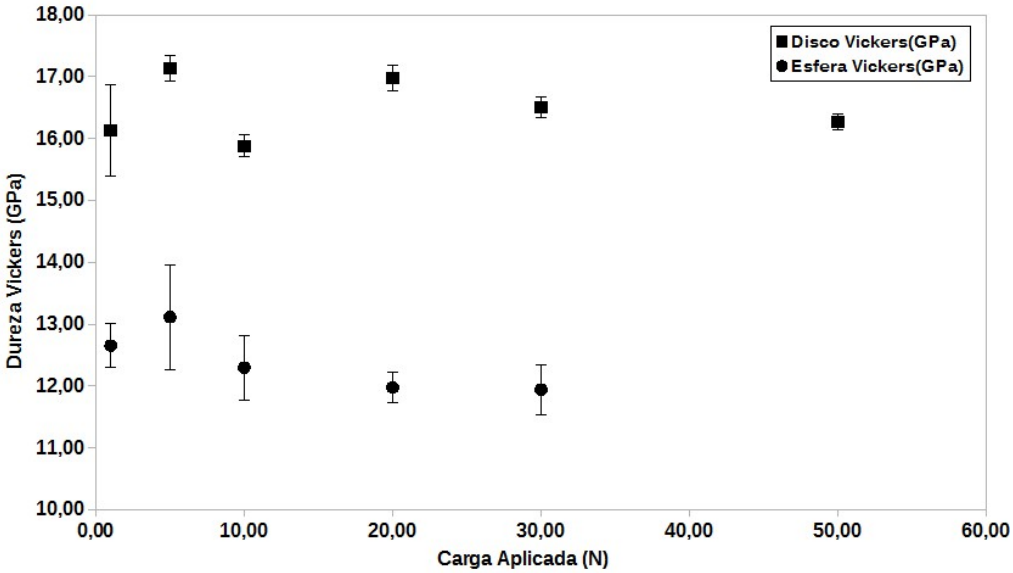

Figura 4.1 –Gráfico de dureza dos materiais. Fonte: Autor.

4.2.2 Determinação do módulo de elasticidade (E)

Os valores dos módulos de elasticidade e de microdureza são apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Módulo de elasticidade dos materiais.

Material	Al_2O_3 (Esfera)	Al_2O_3 (Disco)
Microdureza (GPa)	30,77 ± 0,15	31,21 ± 0,17
Módulo de Elasticidade – E (GPa)	361,0 ± 1,7	363,3 ± 1,3
Dado fornecido pelo fabricante (GPa)	365	-

Fonte: Autor.

Os valores do módulo de elasticidade da alumina variam muito dependendo do método de sinterização, densidade e dos aditivos empregados.

Segundo a literatura, o módulo de elasticidade da alumina pode estar entre 344 e 446 GPa (74)(24). Com isso pode-se perceber que os valores dos módulos de elasticidade das esferas e dos discos estão dentro do esperado.

Os valores de microdureza são praticamente o dobro dos valores medidos de macrodureza. Isso pode estar ligado ao fato de que estes valores não levam princialmente em conta os poros e os contornos de grão.

4.2.3 Determinação da tenacidade a fratura (K_{IC})

Os resultados obtidos na determinação da tenacidade a fratura dos materiais ensaiados são mostrados na tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Tenacidade a fratura dos materiais.

Material	K_{IC} (MPa.m$^{1/2}$)
Al_2O_3 (Disco)	4,36 ± 0,40

Fonte: Autor.

Na figura 3.4 foi apresentada uma impressão típica de um endentador Vickers; essa impressão também pode ser usada para a medida de tenacidade à fratura.

Devido a grande variedade de métodos de sinterização e à grande variedade de aditivos, as propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos, assim como a tenacidade a fratura, variam dentro de uma extensa faixa de valores.

Para alumina os valores da literatura estão entre 3,0 e 4,0 MPa.m$^{1/2}$ (75)(24).

4.3 Parâmetros iniciais dos ensaios

A seguir parâmetros iniciais dos ensaios como rugosidade, porosidade, isotropia, entre outros.

4.3.1 Rugosidade superficial inicial

As tabelas 4.5, 4.6 e 4.7 e os gráficos das figuras 4.2 e 4.3 mostram os valores médios de rugosidade nas superfícies iniciais e uma média de 30 valores de rugosidade das superfícies após os ensaios. A tabela mostra ainda os valores de rugosidade combinada.

Tabela 4.5 – parâmetros de rugosidade iniciais das superfícies.

Parâmetros de rugosidade Inicial (Pré-ensaio)			
	Disco 'não polido'	**Disco 'polido'**	**Esfera**
Sq (µm)	0,538 ± 0,014	0,233 ± 0,029	0,135 ± 0,009
Sa (µm)	0,421 ± 0,012	0,176 ± 0,015	0,099 ± 0,006
Sk (µm)	1,126 ± 0,054	0,312 ± 0,056	0,139 ± 0,009
Spk (µm)	0,231 ± 0,014	0,077 ± 0,049	0,113 ± 0,018
Svk (µm)	0,732 ± 0,016	0,435 ± 0,125	0,166 ± 0,016

Fonte: Autor.

Tabela 4.6 – parâmetros de rugosidade finais das superfícies.

Parâmetros de rugosidade Final (Pós-ensaio)		
	Disco 'não polido'	**Esfera**
Sq (µm)	0,200 ± 0,018	0,122 ± 0,011
Sa (µm)	0,142 ± 0,014	0,092 ± 0,008
Sk (µm)	0,263 ± 0,021	0,192 ± 0,010
Spk (µm)	0,116 ± 0,010	0,127 ± 0,014
Svk (µm)	0,368 ± 0,045	0,097 ± 0,009

Fonte: Autor.

Tabela 4.7 – rugosidades médias combinadas (Sq) das superfícies.

Rugosidade combinada		
	Pré-ensaio	**Pós-ensaio**
Sq (µm)	0,554 ± 0,014	0,234 ± 0,017

Fonte: Autor.

Quando foram comparados os valores de rugosidade pré ensaio e pós ensaio (Sq) nos discos, foi possível perceber quando utilizado o disco 'não polido' um alisamento da superfície, diminuindo o valor de rugosidade. Quando foi utilizado o disco 'polido' os valores de rugosidade não variaram de forma significativa dentro da incerteza obtida.

Quando foram comparados os valores de rugosidade das esferas pré ensaio e pós ensaio (Sq), foi possível perceber que apesar da geometria da esfera mudar, os valores de rugosidade permaneceram, dentro dos limites de incerteza, parecidos.

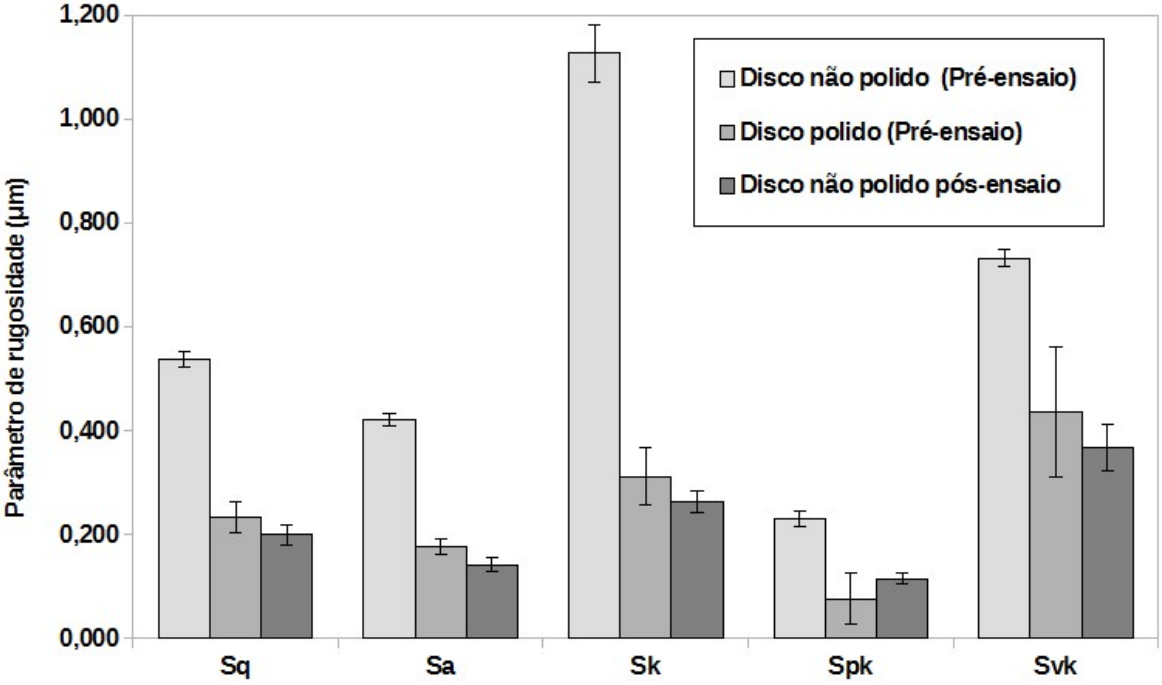

Figura 4.2 – parâmetros de rugosidade no disco. Fonte: Autor.

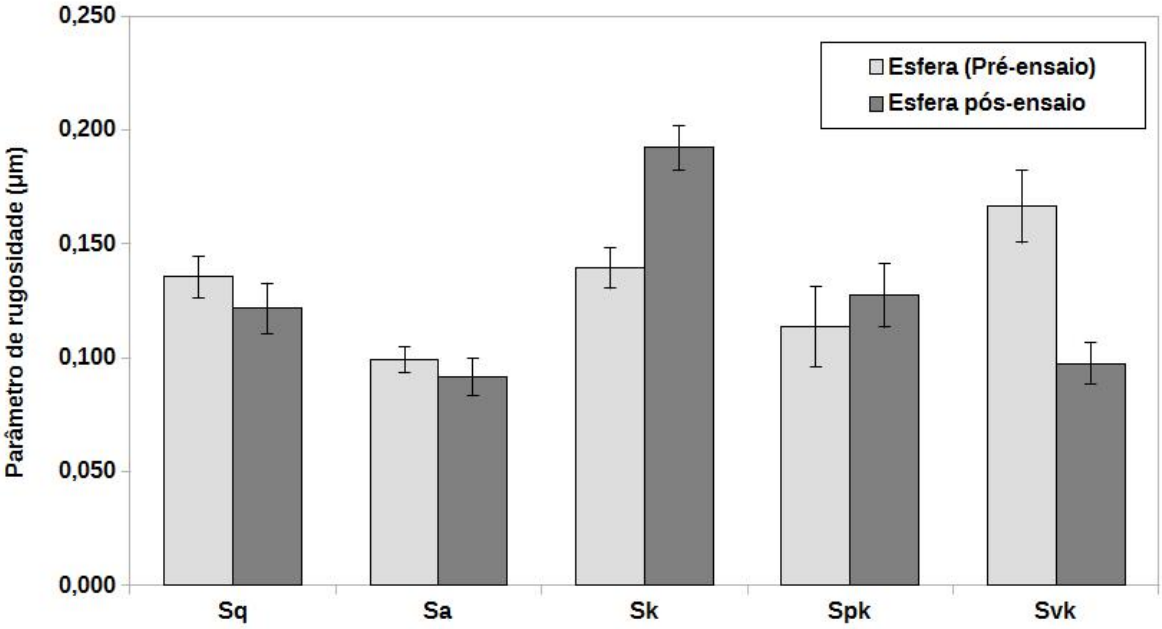

Figura 4.3 – parâmetros de rugosidade na esfera. Fonte: Autor.

4.3.2 Superfície inicial – disco ‘não polido’

A figura 4.4 mostra os parâmetros de superfície inicial para o disco de alumina ‘não polido’.

Onde:

a) Mostra a projeção do perfil de rugosidade após filtragem;
b) Apresenta a curva de Abot-Firestone;
c) Traz a curva de isotropia da superfície;
d) Mostra o perfil da forma da superfície.

A figura 4.5 mostra imagens tiradas a partir de um microscópio óptico em vários aumentos da superfície do disco antes dos ensaios.

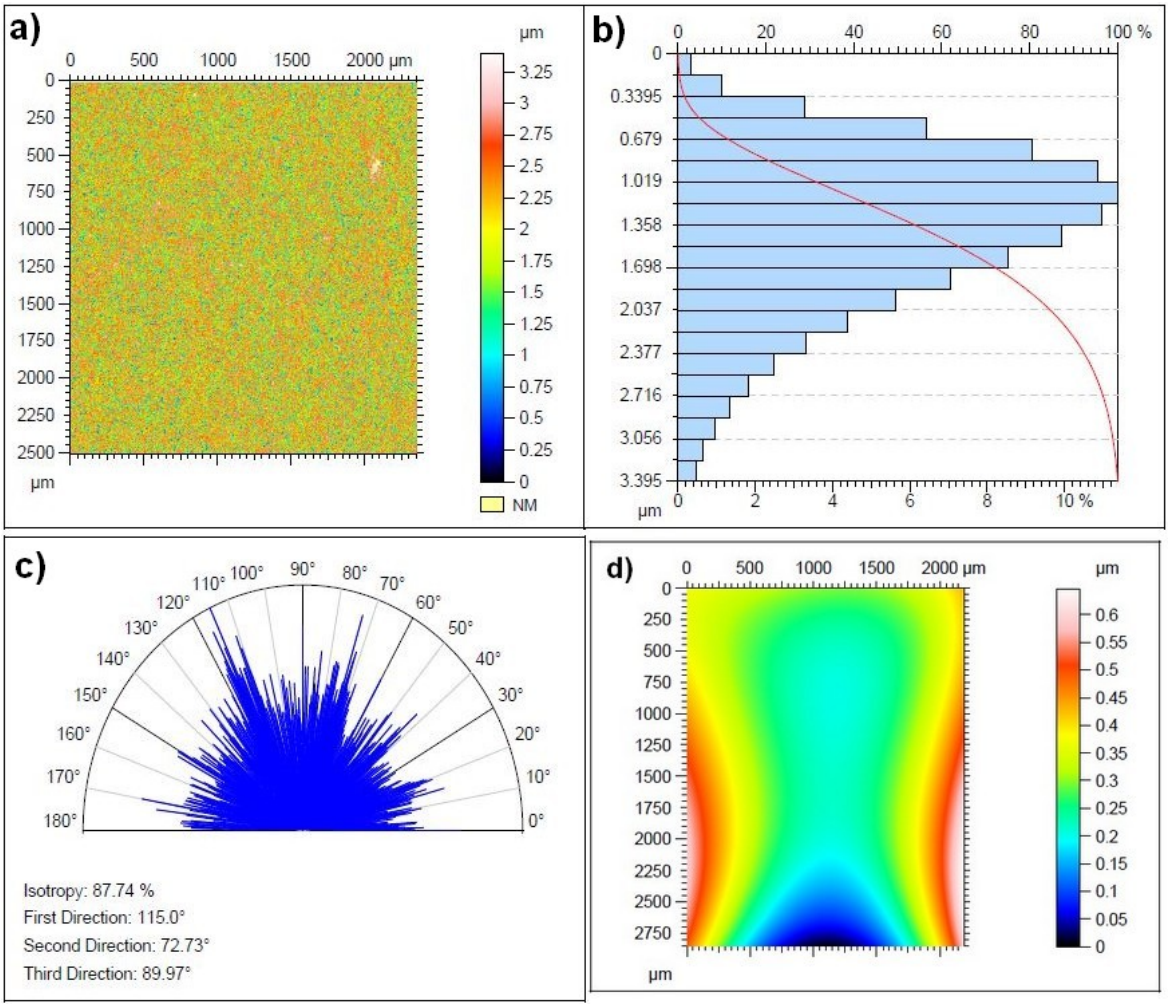

Figura 4.4 – parâmetros de rugosidade inicial para o disco de alumina. Fonte: Autor.

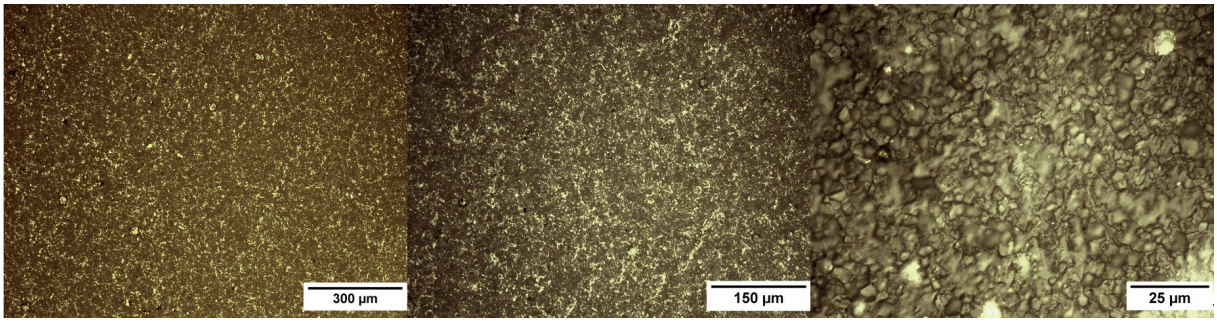

Figura 4.5 – imagens tiradas a partir de um microscópio óptico da superfície inicial do disco. Fonte: Autor.

A partir das figuras 4.4 e 4.5, foi possível perceber que a superfície do disco **‘não polido’** é isotrópica, tem baixa ondulação (aproximadamente 600 nm), além de ser bastante porosa, evidenciado pelo fato da curva de Abot-Firestone estar deslocada. O valor de curtose ficou em aproximadamente Sku = 3,0 ± 0,2.

4.3.3 Superfície inicial disco ‘polido’

A figura 4.6 mostra os parâmetros de superfície inicial para o disco de alumina ‘polido’.

Onde:

a) Mostra a projeção do perfil de rugosidade após filtragem;
b) Apresenta a curva de Abot-Firestone;
c) Traz a curva de isotropia da superfície;
d) Mostra o perfil da forma da superfície.

A figura 4.7 mostra imagens tiradas a partir de um microscópio óptico em vários aumentos a superfície do disco antes dos ensaios.

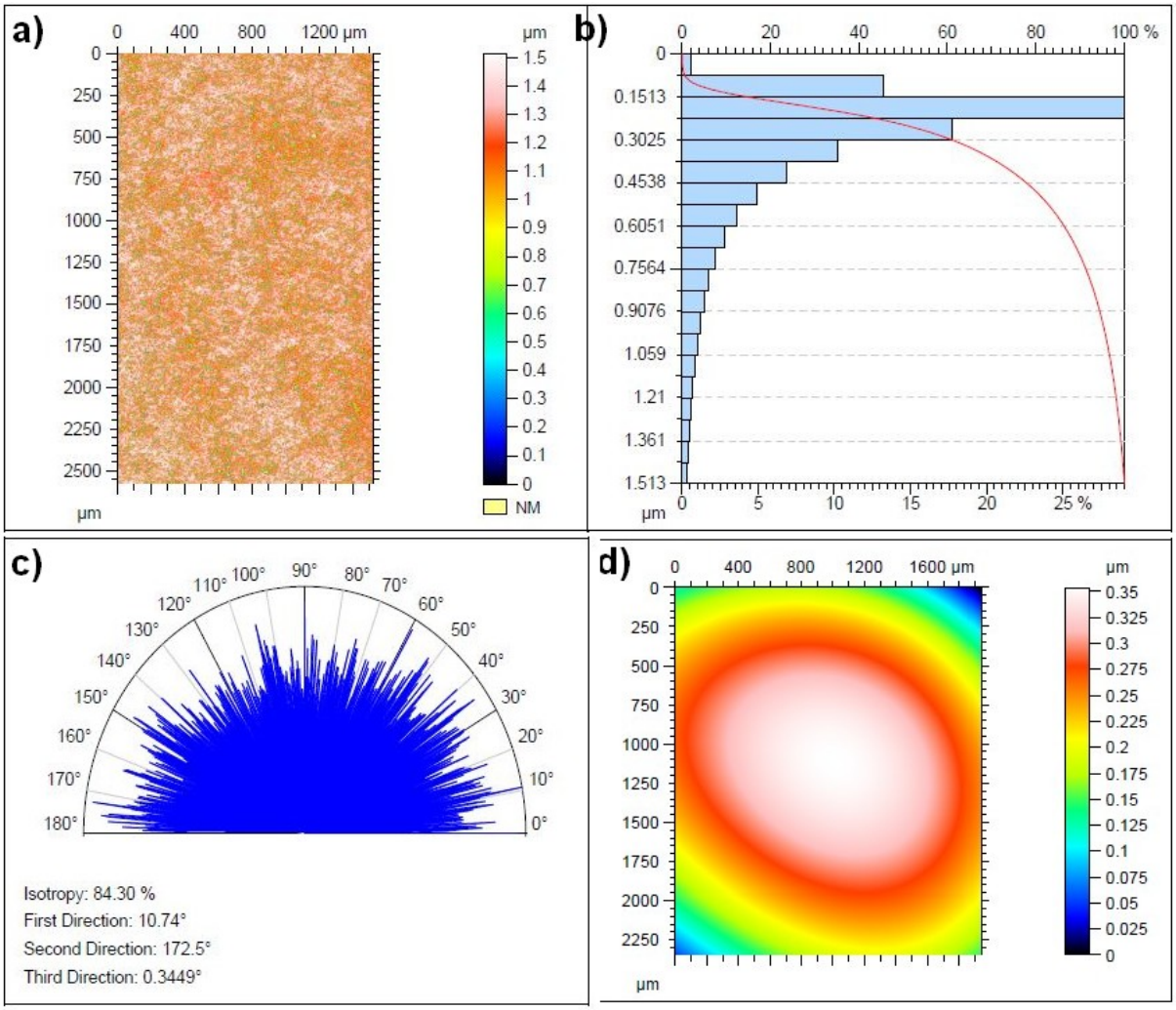

Figura 4.6 – parâmetros de rugosidade inicial para o disco de alumina. Fonte: Autor.

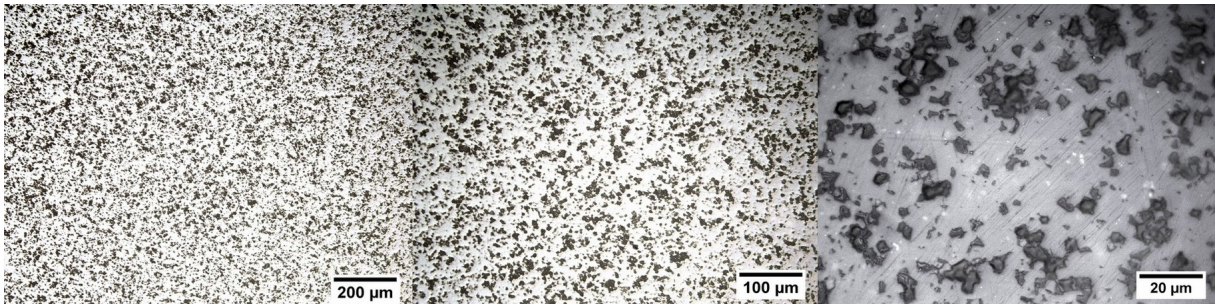

Figura 4.7 – imagens tiradas a partir de um microscópio óptico da superfície inicial do disco polido. Fonte: Autor.

A partir das figuras 4.6 e 4.7, foi possível perceber que a superfície do disco **'polido'** é isotrópica, tem baixa ondulação (aproximadamente 350 nm) além de ser bastante porosa, evidenciado pelo fato da curva de Abot-Firestone estar deslocada. O valor de curtose ficou em aproximadamente Sku = 6,7 ± 0,2.

4.3.4 Superfície inicial da esfera

A figura 4.8 mostra os parâmetros de superfície inicial para esfera.

Onde:

a) Mostra a projeção do perfil de rugosidade após filtragem;
b) Apresenta a curva de Abot-Firestone;
c) Traz a curva de isotropia da superfície;

A figura 4.9 mostra imagens tiradas a partir de um microscópio óptico da superfície da esfera antes dos ensaios.

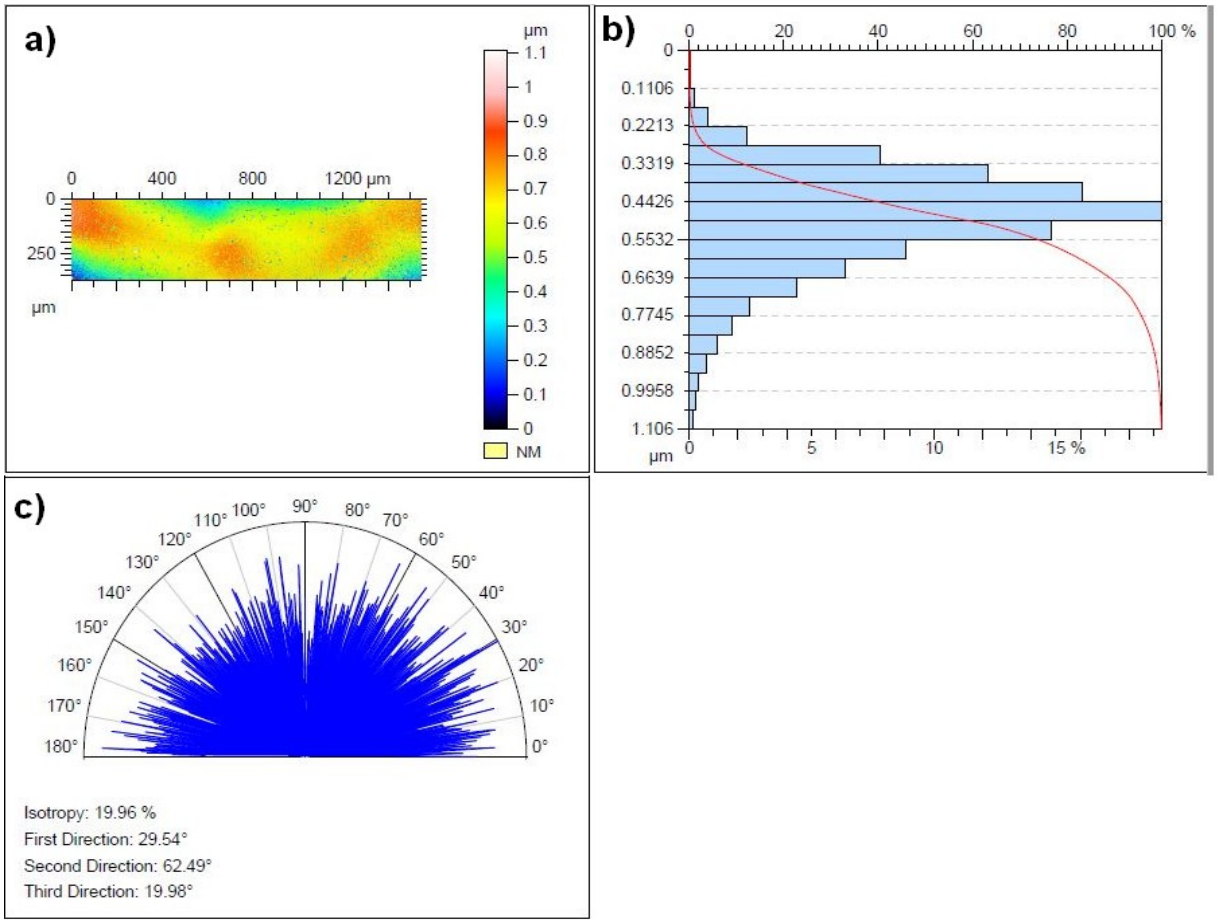

Figura 4.8 – parâmetros de rugosidade inicial para a esfera de alumina. Fonte: Autor.

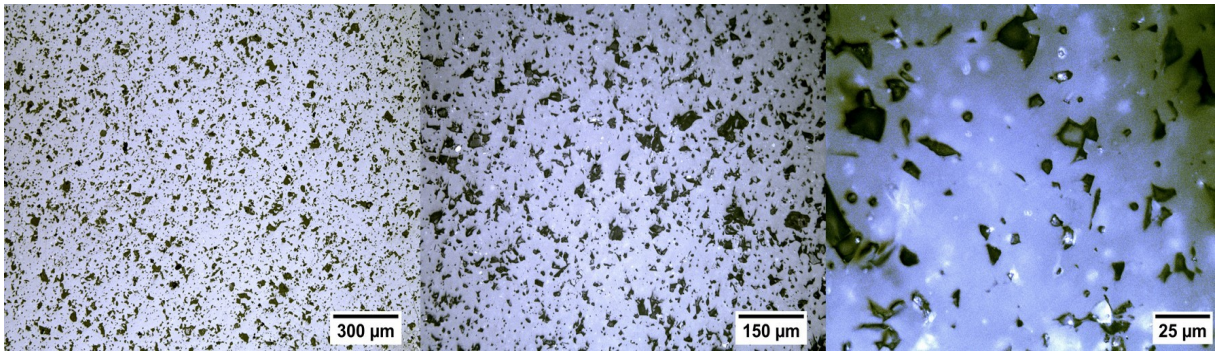

Figura 4.9 – imagens tiradas a partir de um microscópio óptico da superfície inicial da esfera. Fonte: Autor.

A partir das figuras 4.8 e 4.9, foi possível perceber que a superfície da esfera é isotrópica e bastante porosa, evidenciado pelo fato da curva de Abot-Firestone estar deslocada.

4.3.5 Isotropia da superfície

A figura 4.10 mostra a isotropia da superfície do disco antes e depois do ensaio. Como foi possível perceber, a superfície do disco se torna mais direcional após o ensaio (o valor diminui aproximadamente 40 pontos percentuais).

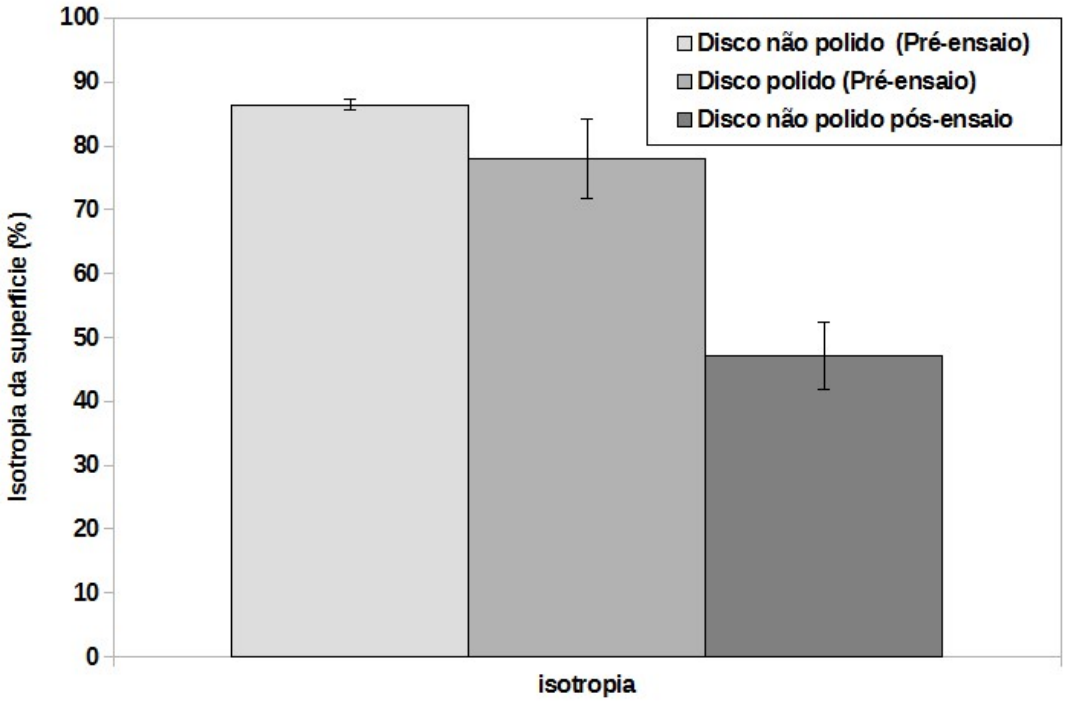

Figura 4.10 – Isotropia da superfície do disco. Fonte: Autor.

A figura 4.11 mostra a isotropia da superfície da esfera antes e após o ensaio. Como foi possível perceber a superfície da esfera, assim com a superfície do disco, se torna mais direcional após o ensaio (o valor também diminui aproximadamente 40 pontos percentuais).

Analisando os gráficos das figuras 4.10 e 4.11, foi possível perceber que a esfera tem uma isotropia superficial menor que a do disco (aproximadamente 35%), evidenciando que o processo de polimento das esferas (não informado pelo fabricante) foi menos cauteloso por parte do fabricante.

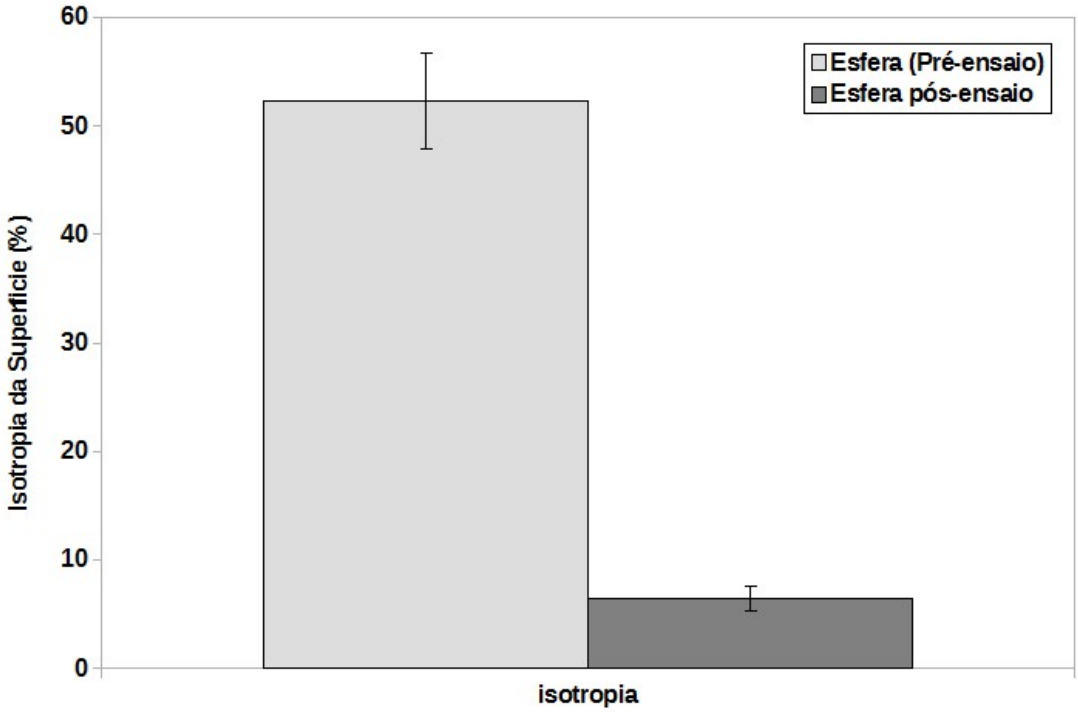

Figura 4.11 – Isotropia da superfície da esfera. Fonte: Autor.

A figura 4.12 mostra uma representação 3D (em três dimensões) das superfícies dos discos e das esferas antes e após os ensaios.

Onde:

a) Disco ‘não polido’ antes do ensaio;
b) Disco ‘polido’ antes do ensaio;
c) Esfera antes do ensaio;
d) Disco ‘não polido’ após o ensaio;
e) Disco ‘polido’ após o ensaio;
f) Esfera após o ensaio;

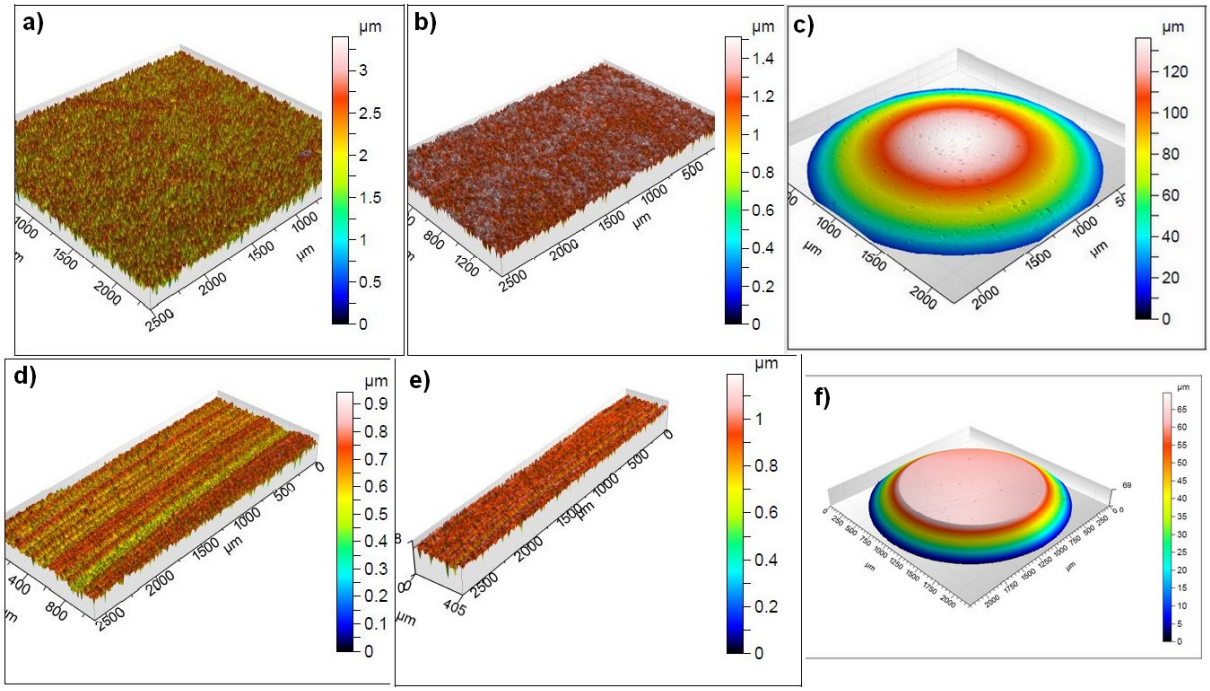

Figura 4.12 – Representações 3D mostrando as superfícies do disco e da esfera antes e após os ensaios. Fonte: Autor.

A figura 4.12 mostra as marcas direcionais provocadas pelo desgaste proveniente dos ensaios, evidenciando uma diminuição da isotropia após os testes

4.3.6 Contato inicial entre o disco e a esfera

Para se ter uma ideia geral das superfícies inicias de contato, na figura 4.13 mostram-se os perfis da superfície do disco e da esfera antes dos ensaios, todos na mesma escala.

Onde:

a) Perfil da superfície da esfera antes do ensaio;
b) Perfil da superfície do disco ‘polido’ antes do ensaio;
c) Perfil médio da superfície do disco ‘não polido’ antes do ensaio.

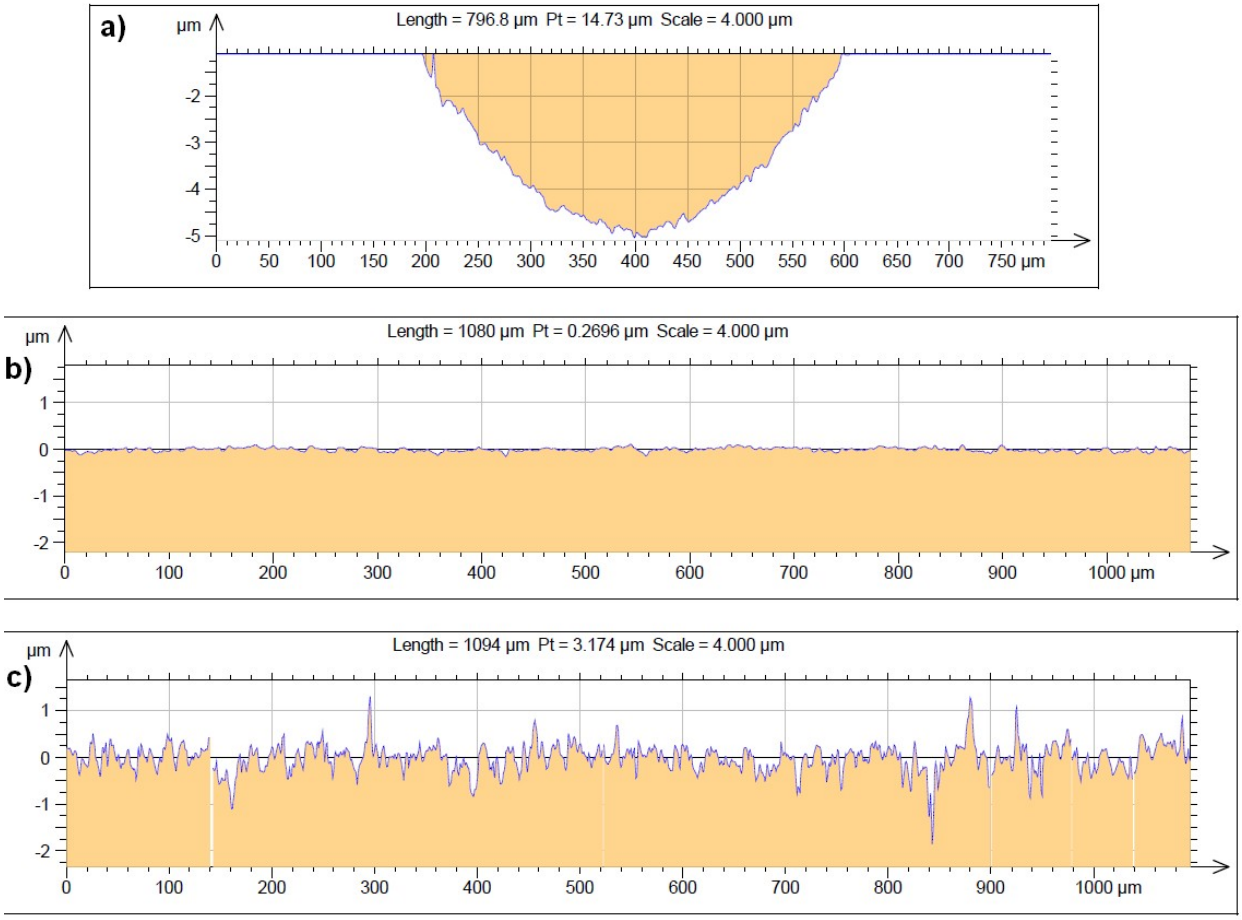

Figura 4.13 – Comparação entre os perfis médios do disco e da esfera antes dos ensaios.

Fonte: Autor.

4.3.7 Análise de porosidade e microestrutura inicial

Determinou-se a distribuição e tamanho dos grãos do disco na figura 4.14 e da esfera na figura 4.15.

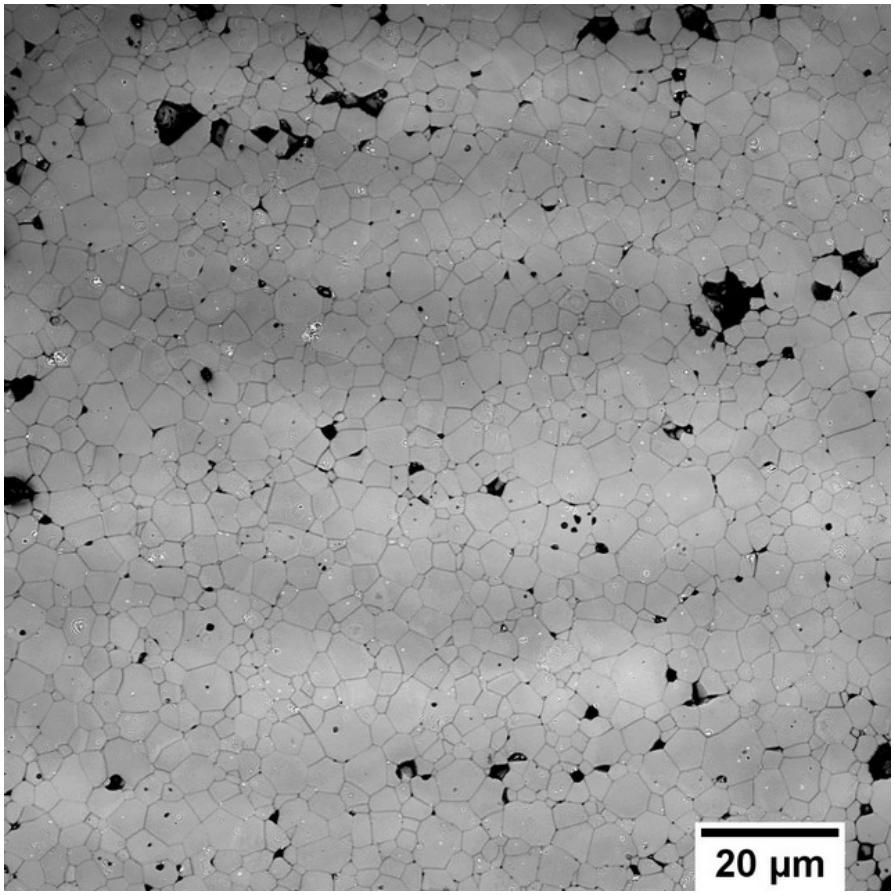

Figura 4.14 – Microestrutura do disco. Fonte: Autor.

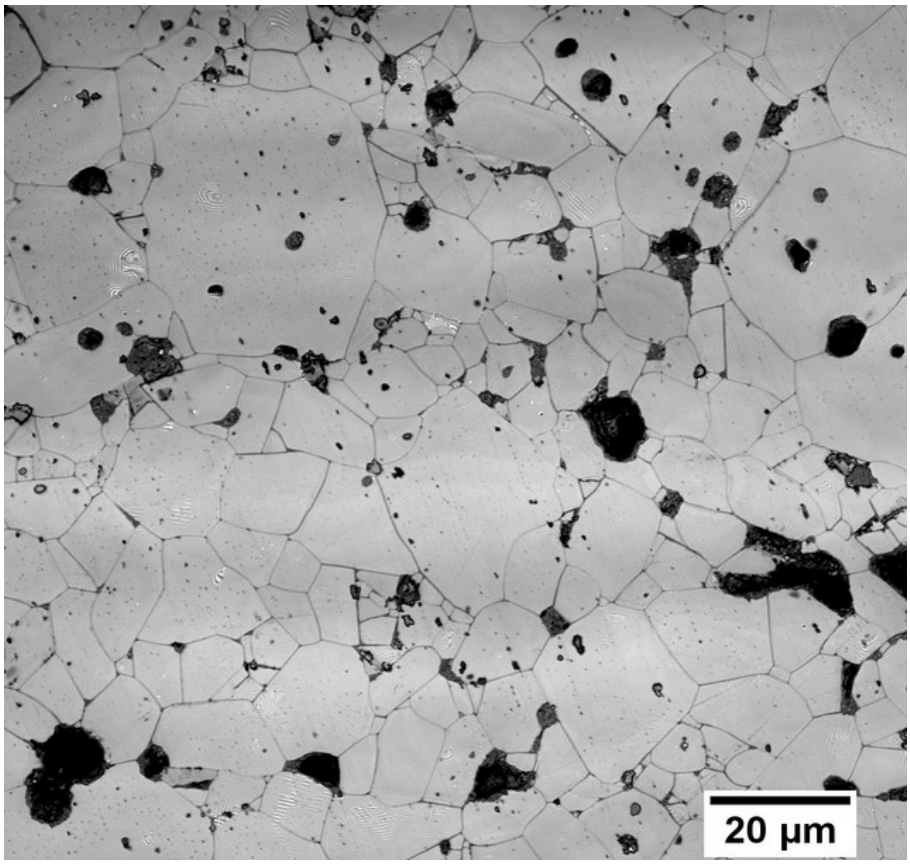

Figura 4.15 – Microestrutura da esfera. Fonte: Autor.

As figuras 4.14 e 4.15 e as figuras de 4.5 a 4.9 mostram que os materiais tanto do disco quanto da esfera são porosos. A tabela 4.8 mostra a porcentagem de área coberta por poros em amostras do disco e de esfera, assim como o parâmetro vv (*void volume – volume de vazios*) dos materiais no início do ensaio.

Tabela 4.8 – Porcentagem da área superficial coberta por poros e parâmetro vv inicial.

	Porcentagem da área superficial coberta por poros (%)	**vv (volume de vazios) ($\mu m^3/\mu m^2$)**
Disco	18,57 ± 0,27	0,61 ± 0,20
Esfera	19,84 ± 0,31	0,148 ± 0,010

Fonte: Autor.

As figuras 4.16 e 4.17 mostram os valores médios de vv para o disco e esfera e após o ensaio. Como foi possível perceber após o ensaio o valor para o disco ficou em aproximadamente 1/3 do valor inicial, indicando que há uma deposição de debris e/ou a formação de hidróxido de alumínio que ocasionou a diminuição do número de poros. Quando olhamos para os dados de vv da esfera antes e depois do ensaio, não podemos fazer uma distinção entre os valores quando incluímos os valores das incertezas.

Na tabela 4.9 foi quantificado o valor de tamanho de grão no disco e na esfera. Como foi possível perceber os tamanhos médios dos grãos do disco são menores que os tamanhos médios dos grãos das esferas, fato que pode afetar o desgaste devido ao regime de fratura intergranular da alumina, onde alguns grãos podem se destacar transformando-se em debris.

Tabela 4.9 – Tamanho e distribuição dos grãos na superfície do disco e da esfera.

	Número de Grãos por área (μm^{-2})	**Área média dos grãos (μm^2)**	**Diâmetro médio dos grãos (μm)**
Disco	0,0817 ± 0,0018	12,2 ± 0,3	3,95 ± 0,04
Esfera	0,0162 ± 0,0002	62,1 ± 0,9	8,89 ± 0,06

Fonte: Autor.

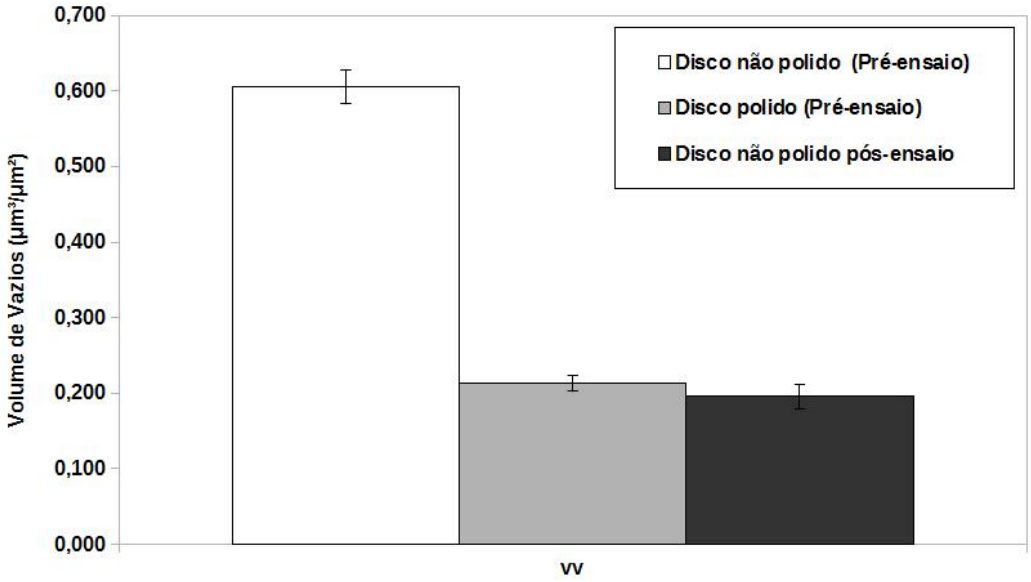

Figura 4.16 – Volume de vazios na superfície do disco. Fonte: Autor.

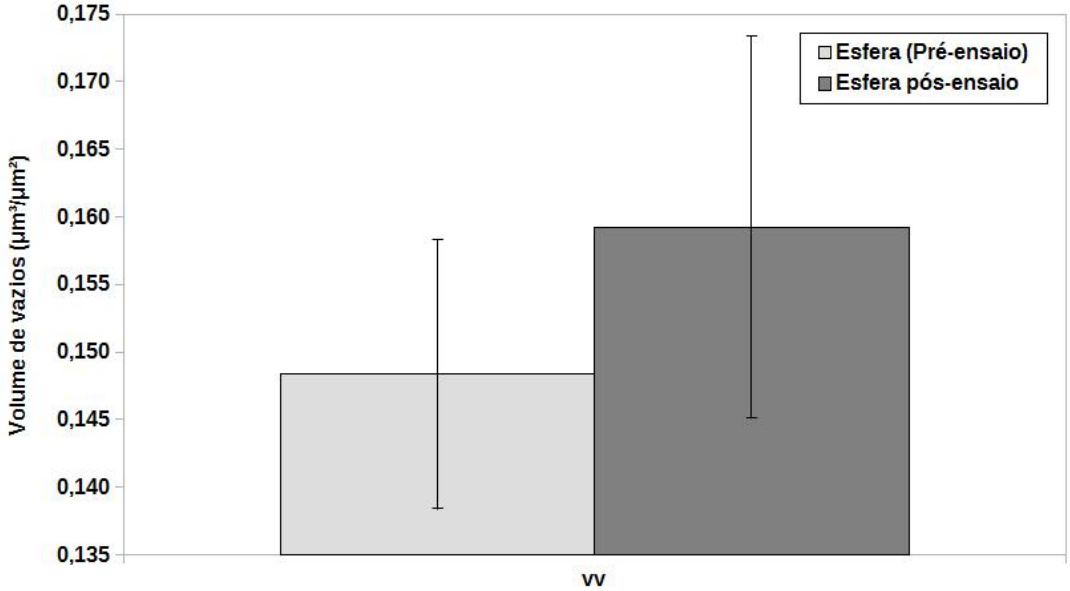

Figura 4.17 –Volume de vazios na superfície da esfera. Fonte: Autor.

4.3.8 Análise de Difratometria de raios-X e EDS (Espectroscopia de raios-X por dispersão em energia)

As figuras 4.18 e 4.19 mostram difratogramas dos materiais ensaiados. A figura 4.18 mostra o difratograma do disco (curva preta) em comparação com a padrão para alfa alumina (corundum)(curva vermelha)(78). Como foi possível perceber os picos do difratograma do disco coincidem com os picos do padrão de corundum, evidenciando a composição como sendo predominantemente alfa

alumina no disco.

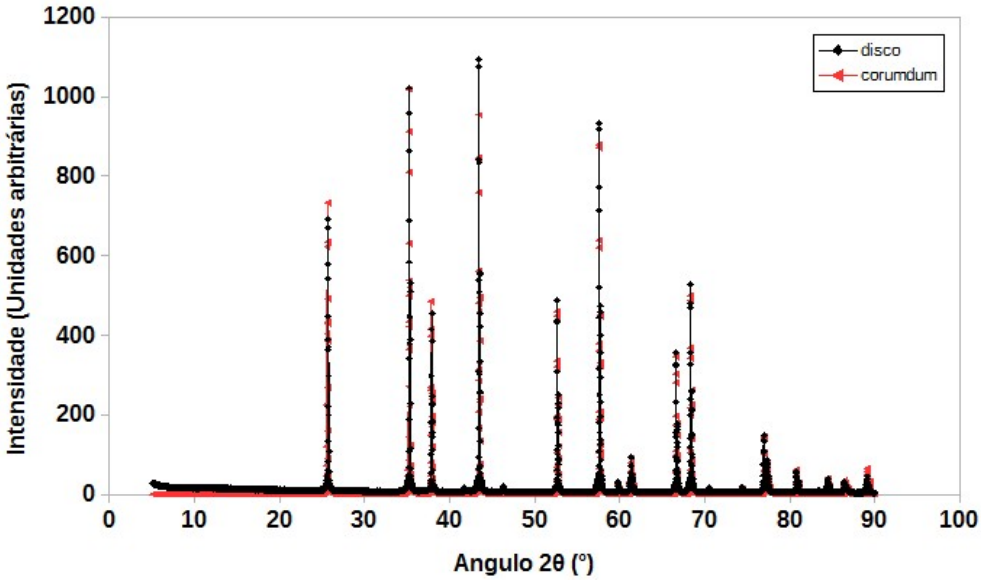

Figura 4.18 – Difratograma do disco em comparação com o padrão de alfa alumina (corundum). Fonte: Autor.

A figura 4.19 mostra o difratograma da esfera em comparação com a padrão para alfa alumina (corundum) (78). Os picos do difratograma da esfera coincidem com os picos do padrão de corundum, evidenciando a composição como sendo predominantemente alfa alumina.

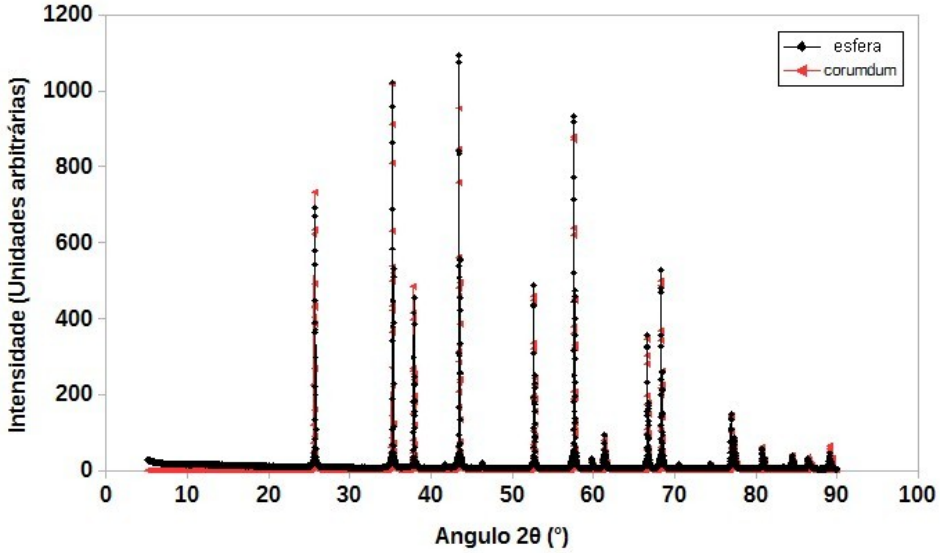

Figura 4.19 – Difratograma da esfera em comparação com o padrão de alfa alumina (corundum). Fonte: Autor.

A tabela 4.10 mostra os valores de porcentagem em massa dos elementos constituintes dos materiais ensaiados obtidos pela técnica EDS.

Tabela 4.10 – Porcentagem em masa dos elementos constituintes do disco e da esfera.

Disco			
Elemento químico	**O**	**Mg**	**Al**
% massa	31,2 ± 1,4	0,460 ± 0,014	68,3 ± 1,4
Esfera			
Elemento químico	**O**	**Mg**	**Al**
% massa	30,4 ± 2,6	0,575 ± 0,104	67,3 ± 2,0

Fonte: Autor.

A partir da tabela 4.10, notou-se que tanto o disco quanto a esfera são feitos com uma alumina de alta pureza, tendo como constituinte extra o óxido de magnésio, provavelmente adicionado como ligante.

4.3.9 Água preparada para o ensaio

A tabela 4.11 mostra quantidades de alguns metais, obtido pela técnica ICP-OES, presentes na água antes dos ensaios, com isso podemos perceber que não há quantidades significativas dos metais de maior interesse e que por algum motivo poderiam interferir no ensaio, somente há uma pequena quantidade de silício, provavelmente devido ao fato da amostra analisada ter sido guardada em recipiente de vidro por 1 mês.

Tabela 4.11 – Propriedades químicas da água antes do ensaio.

Determinação	Água pura
Alumínio (Al) – mg/L	< 0,2
Ferro (Fe) – mg/L	< 0,1
Cromo (Cr) – mg/L	< 0,1
Níquel (Ni) – mg/L	< 0,1
Silício (Si) – mg/L	4,8 ± 0,6
pH (25°C)	6,6 ± 0,1

Fonte: Autor.

Além da análise química, foi realizado para efeito de comparação medidas de absorbância da água em três situações, água pura antes do ensaio, água com 0,03 g/L de sílica antes do ensaio e água após o ensaio com o disco 'não polido' (ensaio padrão – capítulo 4.4.3). Os dados são mostrados na figura 4.20.

A água antes do ensaio tem condutividade 5,5 ± 1,5 µS valor obtido em um condutivímetro de bancada.

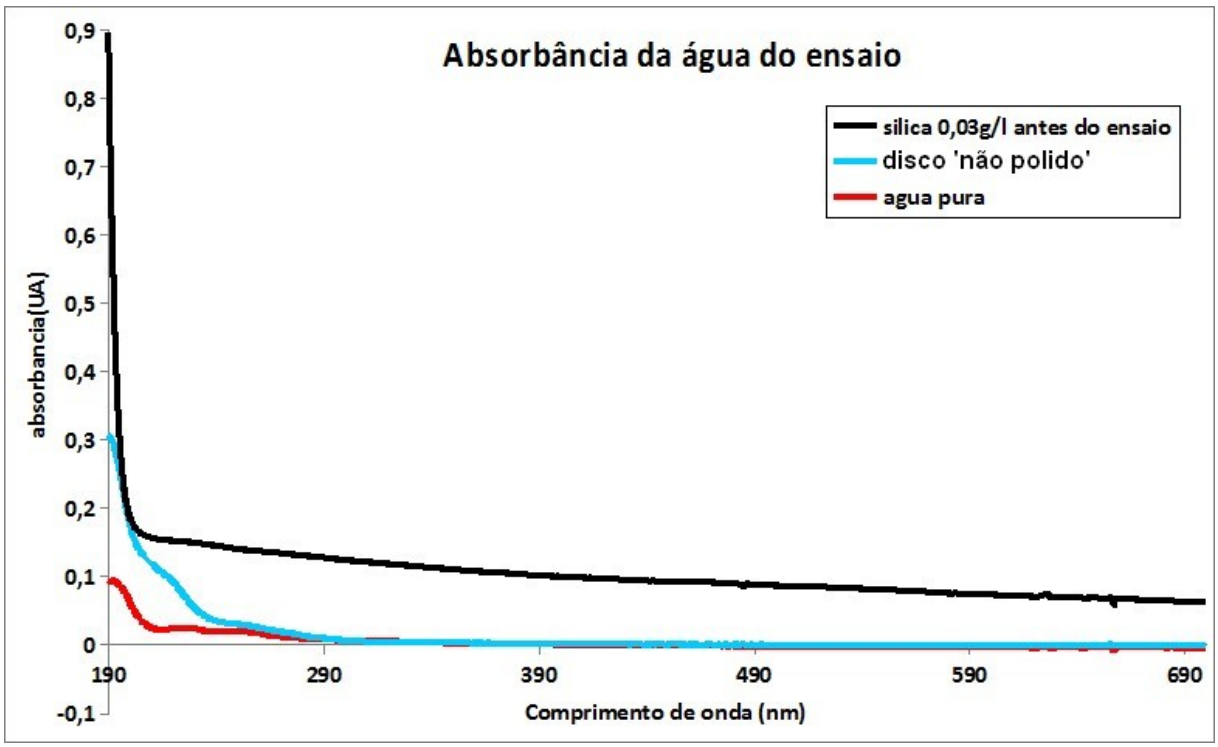

Figura 4.20 – Absorbância da Água. Fonte: Autor.

A partir da figura 4.20, fica evidenciado que após os ensaios há a deposição de alguns materiais dentro da água. Esses materiais influenciam na taxa de absorção de luz na região ultravioleta (até aproximadamente 290 nm), quando comparado ao espectro da água pura. Nessa comparação note-se que há um aumento na absorbância na faixa de 200 nm e a partir de 300 nm, o que pode indicar alguma partícula dissolvida na água já que a curva fica igual à da água pura para comprimentos de onda maior. E como podemos perceber no gráfico, quando olhamos para a curva onde foi adicionado sílica coloidal (não solúvel) o gráfico de absorbância fica sempre acima do gráfico da água pura, o que indica uma partícula coloidal que afeta todo o espectro.

4.3.10 Análise de molhabilidade através do método da gota séssil

Como podemos ver na tabela 4.12 o ângulo de contato entre uma gota de água e a superfície do disco e da esfera é menor que 90º caracterizando uma superfície com molhabilidade entre ($0 < \theta_m < 90º$), o que indica que a água tem uma certa facilidade para acessar e depositar-se nos poros e nos vales da topografia do material.

Tabela 4.12 – ângulo de molhabilidade do disco e da esfera com água deionizada.

Ângulo de molhabilidade θ_m (°)	
Disco não polido fora da trilha	73,8 ± 8,8
trilha de desgaste (disco)	81,9 ± 3,2
esfera (platô de desgaste)	80,1 ± 1,6

Fonte: Autor.

4.4 Resultados dos ensaios tribológicos

São apresentados a seguir os resultados dos ensaios tribológicos realizados com o par alumina-alumina.

Nos gráficos de ensaios preliminares apresentados abaixo, a temperatura da água durante o ensaio foi de 22 ± 3°C, a velocidade de deslizamento foi de 1,00 ± 0,03 m/s e a carga aplicada foi de 54,0 ± 0,6 N.

4.4.1 Ensaios preliminares

Com o intuito de verificar a possibilidade de se obter um regime de baixo coeficiente de atrito no par Al_2O_3 – Al_2O_3 e determinar as melhores condições para os ensaios, foram realizados alguns ensaios preliminares, como o mostrado nas figuras abaixo.

Na figura 4.21 pode-se ver que o coeficiente de atrito no início do ensaio, se mantêm constante entre 0,15 e 0,20. Que foi um resultado próximo ao obtido por

Rani, Yoshizawa, Hyuga, Hirao e Yamauchi (12), entre outros, onde foram obtidos valores entre 0,1 e 0,3. Quando foi adicionado 0,45 g/L de suspensão de sílica o coeficiente de atrito se manteve no mesmo patamar, mas foi observado uma tendência de queda durante todo o ensaio que teve duração de duas horas.

Na figura 4.22, com o aumento do tempo, pôde-se verificar uma tendência de queda do valor do coeficiente de atrito para todos os ensaios, alcançando valores de até 0,08 após 100 horas de teste, mostrando que não existe um valor fixo de coeficiente de atrito para esse par, como apontado na literatura, viabilizando um estudo sistemático do comportamento de atrito para este par.

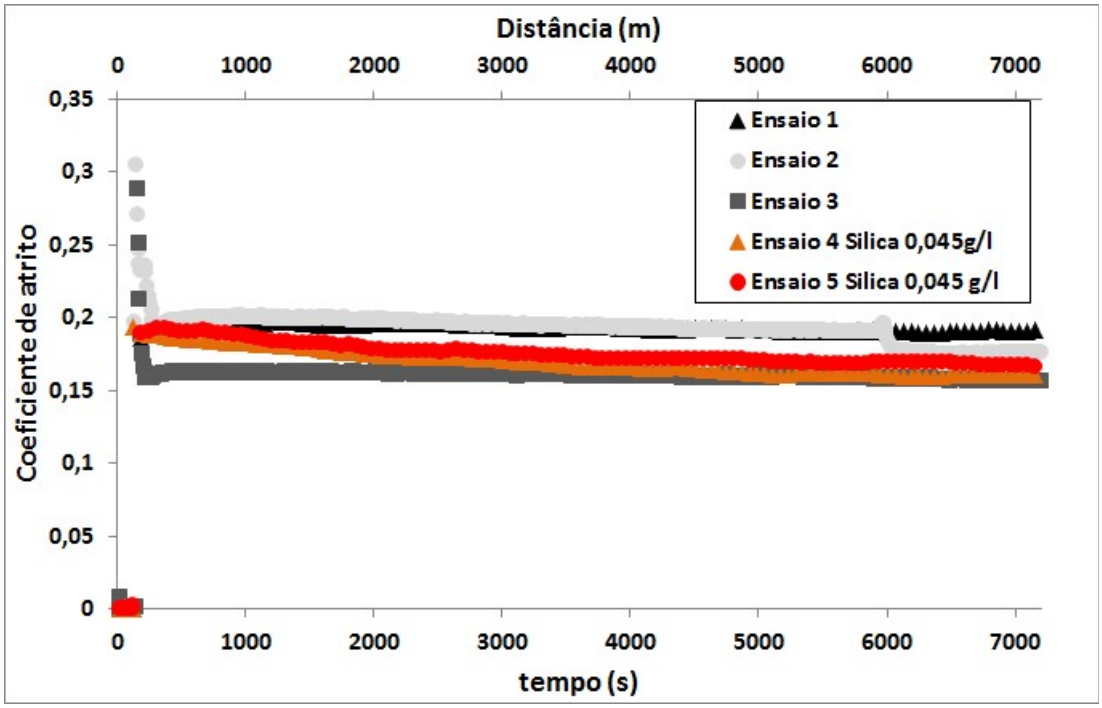

Figura 4.21 – Ensaios preliminares de coeficiente de atrito no par Al_2O_3 – Al_2O_3 (2 horas de teste). Fonte: Autor.

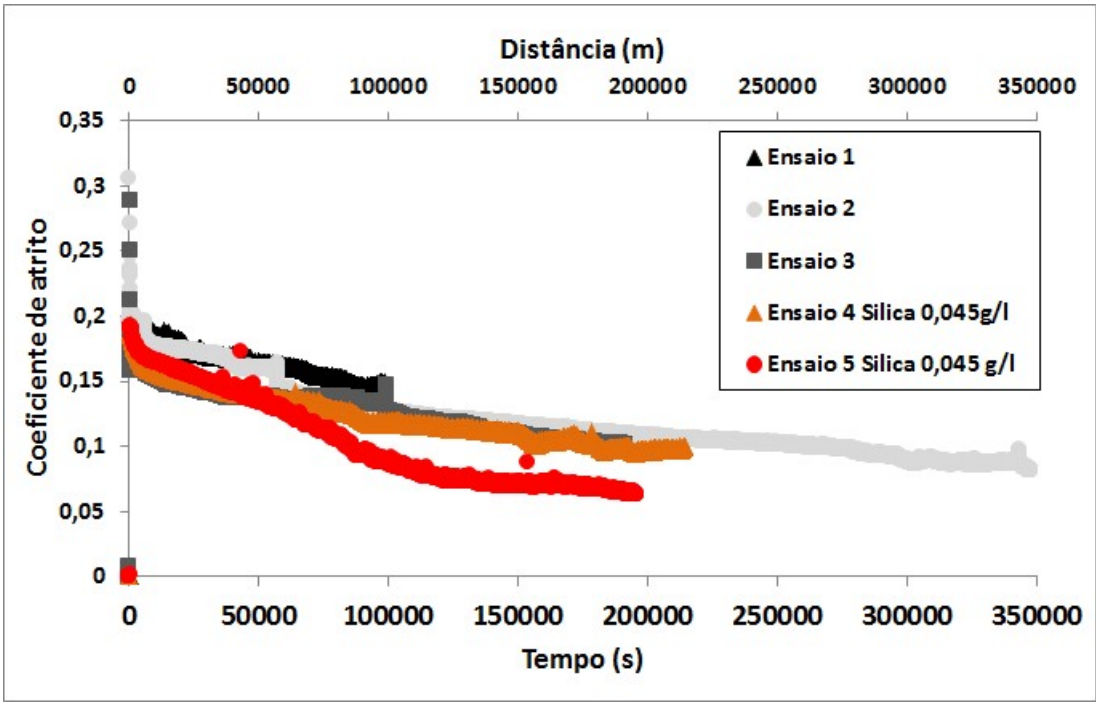

Figura 4.22 – Ensaio preliminar de coeficiente de atrito no par dissimilar Al_2O_3 – Al_2O_3.
Fonte: Autor.

Na figura 4.22, também foi possível verificar que com a adição de sílica na água houve uma redução ainda maior no coeficiente de atrito chegando a valores de até 0,06 após 200000 segundos de teste.

Com estes ensaios preliminares foi possível determinar algumas condições para os ensaios seguintes, como, por exemplo, um volume mínimo necessário de água de aproximadamente 900 mL, devido à evaporação durante o ensaio.

A partir destes testes iniciais notou-se que a limpeza dos discos era de fundamental importância para a obtenção dos dados, uma vez que, quando os discos ficavam muito tempo guardado em sacos plásticos ou manuseado sem luvas de látex, uma pequena deposição de polímeros e gorduras na superfície alterava o comportamento tribológico do sistema.

Também, foi possível verificar que a resposta do sistema é dependente da temperatura, logo os testes foram todos feitos em temperatura ambiente, entre 20°C e 23°C.

Além disso, foi avaliado que o erro geométrico na montagem do sistema (batimento) interfere no comportamento, uma vez que demora mais tempo para obtermos uma trilha uniforme. Portanto foi estipulado um erro máximo de batimento de 20 micrômetros, segundo o aprimoramento feito em (93).

Com base nessas restrições procederam-se as demais séries de ensaios

4.4.2 Interpretação dos sinais de atrito no deslizamento do par Al_2O_3 – Al_2O_3 em água deionizada.

Devido à indisponibilidade de uma grande quantidade de discos aliado ao fato da morosidade e da complexidade da preparação das superfícies, neste trabalho cada face do disco foi utilizada três vezes em raios de trilhas diferentes (15 mm, 19 mm e 23 mm). Logo, a interpretação dos sinais de atrito de todos os ensaios requer notar que cada ponto do gráfico espelham valores espaçados entre 6,9 e 212,2 (23 mm de raio com 0,1 m/s de velocidade e 15 mm de raio do disco com 2 m/s de velocidade respectivamente) rotações do disco. Ou seja, cada pico da figura não retrata, certamente, o contato individual entre asperezas da esfera e do disco. Entretanto, como mostrado nas figuras 4.23 e 4.24, gráfico polar que mostra os pontos medidos e o valor do coeficiente de atrito em função da posição no disco, devido a grande quantidade de postos experimentais, em grande parte da superfície do disco houve ao menos uma medida de atrito.

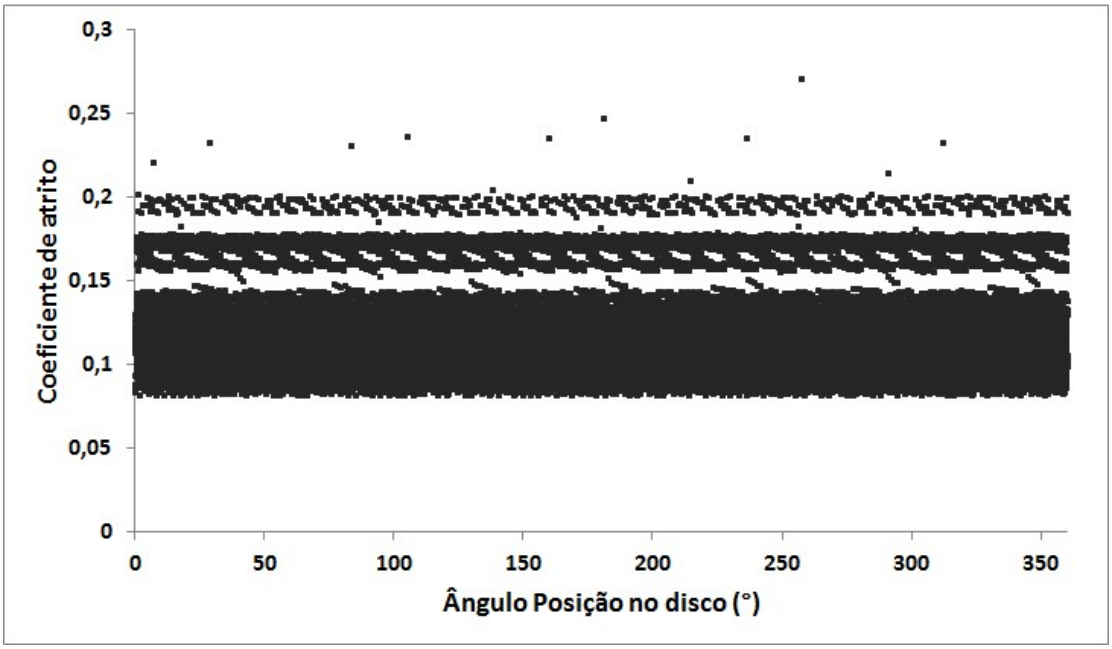

Figura 4.23 – coeficiente de atrito em função da posição do disco no ensaio padrão. Fonte: Autor.

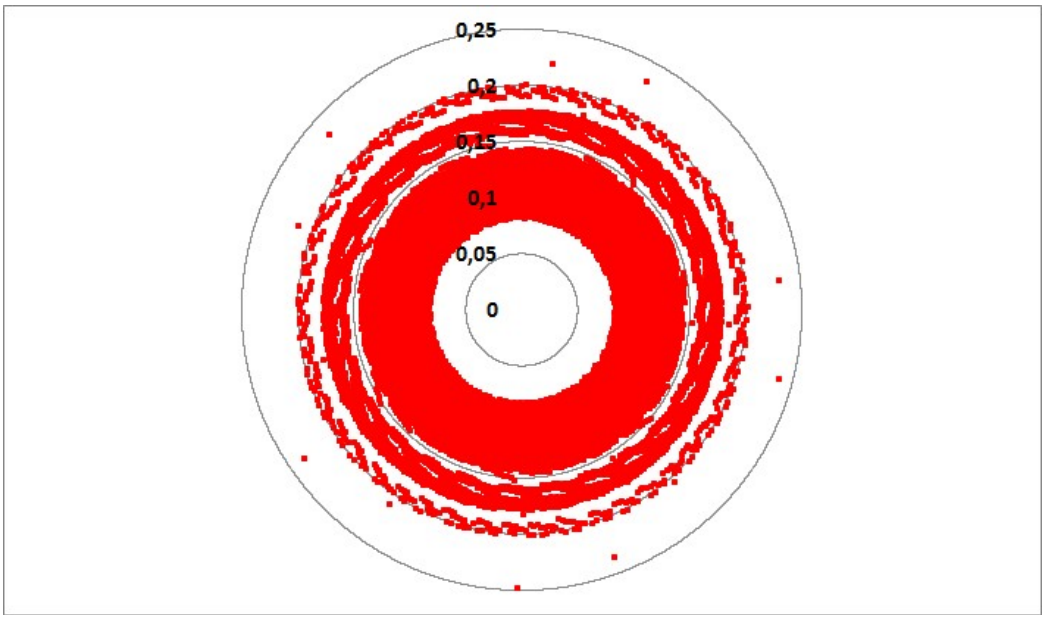

Figura 4.24 – coeficiente de atrito em função da posição do disco no ensaio padrão. Fonte: Autor.

Neste trabalho não foi levado em consideração o fato de que em trilhas com raios de diferentes tamanhos o número de contatos com a mesma parte do disco se altera; foram considerados o tempo de ensaio e a distância percorrida pela esfera sobre o disco. Na tabela 4.13 estão os valores do número de voltas por segundo em função do raio da trilha e da velocidade, que a esfera percorre sobre o disco.

Tabela 4.13 – número de voltas por segundo em função do raio da trilha e da velocidade

Número de voltas por segundo – Frequência (s^{-1})					
	Velocidade m/s				
Raio da trilha (mm)	**0,1**	**0,5**	**1,0**	**1,5**	**2,0**
15	1,06 ± 0,35	5,3 ± 0,8	10,6 ± 1,5	15,9 ± 2,1	21,2 ± 2,8
19	0,84 ± 0,27	4,2 ± 0,5	8,4 ± 0,9	12,6 ± 1,3	16,8 ± 1,8
23	0,69 ± 0,22	3,5 ± 0,4	6,9 ± 0,6	10,4 ± 0,9	13,8 ± 1,2

Fonte: Autor.

4.4.3 Ensaio Padrão

Os denominados ensaios padrão, foram os realizados para servir como parâmetro de comparação com os demais testes. Nesses testes nenhum composto foi adicionado a água e foram utilizados discos não polidos. Os parâmetros utilizados neste teste estão resumidos na tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Variáveis de processo utilizadas nos ensaios padrão.

Temperatura	22 ± 3 °C
Velocidade	1,00 ± 0,03 m/s
Carga	54,0 ± 0,6 N
pH da água	6,1 ± 0,2
Tempo de ensaio	≈ 360000 s

Fonte: Autor.

A figura 4.25 mostra o comportamento do coeficiente de atrito em função da distância e do tempo para os ensaios padrão. Como foi possível perceber, houve uma pequena dispersão nos resultados de atrito, mas o comportamento das curvas foi uniforme sendo um pico inicial que pode chegar a μ ≈ 0,4 e depois uma queda para valores entre 0,1 e 0,2 seguida por uma queda menos acentuada até atingir os valores finais de coeficiente de atrito.

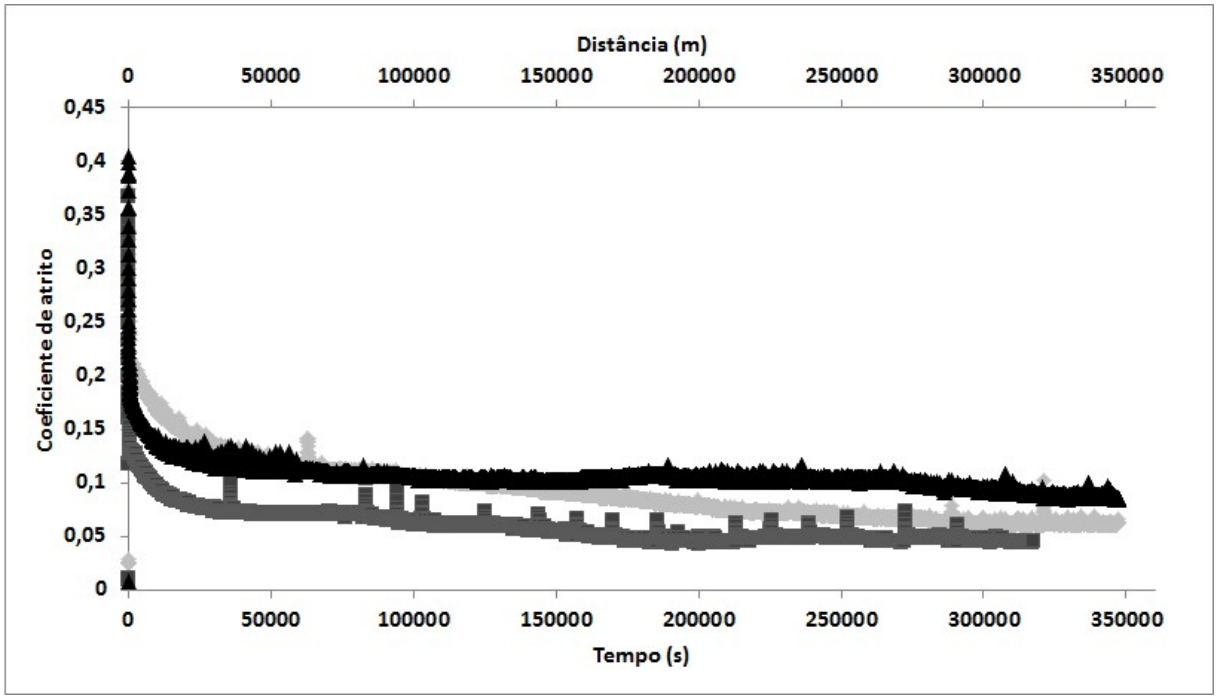

Figura 4.25 – Curvas de coeficiente de atrito no ensaio padrão. Fonte: Autor.

Analisando a parte final da curva (≈ 10% final de cada curva), obteve-se um valor médio para o coeficiente de atrito de **μ = 0,065 ± 0,021**, valor que está abaixo dos valores relatados na literatura (μ ≈ 0,2 (19)(20)(21)).

4.4.3.1 Rugosidade no ensaio Padrão

A tabela 4.15 mostra os valores de rugosidade antes e após os ensaios padrão.

Tabela 4.15 – Parâmetros de rugosidade e isotropia antes a após os ensaios padrão.

	Pré ensaio	**Pós-Ensaio Padrão**
Esfera		
Sq (µm)	0,135 ± 0,009	0,144 ± 0,024
Sa (µm)	0,099 ± 0,006	0,108 ± 0,016
Sk (µm)	0,139 ± 0,009	0,255 ± 0,039
Spk (µm)	0,113 ± 0,018	0,182 ± 0,056
Svk (µm)	0,166 ± 0,016	0,153 ± 0,045
vv (µm³/µm²)	0,148 ± 0,010	0,191 ± 0,028
Isotropia (%)	52,290 ± 4,385	3,666
Disco não polido		
Sq (µm)	0,538 ± 0,014	0,164 ± 0,010
Sa (µm)	0,421 ± 0,012	0,113 ± 0,015
Sk (µm)	1,126 ± 0,054	0,236 ± 0,055
Spk (µm)	0,231 ± 0,014	0,173 ± 0,053
Svk (µm)	0,732 ± 0,016	0,247 ± 0,032
Vv (µm³/µm²)	0,605 ± 0,022	0,185 ± 0,038
Isotropia (%)	86,402 ± 0,786	54,240
Rugosidade combinada		
Sq (µm)	0,554 ± 0,016	0,218 ± 0,026

Fonte: Autor.

A partir dos dados da tabela 4.15 foi possível perceber que na esfera os parâmetros Sa e Sq se mantiveram nos mesmos patamares, apesar da formação de uma calota. Nos parâmetros Sk e Spk houve um aumento significativo (Sk ≈ 83% e Spk ≈ 61%) indicando um aumento da quantidade de picos de aspereza na superfície.

No disco houve um alisamento da superfície indicado por todos os parâmetros de rugosidade.

Como também foi possível perceber a partir da tabela houve uma diminuição da isotropia da superfície causada pela direcionalidade dos ensaios.

Na tabela 4.16 foram colocados os dados de porcentagem de área coberta por poros após o ensaio padrão. E como foi possível perceber houve uma diminuição nos valores de porosidade em relação aos discos e esferas antes dos ensaios. Essa redução está ligada ao fato dos debris se alojarem nos poros assim como nos produtos gerados por reação triboquímica ficarem depositados na superfície do material.

Tabela 4.16 – Valores de porosidade superficial após o ensaio padrão.

	Porosidade (%)
Esfera	5,6 ± 0,6
Disco	6,2 ± 2,5

Fonte: Autor.

A figura 4.26 mostra perfis de rugosidade do platô da esfera e da trilha do disco na mesma escala.

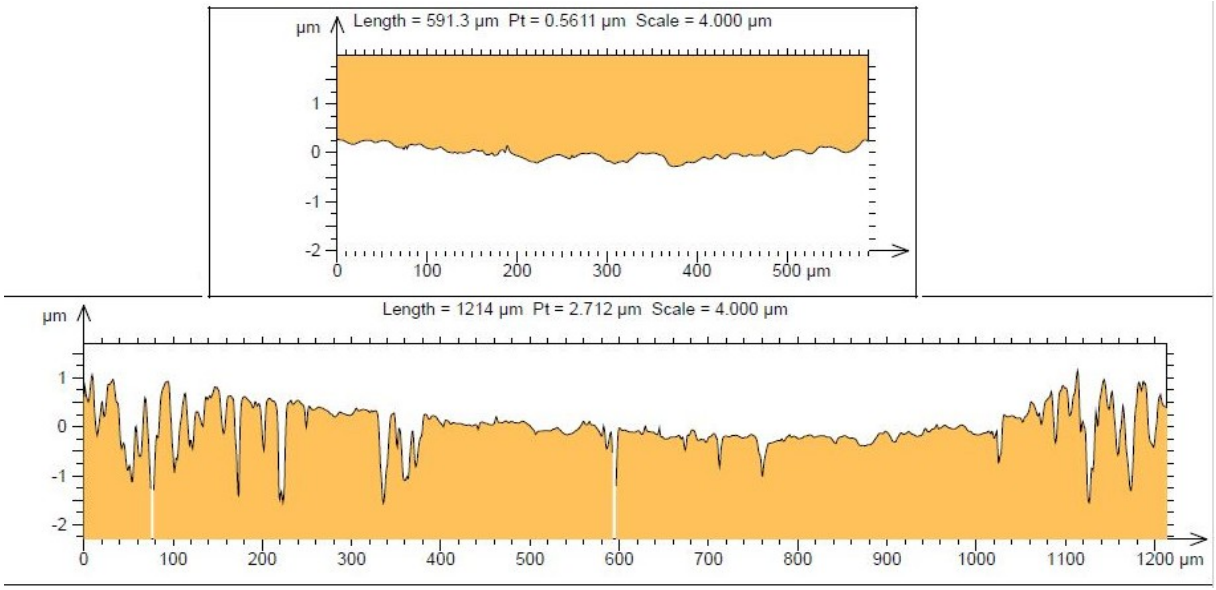

Figura 4.26 – Perfil de rugosidade formado na esfera e no disco. Fonte: Autor.

A partir da figura 4.26 foi possível perceber que a calota formada na esfera (parte de cima do desenho) não é plana, ou seja, tem um perfil que acompanha a forma da trilha de desgaste. Além disso, foi possível ver que houve um alisamento da superfície na região da trilha de desgaste, como demonstrado numericamente pelos parâmetros de rugosidade. Também foi possível perceber que na região da trilha do disco há um número menor de vales quando comparamos com a região fora da trilha ou com o perfil do disco antes do ensaio, evidenciando que há materiais

depositados nos fundos dos vales após o ensaio.

A figura 4.27 mostra uma representação 3D da trilha de desgaste.

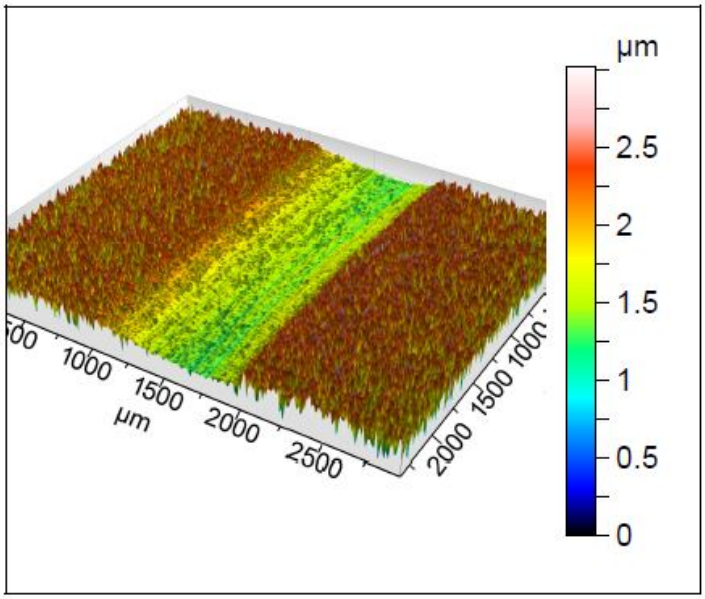

Figura 4.27 – Representação 3D da trilha de desgaste no ensaio padrão. Fonte: Autor.

4.4.3.2 Desgaste no ensaio Padrão

A tabela 4.17 sumariza os valores de taxa de desgaste tanto no disco quanto na esfera após o ensaio padrão, assim como o valor de pressão de contato no final do ensaio.

Tabela 4.17 – Taxa de desgaste e pressão de contato final.

Disco	
Desgaste (µm³/(N*m))	10,0 ± 3,3
Esfera	
Desgaste (µm³/(N*m))	5,0 ± 0,8
Pressão de contato (MPa)	21,4 ± 1,9

Fonte: Autor.

Foi possível perceber que a taxa de desgaste no disco é maior que na esfera, possivelmente provocado pelo fato de a área desgastada no disco (≈ 119,4 mm²) ser bem maior que a área desgastada na esfera (2,311 ± 0,006 mm²). Fato ocasionado pela geometria dos corpos e pela geometria do ensaio.

As figuras 4.28, 4.29a e 4.29b mostram microfotografias das superfícies desgastadas da esfera e do disco respectivamente

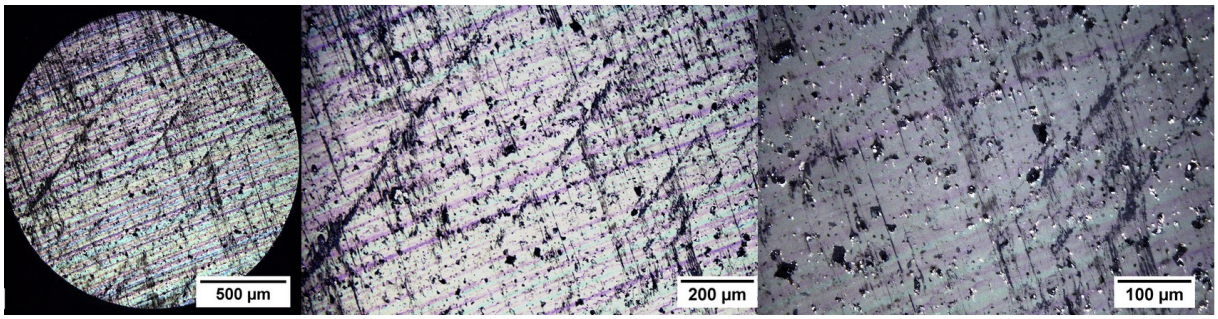

Figura 4.28 – fotomicrografia da calota esférica formada no ensaio. Fonte: Autor.

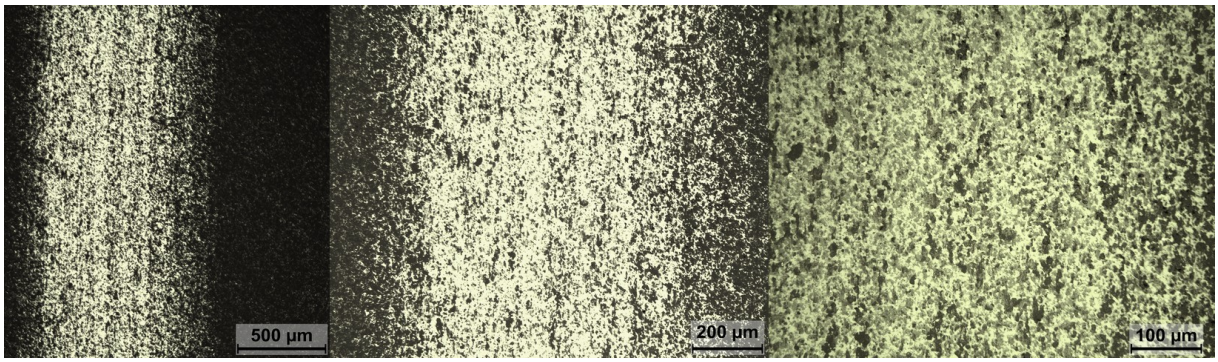

Figura 4.29a – Microfotografia da trilha formada no disco. Fonte: Autor.

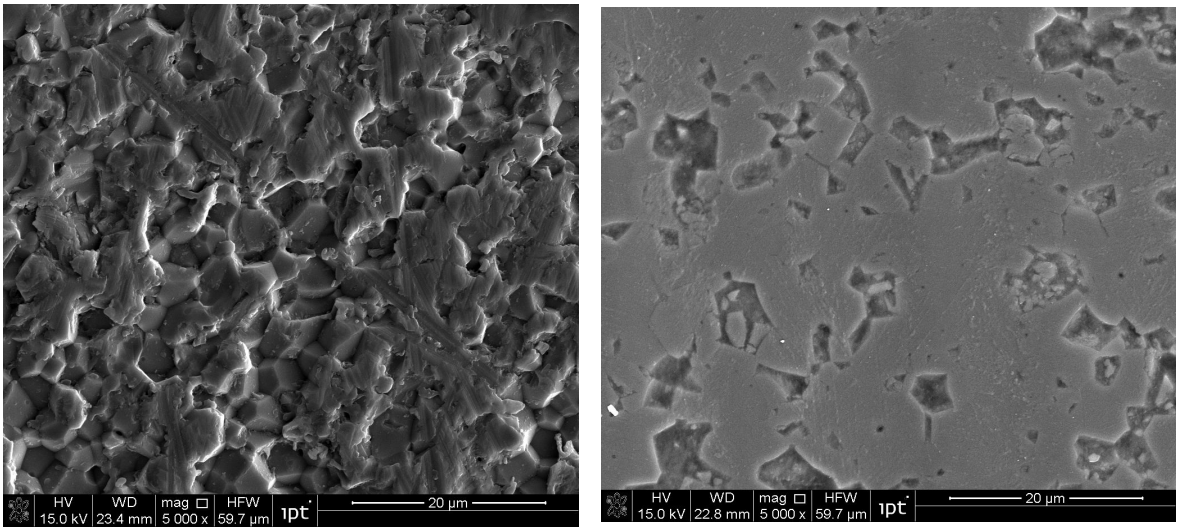

Figura 4.29b – Microfotografia da trilha formada no disco. Fonte: Autor.

4.4.3.3 Comparação entre os ensaios Alumina – Alumina e Alumina – nitreto de silício

Com o objetivo de se determinar a diferença entre ensaios realizados com esferas de nitreto de silício e esferas de alumina foi realizada uma breve

comparação entre os ensaios com alumina (realizados durante este trabalho) e os ensaios realizados com nitreto de silício (realizados durante o mestrado (1)). Todos os ensaios foram realizados nas mesmas condições experimentais. As variáveis são as mesmas utilizadas na tabela 4.14 exceto no tempo onde para os ensaios com esfera de nitreto de silício utilizou-se 6000 s e para esferas de alumina utilizou-se 21000 s que foram cortados em 10000 s na análise dos resultados.

A figura 4.30 mostra os valores de coeficiente de atrito para os dois tipos de ensaio.

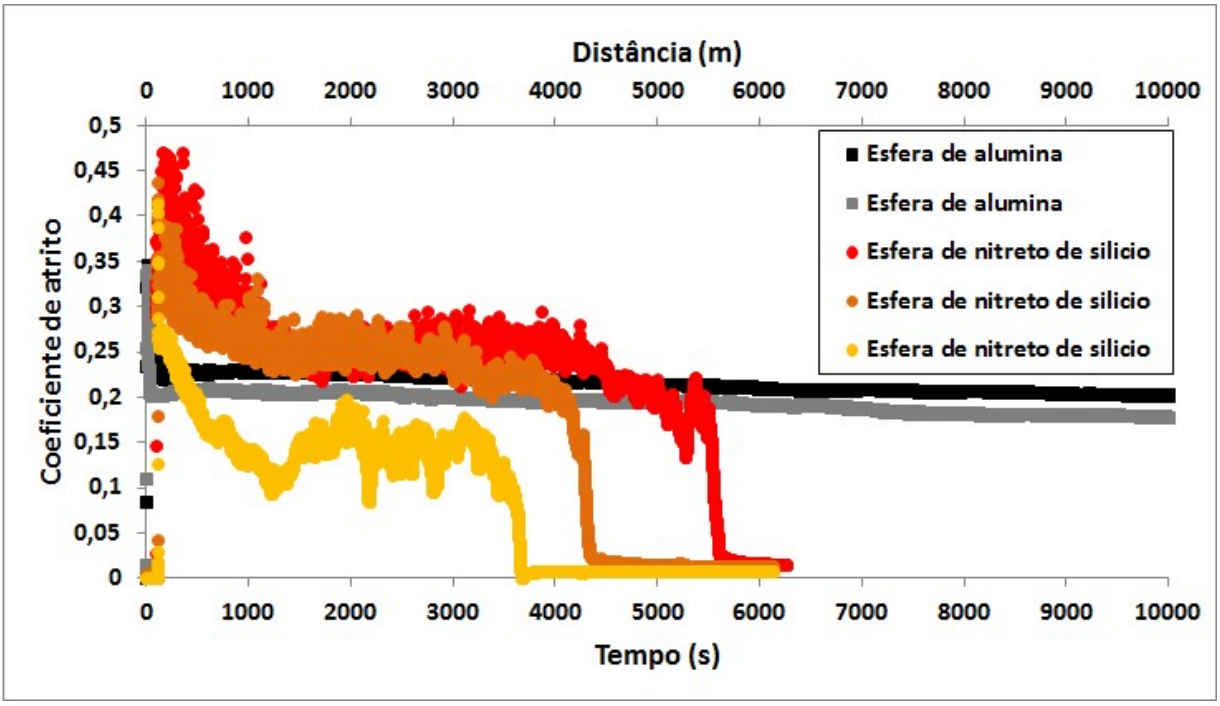

Figura 4.30 – Comparação entre ensaios com esferas de nitreto de silício e esferas de alumina. Fonte: Autor.

É possível perceber que os ensaios têm características diferentes. Quando a esfera foi feita de nitreto de silício, no começo há muitas oscilações no valor do coeficiente de atrito – *running in* – e após um período de tempo que varia entre 3500 e 5500 s essas oscilações diminuem. Após esse período de running in o valor de coeficiente de atrito sofre uma grande variação no seu valor e se mantêm em patamares com valores muitas vezes menores que 0,01. Quando se utiliza esferas de alumina considerando o mesmo intervalo de tempo, foi observado que a curva decai constantemente, com poucas ou nenhuma oscilação no seu valor.

No caso quando se usa esferas de nitreto de silício, essa queda no valor do

coeficiente de atrito está ligada ao fato de ocorrer uma reação triboquímica entre o nitreto de silício e a água, formando sílica que contribui decisivamente para a redução dos valores pois auxilia a lubrificação hidrodinâmica com uma sustentação eletrostática extra (1).

A figura 4.31 mostra a comparação de valores médios de coeficiente de atrito para os ensaios com nitreto de silício a de alumina após 6000 s.

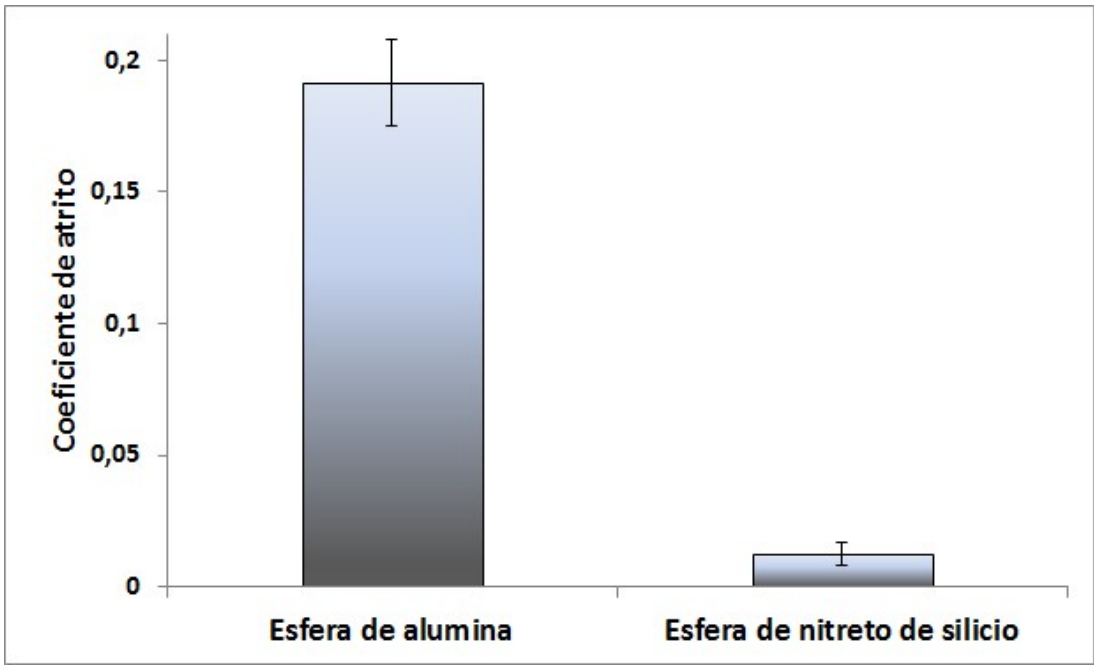

Figura 4.31 – Comparação do coeficiente de atrito final entre ensaios com esferas de nitreto de silício e esferas de alumina. Fonte: Autor.

Como foi possível perceber a diferença no valor de coeficiente de atrito pode chegar a duas ordens de grandeza.

4.4.3.3.1 Desgaste relativo e comparação entre os ensaios Alumina – Alumina e Alumina – nitreto de silício

A tabela 4.18 mostra a diferença na taxa de desgaste do disco de alumina quando o ensaio foi feito com esfera de nitreto de silício e quando o ensaio foi feito com esfera de alumina.

Tabela 4.18 – Taxa de desgaste no disco de alumina.

Taxa de desgaste no disco (μm³/(N*m))	
Nitreto de silício	**Alumina**

1231,6 ± 55,6	64,90 ± 3,05

Fonte: Autor.

Como podemos notar a taxa de desgaste com nitreto de silício é duas ordens de grandeza maior, mesmo sendo realizado em uma distância de deslizamento de 6000 m contra uma distância de 21000 m do ensaio de alumina, ambos com a mesma carga.

A figura 4.32 mostra uma representação gráfica do disco pós ensaio de nitreto de silício.

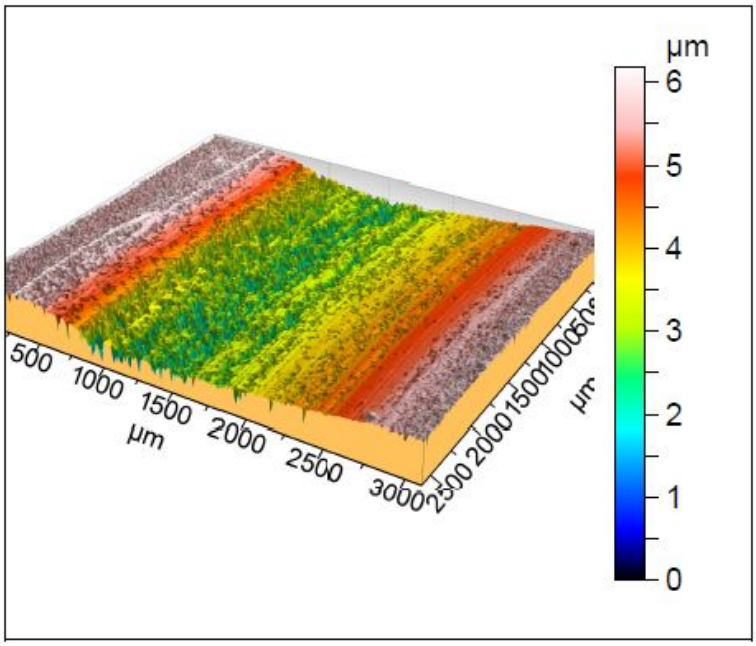

Figura 4.32 – Representação 3D da trilha formada no disco. Fonte: Autor.

Comparando com a figura 4.27 foi possível perceber que o comprimento e a profundidade da trilha de desgaste é maior comparando ao ensaio padrão. Também foi possível notar que o valor de rugosidade nesse ensaio é maior que o ensaio com alumina (Sq ≈ 0,30 nitreto de silício, Sq ≈ 0,14 alumina).

A figura 4.33 mostra microfotografias do disco após os ensaios e a figura 4.34 mostra microfotografias da esfera após os ensaios.

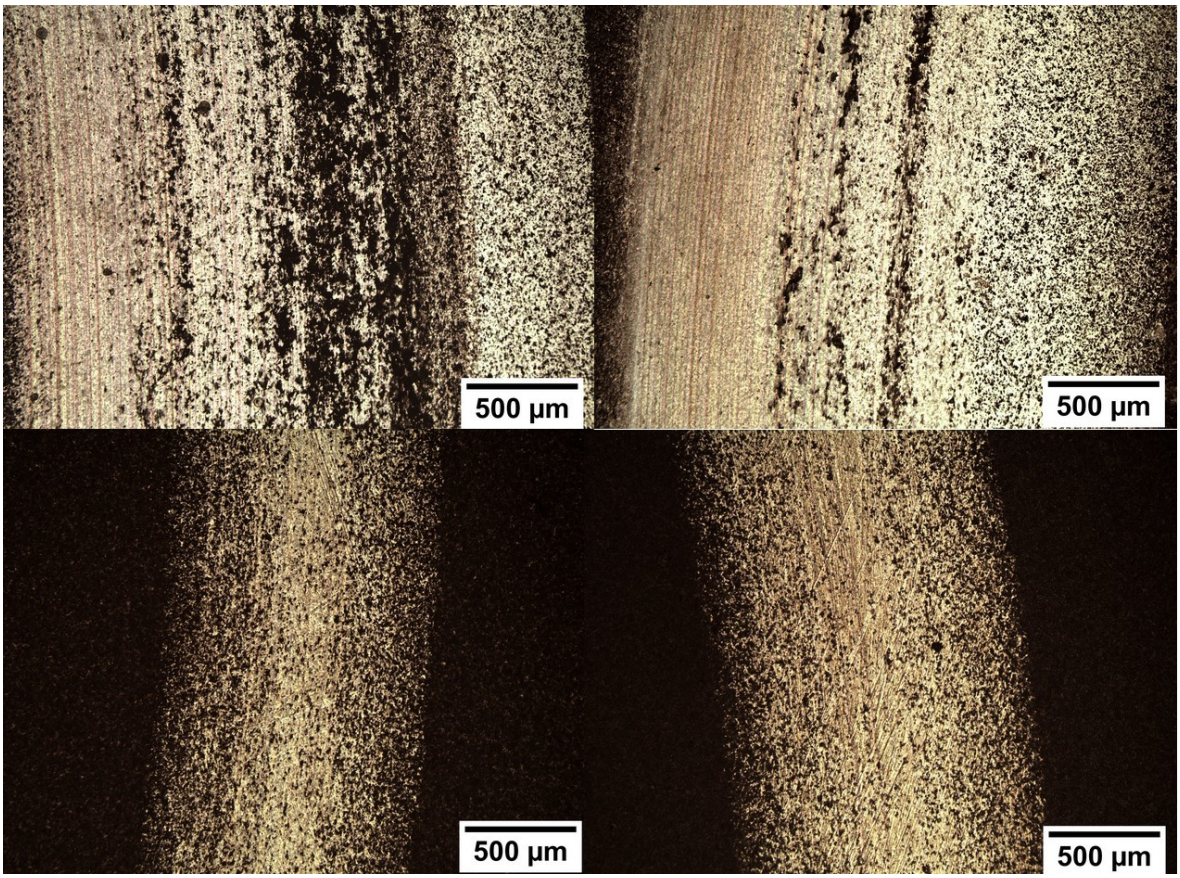

Figura 4.33 – Microfotografias das trilhas formadas no disco. Acima esfera de nitreto de silício e abaixo esfera de alumina. Fonte: Autor.

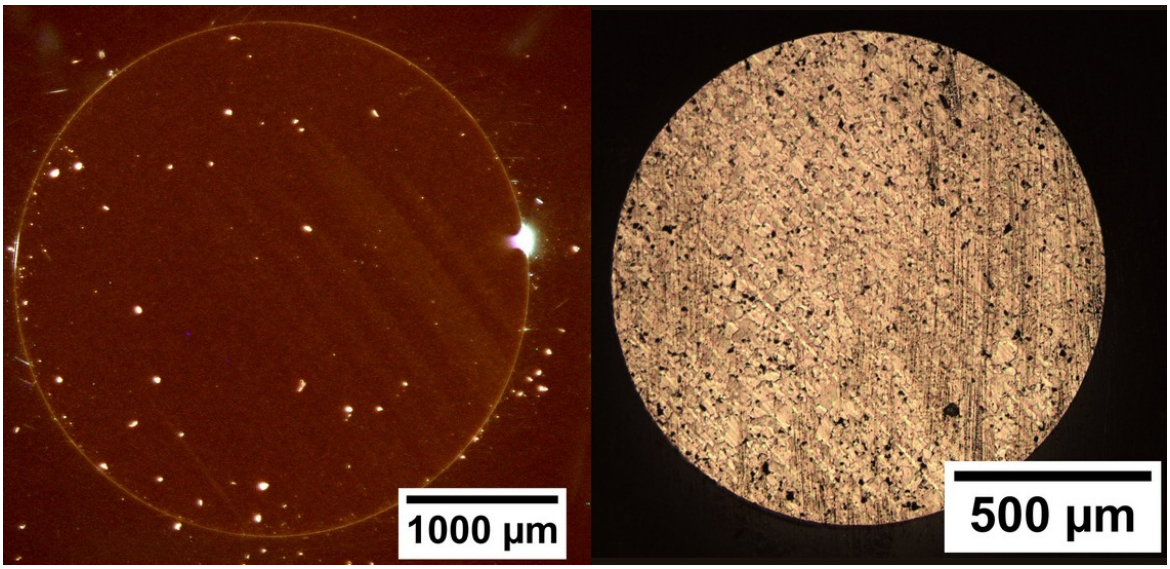

Figura 4.34 – microfotografias das calotas formadas nas esferas. Na esquerda esfera de nitreto de silício e na direita esfera de alumina. Fonte: Autor.

Como foi possível notar, as marcas no disco e nas esferas são maiores no ensaio com nitreto de silício evidenciando um maior desgaste nesse ensaio.

4.4.4 Efeito da velocidade

As figuras 4.35 e 4.36 mostram, respectivamente, o efeito da velocidade do ensaio no coeficiente de atrito em relação ao tempo e a distância percorrida.

A tabela 4.19 mostra as velocidades de ensaio utilizadas nos testes, assim como o nome dado a cada ensaio. Nesses ensaios, foram utilizados carga de 54,0 ± 0,6 N, pH da água em 6,1 ± 0,2 e temperatura de 22 ± 3°C, foram utilizados cinco valores diferentes de velocidade para tentar entender como este parâmetro influencia no valor de coeficiente de atrito e na taxa de desgaste.

Tabela 4.19 – Velocidades utilizadas nos ensaios.

Designação do ensaio	Velocidade do ensaio (m/s)
0,1 m/s	0,10 ± 0,03
0,5 m/s	0,50 ± 0,03
1 m/s (padrão)	1,00 ± 0,03
1,5 m/s	1,50 ± 0,03
2 m/s	2,00 ± 0,03

Fonte: Autor.

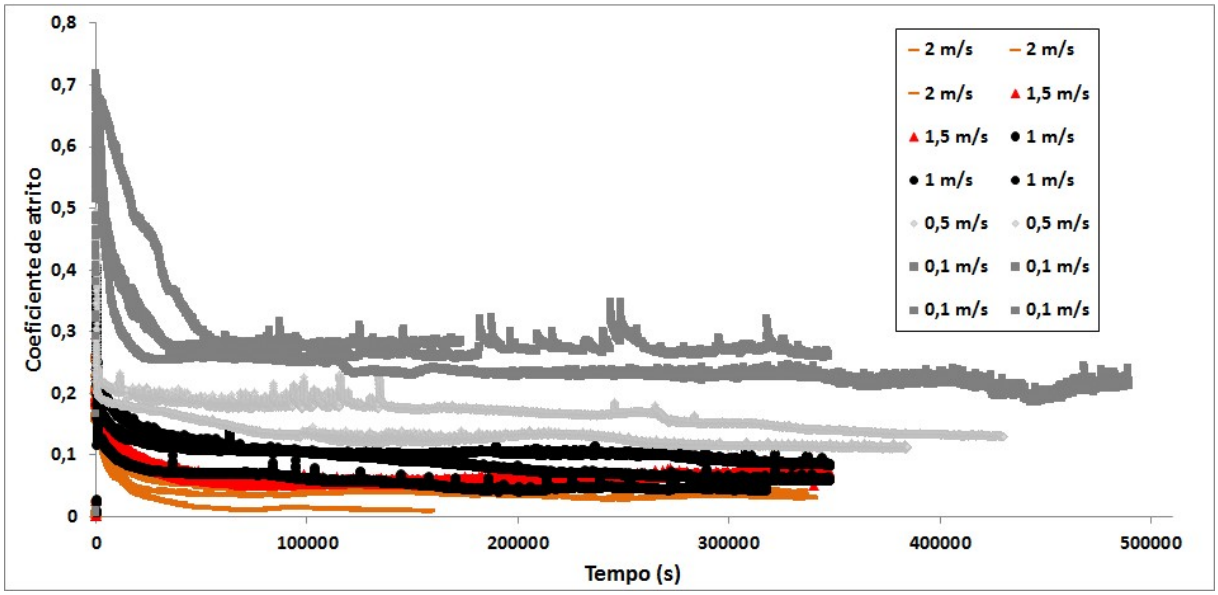

Figura 4.35 – Coeficiente de atrito em função do tempo no deslizamento do par alumina – alumina nos ensaios com diferentes velocidades. Fonte: Autor.

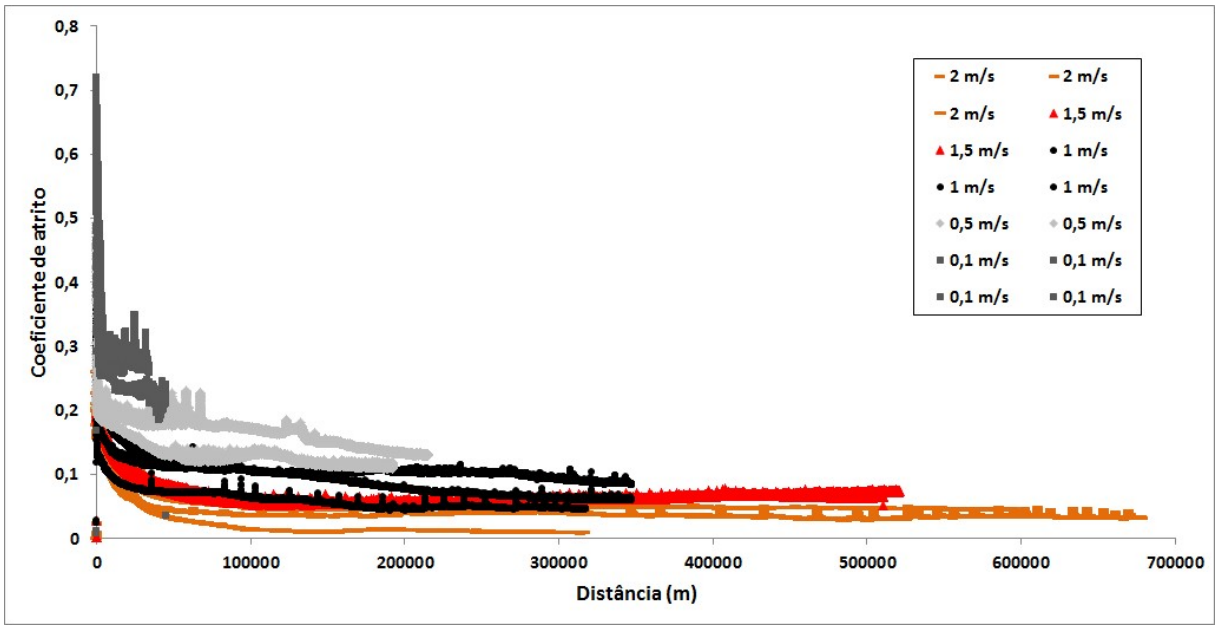

Figura 4.36 – Coeficiente de atrito em função da distância no deslizamento do par alumina – alumina nos ensaios com diferentes velocidades. Fonte: Autor.

Como foi possível perceber nas curvas das figuras 4.35 e 4.36 o coeficiente de atrito foi fortemente dependente da velocidade de ensaio entre 0,1 m/s e 2 m/s. Para as maiores velocidades de ensaio o valor do coeficiente de atrito foi menor, já em menores velocidades o coeficiente de atrito foi maior, o que pode indicar uma tendência de o controle do coeficiente de atrito depender de se atingir regime hidrodinâmico. Pode-se ver também que quando os ensaios foram realizados com velocidade de 2 m/s alcançou-se os menores valores de coeficiente de atrito. Em alguns casos estes valores estão próximos aos valores de coeficiente de atritos obtidos no par alumina – nitreto de silício ($0{,}004 < \mu < 0{,}008$).

Nos ensaios com velocidade menor, também foi menor a distância percorrida no deslizamento. Para se realizar um ensaio onde a distância percorrida no ensaio de 0,1 m/s e 2 m/s seja a mesma, seria necessário um ensaio de aproximadamente 41 dias.

A comparação dos trechos iniciais das curvas que correspondem às mesmas distâncias percorridas com as diferentes velocidades mostrou que os coeficientes de atrito são menores para as maiores velocidades. Isso reforça o peso do regime de lubrificação no controle do coeficiente de atrito.

A análise da parte final das curvas de atrito (≈ 10% final de cada curva) evidencia uma tendência de queda de coeficiente de atrito com o aumento da

velocidade, como mostrado na figura 4.37.

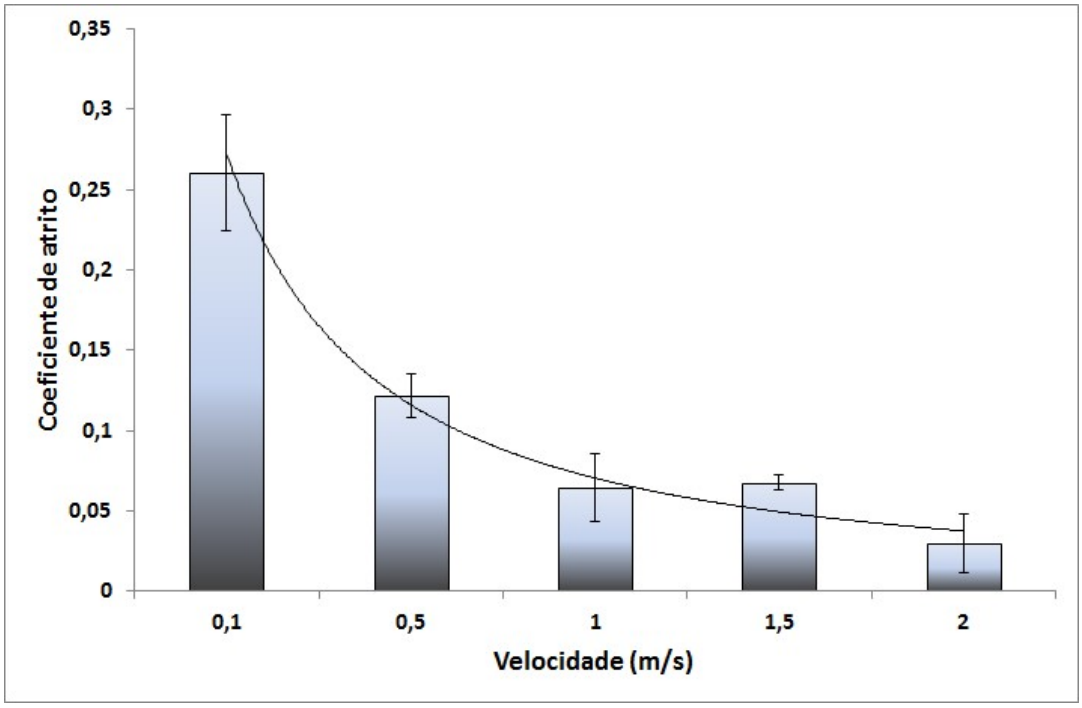

Figura 4.37 – Coeficiente de atrito no final dos ensaios. Fonte: Autor.

4.4.4.1 Parâmetros de rugosidade no efeito da velocidade

As figuras 4.38 e 4.39 mostram a comparação entre os valores de rugosidade obtidos após os testes com velocidades diferentes.

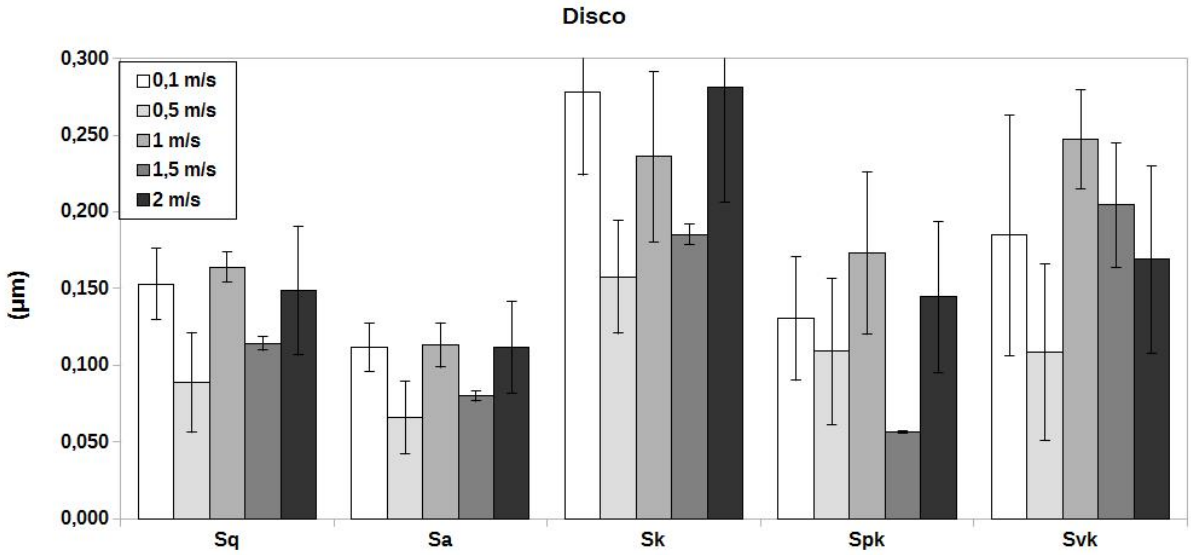

Figura 4.38 – Parâmetros de rugosidade no disco. Fonte: Autor.

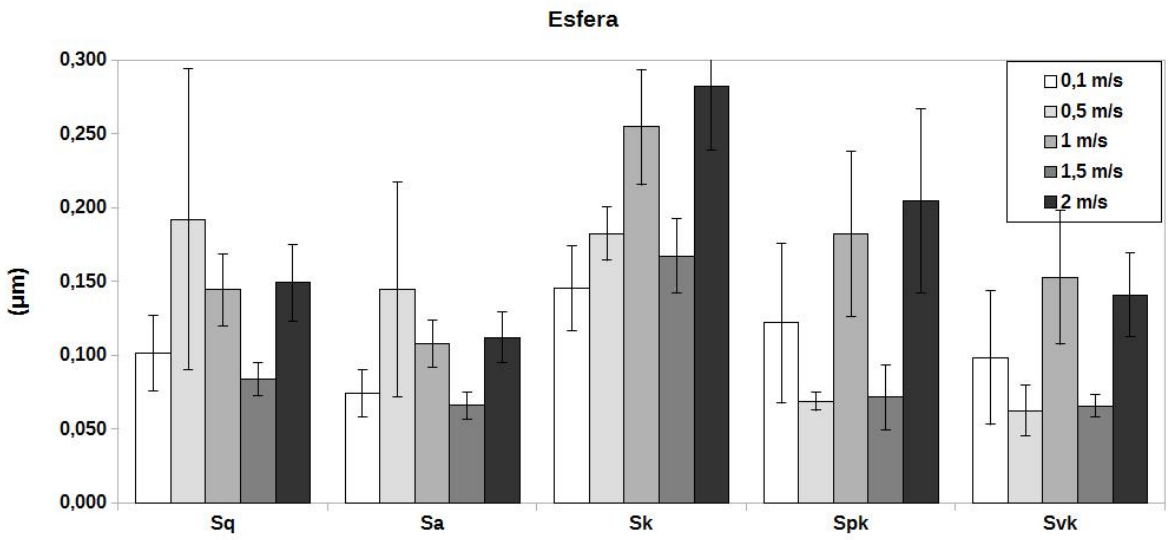

Figura 4.39 – Parâmetros de rugosidade na esfera. Fonte: Autor.

A partir dos dados das figuras 4.38 e 4.39 não foi possível estabelecer nenhuma tendência relativa aos dados de rugosidade entre os ensaios.

A tabela 4.20 mostra os valores de rugosidade combinada em função da velocidade.

Tabela 4.20 – Rugosidade combinada em função da velocidade.

	Rugosidade combinada				
	0,1 m/s	**0,5 m/s**	**1 m/s**	**1,5 m/s**	**2 m/s**
Sq (µm)	0,18 ± 0,04	0,21 ± 0,11	0,218 ± 0,026	0,142 ± 0,012	0,21 ± 0,05

Fonte: Autor.

4.4.4.2 Desgaste relativo ao efeito da velocidade

Na tabela 4.21 e na figura 4.40 estão descritos alguns parâmetros de taxa de desgaste e pressão de contato relativo aos ensaios.

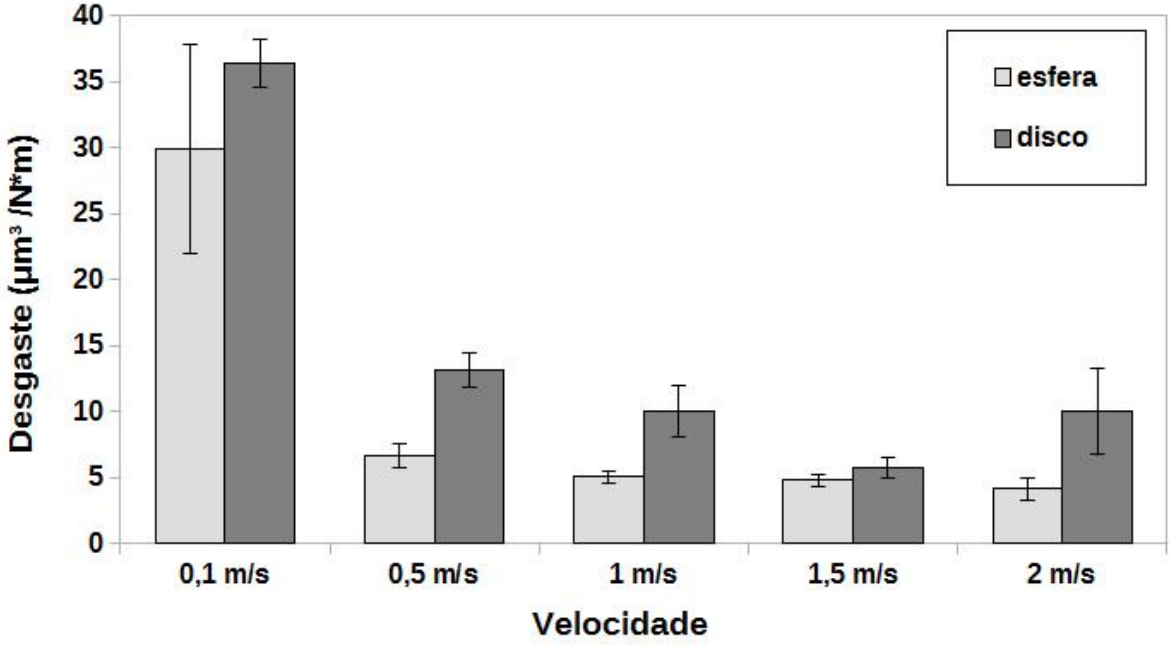

Figura 4.40 – Taxa de desgaste em função do efeito da velocidade. Fonte: Autor.

Tabela 4.21 – Taxa de desgaste e pressão de contato em função do efeito da velocidade

	Velocidade (m/s)				
Disco	0,1	0,5	1	1,5	2
Desgaste (µm³/(N*m))	36,3 ± 1,8	13,1 ± 1,3	10,0 ± 1,9	5,8 ± 0,8	10,0 ± 0,8
Esfera					
Desgaste (µm³/(N*m))	29,9 ± 7,9	6,7 ± 0,9	5,1 ± 0,5	4,8 ± 0,5	4,1 ± 3,3
Pressão de contato (MPa)	38,8 ± 0,3	25,05 ± 0,17	21,37 ± 0,15	17,88 ± 0,12	19,86 ± 0,14

Fonte: Autor.

Constata-se com os dados da da figura 4.40 e da tabela 4.21 que a taxa de desgaste sofre uma queda na esfera em função do aumento da velocidade para a esfera. Para o disco essa diminuição ocorre até o valor de 1,5 m/s e depois volta a aumentar. Isso pode indicar uma contribuição hidrodinâmica, uma vez que quanto menor a velocidade, menor a espessura de filme e consequentemente maior o contato entre asperezas aumentando também o desgaste e a taxa de desgaste. Também foi possível notar a partir da figura que o desgaste no disco foi sempre maior do que na esfera.

A figura 4.41 mostra as calotas formadas nas esferas após os ensaios. A figura 4.42 mostra microfotografias das trilhas formadas no disco após o ensaio.

Onde:

a) 0,1 m/s,
b) 0,5 m/s
c) 1 m/s
d) 1,5 m/s
e) 2 m/s

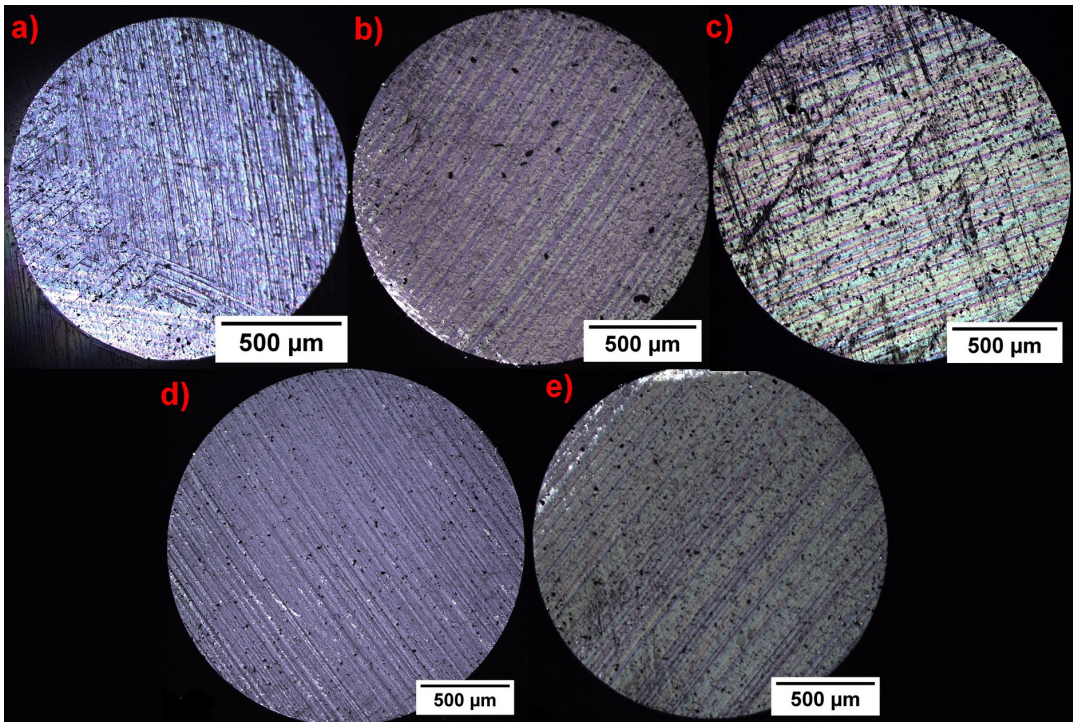

Figura 4.41 – Microfotografia das calotas formadas nas esferas após o ensaio em função da velocidade. Fonte: Autor.

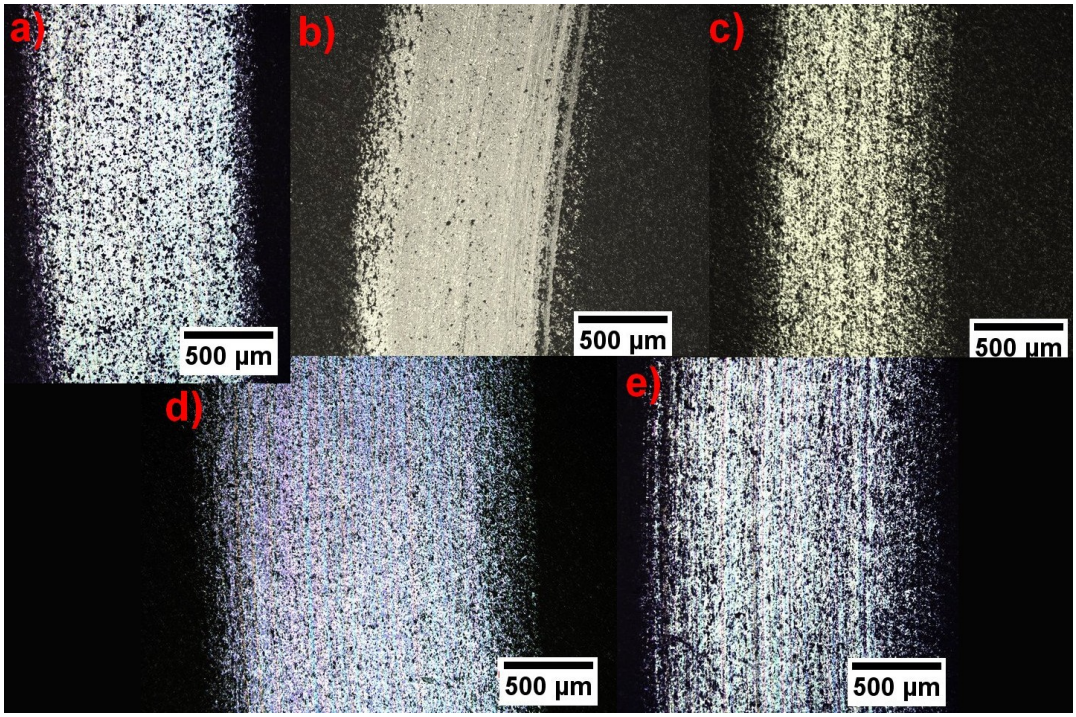

Figura 4.42 – Microfotografia das trilhas formadas nos discos após o ensaio em função da velocidade. Fonte: Autor.

4.4.5 Efeito da carga

A tabela 4.22 mostra os valores de carga aplicada assim como a designação que foi dado a cada ensaio para efeito de identificação. Nesses ensaios foram utilizados a velocidade de 1 m/s, pH da água em 6,1 ± 0,2 e temperatura da água de 22 ± 3°C.

A figura 4.43 mostra o efeito da carga no coeficiente de atrito. Nestes ensaios foram utilizados três valores diferentes de carga para tentar entender como este parâmetro influencia no valor de coeficiente de atrito e na taxa de desgaste.

Tabela 4.22 – Cargas utilizadas nos ensaios.

Designação do Ensaio	Carga Aplicada (N)
24 N	24,7 ± 0,7
54 N (Ensaio Padrão)	54,0 ± 0,6
99 N	100,3 ± 0,8

Fonte: Autor.

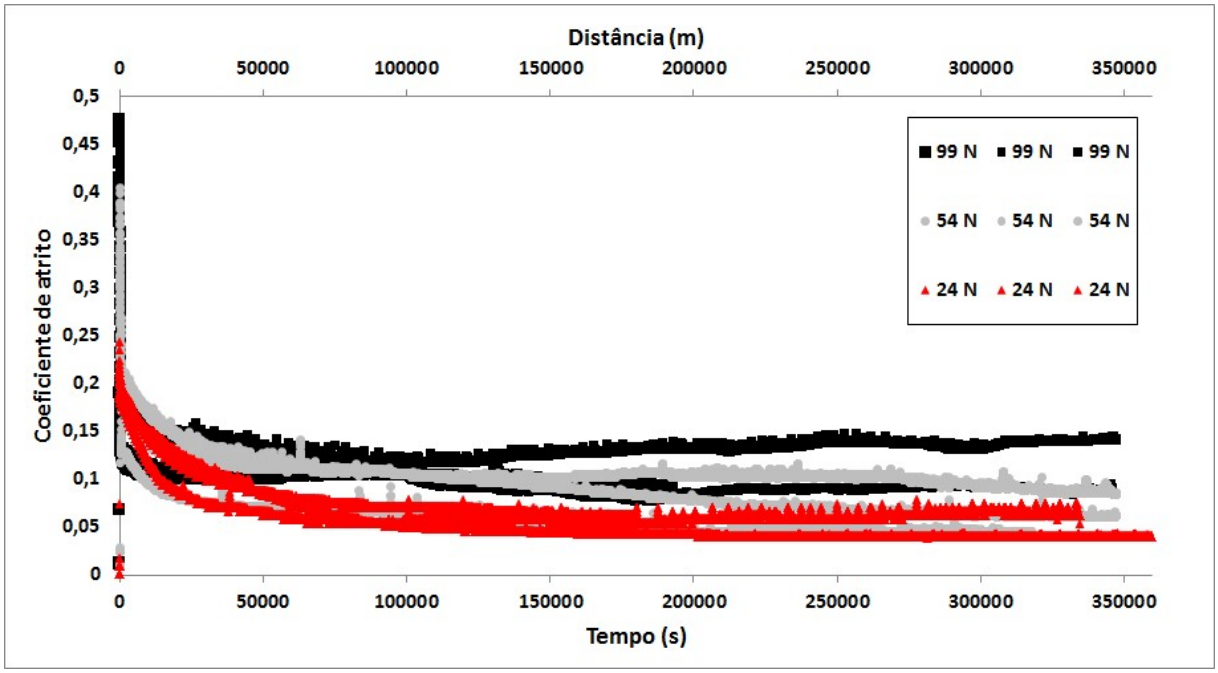

Figura 4.43 – Deslizamento do par alumina – alumina com diferentes cargas iniciais. Fonte: Autor.

A figura 4.44 sumariza o valor de coeficiente de atrito na parte final de cada

ensaio.

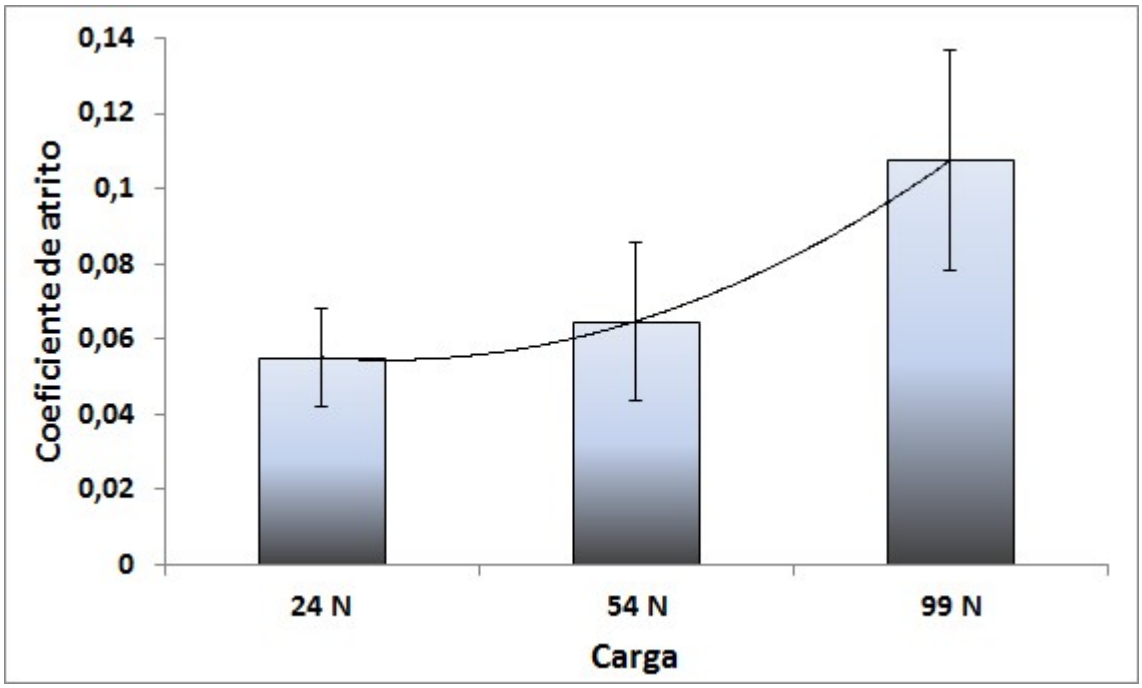

Figura 4.44 – coeficiente de atrito no final dos ensaios. Fonte: Autor.

A partir das figuras 4.43 e 4.44 foi possível verificar que, com o aumento da carga, também há uma tendência no aumento no valor do coeficiente de atrito, indicando que a variável carga influencia diretamente o regime de atrito. A partir desses dados, assim como dos valores de coeficiente de atrito em função da velocidade, foi possível admitir que o regime de coeficiente de atrito segue o que é dado pela curva de Stribeck, pois com o aumento da carga há também um aumento do coeficiente de atrito e com o aumento da velocidade há uma diminuição no coeficiente de atrito. Esse assunto será tratado no decorrer do trabalho.

4.4.5.1 Parâmetros de rugosidade Efeito da carga

As figuras 4.45 e 4.46 mostram os parâmetros de rugosidade após o ensaio para os discos e as esferas nos ensaios com variação de carga.

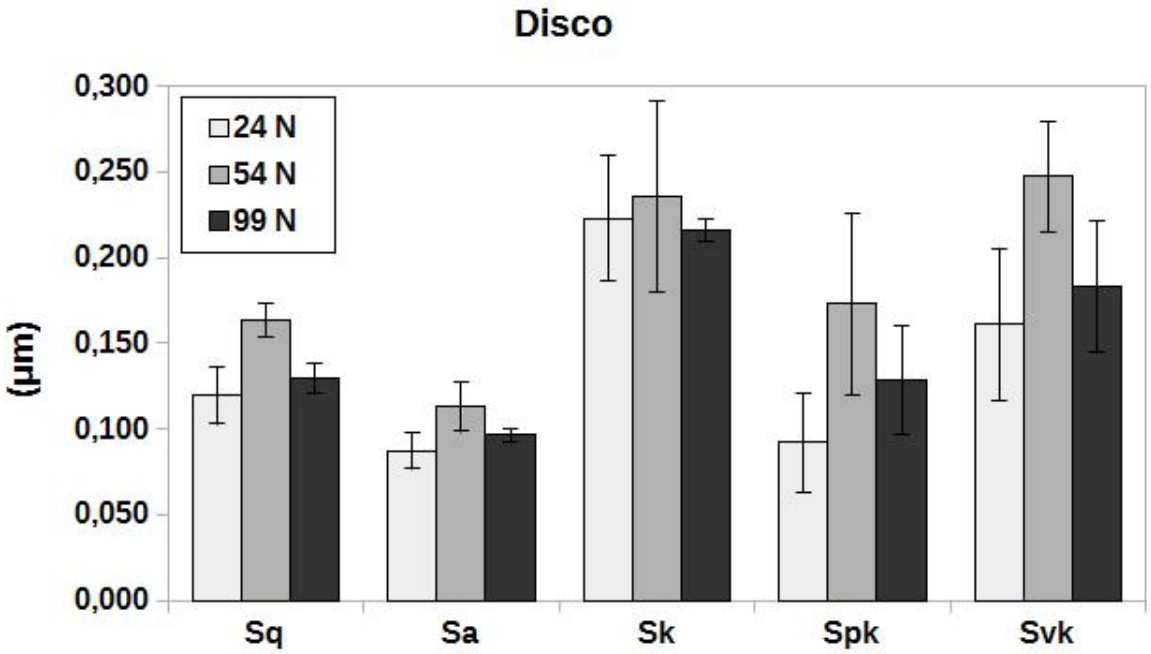

Figura 4.45 – Parâmetros de rugosidade no disco após os ensaios. Fonte: Autor.

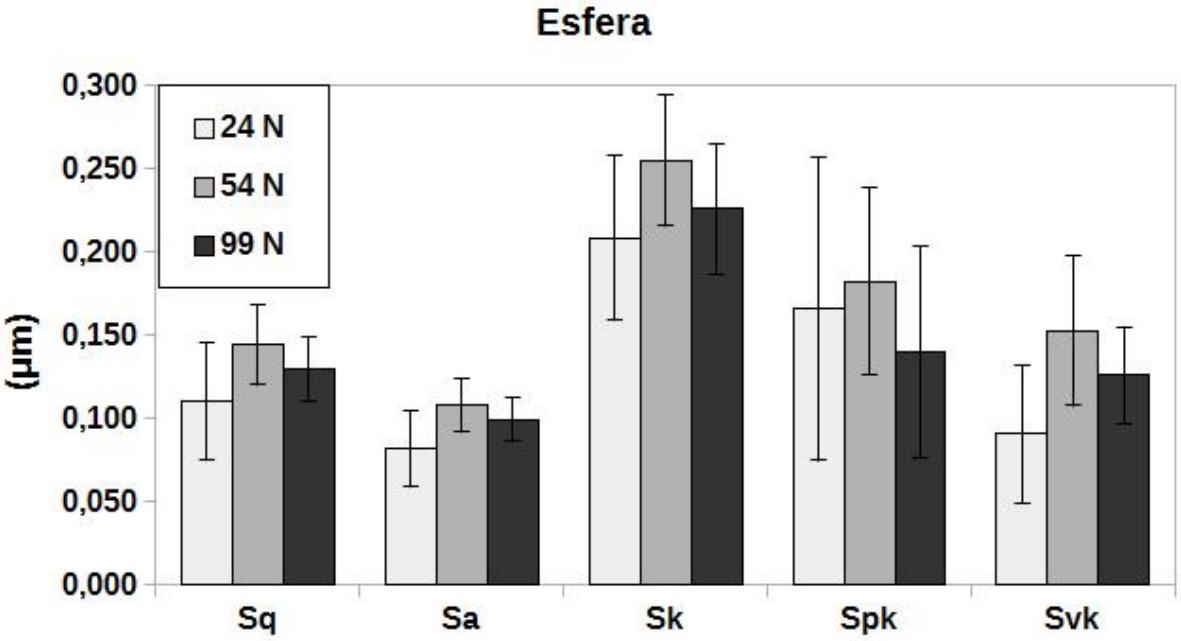

Figura 4.46 – Parâmetros de rugosidade na esfera após os ensaios. Fonte: Autor.

A partir dos parâmetros de rugosidade foi possível perceber que há uma leve queda nos valores, tanto no disco quanto na esfera, quando se aumenta ou quando se diminui a carga no ensaio.

A tabela 4.23 mostra os valores de rugosidade combinada em função da velocidade.

Tabela 4.23 – Rugosidade combinada.

Rugosidade combinada			
	24 N	54 N	99 N
Sq (µm)	0,16 ± 0,04	0,22 ± 0,03	0,183 ± 0,021

Fonte: Autor.

4.4.5.2 Desgaste relativo ao Efeito da carga

A figura 4.47 e a tabela 4.24 mostram os valores de taxa de desgaste em função da carga aplicada.

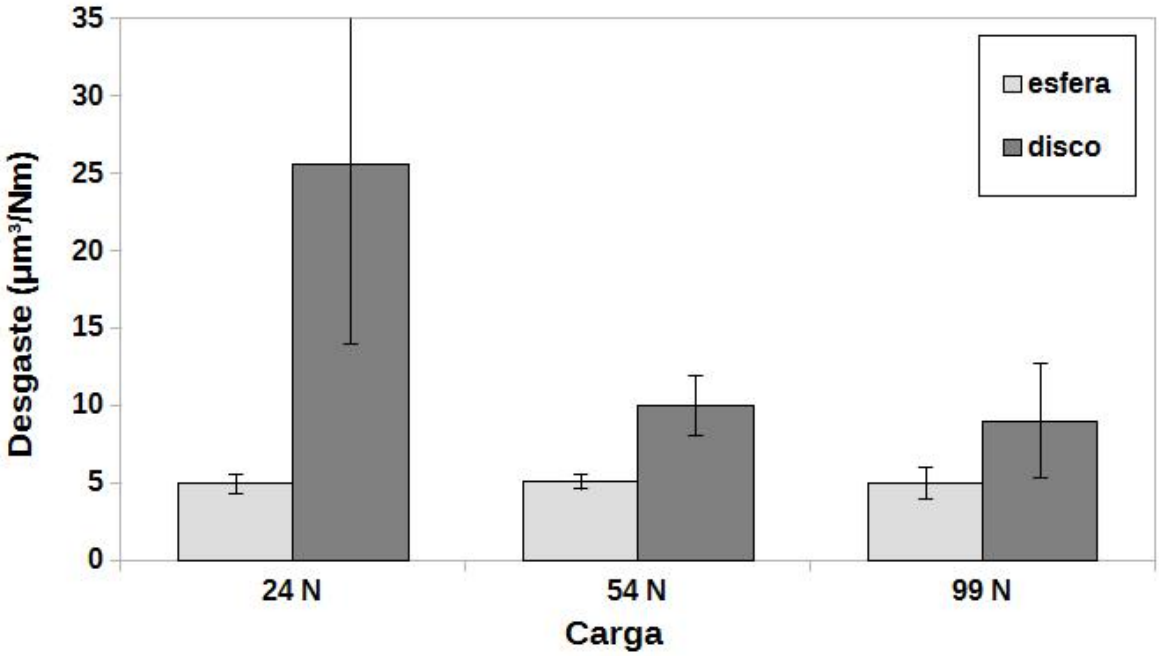

Figura 4.47 – Taxa de desgaste em função da carga aplicada. Fonte: Autor.

Tabela 4.24 – Taxa de desgaste e pressão de contato após os ensaios.

	Carga		
Disco	**24 N**	**54 N**	**99 N**
Desgaste (µm³/(N*m))	25,6 ± 11,6	10,0 ± 1,9	9,0 ± 3,7
Esfera			
Desgaste (µm³/(N*m))	5,0 ± 0,6	5,1 ± 0,5	5,0 ± 1,1
Pressão de contato (MPa)	16,3 ± 2,2	21,4 ± 1,2	32,3 ± 0,5

Fonte: Autor.

A partir dos dados de desgaste foi possível perceber uma queda na taxa de desgaste do disco, enquanto a taxa de desgaste na esfera permanece constante, indicando que a variação da carga afeta de maneira mais significativa o desgaste no disco, enquanto o desgaste na esfera não foi afetada por esta variável.

Apesar do disco e da esfera serem do mesmo material há uma diferença de dureza que poderia explicar essa diferença. Adicionalmente, a esfera sempre está com a mesma região em contato com o disco enquanto a mesma região do disco nem sempre está em contato com a esfera.

Convém notar que a maior taxa de desgaste no disco ocorre no menor valor de carga, enquanto a menor taxa de desgaste no disco ocorre na maior carga aplicada.

Na figura 4.48 estão colocadas microfotografias das esferas e dos discos após os ensaios.

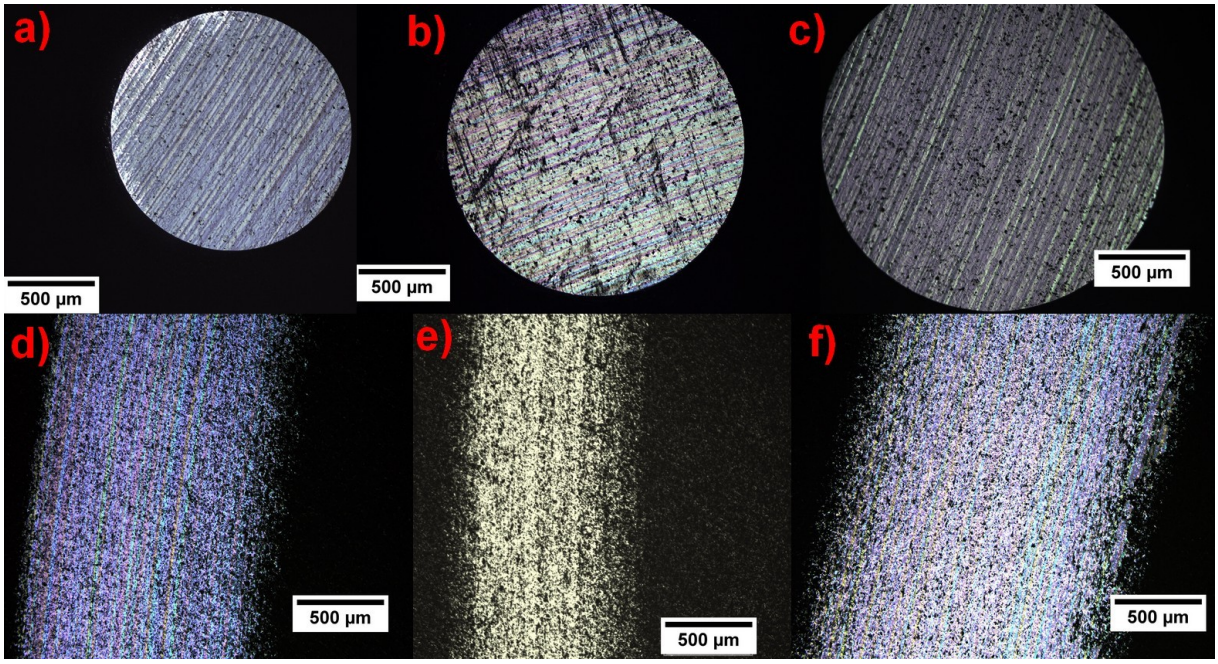

Figura 4.48 – Microfotografias das calotas e das trilhas formadas no ensaio de variação de carga. Fonte: Autor.

É importante notar que apesar dos diâmetros das calotas das esferas terem tamanhos diferentes, as taxas de desgaste permaneceram constantes uma vez que há uma ponderação no valor da carga aplicada (distância percorrida – equação 3.22).

4.4.6 Efeito de rugosidade inicial do disco (Acabamento superficial)

A figura 4.49 mostra o coeficiente de atrito do par alumina – alumina deslizando em água com discos com diferentes acabamentos.

Nesses ensaios foram utilizados velocidade de 1,00 ± 0,03 m/s, carga de 54,0 ± 0,6 N, pH da água em 6,1 ± 0,2 e temperatura de 22 ± 3°C. Para estudar como a rugosidade influencia no valor de coeficiente de atrito e na taxa de desgaste, os ensaios foram realizados com dois valores diferentes de rugosidade ('disco não polido' Sq = 0,538 ± 0,014 µm e 'disco polido' Sq = 0,233 ± 0,029 µm).

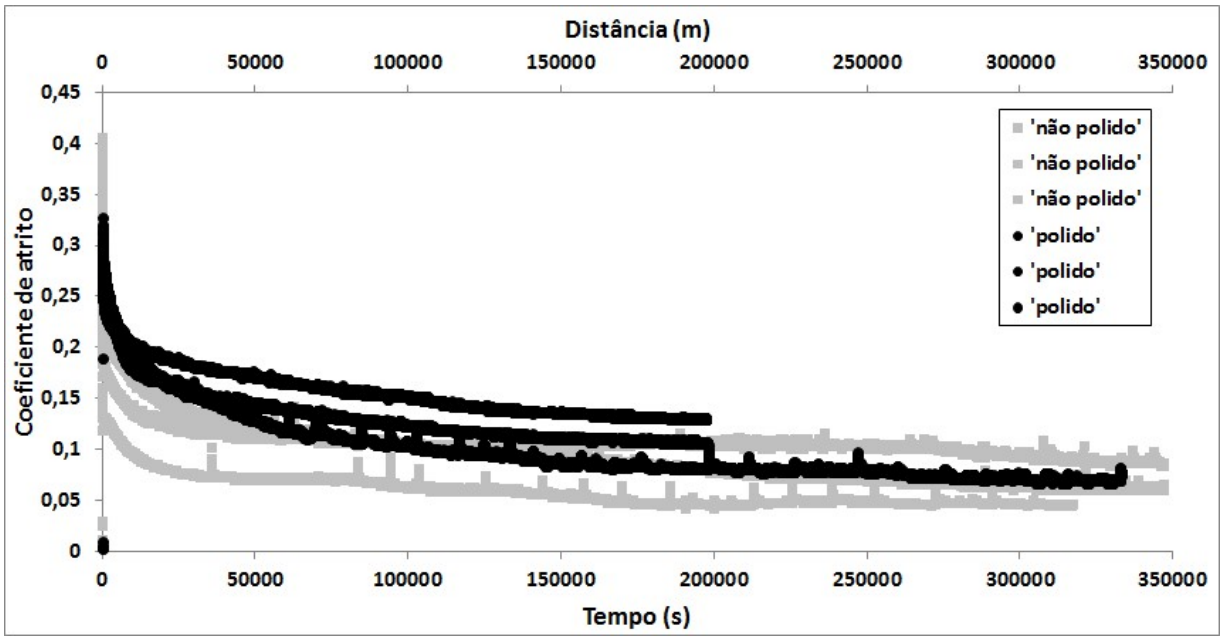

Figura 4.49 – Deslizamento do par alumina – alumina com variação da rugosidade inicial.

Fonte: Autor.

Como foi possível perceber na figura 4.49, há um aumento no valor do coeficiente de atrito quando se diminui a rugosidade superficial.

A figura 4.50 mostra a parte final das curvas de atrito (≈ 10% final de cada curva), onde também foi possivel evidenciar uma tendência de queda de coeficiente de atrito com o aumento da rugosidade superficial.

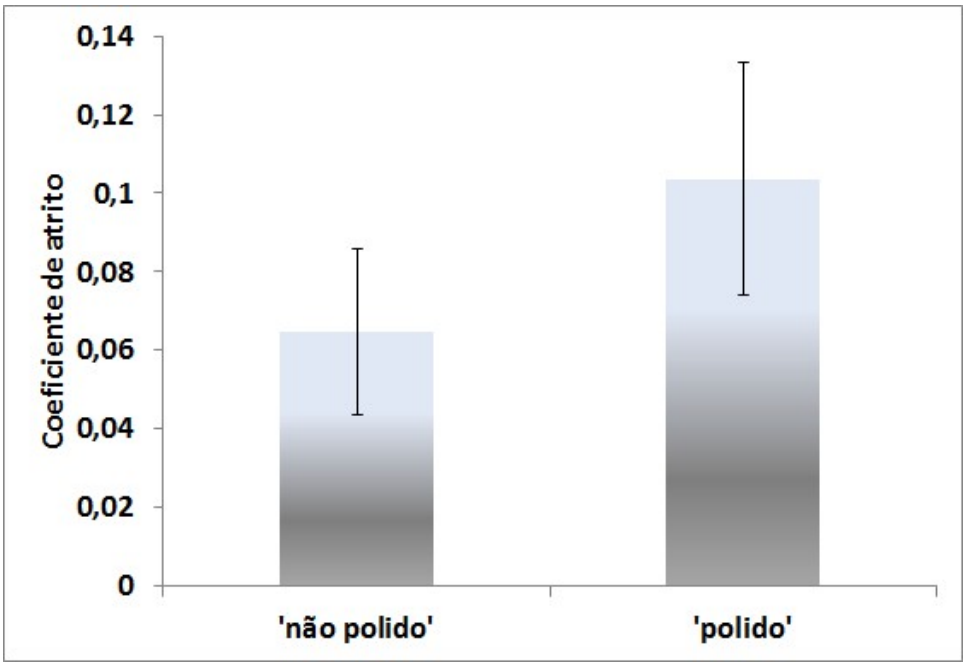

Figura 4.50 – Coeficiente de atrito no final dos ensaios. Fonte: Autor.

Essa diferença provavelmente está ligada ao fato de que quando a rugosidade foi menor, há menos picos de asperezas para ser removidas, consequentemente há menos debris, ou seja, menos matéria prima para a realização de reações triboquímicas que geram um filme de baixa tensão de cisalhamento que auxilia na diminuição do coeficiente de atrito.

4.4.6.1 Parâmetros de rugosidade efeito da rugosidade inicial do disco

As figuras 4.51 e 4.52 mostram os parâmetros de rugosidade respectivamente para disco e esfera após os ensaios.

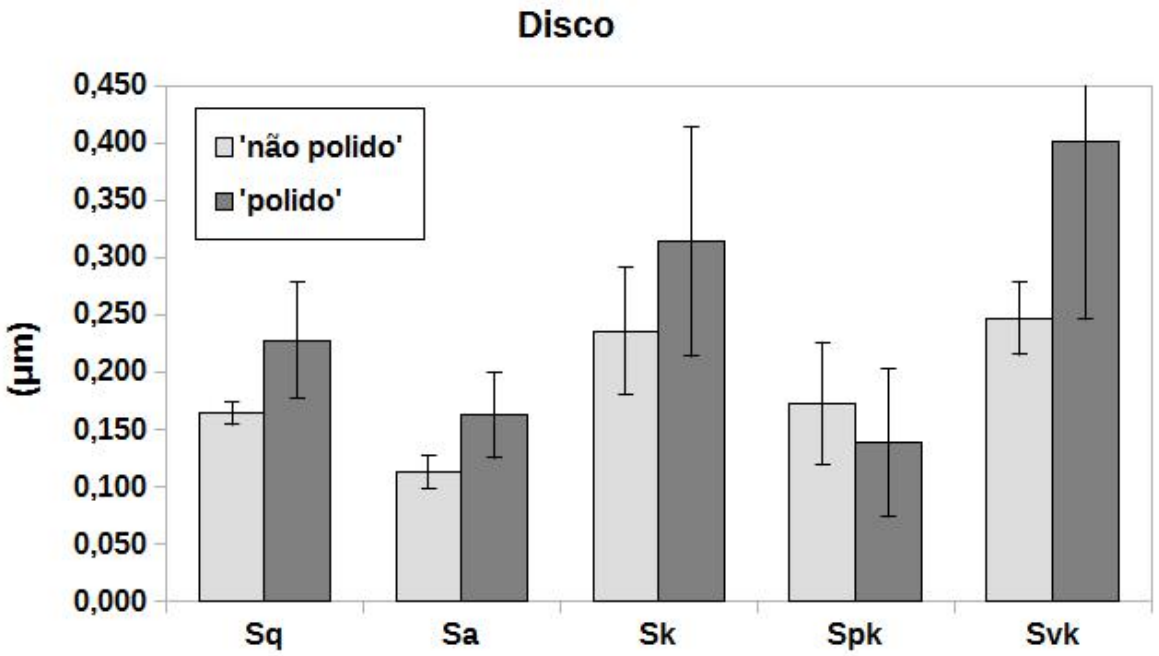

Figura 4.51 – Parâmetros de rugosidade no disco após o ensaio. Fonte: Autor.

A partir da figura 4.51 foi possível notar que houve uma grande queda nos valores dos parâmetros de rugosidade no ‘disco não polido’ após os ensaios, enquanto no disco ‘polido’ os valores permaneceram no mesmo patamar, quando comparados aos valores iniciais.

Também foi possível perceber que todos os valores de rugosidade para o disco após os ensaios foram menores para o ‘disco não polido’ exceto no parâmetro Spk. Comparando os valores de Spk e Svk inicial e final, podemos perceber que no caso do disco ’não polido’ há uma grande redução nos parâmetros (Spk ≈ 0,30 µm para ≈ 0,18 µm / Svk ≈ 0,80 µm para ≈ 0,25 µm), o que também indica que houve redução nos picos e nos vales. Já no caso do disco ‘polido’ (Spk ≈ 0,10 µm para ≈ 0,15 µm / Svk ≈ 0,50 µm para ≈ 0,40 µm), houve um aumento no número de picos e uma diminuição menor no número de vales.

Esses fatos mostram que houve durante os ensaios com disco ’não polido’ uma quantidade maior de debris decorrente do alisamento da superfície. Esses debris após uma reação triboquímica podem ter formado uma camada que diminui o número de vales e poros, além de interferir no valor do coeficiente de atrito.

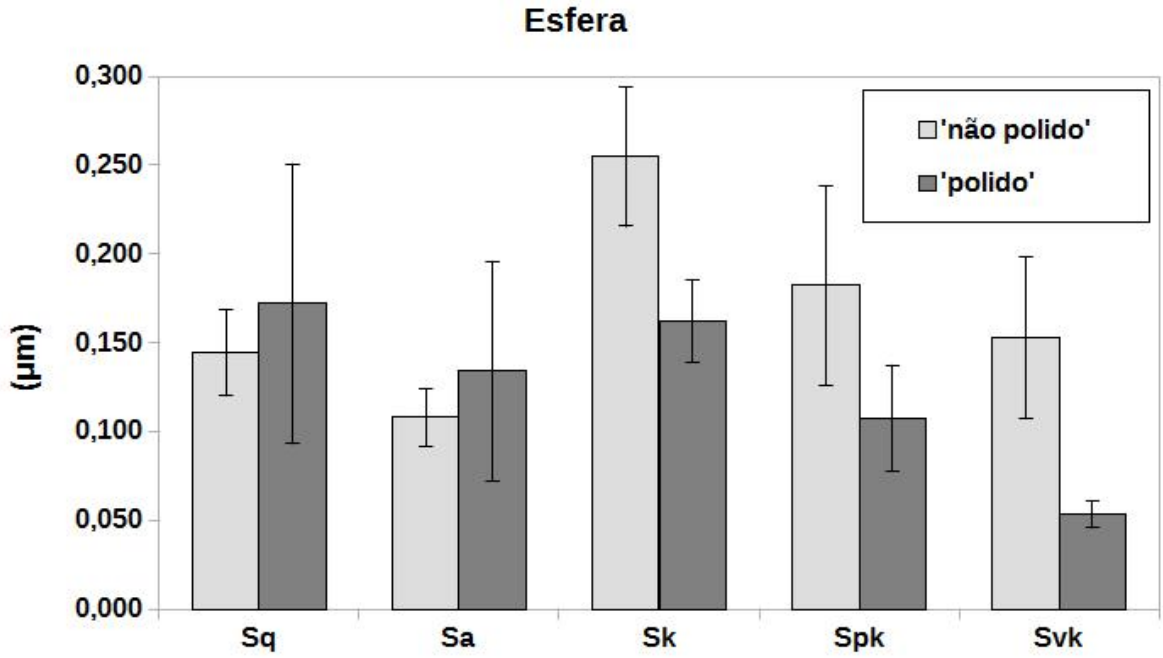

Figura 4.52 – Parâmetros de rugosidade na esfera após o ensaio. Fonte: Autor.

No caso da esfera, levando em conta a alteração da geometria decorrente do ensaio, foi possível perceber que os valores de rugosidade se alteraram pouco entre o início e o final do ensaio. Os valores que mais se alteram na comparação com o disco foram os valores de Svk e Spk para o disco polido, enquanto esses parâmetros se mantiveram no mesmo patamar para os ensaios com disco não polido, nos ensaios com disco 'polido' esses valores sofreram uma queda.

A tabela 4.25 mostra os valores de rugosidade combinada para os ensaios.

Tabela 4.25 – Rugosidade Combinada após o ensaio.

Rugosidade combinada		
	'não polido'	**'polido'**
Sq (µm)	0,218 ± 0,026	0,29 ± 0,09

Fonte: Autor.

4.4.6.2 Desgaste relativo ao Efeito da rugosidade inicial do disco

A figura 4.53 e a tabela 4.26 mostram a taxa de desgaste e a pressão de contato após os ensaios com variação da rugosidade inicial.

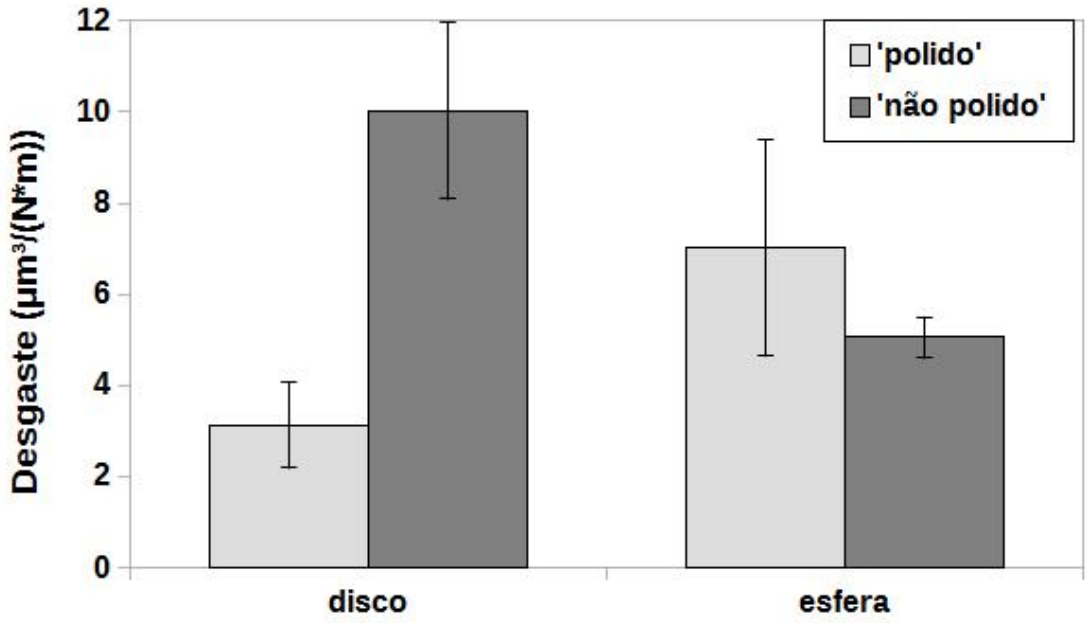

Figura 4.53 – Taxa de desgaste após o ensaio. Fonte: Autor.

Tabela 4.26 – Taxa de desgaste e pressão de contato.

	Acabamento	
Disco	**'polido'**	**'não polido'**
Desgaste (µm³/(N*m))	3,12 ± 0,94	10,02 ± 1,94
Esfera		
Desgaste (µm³/(N*m))	7,02 ± 2,37	5,05 ± 0,45
Pressão de contato (MPa)	23,37 ± 2,64	21,37 ± 1,12

Fonte: Autor.

Como se pode perceber, para o ensaio disco 'polido' o desgaste foi quase 1/3 do medido no disco 'não polido', no disco. Enquanto na esfera o desgaste no disco 'polido' foi pouco superior. Esse resultado sugere que uma superfície com menor rugosidade média pode ajudar no controle do desgaste desse par, nesse caso a

redução da rugosidade reduziu em 50% o valor total de desgaste (de ≈ 15 μm³/(N*m) para o disco 'não polido' para ≈ 10 μm³/(N*m) no disco polido). Esse fato também pode ser explicado pelo menor volume de picos de asperezas a ser removido durante a fase de *running-in*.

A figura 4.54 mostra microfotografias das calotas formadas nas esferas e das trilhas formadas nos discos após os ensaio com disco polido, onde a) e b) são imagens do disco e c) e d) são imagens da esfera.

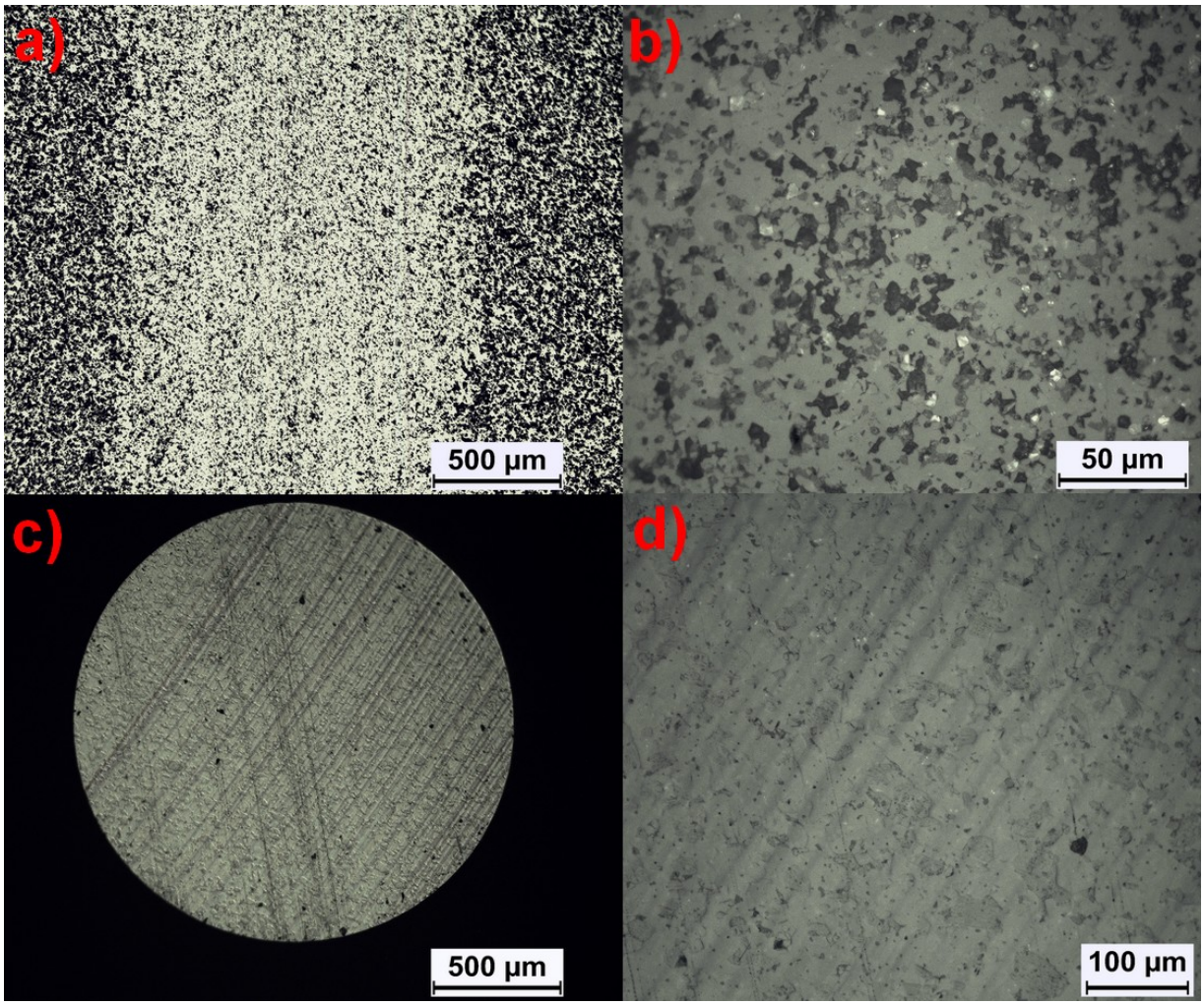

Figura 4.54 – Microfotografias do disco e da esfera no ensaio polido. Fonte: Autor.

4.4.7 Efeito da Adição de Modificadores de atrito (sílica coloidal e/ou carbeto de silício e/ou hidróxido de alumínio) no coeficiente de atrito

A figura 4.55 mostra o coeficiente de atrito no deslizamento do par alumina –

alumina lubrificados com água com adição de sílica e/ou hidróxido de alumínio e/ou carbeto de silício, com o intuito de tentar entender como este parâmetro influencia no valor de coeficiente de atrito e na taxa de desgaste. Na tabela 4.27 encontra-se detalhado o ensaio e a quantidade de cada elemento adicionado a água assim como a velocidade empregada.

Nesses ensaios foram utilizados carga de 54,0 ± 0,6 N, pH da água em 6,1 ± 0,2 e temperatura de 22 ± 3°C.

Tabela 4.27 – Parâmetros utilizados nos ensaios.

Ensaio	Carbeto de silício (g/l)	Hidróxido de alumínio (g/l)	Sílica (g/l)	Velocidade (m/s)
Ensaio 32	0,055	-	-	1
Ensaio 33	0,128	-	-	1
Ensaio 34	0,100	-	-	2
Ensaio 39	0,077	-	0,065	2
Ensaio 40	-	-	0,033	2
Ensaio 43	-	0,06	-	1

Fonte: Autor.

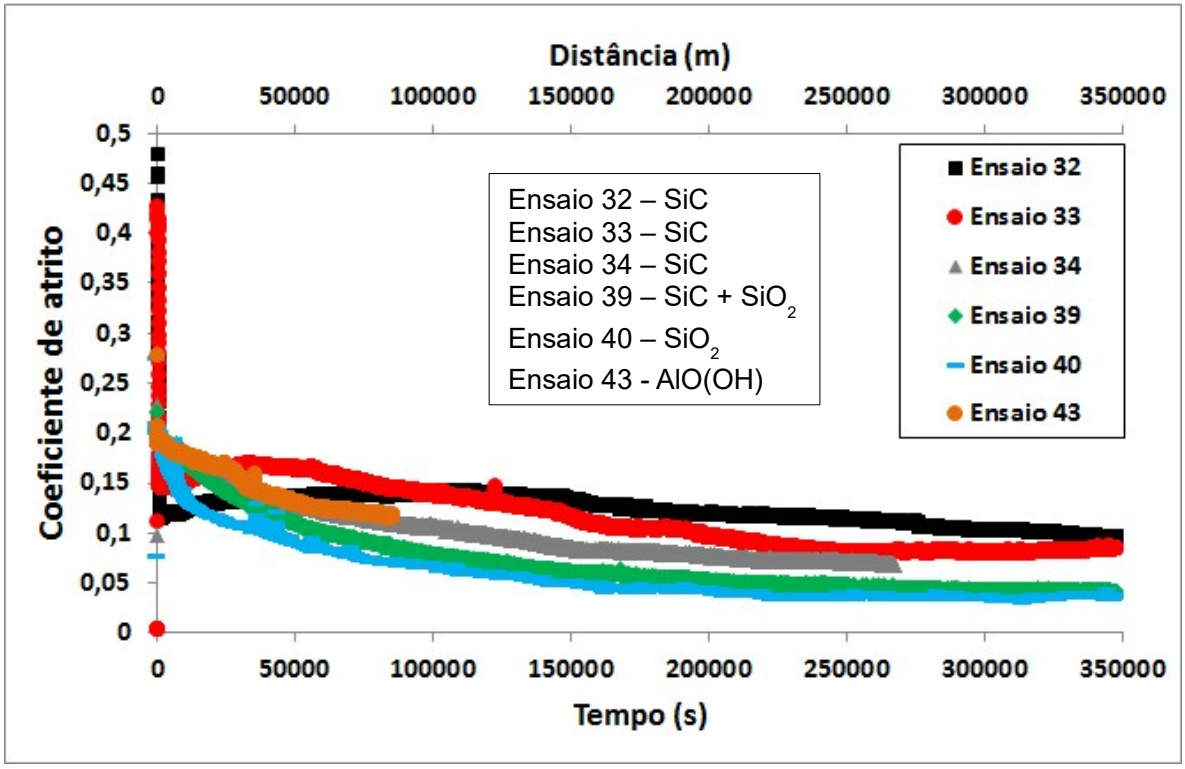

Figura 4.55 – Coeficiente de atrito no deslizamento do par alumina – alumina com adição de modificadores de atrito. Fonte: Autor.

Com a análise da figura foi possível perceber que nos ensaios onde foi adicionado carbeto de silício com velocidade de 1 m/s o coeficiente de atrito tende a cair rapidamente no início do teste para valores próximo a $\mu \approx 0,1$ e em seguida os valores sobem para aproximadamente $\mu \approx 0,15$. No decorrer destes testes o coeficiente de atrito cai chegando ao final um valor de aproximadamente $\mu \approx 0,09$. Isso provavelmente está ligado ao fato de que as partículas de carbeto de silício se comportaram como abrasivos na interface. Quando comparados aos ensaios a 1 m/s sem adição de modificadores de atrito (ensaio padrão), os valores de coeficiente de atrito ficaram ligeiramente mais altos, indicando que o carbeto de silício quando adicionado a água não se transforma em sílica coloidal, como quando os ensaio são feitos com discos ou esferas fabricados com carbeto de silício ou nitreto de silício, aumentando a sustentação eletrostática do sistema permitindo um ultrabaixo coeficiente de atrito.

No ensaio onde foi adicionado carbeto de silício e com velocidade de 2 m/s, há o pico inicial de aplicação de carga e em seguida o valor do coeficiente de atrito se posiciona próximo a $\mu \approx 0,2$ caindo constantemente com o tempo até atingir valores de aproximadamente $\mu \approx 0,07$. Com a velocidade alta as partículas tendem a ser retiradas da superfície trazendo o comportamento do ensaio para próximo ao comportamento do ensaio padrão.

Nos ensaios com adição de sílica os valores de coeficiente de atrito caíram de maneira uniforme até atingir valores próximos a $\mu \approx 0,04$. Nesses ensaios a única diferença para os ensaios realizados a 2 m/s sem adição de sílica foi o fato de o coeficiente de atrito atingir o patamar em aproximadamente 50000 s, enquanto que com a adição de sílica o patamar foi atingido após aproximadamente 200000 s.

O único ensaio feito com hidróxido de alumínio com velocidade de 1 m/s apresentou um comportamento de queda parecido com os ensaios realizados a 2 m/s com adição de sílica e/ou carbeto de silício, porém devido a fatores externos o tempo de ensaio foi drasticamente reduzido, não podendo se obter a resposta se ele teria um melhor valor de coeficiente de atrito.

A figura 4.56 mostra o comportamento do coeficiente de atrito no final de cada ensaio.

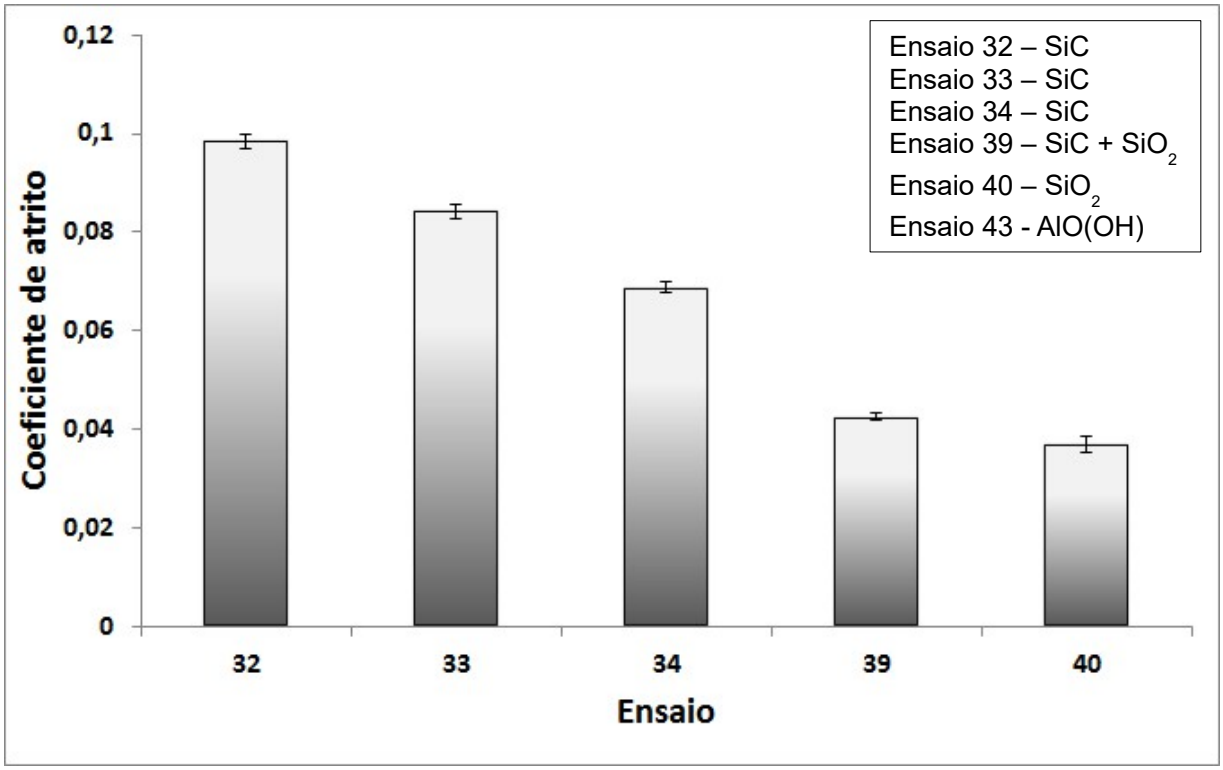

Figura 4.56 – Coeficiente de atrito nos últimos minutos do deslizamento do par alumina – alumina com de modificadores de atrito. Fonte: Autor.

Como foi possível perceber na figura 4.56 que resume os valores de coeficiente de atrito nos momentos finais dos ensaios, os ensaios com carbeto de silício tem os maiores valores de coeficiente de atrito, tanto para velocidades de 1 m/s quanto para velocidades de 2 m/s. Nos ensaios com sílica os valores de coeficiente de atrito na velocidade de 2 m/s são menores quando comparados aos ensaios com carbeto de silício ($\mu \approx 0,4$ e $\mu \approx 0,7$ respectivamente) indicando que a sílica seria um melhor modificador de atrito quando comparado ao carbeto de silício, atentando ao fato de que tanto sílica quando carbeto de silício são amplamente utilizados com abrasivos.

4.4.7.1 Parâmetros de rugosidade relativo ao efeito da Adição de Modificadores de atrito

As figuras 4.57 e 4.58 mostram os valores de parâmetros de rugosidade nos ensaios com adição de modificadores de atrito, no ensaio padrão e no ensaio com velocidade de 2 m/s para efeito de comparação. Nos ensaios 32 e 33 foi realizada uma média aritmética, uma vez que os ensaios eram repetições.

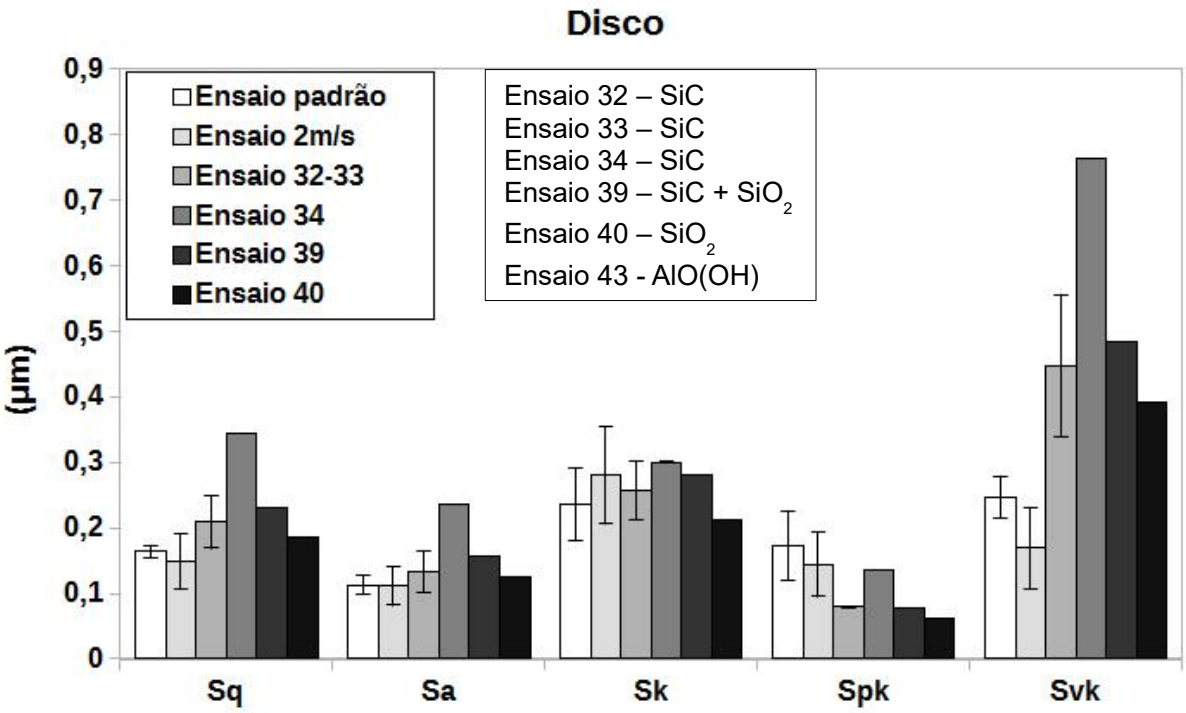

Figura 4.57 – Parâmetros de rugosidade nos discos após os ensaios. Fonte: Autor.

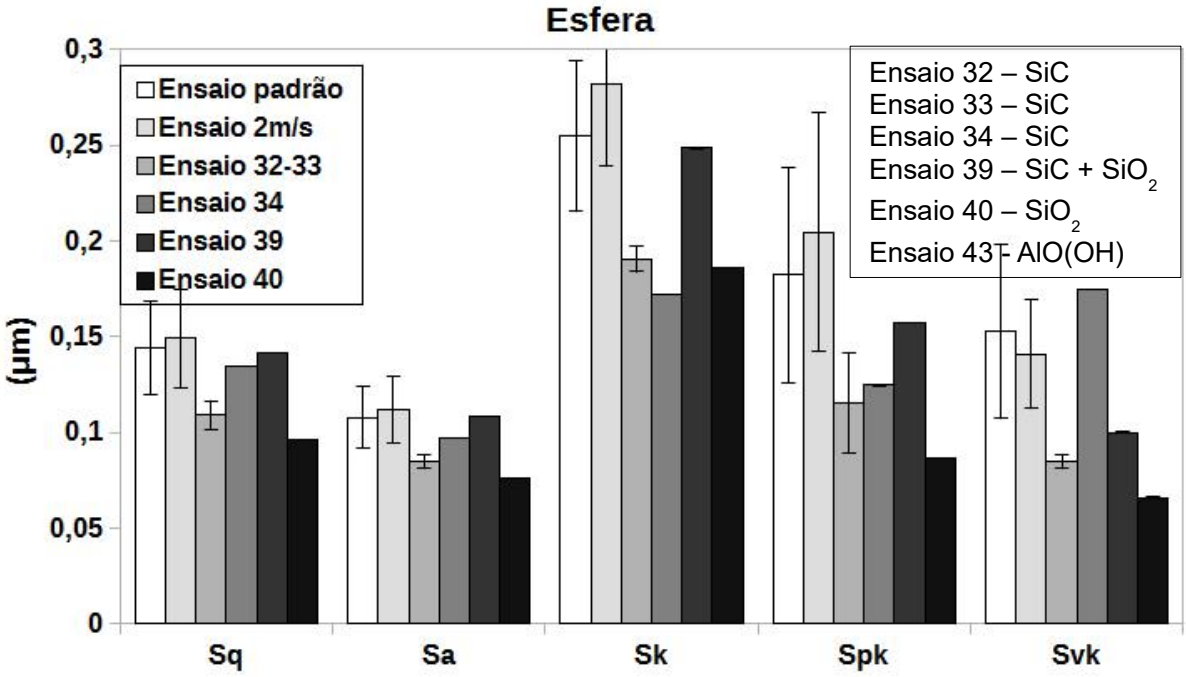

Figura 4.58 –Parâmetros de rugosidade nas esferas após os ensaios. Fonte: Autor.

A figura 4.58 mostra que a rugosidade média nos ensaios com modificadores de atrito foi maior, indicando que esses elementos alteram a superfície final dos ensaios quando comparados aos que não possuem essas partículas, possivelmente em consequência de sua natureza abrasiva. Ao olhar para os valores de Svk ve-se

que esses são muito superiores aos valores se ensaios sem modificadores de atrito. Isso pode indicar que: os debris gerados são grandes e não conseguem se depositar nos vales ou os debris gerados são expulsos da superfície pois não conseguem se aderir ou os compostos adicionados interferem nas reações triboquímicas que produzem uma camada que tende a diminuir o atrito e diminuir o número de vales.

Na esfera os valores de rugosidade média são parecidos com os valores dos ensaios padrões, o que nos leva a crer que os modificadores de atrito não interferiram no comportamento de atrito da esfera. Podemos também perceber que no ensaio onde houve apenas a adição de sílica houve uma queda nos parâmetros de rugosidade quando comparado aos outros modificadores de atrito, indicando que a sílica foi o melhor composto no quesito rugosidade, como também foi possível comprovar na tabela 4.28.

Na tabela 4.28 são apresentados os valores de rugosidade combinada para os ensaios realizados.

Tabela 4.28 – Parâmetro de rugosidade combinada.

	Rugosidade combinada Sq (µm)
Ensaio padrão	0,218 ± 0,026
Ensaio 2 m/s	0,21 ± 0,05
Ensaio 32-33	0,24 ± 0,04
Ensaio 34	0,36988 ± 0,00014
Ensaio 39	0,26968 ± 0,00014
Ensaio 40	0,20836 ± 0,00014

Fonte: Autor.

4.4.7.2 Desgaste relativo ao Efeito da Adição de Modificadores de atrito

Na tabela 4.29 e no gráfico da figura 4.59 estão descritos as taxas de desgaste e valores de pressão de contato relativo aos ensaios para o estudo da adição de modificadores de atrito.

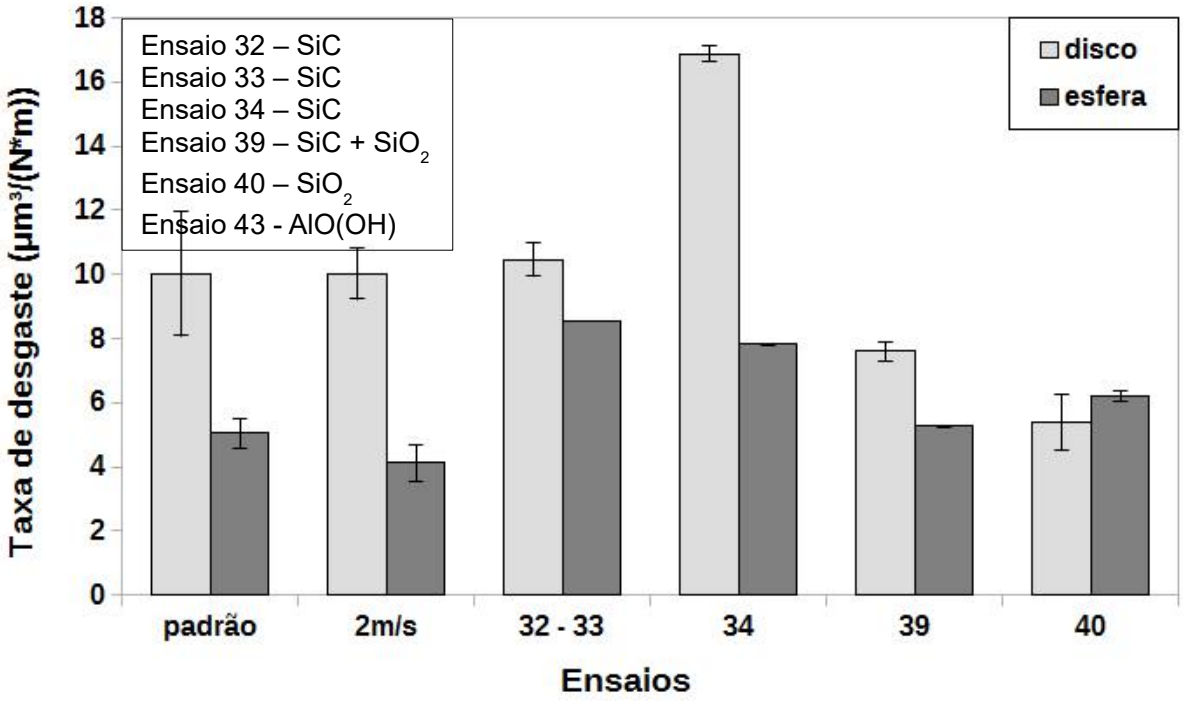

Figura 4.59 – Taxa de desgaste nos ensaios. Fonte: Autor.

Tabela 4.29 – Taxa de desgaste e pressão de contato no final do ensaio.

	Disco	**Esfera**	
	Desgaste (µm³/ (N*m))	**Desgaste (µm³/ (N*m))**	**Pressão de contato (MPa)**
Ensaio padrão	10,0 ± 1,9	5,1 ± 0,4	21,4 ± 1,1
Ensaio 2 m/s	10,0 ± 3,3	4,1 ± 0,8	19,9 ± 1,5
Ensaio 32-33	10,5 ± 0,8	8,6 ± 0,6	16,0 ± 0,5
Ensaio 34	16,9 ± 0,5	7,830 ± 0,013	13,50 ± 0,10
Ensaio 39	7,60 ± 0,23	5,267 ± 0,026	14,38 ± 0,10
Ensaio 40	5,40 ± 0,31	6,197 ± 0,012	13,25 ± 0,09
Ensaio 43	31,0 ± 0,9	8,07 ± 0,15	33,73 ± 0,21

Fonte: Autor.

Quando olhamos para o desgaste no ensaio padrão e no ensaio com velocidade de 2 m/s sem adição de modificadores de atrito, vemos que os valores são muito parecidos tanto no disco quanto na esfera. Quando comparamos com o ensaio com adição de carbeto de silício, vemos que no disco há um aumento do desgaste com o aumento da velocidade. E na esfera há um aumento generalizado do desgaste. Quando olhamos para os ensaios com adição de sílica vemos que há

uma diminuição no desgaste do disco e o desgaste da esfera permanece no mesmo patamar dos ensaios de referência. Indicando que o carbeto de silício funcionou como abrasivo e não houve a formação de sílica a partir de uma reação triboquímica. Também foi possível verificar que os ensaios com sílica obtiveram melhores resultados na questão de desgaste geral. Como exemplo olhemos para os ensaios 34 (adição de carbeto de silício 2 m/s) e 40 (adição de sílica 2 m/s), onde houve uma redução de aproximadamente 50% no desgaste (de 24,74 μm³/(N*m) para 11,597 μm³/(N*m)).

4.5 Efeito do tempo na perda de massa e Modelo teórico para a taxa de desgaste

A partir de ensaios com tempos diferentes (entre 3600 s e 450000 s) foi possível elaborar os gráficos das figuras 4.60, onde foi mostrado a perda de massa em função do tempo, e 4.61, onde foi mostrado a taxa de desgaste em função do tempo para uma série de 30 ensaios tanto para o disco quanto para a esfera.

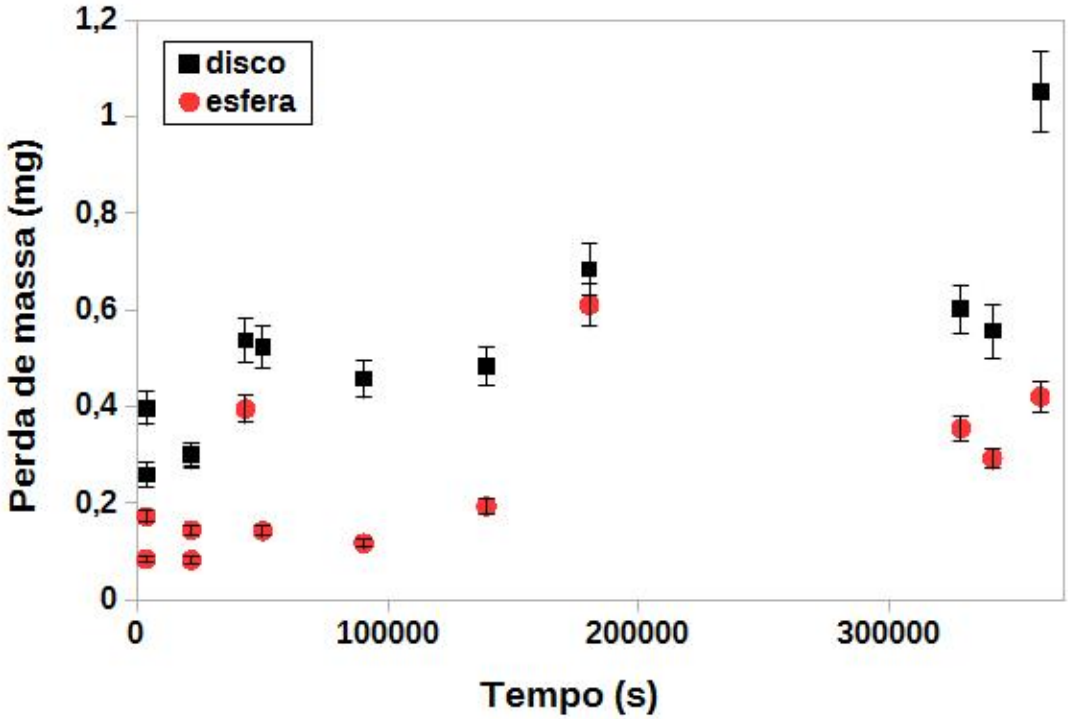

Figura 4.60 – Perda de massa em função do tempo. Fonte: Autor.

Na figura foi possível perceber que tanto no disco quanto na esfera não é possível afirmar que há uma estabilização dos valores de perda de massa com o

tempo de ensaio, indicando que o regime de lubrificação não pode ser hidrodinâmico dentro do tempo amostrado, uma vez que uma das premissas dessa teoria seria o não contato entre as superfícies, o que permitiria um deslizamento livre de desgaste, ou com desgaste desprezível. Ao analisar os dados de perda de massa, vemos que nos primeiros 50000 s o desgaste médio no disco e na esfera foi de aproximadamente metade do desgaste médio no restante do tempo, ou seja, nos primeiros 50000 s temos um desgaste no disco de 0,033 ± 0,009 mg e na esfera de 0,013 ± 0,008 mg e no restante do ensaio temos no disco um desgaste médio de 0,053 ± 0,016 mg e na esfera 0,024 ± 0,012 mg.

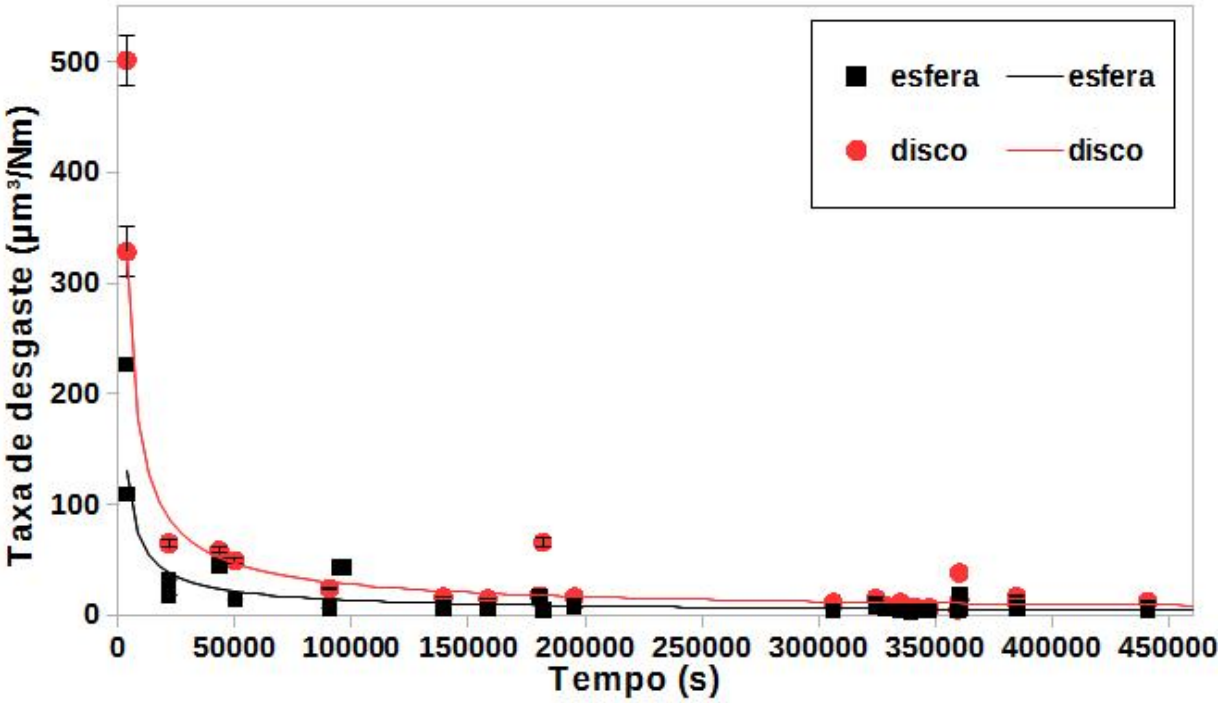

Figura 4.61 – Taxa de desgaste em função do tempo. Fonte: Autor.

A partir da figura 4.61 foi possível perceber que a taxa de desgaste tem comportamento parecido no disco e na esfera começando mais elevada (≈ 500 µm³ /Nm para o disco e ≈ 230 µm³/Nm para a esfera) e depois decaindo com o tempo.

A partir dos dados de desgaste e com auxílio do software ***Calc*** foram realizados várias regressões com o intuito de obter uma curva para descrever o fenômeno.

As tabelas 4.30 e 4.31 mostram as várias equações provenientes das

regressões acompanhadas de seus respectivos coeficientes de determinação. Nas equações f(t) é a taxa de desgaste e t é o tempo.

Tabela 4.30 – Regressões e coeficientes de determinação para a curva de taxa de desgaste em função do tempo (Disco).

Disco			
Regressão	**Equação**		**R² (Coeficiente de determinação)**
Linear	$f(t)=-0{,}000403\,t+149{,}7$	(4.1)	$R^2=0{,}306$
Logarítmica	$f(t)=-65{,}111\ln(t)+828{,}127$	(4.2)	$R^2=0{,}686$
Exponencial	$f(t)=84{,}583\exp(-0{,}000006\,t)$	(4.3)	$R^2=0{,}525$
Geométrica	$\boldsymbol{f(t)=154031{,}155\,t^{-0{,}748}}$	(4.4)	$\boldsymbol{R^2=0{,}745}$
Polinomial (2ª ordem)	$f(t)=2{,}9\times10^{-9}t^2-0{,}00164\,t+217{,}96$	(4.5)	$R^2=0{,}487$
Polinomial (3ª ordem)	$f(t)=-1{,}5\times10^{-14}t^3+1{,}32\times10^{-8}t^2-0{,}00035\,t+268{,}14$	(4.6)	$R^2=0{,}583$

Fonte: Autor.

Tabela 4.31 – Regressões e coeficientes de determinação para a curva de taxa de desgaste em função do tempo (esfera).

Esfera			
Regressão	**Equação**		**R² (Coeficiente de determinação)**
Linear	$f(t)=-0{,}000161\,t+60{,}602$	(4.7)	$R^2=0{,}289$
Logarítmica	$f(t)=-26{,}57\ln(t)+338{,}975$	(4.8)	$R^2=0{,}633$
Exponencial	$f(t)=34{,}758\exp(-5{,}208\times10^{-6}t)$	(4.9)	$R^2=0{,}492$
Geométrica	$\boldsymbol{f(t)=38563{,}899\,t^{-0{,}6918}}$	(4.10)	$\boldsymbol{R^2=0{,}7005}$
Polinomial (2ª ordem)	$f(t)=1{,}207\times10^{-9}t^2-0{,}00068\,t+90{,}677$	(4.11)	$R^2=0{,}464$
Polinomial (3ª ordem)	$f(t)=-5{,}49\times10^{-15}t^3+4{,}94\times10^{-9}t^2-0{,}00135\,t+110{,}98$	(4.12)	$R^2=0{,}542$

Fonte: Autor.

Como foi possível perceber nas tabelas 4.30 e 4.31, tanto no disco quanto na esfera os melhores valores de coeficiente de determinação ocorreram quando a foi

realizado uma regressão geométrica. Portanto os valores gerados pelas expressões 4.4 e 4.10 serão usados nos demais cálculos. A curva de regressão encontra-se na figura 4.61.

Para determinar o ponto onde a curva de desgaste em função do tempo se estabiliza foi utilizado como critério o ponto onde a curva da regressão geométrica forma com o eixo das abscissas um ângulo de 0,05°. Os cálculos detalhados encontram-se no apêndice 2.

A tabela 4.32 mostra os valores de tempo onde as curvas de desgaste se estabilizam segundo o critério pré estabelecido. A tabela também mostra o valor da taxa de desgaste no ponto determinado segundo o mesmo critério.

Tabela 4.32 – Tempo e taxa de desgaste onde a curva de regressão faz um ângulo de 0,05º com o eixo x.

	Tempo (s)	**Taxa de desgaste (μm³ /Nm)**
Disco	44169,08	51,48
Esfera	26580,66	33,52

Fonte: Autor.

Analisando a tabela foi possível perceber que após aproximadamente 12 horas de ensaio a taxa de desgaste se torna constante tanto no disco quanto na esfera, indicando que nesse ponto o número de debris formados diminui, diminuindo também as reações triboquímicas que ocorrem durante o ensaio.

A partir do fato de se assumir que a taxa de desgaste se comporta de maneira geométrica, foi possível inferir que a taxa de desgaste nunca será zero, mas continuará caindo com o tempo até se tornar praticamente desprezível.

4.6 Modelo de comportamento da curva de atrito no ensaio padrão

A partir da análise do comportamento de sete curvas de coeficiente de atrito do ensaio padrão foi elaborado o gráfico da figura 4.62, onde encontra-se a média dos valores obtidos nos gráficos(curva vermelha), suas incertezas (nuvem de curvas cinza) e sua linha de tendência (linha preta).

A linha de tendência e uma equação foi gerada pelo software ***Calc*** com o intuito de tentar descrever o comportamento da curva de atrito com o tempo.

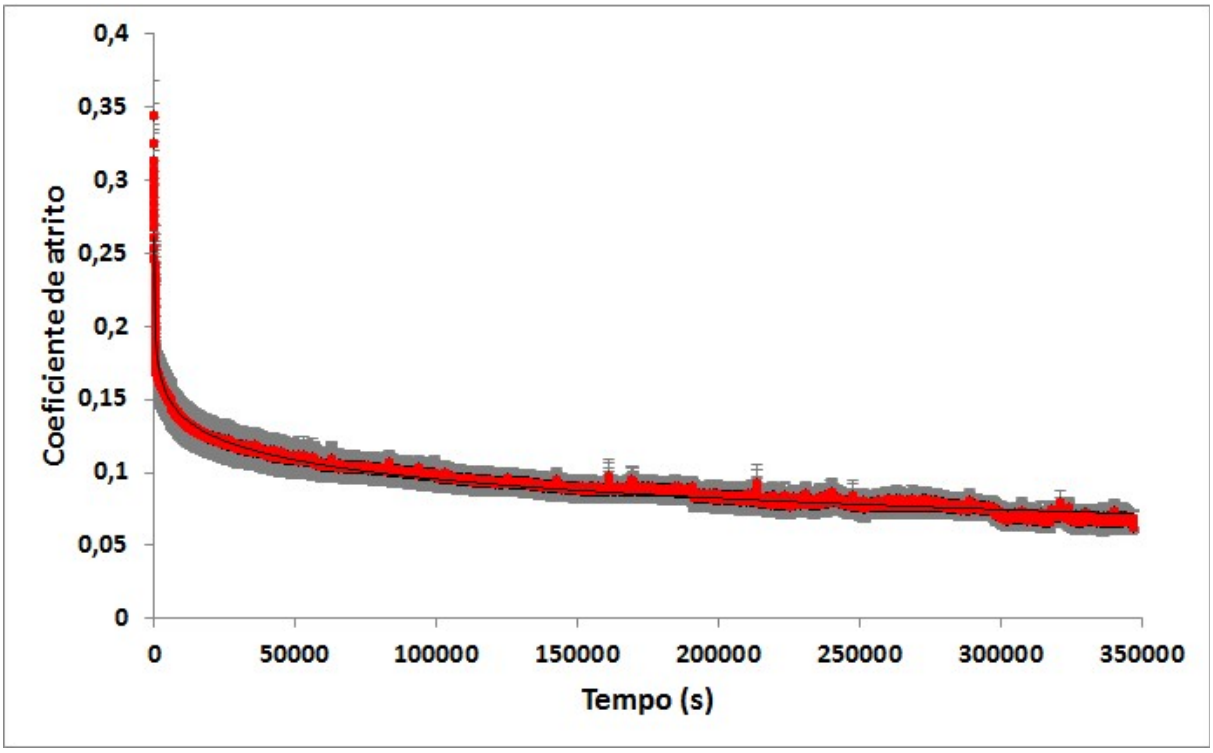

Figura 4.62 – Curva média de ensaio padrão com incerteza e linha de tendência. Fonte: Autor.

A equação gerada pela regressão logarítmica é dada pelas expressões 4.13 e 4.14.

Onde:

COF – coeficiente de atrito;

t – tempo;

R² – coeficiente de determinação.

$$\boxed{COF = -0{,}019 \ln(t) + 0{,}3128} \quad (4.13)$$

$$\boxed{R^2 = 0{,}974} \quad (4.14)$$

A partir da figura foi possível perceber que a curva média, após um pico inicial de aplicação de carga, se comporta de maneira assintótica tendendo a chegar ao valor zero do eixo de coeficiente de atrito.

Tomando como verdade a expressão 4.13 foi possível determinar o tempo para se atingir valores mais baixos de coeficiente de atrito nesse sistema. Os dados estão apresentados na tabela 4.33.

Tabela 4.33 – Valores de tempo segundo a equação 4.13.

Coeficiente de atrito	Tempo (s)	Tempo (h)	Tempo (dias)
0,1	73130,4	20,3	0,8
0,09	123786,8	34,4	1,4
0,08	209532,0	58,2	2,4
0,07	354671,5	98,5	4,1
0,06	600347,0	166,8	6,9
0,05	1016198,2	282,3	11,8
0,04	1720103,0	477,8	19,9
0,03	2911591,9	808,8	33,7
0,02	4928406,7	1369,0	57,0
0,01	8342238,2	2317,3	96,6
0,009	8793063,1	2442,5	101,8
0,008	9268251,2	2574,5	107,3
0,007	9769119,0	2713,6	113,1
0,006	10297054,3	2860,3	119,2
0,005	10853519,9	3014,9	125,6
0,004	11440057,6	3177,8	132,4
0,003	12058292,5	3349,5	139,6
0,002	12709937,6	3530,5	147,1
0,001	13396798,5	3721,3	155,1

Fonte: Autor.

Como foi possível perceber na tabela 4.33, para se atingir valores de coeficiente de atrito abaixo de 0,01 seriam necessários mais do que 102 dias de ensaios contínuos, o que inviabilizaria a tentativa. Para se obter valores na ordem de 0,001 seriam necessários mais de 5 meses de ensaios ininterruptos.

4.6.1 Modelagem para o efeito da carga aplicada

Como visto nas figuras 4.43 e 4.44 a modificação da carga aplicada no ensaio, também modifica o comportamento da curva de atrito fazendo com que o aumento da carga também aumente o valor do coeficiente de atrito e a diminuição da carga traz a diminuição do coeficiente de atrito.

Com o intuito de corrigir a equação 4.13 para levar em consideração a carga

aplicada foi feito o gráfico da figura 4.63 onde são mostrados os valores médios de coeficiente de atrito para cada ensaio calculados ponto a ponto a partir das repetições dos ensaios com variação de carga.

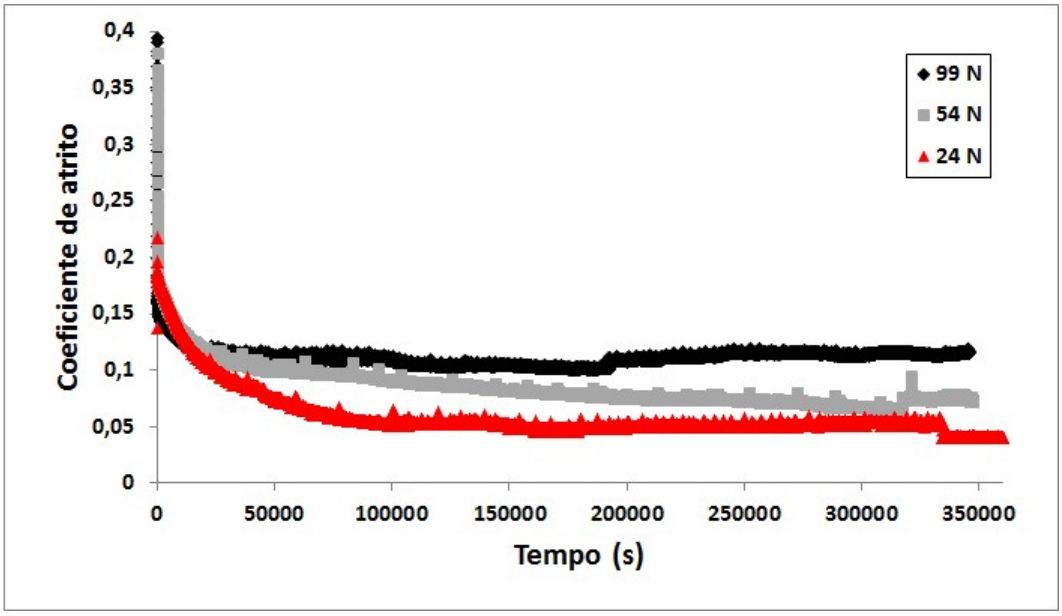

Figura 4.63 – valores médios de coeficiente de atrito para ensaios com variação de carga.
Fonte: Autor.

A partir dos dados da figura foi calculada a diferença entre as curvas e a partir desses valores foram calculadas as médias entre os dados dos ensaios com carga menor e os ensaio padrão e a diferença média entre os dados dos ensaios com carga maior e o ensaio padrão. Os dados foram retirados das curvas a partir do tempo 50000 s, que foi o ponto onde as curvas têm uma separação mais evidente e a queda nos valores de coeficiente de atrito se tornam menos acentuadas. Esses dados estão demonstrados em porcentagem de diferença na tabela 4.34.

Tabela 4.34 – Diferença média do coeficiente de atrito em relação ao ensaio padrão

Ensaio	24 N	99 N
Diferença média em relação ao ensaio padrão %	-34,6 ± 6,5	27,1 ± 10,2

Fonte: Autor.

Com base nos dados da figura 4.63, da tabela 4.34 e nas simplificações expostas foi feita a seguinte correção na equação 4.15:

$$COF = \left(-0{,}019 \ln(t) + 0{,}3128\right)\left(1 + F_C\right) \tag{4.15}$$

Onde:

COF – coeficiente de atrito;

t – tempo;

W/54 – fator de normalização da carga aplicada;

F_C – função denominada fator de carga.

A função F_C obedece às regras da tabela 4.35, onde foi possível aproximar esta função a um comportamento quase linear dentro desse intervalo.

Tabela 4.35 –Função F_c para os três pontos de ensaios.

Ensaio	Fator (W/54)	F_c
24 N	0,457	– 0,34
54 N	1	0
99 N	1,857	0,27

Fonte: Autor.

A partir da tabela foi elaborado o gráfico da figura 4.64 (Fator W/54 x F_C), onde foram dispostos os pontos da tabela assim como sua regressão linear de onde foi possível extrair uma função para determinar o valor aproximado de F_C dado pela expressão 4.16. Na expressão 4.17 encontra-se seu coeficiente de determinação.

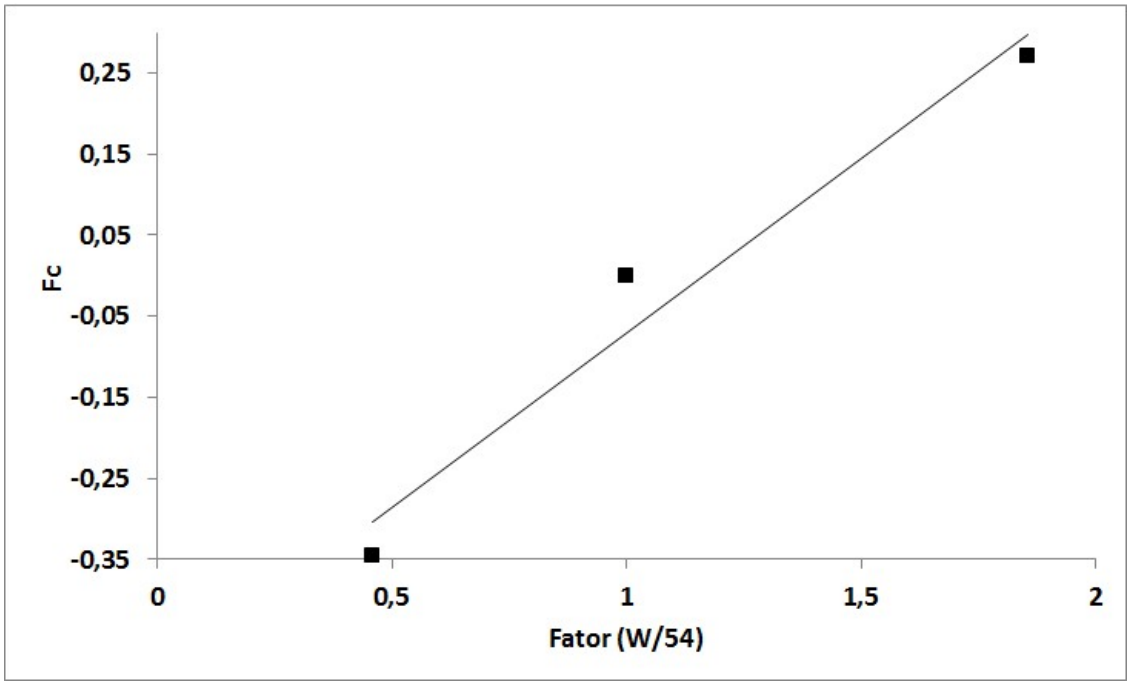

Figura 4.64 – F_C em função do fator de normalização de carga. Fonte: Autor.

$$F_C = 0{,}429\left(\frac{W}{54}\right) - 0{,}499 \tag{4.16}$$

$$R^2 = 0{,}961 \tag{4.17}$$

A partir das equações 4.15 e 4.16 temos uma expressão que mostra o valor do coeficiente de atrito para o par alumina – alumina em função do tempo e da carga aplicada dada pela expressão 4.18, assim como sua simplificação na expressão 4.19.

$$COF = \left(-0{,}019\ln(t) + 0{,}3128\right)\left[1 + \left(\frac{0{,}429\,W}{54} - 0{,}499\right)\right] \tag{4.18}$$

$$COF = \left(-0{,}019\ln(t) + 0{,}3128\right)\left(\frac{0{,}429\,W}{54} + 0{,}501\right) \tag{4.19}$$

A partir de expressão 4.19 vemos que ao aumentar em 86% a carga o coeficiente de atrito aumenta em aproximadamente 27% e ao diminuirmos a carga aplicada em 54% o valor do coeficiente de atrito cai aproximadamente 34%.

4.6.2 Modelagem para o efeito da velocidade

A partir do mesmo raciocínio empregado na correção de carga foi realizado a correção de velocidade para a expressão de previsão de coeficiente de atrito.

O gráfico da figura 4.65 mostra os valores médios de coeficiente de atrito para cada ensaio calculados ponto a ponto a partir das repetições dos ensaios com variação de velocidade.

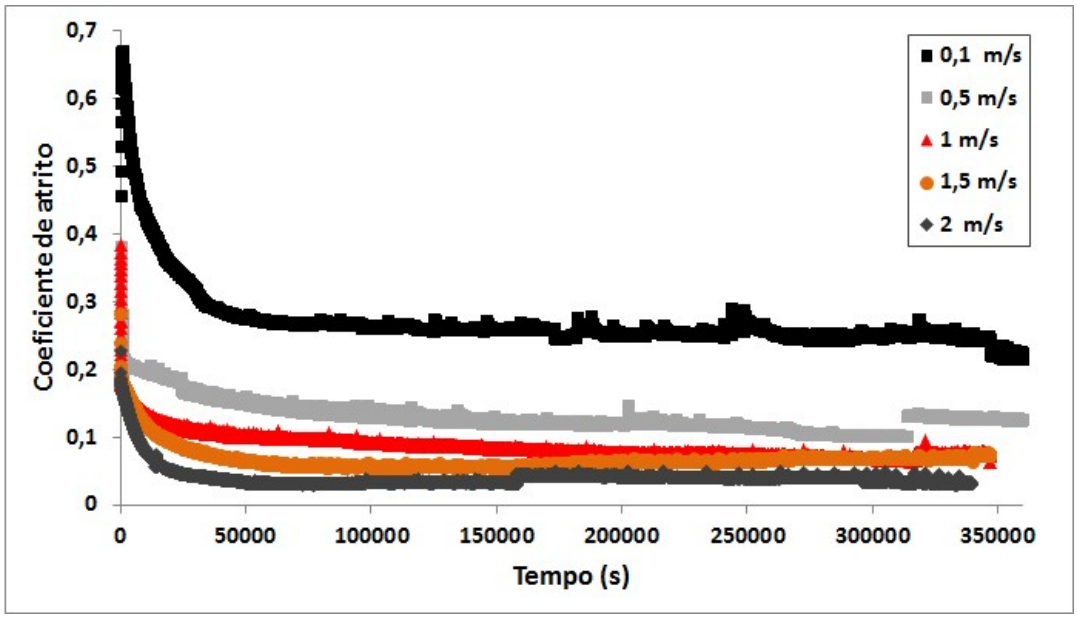

Figura 4.65 – valores médios de coeficiente de atrito para ensaios com variação de velocidade. Fonte: Autor.

A partir desses dados foram calculadas as diferenças ponto a ponto entre as curvas. Em seguida foram calculadas as médias para cada situação sempre usando como referência a curva média dos ensaios a 1 m/s, ou seja, foi calculada a razão média entre as curvas de 2 m/s e 1 m/s, entre 1,5 m/s e 1 m/s, entre 0,5 m/s e 1 m/s e entre 0,1 m/s e 1 m/s, exemplificando temos que o valor médio de coeficiente de atrito no ensaio de 0,1 m/s foi 3,26 vezes os valores obtidos nos ensaios a 1 m/s, e assim sucessivamente. As médias foram calculadas a partir do tempo 50000 s, que foi o ponto onde as curvas têm uma separação mais evidente e a queda nos valores de coeficiente de atrito se tornam menos acentuadas. Esses dados estão demonstrados na tabela 4.36.

Tabela 4.36 – Diferença média de coeficiente de atrito entre os ensaios com variação de velocidade.

Ensaio	Razão entre os ensaios
0,1 m/s	3,26 ± 0,29
0,5 m/s	1,54 ± 0,10
1 m/s	1,00 ± 0,00
1,5 m/s	0,79 ± 0,14
2 m/s	0,47 ± 0,09

Fonte: Autor.

Com base nos dados da figura 4.65, da tabela 4.36 e nas simplificações expostas foi feita a correção na equação 4.19, expressa pela equação 4.20.

$$COF = \left(-0{,}019\ln(t) + 0{,}3128\right)\left(\frac{0{,}429W}{54} + 0{,}501\right)\left(1 + F_V\right) \tag{4.20}$$

Onde:

COF – coeficiente de atrito;

t – tempo;

u – velocidade aplicada;

F_V – função denominada fator de velocidade.

A função F_V obedece as regras da tabela 4.37, onde foi possível aproximar esta função a um comportamento logarítmico dentro desse intervalo.

Tabela 4.37 – Função F_V em função da velocidade do ensaio.

Velocidade de ensaio (m/s)	**F_V**
0,1	2,26
0,5	0,54
1,0	0,00
1,5	-0,21
2,0	-0,53

Fonte: Autor.

A partir da tabela foi elaborado o gráfico da figura 4.66 (Velocidade x F_V), onde foram dispostos os pontos da tabela assim como sua linha de tendência de onde foi possível extrair uma função para determinar o valor aproximado de F_V dado pela expressão 4.21. Na expressão 4.22 encontra-se seu coeficiente de determinação.

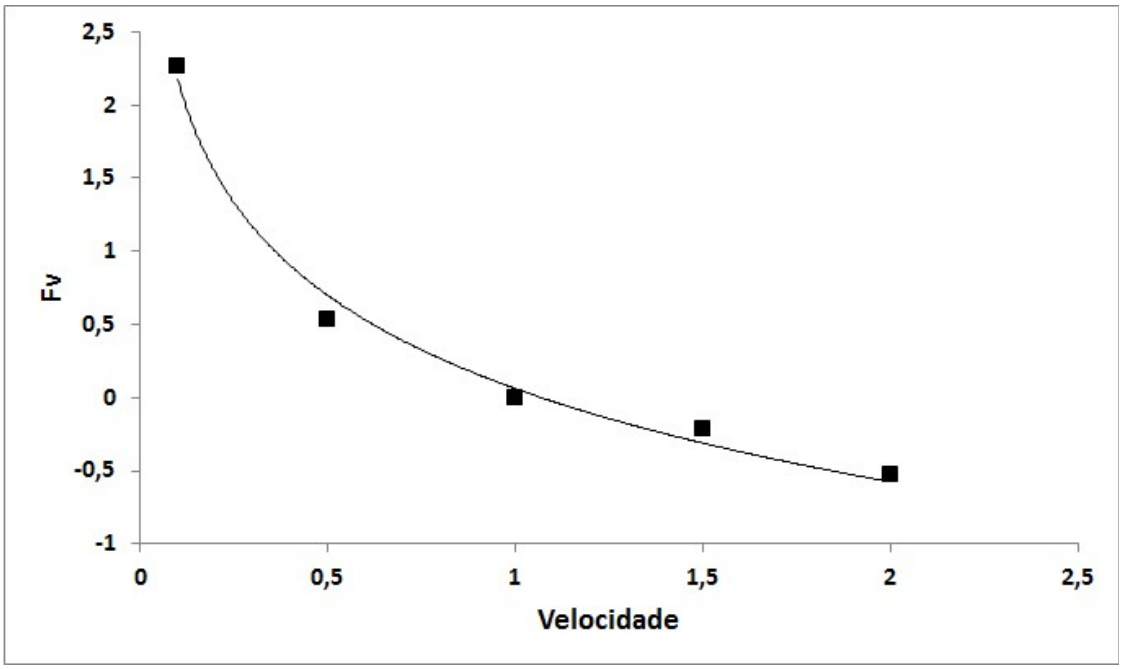

Figura 4.66 – Função F_V em função da velocidade do ensaio. Fonte: Autor.

$$F_V = -0{,}92\ln(u) + 0{,}063 \tag{4.21}$$

$$R^2 = 0{,}9902 \tag{4.22}$$

A partir das equações 4.20 e 4.21 foi possível elaborar uma expressão que mostra o valor do coeficiente de atrito para o par alumina – alumina em função do tempo, da carga aplicada e da velocidade dada pela expressão 4.23, assim como sua simplificação na expressão 4.24.

$$COF = (-0{,}019\ln(t) + 0{,}3128)\left(\frac{0{,}429W}{54} + 0{,}501\right)\left[1 + (-0{,}92\ln(u) + 0{,}063)\right] \tag{4.23}$$

$$COF = (-0{,}019\ln(t) + 0{,}3128)\left(\frac{0{,}429W}{54} + 0{,}501\right)(1{,}063 - 0{,}92\ln(u)) \tag{4.24}$$

No item 4.7 vemos alguns exemplos de aplicação e comparação do modelo com os dados experimentais.

4.7 Comparação entre o modelo e as curvas provenientes dos ensaios.

A fim de poder comparar as curvas dadas pela expressão 4.24 com as curvas

provenientes de ensaios realizados, foram feitas algumas simulações e seus resultados estão expressos nas figuras 4.67. As curvas vermelhas são provenientes da equação 4.24, as curvas cinzas foram obtidas através da média dos dados experimentais para cada ensaio e as regiões pretas são as incertezas experimentais relativas as curvas cinzas.

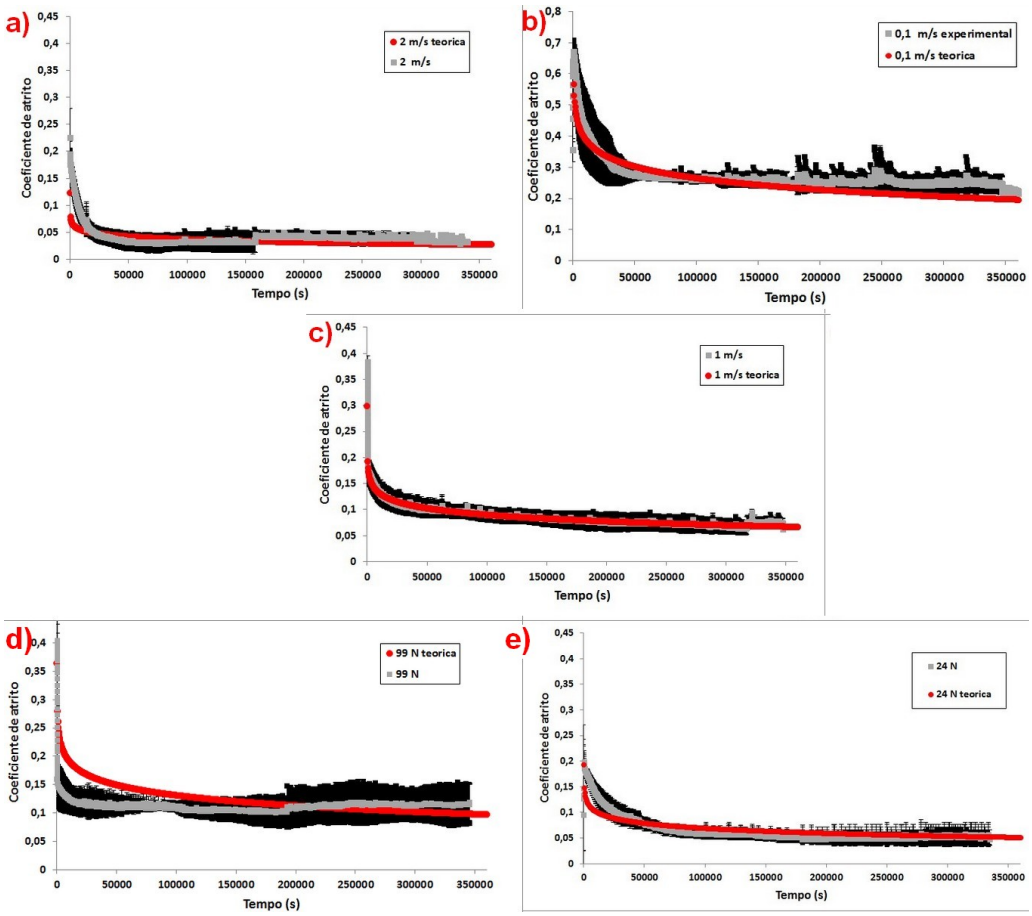

Figura 4.67 – Comparação entre as curvas simuladas e curvas de ensaios. Fonte: Autor.

Onde:

a) Representa o ensaio feito a 2 m/s e carga de 54 N e sua previsão teórica a partir do modelo proposto;
b) Representa o ensaio feito a 0,1 m/s e carga de 54 N e sua previsão teórica;
c) Representa o ensaio feito a 1 m/s e carga de 54 N (ensaio padrão) e sua previsão teórica;
d) Representa o ensaio feito a 1 m/s e carga de 99 N e sua previsão teórica;
e) Representa o ensaio feito a 1 m/s e carga de 24 N e sua previsão teórica.

A partir dos gráficos foi possível notar que a equação 4.24 gera uma boa previsão empírica para o sistema. As maiores discrepâncias entre as curvas ocorreram nos ensaios com 0,1 m/s e com 99 N, que também foram os ensaios com maiores valores de coeficiente de atrito e de oscilações nas curvas. Isso pode estar ligado ao fato de que esses ensaios exigem mais dos materiais e dos equipamentos alterando o comportamento das curvas de atrito em relação aos demais ensaios. Este comportamento também pode estar ligado ao fato de que em baixas velocidades e/ou altas cargas, supondo um regime misto de lubrificação, o sistema teria uma maior parcela de sua sustentação gerada por uma camada limítrofe, variável que não foi considerada nos modelos. Os modelos levam em conta apenas variáveis com comportamento hidrodinâmico, tais como velocidade e carga aplicada. Embora não tenha sido levado em conta na formulação dos modelos inseridos nesse trabalho as variáveis rugosidade inicial e adição de modificadores de atrito devem melhorar a capacidade de previsão do modelo em baixas velocidades e altas cargas, uma vez que alteram o comportamento da camada limítrofe.

Também foi possível perceber que são necessários alguns outros ajustes na equação, principalmente o fato de que ela somente ajusta a carga e a velocidade para valores acima de 50000 s, que foi uma simplificação imposta no problema. Outro ponto que necessita de ajuste é o fato de que a equação não considera a diferença de inclinação entre a curva do ensaio padrão e as demais. A figura 4.68 representa a previsão teórica para os ensaios feitos a 1 m/s com o efeito da carga.

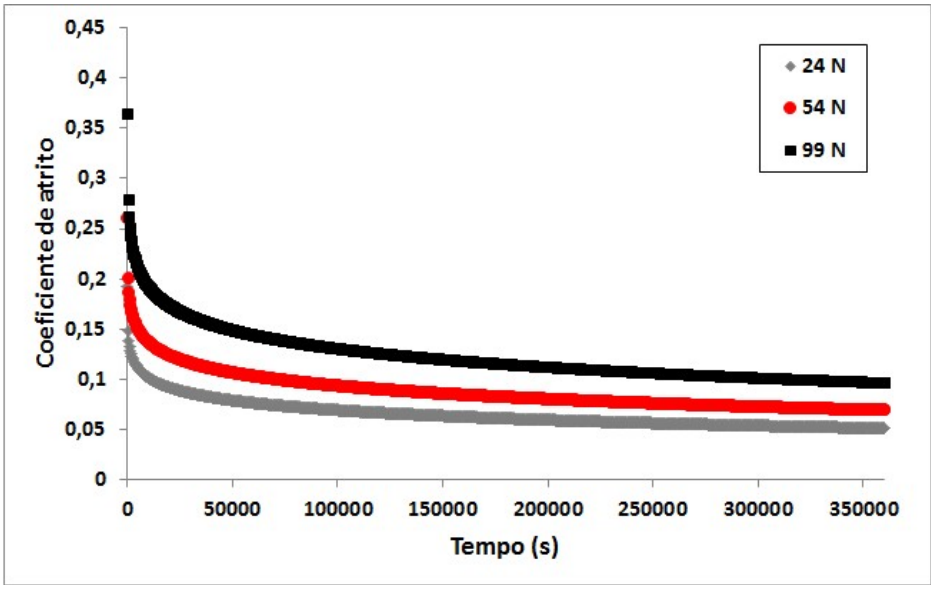

Figura 4.68 – previsão teórica para os ensaios feitos a 1 m/s com o efeito da carga

4.8 Análise crítica do modelo

O modelo apresentado explica satisfatoriamente os efeitos de carga aplicada e velocidade, salvo nas condições relatadas. Entretanto não considera os efeitos de rugosidade e nem os resultados da adição de modificadores de atrito. A explicação para estes efeitos parecem decorrer da importância da lubrificação limítrofe em conjunto a lubrificação hidrodinâmica (regime de lubrificação misto). A seguir será feita a análise do ajuste dos resultados experimentais com modelos de lubrificação da literatura de modo a verificar esta hipótese. Para isso calculam-se os parâmetros de Hertz, Hamrock e Dowson e a curva de Stribeck, além de paramentos como espessura de filme, coeficiente de atrito e o parâmetro Λ para alguns regimes de lubrificação.

4.8.1 Parâmetros de Hertz, Hamrock e Dowson

A partir das equações 2.10 a 2.30 foi possível calcular alguns parâmetros de contato. Como esses parâmetros não levam em conta o efeito da velocidade, foram considerados como parâmetros de contato inicial. A tabela 4.38 mostra os parâmetros inicias de Hertz, Hamrock e Dowson.

Tabela 4.38 – parâmetros inicias de Hertz, Hamrock e Dowson.

Parâmetros de Hertz, Hamrock and Dowson			
raio reduzido de curvatura (mm)	2,7775 ± 0,0025		
módulo de Young reduzido (GPa)	367,6 ± 2,4		
Carga (N)	24,7 ± 0,7	54,0 ± 0,6	100,3 ± 0,8
Parâmetro a (μm)	84,7 ± 0,8	110,0 ± 0,8	135,2 ± 1,2
Parâmetro b (μm)	82,0 ± 0,7	106,4 ± 0,7	130,8 ± 1,1
Pressão de contato máxima (GPa)	1,70 ± 0,05	2,20 ± 0,03	2,71 ± 0,04
Pressão de contato média (GPa)	1,132 ± 0,035	1,469 ± 0,022	1,81 ± 0,03
Máxima deflexão (μm)	1,16	1,95	2,94
Máx. tensão de cisalhamento (GPa)	0,579 ± 0,020	0,751 ± 0,014	0,923 ± 0,018
Profundidade máxima tensão de cisalhamento (μm)	39,6 ± 0,5	68,2 ± 0,5	83,9 ± 0,7

Fonte: Autor.

A partir da tabela e dos dados de Pressão de contato no final do ensaio foram feitos os gráficos da figura 4.69 e 4.70. A figura 4.69 mostra os dados de pressão de contato com variação da velocidade, e a figura 4.70 em função da carga. Os dados estão em escala logarítmica. Nos gráficos a indicação P_{med} indica a Pressão de contato média (GPa) e P_{max} indica a Pressão de contato máxima (GPa).

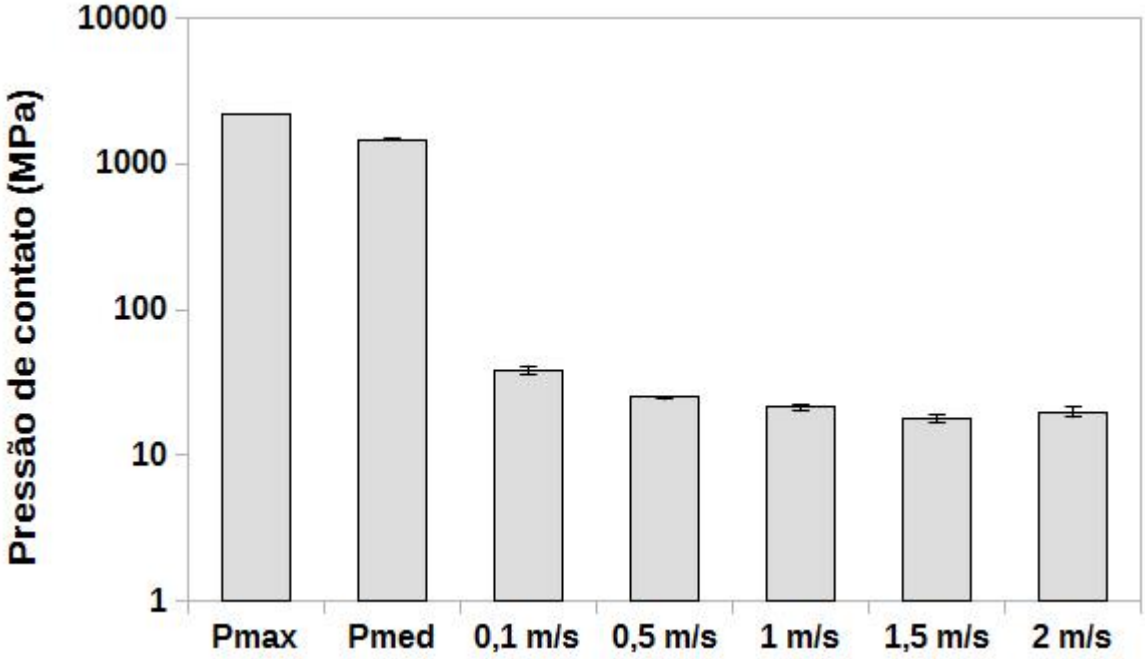

Figura 4.69 – Pressão de contato em função da velocidade. Fonte: Autor.

A partir da figura foi possível notar uma queda de duas ordens de grandeza nos valores de pressão de contato, causado pela geometria do contato. No início temos um contato pontual e no final uma calota formada na esfera. Também foi possível verificar através da figura e da tabela 4.20 que a pressão de contato no final do ensaio cai até o ensaio de 1,5 m/s e depois aumenta.

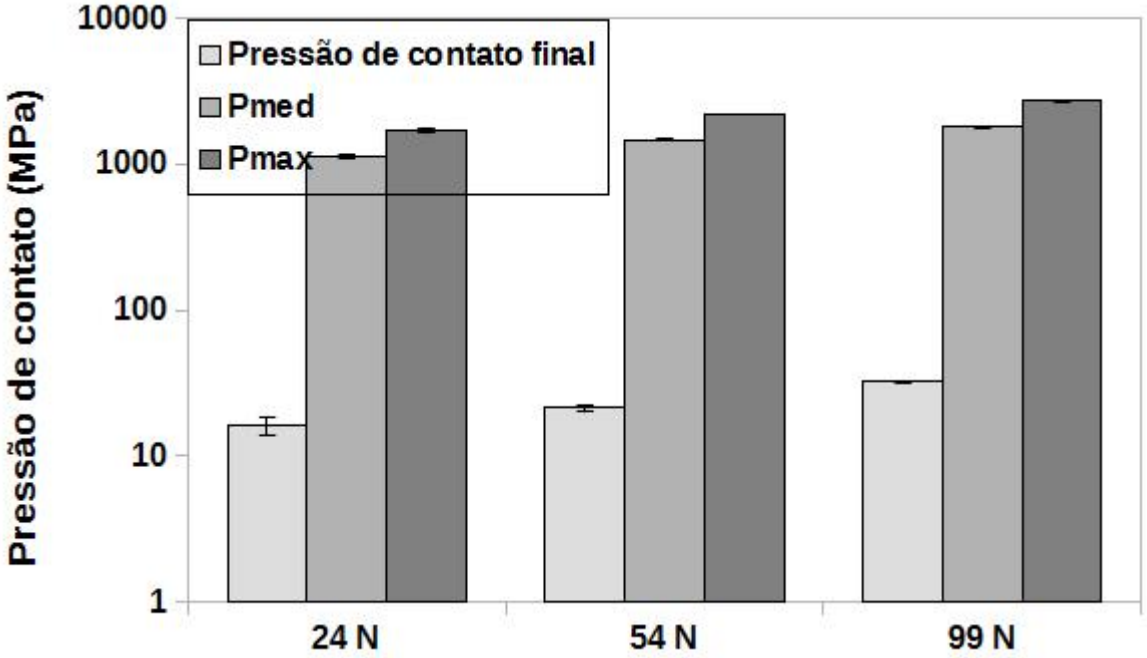

Figura 4.70 – Pressão de contato em função da carga. Fonte: Autor.

A figura 4.69 mostra que a pressão de contato em função da carga varia de maneira uniforme, ou seja, a diferença do ensaio 24 N para o ensaio 54 N tanto na pressão de contato final quanto na pressão de contato inicial foi de aproximadamente 1/3 do valor, já a diferença entre o ensaio 54 N e o ensaio 99 N nos três parâmetros foi de em média 75%.

4.8.2 Curva de Stribeck

A partir dos dados dos ensaios foram confeccionadas duas curvas de Stribeck. A figura 4.71 mostra a curva do coeficiente de atrito em função do parâmetro Viscosidade x Velocidade /Carga. A figura 4.72 mostra o coeficiente de atrito em função do parâmetro Viscosidade x Velocidade / Pressão de contato.

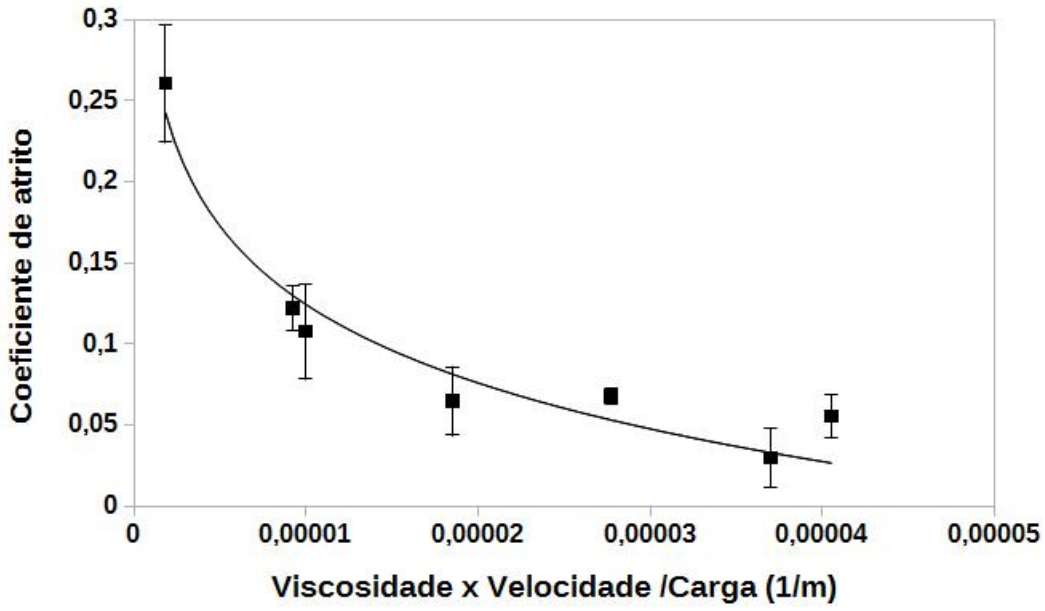

Figura 4.71 – curva de Stribeck em função da carga. Fonte: Autor.

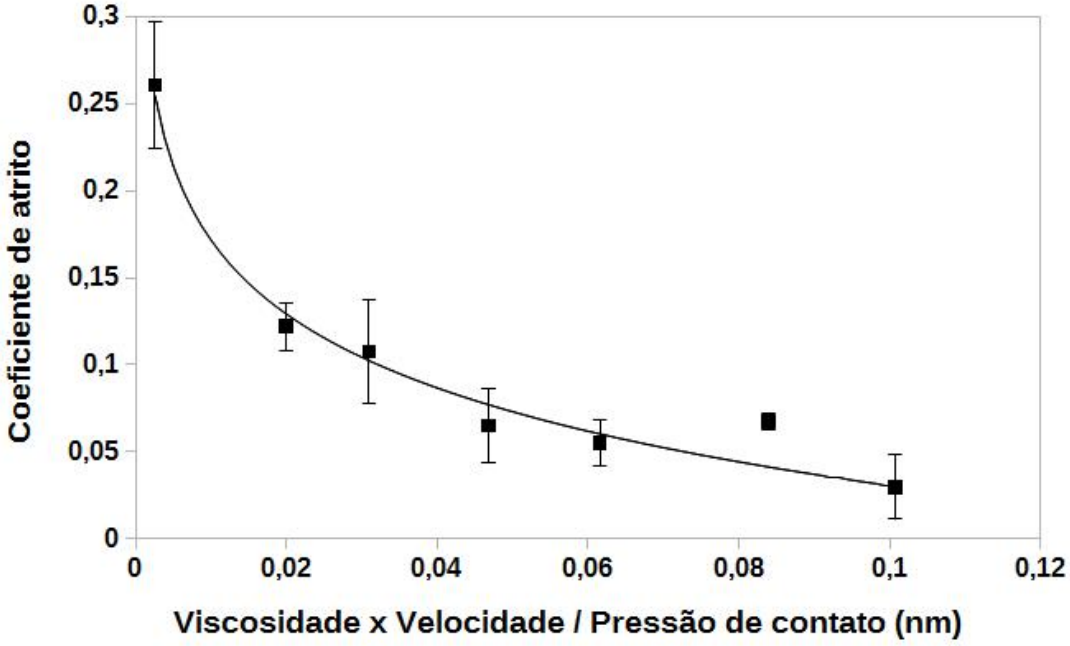

Figura 4.72 – curva de Stribeck em função da pressão de contato. Fonte: Autor.

A partir da análise das figuras 4.71 e 4.72 podemos ver que o coeficiente de atrito cai em função das variáveis analisadas em ambos os gráficos, indicando que o sistema pode estar seguindo o comportamento denotado pela curva de Stribeck, ou seja, no ponto onde há um valor maior de coeficiente de atrito pode estar agindo o regime limítrofe e no ponto onde há um menor coeficiente de atrito pode estar atuando o regime hidrodinâmico. Esse comportamento pode ser interpretado como a

variação do tamanho da camada limítrofe gerada na superfície do sistema, sendo que a parte mais à esquerda da curva indica uma maior contribuição da camada limítrofe no valor de coeficiente de atrito e a porção mais à direita da curva indica uma contribuição maior do regime hidrodinâmico.

4.8.3 Discussão dos resultados com base no modelo hidrodinâmico de lubrificação

A partir das equações 2.3 a 2.9 foi possível determinar vários parâmetros levando-se em consideração o regime hidrodinâmico de lubrificação para o contato circular. Os dados estão compilados na tabela 4.39, e ignoram qualquer porção limítrofe que possa existir no sistema.

Tabela 4.39 – parâmetros obtidos a partir da teoria de lubrificação hidrodinâmica.

Razão de convergência – K	1,2						
Ensaio	**Velocidade**					**Carga**	
Velocidade (m/s)	0,1	0,5	1	1,5	2	1	1
Carga (N)	54,1	54,1	54,1	54,1	54,1	24,7	100,3
Raio calota (mm)	0,7	0,8	0,85	0,97	0,9	0,7	1,01
Rugosidade Combinada (μm)	0,18	0,21	0,218	0,142	0,21	0,16	0,183
h_0 (μm)	0,015	0,040	0,062	0,092	0,095	0,068	0,059
h_1 (μm)	0,032	0,088	0,14	0,20	0,21	0,15	0,13
Λ	0,081	0,190	0,28	0,65	0,45	0,43	0,32
W (N)	90,3	90,3	90,3	90,3	90,3	41,2	167,4
F (N)	0,007	0,016	0,023	0,030	0,034	0,014	0,035
Coeficiente de atrito	0,00007	0,00017	0,00025	0,00033	0,00037	0,00034	0,00020
Q (mm^3/s)	0,0021	0,033	0,11	0,28	0,36	0,10	0,12

Fonte: Autor.

A partir dos dados vemos que os valores de coeficiente de atrito gerados são sempre menores que os valores encontrados nos ensaios experimentais.

Também foi possível notar que os valores de espessura mínima e máxima são

sempre menores que os valores de rugosidade combinada, quantificado pelo parâmetro Λ e mostrado na figura 4.73, indicando que não poderia haver espaço suficiente entre as superfícies para a formação de um filme hidrodinâmico.

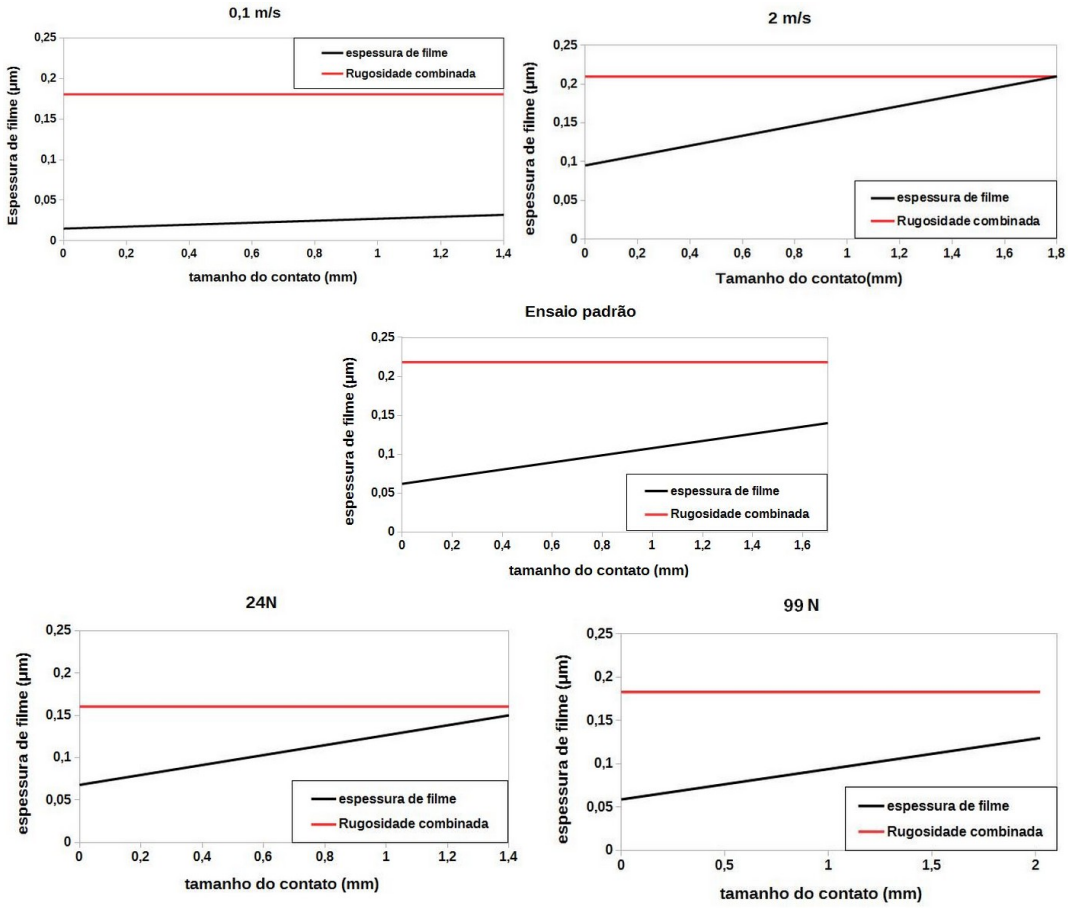

Figura 4.73 – Comparação entre espessura de filme e rugosidade combinada. Fonte: Autor.

Com os dados da tabela e dos gráficos podemos inferir que o regime de lubrificação que governa esse sistema não é hidrodinâmico ou se for hidrodinâmico seria necessário uma reformulação ou adequação nas equações listadas no capítulo 2.

4.8.4 Discussão dos resultados com base no modelo elastohidrodinâmico de lubrificação

Apesar de nenhum relato na literatura englobar o regime de lubrificação elastohidrodinâmica para esses materiais, neste trabalho foi utilizado esse sistema a fim de poder servir como parâmetro de comparação em relação a outros modelos e

para não restar dúvidas sobre sua ineficácia em prever o comportamento do sistema. Os dados estão dispostos na tabela 4.40.

Tabela 4.40 – Valores de espessura de filme obtidos a partir do modelo elastohidrodinâmico.

Ensaio	**Carga**			**Velocidade**			
Velocidade (m/s)	1	1	1	0,1	0,5	1,5	2
Carga (N)	24,7	54	100,3	54	54	54	54
Espessura de filme							
h_0 (µm)	0,0013	0,0012	0,0012	0,0003	0,0008	0,0016	0,0019
h_C (µm)	0,0016	0,0015	0,0014	0,0003	0,0009	0,0019	0,0024
Λ	0,0080	0,0055	0,0063	0,0014	0,0036	0,0112	0,0092
Regimes de EHL							
Isoviscoso rígido							
h_{min} (µm)	4,81E-9	1,01E-9	2,91E-10	1,01E-11	2,51E-10	2,26E-9	4,02E-9
Λ	3,00E-8	4,57E-9	1,59E-9	5,59E-11	1,20E-9	1,59E-8	1,92E-8
Piezoviscoso rígido							
h_{min} (µm)	7,61E-7	7,61E-7	7,61E-7	1,64E-7	4,79E-7	9,97E-7	1,21E-6
Λ	4,75E-6	3,46E-6	4,16E-6	9,11E-7	2,28E-6	7,02E-6	5,75E-6
Isoviscoso elástico							
h_{min} (µm)	3,60E-8	3,05E-8	2,67E-8	6,67E-9	1,93E-8	3,98E-8	4,82E-8
Λ	2,25E-7	1,39E-7	1,46E-7	3,71E-8	9,19E-8	2,81E-7	2,29E-7
Piezoviscoso Elástico							
h_{min} (µm)	4,54E-7	4,28E-7	4,08E-7	8,94E-8	2,67E-7	5,64E-7	6,85E-7
Λ	2,84E-6	1,94E-6	2,23E-6	4,97E-7	1,27E-6	3,97E-6	3,26E-6

Fonte: Autor.

Na tabela vemos que os valores de espessura de filme mínima são

extremamente baixos com h_0 variando entre 0,0019 μm e $1x10^{-11}$ μm, e do parâmetro Λ muito menores que 1, que denotaria deformação da superfície e desgaste excessivo, coisa que não foi verificado durante os ensaios realizados (demonstrado pelos dados relatados nesse trabalho). Comparando os resultados com o gráfico da figura 2.13 vemos que os valores não coincidem com nenhum dos regimes apresentados, situando-se fora da curva. Esses fatos mostram que as equações para o sistema elastohidrodinâmico não reflete o sistema estudado.

4.8.4.1 Discussão dos resultados com base no Modelo elastohidrodinâmico de lubrificação com correção para o efeito de rugosidade

A partir dos estudos e das modificações realizadas por Masjedi e Khonsari (58) no sistema EHL, onde foi considerado o efeito da rugosidade, foi realizado o estudo mostrado na tabela 4.41.

Tabela 4.41 – Valores de espessura de filme no modelo elastohidrodinâmico, com efeito da rugosidade

Ensaio	**Carga**			**Velocidade**			
Velocidade (m/s)	1	1	1	0,1	0,5	1,5	2
Carga (N)	24,7	54	100,3	54	54	54	54
Espessura de filme							
Sem efeito da rugosidade							
h_c (m)	0,0023	0,0022	0,0022	0,0005	0,0014	0,0029	0,0035
h_{min} (m)	0,0008	0,0007	0,0007	0,00014	0,0004	0,0009	0,0011
Λ	0,0047	0,0032	0,0036	0,0008	0,0020	0,0066	0,0054
Com efeito da rugosidade							
h_c (m)	0,012	0,008	0,009	0,013	0,009	0,012	0,009
h_{min} (m)	0,013	0,008	0,009	0,013	0,009	0,013	0,009
Λ	0,079	0,038	0,051	0,070	0,044	0,089	0,041

Fonte: Autor.

Como foi possível notar na tabela os valores do parâmetro Λ se mostram baixos (<<1) quando foram considerados os valores de rugosidade, evidenciando

que o sistema de lubrificação elastohidrodinâmico, mesmo considerando o efeito da rugosidade, não condiz com o sistema alumina – alumina.

4.8.5 Discussão dos resultados com base no modelo misto de lubrificação

No modelo de lubrificação misto onde parte da carga do sistema é suportado pela lubrificação hidrodinâmica e parte pelo regime limítrofe ocasionado pela tribocamada formada, um dos problemas seria estimar a tensão de cisalhamento da tribocamada. Para tentar estimar essa tensão de cisalhamento foi confeccionado o gráfico da figura 4.74, onde foram utilizados como parâmetros: carga 54 N, velocidade 1 m/s, dureza 15 GPa e viscosidade 0,001 Pa.s. Como mostrado na equação 2.8 os valores de coeficiente de atrito mínimo no sistema hidrodinâmico ocorrem quando o parâmetro K = 1,55, o que implica que o parâmetro m seja igual a 2,55, portanto para todos os cálculos foi utilizado este valor.

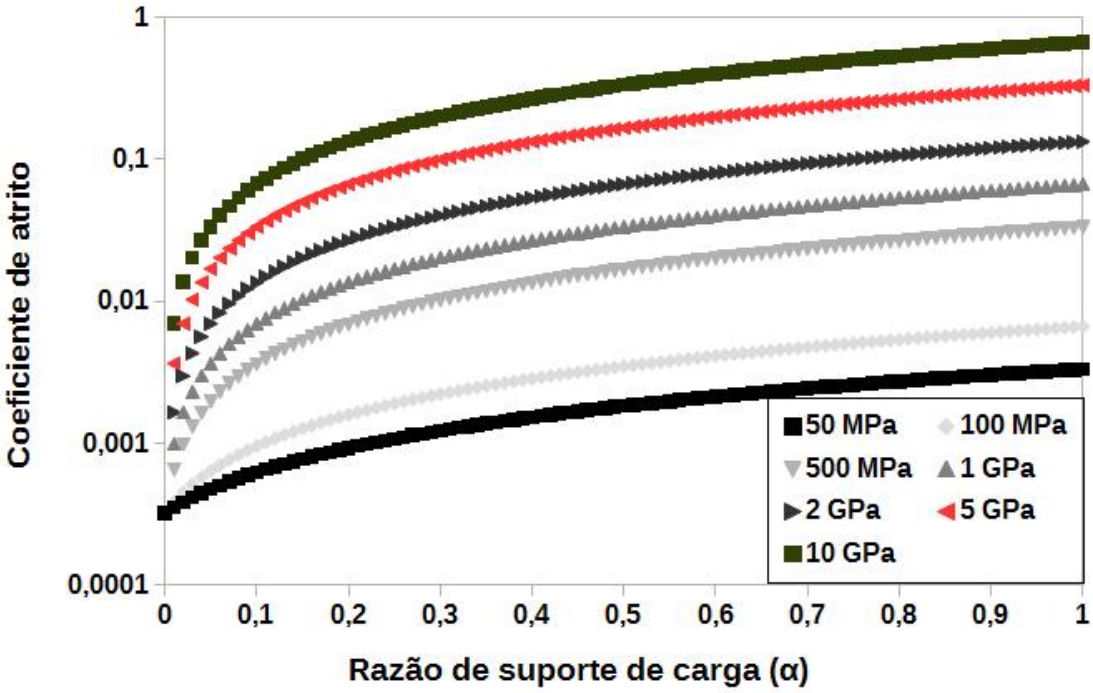

Figura 4.74 – Coeficiente de atrito em função da razão de suporte de carga e da tensão de cisalhamento da camada limítrofe. Fonte: Autor.

Através da figura 4.74, que foi confeccionada com os mesmos dados utilizados nos ensaios padrão, e tomando como base o valor do parâmetro α = 0,5

(50% de contribuição hidrodinâmica), vemos que para um valor de coeficiente de atrito de aproximadamente 0,06 (valor obtido no ensaio padrão), temos um valor de tensão de cisalhamento da camada limítrofe de aproximadamente 2 GPa que será o valor utilizado como padrão para os cálculos a seguir.

A tabela 4.42 mostra os valores calculados de espessura mínima de filme (representado por h_0) e coeficiente de atrito (representado por COF) para três valores de α.

Tabela 4.42 – Coeficiente de atrito e espessura mínima de filme no regime misto.

K	1,55							
m	2,55							
Tensão de cisalhamento na camada (GPa)	2							
Ensaio	**Velocidade**					**Carga**		
Carga (N)	54,1	54,1	54,1	54,1	54,1	24,7	54,1	100,3
Velocidade (m/s)	0,1	0,5	1	1,5	2	1	1	1
Rugosidade Combinada (μm)	0,18	0,21	0,218	0,142	0,21	0,16	0,22	0,183
α	0,1							
h_0 (μm)	0,03	0,08	0,13	0,19	0,19	0,14	0,13	0,12
Λ	0,17	0,39	0,58	1,32	0,92	0,87	0,57	0,65
COF	0,013	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014
α	0,5							
h_0 (μm)	0,04	0,11	0,17	0,25	0,26	0,19	0,17	0,16
Λ	0,22	0,52	0,77	1,78	1,24	1,17	0,77	0,88
COF	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067
α	0,9							
h_0 (μm)	0,09	0,24	0,38	0,56	0,58	0,42	0,38	0,36
Λ	0,50	1,16	1,73	3,97	2,77	2,61	1,72	1,96
COF	0,120	0,120	0,120	0,120	0,120	0,120	0,120	0,120

Fonte: Autor.

A partir da análise da tabela podemos verificar três diferentes comportamentos nos três diferentes valores do parâmetro α. Quando α = 0,1 (predominantemente hidrodinâmico) vemos que os valores do coeficiente de atrito e do parâmetro Λ são baixos, mas próximos aos valores encontrados principalmente em ensaio com alta velocidade e baixa carga. Quando α = 0,5 vemos que os valores do coeficiente de atrito e do parâmetro Λ são próximos aos valores encontrados principalmente nos ensaio com velocidades e cargas intermediárias (ensaio padrão). Quando α = 0,9 (predominantemente limítrofe) vemos que os valores do coeficiente de atrito e do parâmetro Λ são relativamente mais altos, mas próximos aos valores encontrados principalmente em ensaio com baixa velocidade e alta carga. Os valores encontrados nessa previsão teórica são compatíveis com os valores encontrados nas curvas de Stribeck, ou seja, altos coeficientes de atrito para altas cargas e baixas velocidades e baixo coeficiente de atrito para baixas cargas e altas velocidades.

A figura 4.75 mostra os valores de espessura de filme em função da velocidade e do parâmetro α.

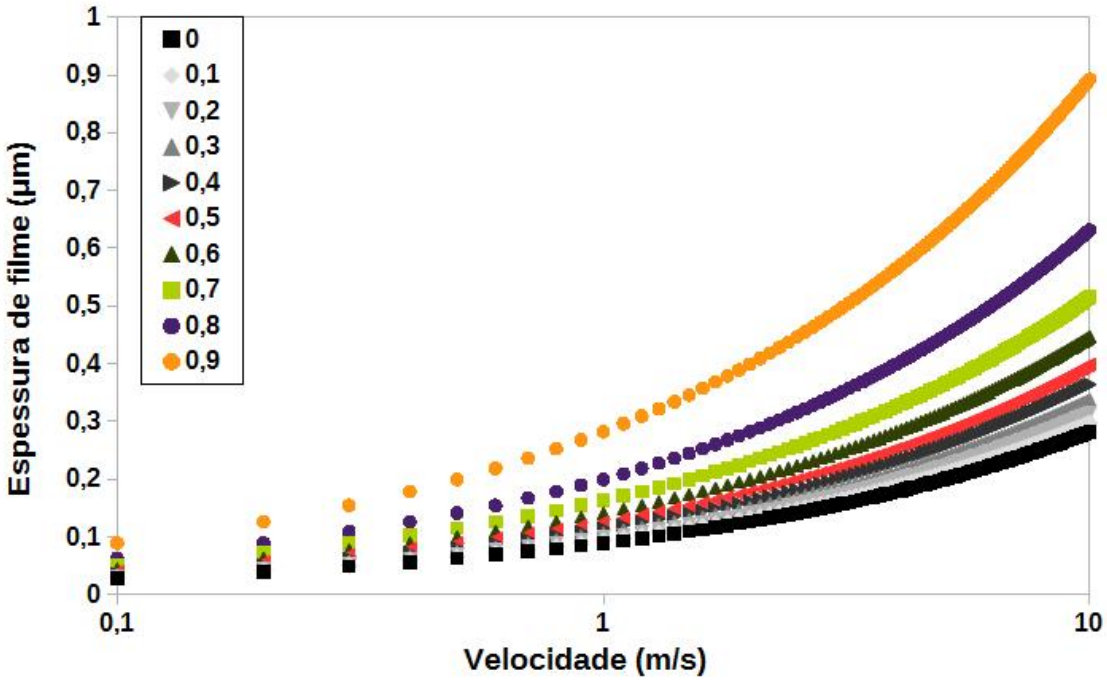

Figura 4.75 – espessura de filme em função da velocidade e do parâmetro α. Fonte: Autor.

A partir da figura 4.75 foi possível perceber que o valor da espessura de filme aumenta com a velocidade e com o valor de α. Indicando que uma parcela da carga tem que ser suportada por uma camada limítrofe. Se considerarmos somente a

porção hidrodinâmica (Curva preta), vemos que seria necessário uma velocidade de aproximadamente 8 m/s para atingir uma espessura de filme do mesmo tamanho do valor de rugosidade combinada (aproximadamente 0,2 μm), ou seja, para termos o parâmetro Λ = 1.

A partir desses dados foi possível afirmar que o melhor modelo para representar o sistema alumina – alumina seria o modelo de lubrificação misto.

A partir dessa premissa podemos tentar verificar se ocorre realmente a formação de um tribofilme, provavelmente feita de hidróxido de alumínio, com o cálculo da temperatura na superfície durante o ensaio e verificação se há algum vestígio dessa camada por meio de espectroscopia Ramam.

4.8.5.1 Temperatura flash

Para efeito de validação da teoria de formação de hidróxido de alumínio por reações triboquímicas, foram realizados os cálculos de temperatura flash a partir das equações entre 2.63 a 2.74.

Os dados de temperatura flash média (T_{fa}) e máxima (T_{fmax}) no início e no final dos testes estão dispostos na tabela 4.43.

Tabela 4.43 – Temperaturas flash no início e no final do ensaio.

Ensaio	**Velocidade**					**Carga**	
Carga (N)	54	54	54	54	54	24,7	100,3
Velocidade (m/s)	0,1	0,5	1	1,5	2	1	1
Início do ensaio							
Número de Peclet	0,99	5,0	9,9	14,9	19,8	7,7	12,2
T_{fa} (K)	29,3	65,4	92,5	113,3	130,8	62,3	126,4
T_{fmax} (K)	351,7	795,7	1141,6	1418,1	1660,6	932,7	1341,3
Final do ensaio							
Número de Peclet	6,3	36,0	76,6	131,1	162,2	63,1	91,0
T_{fa} (K)	2,5	2,2	1,4	1,7	0,9	0,7	3,8
T_{fmax} (K)	496,2	578,7	453,7	744,5	368,4	300,7	1004,8

Fonte: Autor.

A partir dos dados foi possível perceber que os valores de temperatura flash diminuem cerca de 1 ordem de grandeza entre o início e o final do teste.

A partir dos dados dos ensaios foi possível calcular os aumentos de temperaturas na superfície de contato média (T_{fa}) e máxima (T_{fmax}) em função do tempo para o ensaio padrão. Os dados estão dispostos nas figuras 4.76 (escala logarítmica) e 4.77.

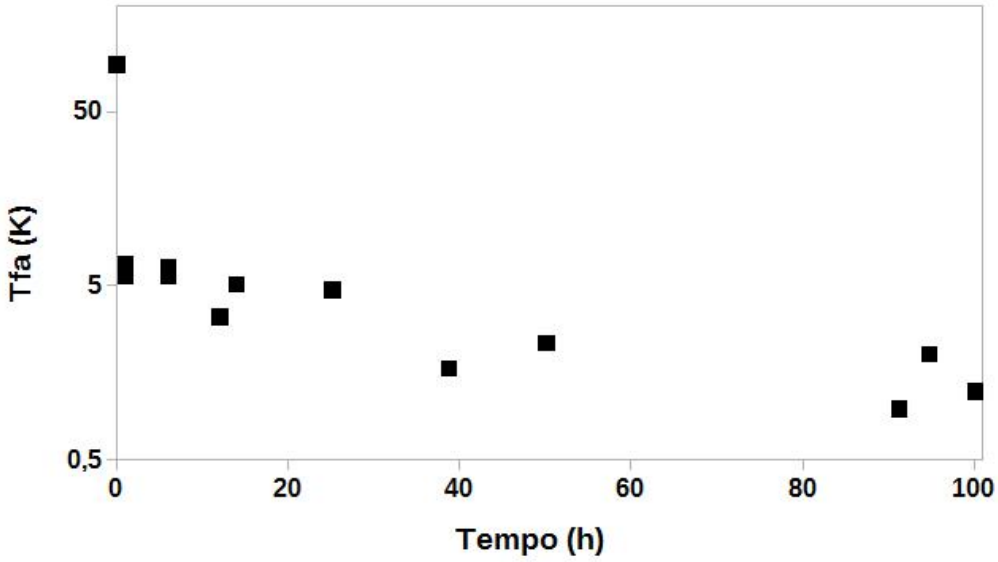

Figura 4.76 – Temperatura flash média (K) em função do tempo (escala logarítmica). Fonte: Autor.

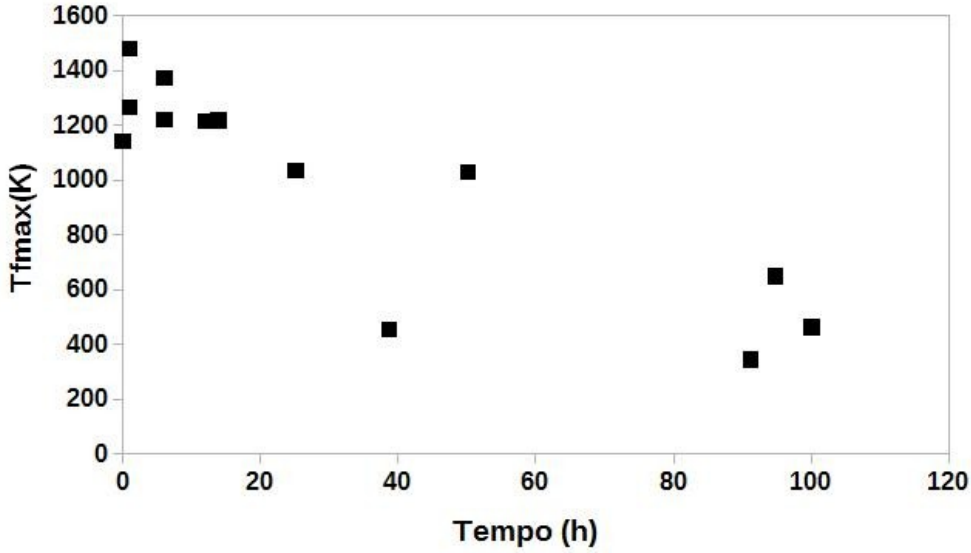

Figura 4.77 – Temperatura flash máxima (K) em função do tempo. Fonte: Autor.

A partir das figuras foi possível notar que as temperaturas T_{fa} e T_{fmax} tem uma

queda no valor em função do tempo, sendo que em T_{fa} ocorre um pico inicial e em T_{fmax} não.

Com isto foi possível prever que com o aumento da temperatura na superfície decorrente do desgaste, pode ter ocorrido a formação de um composto de hidróxido de alumínio localmente gerado por reação triboquímica, principalmente nos momentos iniciais do ensaio a partir dos debris.

4.8.5.2 Espectroscopia Ramam

As figuras 4.78 e 4.79 mostram exemplos de espectroscopia Ramam feitas nos discos dentro e fora das trilhas de desgaste.

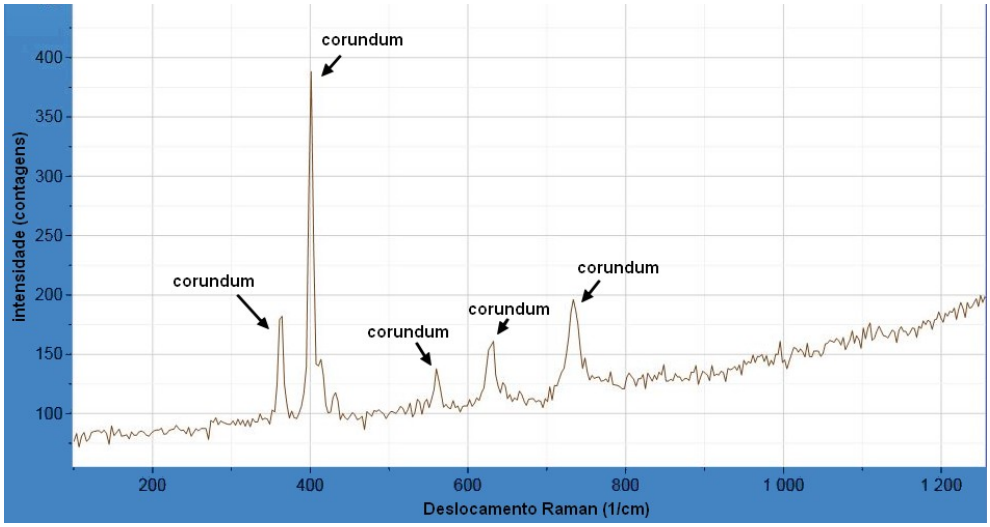

Figura 4.78 – Espectro Ramam realizado fora da trilha de desgaste(disco não polido).

Fonte: Autor.

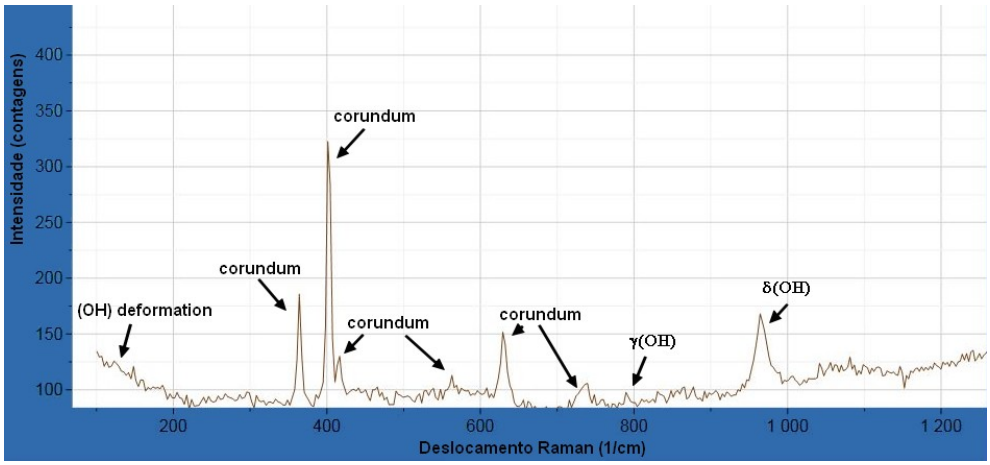

Figura 4.79 – Espectro Ramam realizado dentro da trilha de desgaste. Fonte: Autor.

Fazendo uma comparação entre os espectros das figuras e os dados da literatura sobre espectroscopia Ramam dos materiais Alumina (corundum) e hidróxidos de alumínio (Gibbsita, Bayerita, nordstrandita, Boehmita e Diaspore) (76) (77)(78), vemos que os dois espectros são dominados pelos picos gerados pela alumina.

Apesar da dificuldade em discernir os picos gerados pela ligação Al-O dos picos gerados pela ligação O-H, nos espectros gerados dentro das trilhas de desgaste do disco foi possível notar que há picos distintos gerados pelo grupo funcional hidroxila, além de uma banda gerada pela deformação deste grupo.

Isto indica que deve ter havido a formação hidróxido de alumínio durante os ensaios, camada que seria responsável pela diminuição do coeficiente de atrito durante os testes.

4.9 Discussão Geral

Analisando os valores obtidos a partir dos ensaios tribológicos foi possível criar um modelo teórico para prever o comportamento do sistema e verificar que:

Comparando os ensaios realizados com esferas de nitreto de silício (1) com os ensaios realizados com esferas de alumina, percebeu-se que ensaios realizados com esferas de alumina tem um menor desgaste e um comportamento dos valores de coeficiente de atrito mais previsíveis, porém os valores obtidos são maiores. Depois de aproximadamente uma hora o valor do coeficiente de atrito para esferas

de nitreto de silício cai para valores de μ < 0,01, fato que não acontece em ensaios com esferas de alumina, nesse intervalo de tempo os valores de coeficiente de atrito o valor de coeficiente de atrito fica em torno de μ = 0,2.

Em ensaios preliminares percebeu-se que houve uma tendência de queda no valor do coeficiente de atrito, de maneira que se tornava inverídica a afirmação de vários autores que o coeficiente de atrito no par alumina – alumina era constante com valores em torno de μ = 0,2.

Em ensaios com velocidade de 1 m/s e carga de 54 N após 100 horas de ensaio os valores de coeficiente de atrito alcançam valores de μ = 0,065 ± 0,021. A partir destes ensaios também foi possível perceber que os valores de rugosidade no disco caem de 0,538 ± 0,014 para 0,164 ± 0,010 indicando um alisamento da superfície, condição dita por alguns autores como necessária para manter um sistema de lubrificação hidrodinâmica. Além desses fatos foi possível notar que a porosidade das superfícies diminuem de cerca de 20% para aproximadamente 6 % mostrando que de alguma forma os poros do material foram cobertos, possivelmente por uma camada de hidróxido de alumínio formado por reação triboquímica a partir dos debris gerados durante o desgaste, levando a crer que o regime de lubrificação é misto, ou seja, parcialmente hidrodinâmico e parcialmente limítrofe.

Em ensaios com variação de velocidade obtiveram-se coeficientes de atrito que decaiam com o aumento da velocidade com valores de aproximadamente μ = 0,25 para velocidades de 0,1 m/s e μ = 0,03 para valores de 2 m/s. Indicando que o sistema poderia seguir o regime hidrodinâmico de lubrificação. Assim como o coeficiente de atrito o desgaste cai em função da velocidade, o que também indica uma tendência ao sistema hidrodinâmico.

Em ensaios com variação de carga o aumento da carga, também aumentou o valor de coeficiente de atrito com valores entre μ = 0,06 para 24 N e μ = 0,1 para 99 N. Indicando que o sistema pode ser hidrodinâmico.

Em ensaios com variação de rugosidade inicial houve um aumento no coeficiente de atrito com a diminuição da rugosidade. Esse fato pode indicar que o

regime de lubrificação não é hidrodinâmico uma vez que as superfícies polidas que seriam necessárias ao regime hidrodinâmico estavam presentes desde o começo do ensaio. Outro argumento que pode colaborar para essa teoria foi o fato de que com uma rugosidade menor há também menos picos de asperezas a ser removido, o que geraria uma quantidade menor de debris, fato que limitaria a produção por via triboquímica de hidróxido de alumínio, composto que teoricamente diminuiria o valor do coeficiente de atrito. Este argumento pode ser reforçado pelos valores de taxa de desgaste combinado que ficou em aproximadamente 10 $\mu m^3/(N*m)$ no disco 'polido' e aproximadamente 15 $\mu m^3/(N*m)$ para o disco não polido, uma variação de 50 %.

Em ensaios com adição de modificadores de atrito, observou-se que a adição de sílica à água diminui o valor final de coeficiente de atrito e o desgaste no disco. Enquanto a adição de carbeto de silício aumentou o valor do desgaste e do coeficiente de atrito. Isso pode indicar que a sílica coloidal atua como lubrificante no sistema agindo como uma camada de baixa tensão de cisalhamento devido às suas características de repulsão eletrostática. O carbeto de silício adicionado ao ensaio provavelmente não foi transformado em sílica por reações triboquímicas, portanto sobressaiu suas propriedades abrasivas.

Na avaliação da perda de massa em função do tempo foi possível verificar que os valores médios de perda de massa nos primeiros 50000 s são aproximadamente a metade dos valores de perda de massa médio no restante do ensaio, passando de 0,033 ± 0,009 mg no início para 0,053 ± 0,016 mg no disco e de 0,013 ± 0,008 mg para 0,024 ± 0,012 mg na esfera. Isso indica que o regime de lubrificação nos ensaios pode não ser totalmente hidrodinâmico, pois apesar da tendência de queda na taxa de desgaste com o tempo, os valores de perda de massa continuam aumentando mostrando que há contato entre as asperezas do material, fato que não ocorre em regime de filme completo.

Na análise das curvas de Stribeck confeccionadas foi possível notar que a curva se comporta de maneira descendente indicando uma mudança de regime de lubrificação em função do parâmetro analisado, possivelmente mudando do regime limítrofe para o regime hidrodinâmico. Esse dado experimental concorda com o regime misto de lubrificação onde a maior velocidade e menor carga aumentaria a

porção hidrodinâmica consequentemente aumentado a espessura de filme diminuindo o desgaste e o coeficiente de atrito, e a diminuição da velocidade e aumento da carga aumentaria a porção limítrofe, aumentado também o desgaste e o coeficiente de atrito.

A partir da análise dos modelos teóricos de lubrificação foi possível concluir que tanto o modelo hidrodinâmico quanto o modelo elastohidrodinâmico não podem descrever esse ensaio efetivamente. Ambos geram valores de espessuras de filmes e do parâmetro Λ incompatíveis com os valores de rugosidade combinada geradas pelo sistema, mesmo após correções. O único modelo que se aproximou dos dados experimentais foi o de lubrificação mista. Onde foi possível estabelecer que o fator de razão de carga limítrofe varia em função das variáveis de entrada alterando também os valores de espessura de filme e de coeficiente de atrito, trazendo valores mais próximos aos encontrados nos dados experimentais.

Na análise das variações de temperatura na superfície de contato (temperaturas flash) podemos ver que há um aumento significativo nos valores, principalmente no início dos ensaios, indicando uma alta probabilidade de haver reações de transformação dos debris de alumina em hidróxido de alumínio, que seria o composto principal da camada limítrofe.

Analisando os dados de espectroscopia Ramam vemos uma pequena diferença nos espectros pré e pós ensaio, provavelmente devido aos grupos funcionais hidroxila, provenientes do hidróxido de alumínio. Este fato nos dá mais um indício da formação de uma camada triboquímica de baixa taxa de cisalhamento sobre a superfície do disco.

Com base nos dados acima relatados foi possível concluir que o regime de lubrificação não pode ser hidrodinâmico ou elastohidrodinâmico neste sistema, pois apesar de haver elementos da lubrificação hidrodinâmica, há também elementos que refutam essa teoria como por exemplo, o desgaste durante todo o ensaio e a formação de uma camada limítrofe, além do fato de que as equações utilizadas na teoria gerarem valores de espessura de filme menores do que a rugosidade combinada final.

Portanto resta o regime de lubrificação misto que combina a lubrificação hidrodinâmica com a lubrificação mista, sustentado pelo fato das curvas de Stribeck concordarem, a provável formação de uma camada que auxilia a diminuição do coeficiente de atrito e de desgaste e as equações que governam o regime coincidirem com sistema experimental.

Analisando a tabela 2.3 e comparando com os dados experimentais obtidos foi possível perceber que os autores que realizaram ensaios com o par alumina – alumina mencionados neste trabalho, em sua maioria, realizaram testes na região onde dominaria o regime de lubrificação limítrofe. Além desse fato os ensaios tiveram percurso máximo de 8700 m. Essas variáveis podem ter influenciado na dificuldade do alcance da região predominantemente hidrodinâmica ($\alpha < 0,5$) desse sistema.

Com base nos dados experimentais aventurou-se a realizar previsões teórico – empíricas para o valor da taxa de desgaste e do coeficiente de atrito no sistema deslizamento do par alumina – alumina lubrificado com água. Estas expressões (4.4, 4.10 e 4.24) quando analisadas e/ou simuladas geram resultados próximos aos obtidos experimentalmente aproximadamente dentro de seus erros experimentais, salvo suas restrições. A saber a equação 4.24 não foi corrigida para valores menores 50000 s e não foi levada em conta as inclinações das curvas.

A expressão 4.24 leva em conta somente as correções para carga e velocidade, variáveis hidrodinâmicas, o que implica que ela funciona predominantemente em regiões com $\alpha < 0,5$, ou seja, onde há predominância hidrodinâmica. Em regiões onde há forte influência da camada limítrofe a expressão desvia quando comparada aos dados experimentais.

5 Conclusões

O comportamento do valor do coeficiente de atrito entre ensaios realizados com esferas de nitreto de silício e os realizados com esferas de alumina são diferentes, sendo que no primeiro caso há muitas oscilações no valor no começo do ensaio que após aproximadamente 1 hora cessam e no mesmo momento há uma queda brusca no valor de atrito (de aproximadamente 0,2 para 0,007) permanecendo nesses valores até o encerramento. No segundo caso não há grandes oscilações nos valores de atrito durante o ensaio, que permanece com comportamento descendente durante todo o período medido podendo chegar a valores de até 0,06 para ensaios padrão (carga de 54 N e velocidade de 1 m/s), após 100 h de teste. Esses valores estão abaixo dos reportados na literatura como sendo os provenientes desse teste.

Em ensaios realizados com velocidades diferentes há uma variação no valor final de coeficiente de atrito, sendo que em velocidades menores ocorrem maiores valores de coeficiente de atrito (μ = 0,25 para 0,1 m/s) e em velocidades maiores ocorrem os menores valores de coeficiente de atrito (μ = 0,03 para 2 m/s).

Em ensaios feitos com cargas diferentes há uma variação no valor final de coeficiente de atrito, sendo que em cargas menores ocorrem menores valores de coeficiente de atrito e em cargas maiores valores de coeficiente de atrito maiores.

Estes resultados indicam que há no mínimo uma parcela hidrodinâmica no regime de lubrificação desse sistema, comprovado pelo comportamento da curva de Stribeck.

Há indicações que o regime de lubrificação não pode ser puramente elastohidrodinâmico, comprovado pela falta de concordância do modelo teórico atribuído a este regime com os dados experimentais.

O regime de lubrificação não pode ser puramente hidrodinâmico, uma vez que dados provenientes de ensaios como os realizados com diferentes rugosidades e com modificadores de atrito atestam para a formação de uma tribocamada com implicações no sistema de lubrificação limítrofe, além do fato de que as previsões teóricas para o regime puramente hidrodinâmico não são compatíveis com o resultado experimental, onde os valores encontrados para o parâmetro Λ são muito menores que 1, indicando contato entre as superfícies e inviabilizando o sistema

hidrodinâmico. Sendo assim se atribui o comportamento do sistema ao regime de lubrificação misto, onde parte da carga foi suportada pelo regime hidrodinâmico e outra parte pelo regime limítrofe, essa porcentagem de suporte depende de parâmetros como velocidade, carga, acabamento superficial, entre outros. Outras evidências que suportam essa teoria são a temperatura alta no contato, principalmente no início do ensaio (condição necessária para a formação de uma tribocamada provavelmente de hidróxido de alumínio) e a presença de hidróxidos (verificada por espectroscopia Ramam) na superfície desgastada indicando a presença de uma tribocamada.

A partir de dados experimentais e devido a natureza comportada da curva de taxa de desgaste foi possível ajustar uma previsão teórica para esta taxa, descrita pelas equações 4.4 e 4.10, onde foi possível estimar que após 12 horas de ensaio essa taxa atinge um valor praticamente constante (51,48 μm^3 /Nm para o disco e 33,52 μm^3 /Nm para a esfera).

Assim como no caso da taxa de desgaste, a natureza comportada da curva de coeficiente de atrito tornou possível ajustar uma previsão teórica para o valor do coeficiente de atrito para o par alumina – alumina, descrita pela equação 4.24, que leva em conta correções para o valor da carga e da velocidade. Com base nesse sistema foi possível estabelecer que para se atingir um valor de coeficiente de atrito de 0,001 no sistema Alumina – Alumina seriam necessários aproximadamente 155 dias. Os principais erros relativos a esses modelo estão relacionados aos fatos de que não leva em consideração as variáveis não hidrodinâmicas, nesse caso, modificadores de atrito e acabamento superficial, não levam em conta também a inclinação das curvas de atrito com o tempo e tempos menores que 50000 s.

Levando em conta essas simplificações os modelos descrevem com boa precisão o sistema estudado.

6 Sugestão para trabalhos Futuros

Para aprimorar os trabalhos realizados nesse estudo poderiam ser realizados:

a) Aprimorar o modelo teórico desenvolvido nesse trabalho;
   - Realizando previsões para os primeiros 50000 s;
   - Levando em consideração as inclinações das curvas de atrito para aprimorar o modelo;
   - Novos ensaios com diferentes cargas e diferentes velocidades a fim de melhorar o ajuste nestes casos;
   - Levar em consideração efeitos como a variação da viscosidade da água, o efeito do acabamento superficial, a adição de modificadores de atrito, entre outros para aprimorar o modelo.
   - Definir experimentalmente a taxa de cisalhamento da camada limítrofe (utilizando a técnica de riscamento ou modelagem computacional).

b) Pesquisar e aplicar outros modelos teóricos aos dados experimentais e comparar os resultados a fim de verificar a compatibilidade;

c) Aplicar a metodologia de ensaios e análise de dados a outros materiais, preferencialmente os que tenham curvas de valores de coeficiente de atrito e coeficiente de desgaste igualmente comportados, como por exemplo a zircônia (material cerâmico amplamente utilizado na indústria).

d) Utilizar outros lubrificantes de mesma viscosidade, mas de caráter apolar, para verificar o comportamento das cargas adsorvidas na superfície e verificar se o hidróxido de alumínio encontra-se em estado coloidal.

7 Referências Bibliográficas

(01) OLIVEIRA, R. P.; Ultra baixo coeficiente de atrito no deslizamento de Al_2O_3 – Si_3N_4: efeito das variáveis químicas (pH e concentração de sílica coloidal); Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da USP, 2012.

(02) BUTT H. J., KAPPL M.;Surface and interfacial forces; Wiley- VHC Verlag GmbH & Co. KgaA; 1ª ed – 2010.

(03) Gwidon W. Stachowiak and Andrew W. Batchelor; Engineering Tribology (Third Edition) elsevier Butterworth- Heinemann; 2005.

(04) Hutchings, I. M.; Tribology Friction and wear of engineering Materials,1992

(05) KATO, K., ADACHI K.; Wear of advanced ceramics; Wear 253 (2002) 1097–1104

(06) FERREIRA, V.; Ultra Baixo Coeficiente de Atrito Entre o Par Cerâmico Al_2O_3-Si_3N_4 em Água; Tese de Doutorado, Escola Politécnica da USP, 2008.

(07) FERREIRA, V.; Processamento, Caracterização Mecânica e Tribológica do Compósito Al_2O_3 – NbC; Dissertação de Mestrado, IPEN-USP, 2001.

(08) BLAU, P. J.; The significance and use of the friction coefficient; Tribology International 34 (2001) 585–591

(09) Rabinowicz, E.; Friction and Wear of Materials; New York, John Wiley and Sons (1995).

(10) FISCHER, T.E. AND TOMIZAWA, H.; Interaction of tribochemistry and microfracture in the friction and wear of silicon nitride, Wear, v. 105, 1985, p. 29-45.

(11) MING CHEN, KOJI KATO, KOSHI ADACHI; the difference in running-in period and friction coefficient between self mated Si_3N_4 and Sic under water lubrication; Tletters; vol 11, n°1, 2001;23-27.

(12) MING CHEN, KOJI KATO, KOSHI ADACHI; Friction and wear of self mated Si_3N_4 and Sic sliding in water; Wear 250; 246-255.

(13) D. AMUTHA RANI, Y. YOSHIZAWA, H. HYUGA, K. HIRAO, Y. YAMAUCHI; Tribological behavior of ceramic materials Si_3N_4, Sic and Al_2O_3 in aqueous medium; journal of the European ceramic society 24; 2004; 3279-3284.

(14) RICHARD S. GATES AND STEPHEN M. HSU; Tribochemistry between water and Si_3N_4 and Sic: Induction time analysis; Tribology letters; vol 17, n°3, October 2004;399-407.

(15) JUNGUO XU, KOJI KATO; Formation of tribochemical layer of ceramics sliding in water and its role for low friction; Wear; 2000; 61-75.

(16) K.H. Zum gahr; Sliding wear of ceramic-ceramic, ceramic-steel and steel-steel pairs in lubricated and unlubricated contact; *wear, 133 (1989) 1 22.*

(17) Sadao Asanabe; Applications of ceramics for tribological components; TRIBOLOGY international 0301-679X/87/060355-10 © Butterworth & Co (Publishers) Ltd

(18) Peter J. Blau; An observation of role reversal effects in unlubricated friction and wear tests of alumina and silicon carbide; Wear, 151 (1991) 193-197

(19) Shinya Sasaki; The effects of the surrounding atmosphere on the friction and wear of alumina, zirconia, silicon carbide and silicon nitride; wear, 134 (1989) 185 – 200

(20) Peter Andersson; Water-lubricated pin-on-disc tests with ceramics Peter; Wear, 154 (1992) 37-47

(21) B. Ltiffelbein, M. Woydt and K.-H. Habig; Sliding friction and wear of ceramics in neutral, acid and basic aqueous solutions; *Wear, 162-164 (1993) 220-228*

(22) S.M. Hsu, M.C. Shen; Ceramic wear maps; Wear 200 (1996) 154-175

(23) FindIt; ICSD – Inorganic Crystal Structure Database; http://www.fiz-karlsruhe.de/icsd.htmL

(24) Sintered Alumina (Al_2O_3);NIST Structural Ceramics Database, SRD Database Number 30 – https://srdata.nist.gov/CeramicDataPortal/Pds/Scdaos

(25) - Proceedings of IEEE, Vol 70, No.5, May 1982, p.421 https://www.memsnet.org/material/aluminumoxideal2o3bulk/

(26) WAGNER, W.; PRUSS, A.; The IAPWS formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use; J. Phys. Chem. Ref. Data, 2002, 31, 2, pag. 387-535.

(27) Water, What is Water? About its Science, Chemistry and Structure http://www.3dchem.com/molecules.asp?ID=234; acessado em 23/11/2010

(28) BACCAN, N., ALEIXO, L. M., STEIN, E., GODINHO, O. E. S.; Introdução à Semimicroanálise Qualitativa; 6ª Edição; Editora da Unicamp; 1995.

(29) E.W. LEMMON, M.O. MCLINDEN AND D.G. FRIEND, "Thermophysical Properties of Fluid Systems" in NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69, Eds. P.J. Linstrom and W.G. Mallard, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD, 20899, http://webbook.nist.gov, acessada 19 setembro 2015).

(30) B.O. Jacobson; Rheology and Elastohydrodynamic Lubrication; Elsevier Science Publishers BV, 24 de jul de 1991.

(31) M. B. Peterson and S. F. Murray, Frictional behavior of ceramic materials. Met. Eng. Q. 7 (2), 22-29 (1967).

(32) 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. STLE Trans., v. 30, 1987, p. 41–46.

(33) Ming-Chang Jeng and Li-Yung Yan; Environmental effects on wear behaviour of alumina; *Wear, 161* (1993) 111-119

(34) M. Woydt and K.-H. Habig, High temperature tribology of ceramics, Tribol. Int. 22, 75-88 (1989).

(35) C. S. Yust and C. E. DeVore, Wear of zirconia-toughened alumina and whisker-reinforced zirconia-toughened alumina. Tribol, Trans. 33. 573-580 (1990).

(36) SANTOS, E.; OLIVEIRA, R.; SINATORA, A.; Influence of fluid temperature lubricant [water] in the friction coefficient in sliding of Si_3N_4 Al_2O_3. First International Brazilian Conference on Tribology – TriboBr, 2010, Rio de Janeiro. First International Brazilian Conference on Tribology – TriboBr. São Paulo: ABM, 2010.

(37) Satoshi Kitaoka, Toshihide Tsuji, Yoshimi Yamaguchi, Kazumi Kashiwagi; Tribochemical wear theory of non-oxide ceramics in high temperature and high-pressure water; Wear 205 (1-2):40-46·April 1997

(38) A.Z. SZERI, Tribology: Friction, Lubrication, and Wear, Hemisphere Publishing Corp., 1980, p 2

(39) JAHANMIR, S.; OZMEN, Y.; IVES, L. K.; Water lubrication of silicon nitride in sliding, Tribology Letters, v. 17, n. 3, 2004, p. 409-17.

(40) WONG, P. L.; HUANG, P.; MENG, Y., The Effect of the Electric Double Layer on a Very Thin Water Lubricating Film. Tribology Letters, v.14, n. 3, 2003, p. 197-203.

(41) The formation of aluminium hydroxide in the sliding wear of alumina; M. G. Gee; Wear, 15'3 (1992) 201-227

(42) DUNN J.T., AND RAWCLIFFE H.S.; Literature survey of water lubricated bearing materials; Technical Report; Atomic Energy of Canada Ltd., Chalk River (Ontario), Canada, 1964

(43) Oliveira, R.P., SANTOS, E., T. Cousseau, SINATORA, A.; Effect of ph on wear and friction of silicon nitride sliding against alumina in water. Tribology International (2015), pp. 356-361; DOI:10.1016/j.triboint.2015.04.003

(44) OLIVEIRA, R.; SANTOS, E.; SINATORA, A.; Influence of pH lubricant [water] in the friction coefficient in sliding of Si_3N_4–Al_2O_3; Cobem 2011 [congresso brasileiro de engenharia mecânica], Natal, Brasil, 2011.

(45) Laurent Jordi, Christo Iliev, and Traugott E. Fischer; Lubrication of silicon nitride and silicon carbide by water: Running in, wear and operation of sliding bearings; Tribology Letters, Vol. 17, No. 3, October 2004 (2004)

(46) CHEN, M; KATO, K; ADACHI, K; The Difference in Running-In Period and Friction Coefficient Between Self-Mated Si3N4 and SiC Under Water Lubrication. Tribology Letters, v.11, n.1, 2001, p. 23-28.

(47) ZHU, X.; JIANG, D.; TAN, S.; ZHANG,Z.; Dispersion properties of alumina powders in silica sol. Journal of the European Ceramic Society, 21, 2001, p.2879 – 85.

(48) NATHAN FANTECELLE STREY; Tribologia de cerâmicos dissimilares no deslizamento em água, Estudos de Caso: Si3N4-SiC, Si3N4-Al2O3, Si3N4-ZTA, Al2O3-SiC, ZrO2-SiC, ZrO2-Al2O3 e ZrO2-ZTA; Dissertação de mestrado; VITÓRIA, ES – 2015.

(49) U. Dulias a, L. Fangb, K.-H. Zum Gahr*; Effect of surface roughness of self-mated alumina on friction and wear in isooctane-lubricated reciprocating sliding contact; Wear 252 (2002) 351–358*

(50) Mitjan Kalin a,∗, Saša Novak b, Jože Vižintin; Wear and friction behavior of alumina ceramics in aqueous solutions with different pH; Wear 254 (2003) 1141–1146

(51) Mitjan Kalin, Saˇsa Novak and Joˇze Viˇzintin; Surface charge as a new concept for boundary lubrication of ceramics with water; J. Phys. D: Appl. Phys. 39 (2006) 3138–3149

(52) J. Olofsson, S.Johansson, S.Jacobson; Influence from humidity on the alumina friction drive system of an ultrasonic motor; Tribology International; 42 (2009)1467–1477

(53) Koshi Adachi, Koji Kato; Formation of smooth wear surfaces on alumina ceramics by embedding and tribo-sintering of fine wear particles; Wear 245 (2000) 84 – 91

(54) A.J. Perez-Unzueta, J.H. Beynon, M.G. Gee*; Effects of surrounding atmosphere on the wear of sintered alumina; Wear – 146 (1991) 179 – 196*

(55) J. K. Lancaster; A review of the influence of environmental humidity and water on friction, lubrication and wear; Tribology International; Volume 23, Issue 6, December 1990, Pages 371–389

(56) J K Lancaster, Y Mashal and A G Atkins; The role of water in the wear of ceramics; Journal of Physics D: Applied Physics, Volume 25, Number 1A

(57) Ho-Chieh Wong, Noritsugu Umehara and Koji Kato; Frictional characteristics of ceramics under water – lubricated conditions; Tribology Letters 5 (1998) 303–308

(58) M. Masjedi, M.M. Khonsari; On the effect of surface roughness in point-contact EHL: Formulas for film thickness and asperity load; Tribology International 82 (2015) 228-244; http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2014.09.010

(59) MAZALI, I. O.;Determinação da densidade de Sólidos pelo Método de Arquimedes; Métodos, Processos e Técnicas, LQES – Laboratório de Química do Estado Solido – Instituto de Química – Unicamp – http://lqes.iqm.unicamp.br/.

(60) Estrutura e Propriedades de Materiais Cerâmicos Capítulo VII: Propriedades Físicas Prof. Angelus G. P. da Silva

(61) PADILHA A. F.; Materiais De Engenharia; Editora: Hemus; edição 1

(62) George D. Quinn, Jonathan Salem, Isa Bar-on and Kyu Cho, Michael Fotey, Ho Fang; *Fracture Toughness of Advanced Ceramics at Room Temperature;Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology; Volume 97, Number 5, September-October 1992*

(63) IMAGE J; anlysis and processing images software: http://rsbweb.nih.gov/ij/index.htmL

(64) Lakowicz, Joseph R, **Principles of fluorescence spectroscopy**, 3ª edição, Springer, 2009. ISBN 978-0-387-46312-4 doi:10.1007/s00216-007-1822-x ISSN 1618-2642 Livro, ISSN 1618-2650 e-Livro

(65)Shaw, D. J., Introdução à Química de Colóides e Superfícies; Editora Edgard Blucher/ Edusp, 1ª Ed., 1975, S.P.;

(66) – Site da empresa Paralab em módulo de topografia 3d. http://www.paralab.pt/product/m%C3%B3dulo-3d-topography – acessado em 02/05/2015

(67) – Professor Doutor Henriique Kahn; Difração de raios X; Apostila da disciplina PMI-2201; http://www.angelfire.com/crazy3/qfl2308/1_multipart_xF8FF_2_DIFRACAO.pdf; acessada em 02/05/2015.

(68) – Algumas técnicas de caracterização de materiais em http://www.foz.unioeste.br/~lamat/downmateriais/materiaiscap5.pdf; Unioeste – acessada em 02/05/2015.

(69) LAUREN DA CUNHA DUARTE, PEDRO LUIZ JUCHEM, GÊNOVA MARIA PULZ, TÂNIA MARA MARTINI DE BRUM, NELSON CHODUR, ANTÔNIO LICCARDO, ADRIANE COMIN FISCHER & ROBERTA BONATTO ACAUAN; Aplicações de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Sistema de Energia Dispersiva (EDS) no Estudo de Gemas: exemplos brasileiros; Pesquisas em Geociências, 30(2): 3-15, 2003 ISSN 1518-2398 Instituto de Geociências, UFRGS Porto Alegre, RS – Brasil

(70) Dalva L. A. de Faria, Antonio Carlos Massabni; Entenda o que é espectroscopia Raman; Artigo publicado pelo QuímicaViva – CRQ-IV http://www.crq4.org.br/default.php?p=texto.php&c=quimica_viva; 2011

(71) Ariano De Giovanni Rodrigues e Jose Claudio Galzerani; Espectroscopias de infravermelho, Raman e de fotoluminescencia: potencialidades e complementaridades; Revista Brasileira de Ensino de Fısica, v. 34, n. 4, 4309 (2012)

(72) VUOLO J. H.; Fundamentos Da Teoria De Erros; Editora: EDGARD BLUCHER;2ª Edição – 1996

(73) INMETRO; Guia para expressão da incerteza da medição, Rio de Janeiro, 1998, 2ª Versão Brasileira do Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, International Organization for Standardization, Geneva 1993.

(74) COSGROVE T.; Colloid Science Principles, methods and applications ; John Wiley & Sons Ltd; Second Edition-2010.

(75) HOTZA D.; ARTIGO REVISÃO: Colagem de Folhas Cerâmicas (REVIEW ARTICLE: Tape Casting); Cerâmica vol.43 no.283-284 São Paulo Sept./Oct./Nov./Dec. 1997

(76) R.S. Krishnan; Raman spectrum of alumina and the luminescence of ruby; Departament of Physics, indian institute of Science, Bangalore, 26-11-1947.

(77) H. D. Ruan, R. L. Frost and J. T. Kloprogge; Comparison of Raman spectra in characterizing gibbsite, bayerite, diaspore and boehmite; JOURNAL OF RAMAN SPECTROSCOPY; J. Raman Spectrosc. 2001; 32: 745–750.

(78) – RRUFF Project website – an integrated database of Raman spectra, X-ray diffraction

and chemistry data for minerals em http://rruff.info/corundum/display=default/ - acessado em 05/01/2017.

(79) SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M.; DA MOTTA, M.; Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas; Revista Matéria vol.12 no.2 2007

(80) ALCOA NO BRASIL; Em http://www.alcoa.com/brazil/pt/custom_page/mercados_alumina_processo.asp; Acesso em 14/ 03/ 2012.

(81) PROGRA2 database, ICARE, Université Lille 1

(82) Balarini, R.; Ultra Baixo Coeficiente de Atrito no deslizamento de Si3N4- Al2O3 m agua – Estudo AB initiodo running-in; Dissertação de mestrado, UFES, 2013.

(83) Junguo Xu, i Koji Kato, Taiya Hirayama; The transition of wear mode during the running-in process of silicon nitride sliding in water; wear 205 [1997] 55-63

(84) Xinwen Zhu, Dongliang Jiang, Shouhong Tan, Zhaoquan Zhang; Dispersion properties of alumina powders in silica sol; Journal of the European Ceramic Society 21 [2001] 2879–2885

(85) Koji Kato∗, Koshi Adachi; Wear of advanced ceramics; Wear 253 [2002] 1097–1104

(86) Min-Soo Suha,1, Young-Hun Chaeb,2, Seock-Sam Kim; Friction and wear behavior of structural ceramics sliding against zirconia; Wear 264 [2008] 800–806

(87) T. E. Fischer and W. M. Mullins; Chemical aspects of ceramic tribology; The Journal of Physical Chemistry1992 96 (23), 5690-5701

(88) Eui-Sung Yoon ‘, Hosung Kong %*, Oh-Kwan Kwon ‘, Jae-Eung Oh; Evaluation of frictional characteristics for a pin-on-disk apparatus with different dynamic parameters; Wear Volumes 203–204, March 1997, Pages 341–349

(89) ANDERSON, P.; Water-lubrificated pin-on-disc tests with ceramics, Wear, v. 154, 1992, p. 37-47.

(90) KATO, K.; Tribology of Advanced Ceramics and Hard Coatings; Key Engineering Materials Vols. 264-268 [2004] pp 449-452; Online available since 2004/May/15 at www.scientific.net© [2004] Trans Tech Publications, Switzerland

(91) J. XU, K. KATO, T. HIRAYAMA; The transition of wear mode during the running-in process of silicon nitride sliding in water, Wear 205 1997] 55–63

(92) SHACKELFORD, J. F.; Materials Science and Engineering Handbook, ed J.F. Shackelford e W.Alexander, Boca Raton, CRC Press, 2001

(93) Roberto Balarini Junior; Ultra baixo coeficiente de atrito no deslizamento de Si3N4-Al2O3 em agua: Estudo AB initio do Running-in; Dissertação de mestrado; VITÓRIA, ES – 2013.

8 Apêndice

8.1 Apêndice 1

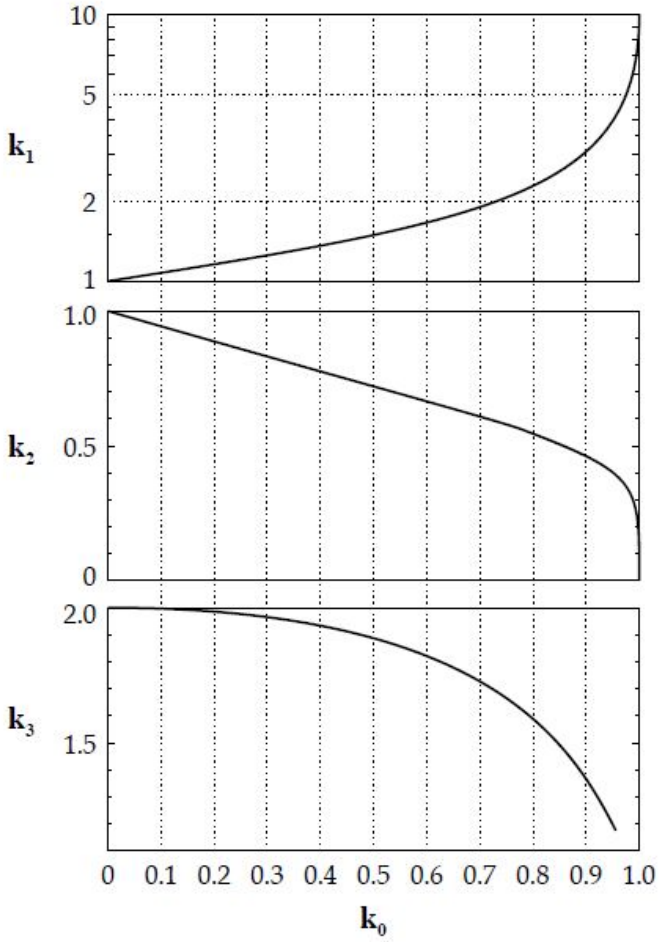

Figura 8.1 – Parâmetros k_1,k_2 e k_3 em função do parâmetro k_0. Fonte: Adaptado de (3)

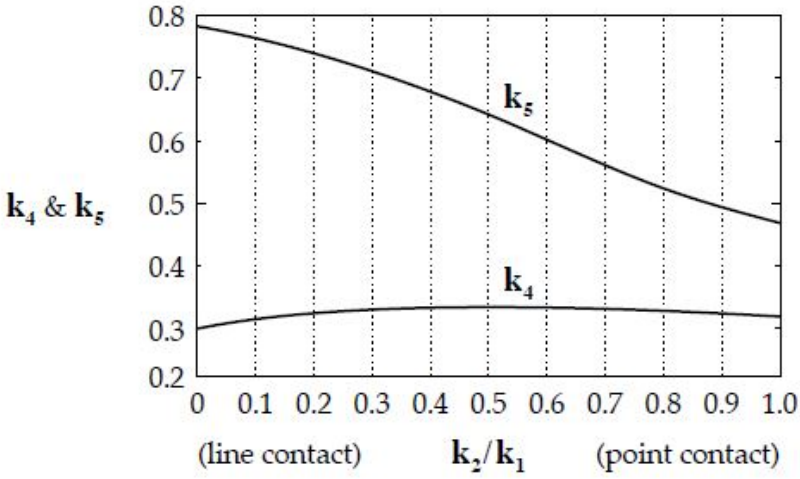

Figura 8.2 – Parâmetros k_4 e k_5 em função do parâmetro k_2/k_1. Fonte: Adaptado de (3)

8.2 Apêndice 2

Regressão geométrica no disco

$$f(t)=y=154031{,}15\cdot t^{-0{,}7483} \tag{8.1}$$

Fazendo a derivada da função temos:

$$y'=\frac{d}{dt}\left(154031{,}15\cdot t^{-0{,}7483}\right)=-\frac{115261{,}36}{t^{1{,}7483}} \tag{8.2}$$

Isolando a variável t temos:

$$y'=-\frac{115261{,}36}{t^{1{,}7483}} \;\Rightarrow\; t^{1{,}7483}=-\frac{115261{,}36}{y'} \tag{8.3}$$

$$\ln\left(t^{1{,}7483}\right)=\ln\left(-\frac{115261{,}36}{y'}\right) \tag{8.4}$$

$$1{,}7483\cdot\ln(t)=\ln\left(-\frac{115261{,}36}{y'}\right) \tag{8.5}$$

$$\ln(t)=\frac{1}{1{,}7483}\cdot\ln\left(-\frac{115261{,}36}{y'}\right) \tag{8.6}$$

$$\ln(t)=\ln\left[\left(-\frac{115261{,}36}{y'}\right)^{\frac{1}{1{,}7483}}\right]=\ln\left[\left(-\frac{115261{,}36}{y'}\right)^{0{,}5720}\right] \tag{8.7}$$

$$t=\left(-\frac{115261{,}36}{y'}\right)^{0{,}5720} \tag{8.8}$$

No caso onde o ângulo entre a curva e o eixo x é 0,05° temos que:

$$y'=\tan\left(-0{,}05^{o}\right)=-0{,}00087 \tag{8.9}$$

Substituindo temos:

$$t=\left(\frac{115261{,}36}{0{,}00087}\right)^{0{,}5720}=\;44169{,}08\,s \tag{8.10}$$

Substituindo o valor obtido na expressão 8.10 na expressão 8.1 temos:

$$f(t)=154031{,}15\times 44169{,}08^{-0{,}7483}=51{,}48\;\;\mu m^{3}/Nm \tag{8.11}$$

Regressão geométrica na esfera

$$f(t)=y=38563{,}899t^{-0{,}6918} \tag{8.12}$$

Fazendo a derivada da função temos:

$$y'=\frac{d}{dt}\left(38563{,}899\,t^{-0{,}6918}\right)=-\frac{26678{,}15}{t^{1{,}6918}} \tag{8.13}$$

Isolando a variável t temos:

$$y'=-\frac{26678{,}15}{t^{1{,}6918}} \;\Rightarrow\; t^{1{,}6918}=-\frac{26678{,}15}{y'} \tag{8.14}$$

$$\ln\left(t^{1{,}6918}\right)=\ln\left(-\frac{26678{,}15}{y'}\right) \tag{8.15}$$

$$1{,}6918\cdot\ln(t)=\ln\left(-\frac{26678{,}15}{y'}\right) \tag{8.16}$$

$$\ln(t)=\frac{1}{1{,}6918}\cdot\ln\left(-\frac{26678{,}15}{y'}\right) \tag{8.17}$$

$$\ln(t)=\ln\left[\left(-\frac{26678{,}15}{y'}\right)^{\frac{1}{1{,}6918}}\right]=\ln\left[\left(-\frac{26678{,}15}{y'}\right)^{0{,}5911}\right] \tag{8.18}$$

$$t=\left(-\frac{26678{,}15}{y'}\right)^{0{,}5911} \tag{8.19}$$

No caso onde o ângulo entre a curva e o eixo x é 0,05° temos que:

$$y'=\tan\left(-0{,}05^{o}\right)=-0{,}00087 \tag{8.20}$$

Substituindo temos:

$$t=\left(\frac{26678{,}15}{0{,}00087}\right)^{0{,}5911}=26580{,}66\,s \tag{8.21}$$

Substituindo o valor obtido na expressão 8.21 na expressão 8.12 temos:

$$f(t)=y=38563{,}899\times26580{,}66^{-0{,}6918}=33{,}52\,\mu m^{3}/Nm \tag{8.22}$$