

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

LUIZ CARLOS BRAGATTO JUNIOR

**RESISTÊNCIA AO DESGASTE MICROABRASIVO DE
REVESTIMENTOS DE SUPERLIGAS A BASE DE NIQUEL
DEPOSITADOS POR SOLDAGEM TIG COM ALIMENTAÇÃO DE
ARAME A FRIO**

VITÓRIA
2014



RESISTÊNCIA AO DESGASTE MICROABRASIVO DE REVESTIMENTOS DE SUPERLIGAS A BASE DE NIQUEL DEPOSITADOS POR SOLDAGEM TIG COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME A FRIO

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

Orientador: Antônio Cesar Bozzi, D.Sc.
Co-orientador: Flávio José da Silva D.
Sc.

VITÓRIA

2014

JUNIOR, Luiz Carlos Bragatto.

Resistência ao desgaste microabrasivo de revestimentos de superligas a base de Níquel depositado por soldagem TIG com alimentação de arame a frio / Luiz Carlos Bragatto Junior – 2014. 93f.

Orientador: Antônio Cesar Bozzi

Co-orientador: Flávio José da Silva

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Microabrasão. 2. Desgaste Abrasivo. 3. Superligas a base de Níquel. 4. Camada Branca. I. JUNIOR, Luiz Carlos Bragatto. II. Universidade Federal Do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica. III. Resistência ao desgaste microabrasivo de revestimentos de superligas a base de Níquel depositado por soldagem TIG com alimentação de arame a frio.

LUIZ CARLOS BRAGATTO JUNIOR

**RESISTÊNCIA AO DESGASTE MICROABRASIVO DE
REVESTIMENTOS DE SUPERLIGAS A BASE DE NIQUEL
DEPOSITADOS POR SOLDAGEM TIG COM ALIMENTAÇÃO DE
ARAME A FRIO**

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

Aprovado em: 17 de março de 2014

COMISSÃO EXAMINADORA:

M. Sc. Flavio Parreiras Marques
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
Examinador

B. Sc. Nathan Fantecelle Strey
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
Examinador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus.

A minha família que sempre me deu força e me apoiou em toda essa caminhada.

A todos os amigos que contribuíram direta ou indiretamente para realização deste trabalho.

Aos professores D.Sc. Antônio Cesar Bozzi e D. Sc. Flávio José da Silva pela orientação, acompanhamento e suporte em todo o trabalho.

A Agência Nacional do Petróleo (ANP) e o Programa de Recursos Humanos da Petrobrás (PRH29) pelo apoio financeiro para realização do trabalho.

Aos técnicos, engenheiros e monitores dos laboratórios: Laboratório de Caracterização de Superfícies de Materiais (LCSM) e o laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais (TRICORRMAT) da UFES que auxiliaram no trabalho.

Ao D. Sc. Cleiton Carvalho Silva, por ter cedido as amostras para este trabalho.

RESUMO

As superligas a base de Níquel são fabricadas para trabalhar em situações extremas. São uma classe incomum de materiais metálicos com uma combinação excepcional de resistência mecânica a alta temperatura, dureza, e resistência à degradação em ambientes corrosivos ou oxidantes e são largamente utilizadas na indústria do petróleo. Nesse trabalho foram depositados por soldagem TIG, em substrato de aço ASTM A516 Gr 60, com alimentação de arame a frio três tipos de superligas de Níquel: Inconel 625, Hastelloy C276 e Inconel 686, já conhecidas por sua elevada resistência à corrosão, variando alguns parâmetros de soldagem com a finalidade de verificar suas resistências ao desgaste microabrasivo. As amostras foram analisadas através de ensaios de microabrasão no Microabrasômetro TE-66, da Plint, com abrasivo sílica (SiO_2), com carga normal e concentração do abrasivo na lama afim de se obter a configuração de desgaste a dois corpos (riscamento). As crateras formadas pelo desgaste tiveram seus volumes calculados a partir da microscopia óptica e da perfilometria 3D para fins de comparação e foram feitas imagens no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) a fim de analisar se o modo de desgaste foi realmente por riscamento nas amostras. A amostra T14 da liga C276 foi a que obteve maior tendência a ter menor coeficiente de desgaste e a amostra T4 da liga 625 foi a que obteve maior tendência a ter maior coeficiente de desgaste. Comparando as ligas analisadas, elas foram próximas no que diz respeito ao coeficiente de desgaste.

Palavras-Chave: Microabrasão; Superligas de Níquel; Desgaste Abrasivo.

ABSTRACT

The nickel based superalloys are manufactured to work in extreme situations . They are a rare class of metallic materials with exceptional mechanical combination of high temperature resistance , hardness, and resistance to degradation in oxidizing or corrosive environments and are widely used in the petroleum industry . In this work were deposited by TIG welding in steel substrate ASTM A516 Gr 60 with cold wire feed three types of nickel superalloys : Inconel 625 , Hastelloy C276 and Inconel 686, already known for its high corrosion resistance , varying some welding parameters in order to verify their resistance to wear microabrasive . The samples were analyzed by testing in microabrasion Microabrasômetro TE- 66, the Plint , abrasive silica (SiO₂) with a normal load and concentration of the abrasive in the slurry in order to obtain the configuration of the two-body wear (grooving) . The craters formed by the wear had their volumes calculated from the optical microscopy and 3D profilometry for comparison purposes and images were made in Scanning Electron Microscope (SEM) to analyze the mode of wear was actually by grooving the samples . The T14 Alloy C276 sample that was obtained more likely to have lower wear coefficient and the sample T4 alloy 625 was the one with a greater tendency to have higher wear coefficient . Comparing the alloys analyzed , they were closer with respect to the wear coefficient .

Keywords: Microabrasion; Nickel superalloys; Abrasive wear.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Desgaste a (a) dois e (b) três corpos. Fonte: ZUM GAHR (1987) | 19 |
| Figura 2: Imagem de MEV da superfície de um aço ferramenta temperado após ensaio de microabrasão com carga normal de 0.25N e fração volumétrica de 0.0009 (0,003 g cm ⁻³) lama abrasiva de diamante com tamanho médio da partícula de 3µm. Superfície característica de abrasão a dois corpos. Fonte: TREZONA (1999). | 20 |
| Figura 3: Imagem de MEV da superfície de um aço ferramenta temperado após ensaio de microabrasão com carga normal de 0.25N e fração volumétrica de 0.237 (1.0 g cm ⁻³) lama abrasiva de SiC F1200. Superfície característica de abrasão a três corpos. Fonte TREZONA (1999). | 20 |
| Figura 4: Interações físicas entre as partículas abrasivas e as superfícies dos materiais (a) microsulcamento; (b) microcorte; (c) microfadiga; (d) microtrincamento. Fonte: ZUM-GAHR (1987). | 21 |
| Figura 5: Transição do microsulcamento para o microcorte como função da razão do ângulo de ataque e o ângulo de ataque crítico. Fonte ZUM-GAHR (1987). | 22 |
| Figura 6: Taxa de volume desgastado em relação a taxa de dureza do abrasivo pela dureza da superfície (H_a / H_s) para materiais cerâmicos e metálicos e partículas abrasivas, para abrasão a dois corpos. Fonte: HUTCHINGS <i>apud</i> HENRIQUE (2009). | 23 |
| Figura 7: Ilustração do contato entre uma partícula abrasiva sob uma carga normal e a superfície plana. (a) Se H_a é maior que $1,2H_s$, a partícula irá indentar a superfície; (b) se H_a é menor do que $1,2H_s$, escoamento plástico irá ocorrer na partícula, que terá as pontas cominuídas. Fonte HUTCHINGS (1992). | 24 |
| Figura 8: Partículas de sílica, visualizadas no Microscópio Eletrônico de Varredura, (a) partículas arredondadas e (b) partículas angulosas. Fonte: HUTCHINGS (1992). | 25 |
| Figura 9: Taxa de desgaste para o cobre nas configurações de dois corpos, três corpos e erosão, por partículas de carbetto de silício com diferentes tamanhos. Fonte: adaptado HUTCHINGS (1992). | 26 |
| Figura 10: Resistência ao desgaste abrasivo de diferentes materiais no ensaio de abrasão pino disco em função da dureza do material. Fonte: adaptado ZUM-GAHR (1987). | 27 |
| Figura 11: Efeito da estrutura, tratamento térmico e teor da liga na resistência ao desgaste a dois corpos de aços sobre partículas de alumina a 90µm. Fonte: MOORE <i>apud</i> HUTCHINGS (1992). | 28 |
| Figura 12: Relação entre a tenacidade à fratura e a resistência ao desgaste para metais e cerâmicos. Fonte: ZUM-GAHR <i>apud</i> HUTCHINGS (1992). | 29 |
| Figura 13: Ilustração da importância do tamanho do contato da partícula abrasiva e a região de fases duras precipitadas no desgaste abrasivo. (a) o material responde de maneira homogênea, enquanto (b) responde de forma heterogênea. Fonte HUTCHINGS (1992). | 30 |
| Figura 14: Taxa de desgaste abrasivo para o ferro fundido alto cromo, contendo diferentes frações de carbonetos: (a) microdureza da liga; (b) pino-disco (dois corpos) com partículas de garnet 100µm; (c) pino-disco (dois corpos) com partículas de carbetto de silício a 90µm; (d) roda de borracha (três corpos) com partículas de alumina a 250µm; (e) roda de borracha (três corpos) com partículas de sílica a 250µm. Fonte: HUTCHINGS (1992). | 31 |
| Figura 15: Esquema do teste de microabrasão. Fonte TREZONA (1999). | 32 |
| Figura 16: Máquina TE-66. Fonte: TREZONA (1999). | 33 |

| | |
|---|----|
| Figura 17: Variação do (a) limite de resistência à tração, (b) limite de escoamento e (c) ductilidade (AL%) em função do teor de Níquel para as ligas cobre-níquel, mostrando o aumento da resistência mecânica. Fonte CALLISTER (1999). | 35 |
| Figura 18: (a) representação das deformações da rede por tração impostas sobre átomos hospedeiros por um átomo de impureza substitucional de menor tamanho. (b) Possíveis localizações de átomos de impurezas menores em relação a uma discordância aresta, de modo que existe um cancelamento parcial das deformações da rede impureza-discordância. Fonte CALLISTER (1999). | 36 |
| Figura 19: (a) representação das deformações compressivas impostas sobre átomos hospedeiros por um átomo de impureza substitucional de maior tamanho. (b) Possíveis localizações de átomos de impurezas maiores em relação a uma discordância aresta, de modo que existe um cancelamento parcial das deformações de rede impureza-discordância. Fonte CALLISTER (1999). | 36 |
| Figura 20: (a) micrografia obtida por MET de uma liga de Níquel endurecida por precipitação; (b) modelo do bloqueio de discordâncias. Fonte: SILVA <i>apud</i> SAFARI & NATEGH (2010). | 37 |
| Figura 21: Progressão do coeficiente de desgaste até alcançar a estabilidade. Fonte: MELADO (2011). | 44 |
| Figura 22: Mapa dos mecanismos de desgaste para microabrasão para uma calota de esfera para aço ferramenta para uma mistura abrasiva de alumina F1200. Fonte: TREZONA (1999). | 45 |
| Figura 23: Perfilômetro Talysurf CLI 1000 – 3D Surface profiling Systems do fabricante Taylor Hobson Precision. | 47 |
| Figura 24: Amostra T3 (a) Perfilometria; (b) Cálculo do volume pelo software; (c) Perfis do centro da cratera. | 48 |
| Figura 25: Amostra 2 com 5000 revoluções acumuladas em um aumento de (a) 80X; (b)200X; (c) 1000X e (d) 2000X. | 51 |
| Figura 26: Amostra 3 com 5000 revoluções acumuladas em um aumento de (a) 80X; (b)200X; (c) 1000X e (d) 2000X. | 52 |
| Figura 27: Amostra 4 com 5000 revoluções acumuladas em um aumento de (a) 80X; (b)200X; (c) 1000X e (d) 2000X. | 53 |
| Figura 28: Amostra 5 com 5000 revoluções acumuladas em um aumento de (a) 80X; (b)200X; (c) 1000X e (d) 2000X. | 54 |
| Figura 29: Amostra 6 com 5000 revoluções acumuladas em um aumento de (a) 80X; (b)200X; (c) 1000X e (d) 2000X. | 55 |
| Figura 30: Amostra 8 com 5000 revoluções acumuladas em um aumento de (a) 80X; (b)200X; (c) 1000X e (d) 2000X. | 56 |
| Figura 31: Amostra 10 com 5000 revoluções acumuladas em um aumento de (a) 80X; (b)200X; (c) 1000X e (d) 2000X. | 57 |
| Figura 32: Amostra 13 com 5000 revoluções acumuladas em um aumento de (a) 80X; (b)200X; (c) 1000X e (d) 2000X. | 58 |
| Figura 33: Amostra 14 com 5000 revoluções acumuladas em um aumento de (a) 80X; (b)200X; (c) 1000X e (d) 2000X. | 59 |
| Figura 34: Amostra 16 com 5000 revoluções acumuladas em um aumento de (a) 80X; (b)200X; (c) 1000X e (d) 2000X. | 60 |
| Figura 35: Amostra 17 com 5000 revoluções acumuladas em um aumento de (a) 80X; (b)200X; (c) 1000X e (d) 2000X. | 61 |

| | |
|--|----|
| Figura 36: Amostra 18 com 5000 revoluções acumuladas em um aumento de (a) 80X; (b)200X; (c) 1000X e (d) 2000X..... | 62 |
| Figura 37: Gráfico feito a partir da tabela 33 com o comparativo entre os valores de coeficiente de desgaste para a microscopia ótica e perfilometria de contato. | 63 |
| Figura 38: Gráfico montado com os valores da tabela 11..... | 64 |
| Figura 39: Relação do produto da distância deslizada com a carga normal pelo volume desgastado. | 70 |
| Figura 40: Relação das revoluções completadas pelo coeficiente de desgaste..... | 70 |
| Figura 41: Relação do produto da distância deslizada com a carga normal pelo volume desgastado. | 72 |
| Figura 42: Relação das revoluções completadas pelo coeficiente de desgaste..... | 72 |
| Figura 43: Relação do produto da distância deslizada com a carga normal pelo volume desgastado. | 74 |
| Figura 44: Relação das revoluções completadas pelo coeficiente de desgaste..... | 74 |
| Figura 45: Relação do produto da distância deslizada com a carga normal pelo volume desgastado. | 76 |
| Figura 46: Relação das revoluções completadas pelo coeficiente de desgaste..... | 76 |
| Figura 47: Relação do produto da distância deslizada com a carga normal pelo volume desgastado. | 78 |
| Figura 48: Relação das revoluções completadas pelo coeficiente de desgaste..... | 78 |
| Figura 49: Relação do produto da distância deslizada com a carga normal pelo volume desgastado. | 80 |
| Figura 50: Relação das revoluções completadas pelo coeficiente de desgaste..... | 80 |
| Figura 51: Relação do produto da distância deslizada com a carga normal pelo volume desgastado. | 82 |
| Figura 52: Relação das revoluções completadas pelo coeficiente de desgaste..... | 82 |
| Figura 53: Relação do produto da distância deslizada com a carga normal pelo volume desgastado. | 84 |
| Figura 54: Relação das revoluções completadas pelo coeficiente de desgaste..... | 84 |
| Figura 55: Relação do produto da distância deslizada com a carga normal pelo volume desgastado. | 86 |
| Figura 57: Relação das revoluções completadas pelo coeficiente de desgaste..... | 86 |
| Figura 57: Relação do produto da distância deslizada com a carga normal pelo volume desgastado. | 88 |
| Figura 58: Relação das revoluções completadas pelo coeficiente de desgaste..... | 88 |
| Figura 59: Relação do produto da distância deslizada com a carga normal pelo volume desgastado. | 90 |
| Figura 60: Relação das revoluções completadas pelo coeficiente de desgaste..... | 90 |
| Figura 61: Relação do produto da distância deslizada com a carga normal pelo volume desgastado. | 92 |
| Figura 62: Relação das revoluções completadas pelo coeficiente de desgaste..... | 92 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Propriedades físicas do níquel e do ferro. Fonte ASME <i>apud</i> SILVA (2010). | 34 |
| Tabela 2: Composição química das ligas (% em peso segundo a análise do fabricante). Fonte SILVA (2010). | 39 |
| Tabela 3: Composição química do metal base (% em peso). Fonte: SILVA (2010). | 40 |
| Tabela 4: Composição dos gases de proteção. Fonte SILVA (2010). | 40 |
| Tabela 5: Parâmetros do processo de soldagem. Fonte SILVA (2010). | 41 |
| Tabela 6: Parâmetros de soldagem que foram utilizados para deposição do material. Fonte SILVA (2010). | 41 |
| Tabela 7: Dados sobre a quantidade e dimensões dos precipitados nos corpos de prova. Fonte: SILVA (2010). | 42 |
| Tabela 8: Valores de dureza Vickers dos corpos de prova. Fonte: SILVA (2010). | 42 |
| Tabela 9: Valores referentes aos volumes desgastados calculados pela medição dos raios das crateras através de microscopia ótica e medidos por perfilometria de contato, coeficiente de determinação e coeficiente de variação. | 49 |
| Tabela 10: Valores do coeficiente de desgaste calculados pela equação (3) para microscopia ótica e perfilometria de contato. | 50 |
| Tabela 11: Comparativo entre os coeficientes de desgaste calculados pela microscopia ótica e pela perfilometria de contato para cada liga. | 64 |
| Tabela 12: Média aritmética e desvio padrão dos volumes desgastados e dos coeficientes de desgaste calculados pelas equações (2) e (3), com base nos valores de diâmetro obtidos pela microscopia ótica. | 69 |
| Tabela 13: Volumes desgastados de cada calota medidos por perfilometria de contato e coeficiente de desgaste calculado pela equação (3) e suas respectivas médias e desvio padrão. | 71 |
| Tabela 14: Média aritmética e desvio padrão dos volumes desgastados e dos coeficientes de desgaste calculados pelas equações (2) e (3), com base nos valores de diâmetro obtidos pela microscopia ótica. | 71 |
| Tabela 15: Volumes desgastados de cada calota medidos por perfilometria de contato e coeficiente de desgaste calculado pela equação (3) e suas respectivas médias e desvio padrão. | 73 |
| Tabela 16: Média aritmética e desvio padrão dos volumes desgastados e dos coeficientes de desgaste calculados pelas equações (2) e (3), com base nos valores de diâmetro obtidos pela microscopia ótica. | 73 |
| Tabela 17: Volumes desgastados de cada calota medidos por perfilometria de contato e coeficiente de desgaste calculado pela equação (3) e suas respectivas médias e desvio padrão. | 75 |
| Tabela 18: Média aritmética e desvio padrão dos volumes desgastados e dos coeficientes de desgaste calculados pelas equações (2) e (3), com base nos valores de diâmetro obtidos pela microscopia ótica. | 75 |
| Tabela 19: Volumes desgastados de cada calota medidos por perfilometria de contato e coeficiente de desgaste calculado pela equação (3) e suas respectivas médias e desvio padrão. | 77 |
| Tabela 20: Média aritmética e desvio padrão dos volumes desgastados e dos coeficientes de desgaste calculados pelas equações (2) e (3), com base nos valores de diâmetro obtidos pela microscopia ótica. | 77 |

| | |
|---|----|
| Tabela 21: Volumes desgastados de cada calota medidos por perfilometria de contato e coeficiente de desgaste calculado pela equação (3) e suas respectivas médias e desvio padrão. | 79 |
| Tabela 22: Média aritmética e desvio padrão dos volumes desgastados e dos coeficientes de desgaste calculados pelas equações (2) e (3), com base nos valores de diâmetro obtidos pela microscopia. | 79 |
| Tabela 23: Volumes desgastados de cada calota medidos por perfilometria de contato e coeficiente de desgaste calculado pela equação (3) e suas respectivas médias e desvio padrão. | 81 |
| Tabela 24: Média aritmética e desvio padrão dos volumes desgastados e dos coeficientes de desgaste calculados pelas equações (2) e (3), com base nos valores de diâmetro obtidos pela microscopia ótica. | 81 |
| Tabela 25: Volumes desgastados de cada calota medidos por perfilometria de contato e coeficiente de desgaste calculado pela equação (3) e suas respectivas médias e desvio padrão. | 83 |
| Tabela 26: Média aritmética e desvio padrão dos volumes desgastados e dos coeficientes de desgaste calculados pelas equações (2) e (3), com base nos valores de diâmetro obtidos pela microscopia ótica. | 83 |
| Tabela 27: Volumes desgastados de cada calota medidos por perfilometria de contato e coeficiente de desgaste calculado pela equação (3) e suas respectivas médias e desvio padrão. | 85 |
| Tabela 28: Média aritmética e desvio padrão dos volumes desgastados e dos coeficientes de desgaste calculados pelas equações (2) e (3), com base nos valores de diâmetro obtidos pela microscopia ótica. | 85 |
| Tabela 29: Volumes desgastados de cada calota medidos por perfilometria de contato e coeficiente de desgaste calculado pela equação (3) e suas respectivas médias e desvio padrão. | 87 |
| Tabela 30: Média aritmética e desvio padrão dos volumes desgastados e dos coeficientes de desgaste calculados pelas equações (2) e (3), com base nos valores de diâmetro obtidos pela microscopia ótica. | 87 |
| Tabela 31: Volumes desgastados de cada calota medidos por perfilometria de contato e coeficiente de desgaste calculado pela equação (3) e suas respectivas médias e desvio padrão. | 89 |
| Tabela 32: Média aritmética e desvio padrão dos volumes desgastados e dos coeficientes de desgaste calculados pelas equações (2) e (3), com base nos valores de diâmetro obtidos pela microscopia ótica. | 89 |
| Tabela 33: Volumes desgastados de cada calota medidos por perfilometria de contato e coeficiente de desgaste calculado pela equação (3) e suas respectivas médias e desvio padrão. | 91 |
| Tabela 34: Média aritmética e desvio padrão dos volumes desgastados e dos coeficientes de desgaste calculados pelas equações (2) e (3), com base nos valores de diâmetro obtidos pela microscopia ótica. | 91 |
| Tabela 35: Volumes desgastados de cada calota medidos por perfilometria de contato e coeficiente de desgaste calculado pela equação (3) e suas respectivas médias e desvio padrão. | 93 |

LISTA DE SIGLAS

CCC – Estrutura cristalina Cúbica de Corpo Centrado

CFC – Estrutura cristalina Cúbica de face Centrada

AL – Alongamento

MET – Microscópio Eletrônico de Transmissão

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

LCSM – Laboratório de Caracterização de Superfícies de Materiais

TRICORRMAT – Laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 15 |
| 2 OBJETIVO | 17 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 18 |
| 3.1 Desgaste abrasivo | 18 |
| 3.1.1 Definição..... | 18 |
| 3.1.2 Mecanismos de desgaste abrasivo | 18 |
| 3.1.3 Fatores que influenciam no desgaste abrasivo..... | 22 |
| 3.1.3.1 Propriedades da partícula abrasiva..... | 22 |
| 3.1.3.2 Microestrutura do material | 26 |
| 3.2 Teste de microabrasão | 32 |
| 3.2.1 Descrição de teste | 32 |
| 3.2.2 Superligas a base de níquel | 33 |
| 3.2.2.1 Mecanismos de aumento de resistência..... | 34 |
| 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 39 |
| 4.1 Materiais avaliados | 39 |
| 4.2 Ensaio de microabrasão..... | 43 |
| 4.2.1 Preparação para o ensaio..... | 43 |
| 4.2.2 Escolha dos parâmetros do teste e cálculo do volume desgastado e coeficiente de desgaste..... | 43 |
| 4.2.3 Perfilometria de contato, microscopia e microscopia eletrônica de varredura (MEV) | 46 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 49 |
| 5.1 Resultados..... | 49 |
| 5.2 Verificação do modo de desgaste | 50 |
| 5.3 Discussão | 62 |
| 6 CONCLUSÃO..... | 65 |
| 7 SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS | 66 |
| 8 BIBLIOGRAFIA | 67 |
| 9 ANEXOS | 69 |
| 9.1 Anexo I: Resultados obtidos para o volume desgastado e coeficiente de desgaste para microscopia ótica e coeficiente de desgaste para perfilometria de contato para cada amostra. | 69 |

| | |
|----------------------------|----|
| 9.1.1 Inconel 625..... | 69 |
| 9.1.2 Inconel 686..... | 77 |
| 9.1.3 Hastelloy C-276..... | 83 |

1 INTRODUÇÃO

O movimento relativo entre superfícies em contato está presente em quase todos os tipos de maquinários, e esse movimento é de extrema importância para que o processo em que esse maquinário está trabalhando funcione perfeitamente para atingir seu objetivo final.

Quase todas as máquinas perdem sua durabilidade e confiabilidade devido ao desgaste, e a possibilidade de novas máquinas avançadas são reduzidas pelos problemas de desgaste. Esse processo ocorre com retirada de material, modificando suas dimensões, o que pode levar a uma falha no funcionamento do mesmo, podendo levá-lo à inutilidade. Situação semelhante encontramos em tubulações que transportam óleo e gás que inevitavelmente levam também areia, cascalho, dentre outros abrasivos que ao entrarem em contato com a tubulação, causarão o desgaste das mesmas.

A indústria petroquímica apresenta um dos mais severos ambientes de operação envolvendo corrosão, erosão e/ou desgaste aliados a altas temperaturas, criando assim grandes desafios no desenvolvimento de materiais que atendam a estas condições (GRAF, 2004). A boa resistência a corrosão e ao desgaste dos diversos componentes se faz necessária, devido a grande agressividade dos fluidos explorados e transportados.

As superligas à base níquel são ligas desenvolvidas para atuar em situações extremas. Estes materiais são largamente utilizados em turbinas de aeronaves e de geração de energia, motores de foguete, e outros ambientes desafiadores, incluindo energia nuclear e plantas de processamento de químicos (POLLOCK;TIN,2006).

São uma classe incomum de materiais metálicos com uma combinação excepcional de resistência mecânica a alta temperatura, dureza, e resistência à degradação de ambientes corrosivos ou oxidantes (POLLOCK;TIN,2006).

Quando o desgaste e corrosão atuam em conjunto, como no caso da indústria do petróleo, este material apresenta um elevado potencial de aplicação. Diversos tipos

de materiais e rotas de fabricação podem ser utilizadas na fabricação de componentes da indústria do petróleo. Determinar qual delas tem o maior potencial de aplicação aliado ao melhor desempenho do componente é uma tarefa desafiadora. Componentes podem ser fabricados de materiais menos nobres e revestidos com superligas de níquel, por exemplo, associando baixo custo com bom desempenho. Assim, estudar formas de aplicação desses revestimentos representam uma grande contribuição principalmente em condições que envolvem desgaste, como por exemplo, no transporte de óleo e gás.

Com intuito de avaliar uma forma de revestimento para contribuir nas condições que envolvem desgaste, neste trabalho, ensaios de microabrasão foram feitos na configuração de esfera fixa e será avaliada a resistência ao desgaste microabrasivo dos revestimentos de superligas a base de níquel (Inconel 625, Inconel 686 e Hastelloy C-276), depositados por soldagem TIG com alimentação contínua. As amostras foram soldadas com diferentes parâmetros, logo, além de selecionar a liga que melhor resistirá ao desgaste microabrasivo, foram selecionados também, os melhores parâmetros de soldagem para tal finalidade.

2 OBJETIVO

Avaliar a resistência ao desgaste abrasivo das superligas de níquel das classes Inconel 625, Inconel 686 e Hastelloy c-276, depositadas por soldagem TIG com alimentação contínua de arame a frio em substrato de aço ASTM A516 Gr 60.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Desgaste abrasivo

A ciência que estuda, dentre outros fenômenos, o desgaste abrasivo é a tribologia. A palavra tribologia vem do grego *tribos*, que significa esfregar, e *logos*, que significa estudo. Tribologia, o estudo do atrito, desgaste e lubrificação, é um assunto interdisciplinar que se baseia na experiência de físicos, químicos e engenheiros mecânicos, bem como os cientistas dos materiais e metalurgistas (HUTCHINGS, 1992).

O atrito pode ser interpretado como o processo de dissipação de energia e o desgaste como uma dissipação da estrutura da superfície e/ou massa. (ZUM-GAHR, 1987).

A lubrificação pode ser definida como uma maneira de diminuir o atrito entre as superfícies evitando o contato e dissipando a energia do movimento relativo entre as superfícies. (ZUM-GAHR, 1987).

O estudo da Tribologia é bastante complexo, pois os fenômenos tribológicos são sistêmicos, ou seja, dependem fortemente das condições do tribossistema em que estão presentes.

3.1.1 Definição

Segundo Hutchings (1992), no desgaste abrasivo, material é removido ou destacado de uma superfície por partículas duras, ou às vezes por asperezas duras na contraface, forçada sobre a superfície no deslizamento.

Como o desgaste abrasivo é um fenômeno estudado pela tribologia, este também é sistêmico, dependendo do tribossistema.

3.1.2 Mecanismos de desgaste abrasivo

O desgaste abrasivo pode ser classificado em dois corpos, que ocorre quando uma aspereza dura de uma superfície risca a outra durante o deslizamento, e três corpos, quando as partículas de desgaste rolam sobre a superfície no deslizamento, ilustrado na figura 1. Nas figuras 2 e 3 temos a superfície característica desses dois tipos de desgaste.

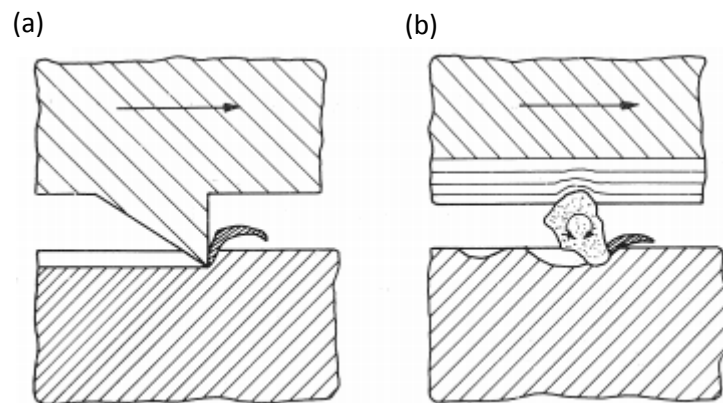


Figura 1: Desgaste a (a) dois e (b) três corpos. Fonte: ZUM GAHR (1987)

O desgaste pode ser classificado de outras maneiras, que pode ser o alta-tensão e a baixa-tensão. Na abrasão a alta-tensão, a força que age esmagando a partícula é excedida, causando sua fraturada durante o processo de desgaste, enquanto a abrasão baixa-tensão, a partícula permanece sem fraturar. (HUTCHINGS, 1992). O termo *goughing* é utilizado quando grandes partículas de abrasivo atuam no processo de desgaste, resultando num desgaste acentuado da superfície, através da retirada de grande fragmentos.

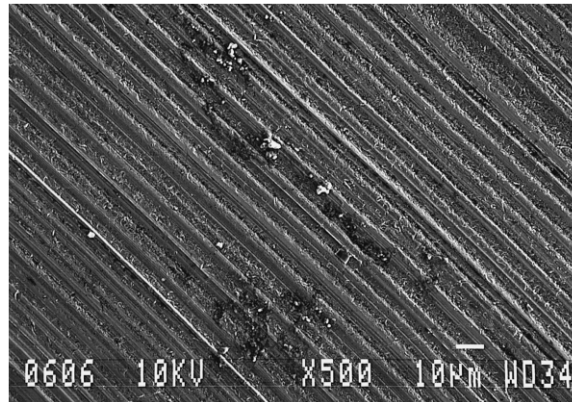


Figura 2: Imagem de MEV da superfície de um aço ferramenta temperado após ensaio de microabrasão com carga normal de 0.25N e fração volumétrica de 0.0009 ($0,003 \text{ g cm}^{-3}$) lama abrasiva de diamante com tamanho médio da partícula de $3\mu\text{m}$. Superfície característica de abrasão a dois corpos. Fonte: TREZONA (1999).

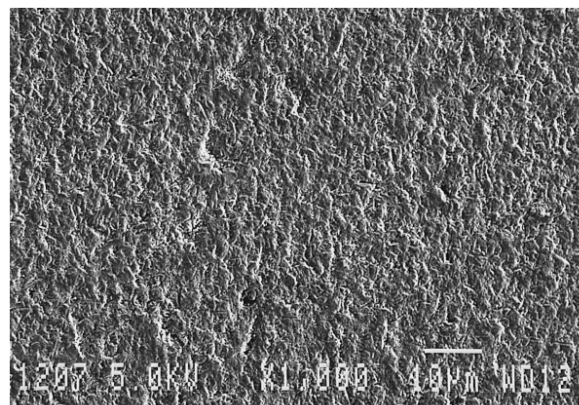


Figura 3: Imagem de MEV da superfície de um aço ferramenta temperado após ensaio de microabrasão com carga normal de 0.25N e fração volumétrica de 0.237 (1.0 g cm^{-3}) lama abrasiva de SiC F1200. Superfície característica de abrasão a três corpos. Fonte TREZONA (1999).

Após o contato do abrasivo com a superfície sob uma carga, a superfície será deformada como uma maneira de dissipar a energia que foi inserida pelo contato. Essa energia pode ser dissipada através de microsulcamento, onde a passagem da partícula abrasiva não causará retirada de material mas apenas uma deformação com o escoamento do material, microtrincamento, particularmente em superfícies de materiais frágeis, haverá o destacamento do material devido a formação e propagação das trincas, microcorte, onde haverá uma remoção do volume de material proporcional ao volume do abrasivo que penetrou na superfície e microfadiga, ocorre quando há vários deslocamentos sucessivos de material pela

passagem do abrasivo, na configuração de microsulcamento, fazendo com que ocorra a fadiga do material, que será desprendido da superfície. Esses mecanismos estão ilustrados na figura 4.

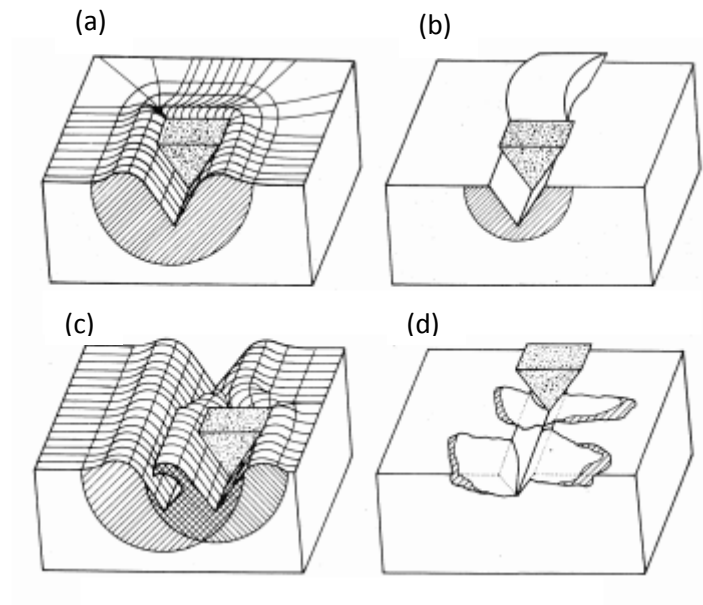


Figura 4: Interações físicas entre as partículas abrasivas e as superfícies dos materiais (a) microsulcamento; (b) microcorte; (c) microfadiga; (d) microtrincamento. Fonte: ZUM-GAHR (1987).

O ângulo de ataque da partícula abrasiva com a superfície desgastada influencia no modo de desgaste, acontecendo uma transição do microsulcamento para o microcorte. Essa transição ocorre à partir de um ângulo crítico α_c . Na prática, uma transição gradual do microsulcamento para o microcorte é observada com o aumento do ângulo de ataque. (ZUM-GAHR, 1987). Como mostrado na figura 5.

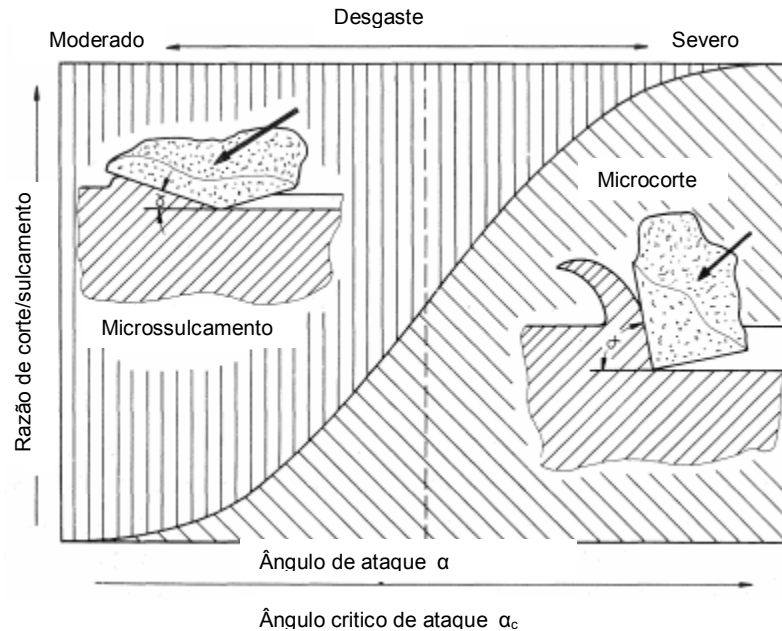


Figura 5: Transição do microsulcamento para o microcorte como função da razão do ângulo de ataque e o ângulo de ataque crítico. Fonte ZUM-GAHR (1987).

3.1.3 Fatores que influenciam no desgaste abrasivo

3.1.3.1 Propriedades da partícula abrasiva

A partícula abrasiva é de extrema importância para o processo abrasivo, portanto, é necessário saber sobre algumas propriedades das partículas que influenciam no desgaste.

(a) DUREZA

A dureza da partícula abrasiva está ligada diretamente com as taxas de desgaste do material, partículas mais duras causarão maior desgaste do que as menos duras. Para melhor entender o comportamento da dureza da partícula em relação a dureza da superfície com o desgaste abrasivo, foi feita uma análise de contato entre a partícula e a superfície. Se o material da superfície escoar plasticamente uma vez que sua tensão de escoamento foi atingida, escoamento plástico irá ocorrer na superfície quando a pressão média de contato for três vezes a tensão uniaxial de

escoamento Y . (HUTCHINGS, 1992). Essa pressão de contato que é três vezes a tensão uniaxial de escoamento Y é conhecida como dureza do material H .

Segundo Hutchings (1992), para uma partícula esférica pressionada contra uma superfície plana, a máxima pressão de contato é em torno de 0,8 vezes a dureza de indentação do material. Então para que ocorra indentação na superfície do material, a dureza H_s do material terá que ser menor do que 0,8 vezes a dureza do abrasivo H_a ($<0,8H_a$), ou seja, $H_a/H_s > 1,25$. A figura 6 mostra a taxa de desgaste referente a essa relação de durezas.

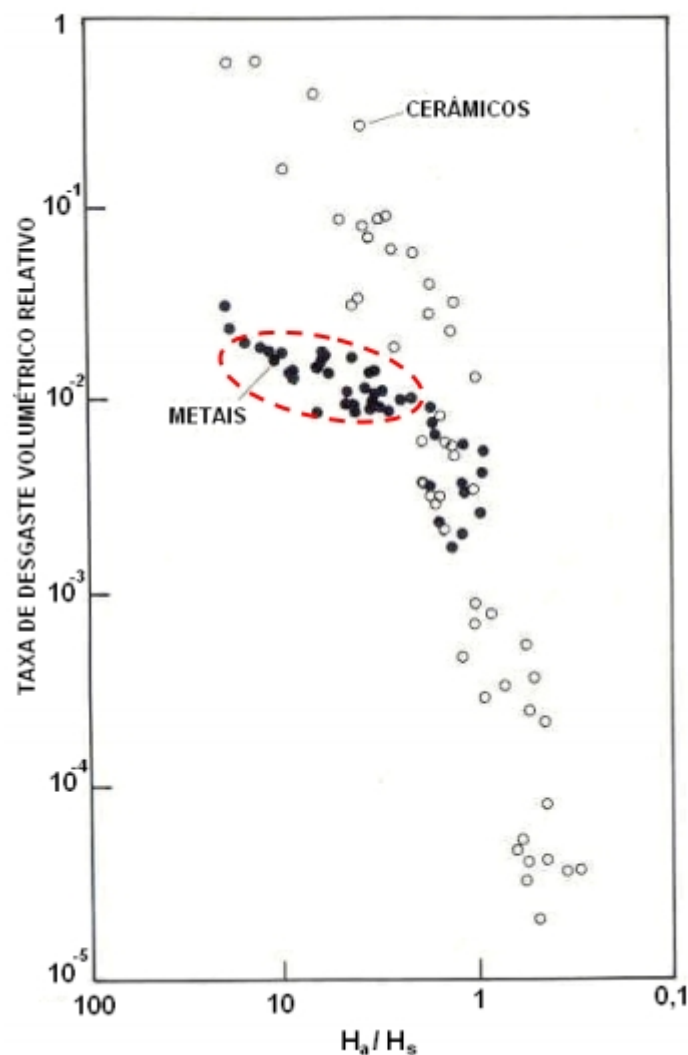


Figura 6: Taxa de volume desgastado em relação a taxa de dureza do abrasivo pela dureza da superfície (H_a/H_s) para materiais cerâmicos e metálicos e partículas abrasivas, para abrasão a dois corpos. Fonte: HUTCHINGS *apud* HENRIQUE (2009).

Para valores em que $H_a/H_s > 1,2$, teremos *hard-abrasion* (abrasão severa), ocorrendo a penetração da partícula abrasiva na superfície sob ação de uma carga normal, e para condições em que $H_a/H_s < 1,2$, teremos *soft-abrasion* (abrasão moderada), ocorrendo a fratura ou o escoamento plástico da partícula abrasiva quando em contato com a superfície agindo sob uma carga normal. Figura 7, mostra a influencia da relação entre as durezas H_a e H_s para os valores de abrasão moderada e severa.

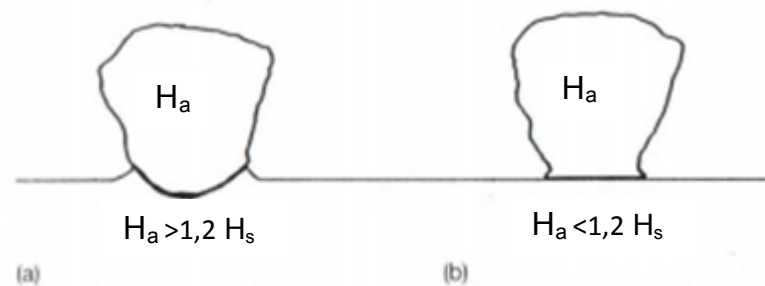


Figura 7: Ilustração do contato entre uma partícula abrasiva sob uma carga normal e a superfície plana. (a) Se H_a é maior que $1,2H_s$, a partícula irá indentar a superfície; (b) se H_a é menor do que $1,2H_s$, escoamento plástico irá ocorrer na partícula, que terá as pontas cominuídas. Fonte HUTCHINGS (1992).

(b) FORMATO DA PARTÍCULA ABRASIVA

O formato da partícula abrasiva influencia nas condições de desgaste da superfície, sendo que uma partícula mais angulosa causará maior desgaste do que uma partícula mais arredondada. Essa característica de angulosidade é bem difícil de se definir. Diferenças no formato da partícula dessa magnitude, podem resultar em diferenças na taxa de desgaste em dez vezes ou mais, ainda, a angulosidade do abrasivo é raramente mensurada quantitativamente. (HUTCHINGS (1992)).

Para tentar mensurar o formato da partícula, foi criado o fator de esfericidade (F), que mede o quão próximo a área da projeção de uma partícula está de um círculo com mesmo perímetro. F será a taxa entre a área da projeção e a área de um círculo de mesmo perímetro P da projeção, dado pela expressão:

$$F = \frac{4\pi A}{p^2}$$

(1)

Se $F=1$, a projeção bidimensional da partícula será uma círculo, quanto mais afastado de 1 for esse valor, a partícula será mais angulosa. A figura 8 a seguir mostra as formas arredondada e angulosa.



Figura 8: Partículas de sílica, visualizadas no Microscópio Eletrônico de Varredura, (a) partículas arredondadas e (b) partículas angulosas. Fonte: HUTCHINGS (1992).

(c) TAMANHO DA PARTÍCULA

O comportamento do desgaste abrasivo em função do tamanho da partícula abrasiva está mostrado na figura 9:

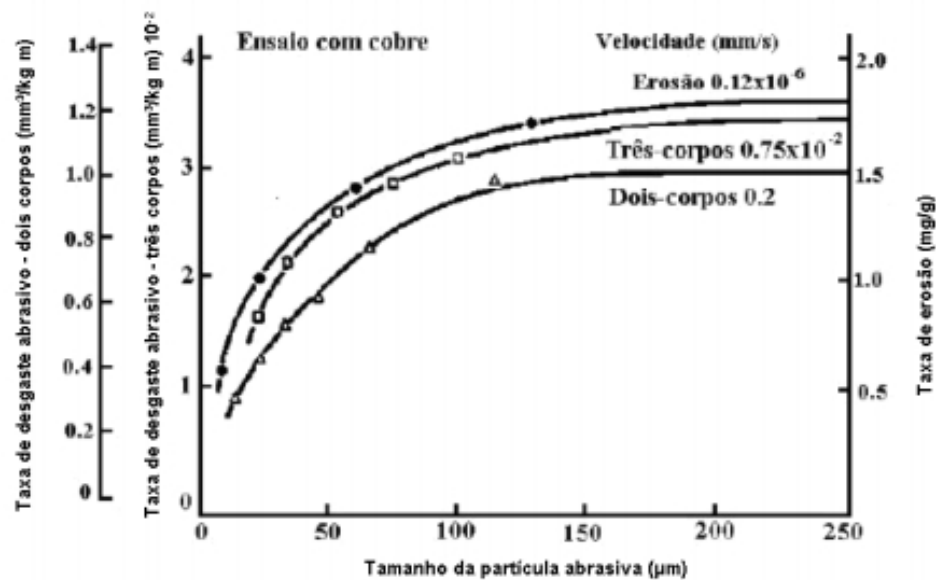


Figura 9: Taxa de desgaste para o cobre nas configurações de dois corpos, três corpos e erosão, por partículas de carbeto de silício com diferentes tamanhos. Fonte: adaptado HUTCHINGS (1992).

Para partículas menores do que 100 μm a taxa de desgaste cai abruptamente. Uma explicação para este comportamento está no efeito escala, onde a tensão para o escoamento de um volume de material muito pequeno (pontual), devido ao contato de partículas bem pequenas, é maior do que aquelas com grande volume, talvez pela dificuldade de nucleação ou movimento de discordâncias no volume menor. Esse aumento na tensão local de escoamento com a diminuição da escala de deformação leva a uma redução nas taxas de desgaste por processos plásticos, caracterizando o processo do efeito escala. (HUTCHINGS, 1992).

O comportamento apresentado na figura 9 está ligado a materiais dúcteis, que envolve o escoamento plástico. Para materiais frágeis, estes exibem uma dependência maior na taxa de desgaste com a variação no tamanho da partícula. (HUTCHINGS, 1992).

3.1.3.2 Microestrutura do material

A figura 10 mostra alguns materiais de engenharia com suas respectivas durezas e resistências ao desgaste abrasivo. É evidente que enquanto há relações entre resistência ao desgaste abrasivo e a dureza um entre mesmo grupo de materiais, essa relação não é observada em grupos diferentes. (HUTCHINGS, 1992). Para alguns materiais com a mesma dureza, observa-se uma resistência ao desgaste diferente.

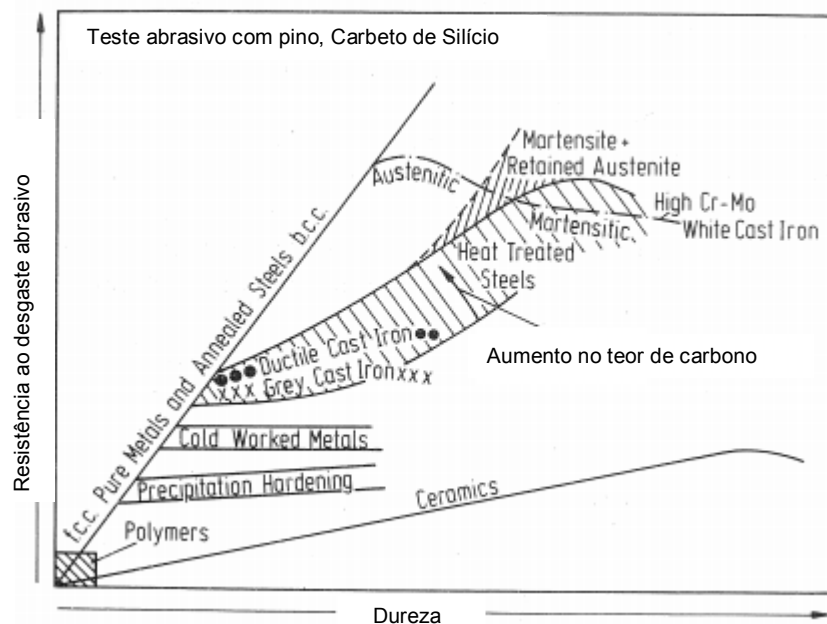


Figura 10: Resistência ao desgaste abrasivo de diferentes materiais no ensaio de abrasão pino disco em função da dureza do material. Fonte: adaptado ZUM-GAHR (1987).

Um motivo para isso está na relação E/H , onde E é propriedade do material, quanto menor o valor de E/H , favorecerá o corte, em relação ao sulcamento, acarretando em maior desgaste.

Pela figura 10, podemos observar também que o trabalho a frio (encruamento) realizado no material, não traz benefícios sobre a resistência ao desgaste da liga, porque o processo de desgaste em si já produz um elevado encruamento superficial.

Segundo Hutchings (1992), aços tratados termicamente, onde o módulo de elasticidade E varia de forma insignificante com a composição e microestrutura, um aumento na dureza, leva a diminuição de E/H . Como mostrado na figura 11.

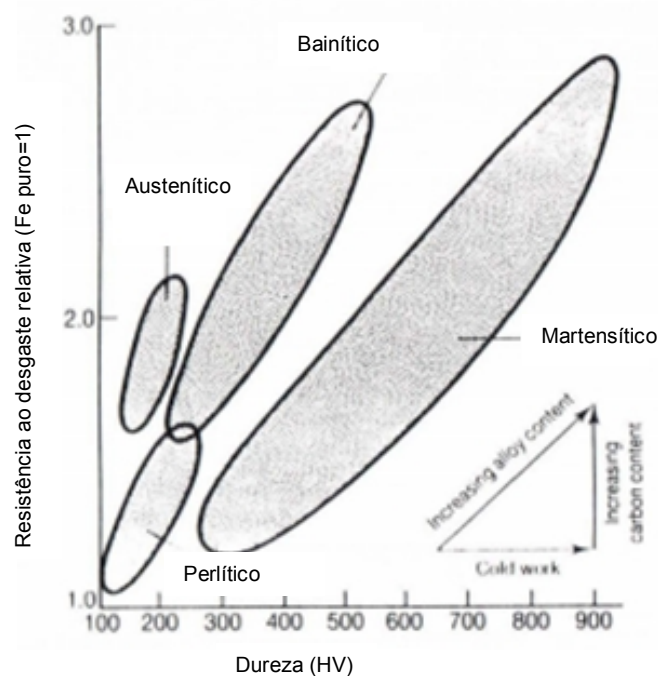


Figura 11: Efeito da estrutura, tratamento térmico e teor da liga na resistência ao desgaste a dois corpos de aços sobre partículas de alumina a 90 μ m. Fonte: MOORE *apud* HUTCHINGS (1992).

Nessa figura, podemos observar o aumento da resistência ao desgaste com o aumento da quantidade de carbono na liga. Aços austeníticos demonstram uma melhor resistência ao desgaste do que os aços bainíticos e perlíticos, com a mesma dureza, enquanto os aços martensíticos apresentam menor resistência. (HUTCHINGS, 1992). A explicação para isso está na maior ductilidade do aço austenítico em relação ao martensítico, levando ao aço martensítico a uma grande remoção de debris, levando ao maior desgaste, enquanto os aços perlíticos e bainíticos tem comportamento intermediário.

Alguns materiais apresentam redução da resistência ao desgaste com aumento da dureza, como no caso dos cerâmicos e ferros fundidos brancos. O comportamento ótimo é atingido com valores intermediários de dureza e tenacidade à fratura,

demonstrados na figura 12, relacionando com a resistência ao desgaste. Materiais duros tem sua resistência ao desgaste aumentada proporcionalmente com o aumento da tenacidade a fratura e materiais com alta ductilidade, que tem dureza menor, a resistência ao desgaste aumenta com o aumento da dureza. O aumento da severidade do sistema, com aumento do tamanho da partícula, angulosidade ou carga normal, leva a um deslocamento da curva para a direita para valores maiores de tenacidade a fratura.

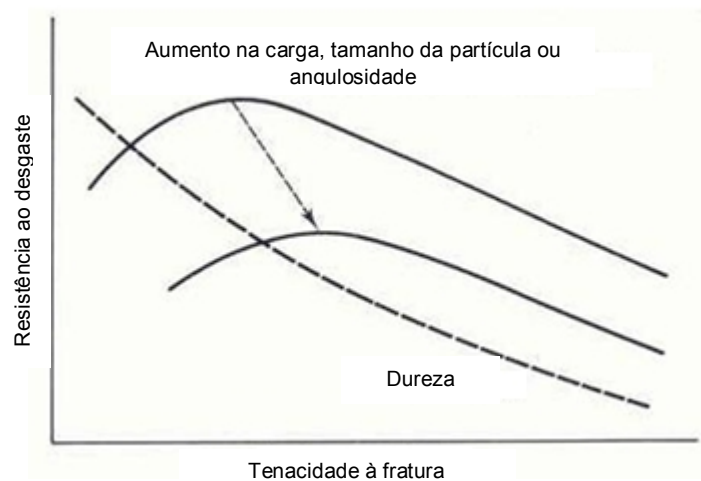


Figura 12: Relação entre a tenacidade à fratura e a resistência ao desgaste para metais e cerâmicos. Fonte: ZUM-GAHR *apud* HUTCHINGS (1992).

Alguns materiais que são expostos ao desgaste abrasivo, possuem fases duras em uma matriz menos resistente. Essas segundas fases podem ser carbonetos, que possuem uma dureza bastante elevada, e podem ser precipitados através da fundição ou tratamentos térmicos na liga. A resposta desses materiais depende do tamanho da fase dura em relação ao tamanho da deformação causada por cada partícula abrasiva individualmente (HUTCHINGS, 1992). Caso o tamanho do dano seja maior do que as partículas de segundas fases formadas e maior que o tamanho da separação dessas partículas o material irá se comportar homogeneamente, como mostrado na figura 13.

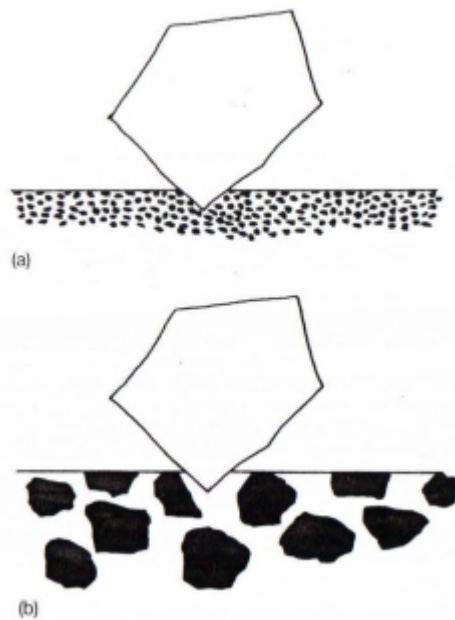


Figura 13: Ilustração da importância do tamanho do contato da partícula abrasiva e a região de fases duras precipitadas no desgaste abrasivo. (a) o material responde de maneira homogênea, enquanto (b) responde de forma heterogênea. Fonte HUTCHINGS (1992).

Segundo Hutchings (1992), a regra geral de que uma grande fração de partículas de segundas fases duras é desejável para melhorar a resistência ao desgaste não é, contudo, universalmente verdadeira. A matriz deve ter boa tenacidade para absorver a energia do contato da partícula abrasiva com a fase dura, caso contrário, se a matriz for frágil, as partículas duras agirão como concentradores de tensão que formará a trinca que se propagará pela matriz e removerá o material junto com as segundas fases, que podem agir, a partir de então, como abrasivos no sistema.

Se as partículas duras forem comparadas com o tamanho do abrasivo e do dano causado por ele, o material se comportará de forma heterogênea. A ação da partícula abrasiva poderá levar ao escoamento ou a fratura, dependendo da carga, tamanho, geometria e propriedades do abrasivo e da resistência da interface com a fase dura HUTCHINGS (1992).

A figura 14 mostra a complexidade do comportamento do ferro fundido branco, possuindo matriz austenítica e frações volumétricas distintas de carbonetos. A dureza dessa liga aumenta linearmente com o aumento da fração de carbonetos. O ensaio pino-disco com granada mostrou a relação da taxa de desgaste, que diminuiu com o aumento a fração de carbonetos. O mesmo ensaio com SiC (carbeto de

silício) demonstrou relação inversa, que é explicado devido as fases duras serem penetradas pelo abrasivo causando trincas, e aumentando a taxa de desgaste. No ensaio roda de borracha com Alumina como abrasivo a taxa de desgaste caiu com o aumento da fração de carbonetos, e com a Sílica (SiO_2), houve um decréscimo da taxa de desgaste até atingir 30% da fração volumétrica de carbonetos, acima desse valor, a taxa de desgaste aumentou, pois a sílica passou a escarear a matriz deixando os carbonetos livres, consequentemente, sendo expostos e tornando-os susceptíveis a fratura.

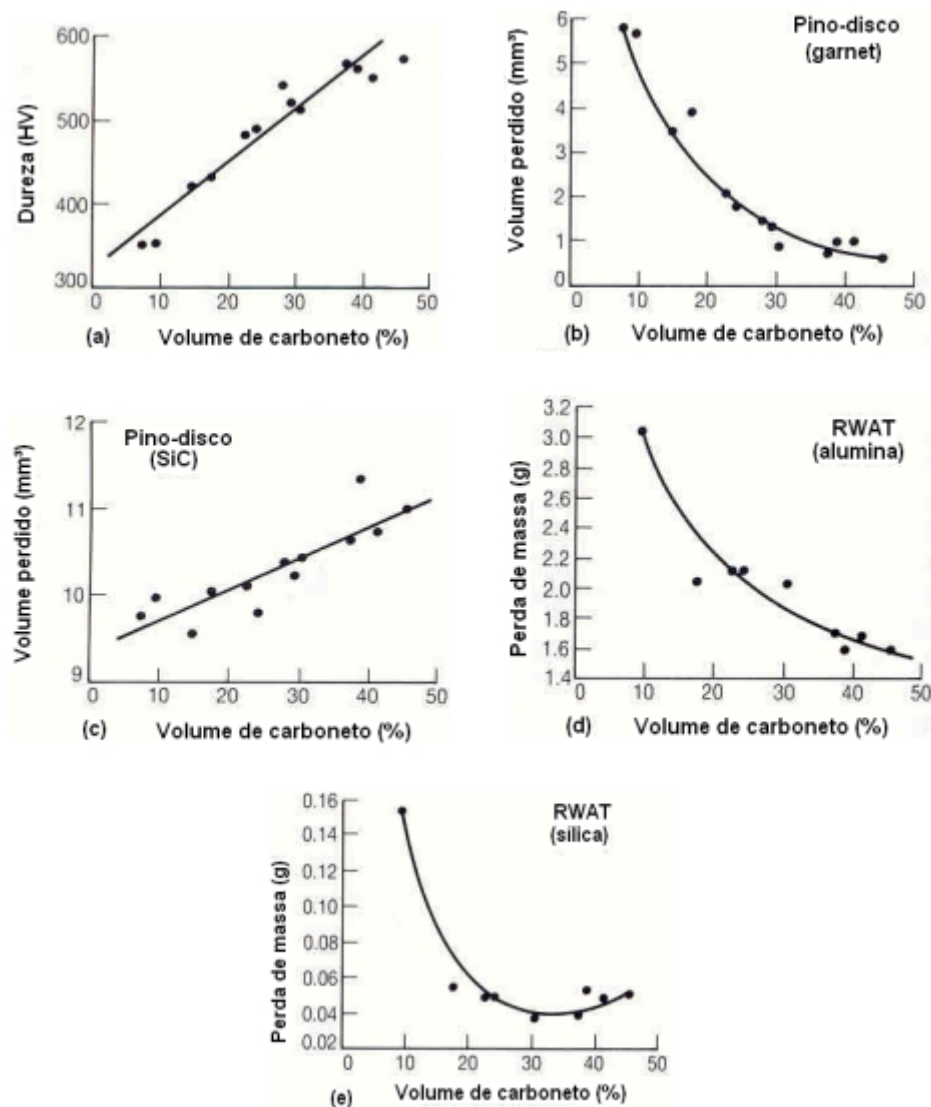


Figura 14: Taxa de desgaste abrasivo para o ferro fundido alto cromo, contendo diferentes frações de carbonetos: (a) microdureza da liga; (b) pino-disco (dois corpos) com partículas de garnet 100 μm ; (c) pino-disco (dois corpos) com partículas de carbeto de silício a 90 μm ; (d) roda de borracha (três corpos) com partículas de alumina a 250 μm ; (e) roda de borracha (três corpos) com partículas de sílica a 250 μm . Fonte: HUTCHINGS (1992).

3.2 Teste de microabrasão

3.2.1 Descrição de teste

O princípio deste teste consiste numa esfera dura de raio R que será rotacionada sobre uma amostra fixa, na presença de uma lama abrasiva, gerando uma cratera de desgaste. As partículas abrasivas geralmente são menores do que $10\mu\text{m}$. A morfologia das superfícies de desgaste é geralmente diferente da encontrada em aplicações reais. (STACHOWIACK; STACHOWIACK; CELLIERS, 2005), quanto ao tamanho do abrasivo utilizado, se este for de um tamanho inadequado, ele pode não entrar na cavidade que fica entre a amostra e a esfera, sendo assim, o desgaste não será produzido pelo abrasivo. A figura abaixo mostra o esquema de funcionamento do microabrasômetro.

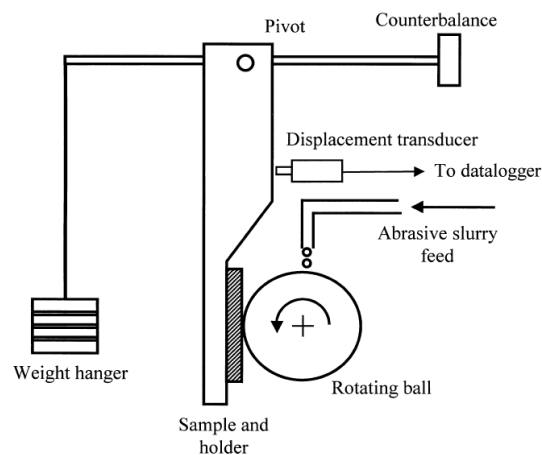


Figura 15: Esquema do teste de microabrasão. Fonte TREZONA (1999).

A esfera é fixa por um eixo e a amostra é montada verticalmente em um braço em forma de L em forma de alavanca e é carregado contra a esfera por um peso morto pendurado na alavanca horizontal. (TREZONA; ALLSOPP; HUTCHINGS, 1999). A esfera gira em uma determinada velocidade enquanto a lama abrasiva é gotejada na

interface que liga a esfera e a amostra, pressionando o abrasivo contra a amostra, causando o desgaste. A figura 16 mostra a máquina utilizada.

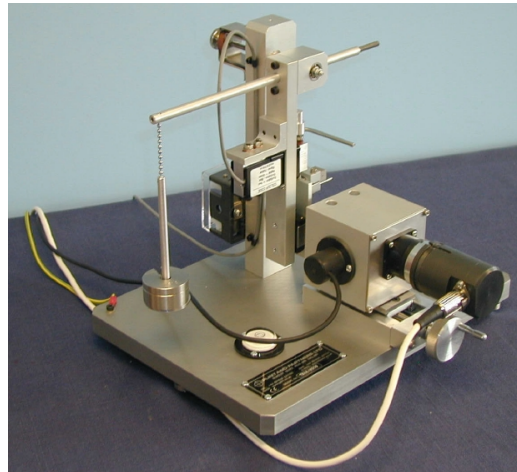


Figura 16: Máquina TE-66. Fonte: TREZONA (1999).

A geometria da superfície desgastada reproduz a geometria de uma calota esférica

3.2.2 Superligas a base de níquel

As superligas de níquel são selecionadas para específicas aplicações devido a suas características particulares que são manter suas propriedades mecânicas a altas temperaturas e sua alta resistência a corrosão e oxidação. Essas ligas possuem uma grande concentração de elementos químicos no níquel, que é bem maior do que no ferro, o que pode ser a explicação para esse melhor desempenho.

O níquel puro possui densidade de $8,9 \text{ g/cm}^3$ e ponto de fusão de $1455 \text{ }^\circ\text{C}$, com densidade das suas ligas variando entre $7,79$ e $9,32 \text{ g/cm}^3$ e possuem estrutura CFC (cúbica de face centrada). A condutividade térmica do Níquel puro é da ordem de $0,089 \text{ (W/mm}^2\text{)/(}^\circ\text{C/mm)}$ portanto superior à do ferro puro (CCC: cúbico de corpo centrado), que atinge somente $0,072 \text{ (W/mm}^2\text{)/(}^\circ\text{C/mm)}$. (SILVA, 2010). A condutividade térmica da liga é inferior, da ordem de 10% desses valores devido a

adição de muitos elementos de liga. As propriedades do ferro e do níquel são mostradas na tabela 1.

Tabela 1: Propriedades físicas do níquel e do ferro. Fonte ASME *apud* SILVA (2010).

| Propriedade | Níquel | Ferro |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Densidade (g/cm ³) | 8,89 | 7,87 |
| Ponto de fusão (°C) | 1.453 | 1.535 |
| Coef. de expansão térmica (m/(m·°C)) | $13,3 \times 10^{-6}$ | $11,8 \times 10^{-6}$ |
| Condutividade térmica (25°C) (W/m·K) | 92 | 80 |
| Resistividade elétrica (Ω m) | $9,7 \times 10^{-8}$ | $7,0 \times 10^{-8}$ |
| Módulo de elasticidade (kPa) | 204×10^6 | 211×10^6 |
| Limite de resistência (MPa) | 462 | |
| Limite de escoamento, 0,2% (MPa) | 148 | |
| Alongamento em 51 mm (%) | 47 | |

Segundo Silva (2010), embora o níquel e o ferro apresentem características semelhantes, a estrutura cristalina das ligas de níquel é completamente diferente das ligas de ferro, tornando a metalurgia do níquel e suas ligas diferentes das ligas de ferro. Isso possibilita formar ligas com as mais variadas composições para atender os requisitos de elevada resistência mecânica e ao desgaste em altas temperaturas e também, excelente resistência à corrosão em meios agressivos.

3.2.2.1 Mecanismos de aumento de resistência

Essas ligas possuem uma matriz γ com estrutura cúbica de face centrada (CFC) e são classificadas em quatro grupos de acordo com seu mecanismo de aumento de resistência em:

- Ligas endurecidas por solução sólida;
- Ligas endurecidas por precipitação;

- Ligas endurecidas por dispersão de óxidos;
- Ligas endurecidas por carbonetos.

(a) LIGAS ENDURECIDAS POR SOLUÇÃO SÓLIDA

Consiste na formação de ligas com átomos de elementos de liga que entram na estrutura do material em solução sólida substitucional ou solução sólida intersticial. O aumento da concentração de elementos de liga resulta em um consequente aumento no limite de resistência a tração e no limite de escoamento. (CALLISTER, 1999). Este conceito está mostrado na figura 17, que representa a adição de níquel em ligas de cobre com o objetivo de formarem soluções sólidas.

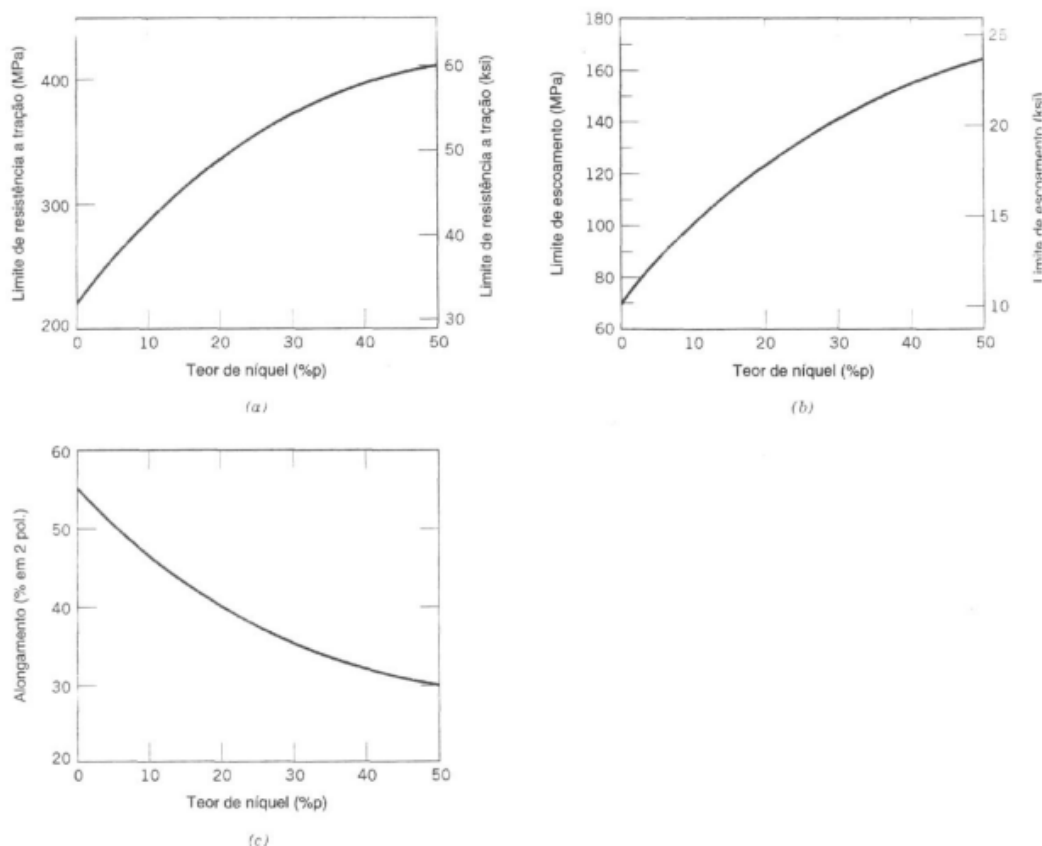


Figura 17: Variação do (a) limite de resistência à tração, (b) limite de escoamento e (c) ductilidade (AL%) em função do teor de Níquel para as ligas cobre-níquel, mostrando o aumento da resistência mecânica. Fonte CALLISTER (1999).

Segundo Callister (1999), um átomo de elemento de liga que seja menor do que o átomo hospedeiro que ele esteja substituindo exerce deformações de tração sobre a rede cristalina vizinha, de maneira contrária, o átomo substitucional maior exerce forças de compressão. A resistência ao escorregamento de planos torna-se maior quando estes átomos estão presentes devido ao aumento da deformação global se uma discordância for separada deles, como demonstrado nas figuras 18 e 19 abaixo.

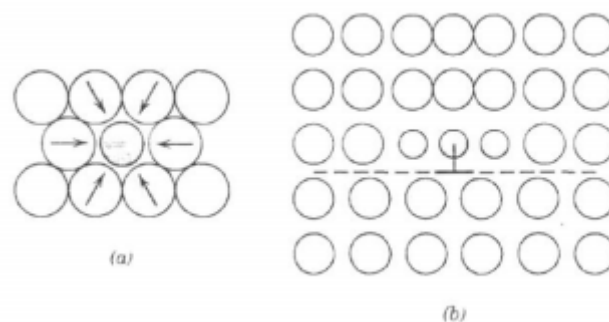


Figura 18: (a) representação das deformações da rede por tração impostas sobre átomos hospedeiros por um átomo de impureza substitucional de menor tamanho. (b) Possíveis localizações de átomos de impurezas menores em relação a uma discordância aresta, de modo que existe um cancelamento parcial das deformações da rede impureza-d discordância. Fonte CALLISTER (1999).

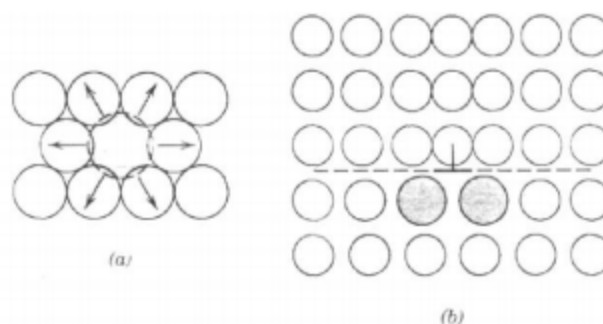


Figura 19: (a) representação das deformações compressivas impostas sobre átomos hospedeiros por um átomo de impureza substitucional de maior tamanho. (b) Possíveis localizações de átomos de impurezas maiores em relação a uma discordância aresta, de modo que existe um cancelamento parcial das deformações de rede impureza-d discordância. Fonte CALLISTER (1999).

Segundo Silva (2010), os principais elementos que atuam no aumento de resistência por solução sólida do níquel são o titânio, o tungstênio, o cromo, o ferro, o cobre e o

cobalto, sendo que os três primeiros apresentam maiores potenciais de aumento de resistência frente aos demais.

(b) LIGAS ENDURECIDAS POR PRECIPITAÇÃO

Este mecanismo ocorre quando há uma diminuição da solubilidade do soluto na rede cristalina com a diminuição da temperatura, ocorrendo a formação de solução sólida supersaturada. A nova fase irá ocorrer quando os átomos de soluto precipitarem com a diminuição da temperatura. O aumento de resistência neste caso é atribuído ao bloqueio do movimento de discordâncias pelas fases precipitadas na matriz γ . (SILVA, 2010). O mecanismo de resistência ocorre devido ao bloqueio das discordâncias por essas fases precipitadas na matriz γ , dentre elas, as fases γ' e γ'' .

A figura 20 representa uma liga endurecida por precipitação na qual observa-se várias discordâncias ao redor da fase γ' .

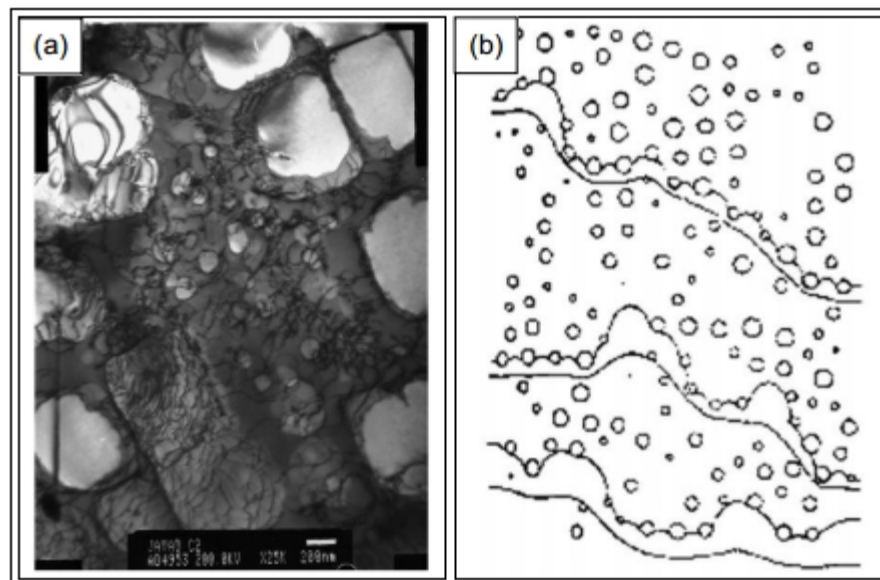


Figura 20: (a) micrografia obtida por MET de uma liga de Níquel endurecida por precipitação; (b) modelo do bloqueio de discordâncias. Fonte: SILVA *apud* SAFARI & NATEGH (2010).

(c) DISPERSÃO DE ÓXIDOS

Segundo Silva (2010), o mecanismo de aumento de resistência devido a dispersão de óxido é semelhante ao observado para precipitação de fase Y' . Esses óxidos encontram-se dispersos tanto na matriz Y quanto na fase Y' . No geral, são usados partículas de óxido de yttrium (Y_2O_3) e óxido de titânio (Ti_2O_3)

(d) LIGAS ENDURECIDAS POR CARBONETOS

Segundo Davis (1997), no geral, superligas possuem uma matriz austenítica e contém uma grande variedade de segundas fases, sendo as mais comuns os carbonetos do tipo (MC , $M_{23}C_6$, M_6C e M_7C_3). Os carbonetos formados têm três funções principais: carbonetos formados nos contornos de grão previnem ou retardam o deslizamento; se carbonetos finamente dispersos na matriz forem formados, haverá uma melhora na resistência mecânica; carbonetos podem se associar com elementos que promoveriam fases instáveis durante o processo.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Materiais avaliados

Os materiais utilizados nesse trabalho foram cedidos por Silva (2010), que foram utilizados em sua tese de doutorado. Os revestimentos foram feitos através de soldagem TIG com alimentação de arame. Os processos foram todos feitos em uma bancada robotizada para garantir maior reprodutibilidade dos resustados.

Os materiais que foram usados como revestimento foram três ligas a base de níquel: Inconel 625, Inconel 686 e Hastelloy C-276. As propriedades químicas estão apresentadas na tabela 2. Essas ligas foram depositadas sobre aço-carbono ASTM A516 Gr. 60, cuja composição química está na tabela 3. Esse aço é amplamente utilizado na construção de vasos e equipamentos para a indústria do petróleo HENRIQUE (2009).

As ligas Inconel 625 e Hastelloy C-276 possuem alta resistência a corrosão, já conhecida, e são muito utilizadas na indústria do petróleo e gás. A liga Inconel 686 foi escolhida por ser uma liga nova, com alta resistência a corrosão, maior do que as ligas anteriores, mas pouco se sabe sobre essa liga, sendo ela, uma liga semelhante a Hastelloy C-276.

Tabela 2: Composição química das ligas (% em peso segundo a análise do fabricante).
Fonte SILVA (2010).

| Item | Composição, peso % | | | | | | | |
|---|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | Ni | C | Cr | Mo | W | Fe | Al | Ti |
| INCONEL 625 (ERNiCrMo-3) | 64,43 | 0,011 | 22,2 | 9,13 | - | 0,19 | 0,09 | 0,23 |
| | Nb | Mn | Si | Cu | Co | V | P | S |
| | 3,53 | 0,01 | 0,05 | 0,01 | 0,03 | | 0,002 | 0,002 |
| HASTELLOY C-276 (ERNiCrMo-4) | Ni | C | Cr | Mo | W | Fe | Al | Ti |
| | 56,80 | 0,002 | 16,13 | 16,28 | 3,38 | 6,07 | - | - |
| | Nb | Mn | Si | Cu | Co | V | P | S |
| INCONEL 686 (ERNiCrMo-14) | - | 0,52 | 0,03 | 0,06 | 0,13 | 0,17 | 0,07 | 0,002 |
| | Ni | C | Cr | Mo | W | Fe | Al | Ti |
| | 58,22 | 0,01 | 20,53 | 16,39 | 3,97 | 0,29 | 0,26 | 0,04 |
| | Nb | Mn | Si | Cu | Co | V | P | S |
| | - | 0,23 | 0,059 | 0,01 | - | - | 0,002 | 0,001 |

Tabela 3: Composição química do metal base (% em peso). Fonte: SILVA (2010).

| Item | Composição, peso % | | | | | | | |
|-------------------------|--------------------|------|------|------|-------|------|------|-----|
| | Ni | C | Cr | Mo | Fe | Al | Mn | Si |
| ASTM A516 Gr. 60 | 0,01 | 0,15 | 0,02 | 0,01 | 98,64 | 0,02 | 0,95 | 0,2 |

As amostras foram soldadas modificando alguns parâmetros de soldagem, assim como o gás de proteção, para observar a influência de cada combinação de parâmetros na microestrutura formada. Foram utilizados três tipos de gases de proteção, que estão na tabela 4.

Tabela 4: Composição dos gases de proteção. Fonte SILVA (2010).

| Gás de proteção | Composição | | |
|-----------------|---------------|------------|--------------|
| | Ar | He | NOx |
| Ar puro | 99,99% | - | - |
| Ar + NOx | 99,98% | - | 0,01% |
| Ar + He | 70% | 30% | - |

As amostras foram produzidas de modo a estudar cinco fatores de controle sobre as características da microestrutura final do cordão de solda. Os fatores a serem avaliados foram o tipo de energia de solda (variando corrente e a velocidade de soldagem) a energia de solda relacionada com a quantidade de calor produzida pelo arco, o tipo de liga, o gás de proteção e o tectimento. HENRIQUE (2009), os parâmetros estão apresentados na tabela 5, onde TE – Técnica de energia; E – Nível de energia; L – Metal de adição (liga); G – Gás de proteção; T – tipo de tectimento.

Tabela 5: Parâmetros do processo de soldagem. Fonte SILVA (2010).

| Nível | TE (le/Vs) | Energia (kJ/cm) | Liga (L) | Gás de Proteção (G) | Tecimento (T) |
|-------|------------|-----------------|-----------------|---------------------|---------------|
| 1 | 330 A | Baixa | Inconel 625 | Ar puro | Espiral |
| 2 | 21 cm/min | Média | Hastelloy C-276 | Ar + NOx | Triangular |
| 3 | - | Alta | Inconel 686 | Ar + He | Duplo 8 |

O método Taguchi foi utilizado para uma matriz do tipo L18, apresentado na tabela 6. Foram testadas 18 condições diferentes e cinco dessas não foram possível soldar que, foram a 1, 7, 11, 12 e 15 (tabela 6).

Tabela 6: Parâmetros de soldagem que foram utilizados para deposição do material. Fonte SILVA (2010).

| Ensaio | TE | E | L | G | T | Corrente Eficaz le (A) | Velocidade de soldagem Vs (cm/min) |
|--------|----|---|---|---|---|------------------------|------------------------------------|
| T1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 223 | 25 |
| T2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 285 | 25 |
| T3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 343 | 25 |
| T4 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 285 | 25 |
| T5 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 343 | 25 |
| T6 | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 | 223 | 25 |
| T7 | 1 | 3 | 1 | 2 | 1 | 343 | 25 |
| T8 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 223 | 25 |
| T9 | 1 | 3 | 3 | 1 | 3 | 285 | 25 |
| T10 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 285 | 25 |
| T11 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 285 | 21 |
| T12 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 | 285 | 32 |
| T13 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 285 | 32 |
| T14 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 285 | 25 |
| T15 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 285 | 21 |
| T16 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 | 285 | 21 |
| T17 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 285 | 32 |
| T18 | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 285 | 25 |

A caracterização microestrutural de alguns corpos de prova foram feitas por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), e resumidamente, foi possível encontrar, na liga Inconel 625, carbonetos de nióbio (NbC) e precipitados de fases Laves ricas em Nb. Nas ligas Inconel 686 e Hastelloy C-276 foram encontradas, predominantemente, fases P que possuem alto teor de Mo e W. Informações detalhadas sobre a morfologia, distribuição, composição química podem ser encontradas na tese de doutorado de Silva (2010).

Silva (2010) extraiu dados sobre a quantidade e dimensões dos precipitados presentes nas ligas que pode ser visto na tabela 7. Nesta tabela podemos encontrar valores referentes ao número de precipitados, área de cada precipitado, fração da área total e perímetro de cada precipitado, do primeiro e do último cordão de solda, sendo esses, dados importantes para posterior relação com o desgaste abrasivo das ligas. Ensaios de dureza Vickers (tabela 8) também foram realizados na extensão do revestimento para retirar a dureza média dos revestimentos para posterior correlação com o desgaste abrasivo sofrido pelo material.

Tabela 7: Dados sobre a quantidade e dimensões dos precipitados nos corpos de prova.
Fonte: SILVA (2010).

| | CORPO DE PROVA | PRIMEIRO CORDÃO | | | | ÚLTIMO CORDÃO | | | |
|-----------------|----------------|------------------------|--|--------------------------|---|------------------------|--|--------------------------|---|
| | | NÚMERO DE PRECIPITADOS | ÁREA DE CADA PRECIPITADO (μm^2) | FRAÇÃO DA ÁREA TOTAL (%) | PERÍMETRO DE CADA PRECIP. (μm) | NÚMERO DE PRECIPITADOS | ÁREA DE CADA PRECIPITADO (μm^2) | FRAÇÃO DA ÁREA TOTAL (%) | PERÍMETRO DE CADA PRECIP. (μm) |
| INCONEL 625 | T-4 | 897,04 | 10,66 | 2,77 | 12,59 | 844,75 | 7,49 | 1,84 | 10,19 |
| | T-10 | 629,27 | 8,05 | 1,48 | 10,42 | 480,5 | 6,69 | 0,94 | 8,82 |
| | T-13 | 824,27 | 7,15 | 1,55 | 9,42 | 813,77 | 5,75 | 1,35 | 8,29 |
| | T-16 | 593,25 | 8,23 | 1,38 | 10,60 | 542,17 | 6,74 | 1,06 | 9,16 |
| INCONEL 686 | T-3 | 777,25 | 14,54 | 3,28 | 16,41 | 753 | 10,94 | 2,31 | 14,24 |
| | T-6 | 1137,96 | 12,78 | 4,02 | 14,86 | 669,56 | 18,05 | 3,44 | 18,36 |
| | T-9 | 678,00 | 22,50 | 4,24 | 20,34 | 543,54 | 20,19 | 3,16 | 19,11 |
| | T-18 | 596,55 | 21,35 | 3,99 | 19,61 | 512,88 | 24,06 | 3,58 | 22,54 |
| HASTELLOY C-276 | T-2 | 512,89 | 23,33 | 3,37 | 23,24 | 374,73 | 15,43 | 1,68 | 17,01 |
| | T-5 | 904,56 | 15,70 | 4,13 | 17,94 | 841,69 | 6,88 | 1,69 | 10,50 |
| | T-8 | 1463,5 | 7,06 | 2,98 | 11,31 | 1249,81 | 7,05 | 2,53 | 10,09 |
| | T-14 | 1410,85 | 8,96 | 3,18 | 12,61 | 513,64 | 13,53 | 1,98 | 14,55 |
| | T-17 | 593,00 | 23,99 | 3,91 | 22,62 | 585,54 | 15,69 | 2,65 | 18,24 |

Tabela 8: Valores de dureza Vickers dos corpos de prova. Fonte: SILVA (2010).

| | Dureza Vickers (HV) | | | | | | | | | | | | |
|------------|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Amostras | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | T8 | T9 | T10 | T13 | T14 | T16 | T17 | T18 |
| Média (HV) | 253 | 223 | 227 | 230 | 235 | 182 | 228 | 178 | 237 | 246 | 182 | 228 | 216 |
| Desvpad | 35 | 37 | 48 | 32 | 29 | 18 | 26 | 27 | 36 | 32 | 13 | 33 | 31 |

4.2 Ensaio de microabrasão

4.2.1 Preparação para o ensaio

Antes que se inicie o ensaio, é necessária a preparação da máquina, que é iniciada colocando a esfera rotativa em um pequeno recipiente contendo uma mistura de areia e água. A esfera foi agitada por 5 minutos com a finalidade de retirar partículas da sua superfície e eliminar os caminhos preferenciais que podem se formar por repetidos ensaios. Após esse procedimento, a esfera é imersa em acetona e colocada no limpador ultrassônico por 10 minutos e depois secada por um secador comum.

A esfera é posicionada no eixo do equipamento de microabrasão e presa no mesmo. A amostra foi colocada no porta amostras e nivelada através de peso morto, após esse procedimento, a carga desejada é colocada no suporte para cargas. A mangueira para transporte da lama abrasiva é posicionada em seu devido lugar, a lama abrasiva é colocada em um pote, onde é inserido um imã, esse pote fica sobre um misturador magnético que irá misturar a lama constantemente em todo o tempo de ensaio evitando que ocorra a decantação do abrasivo. A lama abrasiva é bombeada para o contato entre a amostra e a esfera rotativa através de uma bomba peristáltica passando essa lama pela mangueira. Para o início do teste, a velocidade angular da esfera é configurada no software que comanda a máquina, assim como o número de rotações desejadas.

4.2.2 Escolha dos parâmetros do teste e cálculo do volume desgastado e coeficiente de desgaste

O equipamento utilizado para os testes foi o TE 66 Microscale Abrasion Test (Plint and Partners, Wokinghan, UK). Essa máquina é configurada para trabalhar no modo esfera fixa. Essa configuração leva a uma maior precisão no controle da carga normal.

Os parâmetros selecionados foram retirados do manual (GEE et al., 2002). Nesse trabalho, o desgaste a dois corpos (riscamento) foi reproduzido em todas as

amostras para que se pudesse compará-las com o mesmo modo de desgaste. A velocidade de rotação da esfera foi de 80 rpm. A tendência do volume desgastado é ser linear com o aumento do número de revoluções e o coeficiente de desgaste K tenderá a um regime permanente, que foi considerado, como sendo atingido, a um coeficiente de variação (razão entre o desvio padrão e a média) menor que 7%.

Após atingido o regime permanente, foram retirados 4 pontos para o cálculo do coeficiente de desgaste, e para cada amostra foram feitos 3 ensaios de desgaste. A figura 21 ilustra o regime permanente atingido para a taxa de desgaste em função do número de rotações.

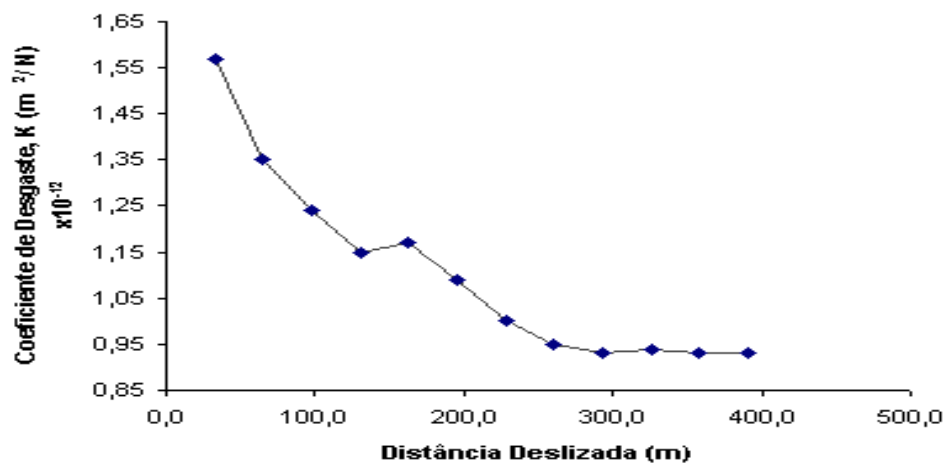


Figura 21: Progressão do coeficiente de desgaste até alcançar a estabilidade. Fonte: MELADO (2011).

Para que fosse atingido o mecanismo de desgaste a dois corpos, a carga normal e a concentração do abrasivo para os ensaios foram baseadas na figura 22 abaixo. O ponto onde se encontra os parâmetros do ensaio está marcado em azul:

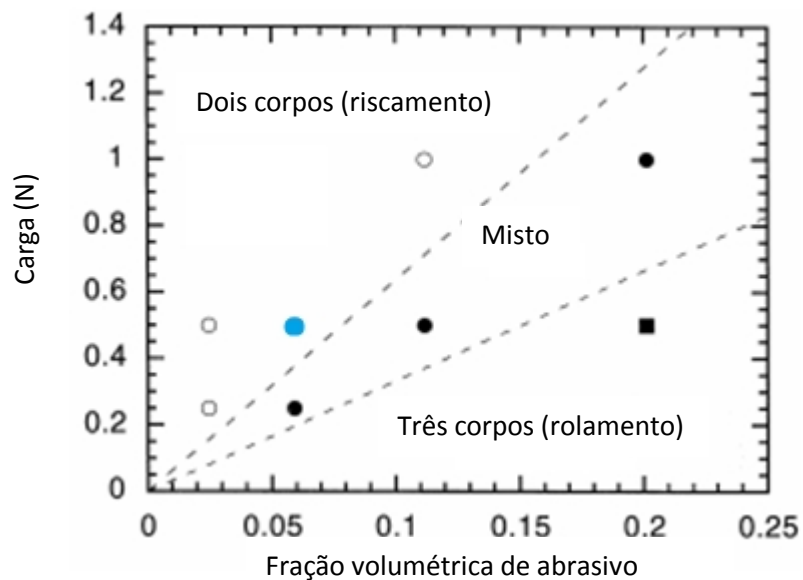


Figura 22: Mapa dos mecanismos de desgaste para microabrasão para uma calota de esfera para aço ferramenta para uma mistura abrasiva de alumina F1200. Fonte: TREZONA (1999).

Foi utilizado uma carga normal de 0,5N, concentração do abrasivo de 6,4g de abrasivo para 100ml de água, que foram medidos, respectivamente, por uma balança de precisão e um recipiente graduado em mililitros, o abrasivo utilizado foi a Sílica (SiO_2) com dureza média de 1200HV e tamanho médio de $5\mu\text{m}$, velocidade de rotação de 80rpm e uma vazão de 1g/min.

Inicialmente foi feito o teste para verificar o regime permanente do coeficiente de desgaste uma amostra de cada liga. Esse teste foi iniciado com 1000 rotações acumuladas e foi variando de 500 em 500 rotações até 6000 rotações. Foi verificado que um intervalo de regime permanente em comum das ligas estava compreendido no intervalo de 3500, 4000, 4500 e 5000 rotações, que obedeceu ao requisito de coeficiente de variação menor do que 7% e foi utilizado para as demais amostras.

O volume desgastado pode ser calculado pela medição do diâmetro da cratera e sua profundidade. (TREZONA; ALLSOPP; HUTCHINGS, 1999). Através da equação:

$$V = \frac{\pi b^4}{64R}$$

Onde b será o raio da calota esférica de desgaste formada na amostra e R o raio da esfera. Essa relação é válida quando $b \ll R$.

Para o coeficiente de desgaste, a lei de Archard é seguida, onde o volume de material removido seria $V = K \cdot S \cdot N$, onde K é uma constante relacionada ao desgaste, S é a distância deslizada e N é a carga normal. Em alguns casos, há forte dependência da taxa de desgaste com o número de revoluções e a distância deslizada.

Assim, seguindo a Lei de Archard, a taxa de desgaste K será:

$$K = \frac{\pi b^4}{64R} \cdot \frac{1}{SN} \quad (3)$$

4.2.3 Perfilometria de contato, microscopia e microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Concluído os ensaios, as amostras foram levadas até o perfilômetro Talysurf CLI 1000 (figura 24), no Laboratório de Caracterização de Superfícies de Materiais (LCSM) da UFES, onde foram retiradas as topografias das amostras, através de medição de contato, para posteriormente calcular seu volume, com o software presente nessa máquina, e seu coeficiente de desgaste, através da equação e (3). Um exemplo está na figura 24, onde foram retirados o perfil completo da amostra 3, demonstrado o perfil do centro e calculado o volume.

Para microscopia ótica, ao término de cada quantidade de rotações desejadas, foi retirada uma foto da cratera pelo microscópio ótica da máquina e a medida do raio da cratera é feita no software da máquina.

A medição feita no software não estava correta, tinha uma defasagem com o valor real, portanto, foi feita uma calibração utilizando uma escala padrão e foi estabelecido um coeficiente de correção de 3,4 que foi multiplicado pelo valor raio medido pela microscopia ótica para obter o valor real do raio da cratera.

Foram retiradas as medidas das crateras nas rotações completas de 3500, 4000, 4500, 5000, para posteriormente calcular o volume desgastado e o coeficiente de desgaste através das equações (2) e (3). Os valores de coeficiente de desgaste calculados pela perfilometria de contato e pela microscopia ótica serão comparados.

Foram feitas imagens das amostras no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) do Laboratório de Caracterização de Superfícies e Materiais (LCSM) da UFES. Essas imagens foram feitas nas crateras após 5000 rotações. Todas as imagens foram feitas no modo de elétrons secundários I com aproximação da região central e adjacências a esta e as ampliações foram de 80, 200, 1000 e 2000X.

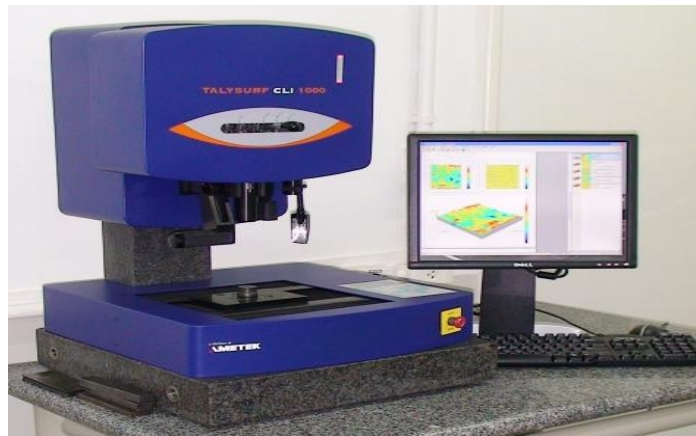


Figura 23: Perfilômetro Talysurf CLI 1000 – 3D Surface profiling Systems do fabricante Taylor Hobson Precision.

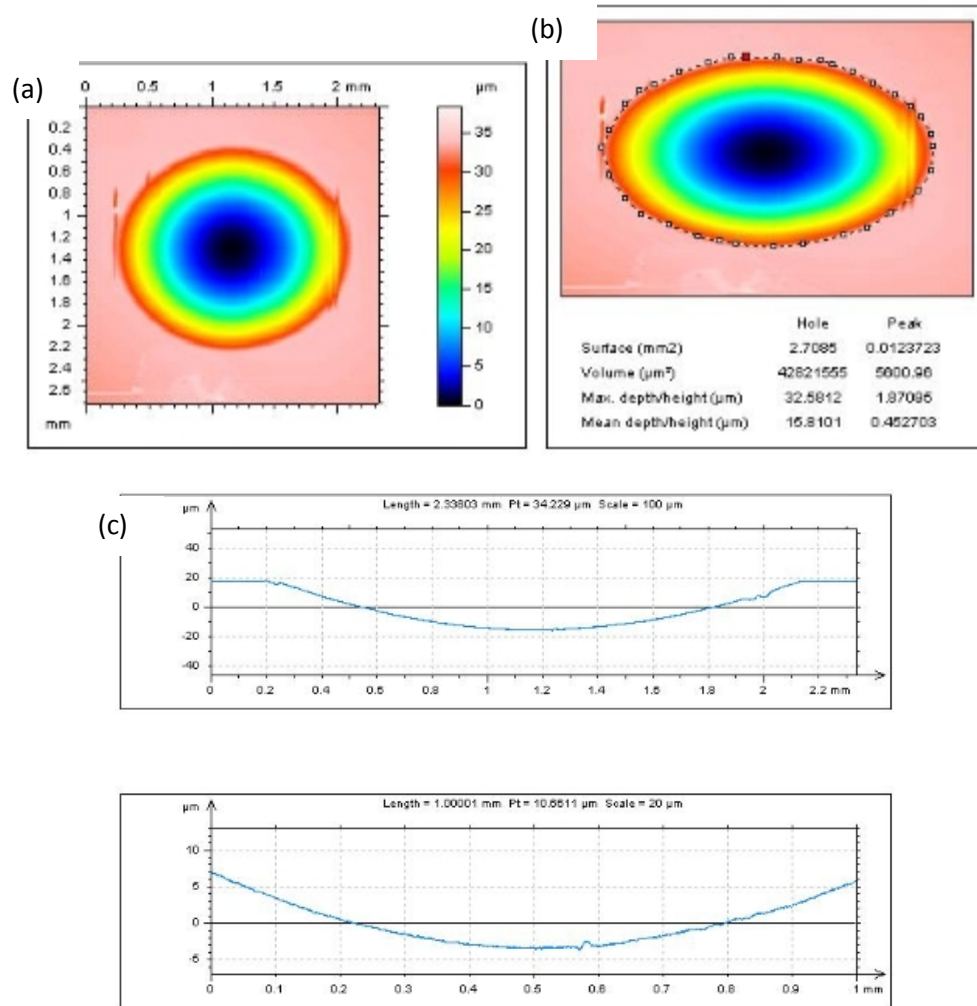


Figura 24: Amostra T3 (a) Perfilometria; (b) Cálculo do volume pelo software; (c) Perfis do centro da cratera.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resultados

Os gráficos e tabelas que mostram a progressão do volume desgastado e do coeficiente de desgaste calculados através das medições de microscopia ótica e as tabelas com os valores dos coeficientes de desgaste calculados à partir dos volumes medidos por perfilometria de contato estão presentes no anexo I.

Com esses valores foi montada a tabela 9, que representa os valores de volume desgastado acumulado calculado pelas medições dos raios das crateras através da microscopia ótica e medidos na perfilometria de contato e também os valores do coeficiente de determinação (R^2) indicando a linearidade do gráfico do volume desgastado calculado pelos valores de microscopia ótica e os valores do coeficiente de variação, e a tabela 10 que apresenta os valores de coeficiente de desgaste médio calculados pela microscopia ótica e perfilometria de contato.

Tabela 9: Valores referentes aos volumes desgastados calculados pela medição dos raios das crateras através de microscopia ótica e medidos por perfilometria de contato, coeficiente de determinação e coeficiente de variação.

| | Volume desgastado (microscopia ótica) (m^3) $\times 10^{11}$ | Desvio padrão do volume desgastado (microscopia ótica) (m^3) $\times 10^{11}$ | Volume desgastado (perfilometria de contato) (m^3) $\times 10^{11}$ | Desvio padrão do volume desgastado (perfilometria de contato) (m^3) $\times 10^{11}$ | Coeficiente de determinação (R^2) | Coeficiente de variação (%) |
|-----|---|--|--|---|---------------------------------------|-----------------------------|
| T2 | 5,36 | 0,11 | 3,95 | 0,84 | 0,9621 | 6,8 |
| T3 | 5,80 | 0,50 | 3,4 | 0,71 | 0,99 | 4,8 |
| T4 | 7,15 | 0,21 | 4,74 | 0,32 | 0,99 | 5,8 |
| T5 | 7,12 | 0,88 | 4,42 | 1,12 | 0,9791 | 6,9 |
| T6 | 6,31 | 1,66 | 3,53 | 0,85 | 0,9999 | 2,7 |
| T8 | 6,15 | 1,33 | 3,95 | 1,00 | 0,9801 | 4,7 |
| T10 | 7,61 | 1,80 | 4,39 | 0,89 | 0,9862 | 6,5 |
| T13 | 6,34 | 2,51 | 3,07 | 0,16 | 0,9996 | 6,2 |
| T14 | 3,68 | 1,51 | 1,68 | 0,62 | 0,9746 | 6,1 |
| T16 | 7,20 | 0,53 | 3,80 | 0,46 | 0,9918 | 3,5 |
| T17 | 6,07 | 0,75 | 3,71 | 0,81 | 0,9804 | 4,8 |
| T18 | 4,26 | 0,79 | 2,29 | 0,47 | 0,9971 | 6,3 |

Tabela 10: Valores do coeficiente de desgaste calculados pela equação (3) para microscopia ótica e perfilometria de contato.

| | Microscopia ótica $K(m^3/N.m) \times 10^{13}$ | | Perfilometria de contato $K(m^3/N.m) \times 10^{13}$ | |
|-----|---|---------------|--|---------------|
| | Média | Desvio Padrão | Média | Desvio Padrão |
| T2 | 2,89 | 0,2 | 1,53 | 0,42 |
| T3 | 3,08 | 0,15 | 1,74 | 0,36 |
| T4 | 3,84 | 0,23 | 2,37 | 0,16 |
| T5 | 3,80 | 0,26 | 2,22 | 0,56 |
| T6 | 3,26 | 0,89 | 1,77 | 0,43 |
| T8 | 3,28 | 0,16 | 1,98 | 0,50 |
| T10 | 4,13 | 0,27 | 2,20 | 0,44 |
| T13 | 3,39 | 0,21 | 1,54 | 0,80 |
| T14 | 1,99 | 0,12 | 0,84 | 0,31 |
| T16 | 3,76 | 0,13 | 1,90 | 0,23 |
| T17 | 3,25 | 0,16 | 1,86 | 0,41 |
| T18 | 2,30 | 0,15 | 1,15 | 0,23 |

Podemos observar pela tabela 9 que todas as amostras obtiveram uma boa linearidade representado pelo coeficiente de determinação (R^2) próximo de 1 e que todas atingiram um coeficiente de variação menor do que 7%.

5.2 Verificação do modo de desgaste

Para verificação do modo de desgaste, foram feitas imagens de MEV de uma cratera selecionada para cada amostra.

Amostra T2

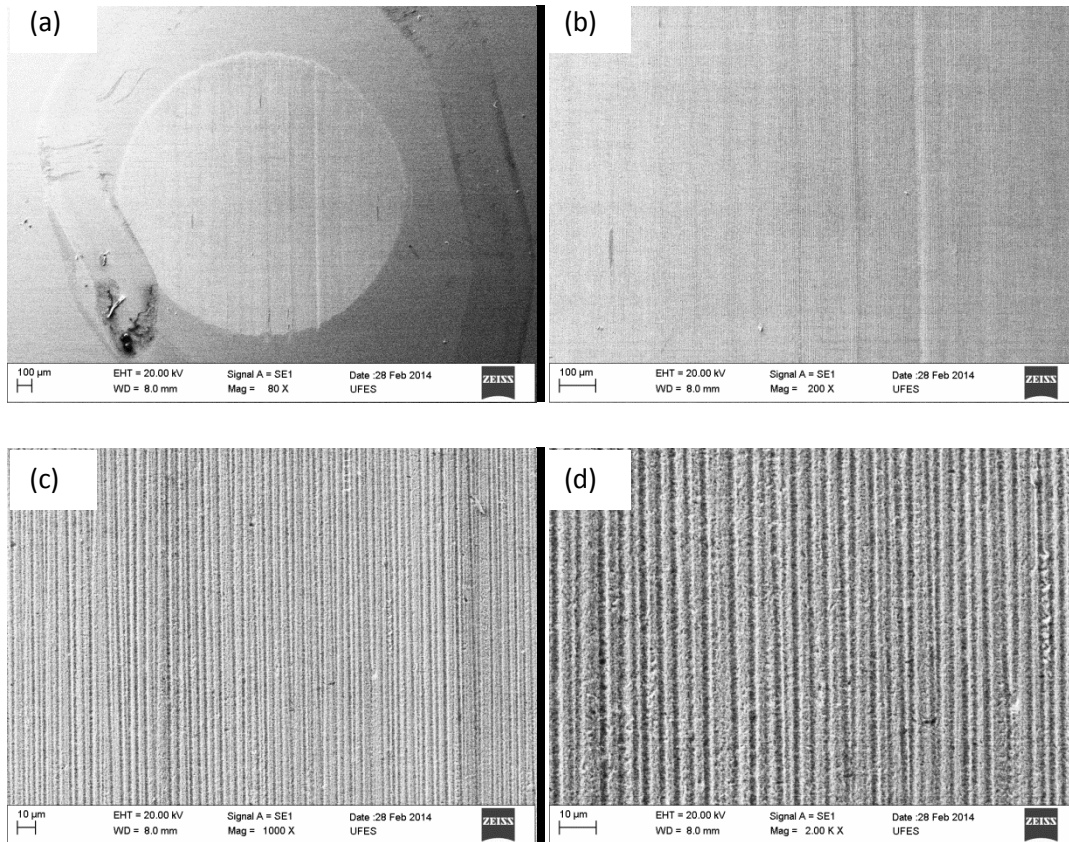


Figura 25: Amostra 2 com 5000 revoluções acumuladas em um aumento de (a) 80X; (b) 200X; (c) 1000X e (d) 2000X.

Amostra T3

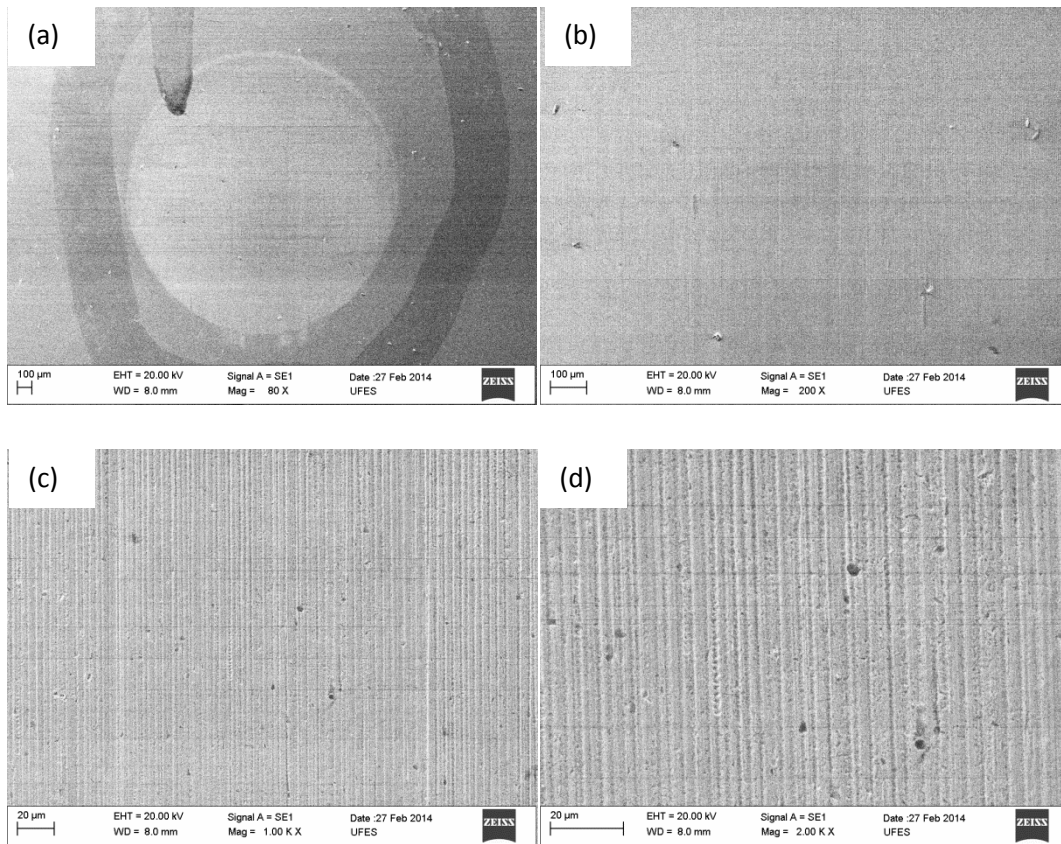


Figura 26: Amostra 3 com 5000 revoluções acumuladas em um aumento de (a) 80X; (b)200X; (c) 1000X e (d) 2000X.

Amostra T4

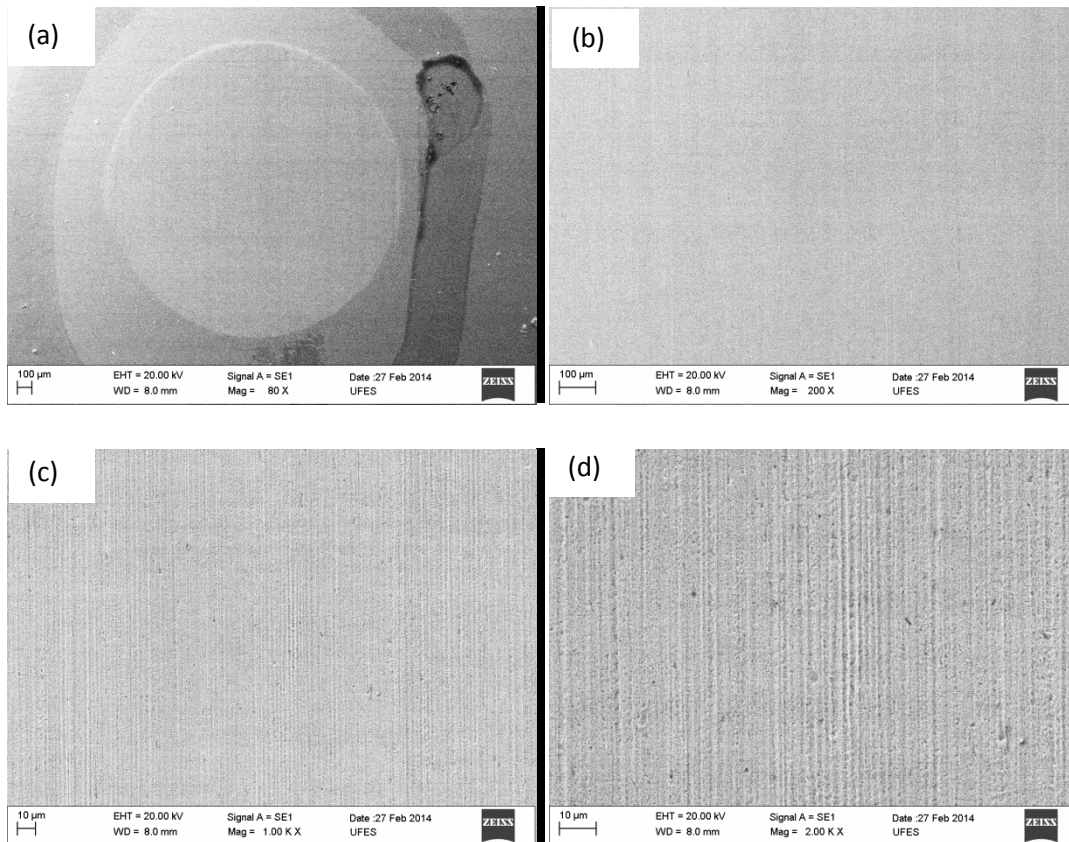


Figura 27: Amostra 4 com 5000 revoluções acumuladas em um aumento de (a) 80X; (b)200X; (c) 1000X e (d) 2000X.

Amostra T5

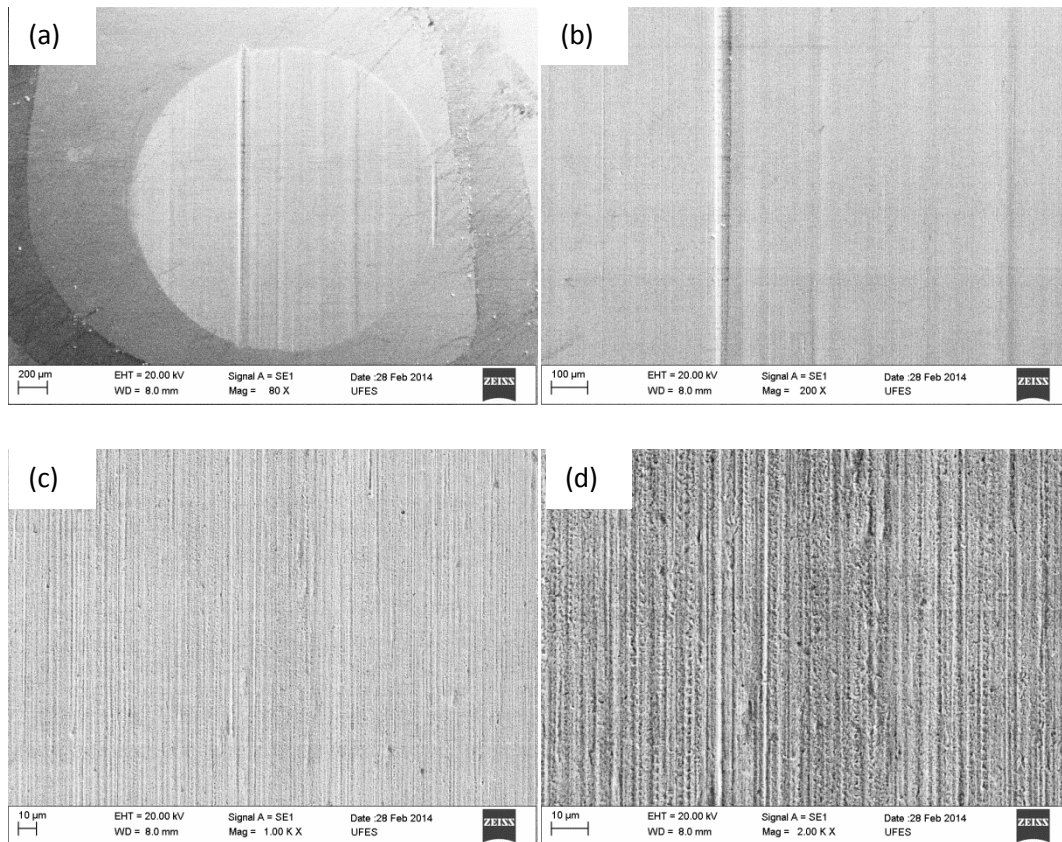


Figura 28: Amostra 5 com 5000 revoluções acumuladas em um aumento de (a) 80X; (b)200X; (c) 1000X e (d) 2000X.

Amostra T6

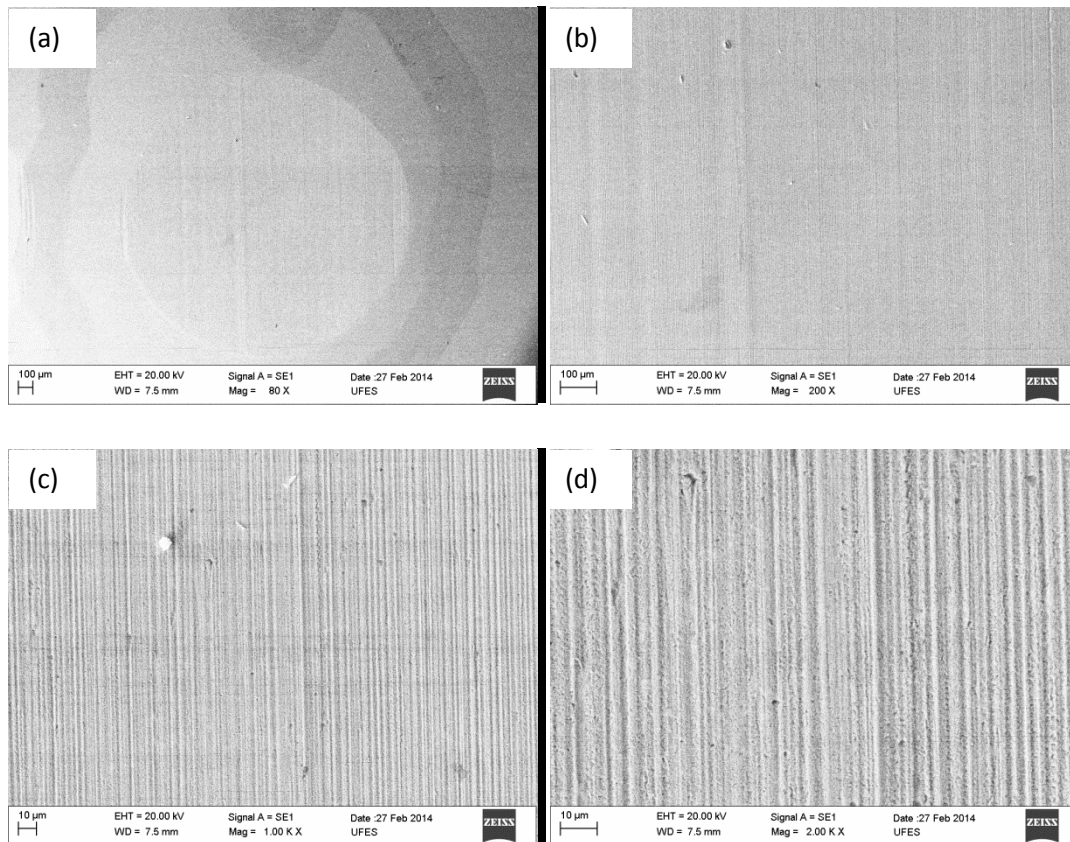


Figura 29: Amostra 6 com 5000 revoluções acumuladas em um aumento de (a) 80X; (b) 200X; (c) 1000X e (d) 2000X.

Amostra T8

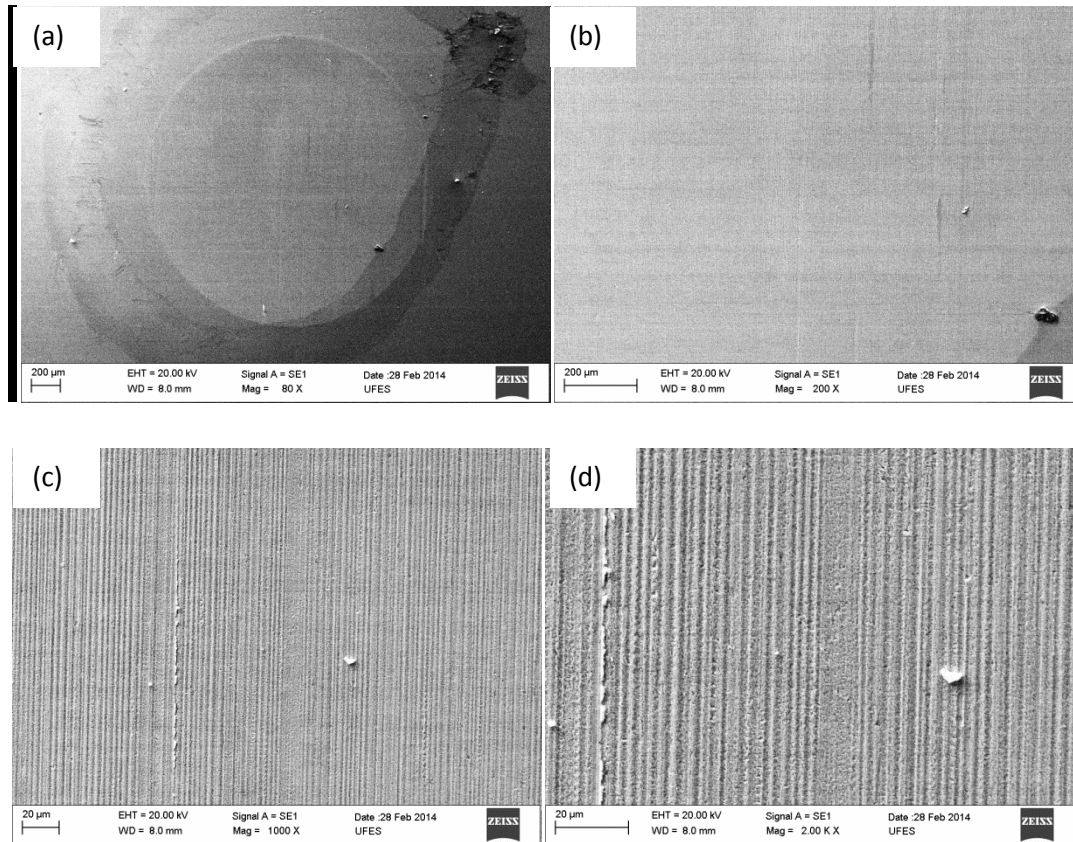


Figura 30: Amostra 8 com 5000 revoluções acumuladas em um aumento de (a) 80X; (b) 200X; (c) 1000X e (d) 2000X.

Amostra T10

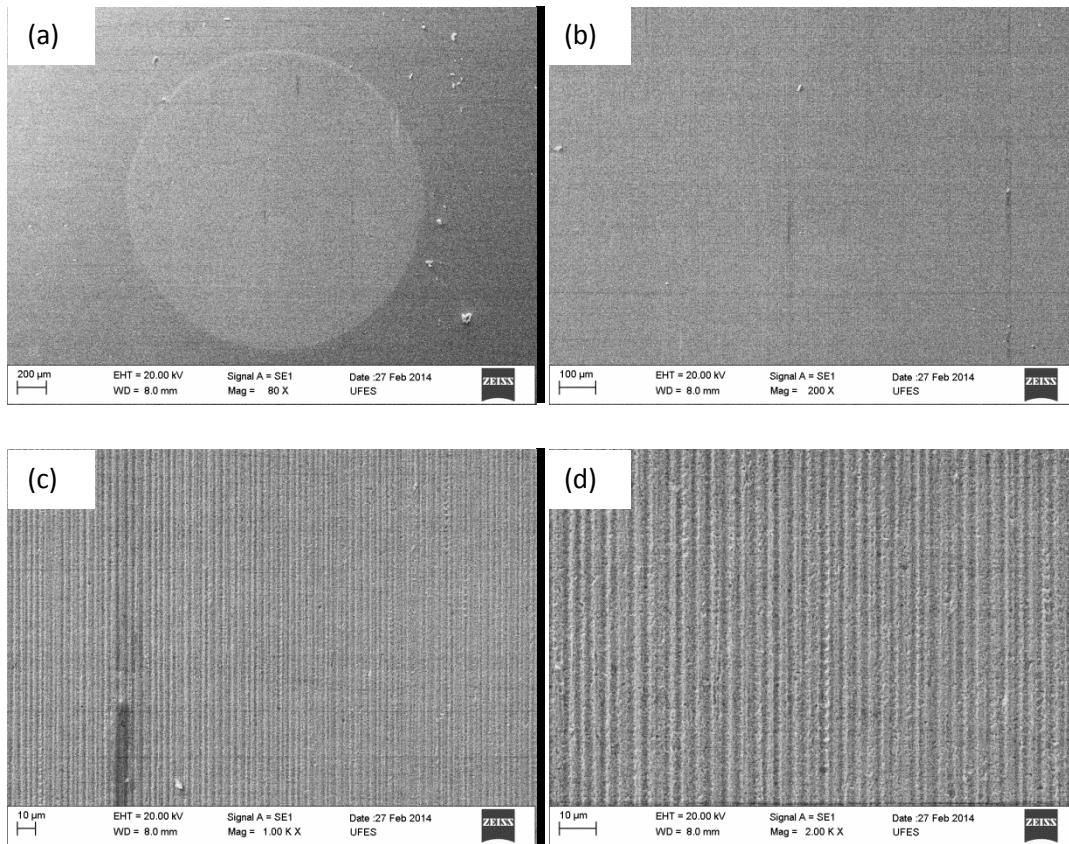


Figura 31: Amostra 10 com 5000 revoluções acumuladas em um aumento de (a) 80X; (b)200X; (c) 1000X e (d) 2000X.

Amostra T13

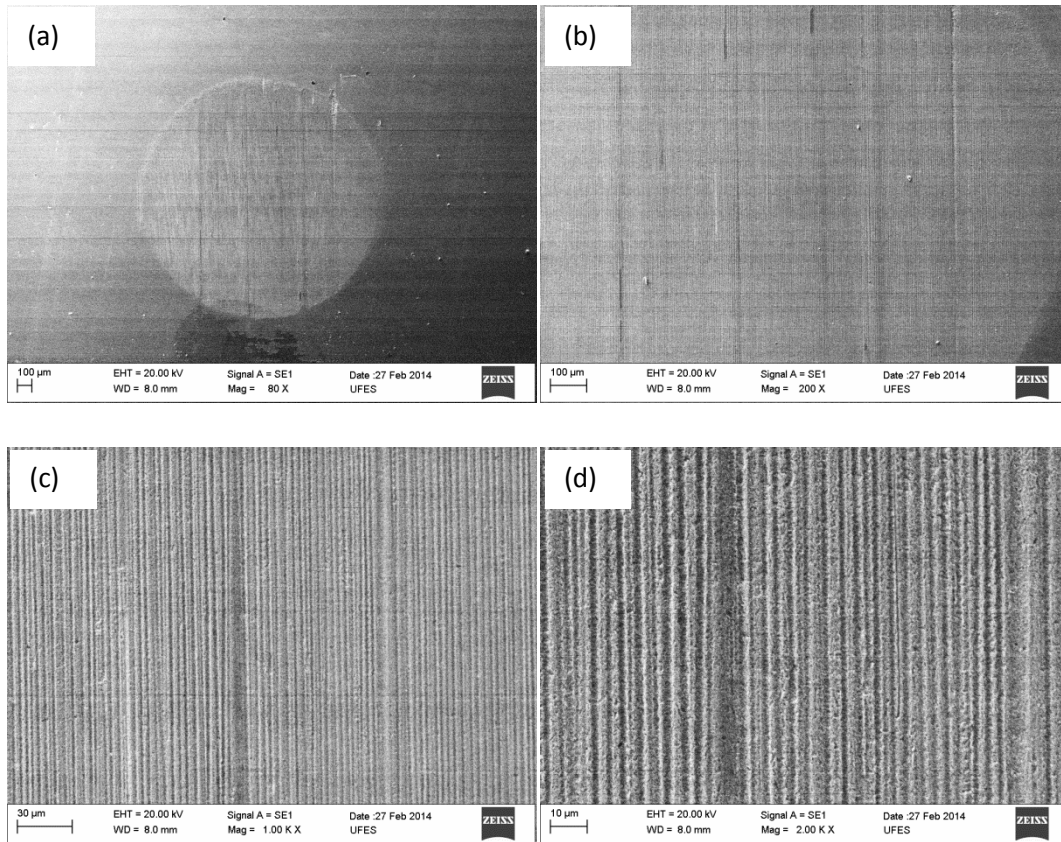


Figura 32: Amostra 13 com 5000 revoluções acumuladas em um aumento de (a) 80X; (b) 200X; (c) 1000X e (d) 2000X.

Amostra T14

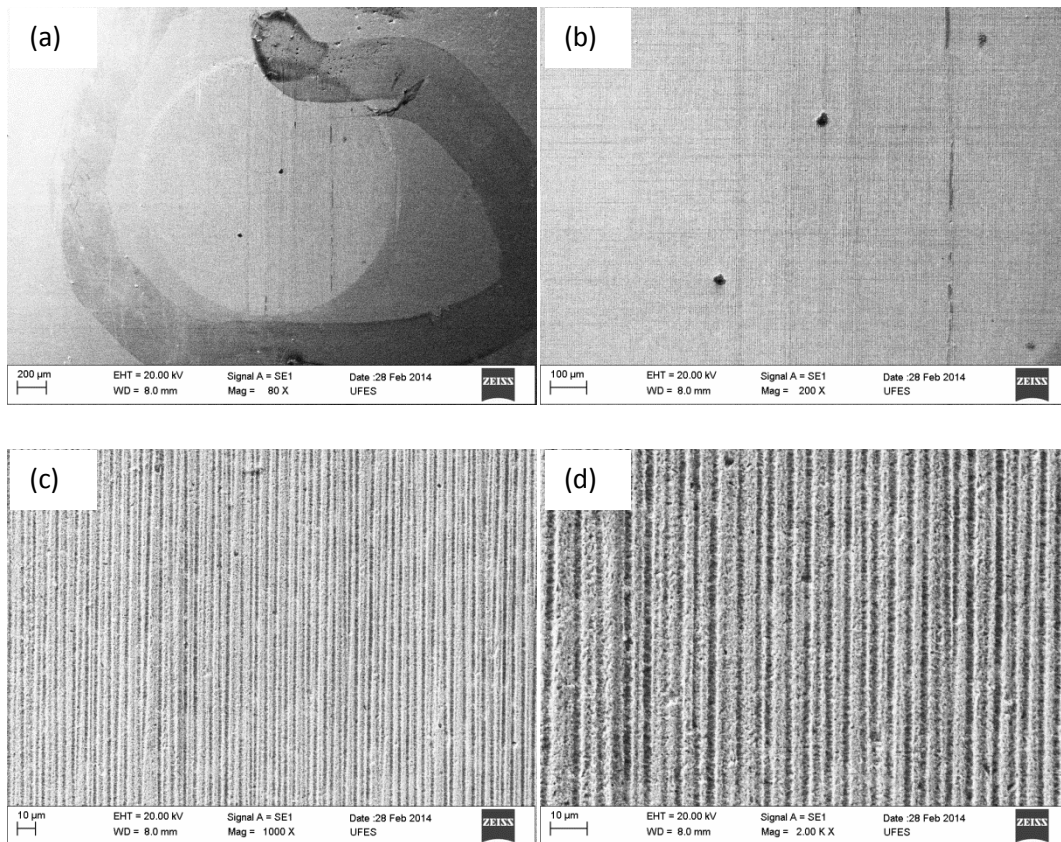


Figura 33: Amostra 14 com 5000 revoluções acumuladas em um aumento de (a) 80X; (b) 200X; (c) 1000X e (d) 2000X.

Amostra T16

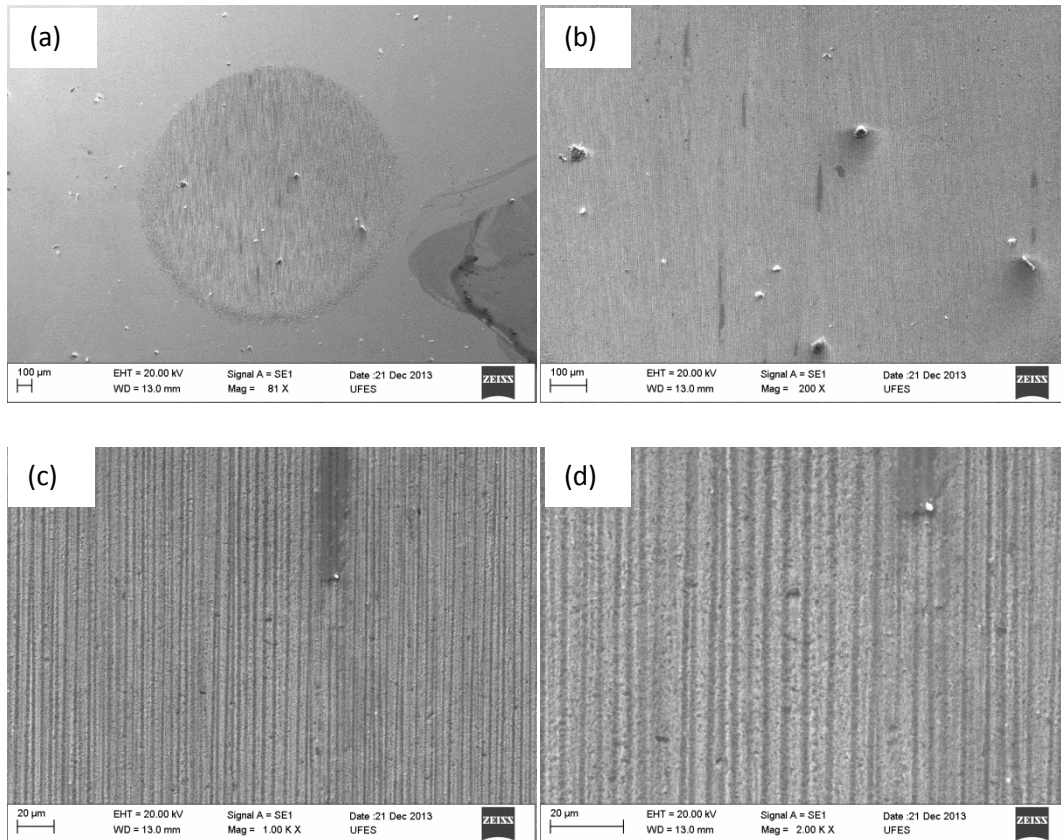


Figura 34: Amostra 16 com 5000 revoluções acumuladas em um aumento de (a) 80X; (b) 200X; (c) 1000X e (d) 2000X.

Amostra T17

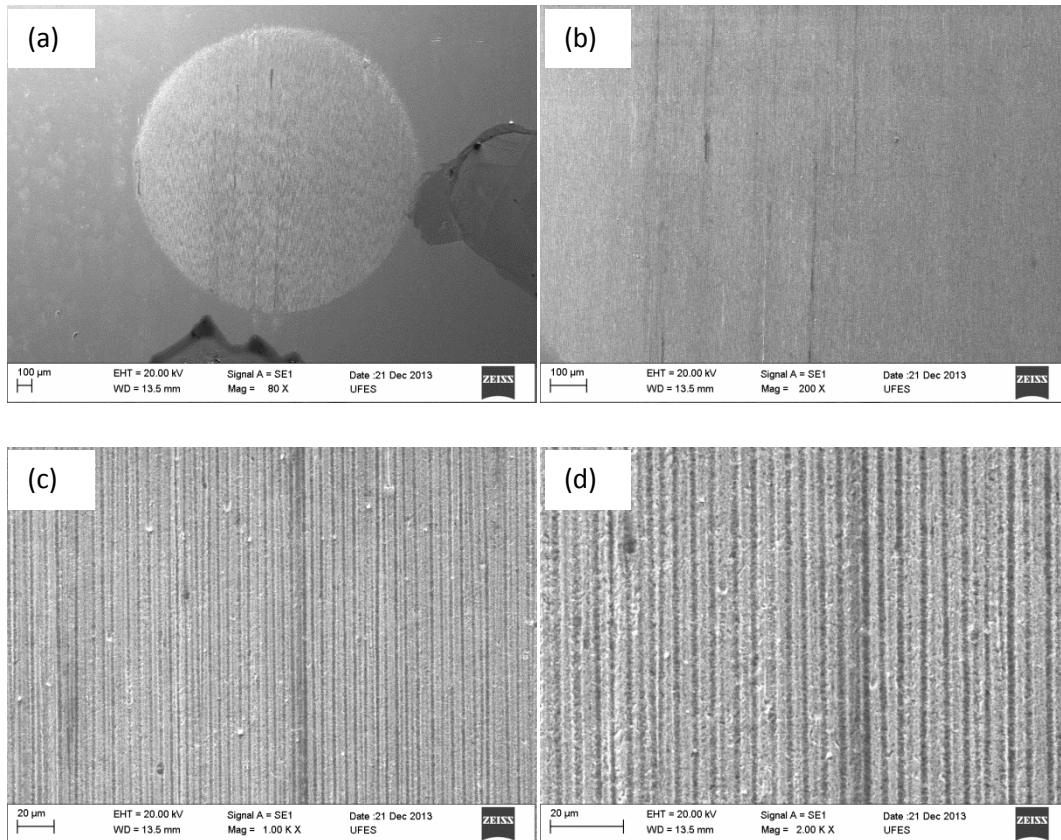


Figura 35: Amostra 17 com 5000 revoluções acumuladas em um aumento de (a) 80X; (b) 200X; (c) 1000X e (d) 2000X.

Amostra T18

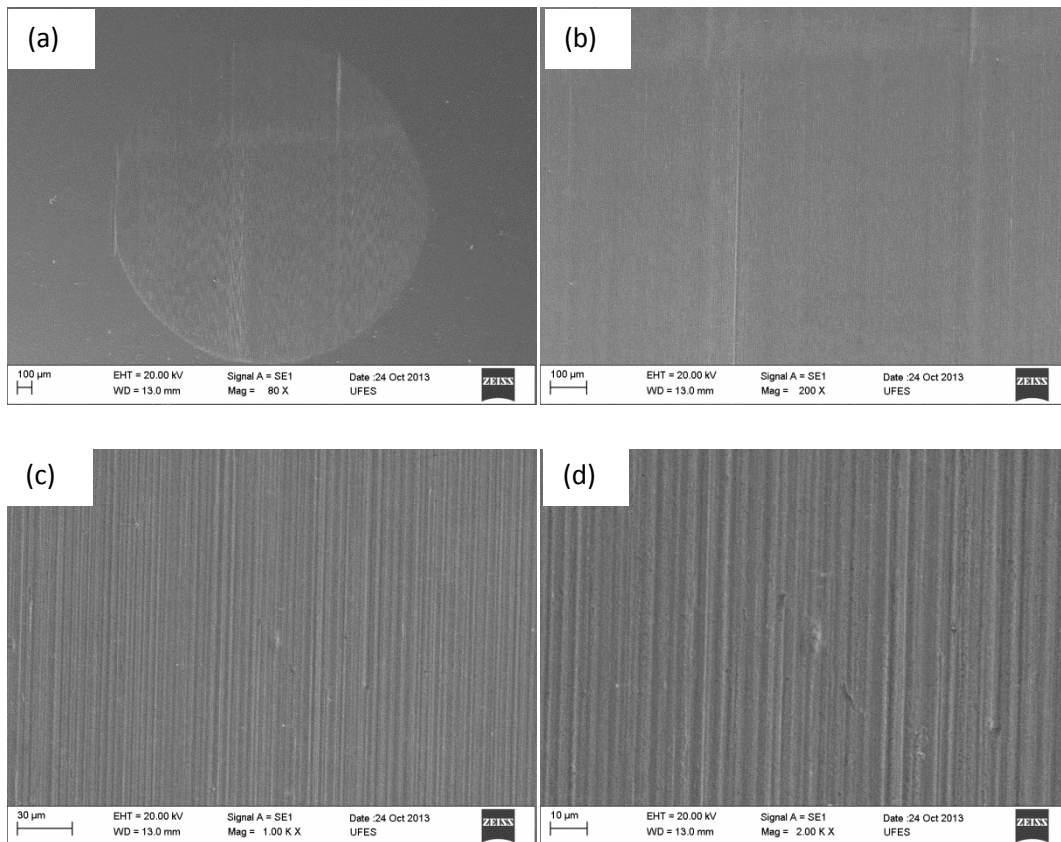


Figura 36: Amostra 18 com 5000 revoluções acumuladas em um aumento de (a) 80X; (b) 200X; (c) 1000X e (d) 2000X.

5.3 Discussão

A partir da tabela 10 foi feita a figura 37. O resultado medido pela perfilometria de contato pode ser considerado real, pois ela faz uma varredura de toda a superfície expondo resultados mais corretos no que se refere ao volume desgastado da cratera. O método da microscopia ótica fornece apenas valores para que o volume possa ser calculado.

A amostra que obteve o menor coeficiente de desgaste foi a amostra T14 da liga Hastelloy C276. Essa amostra, dentre as amostras de Hastelloy C276, foi a terceira que obteve a menor fração de precipitados pela área total, no último cordão de solda, mas ainda assim, em quantidades maiores do que a liga 625 que obteve as amostras com maiores coeficientes de desgaste, sendo a amostra T4 com o maior

entre todas. A amostra T4 chegou a uma quantidade de precipitados formados próximo do valor da amostra T14. Uma amostra que demonstrou um bom valor de coeficiente de desgaste foi a amostra T18 da liga 686, que apresentou valores próximos ao da amostra T14, mas, com maior fração de precipitados pela área total dentre todas as amostras.

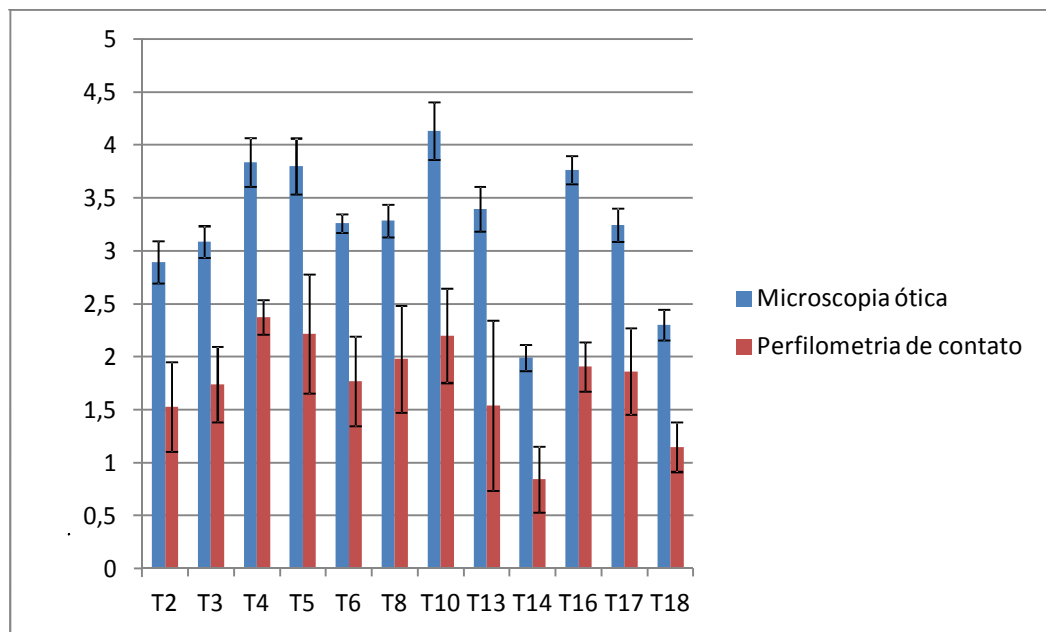


Figura 37: Gráfico feito a partir da tabela 33 com o comparativo entre os valores de coeficiente de desgaste para a microscopia ótica e perfilometria de contato.

Fazendo uma comparação entre as ligas, foi tirado a média e o desvio padrão dos coeficientes de desgaste de todas as amostras e montado a para cada liga a tabela 11. Para melhor visualizar a tabela 11 abaixo, foi criado a figura 38.

Neste gráfico, podemos observar que, no geral, as três ligas possuem coeficientes de desgaste iguais estatisticamente.

Tabela 11: Comparativo entre os coeficientes de desgaste calculados pela microscopia ótica e pela perfilometria de contato para cada liga.

| | Microscopia ótica $K(m^3/N.m) \times 10^{13}$ | | Perfilometria de contato $K(m^3/N.m) \times 10^{13}$ | |
|----------------|---|---------------|--|---------------|
| | Média | Desvio Padrão | Média | Desvio Padrão |
| Inconel 625 | 3,78 | 0,30 | 2,00 | 0,37 |
| Inconel 686 | 2,88 | 0,51 | 1,55 | 0,35 |
| Hastelloy C276 | 3,04 | 0,67 | 1,69 | 0,53 |

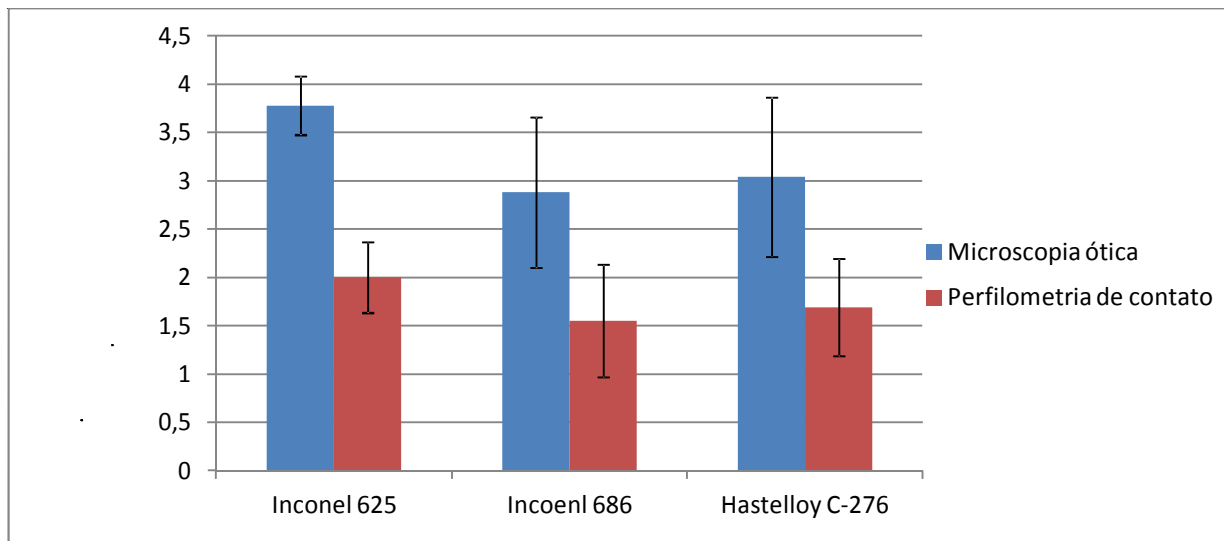


Figura 38: Gráfico montado com os valores da tabela 11.

Podemos verificar também, através das imagens de MEV, que o modo de desgaste predominante em todas as amostras foi o riscamento. Todas obtiveram um bom comportamento quanto ao ensaio, no que diz respeito ao modo de desgaste, mas, na amostra T5 figura 28 (a) e (b) e na amostra T13 figura 32 (c) e (d), podemos verificar um sulco maior na amostra, que pode ser um caminho preferencial para a passagem do abrasivo que foi formado durante o ensaio.

6 CONCLUSÃO

- 1) Houve a tendência a ter menor coeficiente de desgaste foi a T14 da liga C276 e a que obteve maior tendência a ter maior coeficiente de desgaste ficou com a amostra T4 da liga 625.
- 2) Dentre as ligas, podemos concluir que seus coeficientes de desgaste são próximos.
- 3) Não podemos relacionar resistência ao desgaste com a dureza média da matriz que está em torno de 200 a 300 HV com a dureza do abrasivo que foi a sílica (SiO_2) é em média 1200 HV, pois a diferença é muito grande. Não foi obtida relação de resistência ao desgaste com a quantidade de segundas fases precipitadas devido a amostra que demonstrou menor coeficiente de desgaste (T14) não ser uma das que possuem maior fração de precipitados pela área total.
- 4) Os resultados indicados pela perfilometria são mais confiáveis do que os da microscopia, pois a perfilometria faz uma varredura física da superfície obtendo valores mais reais de volume da cratera.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS.

- 1) Avaliar o comportamento das ligas para a condição de desgaste abrasivo a três corpos (rolamento).
- 2) Variar os parâmetros como: carga normal, concentração do abrasivo, velocidade de rotação, tipo de abrasivo, para testar a resposta das ligas de acordo com a severidade do desgaste imposta no ensaio.

8 BIBLIOGRAFIA

CALLISTER JUNIOR, Willian D.. **Ciência e Engenharia de Materiais, uma Introdução**. 5. ed. Salt Lake City: Ltc, 1999.

DAVIS, Joseph R.. **ASM - Speciality Handbook: Heat-Resistant Materials**. 1997. 591 p.

GEE, M G et al. **Ball cratering or micro-abrasion wear testing of coatings: Measurement Good Practice Guide No. 57**, 2002.

GRAF, Karin. **Estabilidade a alta temperatura de Hastelloy C depositados por PTA**. 2004. 101 f. Tese (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Parana, Curitiba, 2004.

HENRIQUE, Gustavo Espoti. **Desgaste abrasivo de revestimento de superligas a base de níquel**. 2009. 103 f. Tese (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. London: Edward Arnold, 1992.

MELADO, A. C. **Influência dos parâmetros de Nitretação a Plasma na resistência ao Desgaste Microabrasivo do Aço Ferramenta AISI H13**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Vitória, 2011.

POLLOCK, Tresa M.; TIN, Sammy. **Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure, and Properties**. Michigan: 2006.

SILVA, Cleiton Carvalho. **Revestimentos de liga de níquel depositados pelo processo TIG com alimentação de arame frio - aspectos operacionais e metalúrgicos**. 2010. 325 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Ciências dos Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

STACHOWIAK, G.b.; STACHOWIAK, G.w.; CELLIERS, O.. **Ball-cratering abrasion tests of high-Cr white cast irons**. Western Australia: 2005.

TREZONA, R. I.; ALLSOPP, D. N.; HUTCHINGS I.M. **Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test.** Wear v.225–229, p.205–214, 1999.

ZUM-GAHR, K. **Microstructure and Wear of Materials.** Amsterdam: Elsevier, 1987.

9 ANEXOS

9.1 Anexo I: Resultados obtidos para o volume desgastado e coeficiente de desgaste para microscopia ótica e coeficiente de desgaste para perfilometria de contato para cada amostra.

9.1.1 Inconel 625

Amostra T4

Tabela 12: Média aritmética e desvio padrão dos volumes desgastados e dos coeficientes de desgaste calculados pelas equações (2) e (3), com base nos valores de diâmetro obtidos pela microscopia ótica.

| Número de revoluções | Distância deslizada S(m) | Média dos volumes desgastados $V (m^3) \times 10^{11}$ | Desvio padrão dos volumes desgastados $(m^3) \times 10^{11}$ | Média dos coeficientes de desgaste k $(m^3/N.m) \times 10^{13}$ | Desvio padrão dos coeficientes de desgaste $(m^3/N.m) \times 10^{13}$ |
|----------------------|--------------------------|--|--|---|---|
| 3500 | 279,29 | 5,74 | 0,28 | 4,12 | 0,20 |
| 4000 | 319,19 | 6,24 | 0,29 | 3,91 | 0,19 |
| 4500 | 359,08 | 6,71 | 0,16 | 3,74 | 0,09 |
| 5000 | 398,98 | 7,15 | 0,21 | 3,58 | 0,11 |

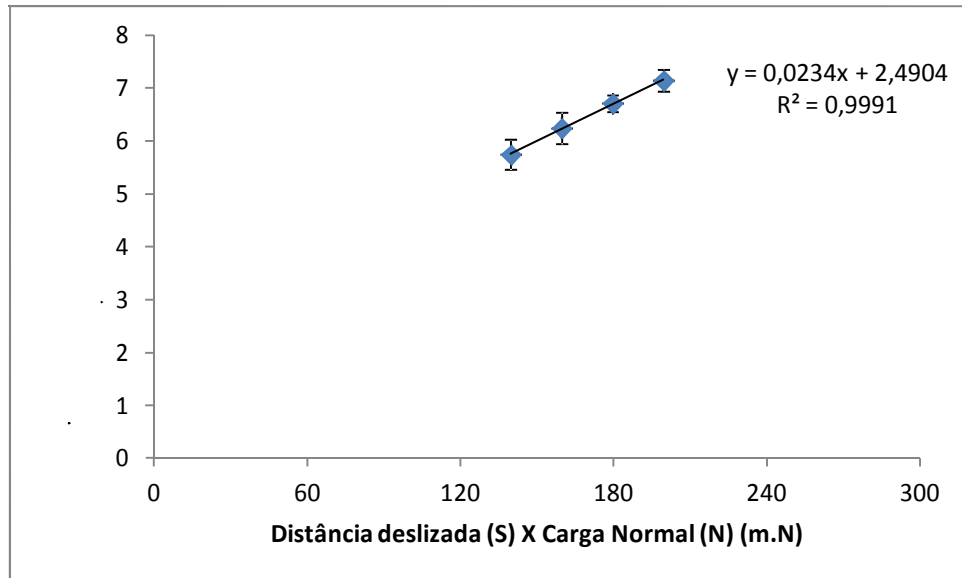


Figura 39: Relação do produto da distância deslizada com a carga normal pelo volume desgastado.

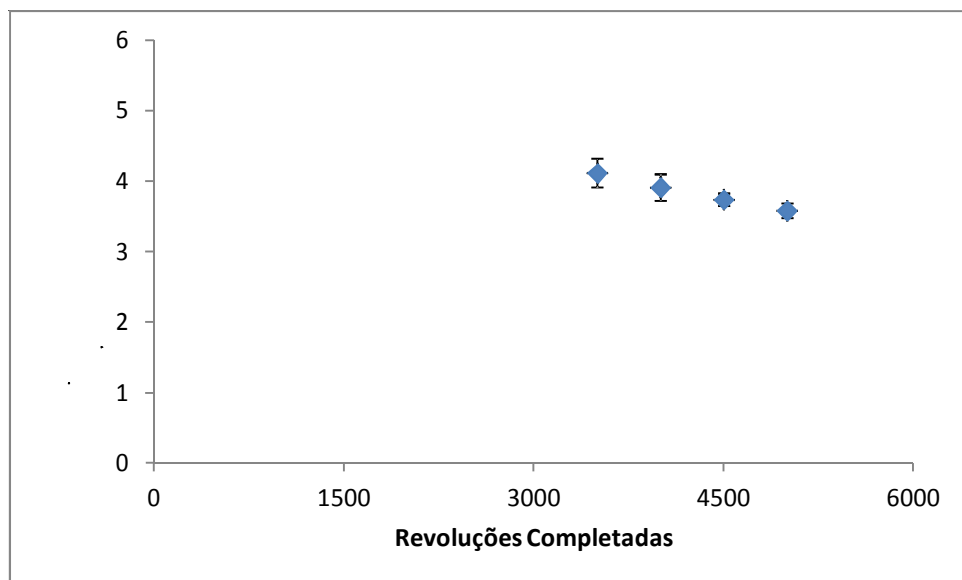


Figura 40: Relação das revoluções completadas pelo coeficiente de desgaste.

Tabela 13: Volumes desgastados de cada calota medidos por perfilometria de contato e coeficiente de desgaste calculado pela equação (3) e suas respectivas médias e desvio padrão.

| Calota | Volume desgastado (m ³)x10 ¹¹ | Coeficiente de desgaste (m ³ /N.m)x10 ¹³ |
|---------------|---|---|
| 1 | 4,87 | 2,44 |
| 2 | 4,37 | 2,19 |
| 3 | 4,97 | 2,49 |
| Média | 4,74 | 2,37 |
| Desvio Padrão | 0,32 | 0,16 |

Amostra T10

Tabela 14: Média aritmética e desvio padrão dos volumes desgastados e dos coeficientes de desgaste calculados pelas equações (2) e (3), com base nos valores de diâmetro obtidos pela microscopia ótica.

| Número de revoluções | Distância deslizada S(m) | Média dos volumes desgastados V (m ³)x10 ¹¹ | Desvio padrão dos volumes desgastados (m ³)x10 ¹¹ | Média dos coeficientes de desgaste k (m ³ /N.m)x10 ¹³ | Desvio padrão dos coeficientes de desgaste (m ³ /N.m)x10 ¹³ |
|----------------------|-----------------------------|---|---|--|--|
| 3500 | 279,29 | 6,18 | 1,58 | 4,43 | 1,13 |
| 4000 | 319,19 | 6,80 | 1,60 | 4,26 | 1,00 |
| 4500 | 359,08 | 7,22 | 1,79 | 4,02 | 0,99 |
| 5000 | 398,98 | 7,61 | 1,80 | 3,81 | 0,90 |

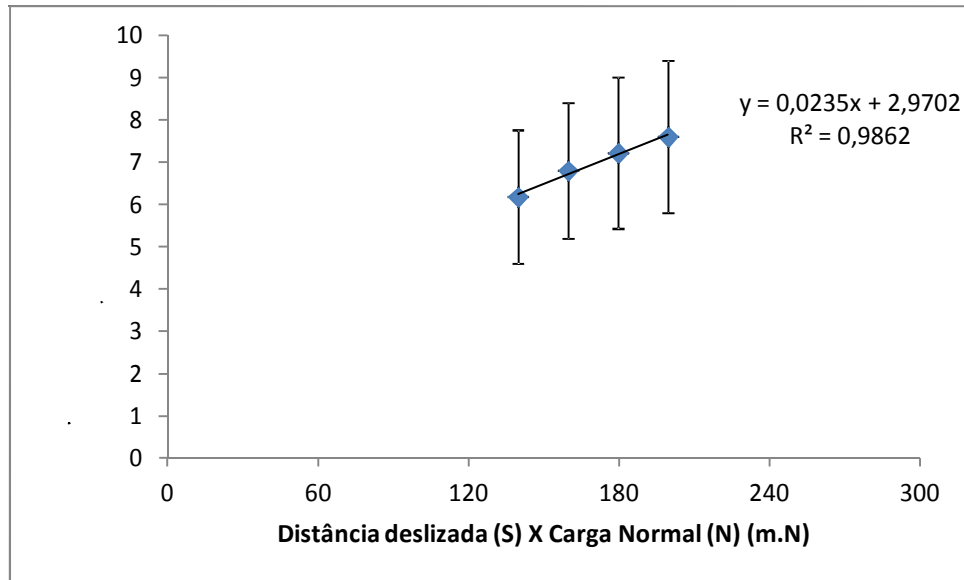


Figura 41: Relação do produto da distância deslizada com a carga normal pelo volume desgastado.

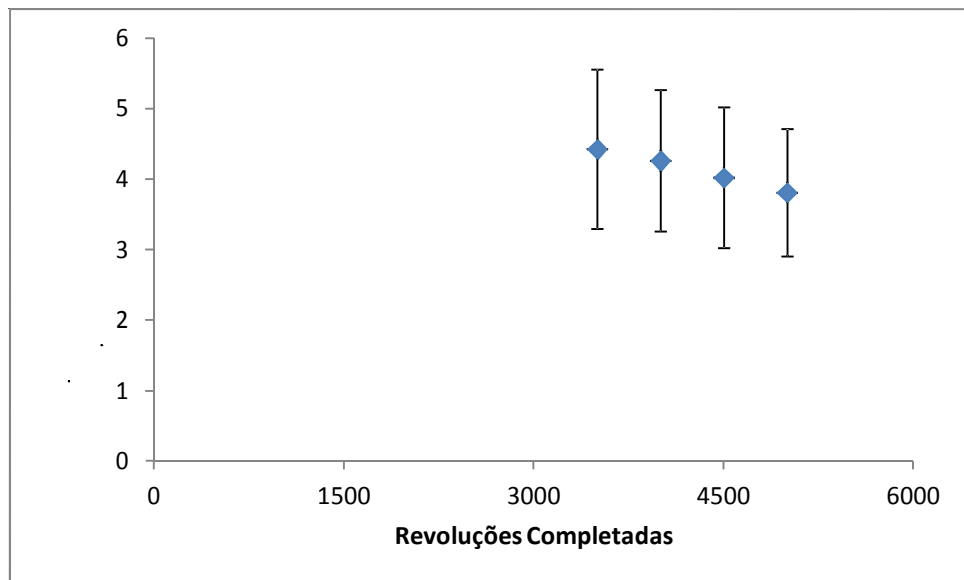


Figura 42: Relação das revoluções completadas pelo coeficiente de desgaste.

Tabela 15: Volumes desgastados de cada calota medidos por perfilometria de contato e coeficiente de desgaste calculado pela equação (3) e suas respectivas médias e desvio padrão.

| Calota | Volume desgastado (m ³)x10 ¹¹ | Coeficiente de desgaste (m ³ /N.m)x10 ¹³ |
|---------------|---|---|
| 1 | 4,45 | 2,23 |
| 2 | 5,24 | 2,63 |
| 3 | 3,47 | 1,74 |
| Média | 4,39 | 2,20 |
| Desvio Padrão | 0,89 | 0,44 |

Amostra T13

Tabela 16: Média aritmética e desvio padrão dos volumes desgastados e dos coeficientes de desgaste calculados pelas equações (2) e (3), com base nos valores de diâmetro obtidos pela microscopia ótica.

| Número de revoluções | Distância deslizada S(m) | Média dos volumes desgastados V (m ³)x10 ¹¹ | Desvio padrão dos volumes desgastados (m ³)x10 ¹¹ | Média dos coeficientes de desgaste k (m ³ /N.m)x10 ¹³ | Desvio padrão dos coeficientes de desgaste (m ³ /N.m) x10 ¹³ |
|----------------------|-----------------------------|---|---|---|--|
| 3500 | 279,29 | 5,11 | 2,00 | 3,66 | 1,44 |
| 4000 | 319,19 | 5,51 | 2,15 | 3,45 | 1,35 |
| 4500 | 359,08 | 5,91 | 2,26 | 3,29 | 1,26 |
| 5000 | 398,98 | 6,34 | 2,51 | 3,18 | 1,26 |

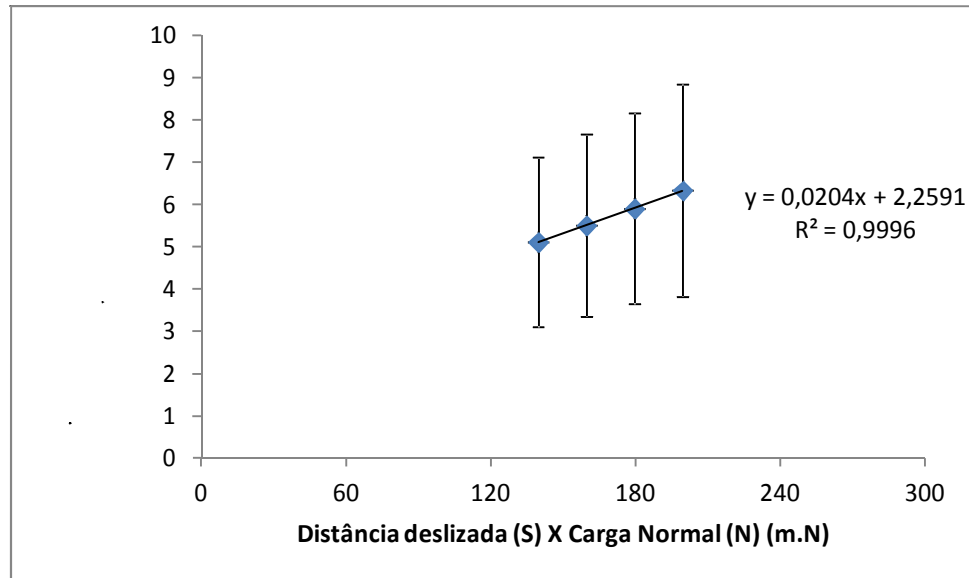


Figura 43: Relação do produto da distância deslizada com a carga normal pelo volume desgastado.

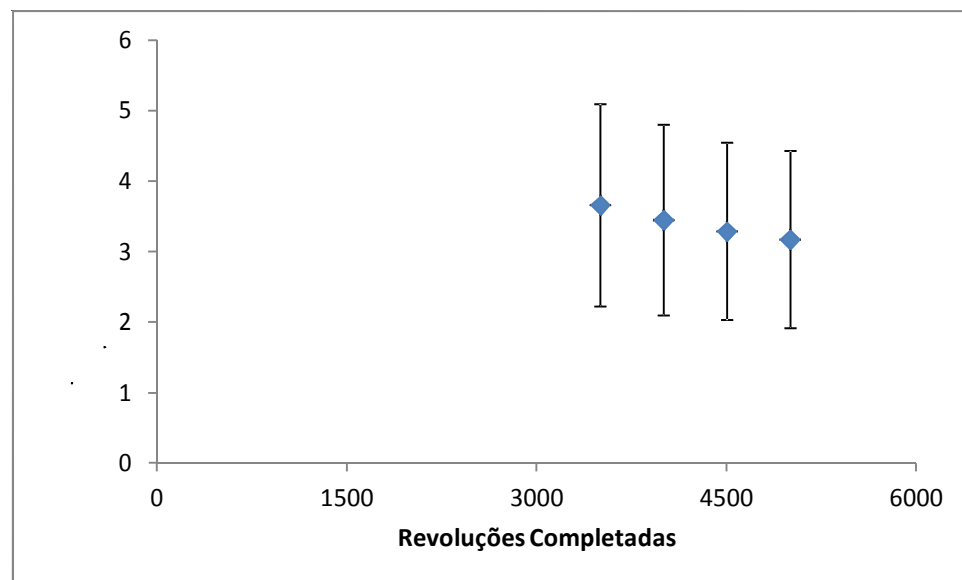


Figura 44: Relação das revoluções completadas pelo coeficiente de desgaste.

Tabela 17: Volumes desgastados de cada calota medidos por perfilometria de contato e coeficiente de desgaste calculado pela equação (3) e suas respectivas médias e desvio padrão

| Calota | Volume desgastado (m ³)x10 ¹¹ | Coeficiente de desgaste (m ³ /N.m)x10 ¹³ |
|---------------|---|---|
| 1 | 4,92 | 2,47 |
| 2 | 2,11 | 1,06 |
| 3 | 2,19 | 1,10 |
| Média | 3,07 | 1,54 |
| Desvio Padrão | 1,60 | 0,80 |

Amostra T16

Tabela 18: Média aritmética e desvio padrão dos volumes desgastados e dos coeficientes de desgaste calculados pelas equações (2) e (3), com base nos valores de diâmetro obtidos pela microscopia ótica.

| Número de revoluções | Distância deslizada S(m) | Média dos volumes desgastados V (m ³)x10 ¹¹ | Desvio padrão dos volumes desgastados (m ³)x10 ¹¹ | Média dos coeficientes de desgaste k (m ³ /N.m)x10 ¹³ | Desvio padrão dos coeficientes de desgaste (m ³ /N.m) x10 ¹³ |
|----------------------|-----------------------------|---|---|---|--|
| 3500 | 279,29 | 5,42 | 0,86 | 3,88 | 0,62 |
| 4000 | 319,19 | 6,16 | 0,55 | 3,86 | 0,34 |
| 4500 | 359,08 | 6,63 | 0,63 | 3,69 | 0,35 |
| 5000 | 398,98 | 7,20 | 0,53 | 3,61 | 0,26 |

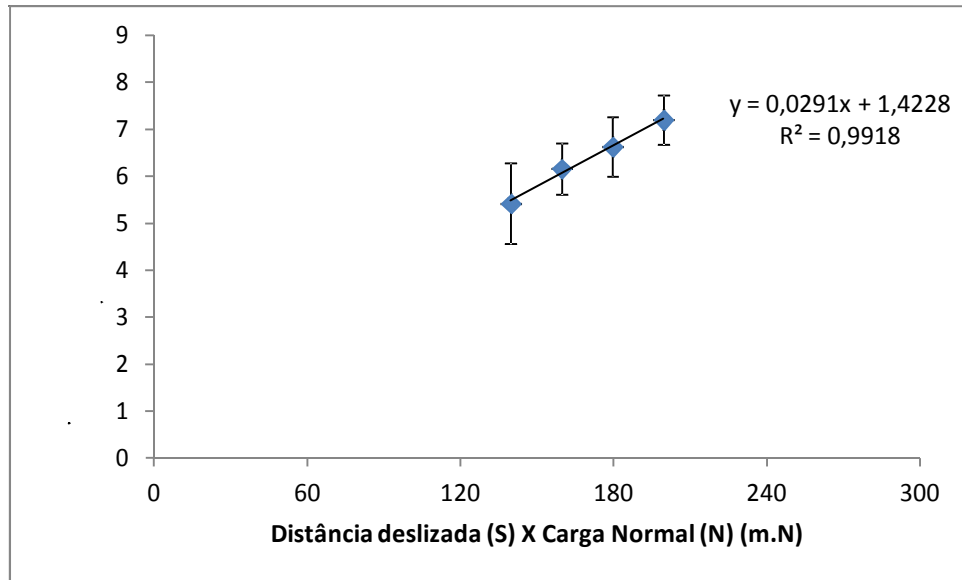


Figura 45: Relação do produto da distância deslizada com a carga normal pelo volume desgastado.

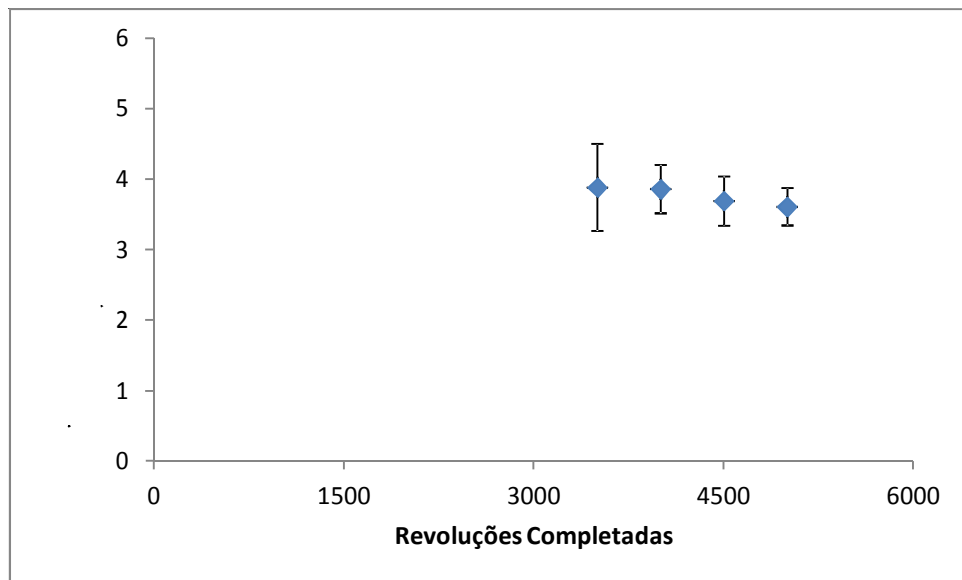


Figura 46: Relação das revoluções completadas pelo coeficiente de desgaste.

Tabela 19: Volumes desgastados de cada calota medidos por perfilometria de contato e coeficiente de desgaste calculado pela equação (3) e suas respectivas médias e desvio padrão.

| Calota | Volume desgastado (m ³)x10 ¹¹ | Coeficiente de desgaste (m ³ /N.m)x10 ¹³ |
|---------------|---|---|
| 1 | 4,19 | 2,10 |
| 2 | 3,92 | 1,97 |
| 3 | 3,29 | 1,65 |
| Média | 3,80 | 1,90 |
| Desvio Padrão | 0,46 | 0,23 |

9.1.2 Inconel 686

Amostra T3

Tabela 20: Média aritmética e desvio padrão dos volumes desgastados e dos coeficientes de desgaste calculados pelas equações (2) e (3), com base nos valores de diâmetro obtidos pela microscopia ótica.

| Número de revoluções | Distância deslizada S(m) | Média dos volumes desgastados V (m ³)x10 ¹¹ | Desvio padrão dos volumes desgastados (m ³)x10 ¹¹ | Média dos coeficientes de desgaste k (m ³ /N.m)x10 ¹³ | Desvio padrão dos coeficientes de desgaste (m ³ /N.m) x10 ¹³ |
|----------------------|-----------------------------|---|---|---|--|
| 3500 | 279,29 | 4,52 | 0,42 | 3,24 | 0,30 |
| 4000 | 319,19 | 5,07 | 0,35 | 3,17 | 0,22 |
| 4500 | 359,08 | 5,42 | 0,55 | 3,02 | 0,31 |
| 5000 | 398,98 | 5,80 | 0,50 | 2,91 | 0,25 |

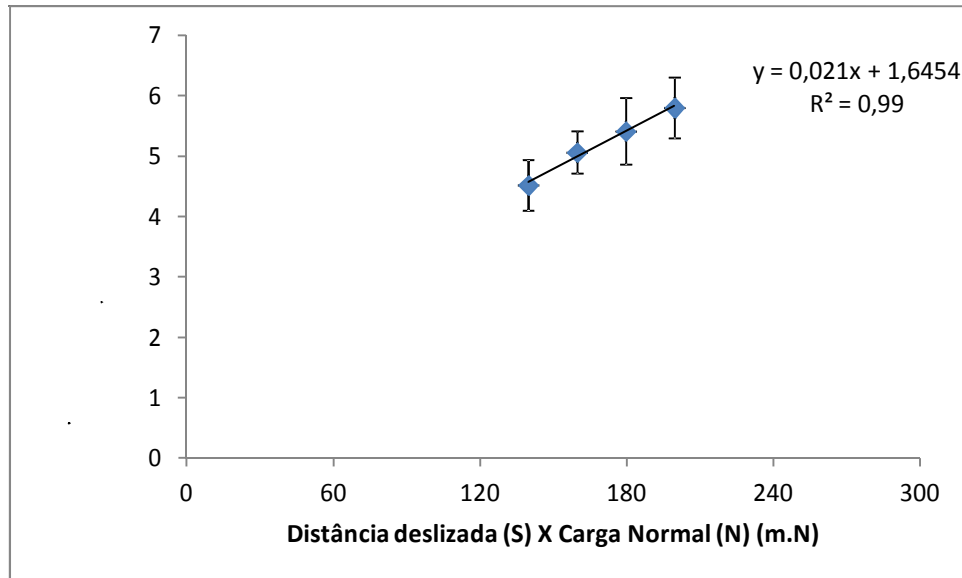


Figura 47: Relação do produto da distância deslizada com a carga normal pelo volume desgastado.

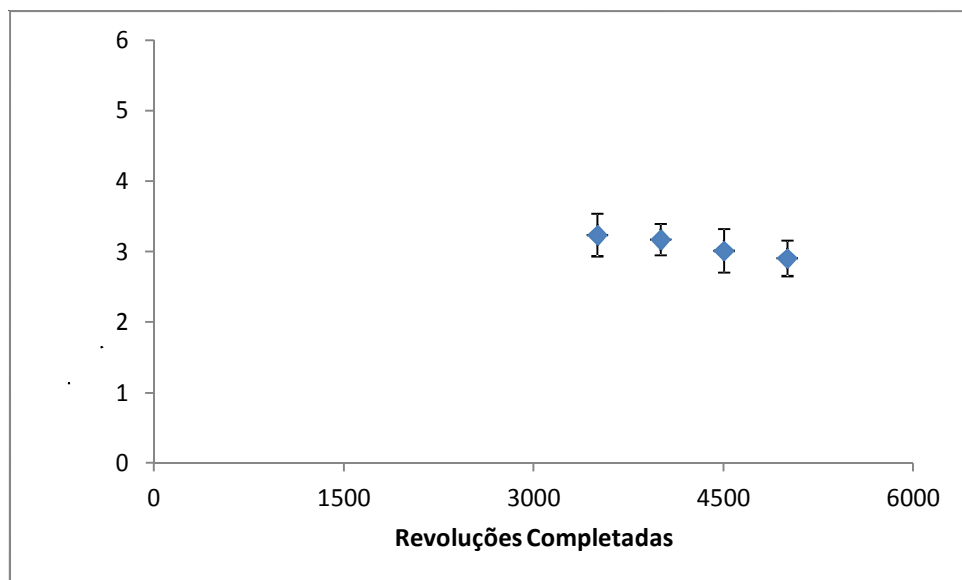


Figura 48: Relação das revoluções completadas pelo coeficiente de desgaste.

Tabela 21: Volumes desgastados de cada calota medidos por perfilometria de contato e coeficiente de desgaste calculado pela equação (3) e suas respectivas médias e desvio padrão.

| Calota | Volume desgastado (m ³)x10 ¹¹ | Coeficiente de desgaste (m ³ /N.m)x10 ¹³ |
|---------------|---|---|
| 1 | 4,28 | 2,15 |
| 2 | 2,96 | 1,48 |
| 3 | 3,17 | 1,59 |
| Média | 3,47 | 1,74 |
| Desvio Padrão | 0,71 | 0,36 |

Amostra T6

Tabela 22: Média aritmética e desvio padrão dos volumes desgastados e dos coeficientes de desgaste calculados pelas equações (2) e (3), com base nos valores de diâmetro obtidos pela microscopia.

| Número de revoluções | Distância deslizada S(m) | Média dos volumes desgastados V (m ³)x10 ¹¹ | Desvio padrão dos volumes desgastados (m ³)x10 ¹¹ | Média dos coeficientes de desgaste k (m ³ /N.m)x10 ¹³ | Desvio padrão dos coeficientes de desgaste (m ³ /N.m) x10 ¹³ |
|----------------------|-----------------------------|---|---|--|---|
| 3500 | 279,29 | 4,71 | 1,47 | 3,37 | 0,11 |
| 4000 | 319,19 | 5,23 | 1,56 | 3,28 | 0,98 |
| 4500 | 359,08 | 5,78 | 1,56 | 3,22 | 0,87 |
| 5000 | 398,98 | 6,31 | 1,66 | 3,16 | 0,83 |

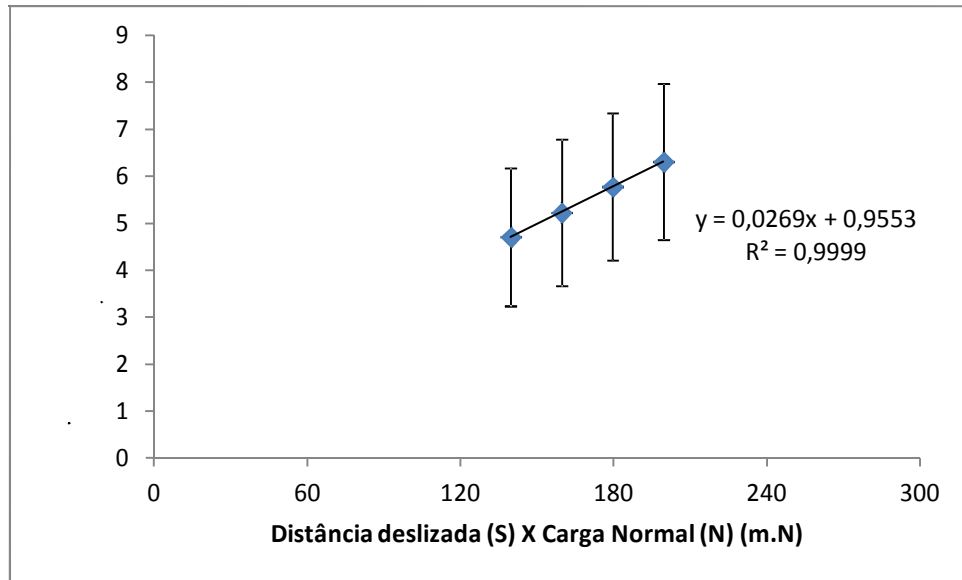


Figura 49: Relação do produto da distância deslizada com a carga normal pelo volume desgastado.

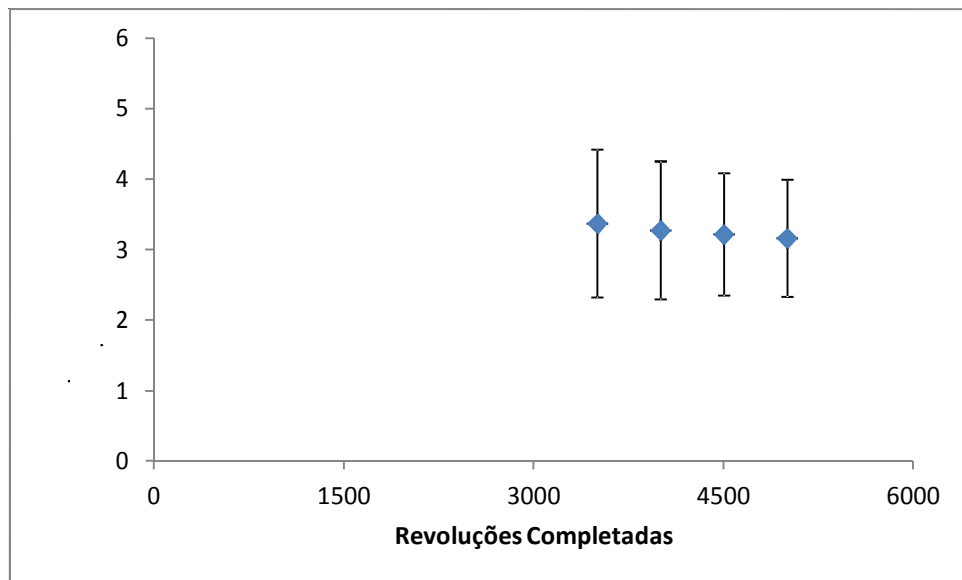


Figura 50: Relação das revoluções completadas pelo coeficiente de desgaste.

Tabela 23: Volumes desgastados de cada calota medidos por perfilometria de contato e coeficiente de desgaste calculado pela equação (3) e suas respectivas médias e desvio padrão.

| Calota | Volume desgastado (m ³)x10 ¹¹ | Coeficiente de desgaste (m ³ /N.m)x10 ¹³ |
|---------------|---|---|
| 1 | 3,84 | 1,92 |
| 2 | 4,18 | 2,10 |
| 3 | 2,57 | 1,29 |
| Média | 3,53 | 1,77 |
| Desvio Padrão | 0,85 | 0,43 |

Amostra T18

Tabela 24: Média aritmética e desvio padrão dos volumes desgastados e dos coeficientes de desgaste calculados pelas equações (2) e (3), com base nos valores de diâmetro obtidos pela microscopia ótica.

| Número de revoluções | Distância deslizada S(m) | Média dos volumes desgastados V (m ³)x10 ¹¹ | Desvio padrão dos volumes desgastados (m ³)x10 ¹¹ | Média dos coeficientes de desgaste k (m ³ /N.m)x10 ¹³ | Desvio padrão dos coeficientes de desgaste (m ³ /N.m)x10 ¹³ |
|----------------------|-----------------------------|---|---|--|--|
| 3500 | 279,29 | 3,45 | 0,61 | 2,47 | 0,44 |
| 4000 | 319,19 | 3,16 | 0,73 | 2,35 | 0,46 |
| 4500 | 359,08 | 4,02 | 0,69 | 2,24 | 0,38 |
| 5000 | 398,98 | 4,26 | 0,79 | 2,14 | 0,39 |

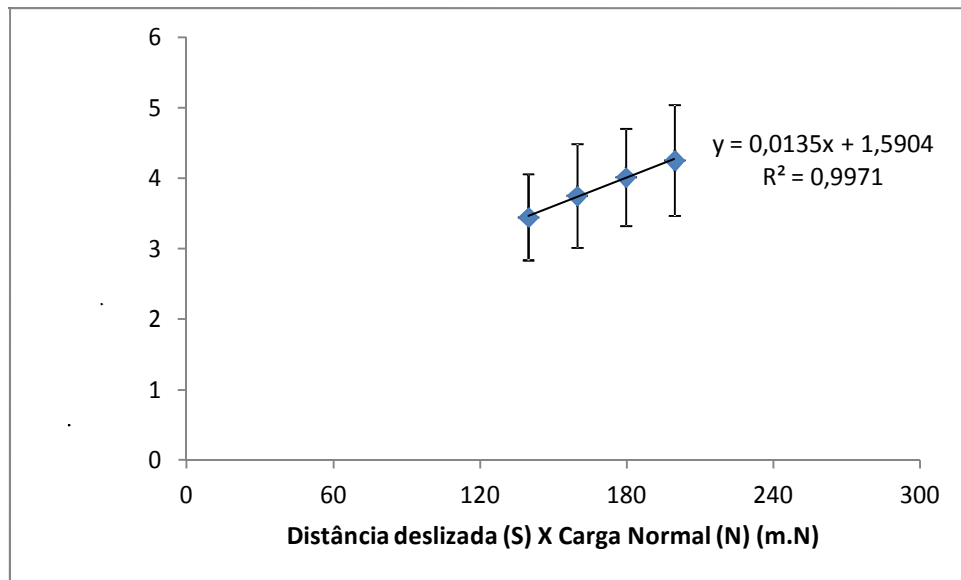


Figura 51: Relação do produto da distância deslizada com a carga normal pelo volume desgastado.

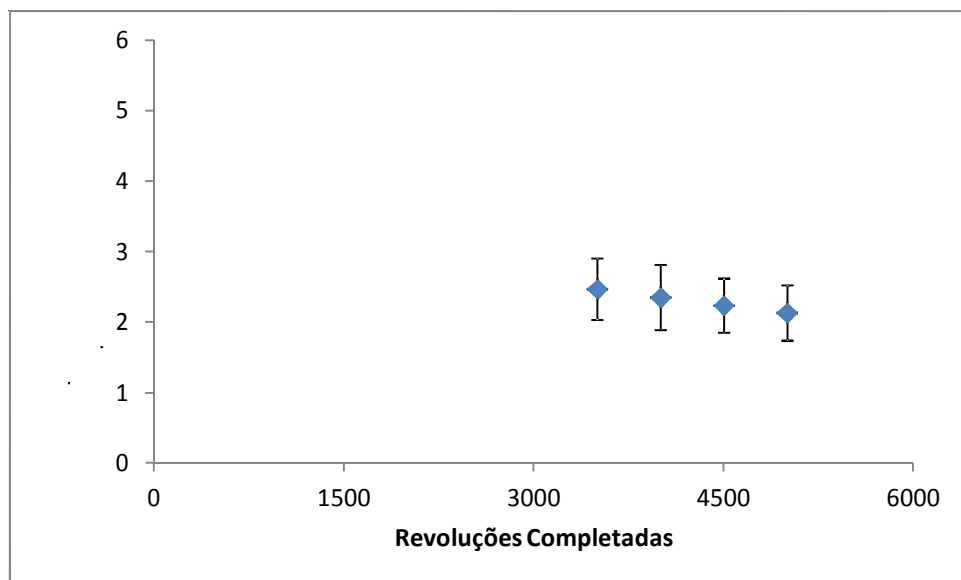


Figura 52: Relação das revoluções completadas pelo coeficiente de desgaste.

Tabela 25: Volumes desgastados de cada calota medidos por perfilometria de contato e coeficiente de desgaste calculado pela equação (3) e suas respectivas médias e desvio padrão.

| Calota | Volume desgastado (m ³)x10 ¹¹ | Coeficiente de desgaste (m ³ /N.m)x10 ¹³ |
|---------------|---|---|
| 1 | 1,84 | 0,92 |
| 2 | 2,26 | 1,13 |
| 3 | 2,77 | 1,39 |
| Média | 2,29 | 1,15 |
| Desvio Padrão | 0,47 | 0,23 |

9.1.3 Hastelloy C-276

Amostra T5

Tabela 26: Média aritmética e desvio padrão dos volumes desgastados e dos coeficientes de desgaste calculados pelas equações (2) e (3), com base nos valores de diâmetro obtidos pela microscopia ótica.

| Número de revoluções | Distância deslizada S(m) | Média dos volumes desgastados V (m ³)x10 ¹¹ | Desvio padrão dos volumes desgastados (m ³)x10 ¹¹ | Média dos coeficientes de desgaste k (m ³ /N.m)x10 ¹³ | Desvio padrão dos coeficientes de desgaste (m ³ /N.m) x10 ¹³ |
|----------------------|-----------------------------|---|---|---|--|
| 3500 | 279,29 | 5,81 | 0,62 | 4,16 | 0,45 |
| 4000 | 319,19 | 6,10 | 0,88 | 3,82 | 0,55 |
| 4500 | 359,08 | 6,54 | 0,91 | 3,64 | 0,50 |
| 5000 | 398,98 | 7,12 | 0,88 | 3,57 | 0,44 |

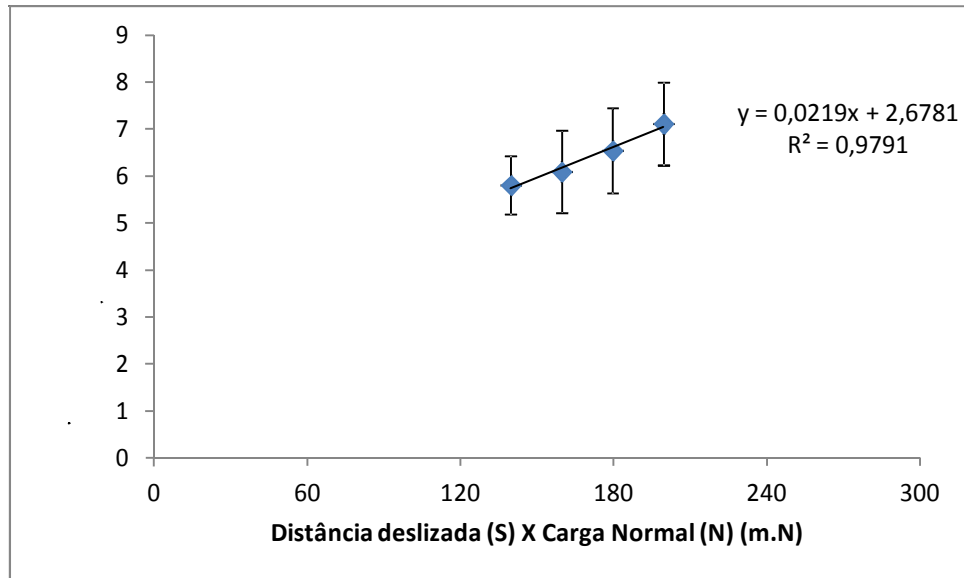


Figura 53: Relação do produto da distância deslizada com a carga normal pelo volume desgastado.

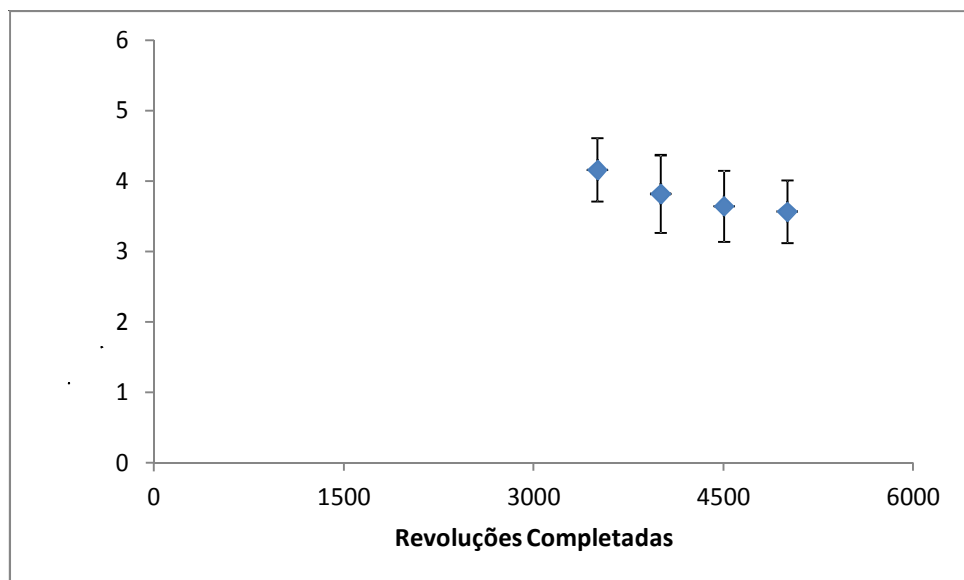


Figura 54: Relação das revoluções completadas pelo coeficiente de desgaste.

Tabela 27: Volumes desgastados de cada calota medidos por perfilometria de contato e coeficiente de desgaste calculado pela equação (3) e suas respectivas médias e desvio padrão.

| Calota | Volume desgastado (m ³)x10 ¹¹ | Coeficiente de desgaste (m ³ /N.m)x10 ¹³ |
|---------------|---|---|
| 1 | 3,88 | 1,94 |
| 2 | 5,71 | 2,86 |
| 3 | 3,67 | 1,84 |
| Média | 4,42 | 2,22 |
| Desvio Padrão | 1,12 | 0,56 |

Amostra T8

Tabela 28: Média aritmética e desvio padrão dos volumes desgastados e dos coeficientes de desgaste calculados pelas equações (2) e (3), com base nos valores de diâmetro obtidos pela microscopia ótica.

| Número de revoluções | Distância deslizada S(m) | Média dos volumes desgastados V (m ³)x10 ¹¹ | Desvio padrão dos volumes desgastados (m ³)x10 ¹¹ | Média dos coeficientes de desgaste k (m ³ /N.m)x10 ¹³ | Desvio padrão dos coeficientes de desgaste (m ³ /N.m) x10 ¹³ |
|----------------------|-----------------------------|---|---|---|--|
| 3500 | 279,29 | 4,78 | 1,14 | 3,43 | 0,82 |
| 4000 | 319,19 | 5,40 | 1,12 | 3,36 | 0,70 |
| 4500 | 359,08 | 5,81 | 1,20 | 3,24 | 0,67 |
| 5000 | 398,98 | 6,15 | 1,33 | 3,08 | 0,67 |

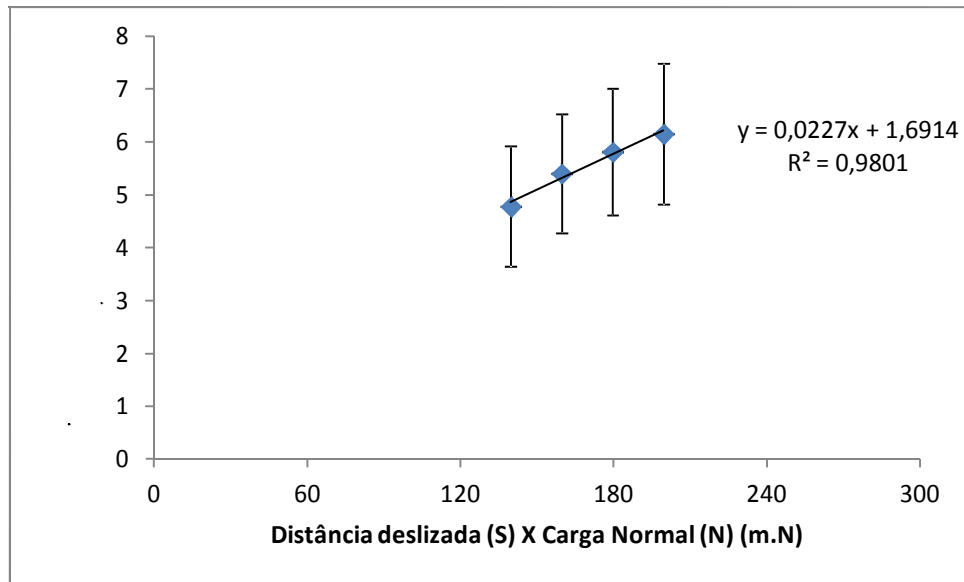


Figura 55: Relação do produto da distância deslizada com a carga normal pelo volume desgastado.

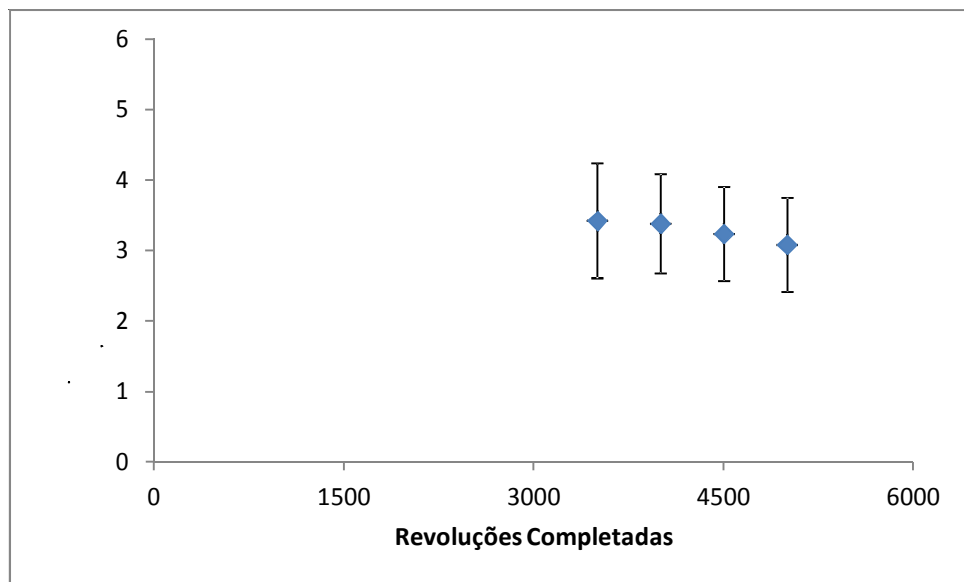


Figura 56: Relação das revoluções completadas pelo coeficiente de desgaste.

Tabela 29: Volumes desgastados de cada calota medidos por perfilometria de contato e coeficiente de desgaste calculado pela equação (3) e suas respectivas médias e desvio padrão.

| Calota | Volume desgastado (m ³)x10 ¹¹ | Coeficiente de desgaste (m ³ /N.m)x10 ¹³ |
|---------------|---|---|
| 1 | 4,56 | 2,29 |
| 2 | 4,49 | 2,25 |
| 3 | 2,79 | 1,40 |
| Média | 3,95 | 1,98 |
| Desvio Padrão | 1,00 | 0,50 |

Amostra T2

Tabela 30: Média aritmética e desvio padrão dos volumes desgastados e dos coeficientes de desgaste calculados pelas equações (2) e (3), com base nos valores de diâmetro obtidos pela microscopia ótica.

| Número de revoluções | Distância deslizada S(m) | Média dos volumes desgastados V (m ³)x10 ¹¹ | Desvio padrão dos volumes desgastados (m ³)x10 ¹¹ | Média dos coeficientes de desgaste k (m ³ /N.m)x10 ¹³ | Desvio padrão dos coeficientes de desgaste (m ³ /N.m) x10 ¹³ |
|----------------------|-----------------------------|---|---|---|--|
| 3500 | 279,29 | 3,97 | 0,91 | 3,15 | 0,65 |
| 4000 | 319,19 | 4,67 | 1,00 | 2,93 | 0,63 |
| 4500 | 359,08 | 5,03 | 1,24 | 2,80 | 0,69 |
| 5000 | 398,98 | 5,36 | 1,12 | 2,69 | 0,56 |

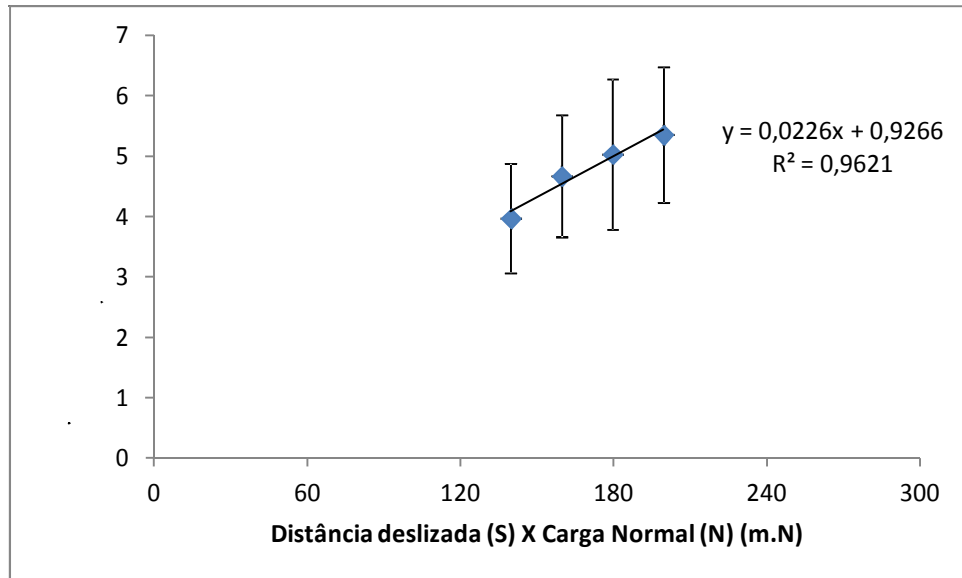


Figura 57: Relação do produto da distância deslizada com a carga normal pelo volume desgastado.

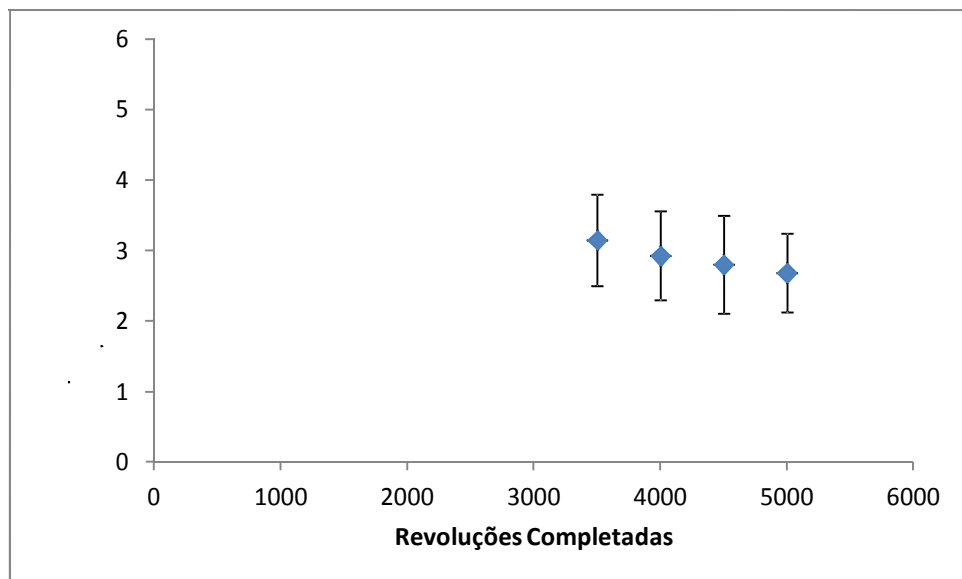


Figura 58: Relação das revoluções completadas pelo coeficiente de desgaste.

Tabela 31: Volumes desgastados de cada calota medidos por perfilometria de contato e coeficiente de desgaste calculado pela equação (3) e suas respectivas médias e desvio padrão.

| Calota | Volume desgastado (m ³)x10 ¹¹ | Coeficiente de desgaste (m ³ /N.m)x10 ¹³ |
|---------------|---|---|
| 1 | 2,99 | 1,50 |
| 2 | 3,92 | 1,97 |
| 3 | 2,24 | 1,12 |
| Média | 3,05 | 1,53 |
| Desvio Padrão | 0,84 | 0,42 |

Amostra T14

Tabela 32: Média aritmética e desvio padrão dos volumes desgastados e dos coeficientes de desgaste calculados pelas equações (2) e (3), com base nos valores de diâmetro obtidos pela microscopia ótica.

| Número de revoluções | Distância deslizada S(m) | Média dos volumes desgastados V (m ³)x10 ¹¹ | Desvio padrão dos volumes desgastados (m ³)x10 ¹¹ | Média dos coeficientes de desgaste k (m ³ /N.m)x10 ¹³ | Desvio padrão dos coeficientes de desgaste (m ³ /N.m) x10 ¹³ |
|----------------------|-----------------------------|---|---|---|--|
| 3500 | 279,29 | 2,95 | 1,21 | 2,11 | 0,87 |
| 4000 | 319,19 | 3,30 | 1,40 | 2,07 | 0,88 |
| 4500 | 359,08 | 3,48 | 1,48 | 1,94 | 0,83 |
| 5000 | 398,98 | 3,68 | 1,51 | 1,85 | 0,76 |

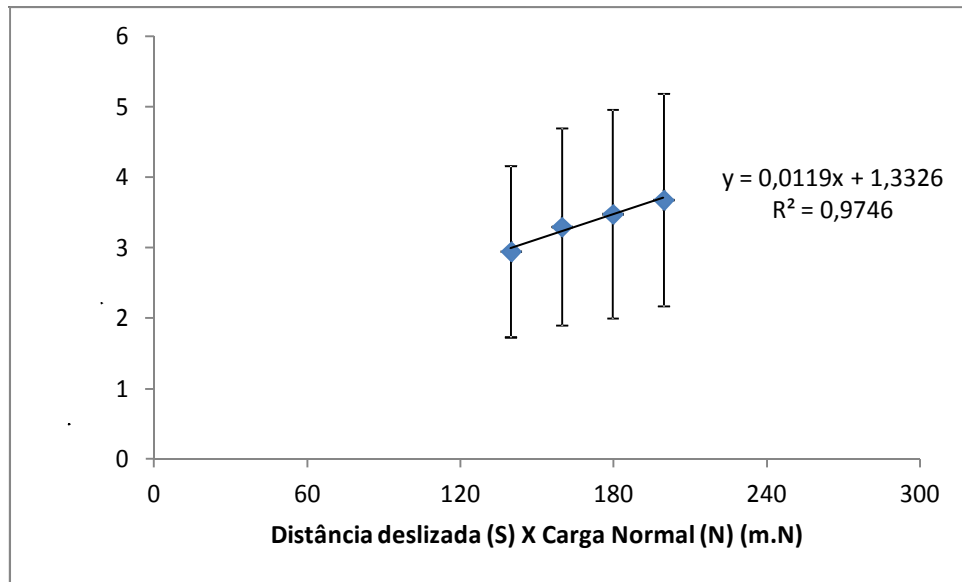


Figura 59: Relação do produto da distância deslizada com a carga normal pelo volume desgastado.

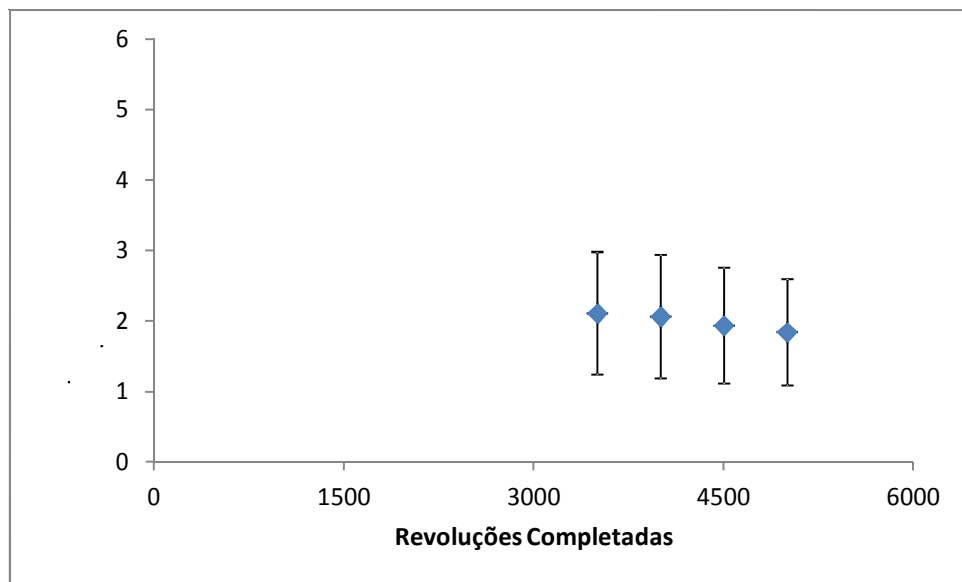


Figura 60: Relação das revoluções completadas pelo coeficiente de desgaste.

Tabela 33: Volumes desgastados de cada calota medidos por perfilometria de contato e coeficiente de desgaste calculado pela equação (3) e suas respectivas médias e desvio padrão.

| Calota | Volume desgastado (m ³)x10 ¹¹ | Coeficiente de desgaste (m ³ /N.m)x10 ¹³ |
|---------------|---|---|
| 1 | 1,05 | 0,53 |
| 2 | 1,71 | 0,86 |
| 3 | 2,29 | 1,15 |
| Média | 1,68 | 0,84 |
| Desvio Padrão | 0,62 | 0,31 |

Amostra T17

Tabela 34: Média aritmética e desvio padrão dos volumes desgastados e dos coeficientes de desgaste calculados pelas equações (2) e (3), com base nos valores de diâmetro obtidos pela microscopia ótica.

| Número de revoluções | Distância deslizada S(m) | Média dos volumes desgastados V (m ³)x10 ¹¹ | Desvio padrão dos volumes desgastados (m ³)x10 ¹¹ | Média dos coeficientes de desgaste k (m ³ /N.m)x10 ¹³ | Desvio padrão dos coeficientes de desgaste (m ³ /N.m) x10 ¹³ |
|----------------------|-----------------------------|---|---|--|---|
| 3500 | 279,29 | 4,74 | 0,52 | 3,39 | 0,38 |
| 4000 | 319,19 | 5,34 | 0,55 | 3,34 | 0,35 |
| 4500 | 359,08 | 5,75 | 0,64 | 3,20 | 0,35 |
| 5000 | 398,98 | 6,07 | 0,75 | 3,04 | 0,38 |

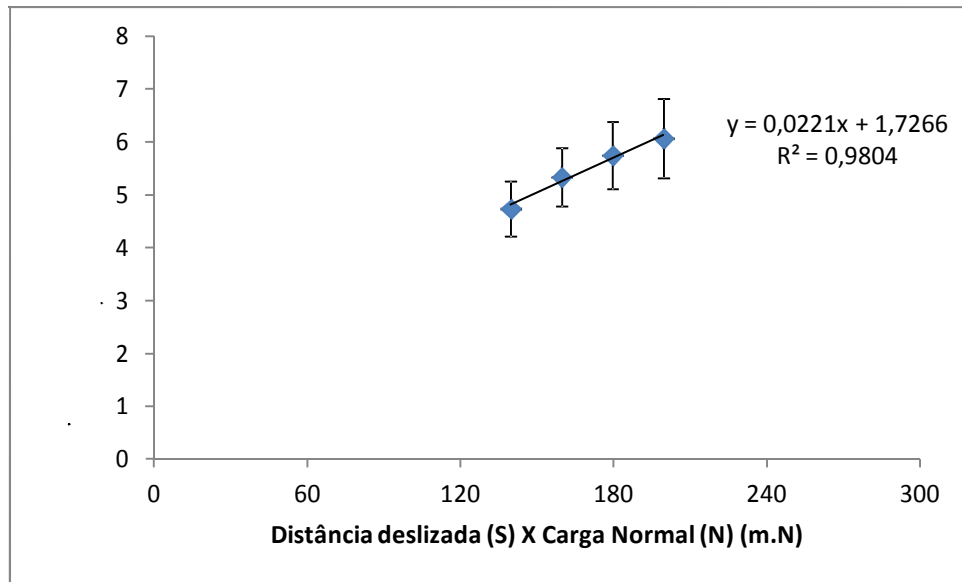


Figura 61: Relação do produto da distância deslizada com a carga normal pelo volume desgastado.

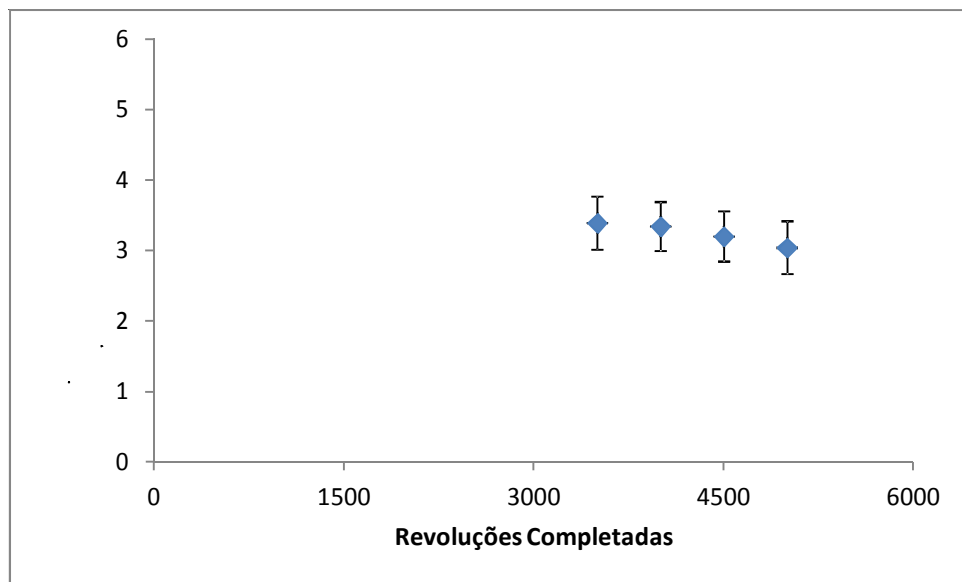


Figura 62: Relação das revoluções completadas pelo coeficiente de desgaste.

Tabela 35: Volumes desgastados de cada calota medidos por perfilometria de contato e coeficiente de desgaste calculado pela equação (3) e suas respectivas médias e desvio padrão.

| Calota | Volume desgastado (m ³)x10 ¹¹ | Coeficiente de desgaste (m ³ /N.m)x10 ¹³ |
|---------------|---|---|
| 1 | 4,60 | 2,31 |
| 2 | 3,54 | 1,77 |
| 3 | 3,00 | 1,50 |
| Média | 3,71 | 0,19 |
| Desvio Padrão | 0,81 | 0,41 |