



PROJETO DE GRADUAÇÃO

**DESGASTE MICROABRASIVO DE LIGAS DE
TITÂNIO RECOBERTAS POR FILMES FINOS
MULTICAMADAS**

Por,
Milzara Menezes de Souza

Brasília, 19 de julho de 2013.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**DESGASTE MICROABRASIVO EM LIGA DE
TITÂNIO RECOBERTAS POR FILMES FINOS
MULTICAMADAS**

POR,

Milzara Menezes de Souza

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. Cosme Roberto, UnB/ ENM (Orientador)

Prof. José Alexander Araújo, UnB/ ENM

Prof. Jorge Luiz de Almeida Ferreira, UnB/ ENM

Brasília, 19 de julho de 2013.

Dedicatória

*Dedico este trabalho aos meus pais, à
minha irmã, à minha família e a todos que
me ajudaram a caminhar.*

Milzara Menezes de Souza

Agradecimentos

À Deus que está sempre ao meu lado.

À minha família que é o bem mais precioso que tenho neste mundo.

À Mommy, por cada palavra amiga, por cada sorriso, por cada incentivo e que sempre acreditou em mim, que sempre batalhou comigo e que sempre me amou incondicionalmente.

Ao Paiê, por sempre me proporcionar o melhor estudo para que eu pudesse trilhar o meu caminho e ser o que eu quisesse nessa vida.

À Hermana, por todos os gritos, brigas, puxões de orelhas, finais de semana sem a Mommy, nossas bagunças e por sermos o futuro da nossa família.

Ao Marcelo, que, apesar da nossa história recente, sempre me acompanhou de longe e me deu o melhor ombro amigo que acabou se tornando o ombro de um namorado.

À Lívia, Italo e Felippes, por todos os momentos de estudos, por toda ajuda e por todos os trabalhos, incluindo as confusões.

Ao Prof. Cosme Roberto, por ter me dado à oportunidade de realizar este trabalho e por ter me incentivado a ir atrás de meu intercâmbio.

Milzara Menezes de Souza

RESUMO

Este projeto envolve a melhoria de próteses ortopédicas e odontológicas que sofreram danos em decorrência de um problema mecânico, o desgaste microabrasivo. E seu principal objetivo é minimizar a ocorrência deste desgaste na liga de titânio Ti-40Zr com a deposição de 3 diferentes filmes finos – Ti, TiN e ZrN – formando a multicamada. A deposição é feita por o novo sistema formado, revestimento mais substrato, passar a apresentar as mesmas propriedades, pelo menos superficialmente, dos filmes depositados. Filmes finos multicamadas que apresentam maior resistência ao desgaste elevam a resistência de todo o sistema. A metodologia de validação dessa melhoria é proposta e envolve o estudo do teste de desgaste microabrasivo, observação das calotas por microscopia eletrônica de varredura e teste de microdureza. O teste de microdureza será feito para incrementar a avaliação dos resultados porque é conhecido que o aumento da dureza de um material eleva a sua resistência ao desgaste. Já o teste de desgaste microabrasivo para obter os valores correspondentes do coeficiente de desgaste do substrato e do revestimento. Assim, espera-se observar o aumento da resistência ao desgaste do revestimento em relação ao substrato.

ABSTRACT

This project involves the improvement of dental and orthopedic prostheses that have suffered damage due to a mechanical problem, wear microabrasive. And the main objective is to minimize the occurrence of this kind of wear on the titanium alloy Ti-40Zr with the deposition of 3 different thin films – Ti, TiN and ZrN – forming the multilayer. The deposition is done because the new system formed, substrate and coating, start presenting the same properties, at least superficially, of the deposited films. Multilayer thin films which exhibit improved wear resistance would increase the resistance of the whole system. The validation methodology of this improvement is proposed and involves the study of the microabrasive wear test, observation of the scar by scanning electron microscopy and microhardness test. The microhardness test will be done to enhance the assessment of the results since it is known that increasing the hardness of a material increases its resistance to wear. And the microabrasive wear test is done to obtain the corresponding values of the wear coefficient of the substrate and the coating. Thus, it is expected to observe an increase in wear resistance of the coating to the substrate.

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ASPECTOS GERAIS	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 TIPOS DE DESGASTE	3
2.1.1 DESGASTE EROSIVO	3
2.1.2 DESGASTE POR <i>FRETTING</i>	3
2.1.3 DESGASTE ADESIVO	4
2.1.4 DESGASTE POR FADIGA	4
2.1.5 DESGASTE ABRASIVO	5
2.1.5.1 MECANISMOS DE DESGASTE ABRASIVO	6
2.1.5.2 MODOS DE DESGASTE ABRASIVO	7
2.1.5.3 RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO DOS MATERIAIS	8
2.2 TITÂNIO E LIGAS DE TITÂNIO	8
2.2.1 APLICAÇÕES	10
2.3 FILMES FINOS	11
2.3.1 FORMAÇÃO DE FILMES FINOS	12
2.3.2 DEPOSIÇÃO DOS FILMES FINOS	13
2.3.3 FILMES FINOS MULTICAMADAS	15
2.3.4 NITRETO DE TITÂNIO e NITRETO DE ZIRCÔNIO	16
2.3.4.1 PROPRIEDADES DO Ti, TiN e ZrN COMO FILME FINO	17
2.4 PARTÍCULAS ABRASIVAS	18
2.4.1 SÍLICA	20
2.5 CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES FINOS MULTICAMADAS	21
2.5.1 TESTE DE DESGASTE MICROABRASIVO	21
2.5.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	22
2.6.3 TESTE DE MICRODUREZA	23
2.6 MÉTODOS DE ANÁLISE DE DADOS DO DESGASTE MICROABRASIVO	24
2.6.1 INTRODUÇÃO	24
2.6.2 ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS	25
2.6.2.1 EQUAÇÕES BÁSICAS	25
2.6.2.2 ESCOLHA DAS MEDIDAS	26
2.6.2.3 INFLUÊNCIA DOS ERROS NAS MEDIDAS	27
2.6.2.4 MÉTODOS DE ANÁLISE	27
2.6.2.4.1 MÉTODO DE RUTHERFORD	27
2.6.2.4.2 MÉTODO DE ALLSOOP	28
3 MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 MATERIAIS	29
3.1.1 PREPARO DO SUBSTRATO	29
3.1.2 DEPOSIÇÃO DO FILME FINO DO TIPO MULTICAMADAS	29
3.2 CARACTERIZAÇÃO	30
3.2.1 DESGASTE MICROABRASIVO	30
3.2.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	31
3.2.3 TESTE DE MICRODUREZA	31
3.3 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE ANÁLISE	32
3.3.1 MÉTODO DE RUTHERFORD 1	33
3.3.2 MÉTODO DE RUTHERFORD 2	33
3.3.3 MÉTODO DE ALLSOOP 1	33
3.3.4 MÉTODO DE ALLSOOP 2	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1 TESTE DE MICRODUREZA	35
4.2 TESTE DE DESGASTE MICROABRASIVO	38
4.2.1 SUBSTRATO	38
4.2.2 REVESTIMENTO + SUBSTRATO	43
5 CONCLUSÃO	54
5.1 CONCLUSÃO	54
6 TRABALHOS FUTUROS	56
6.1 PROPOSIÇÕES DE TRABALHOS	56
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
7.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
8 ANEXOS	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Desenho esquemático do desgaste erosivo [2].	3
Figura 2: Desenho esquemático do desgaste por <i>fretting</i> [2].	4
Figura 3: Desenho esquemático do desgaste adesivo [2].	4
Figura 4: Desenho esquemático do desgaste por fadiga [7].	5
Figura 5: Mecanismos de desgaste abrasivo [2].	7
Figura 6: Modos de desgaste abrasivo [2].	7
Figura 7: Resistência ao desgaste abrasivo versus dureza de metais puros e suas ligas [2].	8
Figura 8: Diagrama de Fase Ti-Zr [17].	10
Figura 9: Ilustração esquemática dos primeiros estágios do crescimento do filme [21].	12
Figura 10: Modelo de zonas de Thornton [21].	12
Figura 11: Esquema do método de deposição assistida por feixe de íons [18].	15
Figura 12: Desenho esquemático de um revestimento do tipo multicamadas [6].	16
Figura 13: Ferramentas revestidas por ZrN [25].	16
Figura 14: Ferramentas revestidas por TiN [29].	16
Figura 15: Dependência do stress residual de uma camada de TiN com a espessura h de uma camada de Ti [35].	18
Figura 16: Efeito de grãos frágeis e grãos duros na eficiência de abrasão [2].	19
Figura 17: Método de definição de grãos por uma série de raios [2].	20
Figura 18: Pó de Sílica [37].	20
Figura 19: Modelo de teste de desgaste microabrasivo [39].	21
Figura 20: Equipamento para ensaio de desgaste microabrasivo, (a) esfera fixa e (b) esfera livre [34].	22
Figura 21: Esquema geral do MEV [42].	23
Figura 22: Representação esquemática de um indentador em um sistema de substrato com revestimento [47].	24
Figura 23: Desenho esquemático da geometria da calota de desgaste formada pelo teste de desgaste microabrasivo com uma esfera de raio R (a) amostra simples e (b) amostra com revestimento [49].	25
Figura 24: Máquina de desgaste microabrasivo [Fonte: autor].	30
Figura 25: Microscópio de Eletrônico de Varredura [52].	31
Figura 26: Teste de microdureza [52].	31
Figura 27: Corpo de prova para ensaio [30 e adaptada pelo autor].	32
Figura 28: Espessura do revestimento [Fonte: autor].	32
Figura 29: Fenômeno de “ <i>scuffing</i> ” [Fonte: autor].	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Diferença entre desgaste abrasivo e microabrasivo [8].....	6
Tabela 2: Propriedades do Ti [12] e [13].	9
Tabela 3: Elementos de liga mais comuns [10].....	9
Tabela 4: Propriedades mecânicas, térmicas e estruturais do TiN e ZrN [30] e [10].	17
Tabela 5: Dureza de alguns materiais [2].....	19
Tabela 6: Propriedades mecânicas, térmicas e estruturais do SiO ₂ [10] e [38].....	20
Tabela 7: Estimativa de Incertezas.....	27
Tabela 8: Resumo dos métodos utilizados.	33
Tabela 9: Resultado do teste de microdureza para carregamento de 50 gf.....	35
Tabela 10: Resultado do teste de microdureza para carregamento de 100gf.....	35
Tabela 11: Resultado do teste de microdureza para carregamento de 300 gf.....	36
Tabela 12: Resultado do teste de microdureza para carregamento de 500 gf.....	36
Tabela 13: Imagens das calotas de desgaste da amostra 1 e 2.	38
Tabela 14: Dados tabulados referente às amostras 1 e 2.....	42
Tabela 15: Dados obtidos a partir do ajuste linear das amostras 1 e 2.....	43
Tabela 16: Imagens das calotas de desgaste da amostra 3.	44
Tabela 17: Valores referentes à espessura do revestimento e profundidade da calota.	47
Tabela 18: Dados tabulados referentes à amostra 3.	47
Tabela 19: Razão V_c/V	48
Tabela 20: Equações obtidas pelos ajustes dos 4 métodos utilizados.....	49
Tabela 21: k_s e k_c obtidos.....	49
Tabela 22: Melhora da resistência ao desgaste do revestimento em relação ao substrato.	52

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos

a – Diâmetro da calota interna de desgaste	R' – Raio do ciclo virtual
A – Referente à camada A	R'' – Raio do eixo
Al – Alumínio	S – Distância de deslizamento
b – Diâmetro externo da calota de desgaste	s – Referente ao substrato
B – Referente à camada B	S' – Distância virtual de deslizamento em
C – Carbono	R'
c – Referente ao revestimento	S'' – Distância percorrida pelo eixo
Cr – Cromo	Si – Silício
D – Diâmetro da esfera de desgaste	Sn – Estanho
Fe – Ferro	t – Espessura do revestimento
H – Hidrogênio	T – Temperatura da amostra
h – Profundidade da calota de desgaste	t_A – Espessura da camada A
k – Coeficiente de desgaste	t_B – Espessura da camada B
k^l – Resistência ao desgaste	Ti – Titânio
k_c – Coeficiente de desgaste do revestimento	T_m – Temperatura absoluta de fusão do material
k_s – Coeficiente de desgaste do substrato	Λ – Comprimento da bicamada
Mo – Molibdênio	V – Vanádio
N – Força normal de contato	V – Volume de desgaste
N – Nitrogênio	V_c – Volume de desgaste do revestimento
n – Número de voltas da esfera de desgaste	V_s – Volume de desgaste do substrato
n' – Número de revoluções do ciclo virtual	x_1 – Distância entre o raio até a superfície do revestimento
n'' – Número de revoluções do eixo	x_2 – Distância entre o raio e a superfície do substrato
O – Oxigênio	
R – Raio da esfera de desgaste	
Zr – Zircônio	
α – Fase cristalina hexagonal compacta	
β – Fase cúbica de corpo centrado	
π – Número pi	

Siglas

CTA – Centro Tecnológico da Aeronáutica

CVD – Deposição Química a Vapor

FGA – Faculdade UnB Gama

ITA – Instituto Tecnológico da Aeronáutica

MET – Microscópio Eletrônico de Transmissão

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

MO – Microscópio Ótico

PVD – Deposição Física a Vapor

SP – São Paulo

UnB – Universidade de Brasília

1 INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTOS GERAIS

O objetivo deste trabalho é avaliar o desgaste microabrasivo da liga de titânio Ti-40Zr em sua forma simples e com revestimento por combinação de 3 diferentes filmes finos – Ti, TiN e ZrN – formando a multicamada. O presente estudo concentra-se em uma liga de titânio por tratar-se de um dos materiais mais utilizados na confecção de próteses em implantes ortopédicos e odontológicos [1].

A análise do desgaste de próteses ortopédicas e odontológicas ocorre por partículas de comida ou o desprendimento de partículas do próprio material atuarem como agentes causadores de desgaste microabrasivo e danificar as peças. Assim, faz-se necessária uma detida abordagem do desgaste microabrasivo [1].

O referido desgaste é responsável por rápidos e severos danos a materiais se não for devidamente controlado. Este fenômeno surge quando partículas localizadas entre duas superfícies sólidas deterioram, pelo movimento, uma ou ambas as superfícies, a depender da dureza de cada material, inclusive a da partícula. Sob a ação de uma carga normal, as asperezas presentes na superfície mais dura penetram na superfície mais macia, fazendo com que o material seja removido e surjam microfraturas e microcortes. O desgaste microabrasivo enfocado por este trabalho se dá pela presença da sílica (SiO₂), que se apresenta na forma de pó e foi utilizado nos testes como partícula abrasiva, gerando assim o desgaste microabrasivo na superfície da liga de titânio supracitada [2] e [3].

A liga aqui utilizada, o Ti-40Zr, apresenta boas propriedades mecânicas, por sua excelente resistência à corrosão e sua inatividade biológica (ou “indiferença biológica”), ou seja, a presença do metal parece não influenciar os tecidos do corpo humano [4] e [5].

Além disso, após a década de 70, notou-se um crescimento no interesse em filmes finos, como: TiN, TiCN e TiAlN, para aplicações em ferramentas de corte que utilizam alta velocidade e grande avanço. Estes filmes exibem propriedades superiores aos substratos onde são depositados, tais como alta dureza, resistência ao desgaste, à oxidação, além de baixo coeficiente de atrito [6].

Os estudos do comportamento tribológico de filmes finos se aliaram ao desenvolvimento de novas máquinas e equipamentos, possibilitando novas maneiras de realização de ensaios, permitindo assim um melhor conhecimento das superfícies submetidas a contatos. O estudo do comportamento tribológico de filmes finos multicamadas se dá para melhorar o conhecimento sobre mecanismos de desgaste dos revestimentos [6].

Agrupando todas essas informações, este trabalho se estruturará da seguinte forma:

- Capítulo 1: Introdução;
 - Informações básicas do que será abordado neste trabalho.
- Capítulo 2: Revisão bibliográfica;

- Desgaste em suas principais formas, com ênfase no desgaste microabrasivo;
- Titânio e suas ligas;
- Caracterização, melhorias e deposição do TiN, ZrN e Ti como filmes finos multicamadas;
- Sílica como partícula abrasiva
- Caracterização para atestar a alteração na resistência ao desgaste;
- Métodos de análise de dados.
- Capítulo 3: Materiais e métodos;
 - Detalhamento de toda a caracterização, contendo informações específicas de cada equipamento que foi utilizado e métodos.
- Capítulo 4: Resultados;
 - Relatório dos resultados obtidos.
- Capítulo 5: Conclusão;
- Capítulo 6: Trabalhos futuros;
- Capítulo 7: Considerações finais;
 - Referências bibliográficas;
- Capítulo 8: Anexos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TIPOS DE DESGASTE

Tradicionalmente divide-se o desgaste em: desgaste abrasivo, desgaste por erosão, desgaste por *fretting*, desgaste por adesão e desgaste por fadiga. O desgaste é geralmente associado à perda de material de corpos em movimento relativo. Dois grupos de mecanismo de desgaste podem ser identificados, o primeiro compreendendo aqueles dominados pelo comportamento mecânico dos materiais e, o outro, compreendendo os definidos pela natureza química dos materiais [2].

Embora as formas de desgaste apresentem características comuns, existem também diferenças fundamentais. Tais diferenças são observadas, principalmente, por diferentes mecanismos microscópicos de desgaste que ocorrem em cada uma delas que é geralmente determinada pelas propriedades mecânicas, estabilidade química do material, a temperatura dentro da zona de contato e as condições operacionais [2].

2.1.1 DESGASTE EROSIVO

O desgaste erosivo é causado pelo impacto de partículas de sólido ou líquido contra a superfície de um objeto. Ocorre numa grande variedade de máquinas e também é comum aparecer com outras formas de desgaste. A resistência mecânica não garante a resistência ao desgaste e um estudo detalhado de características do material é necessário para a minimização de desgaste. Na Figura 1, pode-se observar o desenho esquemático do desgaste erosivo [2].

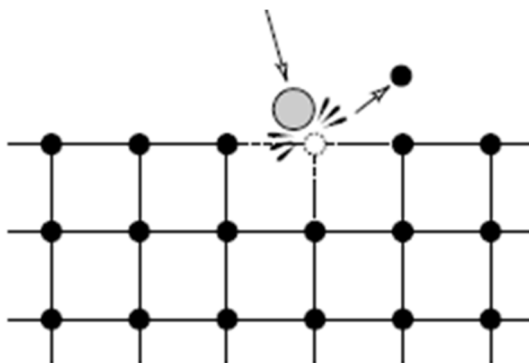


Figura 1: Desenho esquemático do desgaste erosivo [2].

2.1.2 DESGASTE POR *FRETTING*

A característica fundamental do *fretting* é a sua pequena amplitude de deslizamento que dita as características únicas presentes nesta forma de desgaste. Sob certas condições de carga normal e tangencial, é aplicado um movimento microscópico dentro da zona de contato. Um dos traços característicos de *fretting* é que o desgaste produz detritos que muitas vezes são mantidos dentro da

zona de contato devido ao deslizamento de pequena amplitude. A acumulação de detritos de desgaste gradualmente separa as duas superfícies e, em alguns casos, podem contribuir para acelerar o processo de desgaste por abrasão. Na Figura 2, pode-se observar o desenho esquemático do desgaste por *fretting* [2].

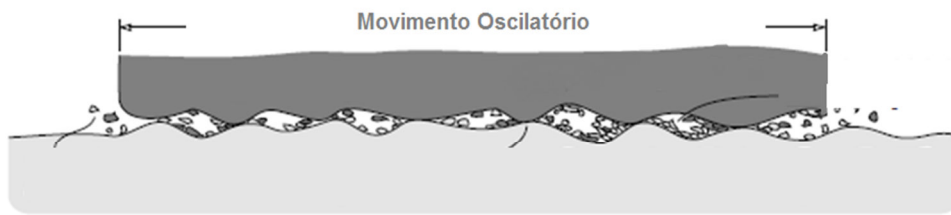


Figura 2: Desenho esquemático do desgaste por *fretting* [2].

2.1.3 DESGASTE ADESIVO

O desgaste adesivo é uma forma muito grave de desgaste caracterizado por altas taxas de desgaste. A maioria dos sólidos irá aderir a outro sólido se certas condições de contato são satisfeitas e, na separação desses dois materiais, o material mais forte desprende partículas do material mais fraco. A observação real de aderência é possível em sistemas de alto vácuo que permite a preparação de superfícies livres de contaminantes. Na Figura 3, pode-se observar o desenho esquemático do desgaste adesivo [2].

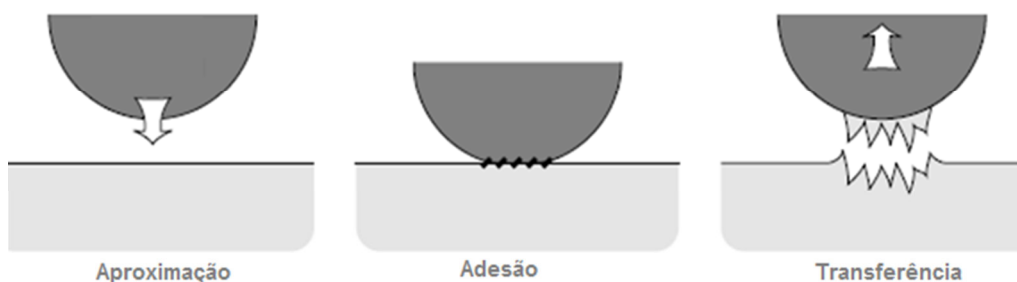


Figura 3: Desenho esquemático do desgaste adesivo [2].

2.1.4 DESGASTE POR FADIGA

O termo fadiga de contato ou fadiga de superfície é usado para explicar os danos causados por uma superfície de contato rolante repetidamente. Refere-se ao dano inicial sobre uma superfície lisa e é, frequentemente, usado no contexto de rolamentos. Certo número de ciclos de contato de rolamento deve decorrer antes que defeitos de superfície sejam formados. A falha de um rolamento causada por fadiga de contato é geralmente súbita e altamente indesejável, especialmente quando o rolamento é imprescindível para o bom funcionamento da máquina. Na Figura 4, pode-se observar o desenho esquemático do desgaste por fadiga [2].



Figura 4: Desenho esquemático do desgaste por fadiga [7].

2.1.5 DESGASTE ABRASIVO

O desgaste abrasivo é muito comum e grave, pois é responsável por rápidos e severos danos a materiais, se não for devidamente controlado. Este surge quando partículas ou superfícies sólidas duras deterioram, pelo movimento e ação de uma carga normal, outra superfície mais macia, a depender da dureza de cada material envolvido [2].

Existe uma relação estreita entre as propriedades do material e a resistência ao desgaste e, em particular [2]:

- Há uma proporcionalidade direta entre a resistência ao desgaste em relação à dureza;
- A resistência ao desgaste relativo aos materiais metálicos não depende da dureza que adquirem no trabalho a frio de endurecimento por deformação plástica;
- O tratamento térmico das superfícies geralmente melhora a sua resistência à abrasão;
- Existe uma relação linear entre a resistência ao desgaste e a dureza para materiais não metálicos rígidos.

Qualquer material, mesmo se a maior parte a maior for muito macia, pode provocar o desgaste abrasivo se partículas duras estiverem presentes. Por exemplo, um material orgânico, tal como cana de açúcar, está associado ao desgaste abrasivo dos cortadores de cana e trituradores por causa da pequena fração de sílica presente nas fibras vegetais. Uma das principais dificuldades na prevenção e controle de desgaste abrasivo é que o termo “desgaste” não descreve precisamente os mecanismos de desgaste envolvidos. Há de fato, quase sempre, diferentes mecanismos de desgaste atuando em conjunto, todos com características diferentes [2].

O enfoque deste trabalho é o desgaste microabrasivo que se encaixa no conceito de desgaste abrasivo. Alguns parâmetros podem ser utilizados para diferenciar um do outro, como o tamanho médio das partículas e o coeficiente de desgaste. O tamanho médio das partículas abrasivas para cada um dos casos pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1: Diferença entre desgaste abrasivo e microabrasivo [8].

	Desgaste Abrasivo	Desgaste Microabrasivo
Tamanho médio da partícula abrasiva	50 – 250 μm	3 – 6 μm

Ao longo deste trabalho serão encontradas frases envolvendo os termos desgaste abrasivo e microabrasivo. Isso pode fazer com que surjam algumas dúvidas. Quando isso ocorrer, pode-se entender que o que for dito para um caso serve para o outro alterando apenas a escala da partícula utilizada [2].

2.1.5.1 MECANISMOS DE DESGASTE ABRASIVO

Inicialmente pensou-se que o desgaste abrasivo por grânulos ou asperezas rígidas se assemelhava muito a um corte. No entanto, o exame microscópico revelou que o processo abrasivo envolve outros mecanismos mais complexos e foram diferenciados em quatro. O desgaste abrasivo por corte, fratura, fadiga por repetição e destacamento do grão [2].

Descreve-se a seguir, de forma resumida, cada um dos mecanismos envolvidos e o desenho esquemático correspondente a cada uma dos casos pode ser observado na Figura 5 [2].

- Corte: é o modelo clássico, onde um grão afiado ou de grande aspereza corta a superfície mais macia. O material que é cortado é removido como detritos de desgaste;
- Fratura: quando o material desgastado é frágil, a fratura da cerâmica da superfície desgastada pode ocorrer. Neste exemplo, os detritos de desgaste são o resultado da convergência da rachadura;
- Fadiga por repetição: quando um material dúctil é desgastado por um grão abrasivo, no lugar do corte ocorre a deformação da superfície pela repetição. Neste caso, os detritos de desgaste são o resultado de fadiga do metal;
- Destacamento de grão: representa desprendimento de grãos. Este mecanismo aplica-se principalmente à cerâmica, onde a ligação entre os grãos é relativamente fraca. O grão inteiro é perdido como detrito do desgaste.

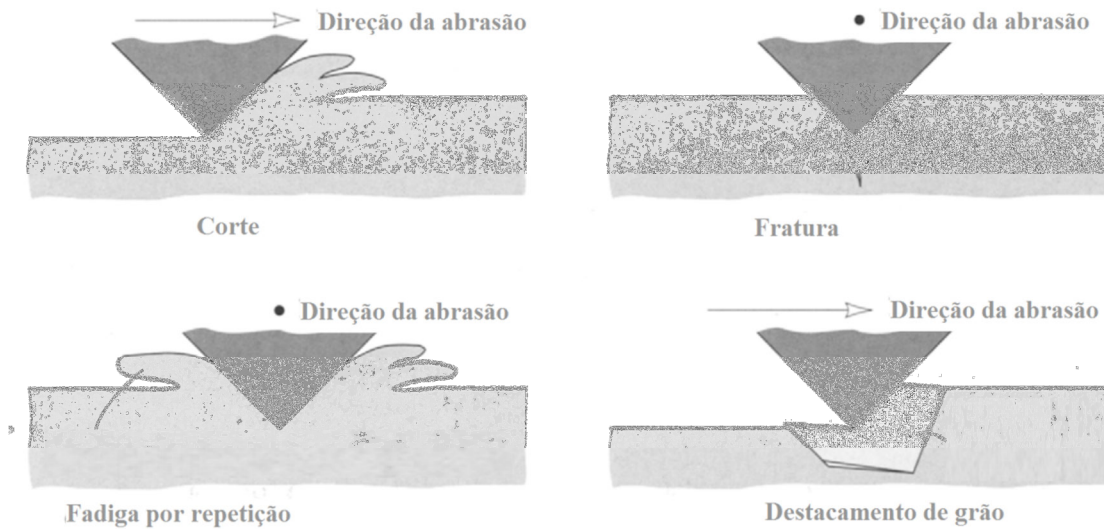


Figura 5: Mecanismos de desgaste abrasivo [2].

2.1.5.2 MODOS DE DESGASTE ABRASIVO

A forma como os grãos passam sobre a superfície a ser desgastada determina a natureza do desgaste abrasivo. E na literatura podem-se observar dois modos básicos deste desgaste: a dois corpos e a três corpos [2].

O desgaste abrasivo a dois corpos é exemplificado pela ação de uma lixa sobre a superfície. Superfícies duras ou grãos rígidos passam sobre a superfície desgastada como uma ferramenta de corte. Já no desgaste abrasivo a três corpos os grãos são livres para rolar e deslizar sobre o substrato. Os dois modos de desgaste podem ser observados na Figura 6 [2] e [9].

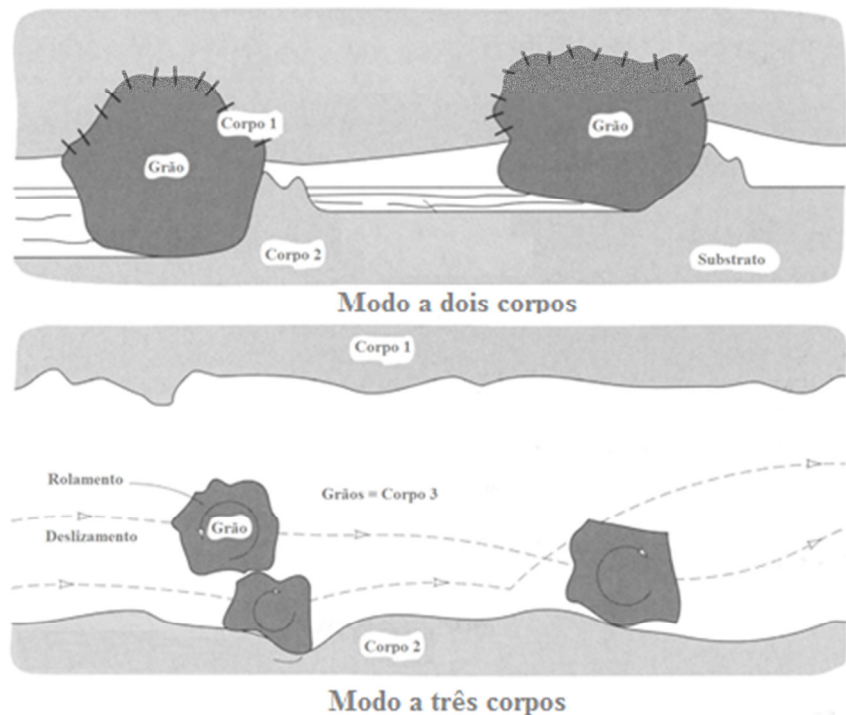


Figura 6: Modos de desgaste abrasivo [2].

Até recentemente estes dois modos de desgaste abrasivo eram considerados similares, entretanto, algumas diferenças significantes foram posteriormente observadas. Chegou-se a conclusão que o desgaste abrasivo a três corpos é cerca de 10 vezes mais lento que o a dois corpos. Propriedades como a dureza da superfície e a força com que o grão passa sobre a superfície mais mole são importantes para o desgaste a três corpos, mas não são para o outro caso. Aparentemente o material desgastado é removido por uma série de arranhões no caso a dois corpos. Já no a três corpos, no lugar disso, a superfície desgastada apresenta uma topografia aleatória que sugere uma remoção gradual das camadas de superfície pelo sucessivo contato com os grãos [2].

2.1.5.3 RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO DOS MATERIAIS

A base da resistência ao desgaste abrasivo dos materiais é a dureza e, geralmente, é reconhecido que os materiais rígidos permitem taxas de desgaste mais lento do que os materiais mais macios. E um exemplo dessa relação pode ser observado na Figura 7 que apresenta a resistência ao desgaste abrasivo de alguns materiais ao carbeta de silício [2].

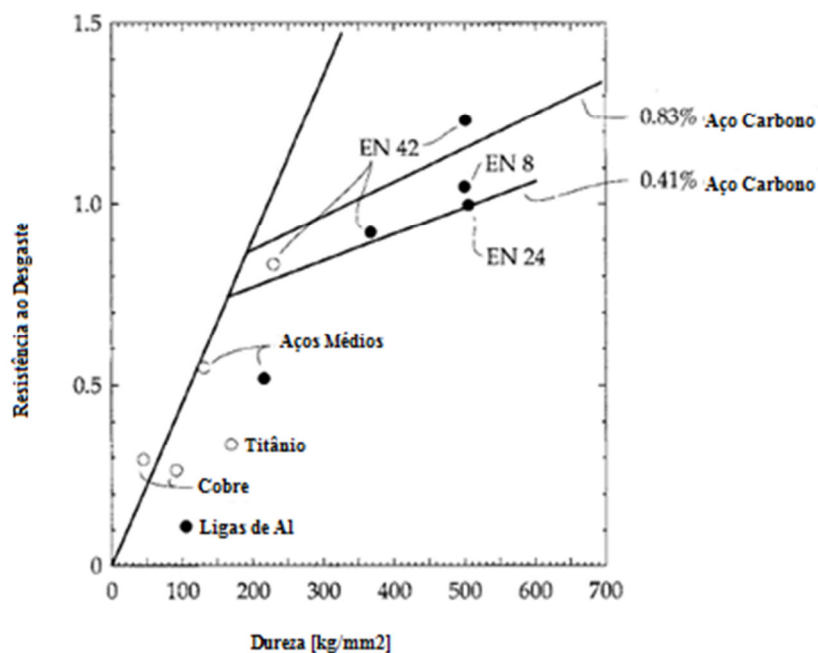


Figura 7: Resistência ao desgaste abrasivo versus dureza de metais puros e suas ligas [2].

Observando os dados acima se pode atestar a afirmação de que quanto maior a dureza de um material, maior será a sua resistência ao desgaste. Assim, mecanismos que elevem a dureza dos materiais são bem vindos quando o objetivo é minimizar o desgaste abrasivo de um sistema.

2.2 TITÂNIO E LIGAS DE TITÂNIO

O titânio (Ti), na crosta terrestre, é o nono elemento mais abundante e o quarto metal, ocorrendo na natureza na forma de combinações químicas, geralmente, com oxigênio e ferro. O primeiro relato

da descoberta deste elemento é atribuído a *Wilhelm Gregor*, um mineralogista amador no ano de 1791, mas só foi por volta de 1950 que os primeiros produtos comerciais se tornaram disponíveis, principalmente por a extração do titânio dos minerais ter se tornado economicamente viável. Desde então, a produção desse material aumentou com uma média anual de cerca de 8 % ao longo dos últimos 50 anos [10] e [11].

O aumento se deu por o Ti ser tecnicamente superior como material para estruturas, por apresentar apenas 60 % do peso do aço, por ter excelentes propriedades mecânicas, como: resistência à corrosão e às variações de temperatura; além de permitir sua manufatura nas mais diversas formas requeridas. Na Tabela 2 podem-se observar as principais propriedades do Ti [10] e [11].

Tabela 2: Propriedades do Ti [12] e [13].

Propriedade	Valor
Número atômico	22
Massa atômica	47,867 g/mol
Ponto de Fusão	1650 °C
Ponto de Ebulição	3287 °C
Densidade	4,50 g/cm ³
Dureza	186 HV
Média de Calor Específico	0,528 J/g*°C
Condutividade Térmica	17 W/m*K
Resistividade Elétrica	5,54*10 ⁻⁵ Ω*cm
Módulo de Elasticidade	116 GPa

O Ti existe em duas formas cristalinas. Em temperatura ambiente, o Ti puro tem uma estrutura cristalina hexagonal compacta conhecida como fase α . A 883 °C, transforma-se em uma estrutura cúbica de corpo centrado conhecida por fase β . A manipulação da variação dessas estruturas cristalográficas proporciona o desenvolvimento de uma vasta gama de ligas e propriedades [10].

Na formação de suas ligas o Ti facilita a formação de soluções sólidas substitucionais com uma variedade de elementos desde que a diferença de tamanho de seus átomos seja de até 15 %. E os componentes das ligas de Ti têm influências diferentes nas propriedades da liga formada. Por exemplo, o Al, Zr e Mo aumentam a resistência ao calor, enquanto a resistência à corrosão pode ser incrementada por Mo e Zr. Na Tabela 3 podem-se observar os mais comuns elementos de ligas utilizados [10] e [14].

Tabela 3: Elementos de liga mais comuns [10].

Elemento de Liga	Valores (wt. %)
Alumínio	2 a 7
Estanho	2 a 6
Vanádio	2 a 20
Molibdênio	2 a 20
Cromo	2 a 12
Cobre	2 a 6
Zircônio	2 a 8
Silício	0,2 a 1

Recentemente, ligas que contêm elementos atóxicos como o Zr vêm sendo utilizados. O Zr pertence à mesma família da tabela periódica que o Ti e apresenta um raio atômico igual a 1,62 Å, enquanto o Ti tem 1,47 Å de raio, estando na faixa aceitável para formação de solução sólida anteriormente citada. A junção do Zr ao Ti tem como resultado excelentes propriedades mecânicas, boa resistência à corrosão e biocompatibilidade [13], [14] e [15].

Esta liga tem uma vantagem porque a temperatura do ponto de fusão do Ti (1650°C) diminui com o aumento da porcentagem de Zr na composição (1560°C para o Ti-40Zr), facilitando o processo de fundição. Essa redução da temperatura de fundição do Ti pode aumentar a reatividade com o oxigênio, reduzir o risco de preenchimento de forma inadequada do molde e, conseqüentemente, a porosidade que é devido à alta diferença de temperatura entre a liga fundida e seu molde. Na Figura 8 pode-se observar o diagrama de fases do Ti-Zr [16].

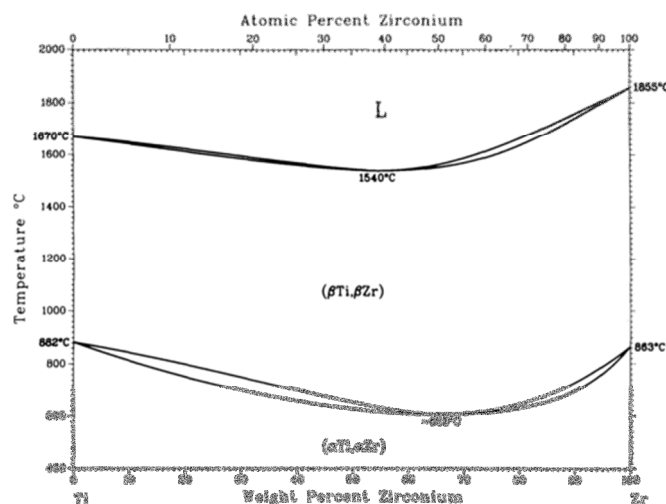


Figura 8: Diagrama de Fase Ti-Zr [17].

Observa-se também o endurecimento por solução sólida que aumenta a resistência do sistema de deslizamento de grãos, fazendo com que esta liga apresente dureza em torno de 350 HV, segundo estudo de *Wen-Fu Ho*, em 2008, que é quase o dobro da dureza para o Ti puro, mantendo a estrutura cristalina hexagonal compacta [13].

2.2.1 APLICAÇÕES

O Ti e suas ligas têm propriedades muito atrativas habilitando o seu uso em muitas indústrias. Algumas de suas vantagens são: excelente resistência à corrosão e erosão; baixa densidade, dando relações específicas entre força e peso, permitindo leveza e estruturas mais fortes; capacidade de altas temperaturas e, em alguns casos, capacidade criogênica. É muito utilizado em aplicações aeronáuticas, marítimas, ambientes corrosivos, equipamentos esportivos e medicina [10].

Este material é completamente neutro ao corpo humano e é frequentemente usado no campo médico para substituir válvulas do coração, juntas, ossos e dentes. Em substituição do fêmur e juntas já é conhecido e utilizado a mais de 30 anos. Sua biocompatibilidade e força o tornam um bom material para dentes e outras próteses orais. O osso natural adere à superfície do óxido de Ti sem adição de revestimento [11].

Ao mesmo tempo, o Ti e suas ligas também encontram uso em aplicações de engenharia mecânica por causa de suas propriedades tribológicas, como: baixa resistência ao desgaste abrasivo e alto coeficiente de fricção. A baixa resistência ao desgaste pode ser melhorada pela aplicação de diferentes tratamentos de superfície e revestimento [11]:

- Induzir uma tensão de compressão;
- Diminuir o coeficiente de fricção;
- Aumentar a dureza.

A fricção é relacionada à estrutura cristalina e a reatividade do Ti que pode ser superada alterando a natureza da superfície usando tecnologias de engenharia de superfície como diferentes tratamentos termoquímicos e de revestimentos, então essa superfície não é mais Ti, mas sim um duro componente de Ti [11].

2.3 FILMES FINOS

O tratamento de superfícies através da deposição de filmes finos faz parte da ciência que estuda novos materiais. Avanços nesta área estão ligados diretamente à tecnologia de deposição de filmes finos em materiais cerâmicos, aços e metal duro, que têm recebido cada vez mais importância em aplicações industriais, como: proteção de um material de base que está sujeito a esforços mecânicos envolvendo desgaste mecânico e corrosivo [18].

A deposição deste revestimento nas aplicações tribocorrosivas tem apresentado considerável crescimento devido às propriedades superiores destes filmes, tais como: alta estabilidade térmica, alta dureza, alta resistência à abrasão e ao desgaste mecânico, e corrosivo [18].

Um filme fino é uma película delgada de um material sólido, geralmente produzida à base de um metal de transição, depositada sobre um substrato (amostra), com uma espessura que varia entre 1 a 10 μm . Porém, não é só a espessura que determina se um revestimento é ou não um filme fino, mas sim a razão entre a espessura do filme e a espessura do substrato. A razão entre a área de sua superfície e seu volume é tão grande que as propriedades de superfície se tornam muito importantes, uma vez que, pelo menos ao meio exterior, o material a ser revestido possuirá as mesmas propriedades do filme fino [18] e [19].

Normalmente os filmes são formados por grãos monocristalinos. O tamanho dos grãos depende das condições da deposição e dos tratamentos térmicos posteriores. Grãos maiores geralmente estão

associados a temperaturas maiores de processamento. A rugosidade de um filme está relacionada com o tamanho dos grãos. Deposições em alta temperatura tendem a produzir filmes menos rugosos. E, a densidade de um filme, pode dar informações sobre a sua estrutura física [18].

2.3.1 FORMAÇÃO DE FILMES FINOS

Filmes finos podem ser produzidos por uma grande variedade de processos, independente do processo, a nucleação e o crescimento estão presentes. O processo tem início na colisão dos átomos com a superfície e a perda de energia para esta. Estes átomos são absorvidos e podem se difundir na superfície interagindo com outros átomos. Uma fração dos átomos absorvidos pode continuar a crescer em tamanho e formar núcleos [19] e [20].

À medida que mais átomos interagem, os núcleos crescem. Quando os núcleos entram em contato uns com os outros ocorre a coalescência, resultando em estruturas maiores. O processo continua formando canais e buracos de substrato exposto, preenchidos por novos núcleos, formando o filme contínuo. Todo esse processo pode ser observado na Figura 9 [19].

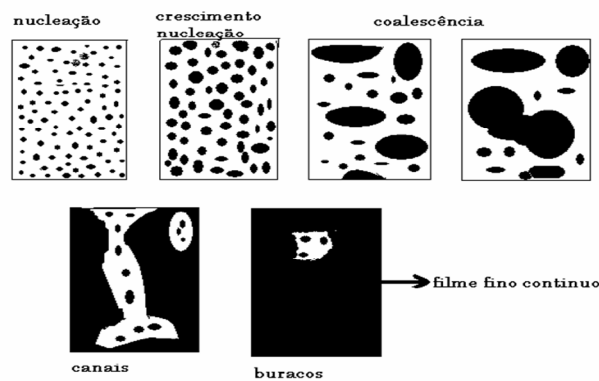


Figura 9: Ilustração esquemática dos primeiros estágios do crescimento do filme [21].

A microestrutura dos filmes pode ser representada pelo modelo de zonas de Thornton, observado na Figura 10, onde se relaciona as características morfológicas das camadas com a pressão do gás de trabalho e a razão T/T_m , onde T é a temperatura da amostra e T_m é a temperatura absoluta de fusão do material que está sendo depositado [21].

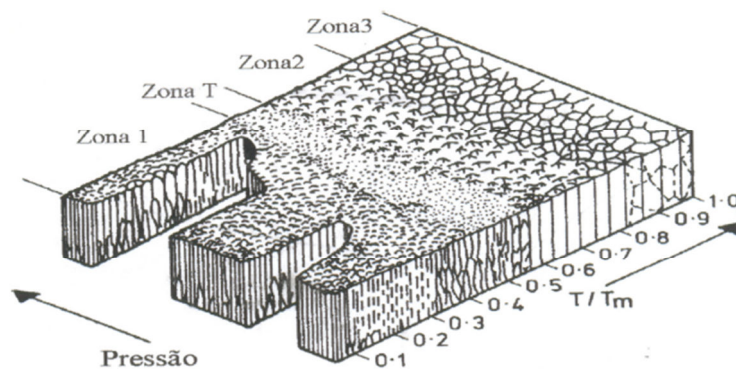


Figura 10: Modelo de zonas de Thornton [21].

- Zona 1: presença de grãos colunares que se tornam finos a medida que crescem. Possui um vazio significativo entre as colunas. Este tipo de estrutura possui piores propriedades mecânicas e uma péssima adesão do revestimento ao substrato;
- Zona T: grãos fibrosos não bem definidos e com interligações suficientemente densas para produzir excelentes propriedades mecânicas, elétricas e óticas. Este tipo de estrutura é desejado em diversas aplicações de engenharia de superfície. Apresenta uma significativa diminuição na quantidade de defeitos do revestimento;
- Zona 2: apresenta significativa difusão superficial de grãos. É caracterizada por colunas que possuem tendência de acabarem sob forma poligonal na superfície, sendo razoavelmente densas;
- Zona 3: Ocorre uma difusão superficial e volumétrica, sendo ambos os mecanismos determinantes da microestrutura do filme. Os grãos são equiaxiais assemelhando-se aos obtidos em processo de fundição [21].

Os esforços para aumentar o patamar tecnológico atual e a busca incessante por materiais com propriedades melhores, levaram ao desenvolvimento de revestimentos específicos voltados para suprir a demanda de revestimentos diferenciados, destacando-se o Ti, TiN e ZrN [6].

2.3.2 DEPOSIÇÃO DOS FILMES FINOS

As principais formas de deposição de filmes finos é a deposição física a vapor (PVD) e a deposição química a vapor (CVD). Os processos PVD são resumidos à deposição de um material, inicialmente na fase sólida, obtido por meio de evaporação e subsequente condensação sobre um substrato para formação de um filme. Já os processos associados à técnica de CVD são geralmente definidos como a deposição de um material, inicialmente na fase de vapor ou líquida, sendo este material resultado de numerosas reações químicas [6].

A temperatura de deposição por CVD é elevada e por isso nem sempre pode ser aplicada devido à sensibilidade à temperatura apresentada por alguns substratos. Alternativamente, o processo PVD pode ser utilizado nesses casos, como neste trabalho, para que se evite a alteração da microestrutura do substrato, já que apresenta menores temperaturas de deposição [22].

O PVD é usado para aplicar revestimentos pela condensação do vapor no vácuo. O ambiente extremamente limpo, criado pelo vácuo, resulta em uma quase perfeita adesão entre os átomos do material de revestimento e do material do substrato. A tecnologia de PVD é extremamente versátil. Suas aplicações vão desde a decoração até a microeletrônica, seguindo até um significativo ramo dentro da engenharia, química e das indústrias [2].

Nos últimos anos, um grande número de técnicas especializadas de PVD foram desenvolvidas e extensamente aplicadas. Variam em função do meio de obtenção do vapor ou mesmo da existência ou não de reações químicas durante o processo. Muitas vezes em PVD, um gás reativo (N_2 , CH_4 ou O_2) é

introduzido no processo a fim de promover reações químicas com espécimes evaporadas para a obtenção do composto. Nestes casos chamados de processo reativo [2] e [20].

O processo PVD se divide em duas partes, a obtenção da fase vapor e a deposição do revestimento. A obtenção aqui estudada será a evaporação por meios térmicos e a deposição iônica, por ser a forma de deposição que será aplicada neste trabalho.

a) Evaporação por meios térmicos:

A evaporação é um dos mais antigos, simples e baratos métodos de deposição a vácuo. É usado na deposição de revestimentos de até 1 mm de espessura. Durante o processo o material de revestimento é vaporizado pelo emprego de uma fonte de calor / energia. Átomos na forma de vapor viajam em linha reta da fonte de material de revestimento até o substrato onde a condensação acontece, formando o revestimento. Neste processo, a energia cinética dos átomos atingindo o substrato é resultando somente da energia térmica [2] e [20].

Sobre o substrato, os átomos perdem energia rapidamente e ocorre uma pequena interação entre átomos da superfície do substrato e os átomos do filme. Conseqüentemente, a adesão é fraca e pode ser ainda mais prejudicada por contaminantes no substrato [20].

Alguma melhora pode ser alcançada pelo aquecimento do substrato promovendo a interdifusão de átomos do substrato e do filme, mas a magnitude da resistência destas ligações é normalmente muito baixa para aplicações tribológicas. Outra limitação do processo é referente ao transporte de átomos no vácuo, pois estes viajam da fonte para o substrato em linhas retas, dificultando a uniformidade do filme e o revestimento de perfis complexos [2].

b) Deposição assistida por feixes de íons:

A evaporação por meios térmicos é auxiliada pela deposição iônica, que pode ser chamada de deposição auxiliada por feixes de íons, que utiliza bombardeamento simultâneo ou periódico de partículas energéticas já evaporadas. As partículas energéticas usadas para o bombardeamento iônico, geralmente é um gás inerte ou reativo, ou em alguns casos íons do material do filme. A deposição iônica pode ser feita em um ambiente de plasma ou a vácuo, desde que os íons sejam produzidos em um injetor separado de íons [20] e [18].

A vantagem principal do *ion beam assisted deposition*, seu esquema pode ser observado na Figura 11, é que o fluxo dos átomos evaporados e o fluxo de íons na superfície do substrato, bem como a energia de íons, são controlados independentemente. Os átomos evaporados são depositados sobre o substrato simultaneamente exposto aos íons. Durante a deposição, é formada uma camada intermediária fisicamente mista que se situa entre a superfície do substrato e o filme produzido. A presença dessa camada pode melhorar a aderência do filme. Assim, o efeito do feixe de íons no crescimento do filme depende da espécie de íons, da energia de íons e da razão entre os fluxos do feixe de íons incidente e dos átomos evaporados transportados à superfície do substrato [18].

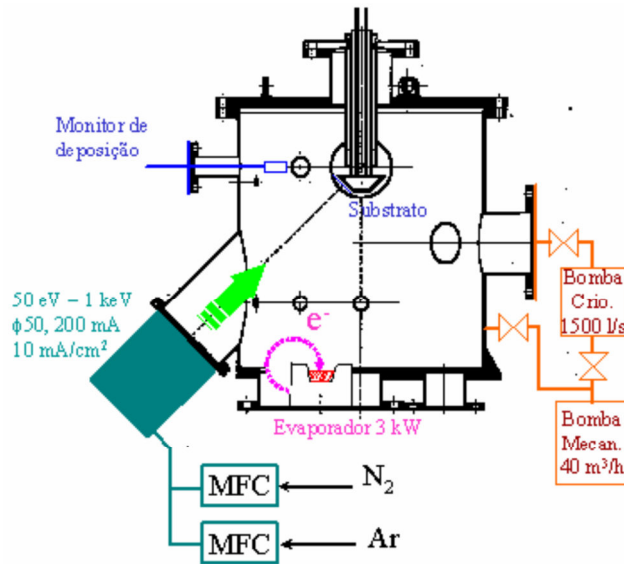


Figura 11: Esquema do método de deposição assistida por feixe de íons [18].

As características da combinação destes dois métodos são:

- Boa aderência dos filmes depositados;
- Aplicabilidade na deposição em baixas temperaturas;
- Facilidade da modificação e controle das características físicas e químicas de filmes finos com os controles independentes da energia e da corrente de íons incidentes e da velocidade de deposição.

2.3.3 FILMES FINOS MULTICAMADAS

Revestimentos compostos por multicamadas têm recebido atenção, porque têm flexibilidade para combinar dois ou mais filmes finos de diferentes materiais com estruturas diferentes e propriedades, que podem trazer aos novos sistemas, não apenas as vantagens de cada constituinte, mas também algumas características superiores a qualquer outro componente [23].

As estruturas multicamadas são geralmente obtidas pela deposição sequencial de materiais diferentes, de dimensões nanométricas, sobre a superfície de um substrato. A espessura de cada par de camadas desempenha um papel importante nas propriedades dos revestimentos. Vários sistemas multicamadas, incluindo TiN/Zr, já foram desenvolvidos e apresentaram melhores propriedades quando as características iniciais do substrato [23].

A Figura 12 apresenta, esquematicamente, um revestimento com uma estrutura do tipo multicamadas formado pelos materiais *A* e *B*, apresentando o período da bicamada ou comprimento de modulação Λ . Desta forma, é possível dizer que [6]:

$$\Lambda = t_A + t_B \quad (1)$$

onde t_A e t_B correspondem a espessura que compõe as camadas dos revestimentos referentes aos materiais *A* e *B*, respectivamente.

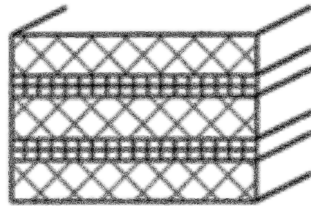


Figura 12: Desenho esquemático de um revestimento do tipo multicamadas [6].

2.3.4 NITRETO DE TITÂNIO e NITRETO DE ZIRCÔNIO

O ZrN tem atraído o interesse industrial em aplicações como revestimentos protetores e decorativos. Ele é um material refratário, tem cor dourada e estrutura cristalina cúbica à temperatura ambiente. Além disso, ZrN é um bom condutor de calor e eletricidade, resistente ao desgaste, corrosão e abrasão. Finalmente, devido a sua grande afinidade por oxigênio, o ZrN adere muito bem à maioria dos substratos, devido à formação de oxinitreto de zircônio (ZrN_xO_y) na interface. O composto formado pela deposição de filmes finos de ZrN, tem muitas aplicações, como revestimento protetor de ferramentas de corte e em moldes, barreira a difusão e contatos elétricos. Na Figura 13 pode-se observar uma ferramenta revestida com esse material [24].



Figura 13: Ferramentas revestidas por ZrN [25].

Já o TiN é um material cerâmico de cor “ouro velho” com uma estrutura cristalina do tipo cúbica de face centrada. É um revestimento fortemente adesivo, de superfície lisa e baixo coeficiente de atrito. Apresenta uma boa resistência à corrosão e ao desgaste, o que faz com que este revestimento seja um candidato ideal a várias aplicações tribológicas. Por isso, é largamente usado em diversas aplicações industriais, como em ferramentas de corte e vários componentes mecânicos, como observado na Figura 14 [22], [26], [27] e [28].



Figura 14: Ferramentas revestidas por TiN [29].

Estes dois materiais, quando utilizados, aumentam principalmente a resistência ao desgaste, estendendo a vida útil dos substratos em que são depositados em mais de 100%, quando comparadas as não recobertas. Suas propriedades mecânicas podem ser observadas na Tabela 4 [6] e [19].

Tabela 4: Propriedades mecânicas, térmicas e estruturais do TiN e ZrN [30] e [10].

Material	Microdureza	Ponto de fusão	Densidade
TiN	2300 HV	2930 °C	5,22 g/cm ³
ZrN	2800 HV	2960 °C	7,09 g/cm ³

2.3.4.1 PROPRIEDADES DO Ti, TiN e ZrN COMO FILME FINO

Tratamentos de superfície têm assumido um papel de crescente importância entre as técnicas de processamento de materiais pela possibilidade de alterar as propriedades físico-químicas, estruturais, magnéticas, térmicas, elétricas e mecânicas dos materiais sem a necessidade de reprocessamento de todo o material. Em determinadas aplicações, quando o ambiente de trabalho é agressivo, é necessário que o material tenha boa resistência ao desgaste, à propagação de trincas e ao impacto. Nestes casos, uma excelente alternativa consiste em nitretar a superfície do substrato [24].

Revestimentos de metais de transição nitretados por PVD vêm sendo intensamente estudados desde o início de 1980. TiN e, mais recentemente, ZrN têm apresentado excelente resistência ao desgaste e corrosão [31].

O TiN é utilizado para revestir ferramentas de corte pelo fato de a dureza do TiN elevar o tempo de vida dessas ferramentas. A propriedade que faz com que o TiN seja tão atrativo na indústria é a sua alta dureza, baixo coeficiente de atrito, boa estabilidade térmica e química, em adição a boa adesão e resistência a corrosão. Sua dureza é resultado do elevado grau de ligação metálica e covalente. Isto acontece pela presença de pequenos átomos de separação, sua alta energia de superfície e elevado módulo elástico. Outras duas propriedades que faz com que materiais baseados em TiN sejam tão comercializados é a densidade e elevado ponto de ebulição [32].

Já o ZrN exibe propriedades adequadas para uma grande variedade de aplicações industriais. Seu brilho dourado e sua resistência ao desgaste permitiu o uso do ZrN como revestimento decorativo muito usado em aplicações de joalheria. Atualmente, também se tornou importante na microeletrônica devido as suas propriedades químicas e elétricas [32].

A dureza é, provavelmente, a propriedade mais extensamente estudada e seu valor inicial para o Ti e suas ligas variam usualmente entre 200 a 400 HV. Sabendo que a dureza está diretamente relacionada à resistência ao desgaste, a melhoria das propriedades de desgaste das ligas de Ti através do revestimento por filmes finos aumenta a dureza devido ao aumento da concentração de nitrogênio e a formação das novas fases, como o TiN e ZrN, sobre a superfície do material [2], [10], [33] e [34].

Tudo isso só é possível se existir uma dureza suficiente do material de substrato. Para um substrato que é muito macio existe o risco do TiN ou do ZrN fraturar com o aumento da carga aplicada e da espessura do filme por ocorrer uma significativa deformação plástica, onde a espessura do filme influencia diretamente no coeficiente de atrito e no tempo de vida do revestimento [33] e [34].

A superfície de cobertura depende da dureza do filme e da força de adesão, que podem ser relacionados com alguns parâmetros fundamentais, tais como a orientação preferida, a proporção de N/Ti e N/Zr, a tensão residual e da composição química da região de interface. Estudos prévios de difração de raios-x revelaram que os revestimentos de TiN apresentam orientações preferencias e que a tensão residual do filme é geralmente compressiva no plano no filme, com um valor de vários GPa [22].

Já o Ti como revestimento é utilizado não para incrementar a dureza do revestimento como um todo, mas sim para diminuir o stress residual causado pela deposição sucessiva de filmes finos. Nessa deposição tende-se a compactar o maior número de átomos possíveis em um pequeno espaço e esses átomos buscam se estabilizar de forma a diminuir a força que eles estão sofrendo para se manterem em seu lugar, tornando a delaminação mais sucessível [35].

Na Figura 15 podem-se observar os efeitos do aumento da espessura da camada de Ti na diminuição da tensão residual. Esta camada intermediária garante também uma melhor aderência do revestimento ao substrato e melhora a resistência ao desgaste abrasivo [35].

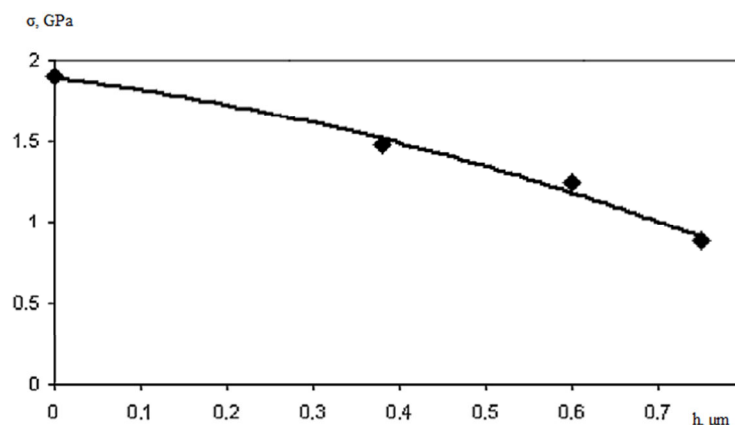


Figura 15: Dependência do stress residual de uma camada de TiN com a espessura h de uma camada de Ti [35].

2.4 PARTÍCULAS ABRASIVAS

As partículas abrasivas são definidas quando podem causar um rápido e eficiente desgaste abrasivo. Na maioria dos casos, a dureza do material deve ser menor que 0,8 da dureza da partícula para que a rápida abrasão ocorra. Entretanto, tem sido observado que uma quantidade limitada de desgaste e danos à superfície ocorre a menos que o limite de elasticidade do material exceda ao da partícula abrasiva. Um desgaste abrasivo lento persiste até que a dureza da partícula e do material seja igual. Exemplos de dureza podem ser observados na Tabela 5 [2].

Tabela 5: Dureza de alguns materiais [2].

Substância	Escala de Mohs	Dureza (HV)
Calcita	3	109 – 172
Hermitita	6 – 7	1038
Quartzo	7	1103 – 1260
Pirita	7 – 8	1500
Diamante	10	8000 – 10000
Alumina	9	2085

Uma complexa restrição é a fragilidade da partícula, que pode ser observada na Figura 16. Se os grãos são muito frágeis, eles devem se quebrar em partículas menores, maximizando o desgaste. Se a partícula é muito resistente, os grãos podem não se quebrar e não formar novas faces de corte necessárias para causar um rápido desgaste. As faces cortantes dos grãos vão se desprender e os grãos vão se tornar ineficientes como agentes abrasivos [2].

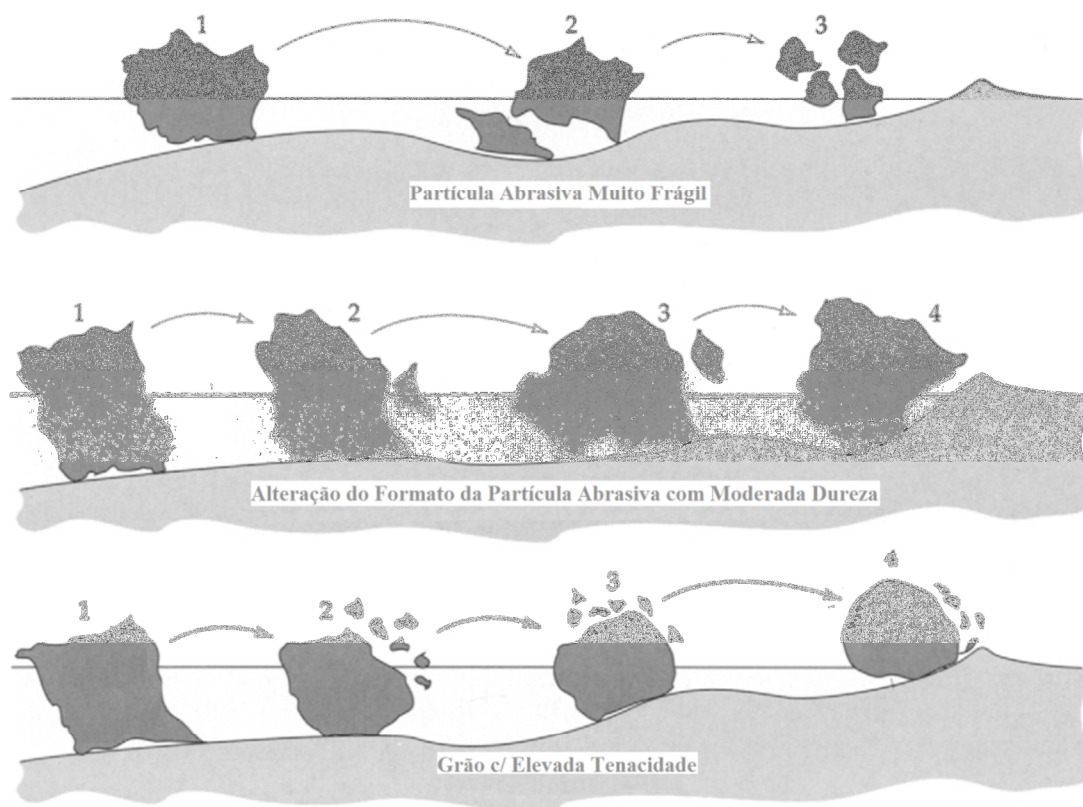


Figura 16: Efeito de grãos frágeis e grãos duros na eficiência de abrasão [2].

Outro fator de controle da abrasividade de uma partícula é o tamanho e a geometria de seu grão, que pode ser observada na Figura 17. O tamanho do grão é geralmente definido como o tamanho mínimo de uma esfera que envolve a partícula inteira. Esta quantidade pode ser medida de forma relativamente fácil por peneiração do pó mineral através de orifícios de diâmetros conhecidos. A geometria de um grão é importante na definição de como a partícula difere de uma esfera ideal e quantas arestas ou cantos estão presentes no grão [2].

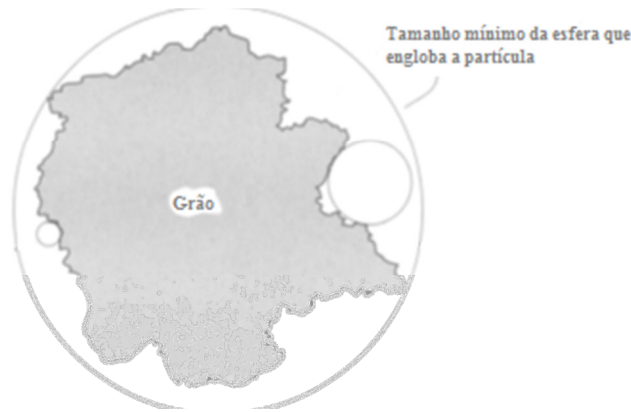


Figura 17: Método de definição de grãos por uma série de raios [2].

2.4.1 SÍLICA

O termo mais conhecido como sílica, refere-se ao dióxido de silício, SiO_2 . O SiO_2 é o composto binário de oxigênio e silício mais comum, sendo inclusive composto dos dois elementos mais abundantes na crosta da Terra. A sílica e seus compostos constituem cerca de 60% em peso de toda a crosta terrestre. Sua estrutura em forma de pó pode ser observada na Figura 18 [36].



Figura 18: Pó de Sílica [37].

Os depósitos de sílica são encontrados universalmente e são minerados para obtenção das "areias de sílica". Comercialmente, a sílica possui numerosas aplicações especializadas, como: cristais piezelétricos, dessecantes, adsorventes, componentes abrasivos, óticos e catalisadores. Essa areia branca é a principal causa de problemas de desgaste abrasivo em materiais que têm uma dureza máxima de 800 HV. Na Tabela 3 pode-se encontrar as principais características do SiO_2 [36] e [2].

Tabela 6: Propriedades mecânicas, térmicas e estruturais do SiO_2 [10] e [38].

Material	Dureza Vickers	Ponto de fusão	Densidade
SiO_2	1103 – 1260 HV	1713 °C	2,65 g/cm ³

2.5 CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES FINOS MULTICAMADAS

2.5.1 TESTE DE DESGASTE MICROABRASIVO

O teste por desgaste microabrasivo é principalmente utilizado para medir a espessura e resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos finos ou camadas de superfície. O ensaio em revestimentos ou camadas finas pode ser feito com suspensões abrasivas ou pastas que contenha pequenas partículas abrasivas de tamanho de micrômetros. Este pequeno tamanho dos grãos abrasivos é escolhido deliberadamente para obter imagens de boa qualidade óptica das calotas de desgaste para determinação precisa da espessura de revestimento [39].

Este tipo de ensaio é aplicado no estudo ao desgaste de materiais metálico e não metálicos, e, dependendo do tipo de equipamento utilizado, é possível se trabalhar com uma força normal entre 0,01 a 5 N e velocidade de rotação da esfera acima de 525 rpm [40].

Dois modos de desgaste podem ser observados durante o ensaio de desgaste microabrasivo: abrasão por rolamento ou abrasão por escorregamento das partículas abrasivas. Pode ocorrer desses dois modos se apresentarem simultaneamente, influenciando, significativamente, a taxa de desgaste do sistema tribológico. Um bom teste de desgaste microabrasivo se dá quando apenas um desses modos de abrasão ocorre [40].

O teste, que pode ser observado no modelo da Figura 19, consiste na rolagem de uma esfera de aço de raio R contra uma amostra na presença de lama com finas partículas abrasivas entre a interface de contato, formando uma calota na amostra. A geometria da calota é determinada em função da geometria esférica da esfera de desgaste [40] e [41].

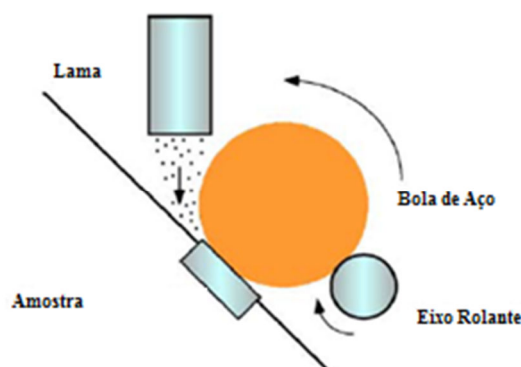


Figura 19: Modelo de teste de desgaste microabrasivo [39].

Dois modelos estão disponíveis: esfera livre (a esfera é acionada por atrito por um eixo de acionamento contra o qual repousa e a carga aplicada à amostra é essencialmente devido ao peso da esfera. geometria do sistema e coeficiente de atrito) e esfera fixa (a esfera é movida positivamente e a amostra é carregada sobre a esfera com a força normal desejada). Exemplo desses dois modelos pode ser observado na Figura 20 [39] e [41].

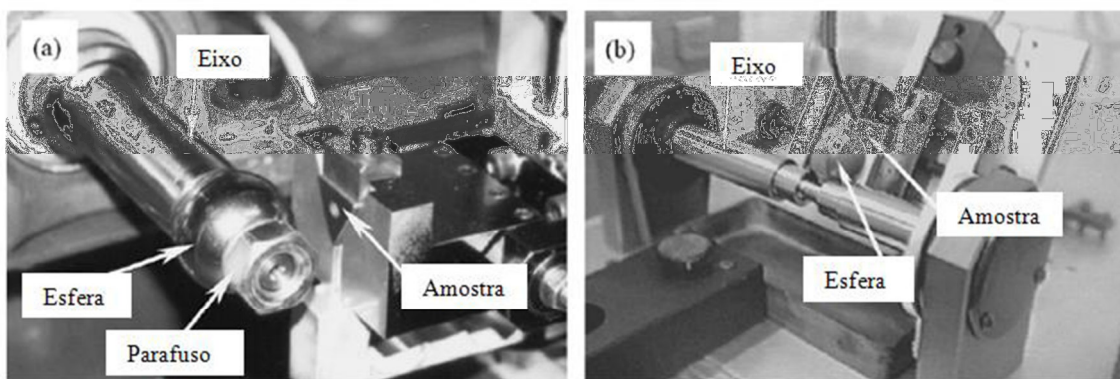


Figura 20: Equipamento para ensaio de desgaste microabrasivo, (a) esfera fixa e (b) esfera livre [34].

As características da esfera que podem afetar o desgaste das placas incluem o material da esfera, a sua dureza e a rugosidade da superfície. As características abrasivas das partículas que afetam o desgaste incluem a forma das partículas e a dureza. Os principais resultados obtidos por este ensaio são a distância de deslizamento, o volume desgastado e o coeficiente de desgaste do material [39].

2.5.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Nos anos 50 foi desenvolvida a microscopia eletrônica de varredura (MEV) que se tornou a técnica de caracterização micro estrutural mais versátil hoje disponível. A interação de um fino feixe de elétrons focalizado sobre a área ou micro volume a ser analisado gera uma série de sinais que podem ser utilizados para caracterizar propriedades da amostra, tais como composição, superfície, topografia, cristalografia, etc [42] e [43].

O aumento máximo conseguido pelo MEV fica entre o microscópio ótico (MO) e o microscópio eletrônico de transmissão (MET). A grande vantagem do MEV em relação ao MO é sua alta resolução, na ordem de 2 a 5 nm (20 - 50 Å), enquanto que no ótico é de 0,5 μm . Comparado com o MET a grande vantagem do MEV está na facilidade de preparação das amostras [44].

Entretanto, não é apenas estas características que fazem do MEV uma ferramenta tão importante e tão usada na análise dos materiais. A elevada profundidade de foco (imagem com aparência tridimensional) e a possibilidade de combinar a análise micro estrutural com a microanálise química são fatores que em muito contribuem para o amplo uso desta técnica. A observação e análise de fratura teve um grande avanço com o uso do microscópio eletrônico de varredura [44].

O MEV pode ser dividido em duas partes principais: a coluna e a câmara de amostras. A coluna é mantida sobre vácuo e contém em sua porção superior um canhão de elétrons e, abaixo deste, lentes magnéticas para a focalização de um fino feixe de elétrons sobre a amostra. A quantidade de corrente no feixe de elétrons incidente sobre a amostra determina a intensidade dos sinais a serem emitidos, a qual, por sua vez, diretamente proporcional ao diâmetro do feixe, implicando no ajuste dos controles do microscópio para a otimização da condição de operação desejada: alta resolução, elevada profundidade de foco ou microanálise. A fonte mais usual de elétrons corresponde à emissão

termiônica gerada a partir de um filamento de tungstênio aquecido a 2700° K. O filamento é mantido em um potencial negativo, com aceleração dos elétrons através do orifício de uma placa de ânodo conectada a terra [42].

A câmara de amostras, observada na Figura 21, conta com diferentes tipos de detectores para captar os sinais gerados na interação elétrons-amostra e um suporte, motorizado ou não, que possibilita a movimentação das amostras em três eixos, além de rotação e inclinação lateral. Duas concepções construtivas são adotadas no que se refere às condições de vácuo, equivalente àquele existente na coluna; necessitando de um detector especial para a coleta de imagens topográficas [42].

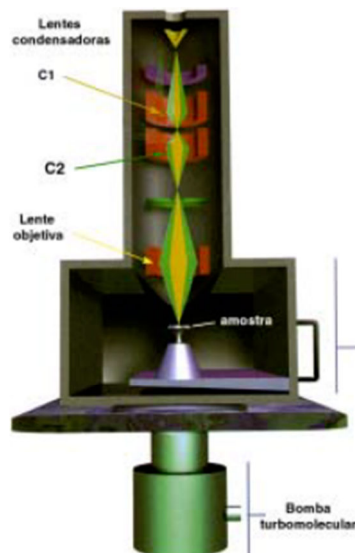


Figura 21: Esquema geral do MEV [42].

A superfície de uma amostra a ser examinada é varrida com um feixe de elétron e o feixe de elétron refletido (ou retroespalhado) é coletado e depois exibido na mesma taxa de varredura sobre um tubo de raio catódico (similar a uma tela de TV) fornecendo informações tridimensionais da superfície da amostra. A imagem que aparece na tela, que pode ser fotografada, representa as características superficiais da amostra. A superfície pode ou não ser polida e atacada, mas deve ser eletricamente condutiva. Ampliações variando de 10 a mais do que 5000 diâmetros são possíveis, do mesmo modo que são possíveis grandes profundidades de campo [42] e [45].

2.6.3 TESTE DE MICRODUREZA

O teste de microdureza, que pode ser observado na Figura 22, pode medir diversas propriedades mecânicas, como a deformação elástico-plástica, adesão do filme ao substrato, tensões residuais e, principalmente, dureza. Este teste é capaz de medir as propriedades de filmes finos, materiais com superfície modificada e revestimentos, por isso se torna importante dentro desse estudo de caracterização, uma vez que filmes finos requerem instrumentos especializados [46].

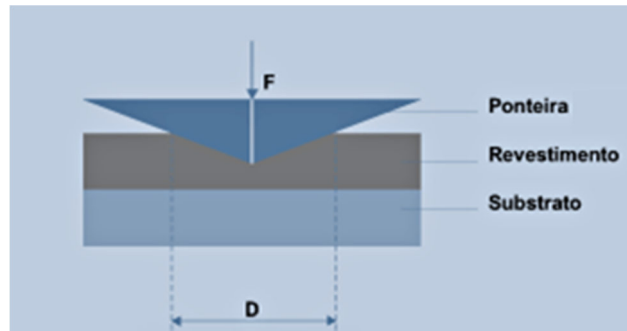


Figura 22: Representação esquemática de um indentedor em um sistema de substrato com revestimento [47].

No teste a esfera, o cone, ou o indentedor piramidal é forçado sobre a superfície do material e forma uma indentação permanente (plástica) que será analisada. O penetrador está localizado no final de um sistema vertical suspenso por molas, ligado a uma bobina eletromagnética a qual faz o controle da força a ser aplicada no penetrador durante o procedimento. O número de dureza (GPa ou kg/mm) é equivalente a pressão média sob o indentedor, é calculado como a carga normal aplicada dividida pela área da superfície (Brinell, Rockwell e Vickers) ou pela área projetada (Knoop e Berkovich) de contato entre o indentedor e o material testado sob carga. Nos testes de dureza por indentação mais recentes, a área de contato é determinada mediante à profundidade da penetração por um microscópio durante os ciclos de carregamento e não carregamento [46] e [48].

O comportamento no ensaio é intrinsecamente diferente porque a área de contato varia continuamente quando o penetrador é introduzido ou retirado da amostra e isso ocorre para se alcançar um alto grau de resolução espacial, que a área de contato seja tão pequena quanto possível, e isto se consegue utilizando-se de penetradores pontiagudos [48].

A dureza de superfícies com revestimento ou filmes finos apenas se torna significativa se a influência do material do substrato poder ser eliminado. Isso geralmente é aceito se a profundidade de indentação não ultrapassar 30% da espessura do filme [46].

2.6 MÉTODOS DE ANÁLISE DE DADOS DO DESGASTE MICROABRASIVO

2.6.1 INTRODUÇÃO

O teste de desgaste microabrasivo ilustrado na Fig. 23 é uma técnica muito útil para obter o coeficiente de desgaste dos materiais e está sendo cada vez mais utilizado em uma vasta gama de aplicações em materiais simples e com revestimento. Este teste usualmente utiliza uma esfera de aço que rotaciona sobre a superfície da amostra na presença de uma lama fina de partículas abrasivas. O desgaste abrasivo gera calotas de até 2 mm de diâmetro e de aproximadamente até 40 μm de profundidade [49].

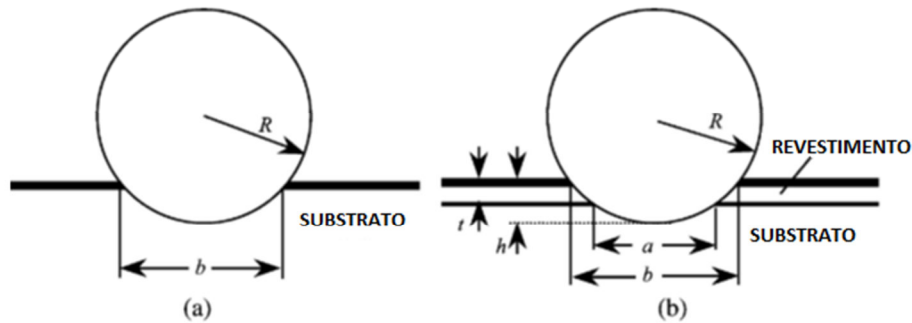


Figura 23: Desenho esquemático da geometria da calota de desgaste formada pelo teste de desgaste microabrasivo com uma esfera de raio R (a) amostra simples e (b) amostra com revestimento [49].

O coeficiente de desgaste (definido como volume removido por unidade de distância de deslizamento, por unidade de força normal carregada, com unidades no SI de $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{N}^{-1} = \text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$) de materiais simples pode ser a princípio calculado pelo volume da calota de desgaste dividido pelo produto da distância de deslizamento relativa e a força normal carregada. As vantagens teste modo de teste incluem a simplicidade, o baixo custo do aparato e o pequeno tamanho das amostras necessárias. Para sistemas revestidos é possível, inicialmente, avaliar a taxa de desgaste específico para substrato e revestimento simultaneamente com a medida da evolução das dimensões da calota de desgaste durante o teste. Existem várias possibilidades de métodos para analisar os dados experimentais, e o uso do método errado pode gerar baixa acuracidade nos resultados de taxas de desgaste específicos [49] e [51].

2.6.2 ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS

2.6.2.1 EQUAÇÕES BÁSICAS

Materiais sem revestimento relacionam o volume total de desgaste, V , à distância de deslizamento, S , e à força normal de contato, N , por um simples modelo de desgaste abrasivo que é equivalente à equação de *Archard* para desgaste por deslizamento:

$$S * N = \frac{V}{k} \quad (2)$$

onde k é o coeficiente de desgaste – a resistência ao desgaste é definida como k^{-1} . A utilidade de k como medida de desgaste abrasivo do material é limitada em situações em que o volume de desgaste é diretamente proporcional ao carregamento e à distância de deslizamento [41].

Vale ressaltar ainda que a distância de deslizamento, S , para a geometria apresentada pela máquina de teste de desgaste microabrasivo aqui utilizada é dada por, com S em mm:

$$S = \frac{19,95 * n'' * D}{\sqrt{\frac{D^2}{4} - 25}} \quad (3)$$

onde n'' é o número de rotações realizadas pelo eixo do motor do equipamento de ensaio e D é o diâmetro da esfera. Ao se definir essas equações e incógnitas é possível realizar o cálculo do coeficiente de resistência ao desgaste [41].

Já um sistema com revestimento é mais complexo. Nestes casos, um método é utilizar a extensão da equação de *Archard* para combinar o desgaste do revestimento e substrato, cada um com um coeficiente independente. A extensão da equação mais simples é expressa por:

$$S * N = \frac{V_c}{K_c} + \frac{V_s}{K_s} \quad (4)$$

onde o sobrescrito c e s se refere ao revestimento e ao substrato respectivamente [49].

A Eq. (4) deve ser aplicada no caso em que há filmes finos sobre o substrato e a calota de desgaste deve ter penetrado através do revestimento até chegar ao substrato. Já a Eq. (2) deve ser usada quando se tem apenas um material a ser analisado [49].

2.6.2.2 ESCOLHA DAS MEDIDAS

Em um típico teste de abrasão, várias calotas de desgaste (provavelmente 6 ou mais) são formadas, cada uma sequencialmente, com diferentes números de revoluções da esfera e por isso com diferentes tamanhos. Tudo é medido e ajustado como dados para análise. Os volumes de desgaste V_c , V_s e, conseqüentemente, V podem ser expressos em termos de dois parâmetros escolhidos entre o diâmetro interno da calota a , o diâmetro externo da calota b , a espessura do revestimento t e a profundidade de penetração total h na amostra, como mostrado na Fig. 23, ao se assumir implicitamente que a calota de desgaste tem uma geometria esférica como a da esfera que a produziu. Usualmente a , b e t podem ser medidas com mais precisão que h . Assim, as fórmulas para os volumes podem ser escritas como [49]:

$$V \approx \frac{\pi * b^4}{64 * R} \text{ ou } \frac{\pi * a^4}{64 * R} + \frac{\pi * t}{4} * (a^2 + 4 * R * t) \quad (5)$$

$$V_c \approx \frac{\pi * t}{4} * (b^2 - 4 * R * t) \text{ ou } \frac{\pi * t}{4} * (a^2 + 4 * R * t) \quad (6)$$

$$V_s \approx \frac{\pi * b^4}{64 * R} - \frac{\pi * t}{4} * (b^2 - 4 * R * t) \text{ ou } \frac{\pi * a^4}{64 * R} \quad (7)$$

Definido como calcular os volumes, pode-se observar uma distinção entre os volumes que estão apenas em função de b e t ou em função de a e t . Essa distinção é feita por o diâmetro interno da calota de desgaste a ter, geralmente, sua medida mais exata em relação ao diâmetro externo da calota de desgaste b , uma vez que o contraste entre o substrato e o material de revestimento é mais claramente definido e não é afetado pelo efeito de *scuffing* – região com ranhuras pouco nítidas causadas por um

simples toque e que geram uma indefinição da fronteira – envolta do perímetro externo da calota de desgaste [49].

A espessura do revestimento t pode ser estimada a partir das medidas de diâmetro da calota a e b , mas qualquer erro na medida de a e b se propagarão nos valores de t e dos volumes. Estes erros podem ser reduzidos pela mediana dos valores calculados de espessura, no lugar de usar cada valor de espessura separado. O valor da mediana é melhor que a média, porque é menos afetado por discrepâncias. A fórmula de t pode ser descrita como:

$$t = \sqrt{R^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} - \sqrt{R^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2} \quad (8)$$

2.6.2.3 INFLUÊNCIA DOS ERROS NAS MEDIDAS

A veracidade dos resultados das taxas de coeficiente de desgaste depende dos erros de medida assim como a escolha dos dados para análise. Os erros em k_c e k_s são determinados, principalmente, pelos erros de medidas relativos ao diâmetro interno da calota a e a espessura do revestimento t , ao se utilizar apenas a e t como parâmetros para o cálculo dos volumes [49].

O teste de desgaste abrasivo é feito para revestimentos que tenham $k_c < k_s$, e o valor de k_c é o mais interessante, onde a limitação é raramente uma problemática. Se $k_c \gg k_s$ um valor confiável de k_c é necessário, em ambas medidas de erros $\Delta a/a$ e $\Delta t/t$ devem ser reduzidos e a calota de desgaste deve penetrar o revestimento o menos possível. Se o revestimento é fino o suficiente, o teste pode ser feito com a calota de desgaste contida inteiramente dentro do revestimento, levando a uma análise muito mais simples, sendo considerado um material homogêneo. Na Tabela 7 algumas estimativas de incertezas podem ser observadas [49].

Tabela 7: Estimativa de Incertezas.

Parâmetro Experimental	Estimadas Incertezas
Diâmetro da cratera	$\pm 0,001$ mm
Força Normal	$\pm 0,001$ N
Distância de Deslizamento	± 1 %
Espessura do Revestimento	$\pm 0,1$ μ m
Raio da Esfera	$\pm 0,1$ mm

2.6.2.4 MÉTODOS DE ANÁLISE

2.6.2.4.1 MÉTODO DE RUTHERFORD

A Eq. (4) pode ser reescrita em termos do volume total da calota de desgaste $V(=V_s+V_c)$, permitindo uma taxa de coeficiente de desgaste do substrato e do revestimento sejam obtidos simultaneamente pelo ponto de intercepção e do gradiente do ajuste linear dos dados plotados:

$$\frac{SN}{V} = \left(\frac{1}{k_c} - \frac{1}{k_s} \right) \frac{V_c}{V} + \frac{1}{k_s} \quad (9)$$

ou

$$\frac{SN}{V} = \left(\frac{1}{k_s} - \frac{1}{k_c} \right) \frac{V_s}{V} + \frac{1}{k_c} \quad (10)$$

da Eq. (9), pelo plote de SN/V contra V_c/V a taxa do coeficiente de desgaste k_s pode ser obtido do ponto de intercepção do ajuste linear dos dados. Já o k_c deriva do gradiente da linha reta. Ao se usar a Eq. (10) o plote é feito por SN/V contra V_s/V [49].

Erros nos valores da taxa de coeficiente de desgaste associados aos erros de medida do volume da calota de desgaste podem ser reduzidos pela escolha correta entre a Eqs. (9) e (10). Quando $V_c/V < 0,5$ para a maioria dos pontos, a Eq. (9) é preferida, enquanto que $V_c/V > 0,5$ para a maioria dos dados, a Eq. (10) é preferida em função da influência do volume do revestimento ou do substrato desgastado no volume total da calota de desgaste [49].

2.6.2.4.2 MÉTODO DE ALLSOOP

Um novo rearranjo da Eq. (4) pode ser obtida dividindo toda a equação por V_s :

$$\frac{SN}{V_s} = \frac{1}{k_c} \frac{V_c}{V_s} + \frac{1}{k_s} \quad (11)$$

Como na aproximação de Rutherford, esta formulação também permite que ambos os coeficientes de desgaste do substrato e do revestimento sejam obtidos a partir de uma mesma base de dados e plote linear. Neste método, ambos os coeficientes podem ser calculados diretamente da inclinação e do intercepção do plote linear de SN/V_s contra V_c/V_s [49].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados foram Ti-40Zr como substrato, revestido por filmes finos multicamadas com a seguinte disposição de filmes: Ti + TiN + ZrN + TiN. Tanto o substrato quanto o sistema substrato + revestimento foram submetidos ao teste de desgaste microabrasivo e teste de microdureza. A partícula abrasiva que agiu no teste de desgaste foi a sílica.

3.1.1 PREPARO DO SUBSTRATO

As amostras da liga Ti-40Zr foram embutidas em resina para facilitar o posterior lixamento das amostras. Após o embutimento as amostras foram lixadas, progressivamente, em lixas 240, 400, 600, 800, 1200 e 2400. Cada etapa do lixamento foi realizada de forma a minimizar, perpendicularmente, os riscos deixados pela lixa anterior.

O polimento mecânico das amostras foi realizado em 3 etapas:

1. Polimento inicial – alumina 0,03 μm com velocidade do disco em 250 rpm e alta pressão de compressão;
2. Polimento intermediário – pasta de diamante 1 μm com velocidade do disco de 250 rpm e alta pressão de compressão;
3. Polimento final – alumina 0,03 μm com velocidade do disco em 125 rpm e média pressão de compressão.

O polimento inicial e intermediário serve para retirar riscos mais severos oriundos da etapa de lixamento, além de eliminar possíveis resíduos sobre a superfície da amostra. O polimento final, com menor pressão relativa de compressão e velocidade do disco, auxilia no acabamento final do polimento.

3.1.2 DEPOSIÇÃO DO FILME FINO DO TIPO MULTICAMADAS

A deposição dos filmes finos multicamadas sobre as amostras foi feita em um forno tipo *electron-beam*, no Centro Tecnológico da Aeronáutica (CTA) do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) em São José dos Campos – SP.

A amostra cuja sequência de filmes é Ti + TiN + ZrN + TiN sofreu o seguinte processo de deposição:

- Tempo de evaporação do Ti antes da abertura do gás N: 5 min;
- Tempo de evaporação do Ti após a abertura do gás N: 10 min;

- Tempo de evaporação do Zr após a abertura do gás N: 30 min;
- Tempo de evaporação do Ti após a abertura do gás N: 10 min.

3.2 CARACTERIZAÇÃO

3.2.1 DESGASTE MICROABRASIVO

A avaliação das propriedades tribológicas foi realizada por meio do teste de desgaste microabrasivo. O tribômetro em questão é o CALOWEAR, da marca CSM. Sua configuração é de esfera rotativa livre. O equipamento pertence ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília (UnB). A Figura 24 trás a imagem frontal dessa máquina de desgaste.

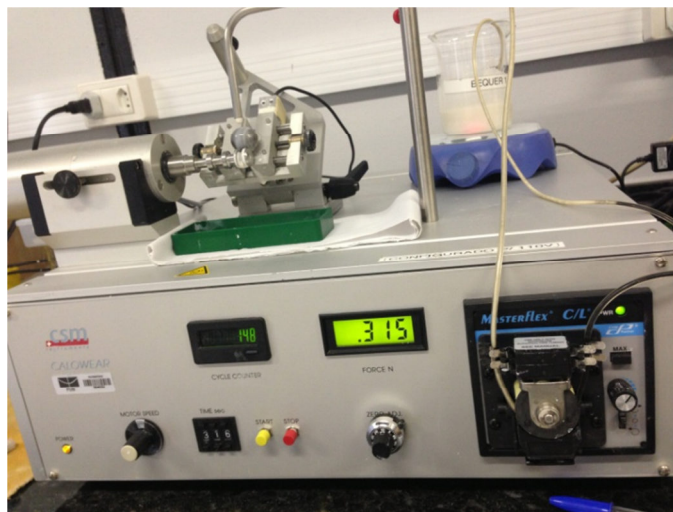


Figura 24: Máquina de desgaste microabrasivo [Fonte: autor].

Em decorrência deste experimento, o coeficiente de desgaste – k – do material foi determinado a partir de uma série de equações que determinam esta propriedade. Os principais parâmetros utilizados neste ensaio de desgaste foram:

- Tipo de esfera: Aço 100Cr6 com diâmetro de 20 mm;
- Força Inicial: 0,15 a 0,20 N;
- Lama abrasiva: Sílica, 1 gota a cada 2 s;
- Rotação da esfera: ~ 115 rpm.

Em cada amostra, 8 ensaios foram realizados variando a distância de deslizamento. O primeiro ensaio teve $S = 14$ m, o segundo igual a 28 m e assim sucessivamente até o oitavo teste.

3.2.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

O ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizado no equipamento pertencente ao laboratório de Estudos Geocronológicos, Geodinâmicas e Ambientais, da Universidade de Brasília (UnB). A Figura 25 é uma imagem no interior da câmara do MEV.

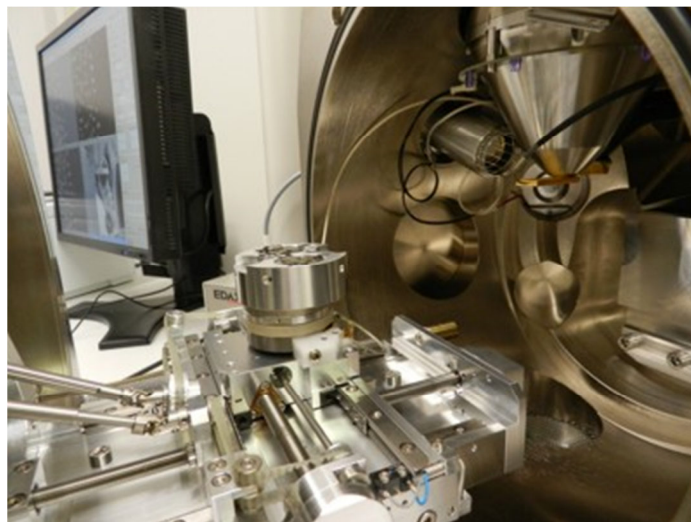


Figura 25: Microscópio de Eletrônico de Varredura [52].

Este equipamento foi utilizado para se obter melhores imagens das calotas de desgaste e decorrente obtenção de dados a respeito da geometria.

3.2.3 TESTE DE MICRODUREZA

O teste de microdureza foi realizado em um equipamento cuja especificação é Future-Tech, *Microhardness Tester* FM 700. Este equipamento pertence à Faculdade Unb Gama (FGA). A Figura 26 é uma imagem do tipo de equipamento utilizado.



Figura 26: Teste de microdureza [52].

Os principais parâmetros utilizados neste teste de microdureza foram:

- Indentador de diamante Vickers;
- Carregamentos: 50 gf, 100 gf, 300 gf e 500 gf.

3.3 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE ANÁLISE

Os métodos de análise descritos foram comparados a partir de dados experimentais gerados nos testes de Ti-40Zr revestido utilizado em próteses ortopédicas e odontológicas. As amostras foram preparadas na forma de discos polidos com aproximadamente 12 mm de diâmetro e com 3 mm de espessura, e foram revestidos com Ti + TiN + ZrN + TiN por *PVD*. Amostras sem revestimento também foram utilizados para uma medida independente do k_s e sua dureza. A Figura 27 trás um desenho esquemático da geometria da amostra.

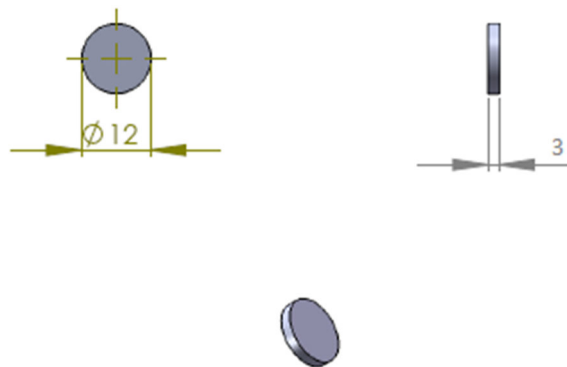


Figura 27: Corpo de prova para ensaio [30 e adaptada pelo autor].

A espessura do revestimento foi determinada pelas imagens do MEV após partir as amostras ao meio perpendicularmente ao revestimento e obteve-se 5,545 μm para a multicamada. A Figura 28 mostra a imagem do MEV de onde foi obtida essa medição.

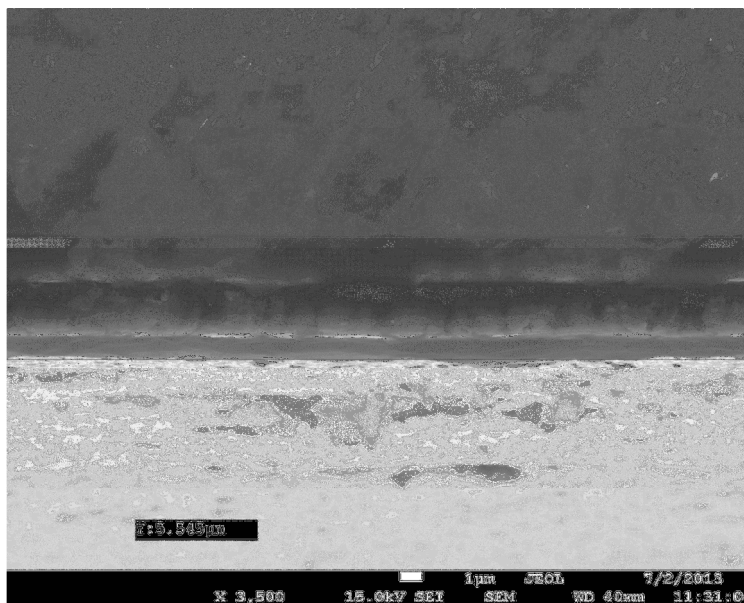


Figura 28: Espessura do revestimento [Fonte: autor].

O teste de desgaste microabrasivo foi feito em um equipamento cuja configuração é de esfera rotativa livre. A força inicial variou entre 0,15 a 0,20 N e utilizou-se uma esfera de aço de diâmetro de 20 mm a uma velocidade de rotação do eixo ~ 115 rpm. A partícula abrasiva foi a Sílica com ~ 99%, 0,5 – 10 µm (aproximadamente 80% entre 1 – 5 µm) a uma concentração de 40 vol.% em água destilada. Calotas de desgaste separadas foram formadas depois de se variar o número de rotações da esfera. As medidas de geometria de cada esfera foram feitas com o auxílio do MEV. Para cada esfera pelo menos duas medidas de a e b foram feitas paralelamente e perpendicularmente a direção da abrasão.

Os seguintes métodos foram aplicados aos dados e resumidos na Tabela 8.

3.3.1 MÉTODO DE RUTHERFORD 1

A formulação combinada de desgaste de Rutherford da Eq. (9) ou (10), a depender da razão V_c/V_s , em termos do diâmetro externo da calota de desgaste a e da mediana da espessura do revestimento obtido a partir de a e b .

3.3.2 MÉTODO DE RUTHERFORD 2

A formulação combinada de desgaste de Rutherford da Eq. (9) ou (10), a depender da razão V_c/V_s , em termos do diâmetro externo da calota de desgaste a e da medida independente da espessura do revestimento t .

3.3.3 MÉTODO DE ALLSOOP 1

A formulação de Allsoop da Eq. (11), usando o diâmetro interno da calota de desgaste a e da mediana da espessura do revestimento obtido a partir de a e b .

3.3.4 MÉTODO DE ALLSOOP 2

A formulação de Allsoop da Eq. (11), usando o diâmetro interno da calota de desgaste a e da medida independente da espessura do revestimento t .

Tabela 8: Resumo dos métodos utilizados.

Nome	Equações	a	b	t	Ajuste
Rutherford 1	$\frac{SN}{V} = \left(\frac{1}{k_c} - \frac{1}{k_s}\right) \frac{V_c}{V} + \frac{1}{k_s}$	medido	medido	calculado	linear
	ou $\frac{SN}{V} = \left(\frac{1}{k_s} - \frac{1}{k_c}\right) \frac{V_s}{V} + \frac{1}{k_c}$				
Rutherford 2	$\frac{SN}{V} = \left(\frac{1}{k_c} - \frac{1}{k_s}\right) \frac{V_c}{V} + \frac{1}{k_s}$ ou	medido	não utilizado	pré-determinado	linear

	$\frac{SN}{V} = \left(\frac{1}{k_s} - \frac{1}{k_c} \right) \frac{V_s}{V} + \frac{1}{k_c}$				
Allsoop 1	$\frac{SN}{V_s} = \frac{1}{k_c} \frac{V_c}{V_s} + \frac{1}{k_s}$	medido	medido	calculado	linear
Allsoop 2	$\frac{SN}{V_s} = \frac{1}{k_c} \frac{V_c}{V_s} + \frac{1}{k_s}$	medido	não usado	pré-determinado	linear

Os coeficientes de desgaste do substrato e do revestimento, e a correlação dos coeficientes para o ajuste linear dos dados, foram calculados com base nos 4 métodos de análise para cada amostra revestida. Note que a diferença entre o método 1 e 2 foi a forma de obtenção da espessura da calota de desgaste, por MEV ou por cálculo em função de a e b .

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 TESTE DE MICRODUREZA

O teste de desgaste de microdureza foi feito em amostras com e sem revestimento para observar se ocorreu modificação da dureza do material após a deposição do Ti + TiN + ZrN + TiN.

O aumento da dureza é esperado, pois como visto na Tabela 4, a dureza dos materiais de revestimento possuem valores muito superiores ao valor encontrado para o Ti-40Zr por *Wen-Fu Ho*, em 2008, que foi de 350 HV. A relação da dureza com o aumento da resistência ao desgaste já é conhecida, como pode ser observada na Figura 7, pois materiais de maior dureza apresentam maior resistência ao desgaste abrasivo.

O equipamento utilizado fornece o valor da dureza, sem a necessidade de se efetuar cálculos em função da força aplicada e da área da superfície ou área projetada. Assim, os resultados obtidos para cada um dos carregamentos podem ser observados nas Tabelas 9 a 12.

Tabela 9: Resultado do teste de microdureza para carregamento de 50 gf.

Carregamento 50gf (0,49N)	Substrato	Substrato + Revestimento
1°	386,9 HV	900,0 HV
2°	371,9 HV	886,0 HV
3°	412,6 HV	955,7 HV
4°	451,5 HV	900,0 HV
5°	454,1 HV	912,5 HV
6°	356,8 HV	1047,1 HV
7°	375,7 HV	858,9 HV
Média do Valor da Dureza	401,4 HV	922,9 HV
Desvio Padrão	39,0	62,1
Correlação	9,72 %	6,73 %

Tabela 10: Resultado do teste de microdureza para carregamento de 100gf.

Carregamento 100gf (0,98N)	Substrato	Substrato + Revestimento
1°	393,4 HV	784,0 HV
2°	422,5 HV	789,1 HV
3°	433,6 HV	764,9 HV
4°	421,3 HV	685,3 HV
5°	430,3 HV	804,7 HV
6°	306,9 HV	668,1 HV
7°	365,7 HV	714,5 HV

Média do Valor da Microdureza	396,2 HV	744,4 HV
Desvio Padrão	46,2	54,5
Correlação	11,66 %	7,32 %

Tabela 11: Resultado do teste de microdureza para carregamento de 300 gf.

Carregamento 300gf (2,94N)	Substrato	Substrato + Revestimento
1°	356,7 HV	704,0 HV
2°	324,4 HV	624,4 HV
3°	375,1 HV	700,6 HV
4°	382,4 HV	612,0 HV
5°	398,1 HV	816,0 HV
6°	416,0 HV	615,7 HV
7°	369,5 HV	
Média do Valor da Microdureza	374,6 HV	678,8 HV
Desvio Padrão	29,4	79,2
Correlação	7,84 %	11,67 %

Tabela 12: Resultado do teste de microdureza para carregamento de 500 gf.

Carregamento 500gf (4,9N)	Substrato	Substrato + Revestimento
1°	398,4 HV	555,6 HV
2°	395,6 HV	432,9 HV
3°	389,2 HV	524,9 HV
4°	396,1 HV	522,9 HV
5°	397,6 HV	600,9 HV
6°	400,6 HV	590,1 HV
7°	374,8 HV	
Média do Valor da Microdureza	393,2 HV	537,9 HV
Desvio Padrão	8,9	60,7
Correlação	2,25 %	11,28 %

Com os dados obtidos acima, o Gráfico 1 pode ser gerado para auxiliar a comparação dos valores de microdureza do substrato e do sistema substrato + revestimento, note que no gráfico este sistema é identificado como E3.

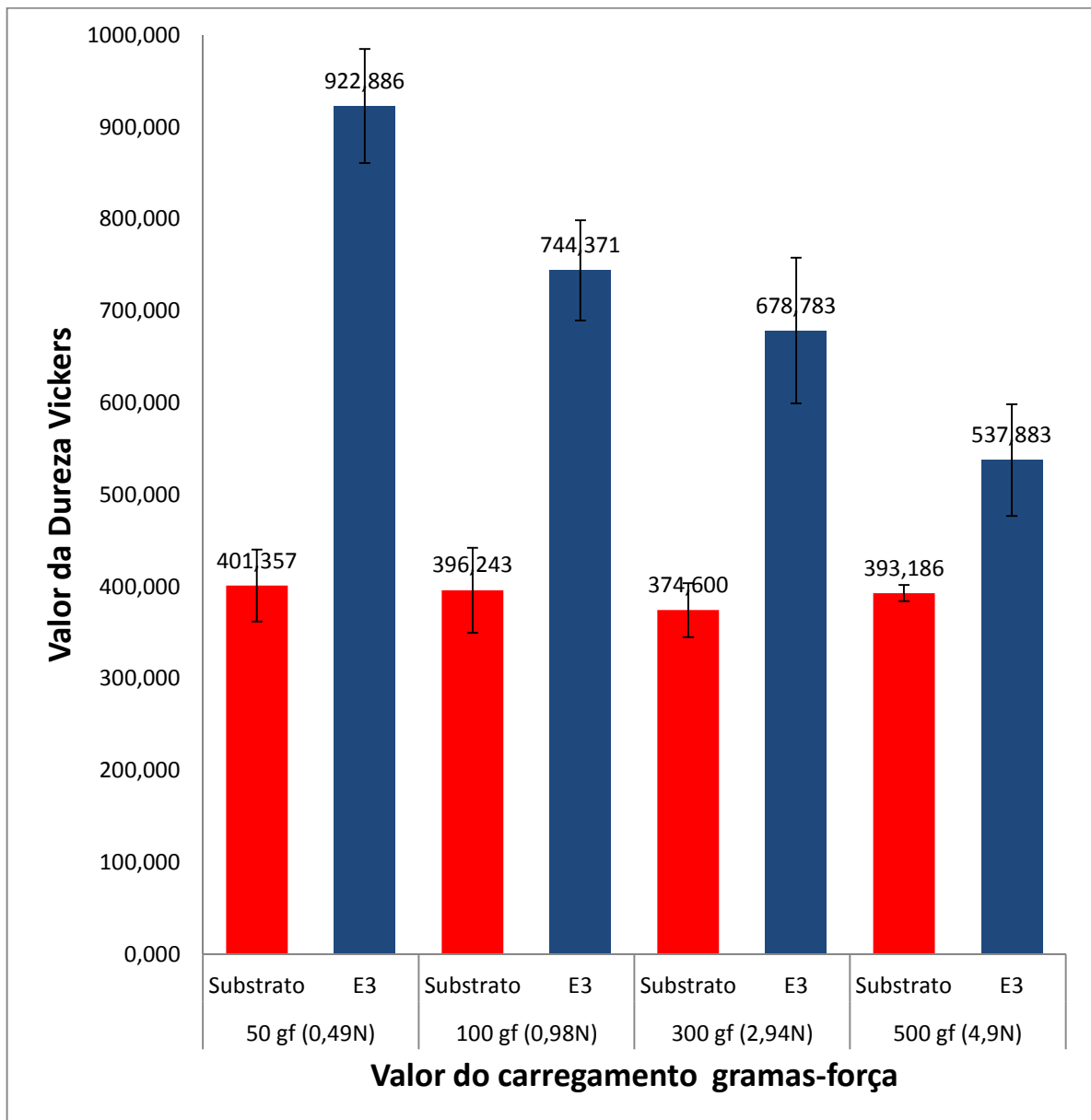


Gráfico 1: Valor das durezas obtidas no ensaio em função do carregamento.

Uma análise geral dos dados trás a informação de que, independente do carregamento utilizado, a dureza do sistema substrato + revestimento foi superior que a dureza do substrato. Comprovando que a deposição do revestimento elevou a dureza do sistema substrato + revestimento. No caso em que a dureza do substrato ficou mais próxima à dureza do revestimento, esta foi 25,90 % maior que a dureza do substrato. E no caso em que estes valores foram mais distantes, a dureza do revestimento foi 56,51 % maior que a dureza do substrato.

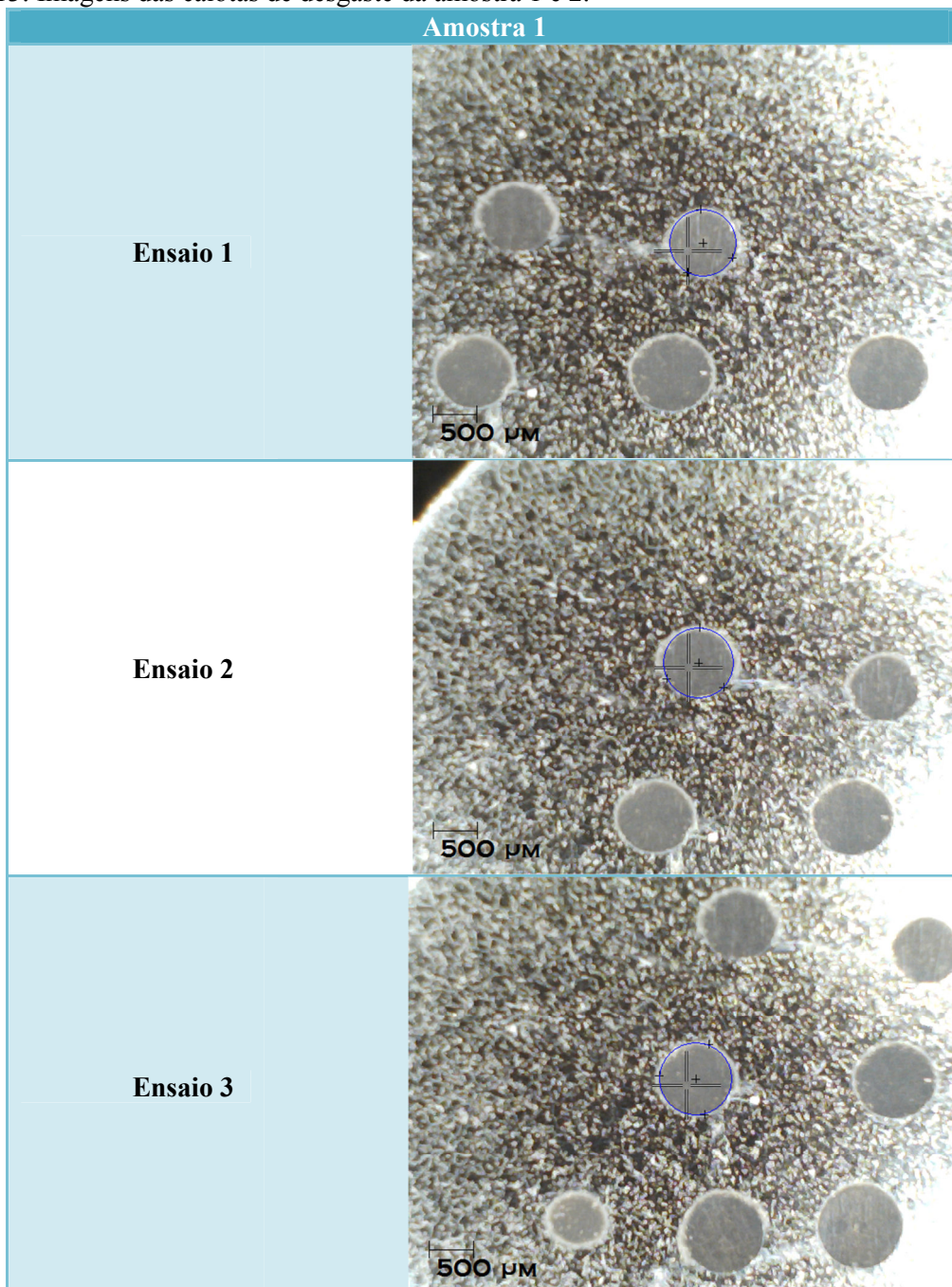
Outro fator a ser observado é que a dureza encontrada para o substrato ficou bem próxima ao já observado em 2008, que foi de 350 HV. Além disso, pode-se concluir que a diminuição da dureza do sistema em função do aumento do carregamento se deu por a espessura do revestimento não ser suficiente para suportar grandes carregamentos.

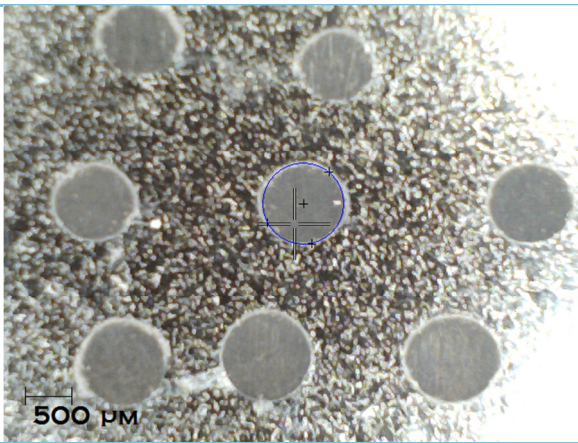
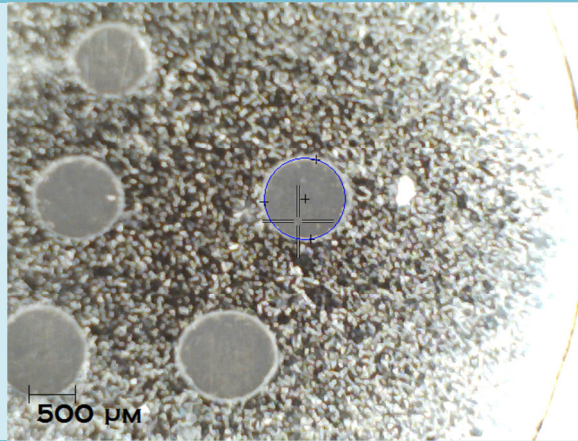
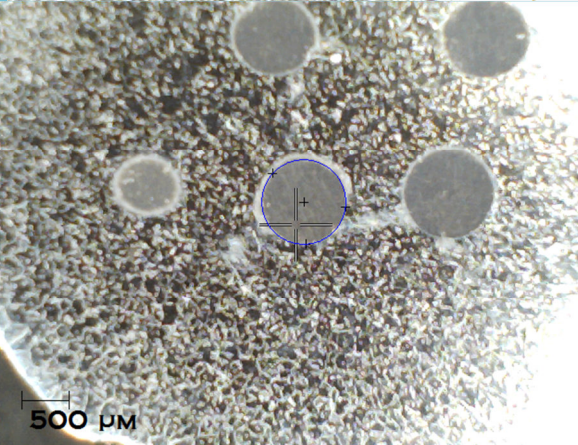
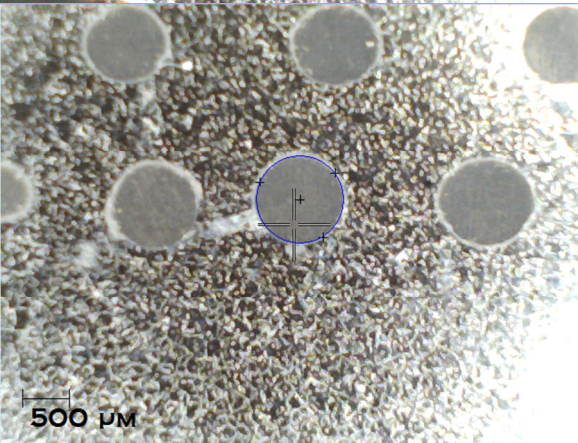
4.2 TESTE DE DESGASTE MICROABRASIVO

4.2.1 SUBSTRATO

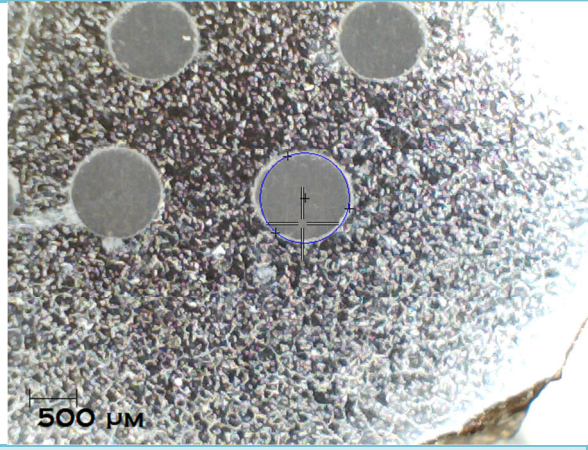
Duas amostras de Ti-40Zr foram submetidas ao ensaio de desgaste microabrasivo com sílica. Após os ensaios, as seguintes imagens foram obtidas e agrupadas na Tabela 13.

Tabela 13: Imagens das calotas de desgaste da amostra 1 e 2.



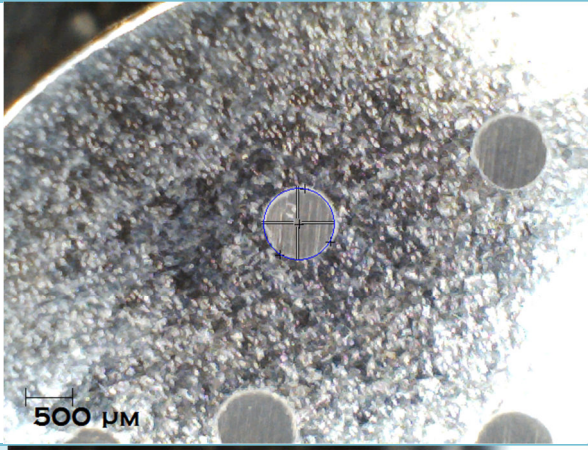
<p>Ensaio 4</p>	
<p>Ensaio 5</p>	
<p>Ensaio 6</p>	
<p>Ensaio 7</p>	

Ensaio 8

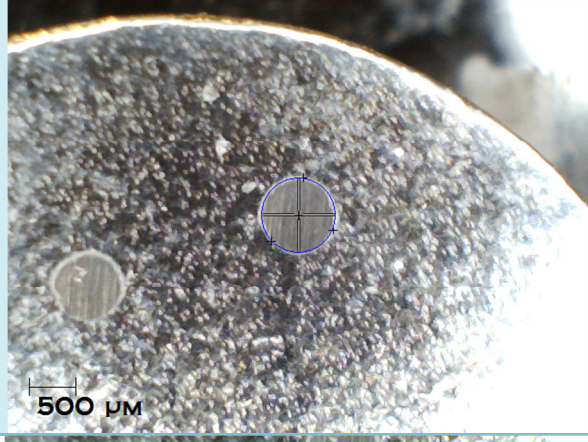


Amostra 2

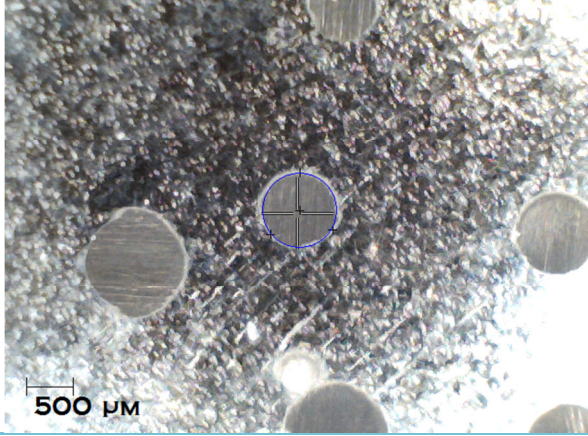
Ensaio 1



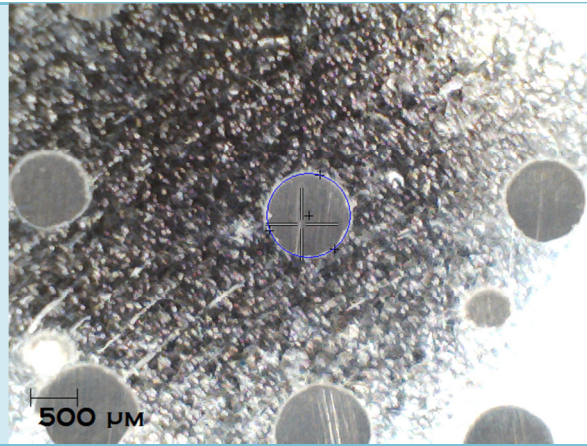
Ensaio 2



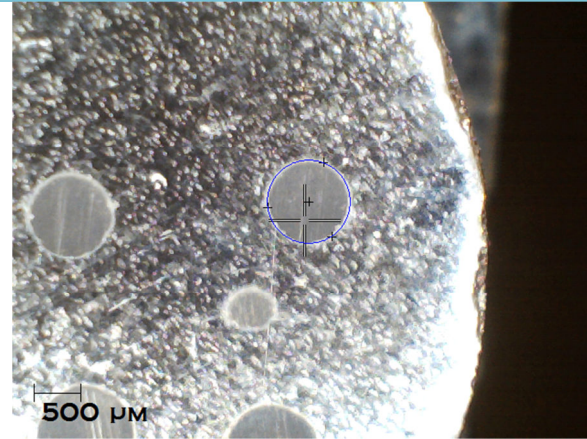
Ensaio 3



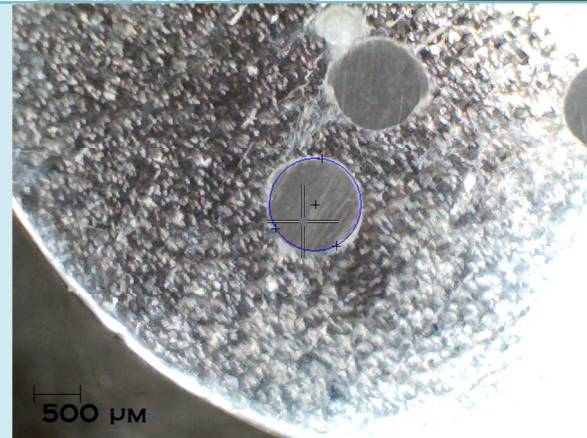
Ensaio 4



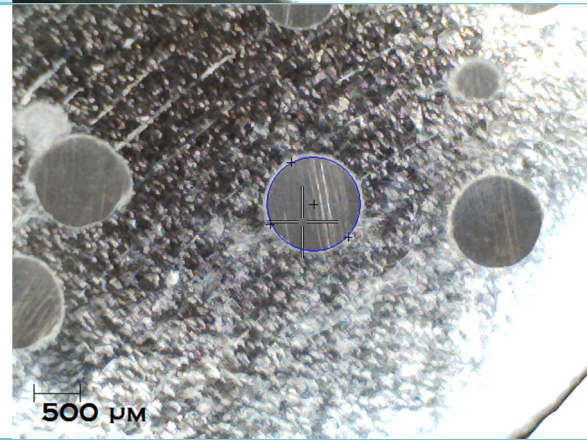
Ensaio 5

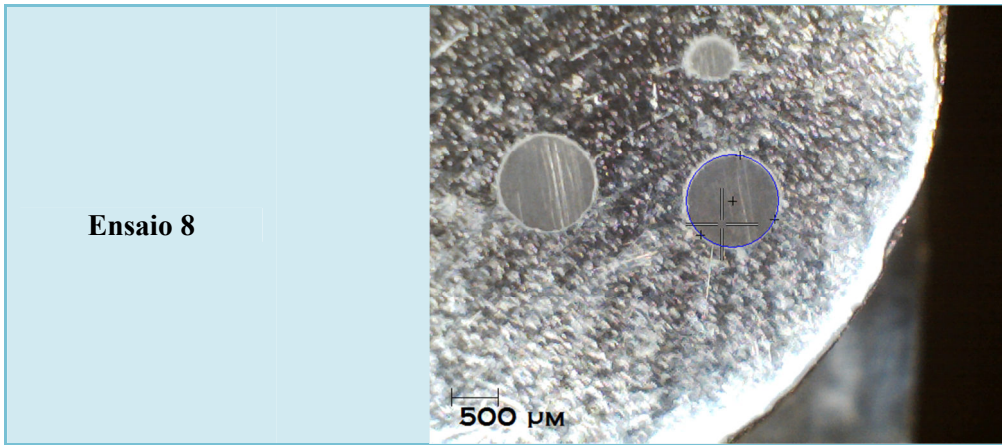


Ensaio 6



Ensaio 7





Com as imagens acima a medida do diâmetro da calota b pode ser determinado para ser utilizado na Eq.(2), juntamente com o número de ciclos e força normal obtida diretamente da máquina de desgaste. Com isso, a Tabela 14 pode ser formulada.

Tabela 14: Dados tabulados referente às amostras 1 e 2.

b_1	b_2	N_1	N_2	$n_{volutas1}$	$n_{volutas2}$	SN_1	SN_2	V_1	V_2
0.764	0.725	0.202	0.213	303	307	2820	3013	0.001672	0.001356
0.811	0.785	0.208	0.223	606	611	5807	6277	0.002124	0.001864
0.841	0.790	0.210	0.208	913	917	8833	8787	0.002456	0.001912
0.889	0.871	0.210	0.206	1215	1223	11755	11607	0.003066	0.002825
0.889	0.875	0.213	0.202	1519	1529	14906	14229	0.003066	0.002877
0.910	1.000	0.218	0.224	1820	1854	18279	19133	0.003366	0.004909
0.969	1.006	0.219	0.225	2146	2162	21652	22411	0.004328	0.005028
1.035	1.035	0.212	0.204	2740	2751	26761	25855	0.005633	0.005633

Assim, pode-se traçar o gráfico de V contra SN para cada uma das amostras para obter k_s .

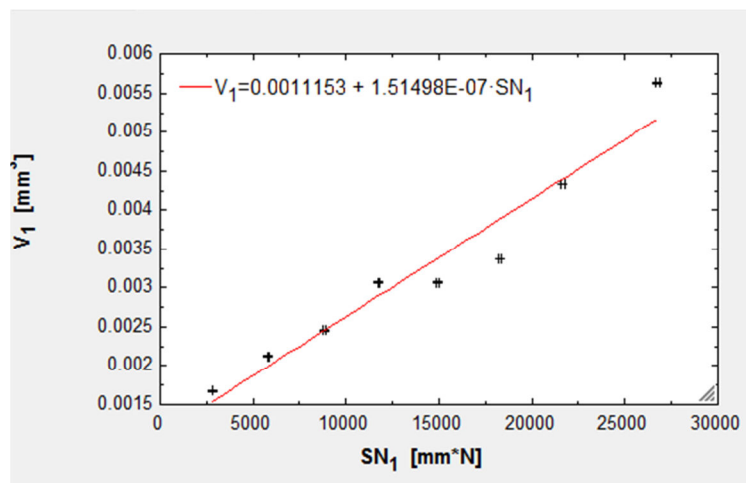


Gráfico 2: V_1 versus SN_1 da amostra 1.

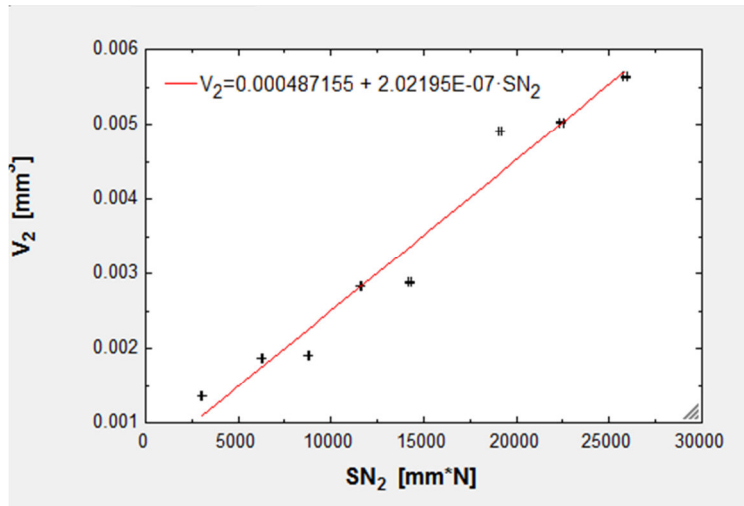


Gráfico 3: V_2 versus SN_2 da amostra 2.

Dos Gráficos 2 e 3 a Tabela 15 pode ser formulada e contém todas as informações necessárias para a obtenção de k_s .

Tabela 15: Dados obtidos a partir do ajuste linear das amostras 1 e 2.

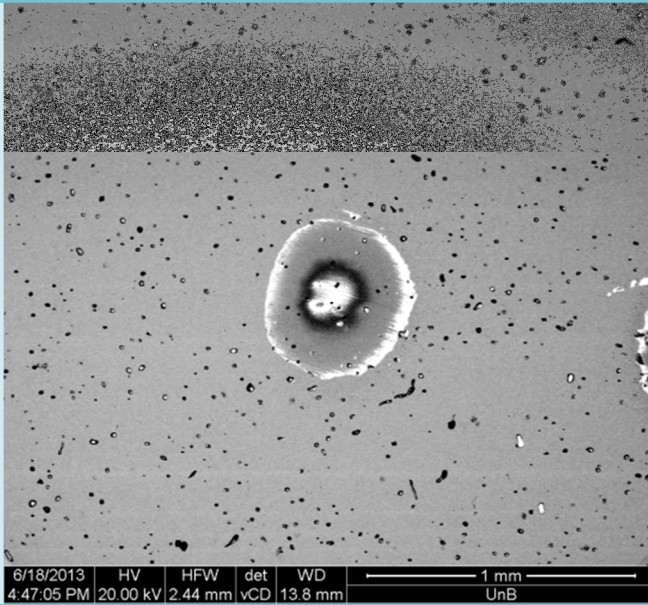
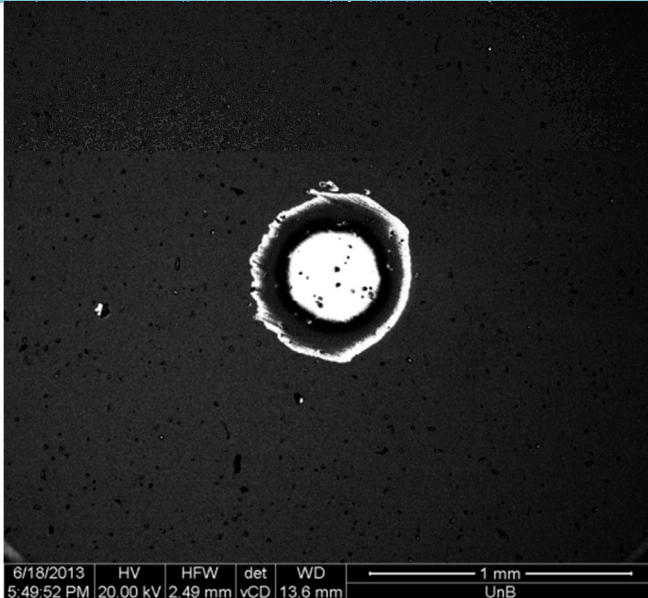
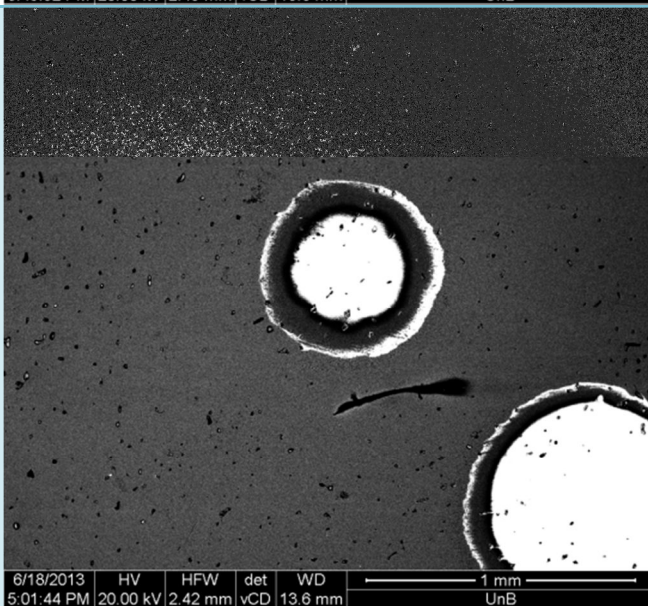
	Amostra 1	Amostra 2
Equação da Reta	$V_1 = 0,0011153 + 1,51498 * 10^{-7} * SN_1$	$V_2 = 0,000487155 + 2,02195 * 10^{-7} * SN_2$
Coef. de Correlação Linear	94,29 %	96,08 %.
k_s [mm²/N]	1,514E-7	2,021-7
Erro	± 1,408E-8	± 1,544E-8
k_s (médio) [mm²/N]	1,768E-7	
Desvio Padrão	3,6E-8	

Dos resultados observa-se que os valores para o coeficiente de desgaste do material divergiram em 25,08 %, tal explicação se deve ao fato de haver diversas variáveis a serem controladas ao longo do teste de desgaste.

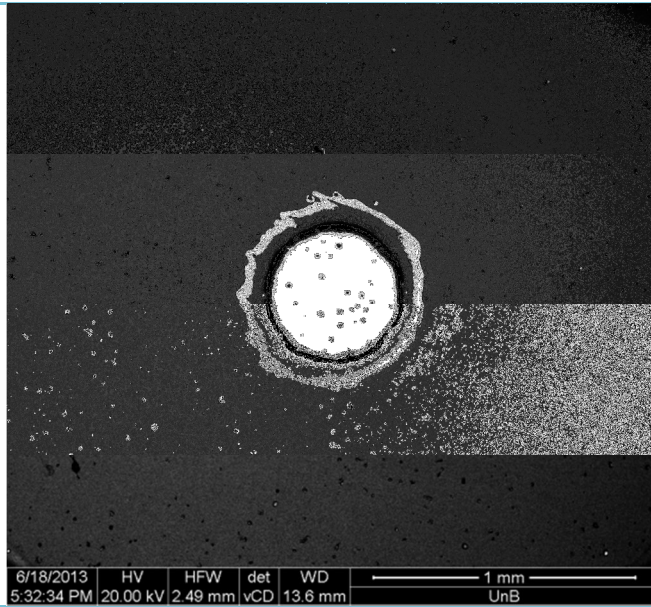
4.2.2 REVESTIMENTO + SUBSTRATO

Uma amostra de Ti-40Zr revestida com Ti + TiN + ZrN + TiN foi submetida ao ensaio de desgaste microabrasivo com sílica. Neste grupo de 8 ensaios, os dois primeiros não atingiram o substrato e os 6 últimos sim. As imagens de cada calota formada foram agrupadas na Tabela 16.

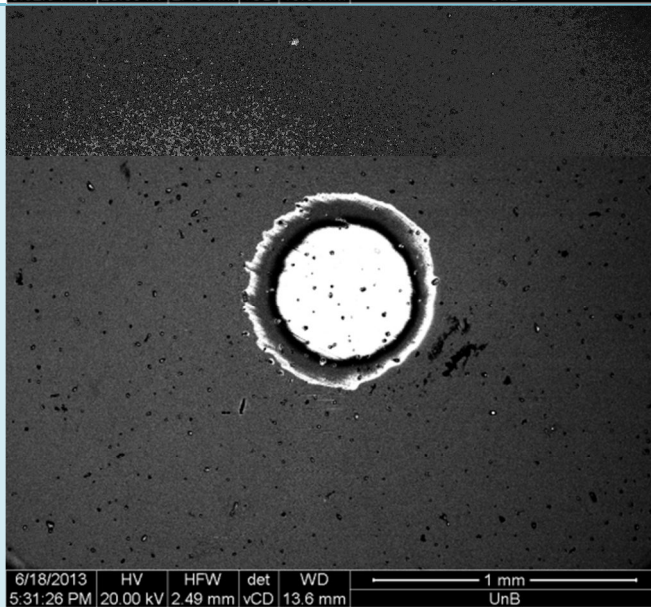
Tabela 16: Imagens das calotas de desgaste da amostra 3.

Amostra 3	
Ensaio 1	
Ensaio 2	
Ensaio 3	

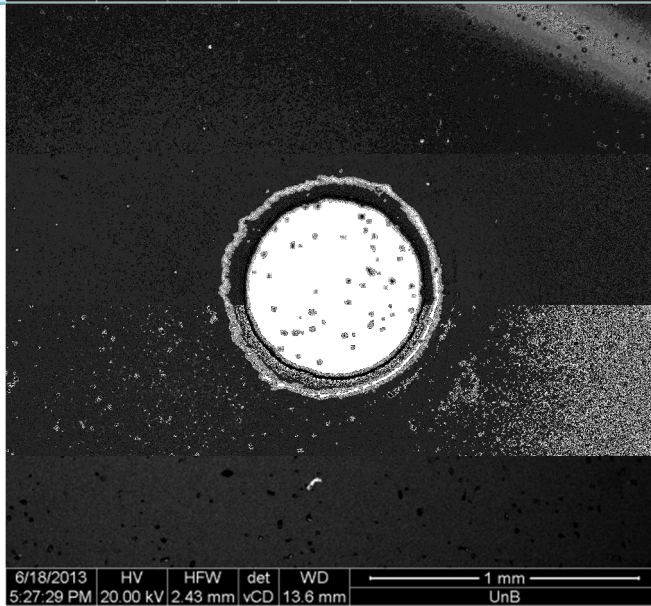
Ensaio 4

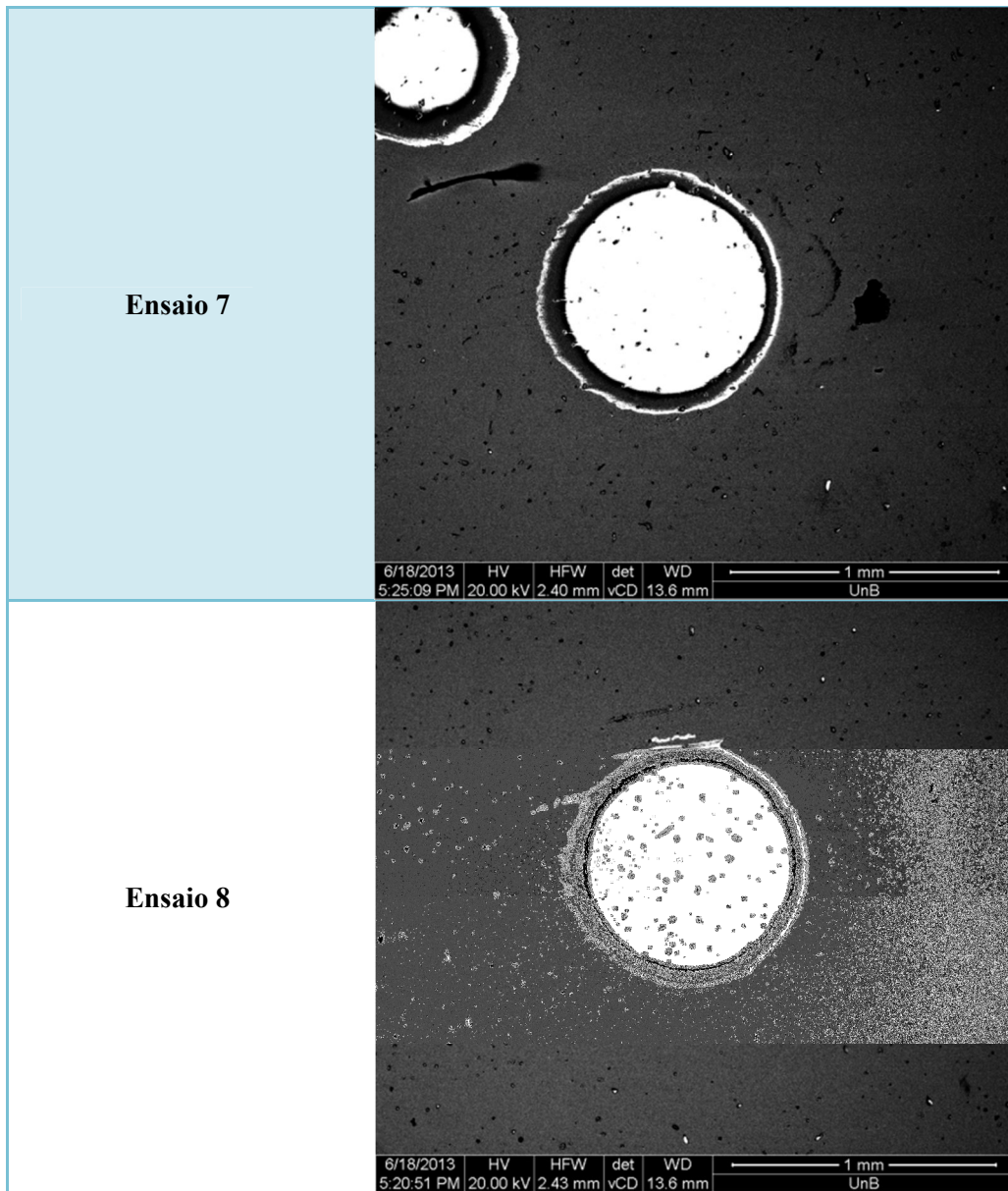


Ensaio 5



Ensaio 6





Ao longo do trabalho foi citado que a determinação do diâmetro externo da calota b pode ser dificultada em função do fenômeno conhecido como *scuffing*. Um exemplo deste fenômeno pode ser observado na amostra 3, ensaio 4 – Figura 29, onde é possível observar diversas marcações e ranhuras na amostra que gera uma incerteza para o observador do limite desse diâmetro.

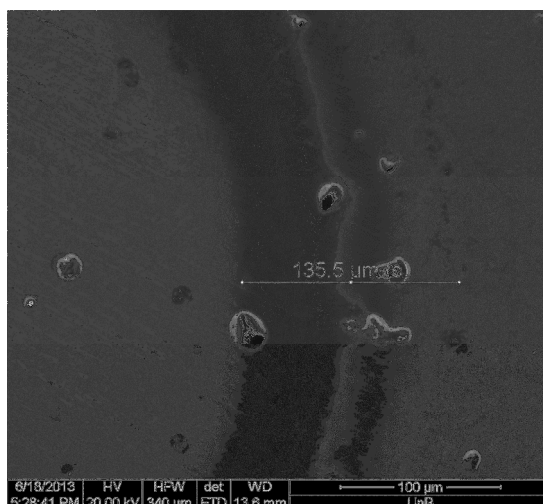


Figura 29: Fenômeno de “scuffing” [Fonte: autor].

No início deste tópico foi feita uma diferenciação entre ensaios que atingiram e que não o substrato. Isso foi possível pelo conhecimento prévio da espessura do revestimento e pela utilização da geometria da calota de desgaste para calcular a profundidade de cada calota. Estes resultados podem ser observados na Tabela 17.

Tabela 17: Valores referentes à espessura do revestimento e profundidade da calota.

Forma de obtenção	Espessura do Revestimento	Forma de obtenção	Profundidade da Calota
MEV	5.545 μm	Ensaio 1	4.089 μm
		Ensaio 2	4.741 μm
		Ensaio 3	5.601 μm
		Ensaio 4	5.865 μm
		Ensaio 5	6.369 μm
		Ensaio 6	8.274 μm
		Ensaio 7	10.580 μm
		Ensaio 8	10.660 μm

Assim, pode-se chegar à conclusão de que apenas os ensaios de 3 a 8 poderão ser utilizados para a aplicação dos métodos previamente descritos por este trabalho. Na Tabela 18 podem-se observar os valores correspondentes as incógnitas que são necessárias para a aplicação do método de Rutherford e Allsoop.

Tabela 18: Dados tabulados referentes à amostra 3.

a_1	b_1	N_1	n_{volts1}	SN_1
0.407	0.669	0.224	906	9350
0.462	0.685	0.221	1212	12340
0.509	0.714	0.225	1509	15642
0.649	0.813	0.224	1812	18699
0.768	0.919	0.214	2133	21029
0.771	0.923	0.222	2724	27860

Com os dados da Tabela 18, 4 diferentes programas foram desenvolvidos para calcular o k_s e k_c . No caso de Rutherford, a Eq.(10) foi utilizada em função da razão entre V_c/V ser maior que 0,5, razão que pode ser observada na Tabela 19. Os gráficos tanto por Rutherford quando para Allsoop foram obtidos e podem ser observados em sequência.

Tabela 19: Razão V_c/V .

Ensaio	Razão V_c/V p/ cálculo com mediana de t	Razão V_c/V p/ cálculo com t medido no MEV
3	0.846	0.926
4	0.793	0.895
5	0.747	0.864
6	0.613	0.763
7	0.513	0.674
8	0.511	0.672

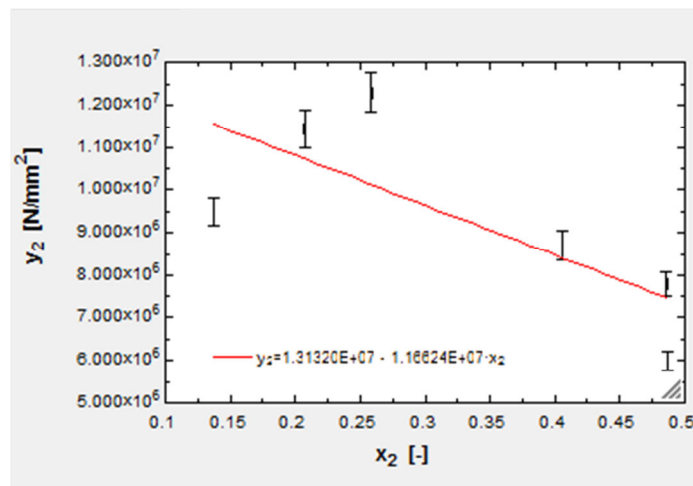


Gráfico 4: Rutherford 1 – SN/V versus V_c/V

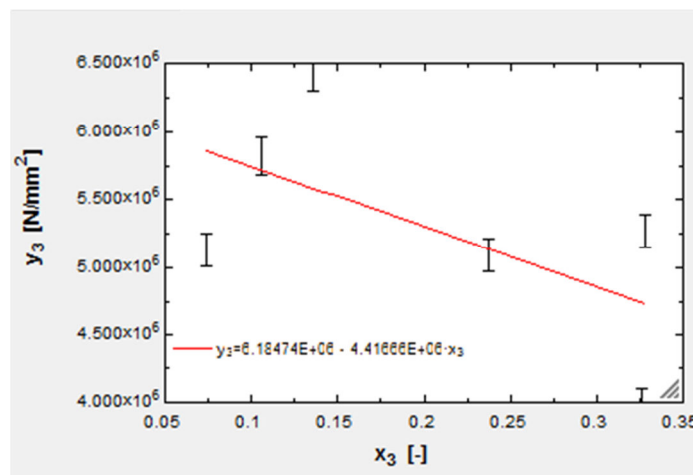


Gráfico 5: Rutherford 2 – SN/V versus V_c/V

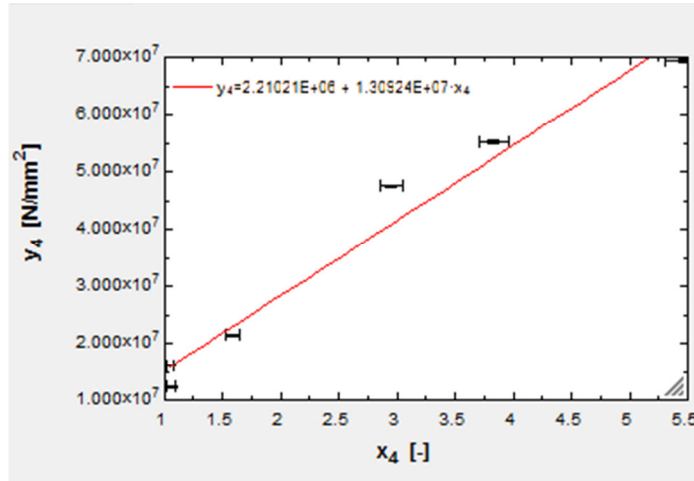


Gráfico 6: Allsoop 1 – SN/V_s versus V_c/V_s

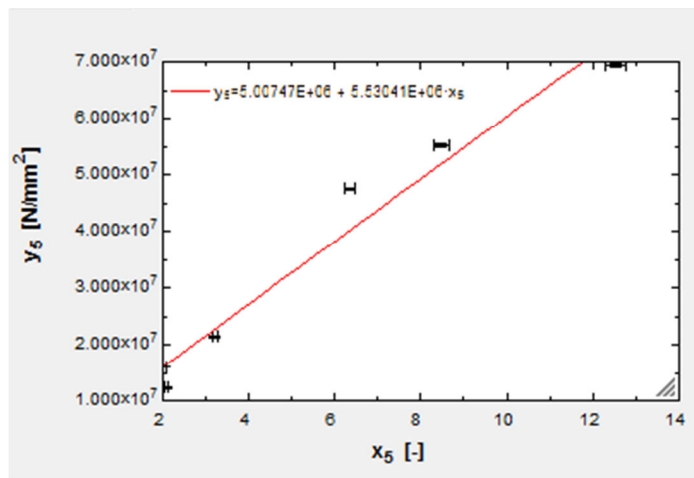


Gráfico 7: Allsoop 2 – SN/V_s versus V_c/V_s

Os erros apresentados nos Gráficos 4 a 7 vieram dos dados referentes aos erros de medidas e erros contidos nos equipamentos utilizados, que podem ser observados na Tabela 7. E partir destes gráficos obtiveram-se as equações, contidas na Tabela 20, em função do ajuste linear dos gráficos.

Tabela 20: Equações obtidas pelos ajustes dos 4 métodos utilizados.

Método	Equação obtida
Rutherford 1	$y = 1,31320 * 10^7 - 1,16624 * 10^7 * x$
Rutherford 2	$y = 6,18474 * 10^6 - 4,41666 * 10^6 * x$
Allsoop 1	$y = 2,21021 * 10^6 + 1,30924 * 10^7 * x$
Allsoop 2	$y = 5,00747 * 10^6 + 5,53041 * 10^6 * x$

A partir das equações da Tabela 20, chegou-se aos valores para k_s e k_c que podem ser observados Tabela 21.

Tabela 21: k_s e k_c obtidos.

Método	k_s	Erro em k_s	k_c	Erro em k_c
Rutherford 1	6.805E-7	2.184E-7	7.615E-8	6.115E-8
Rutherford 2	5.656E-7	3.840E-7	1.617E-7	1.703E-8
Allsoop 1	4.524E-7	3.042E-7	7.638E-8	6.460E-8
Allsoop 2	1.997E-7	1.916E-7	1.808E-7	2.019E-8

Os valores observados na Tabela 21 podem ser mais bem observados nos Gráficos 8 a 11. E a partir deles pode-se afirmar que o coeficiente de desgaste do substrato foi maior que o do sistema substrato + revestimento.

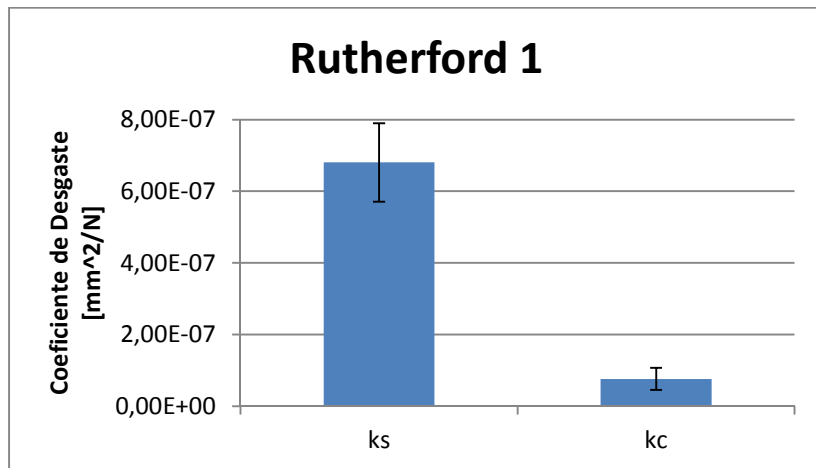


Gráfico 8: Rutherford 1.

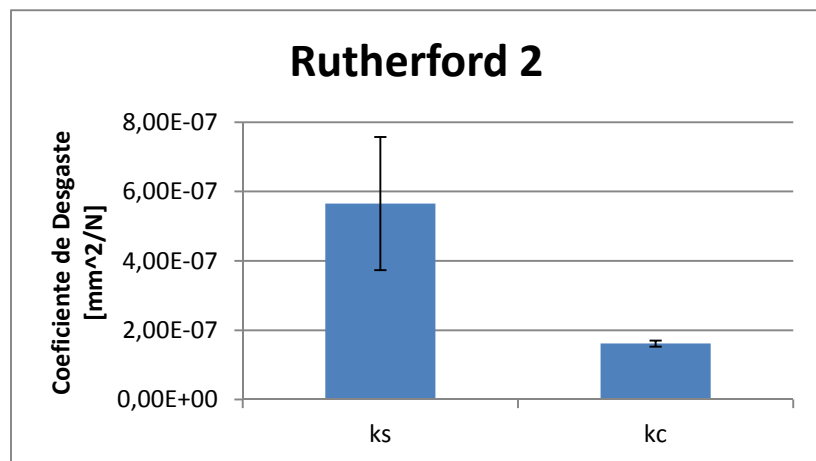


Gráfico 9: Rutherford 2.

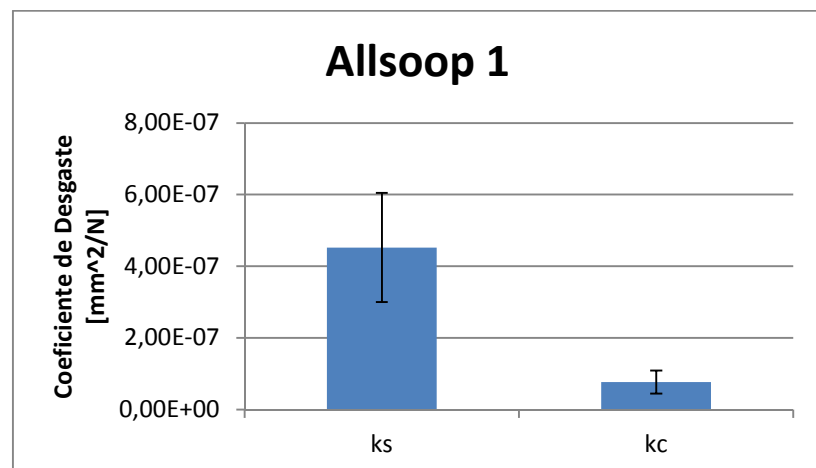


Gráfico 10: Allsoop 1.

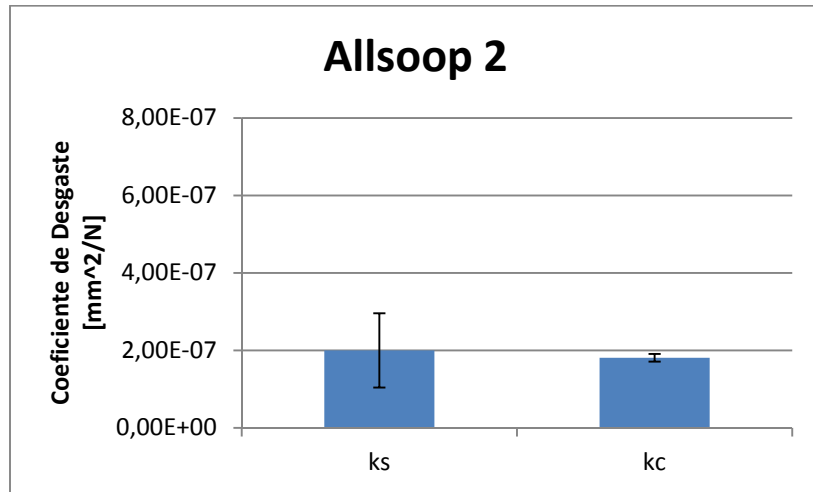


Gráfico 11: Allsoop 2.

Já nos Gráficos 12 e 13 a comparação é feita entre os métodos utilizados. Notam-se grandes erros e valores diferentes para os valores do coeficiente de desgaste do substrato, mesmo em métodos que utilizaram o mesmo grupo de dados. Estes erros podem ser explicados por o experimento ter sido feito muito superficialmente, com pouco aprofundamento no substrato, e o valor correspondente a k_s ter muita influência do revestimento.

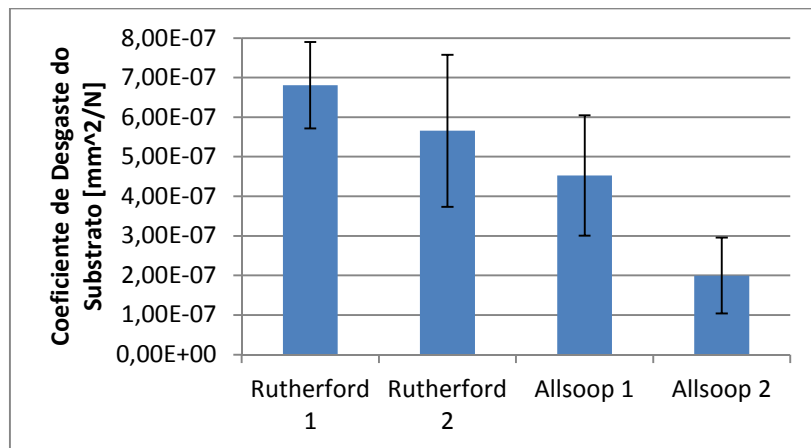


Gráfico 12: Coeficiente de desgaste do substrato para cada método.

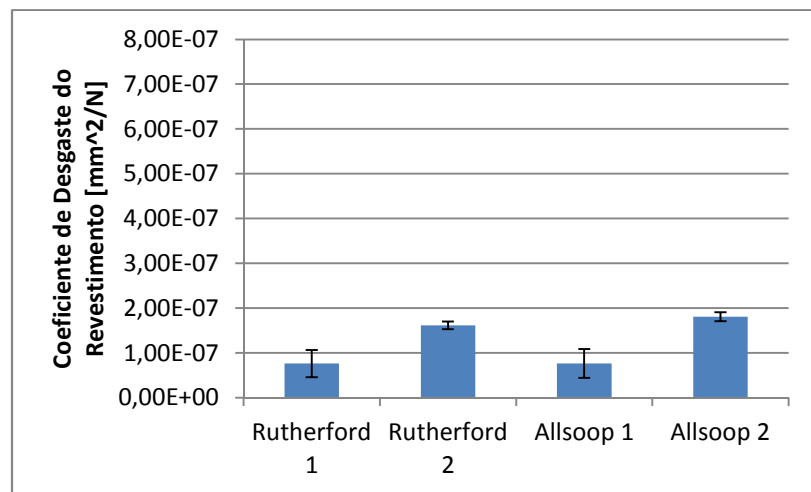


Gráfico 13: Coeficiente de desgaste do revestimento para cada método.

O Gráfico 14 trás as informações referentes aos coeficientes de correlação linear apresentado por cada ajuste linear, este coeficiente traduz o quanto os pontos do gráfico estão próximos ao ajuste linear, observa-se que o melhor ajuste para este conjunto de dados foi o método de Allsoop.

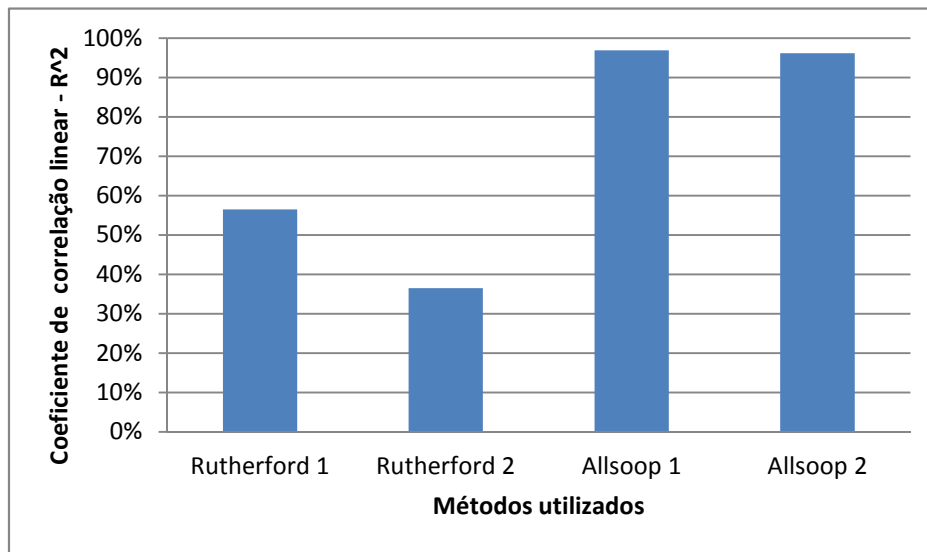


Gráfico 14: Coeficiente de correlação linear.

A escolha apropriada do método, Rutherford ou Allsoop, é fundamental para minimizar os erros e obter resultados mais condizentes com a realidade. Ao se comparar Rutherford 1 a Allsoop 1, que utilizaram t derivado de a e b , os valores obtidos para o coeficiente de desgaste do revestimento, k_c , foram muito próximos, divergindo apenas em 0,30%. Quando comparados os valores para o coeficiente de desgaste do substrato, k_s , a divergência dos dois valores foi de 33,52%. Já ao se comparar Rutherford 2 a Allsoop 2, que utilizaram t medido pelo MEV, as divergências foram de 10,56% para k_c e 35,31% para k_s .

Tais discrepâncias podem ser justificadas pelo coeficiente de correlação linear de Rutherford 1, que foi de 56,48%, tornando o ajuste linear não confiável, contra os 96,84% de Allsoop 1. O mesmo acontece entre os coeficientes de correlação linear de Allsoop 2, 96,15%, e Rutherford 2, 36,52%. O coeficiente de correlação linear está relacionado à precisão ou acurácia entre o ajuste linear de um gráfico e os dados obtidos, ou seja, quanto mais próximo de 100% melhor é o ajuste, maior é a confiabilidade na equação obtida e, conseqüentemente, mais precisos são os dados derivados destas equações.

Comparando k_c a k_s , observa-se um menor coeficiente de desgaste para o revestimento, isto é, a resistência ao desgaste do revestimento foi maior que a do substrato, como observado na Tabela 22. Remetemo-nos à ideia do parágrafo inicial deste trabalho, que demonstra a intenção de melhorar a resistência da peça com a deposição do revestimento.

Tabela 22: Melhora da resistência ao desgaste do revestimento em relação ao substrato.

Rutherford 1	88,81%
Rutherford 2	71,41%

Allsoop 1	83,12%
Allsoop 2	9,46%

Quando se compara o k_s obtido separadamente com o obtido em função dos métodos de Rutherford e Allsoop, observa-se que na melhor das hipóteses a divergência varia em 11,49%, em Allsoop 2, e na pior em 74,02% em Rutherford 1. Fornecendo mais um indício para que se afirme que Allsoop é o melhor método.

Assim, pode-se afirmar que o método de Allsoop 2 apresentou um melhor ajuste dos dados obtidos pelo experimento, o que faz com que se utilize esse método de análise de dados para se obter os melhores valores para o coeficiente de resistência ao desgaste do revestimento e do substrato para este estudo. É importante salientar que o método de Allsoop é apenas uma adaptação da equação proposta por Rutherford.

5 CONCLUSÃO

5.1 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como escopo a obtenção e análise de dados que avaliassem como o revestimento afeta a resistência de ligas de titânio, em especial da Ti-40Zr, à microabrasão. De acordo com a literatura especializada atinente ao tema, observa-se que a melhoria da resistência ao desgaste de materiais pode ser obtida com a deposição de filmes finos multicamadas como o Ti + TiN + ZrN + TiN, que foi a configuração utilizada e estudada. A literatura não faz referência à melhora dessa propriedade para o Ti-40Zr como substrato, mas neste trabalho foi observada uma conclusão similar.

Com os testes de microdureza e desgaste microabrasivo chegou-se a conclusão que a deposição da multicamada aumentou a dureza e a resistência ao desgaste do sistema revestimento + substrato. Sendo o aumento da dureza o primeiro indício de aumento da resistência ao desgaste. E da afirmação de aumento à resistência ao desgaste, outras considerações puderam ser feitas, como: a escolha do método adequado é de fundamental importância.

Observou-se que a escolha apropriada do método, Rutherford ou Allsoop, é fundamental para minimizar os erros e obter resultados mais condizentes com a realidade. Ao longo deste trabalho, objetivou-se minimizar esses erros e, em função disso, todos os cálculos se basearam no diâmetro da calota interna a , variando apenas a forma de obtenção da espessura do revestimento t . Tendo isto em vista, essa obtenção de t foi feita através de duas abordagens: cálculo a partir de a e b e medição direta do revestimento por MEV.

Ao se comparar os coeficientes de correlação linear dos 4 métodos utilizados, o método de Rutherford apresentou piores coeficientes em relação ao método de Allsoop. Esta informação é muito importante para saber quais dados derivados dos ajustes lineares são confiáveis. O coeficiente de correlação linear de Rutherford 1 foi de 56,48%, contra os 96,84% de Allsoop 1. Já para Allsoop 2 chegou-se a 96,15% e para Rutherford 2, 36,52%. E tais discrepâncias de coeficiente de correlação linear podem justificar as diferenças observadas entre os coeficientes de desgaste do revestimento e do substrato obtidos, até mesmo para métodos que utilizaram o mesmo conjunto de dados como base para análise.

Quando se compara o k_s obtido separadamente com o obtido em função dos métodos de Rutherford e Allsoop, observa-se que na melhor das hipóteses a divergência varia em 11,49%, em Allsoop 2, e na pior em 74,02% em Rutherford 1. Fornecendo mais um indício para que se afirme que Allsoop é o melhor método.

Comparando k_c a k_s observa-se um menor coeficiente de desgaste para o revestimento, isto é, a resistência ao desgaste do revestimento foi maior que o do substrato. Ao se tomar como base que o método Allsoop 2 foi o melhor em função do coeficiente de correlação linear apresentado e a

aproximação ao valor já conhecido para o coeficiente de desgaste do substrato, chega-se a um aumento de 9,46 % da resistência ao desgaste do revestimento em relação ao substrato. Remetemo-nos à ideia do parágrafo inicial deste tópico, que demonstra a intenção de melhorar a resistência da peça com a deposição do revestimento.

Portanto, o presente estudo observou um aumento de 9,46% na resistência da liga de titânio ao desgaste microabrasivo em função de seu revestimento, da forma de aquisição dos dados e pelo método de Allsoop 2.

6 TRABALHOS FUTUROS

6.1 PROPOSIÇÕES DE TRABALHOS

Ao avaliar todo o trabalho, observa-se que uma possível continuidade desde trabalho pode-se dar de forma a alterar a espessura do revestimento na tentativa de se obter um melhor coeficiente de desgaste. Variar a intercalação ou a quantidade de filmes finos multicamadas dentro dos filmes já utilizados – Ti + TiN + ZrN + TiN – para observar se um determinado filme influência positivamente ou negativamente à resistência de desgaste do material como um todo. E ainda, realizar mais teste numa tentativa de se comprovar os resultados aqui obtidos.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=unicamp-desenvolve-ligas-de-titanio-para-uso-em-proteses&id=010160090511> acesso dia 13/05/2013 as 10h36;
- [2] STACHOWIAK, W.; BATCHELOR, W. Engineering Tribology. Butterworth Heinemann, 3ª edição, 2001;
- [3] STOLARSKI, T. A. Tribology in Machine Design. Butterworth Heinemann, 1990;
- [4] LINDEN, M.; MARTINS, C.; NETO, F.; ROSS, M. Biocompatibilidade entre implantes de titânio com e sem cobertura de hidroxiapatita. RFO UPF, Passo Fundo, 1996, 24 – 30;
- [5] Xavier, S. Caracterização e Avaliação da Biocompatibilidade do Titânio submetido a diferentes tratamentos de superfície. Araçatuba, 2002;
- [6] VARGAS, A. Deposição e caracterização de revestimentos de Ni-Ti e Ni-Ti/Nb para aplicações biomédicas. Porto Alegre, 2007;
- [7] http://www.bohlersoldabrasil.com.br/janeiro_2011/artigo1_clip_image002_0000.jpg acesso dia 22/07/2013 as 8h44;
- [8] COZZA, R. C. Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste microabrasivo. 2006, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo;
- [9] www.flickr.com/photos/marcelogaziola/5611550357 acesso dia 20/06/2012 as 18h23;
- [10] ZCHECHEVA, A.; SHA, W.; MALINOV, S.; LONG, A. Enhancing the microstructure and properties of Ti alloys through nitriding and other surface engineering methods. Surface and Coatings Technology, 2005, 2192 – 2207;
- [11] WILLIAMS, D.F. Biocompatibility of clinical implant materials. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 1981-b;
- [12] <http://www.matweb.com/search> acesso dia 13/05/2013;
- [13] Ho, W. F. et al. Structure, mechanical properties, and grindability of dental Ti–Zr alloys. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 19, pp. 3179 – 3186, 2008;
- [14] Long, M; Rack, H. J. Titanium alloys in total joint replacement – a materials science perspective. Biomaterials, v. 19, p. 1621 – 1639, 1998;
- [15] KIM, W.; CHOE, H. Electrochemical Behaviors of TiN-Coated/Nanotube-formed Ti-Zr Alloy. Journal of the Korean Physical Society, 2009, 1036 – 1041;
- [16] HO, W.; CHENG, C.; CHEN, W.; WU, S. Evaluation of low-fusing porcelain bonded to dental cast Ti-Zr alloys. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 185 – 189;

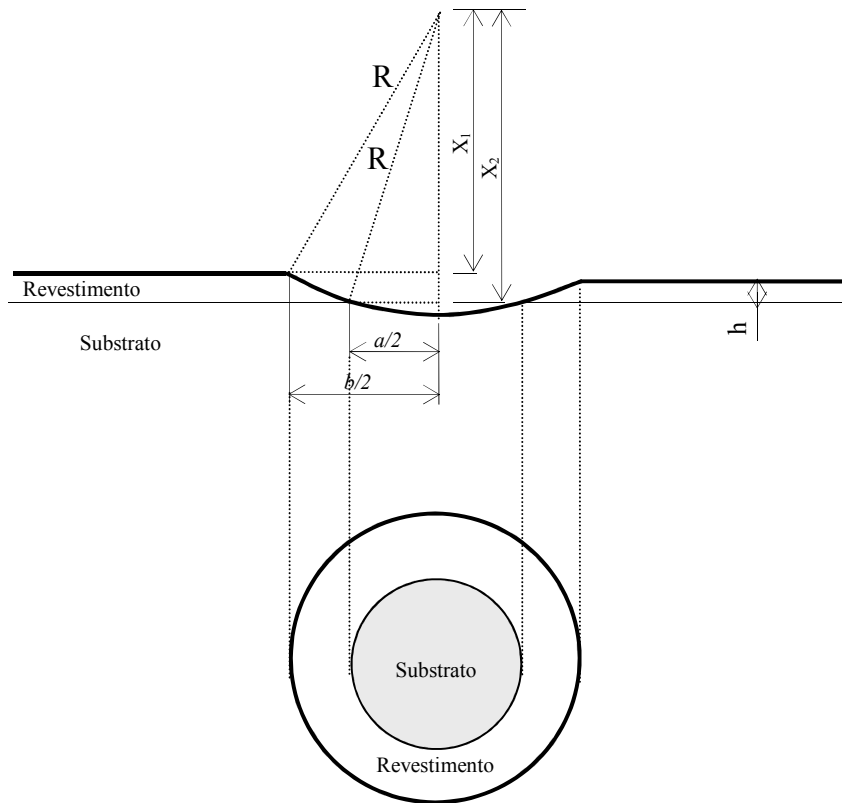
- [17] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838809020040> acesso dia 21/06/2013 as 13h07;
- [18] MATSUOKA, M.; SUCASAIRES, W.; LOPES, K.C.; CHUBACI, J.F.D.; AVANCI, L.; MITTANI, J.C. Filmes finos de nitreto de carbono e nitreto de boro preparados com método de deposição assistida por feixe de íons. *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*, 2006, 105 – 110;
- [19] TICHY, J.; MEYER, D. Review of solid mechanics in tribology. *International journal of Solid and Structures*, 2000, 391 – 400;
- [20] SCHMITZ, C. Comportamento Tribológico de Filmes Duros depositados por PVD em substratos de metal duro. PUC-PR, 2006;
- [21] RECCO, A. Estudo da obtenção e das propriedades dos filmes de TiN e TiC depositados sobre aços de ferramentas AISA H13 e D2 nitretados e não nitretados. 2008;
- [22] PAN, W.; YU, G.; HUANG, J. Mechanical properties of ion-plated TiN films on AISI D2 steel. *Surface and Coating Technology*, 1998, 111 – 119;
- [23] GONÇALVES, A. Obtenção e caracterização de revestimentos compostos de multicamadas TiO₂/TiN. São Paulo, 2010;
- [24] MILAN, R.; LORENZII, G. V.; SOARES, C. A.; FIGUERO, R. P.; CARDOSO, T.; BELMONTE, I. J. R. Dureza e resistência ao desgaste da camada de ZrN formada por nitretação a plasma sobre zircônia parcialmente estabilizada com ítria. *Cerâmica*, 2010, 300 – 304;
- [25] <http://www.usinagemonline.com.br/site/lerNoticias.php?intIdNoticia=1256> acesso dia 14/05/2013 as 9h27;
- [26] LEE, Y.; JEONG, K. Wear-life of TiN-coated steels. *Wear*, 1998, 175 – 181;
- [27] KATARIA, S.; KUMAR, N. Evolution of deformation and friction during multimode scratch test on TiN coated D9 steel. *Surface and Coating Technology*, 2010, 922 – 927;
- [28] STEYER, A.; MEGE, D.; PECH, C.; MENDIBIDE, J.; FOUNTAINE, A.; PIERSON, C.; ESNOUF, P. Influence of the nanostructure of PVD hard TiN-based films on the durability of coated steel. *Surface and Coating Technology*, 2008, 2268 – 2277;
- [29] EZUBER, H.; EL-HOUD, A.; EL-SHAWESH, F. A study on the corrosion behavior of aluminum alloys in seawater. *Materials and Design*, 2008, 801 – 805;
- [30] SILVA, J. D. Influência do revestimento de nitreto de titânio depositado via feixe de elétrons na resistência ao desgaste microabrasivo das ligas de alumínio-magnésio-silício AA6101 e AA6351;
- [31] WITALA, U.K.; PENTTINEN, M.I.; KORHONEN, A.S. Improved corrosion resistance of PVD coated TiN and ZrN. *Surface and Coatings Technology*, 1990, 191 – 204;
- [32] ARIAS, D.F.; ARANGO, Y.C.; DEVIA, A. Characterization of bilayer coatings of TiN/ZrN grown using pulsed arc PAPVD. *Applied Surface Science*, 2005, 1175 – 1181;
- [33] LUGSCHEIDER, E.; KRIMER, G.; BARIMANI, C.; ZIMMERMANN, H. PVD Coatings on Aluminum Substrates, 1995, 497 – 502;

- [34] GUU, Y.; LIN, J.; LIN, C. The tribological characteristics of titanium nitride coatings – Part. 1. Coating thickness effects. *Wear*, 1996, 12 – 21;
- [35] SOROKA, O. B. Evaluation of residual stresses in PVD-coatings. Part 1. Strength of Materials, 2012, Vol. 42;
- [36] BON, A. M., SANTOS, A.M. Sílica, FUNDACENTRO;
- [37] <http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/> acesso dia 16/05/2013 as 10h17;
- [38] WOLDMAN, M. The influence of abrasive body dimensions on single asperity wear, *Wear*, 2013;
- [39] STACHOWIAK, G. B.; STACHOWIAK, G.W. Wear mechanisms in ball-cratering tests with large abrasive particles. *Wear*, 2004, 600 – 607;
- [40] COZZA, R.C.; MELLO, J.D.B.; TANAKA, D.K.; SOUZA, R.M. SOUZA. Relationship between test severity and wear mode transition in micro-abrasive wear tests. *Wear*, 2007, 111 – 116;
- [41] 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*, 1999, 205 – 214.
- [42] ESPINCHO, J. Influência do período nas propriedades mecânicas dos revestimentos snanoestruturados. UFPR, 1 – 38;
- [43] KAHN, H. Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise Química. 2001, 1 – 11;
- [44] MALISK, A. M. Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise. UFSC, 2002, 1 – 98;
- [45] CALLISTER, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. LTC, 5ª edição, 2002;
- [46] BHUSHAN, B.; LI, X. LI. Nanomechanical characterization of solid surfaces and thin films. *International Materials Review*, 2003, 125 – 164;
- [47] <http://www.oerlikonbalzerscoating.com/bbr/por/01-products-services/02-balinit-coatings/01-measurement/indexW3DnavidW261.php> acesso dia 16/06/13 as 10h38;
- [48] MARAGON, A. A. S. Compósitos de PVA/Caulitina e PVA/Caulitina funcionalizada. UFPR, 2008, 1 – 52;
- [49] Kusano, Y., Van Acker, K., Hutchings, I.M. Methods of data analysis for the micro-sacle abrasion test on coated substrates. *Surface and Coatings Technology*. 183 (2004) 312 – 327;
- [50] RUTHEFORD, K.I.; HUTCHINGS, I.M. A micro-abrasive wear test, with particular application to coated systems. *Surface and Coatings Technology*, 1996, 231 – 239;
- [51] http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?from_info_index=51&infoid=1883&sid=48 acesso dia 07/07/2013 as 22h47;
- [52] <http://www.imz.gliwice.pl/en/aktualnosci.php?wid=30&news=228> acesso dia 16/07/2013 as 22h33.

8 ANEXOS

		Páginas
Anexo I	Cálculo da profundidade da calota	61
Anexo II	Cálculo da espessura do revestimento	61
Anexo III	Cálculo da distância de deslizamento	62
Anexo IV	Rotina no EES para cálculo de k_s do substrato	63
Anexo V	Rotina no EES para cálculo de k_s e k_c por Rutherford 1	64
Anexo VI	Rotina no EES para cálculo de k_s e k_c por Rutherford 2	64
Anexo VII	Rotina no EES para cálculo de k_s e k_c por Allsoop 1	65
Anexo VIII	Rotina no EES para cálculo de k_s e k_c por Allsoop 2	66

Anexo I: Cálculo da profundidade da calota



O argumento que o raio da calota produzida no desgaste é igual ao raio da esfera que a gera:

$$h = R - x_1 \quad (12)$$

$$R^2 = x_1^2 + (b/2)^2 \quad (13)$$

$$x_1 = \sqrt{R^2 - (b/2)^2} \quad (14)$$

$$h = R - \sqrt{R^2 - (b/2)^2} \quad (15)$$

onde h é a profundidade da calota, x_1 é a distância entre o raio até a superfície do revestimento e x_2 é a distância entre o raio e a superfície do substrato.

Anexo II: Cálculo da espessura do revestimento

Seguindo o que foi dado acima, tem-se:

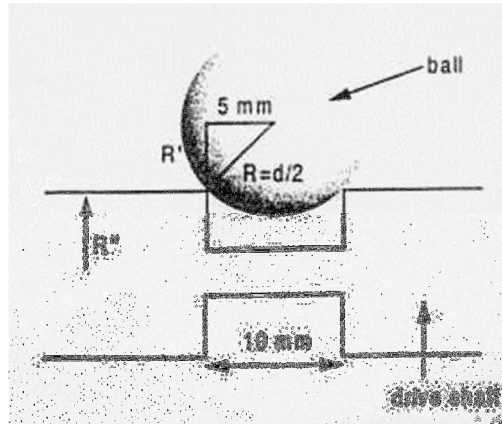
$$t = x_2 - x_1 \quad (16)$$

$$x_1 = \sqrt{R^2 - (b/2)^2} \quad (17)$$

$$x_2 = \sqrt{R^2 - (a/2)^2} \quad (18)$$

$$t = \sqrt{R^2 - (b/2)^2} - \sqrt{R^2 - (a/2)^2} \quad (19)$$

Anexo III: Cálculo da distância de deslizamento



$$S = n * \pi * D \quad (20)$$

$$S' = S'' \quad (21)$$

$$n' * \pi * d' = n'' * \pi * d'' \quad (22)$$

$$n = n' \quad (23)$$

$$n = \frac{n'' * \pi * 2 * R''}{\pi * 2 * R'} = \frac{n'' * R''}{R'} \quad (24)$$

$$S = \pi * D * \frac{n'' * R''}{R'} \quad (25)$$

$$\frac{D^2}{4} = R'^2 + 5^2 \quad (26)$$

$$S = \frac{\pi * n'' * R'' * D}{\sqrt{\frac{D^2}{4} - 5^2}} \quad (27)$$

onde D é o diâmetro da esfera de desgaste, S a distância de deslizamento, S' distância virtual de deslizamento em R' , S'' distância percorrida pelo eixo, n número de revoluções da esfera de desgaste, n' número de revoluções do ciclo, n'' número de revoluções do eixo, R' raio do ciclo virtual e R'' é o raio do eixo.

Sabendo que $R'' = 6,35$ mm, dado obtido a partir da máquina. Chega-se a:

$$S = \frac{\pi * n'' * 6,35 * D}{\sqrt{\frac{D^2}{4} - 5^2}} \quad (28)$$

Anexo IV: Rotina no EES para cálculo de k_s do substrato

"Raio da esfera:"

$$R = 10 \text{ [mm]}$$

"Fórmula da distância de deslizamento:"

$$S_1 = (\pi \cdot 6.35^2 \cdot n_{\text{voltas1}} \cdot R) / (\sqrt{((2 \cdot R)^2) / 4 - 25})$$

$$S_2 = (\pi \cdot 6.35^2 \cdot n_{\text{voltas2}} \cdot R) / (\sqrt{((2 \cdot R)^2) / 4 - 25})$$

"Valores que serão plotados no gráfico:"

$$SN_1 = S_1 \cdot N_1$$

$$V_1 = \pi \cdot b_1^4 / (64 \cdot R)$$

$$SN_2 = S_2 \cdot N_2$$

$$V_2 = \pi \cdot b_2^4 / (64 \cdot R)$$

"Erro em SN:"

$$\text{Erro}_{\%SN1} = 1/S_1 + 0.001/N_1$$

$$\text{Erro}_{SN1} = \text{Erro}_{\%SN1} \cdot SN_1$$

$$\text{Erro}_{\%SN2} = 1/S_2 + 0.001/N_2$$

$$\text{Erro}_{SN2} = \text{Erro}_{\%SN2} \cdot SN_2$$

"Erro em V:"

$$\text{Erro}_{\%V1} = (0.0003/b_1) \cdot 4$$

$$\text{Erro}_{V1} = \text{Erro}_{\%V1} \cdot V_1$$

$$\text{Erro}_{\%V2} = (0.0003/b_2) \cdot 4$$

$$\text{Erro}_{V2} = \text{Erro}_{\%V2} \cdot V_2$$

1	2	3	4	5	6	7	8	9
b_1 [mm]	b_2 [mm]	N_1 [N]	N_2 [N]	n_{voltas1} [-]	n_{voltas2} [-]	Erro_{SN1} [-]	Erro_{SN2} [-]	Erro_{V1} [-]
0.764	0.725	0.202	0.213	303	307	14.16	14.36	0.000002627
0.811	0.785	0.208	0.223	606	611	28.13	28.37	0.000003142
0.841	0.79	0.21	0.208	913	917	42.27	42.45	0.000003504
0.889	0.871	0.21	0.206	1215	1223	56.19	56.55	0.000004139
0.889	0.875	0.213	0.202	1519	1529	70.19	70.64	0.000004139
0.91	1	0.218	0.224	1820	1854	84.07	85.64	0.000004439
0.969	1.006	0.219	0.225	2146	2162	99.09	99.83	0.000005359
1.035	1.035	0.212	0.204	2740	2751	126.4	126.9	0.000006531

10	11	12	13	14
Erro_{V2} [-]	SN_1 [mm·N]	SN_2 [mm·N]	V_1 [mm ³]	V_2 [mm ³]
0.000002245	2820	3013	0.001672	0.001356
0.000002849	5807	6277	0.002124	0.001864
0.000002904	8833	8787	0.002456	0.001912
0.000003892	11755	11607	0.003066	0.002825
0.000003946	14906	14229	0.003066	0.002877
0.00000589	18279	19133	0.003366	0.004909
0.000005997	21652	22411	0.004328	0.005028
0.000006531	26761	25855	0.005633	0.005633

Anexo V: Rotina no EES para cálculo de k_s e k_c por Rutherford 1

"EM FUNÇÃO DE a E t_med"

$R = 10 \text{ [mm]}$
 $S = (6.35 \cdot 2 \cdot \pi \cdot R) / (\sqrt{R^2 - 25}) \cdot (n_{\text{voltas}})$
 $V_s = (\pi \cdot a^4) / (64 \cdot R)$
 $V = \pi \cdot t \cdot (a^2 + 4 \cdot R \cdot t) / 4 + (\pi \cdot a^4) / (64 \cdot R)$
 $V_c = \pi \cdot t \cdot (a^2 + 4 \cdot R \cdot t) / 4$
 $t = (b^2 - a^2) / (8 \cdot R)$
 $t_{\text{med}} = 0.003197$
 $V_c / V = \text{razão}$

"RUTHERFORD"

$y_2 = S \cdot N / V$
 $x_2 = V_s / V$

"ERRO"

$\text{Erro}_{\%SNV} = 1/S + 0.001/N + (0.0001/a)^4 + ((0.0001/a)^2 + 0.0001) + 0.0001/t$
 $\text{Erro}_{SNV} = \text{Erro}_{\%SNV} \cdot y_2$

$\text{Erro}_{\%VsV} = (0.0001/a)^4$
 $\text{Erro}_{VsV} = \text{Erro}_{\%VsV} \cdot x_2$

1	2	3	4	5	6	7	8	9
a	b	N	n_{voltas}	x_2	y_2	razão	Erro_{SNV}	Erro_{VsV}
[mm]	[mm]	[N]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[-]		
0.407	0.6693	0.224	906	0.1367	9.492E+06	0.8633	326513	0.0001344
0.462	0.6849	0.221	1212	0.207	1.142E+07	0.793	425393	0.0001793
0.509	0.7137	0.225	1509	0.2587	1.228E+07	0.7413	463036	0.0002033
0.649	0.8134	0.224	1812	0.4053	8.702E+06	0.5947	337448	0.0002498
0.768	0.9196	0.214	2133	0.4865	5.990E+06	0.5135	220653	0.0002534
0.771	0.9234	0.222	2724	0.486	7.806E+06	0.514	283930	0.0002522

Anexo VI: Rotina no EES para cálculo de k_s e k_c por Rutherford 2

"EM FUNÇÃO DE b E t DO MEV"

$R = 10 \text{ [mm]}$
 $S = (6.35 \cdot 2 \cdot \pi \cdot R) / (\sqrt{R^2 - 25}) \cdot (n_{\text{voltas}})$
 $V_s = V - V_c$
 $V = \pi \cdot t_{\text{med}} \cdot (a^2 + 4 \cdot R \cdot t_{\text{med}}) / 4 + (\pi \cdot a^4) / (64 \cdot R)$
 $V_c = \pi \cdot t_{\text{med}} \cdot (a^2 + 4 \cdot R \cdot t_{\text{med}}) / 4$
 $t_{\text{med}} = 0.005545$
 $V_c / V = \text{razão}$

"RUTHERFORD"

$y_3 = S \cdot N / V$
 $x_3 = V_s / V$

"ERRO"

$\text{Erro}_{\%SNV} = 1/S + 0.001/N + (0.0001/a)^4 + ((0.0001/a)^2 + 0.0001) + 0.0001/t_{\text{med}}$
 $\text{Erro}_{SNV} = \text{Erro}_{\%SNV} \cdot y_3$

$$\text{Erro_}\%VsV = (0.0001/a)^4$$

$$\text{Erro_}VsV = \text{Erro_}\%VsV * x_3$$

1	2	3	4	5	6	7	8	9
a	b	N	n _{voltas}	x ₃	y ₃	razão	Erro _{SNV}	Erro _{VsV}
[mm]	[mm]	[N]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[-]		
0.407	0.6693	0.224	906	0.07392	5.131E+06	0.9261	123651	0.00007265
0.462	0.6849	0.221	1212	0.1055	5.823E+06	0.8945	139615	0.00009137
0.509	0.7137	0.225	1509	0.1359	6.454E+06	0.8641	153416	0.0001068
0.649	0.8134	0.224	1812	0.2372	5.094E+06	0.7628	119879	0.0001462
0.768	0.9196	0.214	2133	0.3258	4.011E+06	0.6742	94664	0.0001697
0.771	0.9234	0.222	2724	0.3279	5.267E+06	0.6721	123385	0.0001701

Anexo VII: Rotina no EES para cálculo de k_s e k_c por Allsoop 1

"EM FUNÇÃO DE a E t_{med}"

$$R = 10 \text{ [mm]}$$

$$S = (6.35^2 * \pi * R) / (\sqrt{R^2 - 25}) * (n_{\text{voltas}})$$

$$V_s = V - V_c$$

$$V = \pi * t_{\text{med}} * (a^2 + 4 * R * t_{\text{med}}) / 4 + (\pi * a^4) / (64 * R)$$

$$V_c = \pi * t_{\text{med}} * (a^2 + 4 * R * t_{\text{med}}) / 4$$

$$t = (b^2 - a^2) / (8 * R)$$

$$t_{\text{med}} = 0.003197$$

"ALLSOOP"

$$y_4 = S * N / V_s$$

$$x_4 = V_c / V_s$$

"ERRO"

$$\text{Erro_}\%SNV = 1/S + 0.001/N + (0.0001/a)^4$$

$$\text{Erro_}SNV = \text{Erro_}\%SNV * y_4$$

$$\text{Erro_}\%VsV = (0.0001/a)^4 + ((0.0001/a)^2 + 0.0001) + 0.0001/t$$

$$\text{Erro_}VsV = \text{Erro_}\%VsV * x_4$$

1	2	3	4	5	6	7	8	9
a	b	N	n _{voltas}	x ₄	y ₄	Erro _{SNV}	Erro _{VsV}	
[mm]	[mm]	[N]	[-]	[-]	[N/mm ²]			
0.407	0.6693	0.224	906	5.472	6.941E+07	379771	0.1637	
0.462	0.6849	0.221	1212	3.832	5.518E+07	298445	0.1253	
0.509	0.7137	0.225	1509	2.949	4.747E+07	248985	0.09803	
0.649	0.8134	0.224	1812	1.583	2.147E+07	109350	0.0543	
0.768	0.9196	0.214	2133	1.055	1.231E+07	64083	0.03393	
0.771	0.9234	0.222	2724	1.046	1.606E+07	80812	0.03331	

Anexo VIII: Rotina no EES para cálculo de k_s e k_c por Allsoop 2

"EM FUNÇÃO DE a E t DO MEV"

$R = 10 \text{ [mm]}$
 $S = (6.35^2 \cdot \pi \cdot R) / (\sqrt{R^2 - 25}) \cdot (n_{\text{voltas}})$
 $V_s = V - V_c$
 $V = \pi \cdot t_{\text{med}} \cdot (a^2 + 4 \cdot R \cdot t_{\text{med}}) / 4 + (\pi \cdot a^4) / (64 \cdot R)$
 $V_c = \pi \cdot t_{\text{med}} \cdot (a^2 + 4 \cdot R \cdot t_{\text{med}}) / 4$
 $t_{\text{med}} = 0.005545$

"ALLSOOP"

$y_5 = S \cdot N / V_s$
 $x_5 = V_c / V_s$

"ERRO"

$\text{Erro}_{\%SNV} = 1/S + 0.001/N + (0.0001/a)^4$
 $\text{Erro}_{SNV} = \text{Erro}_{\%SNV} \cdot y_5$

$\text{Erro}_{\%VsV} = (0.0001/a)^4 + ((0.0001/a)^2 + 0.0001) + 0.0001/t_{\text{med}}$
 $\text{Erro}_{VsV} = \text{Erro}_{\%VsV} \cdot x_5$

1	2	3	4	5	6	7	8
a [mm]	b [mm]	N [N]	n_{voltas} [-]	x_5 [-]	y_5 [N/mm ²]	Erro_{SNV}	Erro_{VsV}
0.407	0.6693	0.224	906	12.53	6.941E+07	379771	0.2456
0.462	0.6849	0.221	1212	8.476	5.518E+07	298445	0.1647
0.509	0.7137	0.225	1509	6.356	4.747E+07	248985	0.1228
0.649	0.8134	0.224	1812	3.216	2.147E+07	109350	0.06128
0.768	0.9196	0.214	2133	2.07	1.231E+07	64083	0.03915
0.771	0.9234	0.222	2724	2.049	1.606E+07	80812	0.03876