

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE UnB GAMA-FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE
MATERIAIS DA ENGENHARIA

COMPORTAMENTO AO DESGASTE MICROABRASIVO DE LIGAS
NiTi

ÍTALO DE BARROS CASTRO

ORIENTADORA: Dra. PALLOMA VIEIRA MUTERLLE

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM INTEGRIDADE DOS
MATERIAS DA ENGENHARIA

PUBLICAÇÃO: FGA.DM – 009A/2014

BRASÍLIA/DF: FEVEREIRO/2014

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE UnB GAMA/FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE
MATERIAIS DA ENGENHARIA

COMPORTAMENTO AO DESGASTE MICROABRASIVO DE LIGAS
NiTi

ÍTALO DE BARROS CASTRO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:

Profª Dra Palloma Vieira Muterlle (ENM-UnB)
(Orientadora)

Prof. Dr. Emmanuel Pacheco Rocha Lima (FGA-UnB)
(Examinador Interno)

Prof. Dr Edson Paulo da Silva (ENM-UnB)
(Examinador Externo)

Brasília, 21/02/2014

FICHA CATALOGRÁFICA

CASTRO, ITALO BARROS

Comportamento ao Desgaste Microabrasivo de Ligas NiTi, [Distrito Federal] 2014.

Nº.116p. 210 x 297 mm (FGA/FT/UnB, Mestre, Integridade de Materiais da Engenharia, 2014).

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade UnB Gama. Programa de Pós-Graduação em Integridade de Materiais da Engenharia.

1. Ligas NiTi

2. Desgaste

3. Envelhecimento

4. Coeficiente de Desgaste

I. FGA/FT/UnB

II. Mestre

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CASTRO, I. B. (2014). Comportamento ao Desgaste Microabrasivo de Ligas NiTi [Dissertação de Mestrado em Integridade de Materiais da Integridade da Engenharia], Publicação Nº./ANO, Faculdade UnB Gama/FT/Universidade de Brasília, DF, nº116p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Ítalo de Barros Castro

TÍTULO: Comportamento ao Desgaste Microabrasivo de Ligas NiTi

GRAU: Mestre

ANO: 2014

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Ítalo de Barros Castro

Rua Brasília, Nº 102, Centro

38600000 Paracatu, MG – Brasil.

Ítalo.bcastro@hotmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, pela proteção em cada viagem até a UnB, pela saúde e por cada pessoa que esteve presente na minha caminhada durante o mestrado.

Agradeço à minha família pelo apoio, carinho e amor. O papel acolhedor, incentivador e compreensivo dos meus pais, irmãos e tios foram de fundamental importância para o meu processo de aprendizagem.

Agradeço à minha orientadora, Prof.^a. Dra. Palloma Vieira Murtelle pelo apoio, compreensão e ajuda na realização deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Edson Paulo da Silva por ter concedido o material para a realização de trabalho e por ter ajudado com seus vastos conhecimentos sobre as ligas de NiTi.

Agradeço aos alunos do SG9 pelo incentivo e apoio durante o processo de realização das atividades de laboratório e confecção da dissertação.

Agradeço à FINEP pelo apoio financeiro no contexto do convênio 04.10.0465.01 (Desenvolvimento de um absorvedor dinâmico de vibração do tipo stockbridge baseado no comportamento pseudoelástico das ligas com memória de forma).

SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO	16
1.1 MOTIVAÇÃO	16
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	17
1.2.1 Objetivo Geral	17
1.2.2 Objetivos Específicos	17
1.2.3 Apresentação do Trabalho	17
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA	19
2.1.1 História	19
2.1.2 O Níquel Titânio e suas Características	20
2.1.3 Efeito Memória de Forma	21
2.1.4 Pseudoelasticidade	22
2.1.5 Diagrama de Fase da Liga NiTi	23
2.1.6 Propriedade das Liga NiTi	25
2.2 TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA	26
2.2.1 Transformação Martensítica Induzida por Temperatura	26
2.2.2 Transformação Martensítica Induzida por Tensão	28
2.4 TRATAMENTOS TÉRMICOS DAS LIGAS NiTi	29
2.4.1 Efeito do Tratamento Térmico na Dureza das Ligas de NiTi	30
2.5 APLICAÇÃO DA LIGA NÍQUEL TITÂNIO	32
2.5.1 Aplicação em Acoplamento de Tubulações	32
2.5.2 Aplicação Aeronáutica	33
2.5.3 Aplicação Biomédica	34
2.5.4 O Desgaste Abrasivo do NiTi e suas Aplicações	36
2.6 TRIBOLOGIA	37
2.6.1 Introdução a Tribologia	37
2.7 ATRITO	39
2.7.1 Introdução ao Atrito	39
2.7.2 As Leis do Atrito e sua Teoria	40
2.7.3 Dureza do Material	42
2.7.4 Cálculo do Coeficiente de Atrito	43
2.7.5 O Atrito e suas Aplicações	43
2.7.6 Considerações Econômicas	44
2.8 DESGASTE	45
2.8.1 Tipos de Desgaste	45
2.8.2 Desgaste Abrasivo	46
2.9 RUGOSIDADE	59
2.9.1 Estudo da Rugosidade	59
2.9.2 Processo de Avaliação de uma Superfície (Rugosidade)	60
2.9.3 Sistema M	61
2.9.4 Parâmetro RA	61
2.9.5 Parâmetro RA X (RQ)	64
2.9.6 Parâmetro RZ	66
3.0 MATERIAIS E MÉTODOS	67
3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE NiTi	69
3.2 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO	73
3.2.1 Rugosidade	73

3.2.2	Caracterização por Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)	73
3.2.3	Ensaio de dureza Vickers.....	74
3.4	ENSAIO DE DESGASTE MICROABRASIVO.....	76
3.4.1	Preparação da Lama Abrasiva	76
3.4.2	Fixação da amostra e ajuste de carga	77
3.4.3	Velocidade da Esfera e Tempo de Ensaio	78
3.4.4	Medição da Calota Esférica	78
4.0	RESULTADOS E DISCURSÕES	80
4.1	RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE	80
4.2	RESULTADOS DE DUREZA	80
4.3	ANÁLISES METALOGRÁFICAS E INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS.....	82
4.4	RESULTADOS DE DSC	85
4.5	RESULTADOS DE DESGASTE	90
5.0	CONCLUSÃO.....	97
6.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	99
7.0	REFERÊNCIAS.....	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - William J. Buehler , 1968, em uma demonstração sobre as propriedades do NiTi. (12).....	20
Figura 2 - Evolução da Martensita com a temperatura (7).	22
Figura 3 - Esquema do ciclo de tensão deformação na transformação martensítica (20).....	22
Figura 4 - Diagrama de Fases da Liga NiTi (2).	23
Figura 5 - Estrutura cúbica de corpo centrado (55).....	24
Figura 6 - Representação do modelo de estrutura martensítica presente nas ligas de NiTi (27).....	24
Figura 7 - Processo de transformação entre austenita B2 e martensita B19 (27).26	
Figura 8 - Três possíveis caminhos de transformação de fases das ligas a base de NiTi (1).	27
Figura 9 - Curva tensão-deformação-temperatura, mostrando a ocorrência do efeito memória de forma (29).	27
Figura 10 - Representação gráfica do efeito da pseudoelasticidade (10).	28
Figura 11 - Curvas de DSC para amostras de NiTi, Ti-50,6%Ni: (a) solubilizado e tratado a 1000°C por 1 hora seguido de têmpera em água, (b)-(f) envelhecido a 450°C por 1, 11, 24, 73 e 150 horas respectivamente (1).....	30
Figura 12 - Dureza HV em função do tratamento térmico liga de NiTi (26).....	31
Figura 13 - Dureza HRC em função da temperatura do tratamento térmico (31). 32	
Figura 14 - Luvas e tubos fabricados com Níquel Titânio (33).	33
Figura 15 - Luva expandida e montada no tubo (33).....	33
Figura 16 - Exemplo de aplicação do NiTi na aeronáutica (34).....	34
Figura 17 – Lima endodôntica utilizada para a realização de canal no dente (10).	35
Figura 18 - Fio ortodôntico feito de NiTi (37), (38).....	35
Figura 19 - Diferentes aplicações das ligas NiTi - Stents auto expansíveis com memória de forma (37), (38).....	35

Figura 20 - (a) Lima endodôntica durante a realização de um canal (b) Representação morfológica de uma lima endodôntica após ensaios mecânicos (4).....	36
Figura 21 - Superfície de limas endodônticas: (a) não utilizada, (b) utilizada 3 vezes, (c) utilizada 6 vezes, (d) utilizada 9 vezes, (e) utilizada 12 vezes (f) ampliação da lima utilizada 12 vezes (38).....	36
Figura 22 - Stent para abertura de veias (a) Aplicação do Stent (b) Stent com Desgaste;(39).....	37
Figura 23 - Ilustração do contato entre uma superfície e outra. a) contato microscópico b) contato macroscópico (45).	40
Figura 24 - Relação entre o número de Mohs e dureza Vickers (kgf/mm ²), (50)..	42
Figura 25 - Desgaste abrasivo por riscamento (51).	47
Figura 26 - Interações físicas entre a partícula e a superfície (60).....	47
Figura 27 - Micrografia mostrando exemplo de desgaste microabrasivo a dois corpos (61).	48
Figura 28 - Desgaste abrasivo por rolamento (51).	48
Figura 29 - Micrografia mostrando exemplo de desgaste microabrasivo a três corpos(61).	48
Figura 30 - Micrografia mostrando exemplo de desgaste microabrasivo a dois e três corpos (63).	49
Figura 31 - Mapa dos mecanismos de desgaste para desgaste microabrasivo por esfera em aço ferramenta utilizando alumina F1200 SiC como abrasivo (61).	49
Figura 32 - Mapa de desgaste com a ilustração da superfície resultante (61).	50
Figura 33 - Classificação do ensaio tribológico de acordo com o realismo (64)...	51
Figura 34 - Ilustração de testes para desgaste por deslizamento (30).....	52
Figura 35 - Modelo analítico de desgaste abrasivo – Partícula única (66).	53
Figura 36 - Sistema tribológico de desgaste microabrasivo por esfera livre.	55
Figura 37 - Calota de desgaste microabrasivo por esfera livre.	55
Figura 38 - (a) Medição do diâmetro da cratera de desgaste (b) Medição do diâmetro da esfera de desgaste.	56
Figura 39 - Representação da esfera e encaixe no eixo da máquina de desgaste microabrasivo.	57

Figura 40 - ilustração dos tipos de perfis presentes em uma superfície (42).	61
Figura 41 - Linha média traçada a partir dos picos e vales da superfície (44).	61
Figura 42 - Ilustração do modelo de cálculo do Ra (44).	62
Figura 43 - Classificação da rugosidade Ra em função do tipo de processo de usinagem utilizado (44).	64
Figura 44 - Rugosidade Média Rz – (45).	66
Figura 45 - Fluxograma Organizacional da metodologia experimental.	67
Figura 46 - Forno Elétrico.	68
Figura 47 - Cortadeira Automática Struers – Modelo <i>Secotom15</i>	70
Figura 48 - Amostras de NiTi.	70
Figura 49 - Lixadeira manual Polipan-U-Pnatec.	71
Figura 50 - Microscópio Óptico Olympus BX51 e máquina Sony SSC-DC50A.	72
Figura 51 - MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura.	72
Figura 52 - Rugosímetro Mitutoyo SJ201	73
Figura 53 - Calorímetro DSC <i>Netzsch 200 F3 Maia</i> e cadinhos de alumínio usados no ensaio.	74
Figura 54 - Durômetro ZHU250 fabricado pela Zwick/Roell.	75
Figura 55 - Micro durômetro FM 700 fabricado pela Future Teck.	75
Figura 56 - Equipamento de Teste por desgaste Microabrasivo CSM Calowear.	76
Figura 57 - Lama abrasiva no agitador magnético.	77
Figura 58 - Porta amostra e medidor de carga.	77
Figura 59 - Microscópio Óptico – CSM Calowear.	78
Figura 60 - Dureza HV20 para as ligas de NiTi com memória de forma e pseudoelásticas.	81
Figura 61 - Resultados de Dureza Vickers HV20 e HV0,2.	82
Figura 62 - Imagens realizadas no MEV(a) Microestrutura da liga PE390 Pseudoelástica como recebida (1000X) (b) Microestrutura da liga LM 391 (8000X).	82
Figura 63 - Imagem realizada no MEV - Amostra PE390 Pseudoelástica – Tratada a 350° C – (1000X).	83

Figura 64 - Imagem realizada no MEV - Amostra PE390 Pseudoelástica – Tratada a 450° C – (1000X).....	84
Figura 65 - Imagem realizada no MEV - Amostra PE390 Pseudoelástica – Tratada a 500° C – (1000X).....	84
Figura 66 - Imagem realizada no MEV - Amostra PE390 Pseudoelástica – Tratada a 600° C – (1000X).....	85
Figura 67 - Resultado de DSC amostra PE390.....	85
Figura 68 - Resultado de DSC amostra PE390-T01.	86
Figura 69 - Resultado de DSC amostra PE390-T02.	87
Figura 70 - Resultado de DSC amostra PE390-T03.	88
Figura 71 - Resultado de DSC amostra PE390-T04.	88
Figura 72 - Resultado de DSC amostra LM391 – Memória de Forma.	89
Figura 73 - Resultados de desgaste de cada tipo de amostra versus a distância de deslizamento da esfera.	90
Figura 74 - Resultados de desgaste microabrasivo da amostra PE390 e PE390-T01.....	91
Figura 75 - Resultados de desgaste microabrasivo da amostra PE390 e PE390-T02.....	91
Figura 76 - Resultados de desgaste microabrasivo da amostra PE390 e PE390-T03.....	92
Figura 77 - Resultados de desgaste microabrasivo da amostra PE390 e PE390-T04.....	92
Figura 78 - Resultados de desgaste microabrasivo da amostra PE390 e LM391.....	93
Figura 79 - Ilustração da divisão dos resultados de desgaste por estágios (Preto – Estágio -01, Azul – Estágio 02, Amarelo – estágio 03).	93
Figura 80 - Resultados de coeficiente de desgaste por estágios.	94
Figura 81 - Resultado do coeficiente médio de desgaste para cada tipo de amostra.	94
Figura 82 - Resultados de Taxa de Desgaste.	95
Figura 83 - Relação entre a taxa de desgaste e a Microdureza HV0,5.	95

Figura 84 - (a) Característica da superfície de desgaste microabrasivo para a amostra com memória de forma LM391 (b) Característica da superfície de desgaste microabrasivo da amostra Pseudoelástica PE390..... 96

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de propriedades das ligas de NiTi (28).....	25
Tabela 2 - Classificação do desgaste abrasivo através da severidade (57).....	50
Tabela 3 - Indicação das Características do estado de superfície (46).....	63
Tabela 4 - Tabela com características das ligas de NiTi fornecida pelo fabricante	68
Tabela 5 - Nomenclaturas das amostras de NiTi	69
Tabela 6 - Características do abrasivo	76
Tabela 7 - Tabela com parâmetros de velocidade e tempo de ensaio.	78
Tabela 8 - Resultados de rugosidade da Superfície.....	80
Tabela 9 - Resultados de dureza Vickers – HV20 e HV0,2.....	81
Tabela 10 - Temperaturas de transformação para cada amostra.	90

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

A - área

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

Af - Austenita Final

As - Austenita Inicial

b - Diâmetro da cratera de desgaste

B19 - Estrutura ortorrômbica NiTi

B19' - Estrutura Monocíclica do NiTi

B2 - Estrutura Austenítica cúbica de corpo centrado do NiTi

C - Comprimento do encaixe da esfera

CCC - Estrutura cúbica de corpo centrado

d - Diâmetro da esfera de desgaste

DSC - Calorimetria Diferencial de Varredura

E.M.F - Efeito Memória de Forma

EDS - Espectroscopia de energia dispersiva

F-14 - Caça Supersônico

Fn - Força Normal – N

Gf - Grama Força

Gpa - Giga Pascal

H - Dureza do material

HV - Dureza Vickers

K - Coeficiente adimensional de desgaste

k - Coeficiente dimensional de desgaste – mm^3/Nm

Kgf - Quilograma Força

L - Distância de deslocamento

LM 391 - NiTi Memória de Forma

MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura

Mf - Martensita Final

Mpa - Mega Pascal

Ms - Martensita Inicial

N - Número de ciclos do eixo de acionamento
NBR - Norma Brasileira
NiTi - Liga de Níquel Titânio
PE390 - NiTi Pseudoelástico com recebido
PE390-T01 - NiTi Pseudoelástico envelhecidas a 350°C
PE390-T02 - NiTi Pseudoelástico envelhecidas a 450°C
PE390-T03 - NiTi Pseudoelástico envelhecidas a 500°C
PE390-T04 - NiTi Pseudoelástico envelhecidas a 600°C
PIB - Produto Interno Bruto
Q - Taxa de Desgaste - mm³/m
Ra - Rugosidade Média
Rf - Fase R Final
RMS - Raiz quadrada principal
Rpm - Rotações por Minuto
Rq - Rugosidade Média Quadrática
Rs - Fase R Inicial
Rz - rugosidade Média dos valores da amplitude do Cut-off
SMA – *Shape Memory Alloy*
T - Força Tangencial
USA - Estados Unidos da América
Vd - Volume de material deslocado
X - profundidade de penetração do endentado

RESUMO

As ligas NiTi fazem parte de um grupo denominado materiais inteligentes, que são usadas em diversas aplicações em função da sua capacidade de retornar a sua forma original, após sofrerem uma deformação da ordem de aproximadamente 8%, a qual é resultante da transformação martensítica induzida por tensão ou temperatura. Estes materiais são largamente utilizados em setores como engenharia, odontologia, medicina e aeronáutica. Contudo, para algumas aplicações, além da sua característica de memória de forma e pseudoelasticidade, a liga precisa ter certa resistência ao desgaste. Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito do tratamento de envelhecimento realizado em temperaturas de 350 a 600°C nos resultados de desgaste microabrasivo de uma liga de NiTi pseudoelástica, utilizando uma máquina de ensaio microabrasivo por esfera livre para a identificação do coeficiente de desgaste. Uma liga NiTi com memória de forma foi testada também para efeito de comparação. Durante o processo de avaliação dos resultados de micro dureza e desgaste foi identificado que o tratamento térmico de envelhecimento realizado na liga pseudoelástica, aumentou a dureza em até 20% para temperaturas de 350°C e 450°C. Porém, para temperaturas de 500°C e 600° foi observado a redução da dureza. Contudo, os valores dos resultados de coeficiente de desgaste foram inferiores para todas as temperaturas de tratamento quando comparado com o a liga pseudoelástica como recebido, reduzindo em até 30% o coeficiente de desgaste. A liga de NiTi com memória de forma teve resultados de dureza 17% menor do que a liga de NiTi Pseudoelástica. Porém, a liga com memória de forma obteve resultados coeficiente de desgaste microabrasivo 14% menor quando comparado com a liga de NiTi pseudoelástica.

Palavras chave: liga NiTi; desgaste microabrasivo; envelhecimento; coeficiente de desgaste.

ABSTRACT

The NiTi alloy is part of a group called smart materials that are used in various applications owing on their ability to return to its original shape after suffering a deformation in the order of about 8 %, which is the result of stress-induced martensitic transformation or temperature. These materials are widely used in industries like engineering, dentistry, medicine and aeronautics. However for some applications beyond of its characteristic of shape memory and pseudoelasticity, the league needs to have some wear resistance. This study aimed to evaluate the effect of the aging treatment carried out at temperatures 350-600 ° C in results of wear micro-abrasive of NiTi alloy Pseudoelástica using a micro-abrasive machine to essay by free ball for identification of the wear coefficient. An alloy NiTi shape memory was also tested for comparison. During the process of evaluating the results of micro hardness and wear was identified that heat treatment increased the hardness in 20% to the temperatures 350 °C and of 450 ° C, but for temperatures of 500 ° C and 600 ° reduction was observed hardness. However, the values of the wear coefficient results were lower for all temperatures of treatment when compared with the material as received, reducing until 30% the wear coefficient. The shape memory alloy NiTi had results in 17% lower hardness than the NiTi alloy Pseudoelástica, but the shape memory alloy obtained results micro-abrasive wear coefficient 14% lower compared with the pseudoelastic NiTi alloy.

Keywords: Alloy NiTi; micro-abrasive wear, aging, wear coefficient .

1.0 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta as características do projeto, demonstrando a motivação e objetivo para a realização deste trabalho.

1.1 MOTIVAÇÃO

As ligas com memória de forma (SMA) são em vários processos, em função da sua capacidade de retornar a sua forma original após sofrerem uma deformação (1). Estas ligas estão divididas entre as ligas que possuem o efeito pseudoelástico, proveniente da elasticidade do material em temperatura ambiente, e as ligas que necessitam de variação de temperatura para retornar a sua forma original, denominadas (ligas com memória de forma). Estas duas características podem ser observada nas ligas de NiTi que serão abordadas neste trabalho.

As ligas de NiTi são largamente utilizadas em setores como a engenharia, odontologia, medicina e aeronáutica (2). Para algumas aplicações nas quais estas ligas estão sujeitas, existe a possibilidade das mesmas estarem expostas ao desgaste abrasivo durante o processo de trabalho. Este desgaste irá variar de acordo com as características do sistema tribológico em que a liga está aplicada. Têm-se como exemplo as limas endodônticas utilizadas no setor odontológico que são confeccionados em material pseudoelástico para atender aos requisitos de deformação durante a realização de um determinado trabalho, e estão sujeitas ao desgaste abrasivo em função do trabalho rotativo que a mesma realiza (3).

As limas endodônticas confeccionadas com NiTi são três vezes mais flexíveis do que as limas de aço inoxidável (3). Contudo, muitas limas fabricadas com NiTi fraturam. Um dos motivos é a presença de defeitos na superfície em forma de microfissuras, provocados no processo de fabricação ou utilização (4). Uma melhor resistência ao risco na liga NiTi contribui para reduzir a quantidade de microfissuras que são provocadas durante o processo de trabalho da lima, o que significa melhor resistência ao desgaste e a fratura, (5).

Neste trabalho foram obtidos os resultados de coeficiente e taxa de desgaste para duas ligas de NiTi diferentes, sendo uma com características de memória de forma e outra com características de pseudoelasticidade, sendo esta

última subdividida em material conforme recebido e material com tratamentos térmicos de envelhecimento variando de 350 °C a 600 °C. Para a avaliação da taxa de desgaste nas ligas de NiTi foi utilizado uma máquina de ensaio microabrasivo do tipo esfera livre. Onde através da medição da calota de desgaste formada pela esfera, carga aplicada e tempo de deslizamento foi possível obter a taxa de desgaste para cada tipo de liga e suas respectivas variações de tratamento térmico por envelhecimento.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência do tratamento térmico por envelhecimento nos resultados de desgaste microabrasivo por esfera livre realizados nas amostras de NiTi com efeito de memória de forma e amostras de NiTi pseudoelásticas como recebido e submetidas a tratamentos térmicos de envelhecimento.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o desgaste microabrasivo das ligas NiTi com efeito memória de forma e pseudoelásticas;
- Identificar a influência das fases presentes na liga sobre o desgaste microabrasivo;
- Avaliar o efeito do tratamento térmico de envelhecimento nos resultados de desgaste microabrasivo de uma liga NiTi pseudoelástica PE390.

1.2.3 Apresentação do Trabalho

Esta dissertação é composta de 6 capítulos. O capítulo 1 apresenta as motivações e objetivos do presente trabalho.

O capítulo 2 mostra o referencial bibliográfico utilizado no desenvolvimento da dissertação, abordando sobre as características, história e aplicação das ligas de NiTi. No capítulo 2 também é abordado sobre a classificação do desgaste

microabrasivo e suas características, enfatizando estas informações no desgaste microabrasivo. Os materiais e métodos utilizados para atingir os objetivos propostos são apresentados no capítulo 3, dando ênfase aos procedimentos de cada ensaio e seus objetivos. No capítulo 4 são apresentados os resultados e discussões obtidos com cada ensaio aplicado.

O capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas com o trabalho, alinhadas com os objetivos que foram propostos anteriormente.

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica abordará sobre as ligas com memória de forma, descrevendo sua história, comportamento termomecânico e aplicações. Neste capítulo, serão apresentados conceitos sobre tribologia, descrevendo os principais tipos de desgaste, onde em específico será mostrado o processo de avaliação do desgaste através da máquina de desgaste microabrasivo por esfera livre.

2.1 LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

A propriedade de memória de forma pode ser observada em alguns materiais, caracterizados pela capacidade de retornar ao formato original após sofrer uma deformação quase plástica. Este efeito pode ser identificado quando a carga sobre a liga é removida ou quando o material é aquecido (7).

As ligas com memória de forma, que apresentam a característica de retornar à sua forma inicial após a remoção de uma carga que foi aplicada anteriormente, são denominadas ligas pseudoelásticas. Já as ligas SMA que necessitam do aquecimento para retornarem à forma original são denominadas ligas com efeito de memória de forma (8).

Apesar de existir uma variedade de ligas que apresentam o efeito memória de forma, somente aquelas que têm a capacidade de recuperar uma quantidade substancial de deformação, ou gerar uma força significativa de restituição sobre mudança de forma, possuem grandes interesses comerciais. Dentre estas, vale destacar as ligas a base de NiTi e as ligas de Cu dos sistemas Cu-Zn-Al e Cu-Al-Ni (2).

2.1.1 História

Por volta de 1938 Arne Olander foi o primeiro a observar o efeito memória de forma em uma liga metálica de cobre, nesta descoberta foi identificado que a transformação martensítica poderia ser visualizada por indução mecanicamente e depois ser eliminada através do aquecimento (2), (9).

Já as ligas NiTi foram desenvolvidas por Willian F. Buehler, mostrado na Figura 1, por volta de 1963. Estas ligas tiveram sua primeira aplicação registrada

em 1971 para unir uma tubulação hidráulica de titânio da aeronave Grumman F-14. Sua característica de retornar à forma após sofrerem uma deformação quase plástica, faz com que pesquisas sejam realizadas no intuito de desenvolver este tipo de material para atender os mais diversos tipos de aplicações (11).



Figura 1 - William J. Buehler , 1968, em uma demonstração sobre as propriedades do NiTi. (12).

Por volta de 1980 ligas de memória de forma foram utilizadas pela NASA em uma estação espacial na órbita da terra. Isto contribuiu para o aparecimento de novas aplicações das ligas de memória de forma (8).

Com a melhoria dos processos de fabricação, o uso comercial das ligas NiTi aumentou, possibilitando a inclusão dessas ligas em aplicações médicas e produtos relacionados à saúde, aplicações militares e até mesmo na utilização em roupas íntimas femininas (12).

2.1.2 O Níquel Titânio e suas Características

Das principais ligas com memória de forma o NiTi é um dos sistemas mais estudados, e tem um grande número de aplicações comerciais disponíveis no mercado. Esta boa aceitabilidade está associada aos bons resultados de resistência à corrosão, deformação, fadiga, biocompatibilidade e biofuncionalidade (13).

O fenômeno que ocorre nas ligas NiTi está relacionado com a composição da liga, estrutura e microestrutura. As ligas de NiTi sofrem transformação martensítica e os átomos da liga podem se deslocar da sua origem em determinadas temperaturas (5).

Enquanto a maioria dos metais se deforma em função do deslizamento da estrutura cristalina, o NiTi responde ao estresse, simplesmente transformando de fase através do rearranjo da estrutura (7).

2.1.3 Efeito Memória de Forma

O efeito memória de forma ocorre quando a liga tem a capacidade de retornar a sua dimensão e forma original após ser submetida a um ciclo térmico apropriado. Normalmente, ligas com memória de forma podem ser deformadas de forma aparentemente plástica (2 a 10%) a temperaturas relativamente baixas, e, ao serem expostas a uma temperatura mais alta, retornam à forma inicial (14), (15).

As fases de baixa e alta temperatura são chamadas de martensita e austenita respectivamente, e suas temperaturas normalmente estão compreendidas entre - 100 e 110°C (16).

O processo de transformação martensítica passa pelas seguintes fases de temperatura de transformação: Ms é a temperatura de início da transformação martensítica, Mf é a temperatura final da transformação martensítica, As é a temperatura de início da transformação austenítica e Af, é a temperatura final da transformação austenítica(14,15,16,1).

As temperaturas de transformação martensítica (Mf) e austenítica (Af) são definidas como os pontos de transformação entre as fases martensita e austenita respectivamente. Normalmente, todas as propriedades físicas, como por exemplo: resistividade elétrica, refletividade óptica, características de amortecimento e calor específico, são diferentes nas fases austenítica e martensítica (17).

A Figura 2 ilustra esquematicamente o processo de evolução das fases em função da alteração da temperatura.

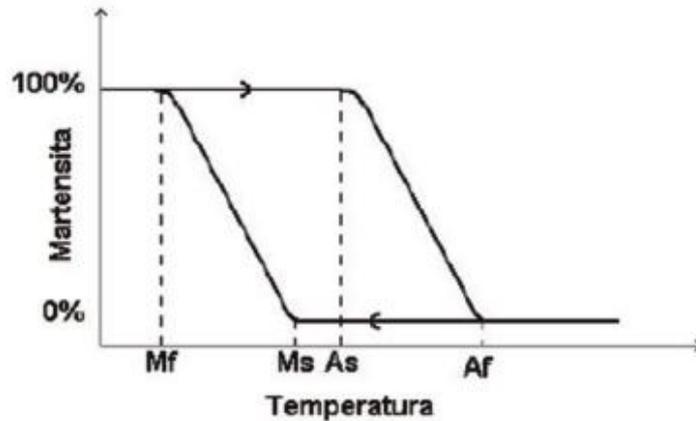


Figura 2 - Evolução da Martensita com a temperatura (7).

2.1.4 Pseudoelasticidade

A pseudoelasticidade é uma das propriedades das ligas com memória de forma, este tipo de característica é apresentado durante a fase austenita, fase em que a liga recupera a sua forma inicial quando uma carga previamente colocada é removida. Neste caso da pseudoelasticidade o processo de transformação para a reversibilidade da forma do material é induzido pela tensão, diferentemente do efeito memória de forma que necessitam de temperatura para que ocorra a reversibilidade (18).

As ligas com memória de forma apresentam a fase austenita e martensita. Na Figura 3 é possível observar a transformação de fases do material durante o processo de aplicação de carga. A fase em que o material se encontra vai depender da amplitude da carga aplicada. Neste caso a liga retorna a sua fase e dimensões iniciais após a remoção da carga.

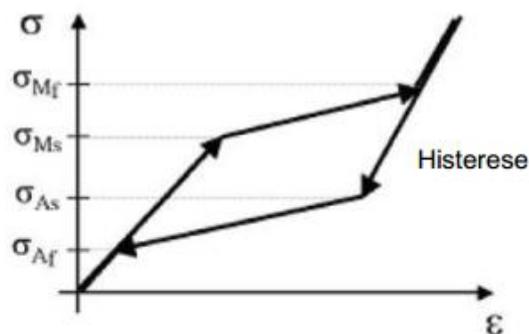


Figura 3 - Esquema do ciclo de tensão deformação na transformação martensítica (20).

As ligas com efeito de pseudoelasticidade a temperatura ambiente são constantemente utilizadas na aplicação ortodôntica com intuito de movimentar a arcada dentária para um posicionamento fisiológico requerido. Esta movimentação é realizada com fios de NiTi (21).

2.1.5 Diagrama de Fase da Liga NiTi

Como já mencionado anteriormente as ligas de NiTi possuem duas fases características, a austenita e a martensita. A fase austenita possui uma estrutura denominada estrutura cúbica de corpo centrado, já a martensita possui uma estrutura monocíclica do tipo B19, contudo, durante o processo de transformação de fase algumas publicações indicam o aparecimento da fase R (estrutura romboédrica), que pode ser resultado da presença de outros elementos na liga oriundos do processo de fundição ou proveniente da variação de temperatura nos processos de fabricação e tratamentos térmicos (8).

No diagrama de fases, Figura 4, é possível observar a presença de uma região triangular denominada NiTi, nesta fase a liga tem estrutura cúbica de corpo centrada (CCC) quando o mesmo está em temperaturas acima de 1090°C e uma estrutura cubica ordenada (B2) quando está abaixo desta temperatura (22).

As ligas de NiTi que possuem percentuais atômicos de Ni na liga acima 50,5% são consideradas ricas em Ni e as que possuem percentual atômico de Ni abaixo de 50,5% são consideradas pobres em Ni (2).

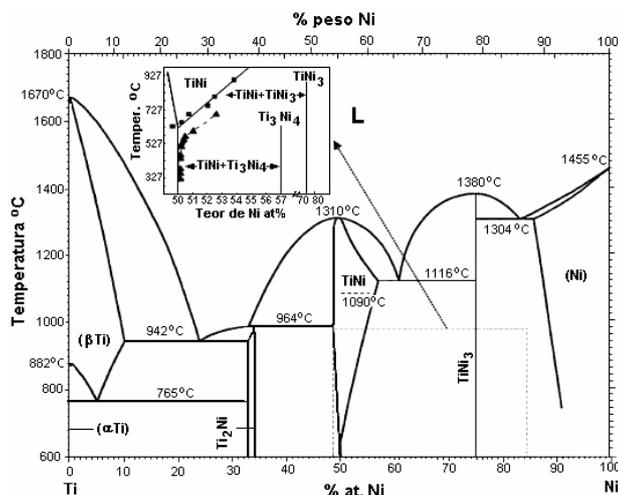


Figura 4 - Diagrama de Fases da Liga NiTi (2).

A esquerda do diagrama de fases podemos observar a fase (Ti_2Ni) com porcentagens de níquel de 33% a 34%, já a direita do diagrama de fases podemos observar que a fase ($TiNi_3$) é composta por cerca de 75% de níquel e 25% de titânio.

A porcentagem de Níquel e titânio na liga tem grande influência nas características do material, no geral a concentração de Níquel é de 50,5% (1).

2.1.5.1 Fase B2 – Austenita

A estrutura da fase B2, cúbica de corpo centrado, tem geometria formada por átomos localizados nos oito vértices e contém um único átomo no centro, esta estrutura é ilustrada pela Figura 5, (23).

A fase Austenita B2 é a fase estável da liga de NiTi.

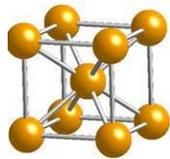


Figura 5 - Estrutura cúbica de corpo centrado (54).

2.1.5.1 Fase B19 – Martensita

A estrutura Martensita B19', apresenta a distorção de uma estrutura tetragonal, a qual existe uma inclinação em relação à base da célula. A martensita pode apresentar-se em 24 orientações cristalográficas diferentes. Esta orientação esta ligada com as transformações sofridas pelo material (24), (25).

A Figura 6 ilustra o modelo de estrutura martensítica.

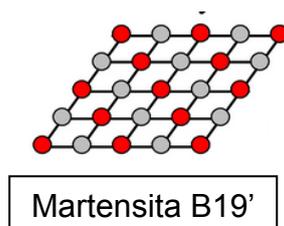


Figura 6 - Representação do modelo de estrutura martensítica presente nas ligas de NiTi (27).

2.1.5.1 Fase R

Existem três possibilidades para o aparecimento da fase R acontecer durante o processo de transformação em ligas NiTi; são elas: quando parte da concentração de Ni é substituída por Fe ou Al, ligas de NiTi ricas em Ni que são envelhecidas a aproximadamente 400°C para causar precipitação da fase Ti_3Ni_4 ou então quando faz se tratamentos térmicos nas ligas de NiTi após sofrerem trabalho a frio formando estruturas de discordâncias reorganizada (1).

A fase R pode ocorrer quando o material tem sua transformação induzida por temperatura, contudo existem evidencias de que a fase R possa aparecer quando a liga de NiTi é submetida a carregamentos (18).

Entretanto, nos casos em que a liga é submetida a tratamento térmico, a fase R pode aparecer dependendo da temperatura de recozimento do material. Sendo assim, a fase R ocorre para as ligas que tiveram o tratamento térmico em baixas temperaturas e não ocorre em ligas recozidas com temperaturas de tratamento acima de 550°C (21).

2.1.6 Propriedade das Liga NiTi

As principais propriedades termofísicas da liga Ni-45%Ti são mostradas na Tabela 1. Um dos principais desafios na obtenção desta liga é desenvolver procedimentos de tratamento térmicos adequados para a obtenção das características requeridas (28).

Tabela 1 - Tabela de propriedades das ligas de NiTi (28).

Propriedades Termofísicas		Propriedades Mecânicas	
Temperatura de fusão (°C)	1310	Módulo de elasticidade (Gpa) - Austenita - Martensita	80 25 a 40
Densidade (g/cm ³)	6,48	Limite de escoamento (Mpa) - Austenita - Martensita	195 a 690 70 a 140
Condutividade térmica (W/m.K) - Austenita - Martensita	18,0 8,5	Limite de Resistência (Mpa)	895
Resistividade (μ.Ω.cm) - Austenita - Martensita	100 70	Histerese térmica (°C)	15 a 25
Calor específico (J/kg.K)	400	Deformação recuperável (E.M.F.)	8,5

2.2 TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

2.2.1 Transformação Martensítica Induzida por Temperatura

O comportamento das ligas com memória de forma a base de NiTi é explicado com base nas características da estrutura cristalina e na mudança de fase entre austenita e martensita. Este mecanismo é ilustrado na Figura 7. Como já mencionado anteriormente, quando a liga está entre as temperaturas de transformação A_s (Austenita Inicial) e A_f (Austenita Final), a mesma se encontra em uma fase estável com estrutura cúbica de corpo centrado (Austenita B2), e quando a liga atinge a temperatura M_s (Martensita Inicial) a mesma passa da fase austenita para a fase martensita. Na Figura 7 é mostrado o processo de transformação para liga NiTi com uma representação do efeito memória de forma.

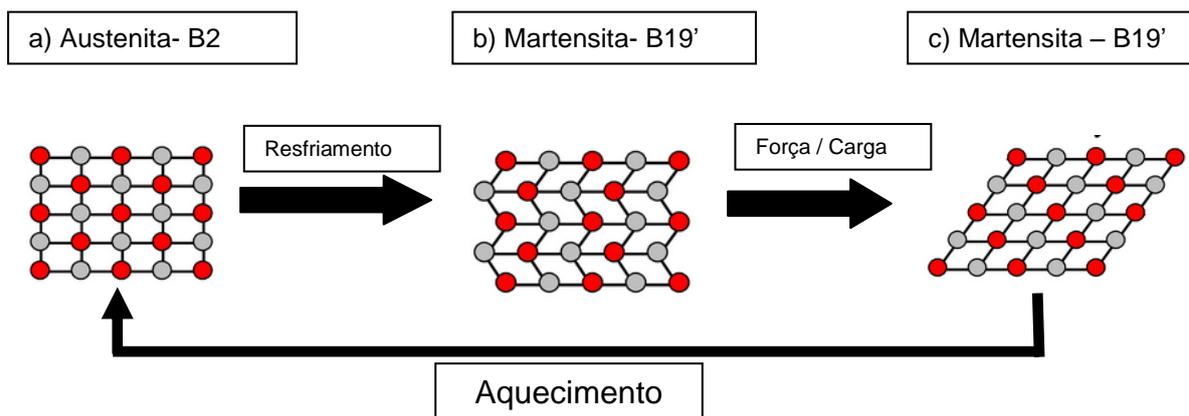


Figura 7 - Processo de transformação entre austenita B2 e martensita B19' (27).

Quando a liga de NiTi com memória de forma sofre algum tipo de carregamento algumas camadas da sua estrutura mudam a sua orientação como mostra a Figura 7. Esta mudança estrutural induz a mudança de forma macroscópica. Quando o carregamento é removido a estrutura não volta a sua forma original, porém quando a liga é aquecida até chegar a sua temperatura de transformação, a martensita se transforma em austenita (B2), com o resfriamento da liga após a mesma ter passado para a fase B2 ocorre a reversão da transformação. A austenita B2 possui estrutura cristalina cúbica de corpo centrado, com a transformação de fase a forma da célula unitária independe da

orientação das camadas martensíticas da estrutura. Com isso a liga retorna a sua forma macroscópica original. As alterações da forma e transformação de fases são conhecidas. Contudo os mecanismos envolvidos não são completamente explicados, uma vez que o comportamento envolve vários parâmetros (22).

Durante o processo de transformação de fase existem três caminhos no que a liga NiTi pode percorrer, estes caminhos estão ilustrados na Figura 8. O primeiro caminho é mostrado em separado na Figura 7, como parte de um grupo de possíveis caminhos que a transformação da liga NiTi pode percorrer. Na Figura 8 também é descrita a possibilidade do aparecimento da fase R durante a transformação conforme é descrito no capítulo 2.1.5.

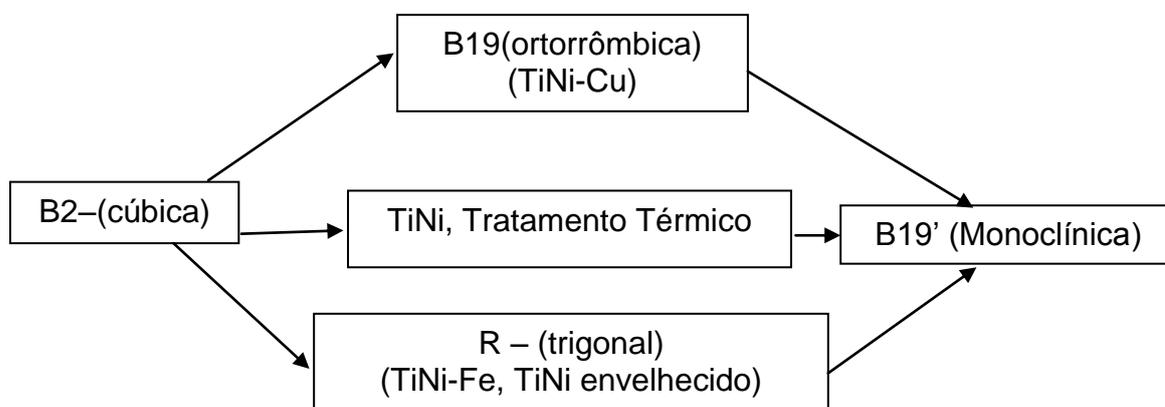


Figura 8 - Três possíveis caminhos de transformação de fases das ligas a base de NiTi (1).

A liga de NiTi com efeito memória de forma apresenta a histerese típica de tensão, deformação e temperatura conforme é mostrado na Figura 9.

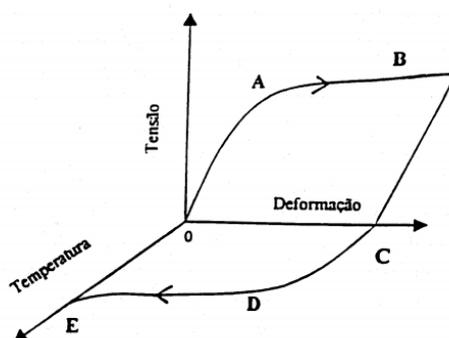


Figura 9 - Curva tensão-deformação-temperatura, mostrando a ocorrência do efeito memória de forma (29).

Sendo:

O→A deformação do metal na região elástica;

A→B deformação aparentemente permanente;

B→C eliminação da tensão;

O→C deformação residual;

C→D aquecimento até o início da recuperação da forma;

D→E recuperação da forma original.

2.2.2 Transformação Martensítica Induzida por Tensão

A transformação martensítica induzida por tensão ocorre nas ligas que apresentam o fenômeno de pseudoelasticidade, este fenômeno ocorre porque existe a transformação da austenita em martensita induzida por tensão. Ou seja, quando a liga está em uma temperatura em que a austenita é estável, ao ser aplicada uma tensão, até certos limites, provocará uma instabilidade na mesma, mudando a liga gradualmente para a fase martensítica auto-acomodada induzida por tensão. Contudo, após o descarregamento da tensão a martensita induzida por tensão é revertida em austenita voltando a liga para sua posição original, (2).

A Figura 10 mostra a curva de tensão deformação para ligas de NiTi pseudoelásticas, (A) representa a região elástica do material, (B) região de deformação aparentemente plástica, (C) eliminação da tensão e formação de deformação residual e (D) retorno do material a forma original.

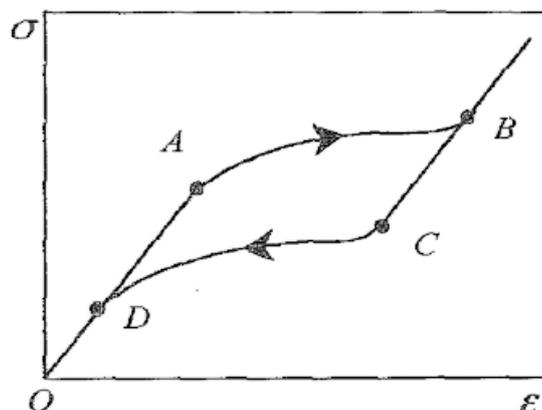


Figura 10 - Representação gráfica do efeito da pseudoelasticidade (10).

2.4 TRATAMENTOS TÉRMICOS DAS LIGAS NiTi

O tratamento térmico tem por objetivo alterar as propriedades da liga sem alterar a sua composição química. No caso das ligas com memória de forma qualquer alteração na composição química resulta na alteração das características de memória de forma. Sendo necessário o tratamento térmico para melhorar os resultados de resistência mecânica do material (23).

No tratamento térmico estão presentes as seguintes variáveis:

- Taxa de aquecimento: Velocidade de aquecimento da liga até a temperatura de austenitização pode ser dada em °C por Minuto;
- Tempo de austenitização: Tempo em que a liga estará na fase austenita;
- Taxa de resfriamento: Velocidade na qual é resfriada a liga.

O tratamento térmico nas ligas NiTi tem por objetivo controlar a presença de precipitados na matriz da liga. Estes tratamentos fazem com que as transformações de fase ocorram em múltiplas ou em uma única etapa durante o processo de aquecimento e resfriamento (24).

As ligas de NiTi, com composição atômica acima de 50,5% Ni, ricas em Ni, melhoram as propriedades de pseudoelasticidade, através de tratamentos térmicos entre 300°C e 500°C aumentando a força motriz em função da precipitação de Ti_3Ni_4 (3).

Normalmente, o tratamento térmico provoca o aparecimento da fase R nas ligas de NiTi, em função da heterogeneidade da composição na matriz da fase B2 resultados da presença de Ti_3Ni_4 na forma de precipitado, permitindo as seguintes transformações no resfriamento: $B2 \rightarrow R$ e $R \rightarrow B19'$ e outras duas no aquecimento $B19' \rightarrow R$ e $R \rightarrow B2$ (25).

Na Figura 11 é possível observar o aparecimento da fase R após o processo de tratamento térmico (1).

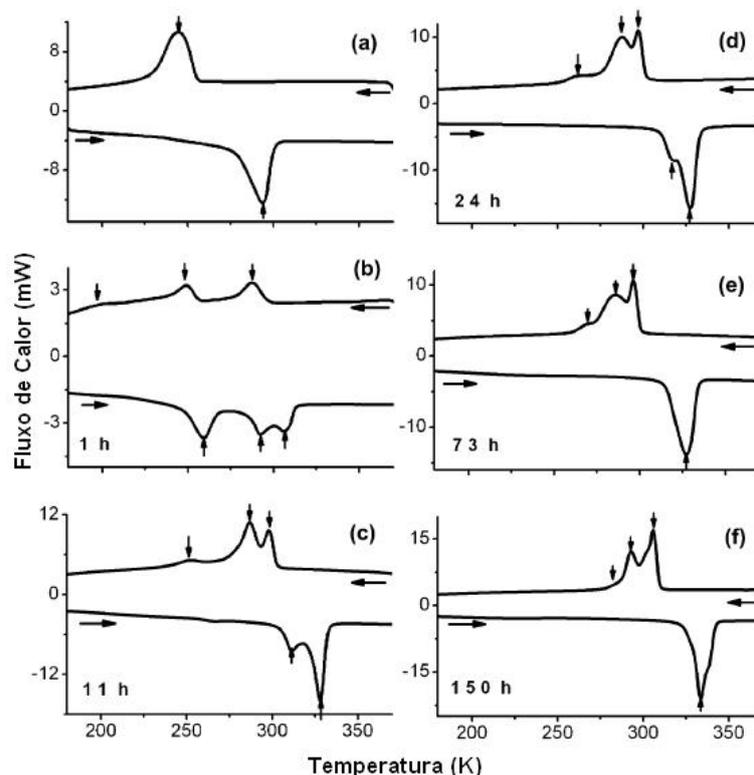


Figura 11 - Curvas de DSC para amostras de NiTi, Ti-50,6%Ni: (a) solubilizado e tratado a 1000°C por 1 hora seguido de têmpera em água, (b)-(f) envelhecido a 450°C por 1, 11, 24, 73 e 150 horas respectivamente (1).

Através da adição de cobre a transformação terá como resultado a fase martensítica intermediária ortorrômbica B19, com a adição de Fe a fase B2 se transforma na fase B19' passando pelo processo de transformação da fase R (22).

A fase ortorrômbica R pode também ser induzida por envelhecimento no caso das ligas ricas em Ni, em função do tratamento térmico por recozimento, por precipitados de Ti_3Ni_4 ou por transformação cíclica (1).

2.4.1 Efeito do Tratamento Térmico na Dureza das Ligas de NiTi

Através do tratamento térmico é possível obter melhoras significativas nas propriedades de dureza das ligas com memória de forma e pseudoelásticas, onde com a realização de tratamentos térmicos de envelhecimento, a temperaturas de 200 a 300°C observou-se melhores resultados de dureza para a liga de NiTi, esta melhora ocorreu em função do aparecimento de precipitados na liga, entretanto nos tratamentos térmicos realizados entre 400°C e 800°C observou-se resultados

inferiores de dureza quando comparado com o material como recebido, de acordo com o autor esta redução na dureza é associada ao processo de solubilização que o NiTi sofre em altas temperaturas e em função da precipitação de Ti_3Ni_4 que tem características estruturais semelhantes ao do material como recebido. O gráfico com o perfil de dureza versus temperatura de tratamento térmico é mostrado na Figura 12 (26).

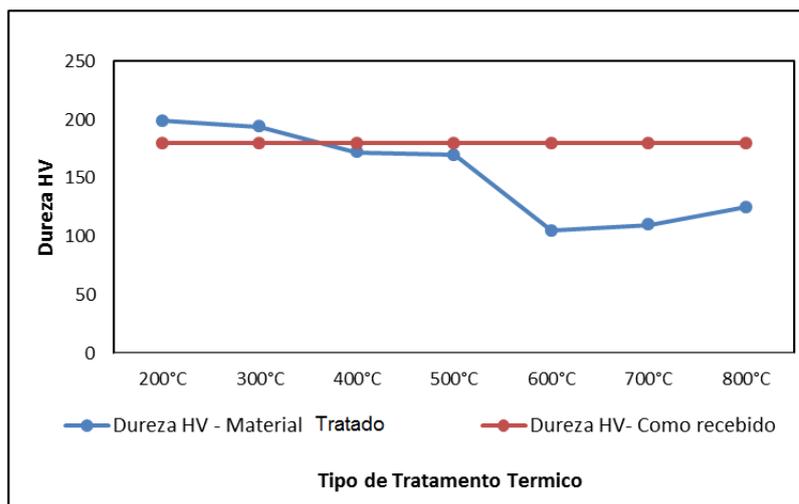


Figura 12 - Dureza HV em função do tratamento térmico liga de NiTi (26).

De acordo com trabalhos anteriores, Figura 13, tratamentos térmicos realizados a 300°C provocaram o aumento de 15% na dureza da liga de NiTi com 50,9% de Ni e 49,1% em Ti. Este endurecimento nesta temperatura é provocado pela precipitação de uma segunda fase na estrutura cristalina do NiTi (31).

A presença desta segunda fase na rede cristalina provoca distorções na rede, e estas distorções fazem com que as discordâncias tenham dificuldade de se movimentarem através do retículo cristalino.

O endurecimento por precipitação pode ser facilmente obtido para as ligas ricas em Ni através do resfriamento lento ou pelo processo de envelhecimento em temperaturas intermediárias após o processo de têmpera. Contudo, as ligas ricas em Ti (> 44,55% de Ti) não podem ser endurecidas por precipitação do Ti_2Ni , em função do limite de solubilidade ser quase vertical no diagrama de fases no lado rico do titânio (32).

A Figura 13 mostra os resultados de dureza obtidos por GALL (31) através de tratamentos térmicos realizados entre 300°C e 550°C.

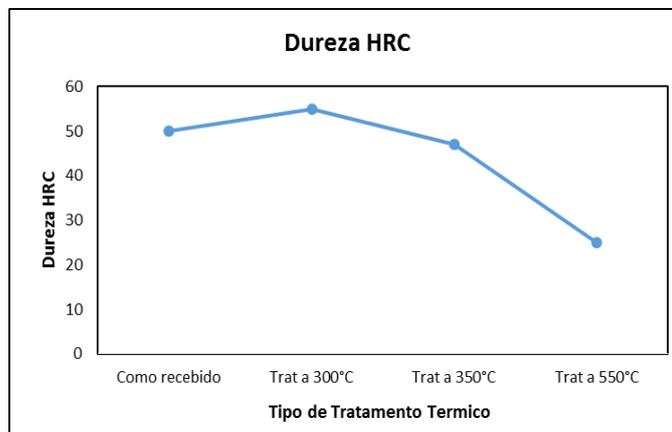


Figura 13 - Dureza HRC em função da temperatura do tratamento térmico (31).

2.5 APLICAÇÃO DA LIGA NÍQUEL TITÂNIO

A seguir são apresentadas algumas aplicações da liga de NiTi.

2.5.1 Aplicação em Acoplamento de Tubulações

Como mencionado anteriormente, uma das primeiras aplicações do NiTi na aeronáutica foi realizada em 1971 para se obter o acoplamento entre dois tubos do sistema hidráulico usado no F-14, este processo utilizou da variação do diâmetro do tubo de NiTi em função da variação de temperatura. A partir desta época as ligas de NiTi tanto com características pseudoelásticas quanto as ligas com características de memória de forma tiveram aumento significativo em relação aos estudos, demanda de fabricação e aplicação (13).

Acoplamentos como este também são comumente utilizados no setor naval, já que reparos e montagens de tubos em alguns locais de um navio tornam-se complicados em função da quantidade de água que pode estar presente durante o processo de acoplamento. Usando o método convencional seria necessário resfriar um dos tubos com Nitrogênio até que o mesmo possibilitasse o encaixe. Porém, a utilização do nitrogênio tem um custo elevado e

apresenta riscos de problemas por se tratar de um vaso de pressão a bordo de um meio de transporte que está no mar (33).

Um exemplo típico de acoplamento de tubos com liga NiTi e mostrado na Figura 14 e Figura 15.

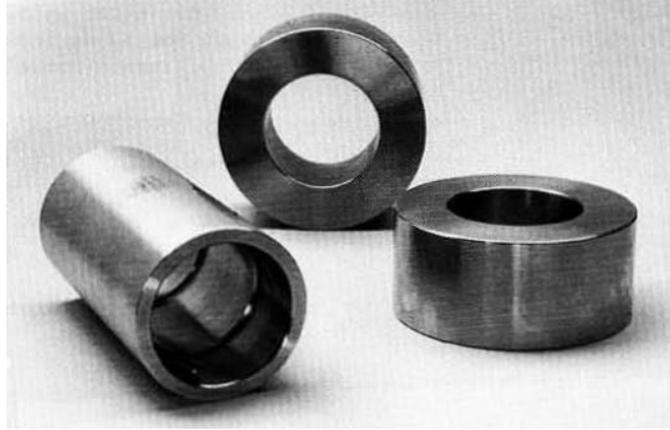


Figura 14 - Luvas e tubos fabricados com Níquel Titânio (33).

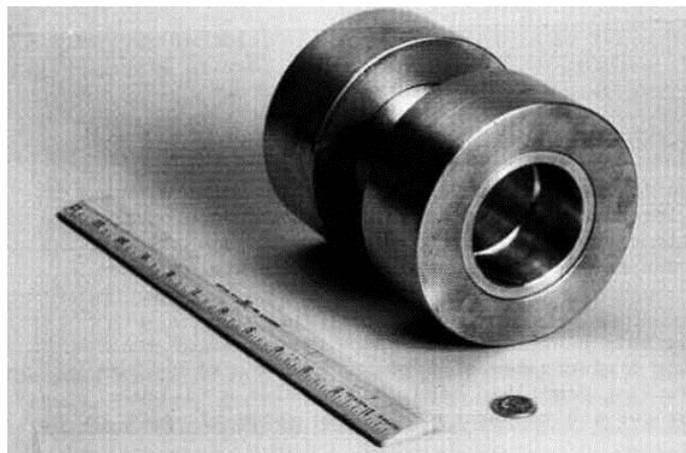


Figura 15 - Luva expandida e montada no tubo (33).

2.5.2 Aplicação Aeronáutica

Na aeronáutica já existem estudos e testes sendo realizados para substituir o sistema de acionamento dos flaps dos aviões que atualmente são feitos mecanicamente por sistemas confeccionados com ligas de memória de forma. O sistema tem como princípio de funcionamento o acionamento dos flaps através da

variação da temperatura da liga com memória de forma conforme é ilustrado na Figura 16.

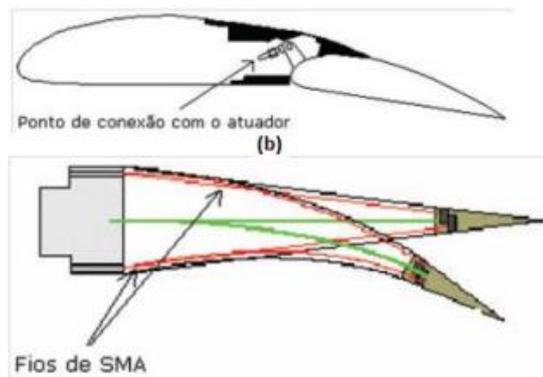


Figura 16 - Exemplo de aplicação do NiTi na aeronáutica (31).

2.5.3 Aplicação Biomédica

Os estudos sobre o NiTi são realizados principalmente nos campos médicos e odontológicos, isto ocorre porque os materiais são aplicados em situações que exigem boa biofuncionalidade e boa biocompatibilidade. A biofuncionalidade está ligada com a capacidade de o material utilizar das suas características de memória de forma e pseudoelasticidade para realizar algum tipo de trabalho nos processos médicos e ortodônticos, já a biocompatibilidade está associada com a compatibilidade do material com o local no qual o mesmo será aplicado (34).

No geral as ligas de NiTi possuem excelentes características como efeito Memória de forma, pseudoelasticidade, resistência à corrosão e biocompatibilidade, contudo estas ligas apresentam resultados ruins relacionados a propriedades tribológicas. Com isso torna-se necessário a realização de tratamentos térmicos na superfície das ligas de Níquel Titânio a fim de se melhorar os resultados tribológico (35).

Uma importante aplicação do NiTi são os instrumentos rotatórios conhecidos como limas endodônticas, Figura 17, utilizada no campo odontológico. Estes instrumentos normalmente são utilizados para tratamentos de canal, onde através da liga NiTi foi possível realizar a substituição das limas fabricadas em aço inoxidável, devido a sua flexibilidade (11).



Figura 17 – Lima endodôntica utilizada para a realização de canal no dente (10).

Outra grande aplicação da liga de NiTi na ortodontia é a aplicação de fio de NiTi pseudoelásticos no processo de correção da posição dos dentes na arcada dentária, conforme mostra a Figura 18. A liga mantém constante a força exercida sobre os dentes em função da sua característica de pseudoelasticidade.

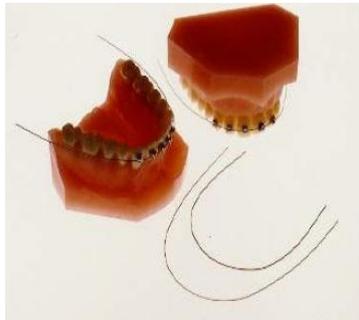


Figura 18 - Fio ortodôntico feito de NiTi (36), (37).

Na biomedicina existem também aplicações da liga de NiTi em stents, que tem por objetivo realizar a abertura de veias que apresentam problemas de excesso de gordura nas paredes, que por sua vez impede o sangue de circular. Este dispositivo tem o objetivo de expandir esta parede que está com o excesso de gordura a fim de facilitar a circulação do sangue. Na Figura 19 é mostrado o processo de instalação do Stent.



Figura 19 - Diferentes aplicações das ligas NiTi - Stents auto expansíveis com memória de forma (36), (37).

2.5.4 O Desgaste Abrasivo do NiTi e suas Aplicações

Durante o processo de trabalho das ligas de NiTi existe a possibilidade da mesma estar exposta ao desgaste, podemos citar como exemplo as limas endodônticas que são confeccionadas de NiTi. Estas limas durante o processo de trabalho rotativo apresentam sinais de desgaste microabrasivo na sua estrutura. Este desgaste por sua vez pode provocar a nucleação de trincas nas ligas ocasionando a sua fratura.

Durante o processo de trabalho das limas a superfície sofre ranhuras conforme mostra a Figura 20 (4).

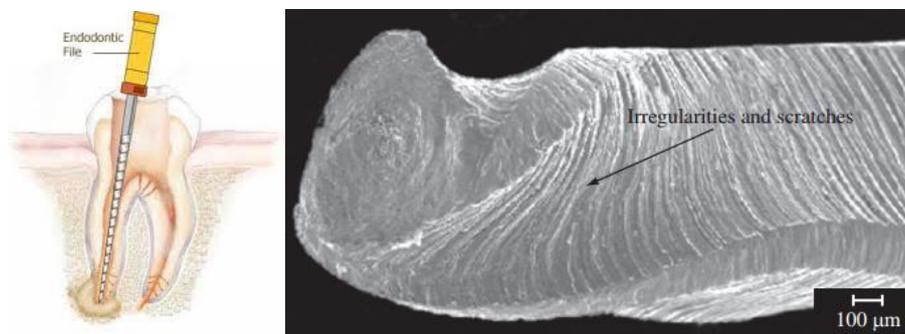


Figura 20 - (a) Lima endodôntica durante a realização de um canal (b) Representação morfológica de uma lima endodôntica após ensaios mecânicos (4).

Após o uso as limas endodônticas apresentam características de torção e marcas de desgaste abrasivo circular, estas ranhuras do processo abrasivo circular provocaram o início de trincas na superfície da lima conforme é ilustrado na Figura 21, (37).

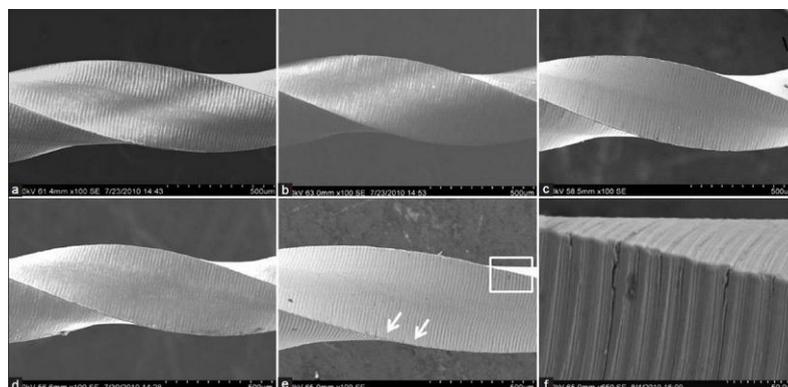


Figura 21 - Superfície de limas endodônticas: (a) não utilizada, (b) utilizada 3 vezes, (c) utilizada 6 vezes, (d) utilizada 9 vezes, (e) utilizada 12 vezes (f) ampliação da lima utilizada 12 vezes (37).

No caso dos stents também existe a possibilidade de desgaste em função da variação do diâmetro da veia ou artéria no qual o mesmo está instalado. Este movimento contínuo ao longo do tempo provoca desgaste na estrutura do stent conforme descreve a Figura 22, (38).

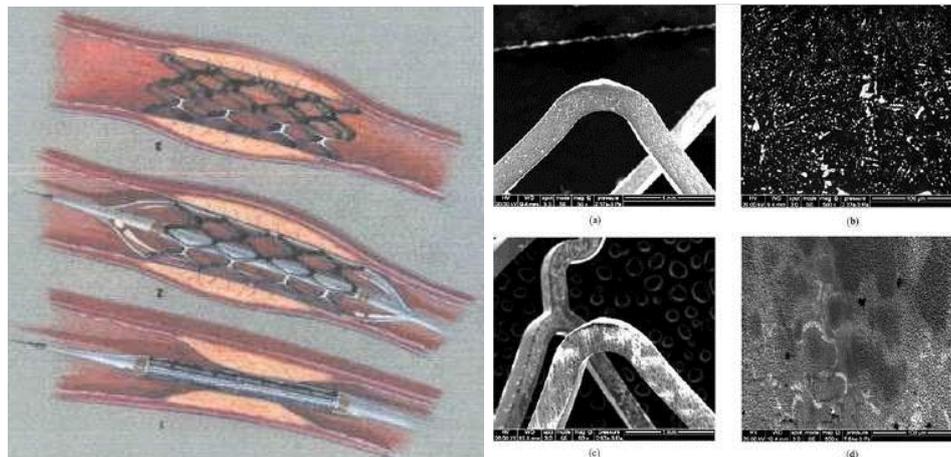


Figura 22 - Stent para abertura de veias (a) Aplicação do Stent (b) Stent com Desgaste;(38).

2.6 TRIBOLOGIA

2.6.1 Introdução a Tribologia

A tribologia focaliza os seus estudos no desgaste, no atrito e, por conseguinte, na lubrificação, como forma de reduzir o impacto provocado pelos efeitos do desgaste e atrito em uma determinada superfície. Sendo embasada na mecânica, física, química e ciência dos materiais (40) .

A palavra tribologia é derivada da palavra tribo que significa atrito e logia que significa estudar sobre algum tipo de assunto. O atrito ocorre através da interação entre duas ou mais superfícies em movimento entre si. O estudo do atrito é necessário para entender as interações químicas e físicas que ocorrem quando um material é friccionado ou atritado a outro. É importante observar que o atrito está presente em quase tudo, desde o atrito que acontece nos membros em movimento do corpo humano ao atrito que ocorre nos componentes de um carro. O atrito normalmente precede de um fenômeno chamado desgaste, este fenômeno ocorre em consequência da perda do material de uma superfície, que

pode estar associado ao atrito ou a outros tipos de redução de massa, como por exemplo, a oxidação (41).

Ao longo dos anos foram sendo desenvolvidos métodos para se reduzir o atrito e conseqüentemente o desgaste. A lubrificação é um dos principais métodos para se reduzir o atrito que provoca o desgaste.

Contudo, o conceito de lubrificação não deve ser estendido somente para óleo e graxa, pois existem outros métodos de lubrificação tais como sódio líquido que é utilizado para lubrificação de reatores nucleares e a gasolina que durante o processo de bombeamento na bomba de combustível de um carro faz um trabalho de lubrificante do sistema, dentre outros tipos de sistema que são utilizados sem a utilização de óleo ou graxa (41).

Os estudos do atrito, desgaste e da lubrificação têm grande importância para os avanços tecnológicos do mundo. Pois através dos resultados destes estudos é possível desenvolver produtos com maior durabilidade, melhor acabamento, maior custo benefício e melhor interação entre os tipos de materiais disponíveis no mercado e a sua utilização (30).

Pode-se citar como exemplo uma empresa automobilística que fornece aos clientes um veículo com cinco anos de garantia, no qual possui inúmeros processos de atrito acontecendo ao mesmo tempo durante o seu processo de operação. Para que estas empresas possam identificar a durabilidade de um produto que está sujeito ao atrito existem duas opções. A primeira delas é realizar os testes no campo, ou seja, dimensionar o produto, produzir o mesmo e realizar testes nas condições em que este estará exposto. Porém, neste caso será realizado no veículo por completo, o que aumenta a complexidade de obtenção de resultados já que um veículo é composto por vários sistemas com características, componentes e tipos de materiais diferentes. Após a falha do produto é possível saber quais são as características de durabilidade do mesmo. Contudo, para ter um resultado completo é necessário mapear a falha de cada material ao longo do tempo. O que torna este processo de teste demorado, impreciso e caro com relação ao outro. Em alguns casos em função da falta de qualidade e falta de ensaios prévios a empresa poderá gastar além do necessário para produzir um determinado produto (63).

O segundo método consiste em realizar os ensaios em laboratórios que são estruturados para realizar uma análise do comportamento do material que

será utilizado em um determinado componente, estes testes podem ser realizados em uma máquina de ensaio ou em uma máquina de simulação, a máquina de ensaio realiza testes para definir as características de um determinado material com base em um modelo padronizado, podemos citar os ensaios de abrasão, corrosão, fretting, dureza, flexão, tração, compressão, cisalhamento, torção, e fadiga, estes são alguns dos tipos de ensaios utilizados para definir as características de um material (30).

Já a máquina de simulação tem como objetivo realizar um teste em determinado material ou componente aplicando sobre ele as interferências no qual o mesmo estará exposto durante o seu processo de trabalho. Desta forma, por exemplo, é aplicado sobre um material todas as forças que este estará sujeito durante o seu processo de operação. Não necessitando aplicar este material ou componente em uma determinada estrutura, a exemplo um carro (63).

Através das máquinas de ensaio e das máquinas de simulação é possível desenvolver novos produtos com maior garantia de sucesso após a aplicação em seu local de trabalho. Isto impacta em redução de custos, aumento da qualidade e velocidade da evolução tecnológica dos materiais. Mais adiante será abordado de forma mais abrangente sobre os tipos de ensaios utilizados para caracterização de desgaste.

2.7 ATRITO

2.7.1 Introdução ao Atrito

O atrito é a resistência ao movimento que ocorre quando um corpo sólido se move sobre o outro (47). Esta resistência está fortemente associada a rugosidade da superfície do material, pois em materiais com maior rugosidade o atrito é maior do que em materiais com menor rugosidade (41). Desta forma, a resistência contra o movimento de duas superfícies provoca a força de atrito.

Quando o corpo está estático é necessário uma força tangencial para que o mesmo venha ser deslocado, esta força é denominada força de atrito estática, (41).

2.7.2 As Leis do Atrito e sua Teoria

Através de experimentos foi possível identificar as principais características do processo de atrito, sendo assim definido algumas leis para o processo. Estas leis apresentam algumas exceções de acordo com o tipo de aplicação do sistema tribológico e com tipo de material a ser utilizado, porém as mesmas são aplicáveis na maioria dos casos (48).

A primeira lei aborda que o atrito independe da área aparente de contato. Isto demonstra de maneira clara que se os valores de parâmetro de rugosidade e carga normal, não variarem o valor de atrito entre os dois corpos será o mesmo independente da área aparente em que a carga é aplicada.

Contudo a força de atrito difere com a variação da área de contato real (47). A área de contato real ocorre a níveis microscópicos, variando de acordo com o tipo de material e a carga aplicada. Assim ao analisar-se o contato entre duas superfícies, será observado que a rugosidade e a ondulação da superfície não esta em 100% de contato, o que existe é um contato entre as asperezas de cada superfície. A Figura 23 mostra a interação que ocorre entre duas superfícies.

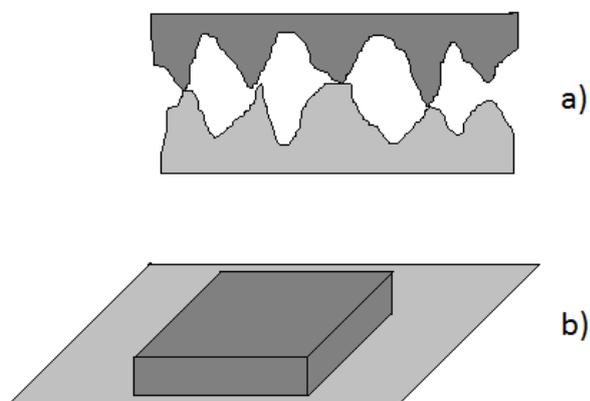


Figura 23 - Ilustração do contato entre uma superfície e outra. a) contato microscópico b) contato macroscópico (44).

A segunda lei aborda que a atrito é proporcional ao valor da carga normal. Esta lei é facilmente identificada quando se tenta deslocar um objeto que está apoiado em uma superfície. Comparando a força exercida para o deslocamento

do objeto percebesse que dois objetos com mesmas dimensões, porém com densidades diferentes, apresentam atrito resultante com valores diferentes.

A segunda lei é expressa pela equação 1, (30):

$$F=\mu*N \quad [1]$$

Sendo:

Ff= Força de Atrito;

μ =Coeficiente de Atrito;

N= Carga Normal.

A força de atrito é obtida através da multiplicação da carga normal sobre uma superfície que está deslizando sobre outra pelo coeficiente de atrito do material mais macio. Para diversos materiais, em condições lubrificadas e não lubrificadas, a lei da proporcionalidade entre o coeficiente de desgaste e a carga normal é aplicável (30).

Em função da pequena área do contato real, as asperezas tendem a suportar cargas elevadas durante o processo de deslizamento entre uma superfície e outra, aliado as tensões impostas pelo deslizamento existe uma deformação plástica e posterior fratura da aspereza. À medida que as fraturas acontecem, a área de contato real tende a aumentar (41).

Já a terceira lei, apesar de ter uma menor aplicação quando comparada com as primeiras, é de suma importância para o entendimento do processo de desgaste. A mesma mostra que a força de atrito cinética independe da velocidade de deslizamento (47).

A força inicial necessária para o deslizamento de um determinado objeto é maior do que a força de atrito necessária para manter o objeto em movimento, contudo, para diversos tipos de sistemas tribológicos após o corpo ter saído da inércia a alteração da velocidade não influencia na força de atrito (30).

O coeficiente de desgaste não é uma constante particular para cada tipo de material, e sim uma constante obtida através do deslizamento de dois corpos. O aço, por exemplo, não possui um valor de coeficiente de atrito próprio, os valores de coeficiente para o aço são obtidos deslizando outro material sobre o mesmo.

Através desta interação é possível determinar o coeficiente de atrito de uma superfície para um determinado tipo de material (47).

2.7.3 Dureza do Material

Analisando a fórmula de Archard pode-se entender a influência da dureza do material nos resultados de resistência ao desgaste. A fórmula indica que quanto maior for à dureza do material, maior será sua resistência ao desgaste. Esta não pode ser considerada uma fórmula geral, pois existem materiais de baixa dureza com alta resistência ao desgaste (30).

Entretanto, existe um exemplo clássico e bem difundido que é denominado como escala de Mohs, esta escala está entre 1 e 10, e contém os resultados de resistência ao riscamento de 10 diferentes materiais. O talco é número 1 sendo elemento da tabela com menor dureza e o diamante é o número 10, sendo o elemento da tabela de maior dureza. Um exemplo da tabela de Mohs é mostrado na Figura 24.

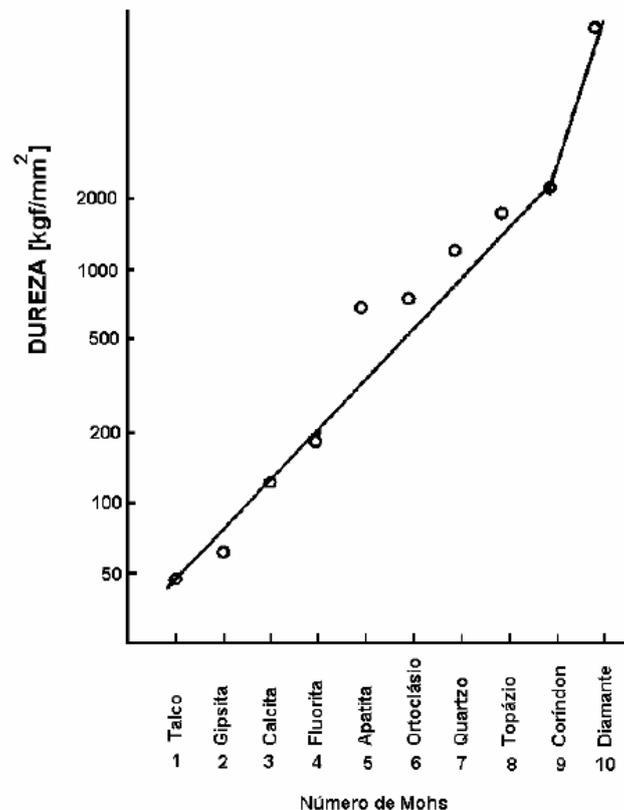


Figura 24 - Relação entre o número de Mohs e dureza Vickers (kgf/mm²), (49).

2.7.4 Cálculo do Coeficiente de Atrito

Existem diversas máquinas de ensaio abrasivo que podem calcular o coeficiente de atrito, este cálculo é obtido através da interação entre dois corpos que estão em contato por uma força normal conhecida e através da medição da força tangencial (47). O coeficiente de atrito pode ser expresso pela equação 2, (50):

$$\mu = T/N \quad [2]$$

Sendo:

μ = Coeficiente de atrito;

T = Força Tangencial;

N = Carga Normal.

O coeficiente de atrito pode ser calculado utilizando os valores de carga normal e força tangencial no qual os dois corpos foram submetidos no processo de desgaste, conforme descreve a equação 2 (50).

Alguns equipamentos de desgaste microabrasivo possuem uma célula de carga tanto para a medição da carga normal quanto da força tangencial, pois a mesma é utilizada para realizar o cálculo da taxa de desgaste durante o processo de interação entre os corpos ou pode ser utilizada para o cálculo do coeficiente de atrito.

2.7.5 O Atrito e suas Aplicações

Ao contrário do que muitas pessoas pensam o baixo atrito pode ser tanto benéfico quanto maléfico para um determinado sistema (41).

O atrito é o grande vilão dos componentes de um determinado sistema que estão sujeitos ao movimento relativo entre si. Ao longo do tempo foram desenvolvidos diversos tipos de meios de se reduzir o atrito. O processo de lubrificação consiste em um dos meios mais utilizados para minimizar o impacto do atrito em um determinado material. Atualmente, existem milhares de peças que se deterioram em função do atrito, pode-se citar mancais, rolamentos, bronzinas,

pistões, engrenagens, dentre outros. Porém, existe um grupo de componentes que necessita do atrito para desempenhar um bom trabalho, como as embreagens, sistemas de freio, pneus dentre outros. Sem o atrito o sistema de freio de um carro, por exemplo, não funcionaria (50).

2.7.6 Considerações Econômicas

Os estudos referentes ao impacto econômico em função do atrito e desgaste tiveram início por volta de 1966, foi estimado pelo Professor Peter Jost da Inglaterra, que os gastos em função dos mesmos alcançavam 0,5% do PIB (Produto Interno Bruto) do país, o que representava 515 milhões de libras por ano. Estas informações foram apontadas no relatório de Jost juntamente com uma lista das principais causas do problema. De acordo com Jost as principais causas estavam associadas a técnicas de lubrificação, métodos de manutenção, falhas no projeto e falhas durante o processo de montagem (64).

Estes estudos de impactos econômicos relacionados à tribologia contribuíram para o desenvolvimento de materiais com características que atendiam a necessidade de produtos com maior resistência ao desgaste. Outros fatores como a crise de petróleo nos anos 70 também contribuíram positivamente para o aumento da importância da tribologia, em função da crise as empresas tiveram a necessidade de desenvolver sistemas mecânicos mais eficientes (42).

Com sistemas mais resistentes ao desgaste as empresas evitaram gastos com mão de obra e manutenção. Além da redução dos gastos as empresas tiveram maior sustentabilidade e confiabilidade para produção dos seus produtos. Dependendo do tipo de máquina o processo de reparo pode levar horas ou até mesmo dias, o que poderia ser evitado com sistemas tribologicamente mais confiáveis (64).

De acordo com o relatório de Jost os estudos tribológicos no intuito de aumentar a confiabilidade resultariam no ganho dos seguintes benefícios(65):

- Economia do trabalho;
- Economia de lubrificantes;
- Economia de investimentos;

- Menor dissipação de energia por atrito;
- Maior vida útil dos equipamentos;
- Menor quantidade de paradas em corretiva do equipamento.

2.8 DESGASTE

O desgaste é definido como a perda progressiva de massa de uma superfície de um material sólido, em função do movimento relativo entre duas superfícies, (51). Existem pelo menos três maneiras de se classificar o desgaste (51):

- Pelo vestígio de danos na superfície: fissuras, trincas, sulcamento, lascamento, riscamentos, polimentos, cavacos;
- Pelos mecanismos físico-químicos que provocaram a perda do material: adesão, abrasão, fadiga de superfície e oxidação;
- Pelas condições nos quais o desgaste ocorreu: desgaste por deslizamento, desgaste lubrificado ou não lubrificado, em alta temperatura ou baixas temperaturas, dentre outros fatores.

2.8.1 Tipos de Desgaste

Para se obter um melhor entendimento do desgaste é essencial entender e distinguir os mecanismos de desgaste. Existem quatro tipos básicos de desgaste que ocorrem com maior frequência, (41):

- Desgaste adesivo – processo em que o material de uma das superfícies de contato é removido e soldado na outra superfície durante o atrito (41);
- Desgaste abrasivo – Perca de massa resultante da interação entre partículas ou asperezas duras que são forçadas contra as superfícies durante o processo de movimento relativo entre si (52);
- Desgaste corrosivo – É a transformação de um material pela sua interação química ou eletroquímica num meio de exposição que

resulta na formação de produtos de corrosão e na liberação de energia(53);

- Desgaste erosivo – Pode se manifestar quando a superfície do material estiver exposta a escoamento de fluídos, partículas sólidas contidas em líquidos ou em jato de líquidos ou gases (55);

2.8.2 Desgaste Abrasivo

Os mecanismos de desgaste abrasivo podem ser divididos em dois tipos: os que são baseados na deformação plástica e os que são baseados na fratura frágil (30).

Contudo, outros autores classificam o desgaste abrasivo em três regimes: moderado, severo e extremo. Onde são avaliadas as seguintes variáveis: tamanho, angulosidade e restrição ao movimento do abrasivo, e os níveis de tensão aplicados (56).

Entre uma superfície e outra existe a presença de partículas denominadas asperezas, estas partículas podem ser provenientes de alguma fonte externa ou do próprio material que está em contato, onde o material mais macio tende a perder mais material durante o processo de desgaste.

O desgaste abrasivo representa 50% dos casos de falha por desgaste, seguido pelo desgaste adesivo com 15% (57).

2.8.2.1 Classificação do desgaste abrasivo

Como citado anteriormente o desgaste abrasivo é normalmente classificado em dois tipos: desgaste abrasivo a dois corpos e desgaste abrasivo a três corpos (30).

Usualmente defini-se o desgaste abrasivo a dois corpos como o sistema no qual as partículas ou asperezas estão rigidamente fixas a um corpo que faz movimento relativo sobre outro, fazendo com que as mesmas penetrem na superfície causando riscos, uma ilustração do processo é mostrado na Figura 25 (58).

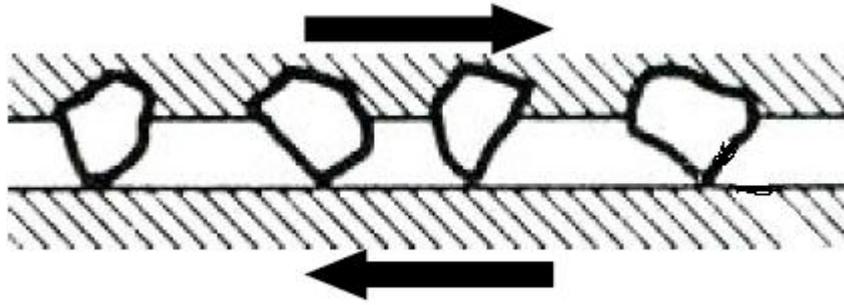


Figura 25 - Desgaste abrasivo por riscamento (50).

O desgaste abrasivo de dois corpos provoca ranhuras na superfície do material conforme é mostrado na Figura 26, estas ranhuras durante o processo de desgaste podem ser classificadas em três tipos: microfadiga, microcorte e microtrincamento (59).

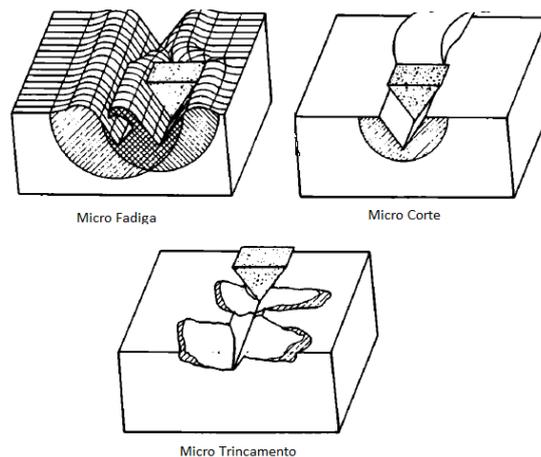


Figura 26 - Interações físicas entre a partícula e a superfície (59).

Este tipo de desgaste normalmente ocorre em situações de altas cargas entre as superfícies de contato e baixa concentração de abrasivo (quantidade de partículas ou asperezas presentes entre os dois corpos), Figura 27 (30).

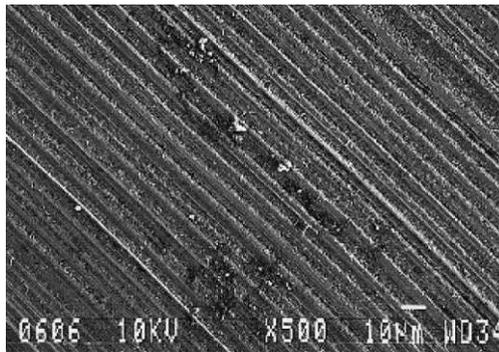


Figura 27 - Micrografia mostrando exemplo de desgaste microabrasivo a dois corpos (60).

O desgaste a três corpos apresenta micro indentações na superfície do material, isto é provocado pelo fato do abrasivo ou aspereza estar girando entre os corpos, conforme é mostrado na Figura 28, (65).

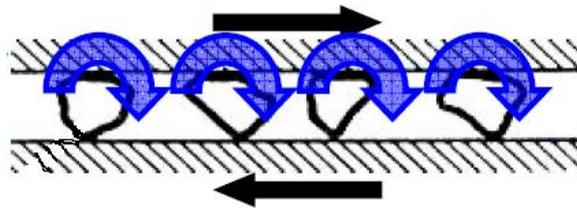


Figura 28 - Desgaste abrasivo por rolamento (50).

Este tipo de desgaste ocorre em situações de baixa carga aplicada e alta concentração de partícula abrasiva. Nesta situação, as partículas não estão em uma das superfícies, ou tem a liberdade de se locomover entre as mesmas deformando e indentando a superfície sem deixar evidencias da direção do desgaste, este tipo de desgaste é ilustrado na Figura 29 (60).

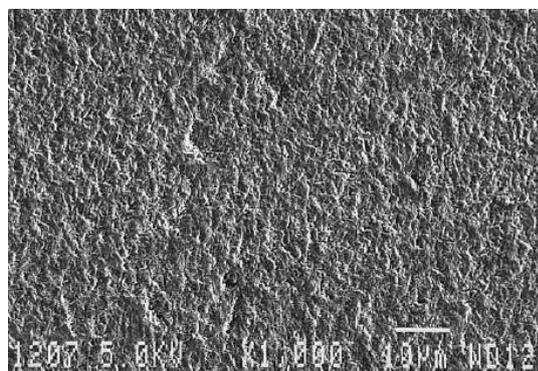


Figura 29 - Micrografia mostrando exemplo de desgaste microabrasivo a três corpos(60).

Contudo, em muitas situações o desgaste entre dois corpos pode ser misto, com a presença de sinais de desgaste a dois e três corpos.

Desgaste abrasivo misto pode ocorrer para alguns tipos de configuração de ensaio. Na Figura 30 é mostrado um resultado típico em que é possível identificar tanto evidências de desgaste a dois corpos, quanto a três corpos (62).

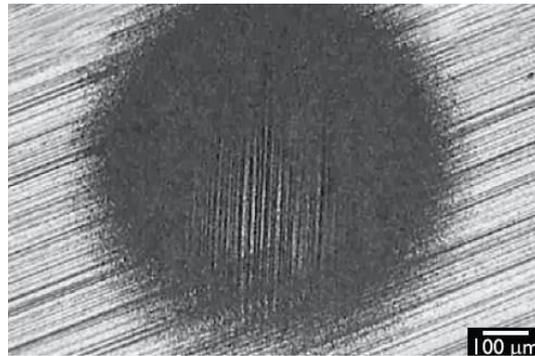


Figura 30 - Micrografia mostrando exemplo de desgaste microabrasivo a dois e três corpos (62).

O processo de transição entre o desgaste de três corpos, dois corpos e misto está associado com a carga aplicada entre as superfícies e a concentração do abrasivo durante o processo de desgaste abrasivo (60). A variação dos resultados de desgaste em função da carga e concentração do abrasivo é ilustrado na Figura 31, a qual mostra o mapa dos mecanismos de desgaste microabrasivo em um aço ferramenta utilizando o carbeto de silício como abrasivo.

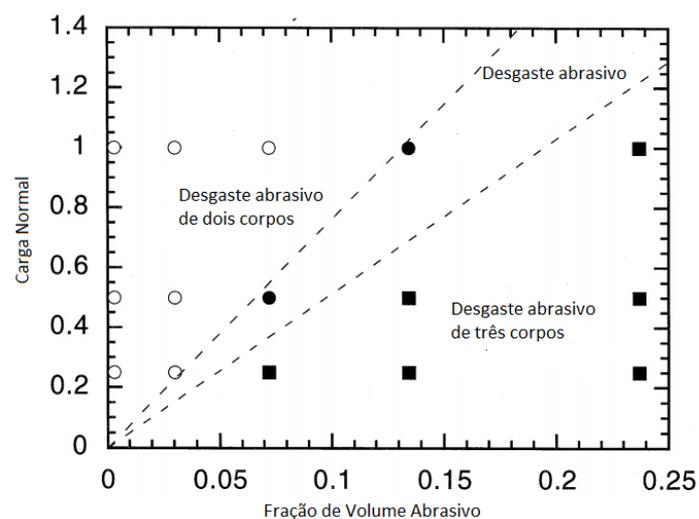


Figura 31 - Mapa dos mecanismos de desgaste para desgaste microabrasivo por esfera em aço ferramenta utilizando alumina F1200 SiC como abrasivo (60).

Na Figura 32 é possível observar o processo de transição entre os mecanismos de desgaste abrasivo, através da variação da carga normal e a concentração da lama abrasiva.

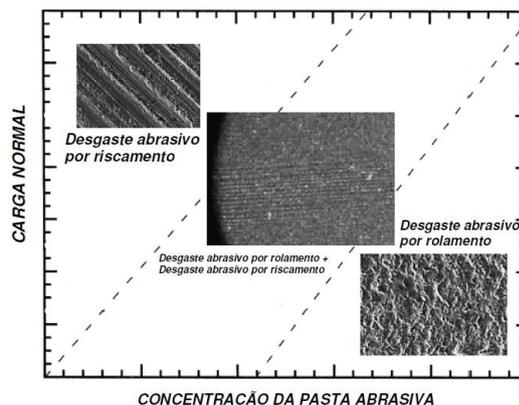


Figura 32 - Mapa de desgaste com a ilustração da superfície resultante (60).

Para a avaliação das superfícies de desgaste, com base na severidade, é possível identificar as prováveis variáveis que influenciaram no resultado de desgaste. Na Tabela 2 é mostrado as situações típicas que podem levar a cada tipo de severidade de desgaste (56)

Tabela 2 - Classificação do desgaste abrasivo através da severidade (56).

Situações Típicas	Modo de Desgaste Abrasivo		
	Brando	Severo	extremo
Tamanho da particular	pequena	moderada	grande
	sem restrição	parcialmente restrita	fortemente restrita
Forma da particular	arredondada	angulosa	angulosa
Tensões de contato	Baixas - insuficiente para fraturar partículas	moderada - suficiente para fraturar as partículas	Severa - pode causar deformação macroscópica ou fratura frágil do material desgastado
Mecanismo dominante	microsulcamento	microcorte	microcorte e/ou microsulcamento
Termos Equivalentes	Abrasão a baixas tensões Riscamento Três corpos e baixas tensões	Abrasão a altas tensões Trituração Três corpos a altas tensões Dois corpos a baixas tensões	Golvagem Dois corpos a altas tensões

2.8.2.2 Métodos de Ensaio – Desgaste Abrasivo

Existem diferentes arranjos para se realizar o teste de desgaste abrasivo por deslizamento de um determinado material. Através do ensaio de desgaste é possível examinar os mecanismos que ocorrem durante o processo de desgaste, simular aplicações práticas e obter valores de taxa de desgaste e coeficiente de atrito (30).

Os ensaios tribológicos podem ser realizados em um número quase infinito de formas, e os resultados de desgaste não estão relacionados somente com os materiais envolvidos, mas também com a mecânica do sistema tribológico, processo de seleção do teste adequado, e ambiente no qual o teste é realizado. Conhecer o teste tribológico é fundamental para o planejamento e interpretação dos resultados do teste (63).

Os ensaios tribológicos podem ser classificados de acordo com o realismo que os mesmos oferecem perante a sua aplicação, à medida que o realismo de um ensaio é aumentado o custo do mesmo também é aumentado, conforme é ilustrado na Figura 33 (63).

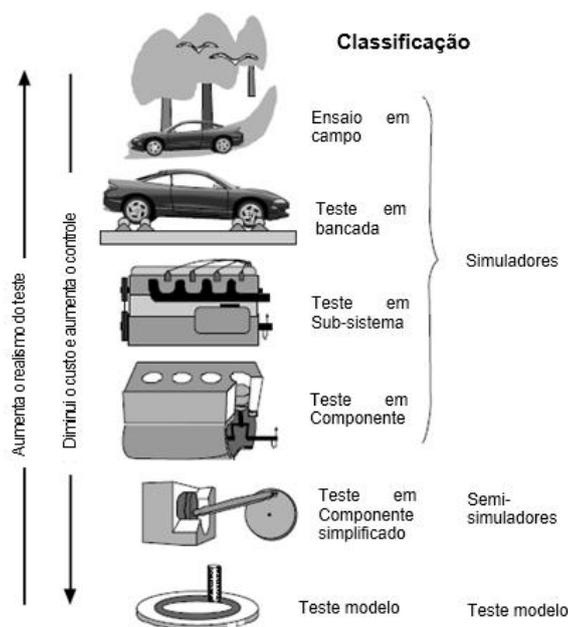


Figura 33 - Classificação do ensaio tribológico de acordo com o realismo (63).

Durante o processo de desenvolvimento de um material é necessário a sua aplicação em ensaios com menor custo de realização, com isso se torna possível descobrir com baixo custo qual é melhor o tipo de material para uma determinada aplicação. Os resultados dos ensaios tribológicos de menor custo tem contribuição decisiva no momento de tomar a decisão sobre alterar para um ensaio com maior realismo, porém com maior custo (64).

No caso do desgaste abrasivo por deslizamento, podemos realizar a avaliação da resistência ao desgaste de diversas maneiras, cada tipo de sistema deve ser associado com a aplicação do material durante o processo de escolha do sistema tribológico. Os sistemas mais comuns de teste tribológicos por deslizamento são mostrados na Figura 34.

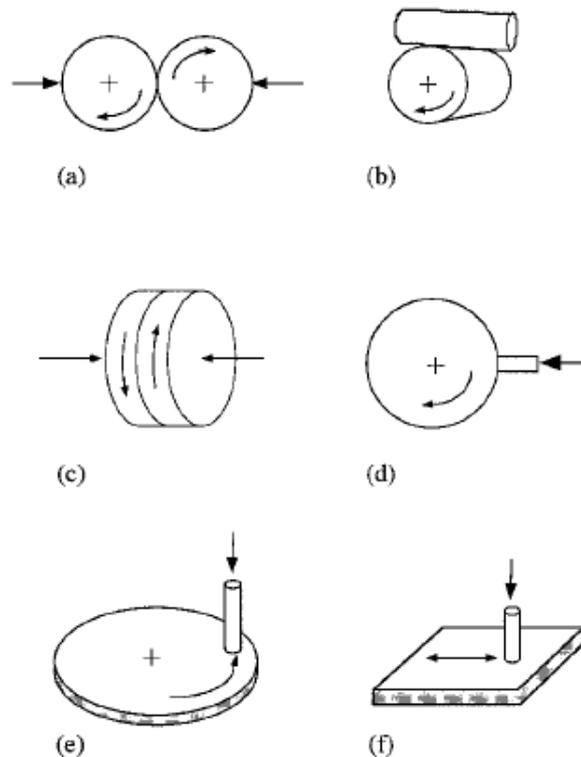


Figura 34 - Ilustração de testes para desgaste por deslizamento (30).

2.8.2.3 Modelo analítico do desgaste

Um dos métodos mais antigos de desgaste abrasivo consiste em um indentador cônico sendo deslizada sobre uma superfície, Figura 35, em que através da profundidade de penetração (x), ângulo do cone (α) e distância de

deslizamento (L), torna-se possível calcular o volume de material removido por uma partícula durante o processo de desgaste abrasivo (64).

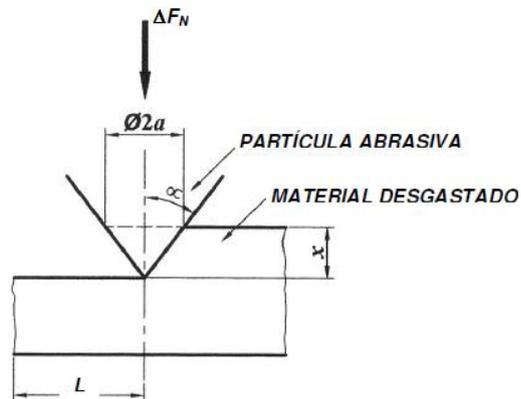


Figura 35 - Modelo analítico de desgaste abrasivo – Partícula única (65).

O volume deslocado pode ser obtido pela equação 3 a seguir: (65).

$$V_d = x L a \quad [3]$$

Sendo:

V_d = Volume de material deslocado;

x = profundidade de penetração do endentado;

L = distância de deslocamento;

a = área da partícula abrasiva.

A área da partícula pode ser calculada através da equação 4:

$$a = x \tan \alpha \quad [4]$$

Sendo:

a = área da partícula abrasiva;

x = profundidade de penetração da partícula;
 α = grau de angulação da partícula.

As equações 3 e 4 são baseadas no modelo de somente uma partícula durante o processo de desgaste, porém sabemos que durante este processo as partículas não têm um formato bem definido e apresentam-se em grande quantidade durante a interação entre superfícies.

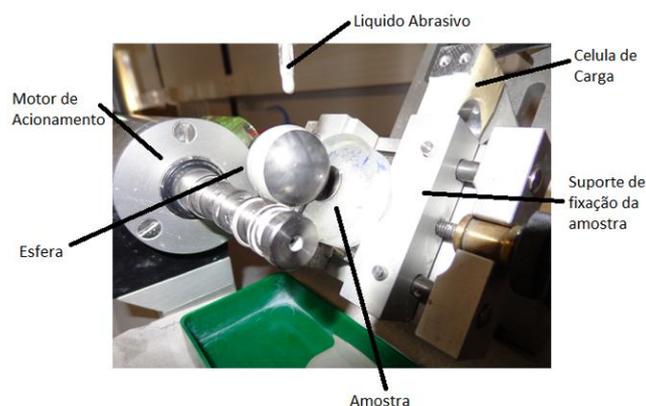
2.8.2.4 Ensaio de Desgaste Microabrasivo por esfera livre

O ensaio de desgaste microabrasivo é utilizado nos centros de pesquisa e universidades, sendo amplamente adotado no estudo do desgaste abrasivo de materiais (62).

O ensaio de desgaste microabrasivo é um teste bastante difundido no meio acadêmico, apesar de ter surgido no setor produtivo (66).

O teste de desgaste microabrasivo por esfera livre é comumente utilizado para medir a taxa de desgaste de materiais com recobrimento e/ou tratamento superficial (67).

O equipamento de desgaste microabrasivo por esfera livre consiste em uma esfera confeccionada em aço de alta dureza acionada por um motor elétrico com sistema de variação de velocidade e contagem de ciclos, sistema de medição de carga e um sistema de bombeamento do líquido abrasivo conforme é ilustrado na Figura 36. Em alguns casos é possível encontrar este tipo de sistema com a esfera fixa no rotor e o sistema de medição da força tangencial, possibilitando o cálculo do coeficiente de atrito.



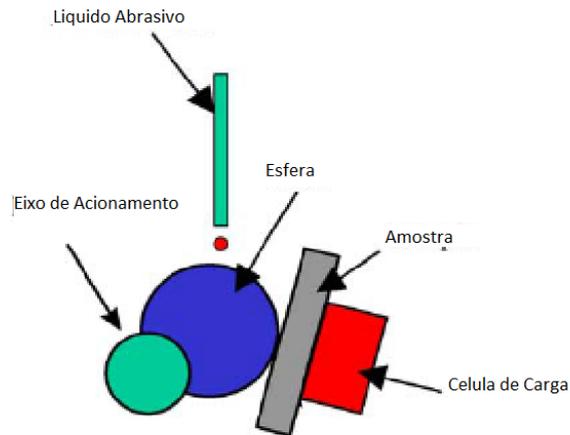


Figura 36 - Sistema tribológico de desgaste microabrasivo por esfera livre.

Este sistema tem por objetivo reproduzir uma calota esférica na superfície do material a ser analisado, conforme é mostrado na Figura 37, onde através da medição do diâmetro da calota, carga normal aplicada e distância de deslizamento torna-se possível identificar qual é a taxa de desgaste e o coeficiente de desgaste de um determinado material.

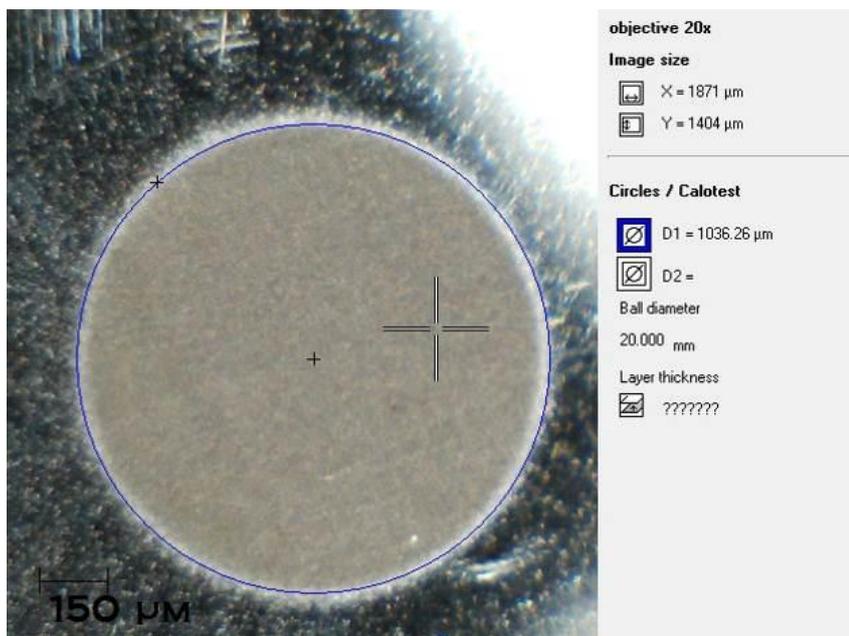


Figura 37 - Calota de desgaste microabrasivo por esfera livre.

A medição da cratera de desgaste pode ser realizada por um microscópio ótico ou por um microscópio eletrônico de varredura. O correto sistema de medição irá depender das características da cratera de desgaste.

2.8.2.5 Volume de desgaste da calota

O volume de desgaste é calculado utilizando o diâmetro da esfera de desgaste (d) e o diâmetro da calota de desgaste (b), Figura 38 (30).

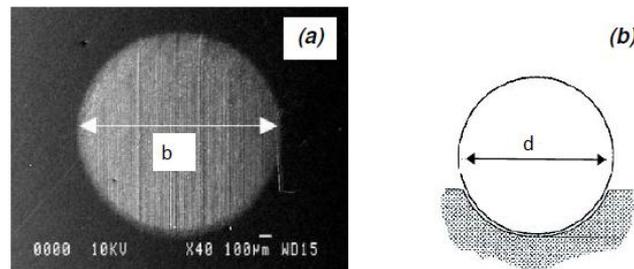


Figura 38 - (a) Medição do diâmetro da cratera de desgaste (b) Medição do diâmetro da esfera de desgaste.

O volume de desgaste pode ser calculado usando a equação 5.

$$V = \frac{\pi b^4}{32d} \quad [5]$$

Onde:

V= Volume de desgaste da cratera;

b= Diâmetro da cratera de desgaste;

d= Diâmetro da esfera de deslizamento.

2.8.2.6 Distância de Deslizamento

O volume de material removido é proporcional à distância de deslizamento, contudo o coeficiente de desgaste independe do volume removido.

A distância de deslizamento pode ser calculada através da equação 6, (66).

$$L = \frac{2\pi dnb}{\sqrt{b^2 - c^2}} \quad [6]$$

Sendo:

L = Distância de deslizamento;

b = Diâmetro da cratera de desgaste;

d = Diâmetro da esfera de desgaste;

n = Número de ciclos do eixo de acionamento;

c = Comprimento do encaixe da esfera.

O comprimento do entalhe do eixo de deslocamento da esfera tem influência direta com a velocidade de deslizamento, uma representação do entalhe é ilustrado na Figura 39.

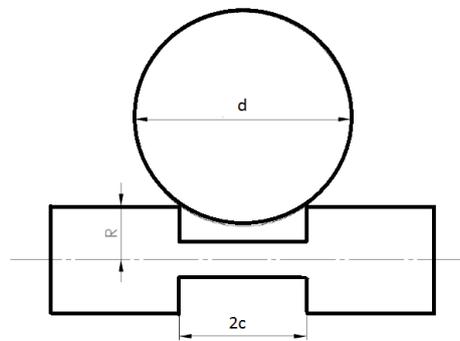


Figura 39 - Representação da esfera e encaixe no eixo da máquina de desgaste microabrasivo.

2.8.2.7 Coeficiente de Desgaste e Taxa de Desgaste

Cada sistema tribológico possui um coeficiente de desgaste, este coeficiente de desgaste tem variações infinitas, uma vez alterado qualquer parâmetro durante o ensaio de desgaste o coeficiente terá seus valores modificados. Desta maneira o coeficiente de desgaste não está associado a um material em específico e sim existem valores de coeficiente de desgaste para o processo de desgaste por deslizamento entre dois ou mais materiais em uma determinada condição (51).

O coeficiente de desgaste pode ser adimensional, normalmente representado pela letra K e dimensional que é representado pela letra k .

O coeficiente de desgaste adimensional K fornece um meio valioso de comparar a severidade de desgaste dos mais variados processos tribológicos. Para o

desgaste abrasivo por riscamento, K está entre $5 \cdot 10^{-3}$ e $50 \cdot 10^{-3}$ e, para o desgaste abrasivo por rolamento está entre $0,5 \cdot 10^{-3}$ e $5 \cdot 10^{-3}$. Contudo para utilizações na tribologia, a quantificação da relação entre K e a dureza H do material é comumente utilizada. Esta quantificação é expressa pela equação 7 (30).

O coeficiente de desgaste adimensional K indica a severidade do desgaste abrasivo, já o coeficiente de desgaste dimensional k é a taxa de desgaste considerando além da distância de deslizamento a força normal (65).

$$k = \frac{K}{H} \quad [7]$$

Onde:

k= Coeficiente dimensional de desgaste – mm^3/Nm ;

K= Coeficiente adimensional de desgaste;

H= Dureza do material - N/mm^2 .

O coeficiente dimensional k normalmente é dado em mm^3/Nm e está descrito na equação 8 (30).

$$k = \frac{\pi b^4}{32 d L F n} \quad [8]$$

Sendo:

k= Coeficiente dimensional de desgaste – mm^3/Nm ;

b= Diâmetro da cratera de desgaste – mm;

d= Diâmetro da esfera de desgaste – mm;

L= Distância de deslizamento – m (Metros);

F_n= Força Normal – N.

Utilizando a fórmula de Archard, equação 9, é possível identificar a taxa de desgaste para um sistema tribológico (60):

$$Q = \frac{K F n}{H} \quad [9]$$

Sendo:

Q = Taxa de Desgaste mm^3/m ;
 K = Coeficiente adimensional de desgaste;
 F_n = Força Normal – N;
 H = Dureza do material mais macio - N/mm^2 .

Substituindo a equação 7 na equação 9 é possível obter a equação 10:

$$Q = kF_n \quad [10]$$

Sendo :

Q = Taxa de Desgaste mm^3/m ;
 k = Coeficiente dimensional de desgaste – mm^3/Nm ;
 F_n = Força Normal – N.

A taxa de desgaste mostrada na equação 10 tem como resultado o volume de material removido por unidade de distância de deslizamento (30).

2.9 RUGOSIDADE

2.9.1 Estudo da Rugosidade

No geral a superfície de um determinado produto apresenta diversas irregularidades, que podem ser visualizadas a olho nú ou não. Estas irregularidades exercem grande influência nas características de desgaste de um determinado material (44).

Entender sobre os tipos de acabamento superficial é fundamental para o estudo do desgaste. Haja vista que a rugosidade superficial tem relação direta com o coeficiente de atrito de uma determinada superfície (30).

No Brasil os conceitos de rugosidade são regidos pela ABNT NBR 4287:2002.

As irregularidades de uma superfície são provocadas pelo processo de corte, usinagem e acabamento, estes processos deixam imperfeições na superfície que variam de acordo com o tipo de processo que foi utilizado (44).

Dentre os processos de fabricação a usinagem representa de 60% a 70% do tipo de processo utilizado, onde podemos citar como exemplo o torneamento, fresamento, brunimento, lapidação e outros (43).

Todo processo de fabricação induz a erros no âmbito dimensional e geométrico (41).

Os erros no âmbito dimensional e geométrico causam alteração dos comportamentos mecânicos, tais como (43):

- Qualidade de deslizamento;
- Resistência ao desgaste;
- Resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluídos e lubrificantes;
- Qualidade de aderência que a estrutura fornece a camadas protetoras;
- Resistência à corrosão e a fadiga;
- Vedação;
- Aparência.

2.9.2 Processo de Avaliação de uma Superfície (Rugosidade)

As superfícies são classificadas em três tipos (46):

- Superfície Geométrica: É idealizada como sendo perfeita, sem imperfeições ao longo da mesma;
- Superfície Real: Na superfície real é mostrada as imperfeições provocadas pelo processo de usinagem;
- Superfície Efetiva: É a superfície determinada por técnicas de medição.

A Figura 40 mostra os perfis encontrados em uma superfície, sendo que o perfil de referência é representado por uma linha traçada perpendicularmente ao maior pico e o perfil de base por uma linha perpendicularmente traçada em função do menor vale.

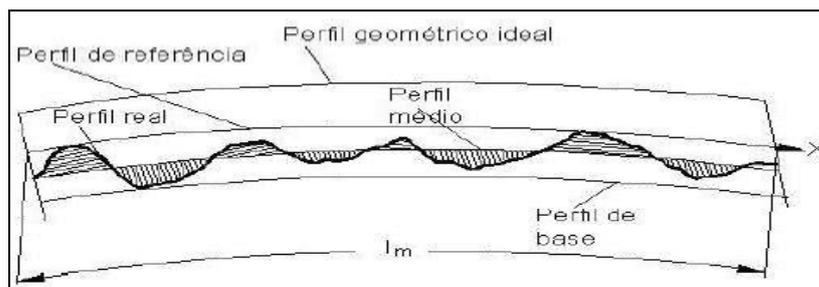


Figura 40 - ilustração dos tipos de perfis presentes em uma superfície (41).

A distância entre o perfil geométrico e o perfil real diminui em função do tipo de acabamento aplicado na superfície. Já a superfície efetiva somente poderá ser medida com precisão, utilizando técnicas e aparelhos específicos para a finalidade (44).

2.9.3 Sistema M

O sistema M tem por objetivo encontrar o ponto médio da rugosidade de uma determinada superfície.

A Figura 41 demonstra de forma ilustrativa o conceito da linha média, onde para que a linha média esteja na posição verdadeira a somatória da área de A1 e A2 deve ser igual à área de A3. A partir da linha média é possível definir os parâmetros de rugosidade da superfície (46).

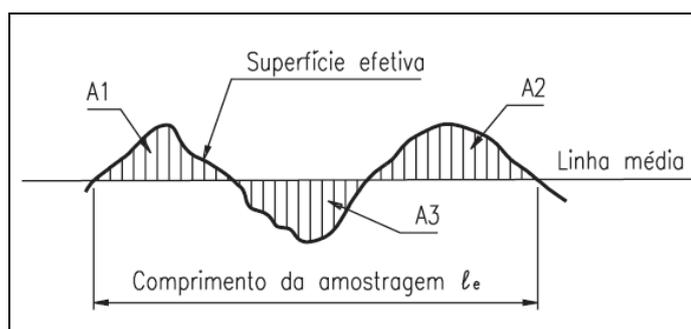


Figura 41 - Linha média traçada a partir dos picos e vales da superfície (43).

2.9.4 Parâmetro RA

O parâmetro (Ra) é frequentemente utilizado na indústria para verificação de superfícies. A medida deste parâmetro é facilmente obtida através de um equipamento chamado Rugosímetro. Normalmente todos os aparelhos de medição de rugosidade apresentam como medida principal o parâmetro (Ra). O

(Ra) é calculado através da média aritmética dos valores de afastamento da linha média (46).

O padrão de rugosidade (Ra) é a área entre o perfil de rugosidade e a linha média (44).

O (Ra) pode ser expresso pela fórmula que é descrita na

Figura 42:

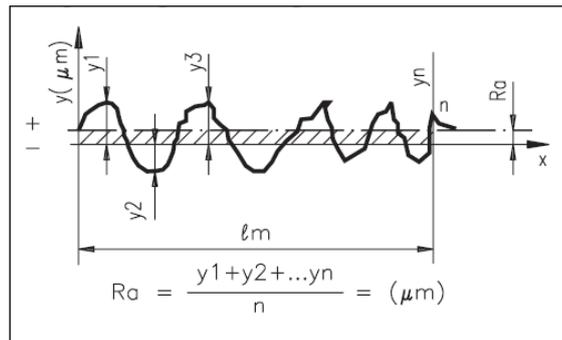


Figura 42 - Ilustração do modelo de cálculo do Ra (43).

O Parâmetro Ra apresenta as seguintes desvantagens (43):

- Os picos e vales com valores maiores e em pequena quantidade não influenciam no valor da média aritmética;
- Não existe a distinção entre os picos e vales;
- Quando a frequência de vales ou picos é muito alta, a exemplo dos sintetizados, o parâmetro é inadequado, já que o filtro provoca distorções nos dados do parâmetro.

O Parâmetro Ra apresenta as seguintes vantagens (43):

- É o parâmetro mais utilizado no mundo;
- Pode ser aplicado na maioria dos processos de fabricação;
- É facilmente encontrado nos aparelhos de medição de rugosidade disponíveis no mercado;
- Na maioria dos casos, este parâmetro está de acordo com a curva de Gauss, que caracteriza a distribuição de amplitude.

Em função de algumas desvantagens encontradas no parâmetro (Ra) é importante que seja usado nos casos em que se exige maior assertividade dos padrões de superfície outros tipos de parâmetros que serão mostrados mais adiante (44).

De acordo com a norma de indicação do estado de superfícies técnicas, NBR 8404-1987, o parâmetro (Ra) apresenta a seguinte classificação de rugosidade, descrito na Tabela 3:

Tabela 3 - Indicação das Características do estado de superfície (45).

Classe de Rugosidade	Desvio Médio Aritmético (Ra) μm
N12	50
N11	25
N10	12,5
N09	6,3
N08	3,2
N07	1,6
N06	0,8
N05	0,4
N04	0,2
N03	0,1
N02	0,05
N01	0,025

A Figura 43 mostra a classificação do parâmetro Ra para cada tipo de processo de usinagem utilizado. Esta relação tem grande influência no atrito e no processo de desgaste das superfícies de um determinado material.

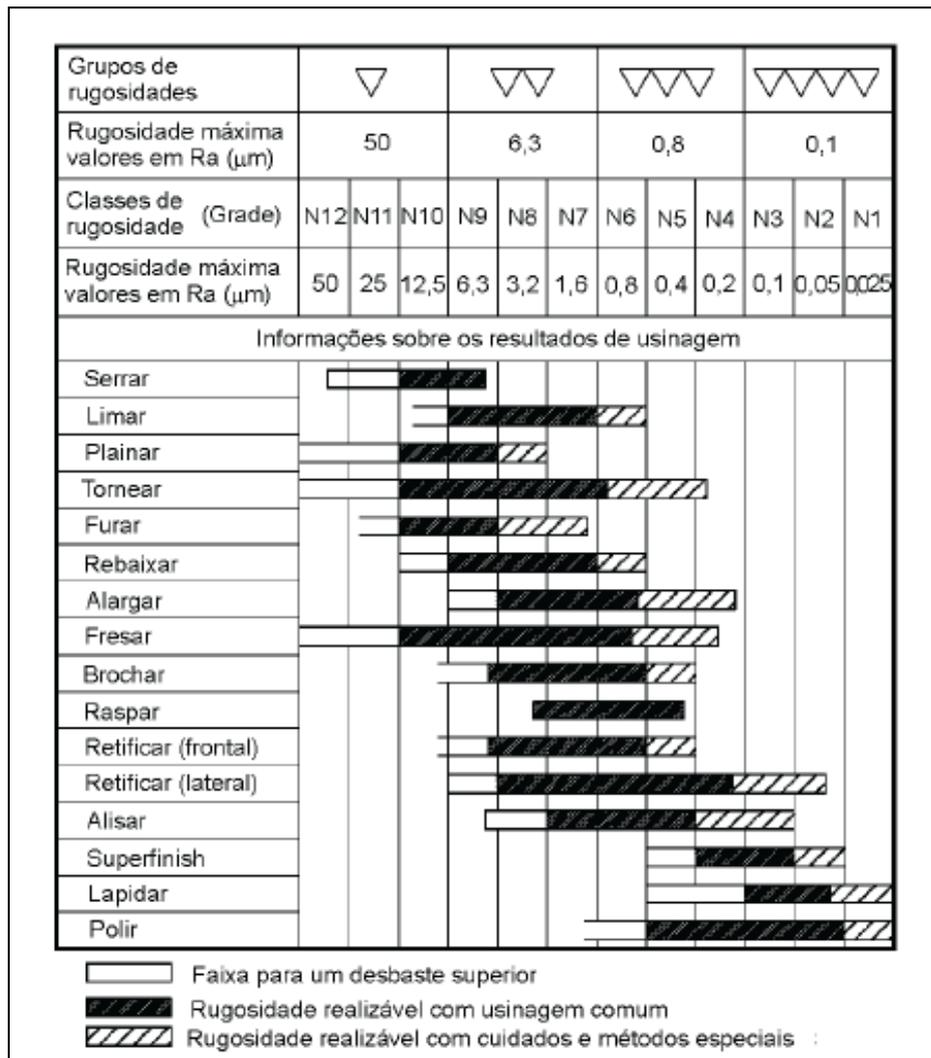


Figura 43 - Classificação da rugosidade Ra em função do tipo de processo de usinagem utilizado (43).

2.9.5 Parâmetro RA X (RQ)

O parâmetro (Ra) é largamente utilizado em diversos países, sendo tradicionalmente utilizado na Inglaterra, porém, em alguns países como os Estados Unidos é comum identificar uma grande utilização do parâmetro (Rq). O parâmetro Ra representa a derivação dos vales e picos a partir da linha central, tratando a derivação abaixo quanto acima da linha como positivo, já o parâmetro (Rq) é a raiz quadrada das derivações encontradas em (Ra) (41). O parâmetro Ra pode ser calculado pela equação 11 (47):

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y| \quad [11]$$

Sendo:

Ra= Rugosidade Aritmética;

L= Comprimento da Amostra;

y= Distância entre a linha central e o pico ou vale;

n= Número de picos e vales encontrados na superfície.

Para o cálculo do parâmetro (Rq) utiliza-se a equação 12 (30):

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y^2 dx} \approx \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n}} \quad [12]$$

Sendo:

Rq= Rugosidade Média Quadrática

L= Comprimento da Amostra

y= Distância entre a linha central e o pico ou vale.

n= Número de picos e vales encontrados na superfície

O parâmetro (Rq) enfatiza os altos valores de picos e vales que aparecem, pois o mesmo eleva ao quadrado essas irregularidades (44).

Os parâmetros (Ra) e (Rq) são obtidos apenas a partir de um perfil na direção vertical, estes parâmetros não fornecem informações de inclinação, forma e tamanho das asperezas (41). Para uma verificação detalhada da superfície é necessário ter vários parâmetros como referência, desta maneira o que não é identificado através de um parâmetro pode ser identificado através de outro.

2.9.6 Parâmetro Rz

A Rugosidade média (Rz) consiste na média aritmética dos cinco valores da rugosidade parcial (Z_i), é definida como o resultado do valor médio da amplitude de cada *cut-off*, Figura 44 (46).

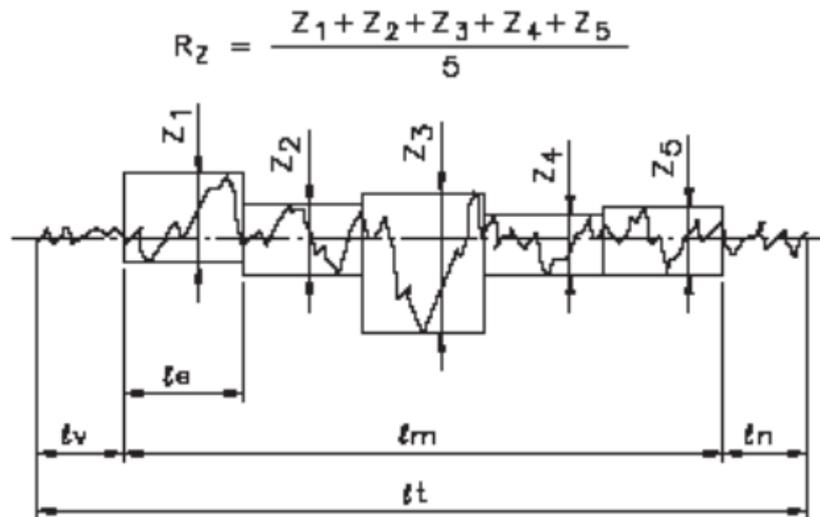


Figura 44 - Rugosidade Média Rz – (44).

3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 45 ilustra o fluxograma organizacional utilizado para a realização dos ensaios.

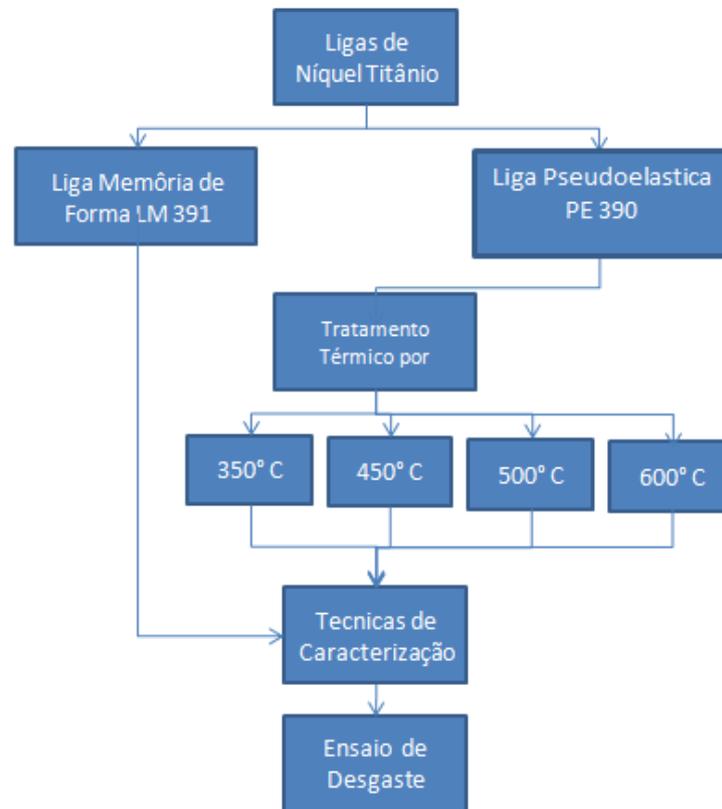


Figura 45 - Fluxograma Organizacional da metodologia experimental.

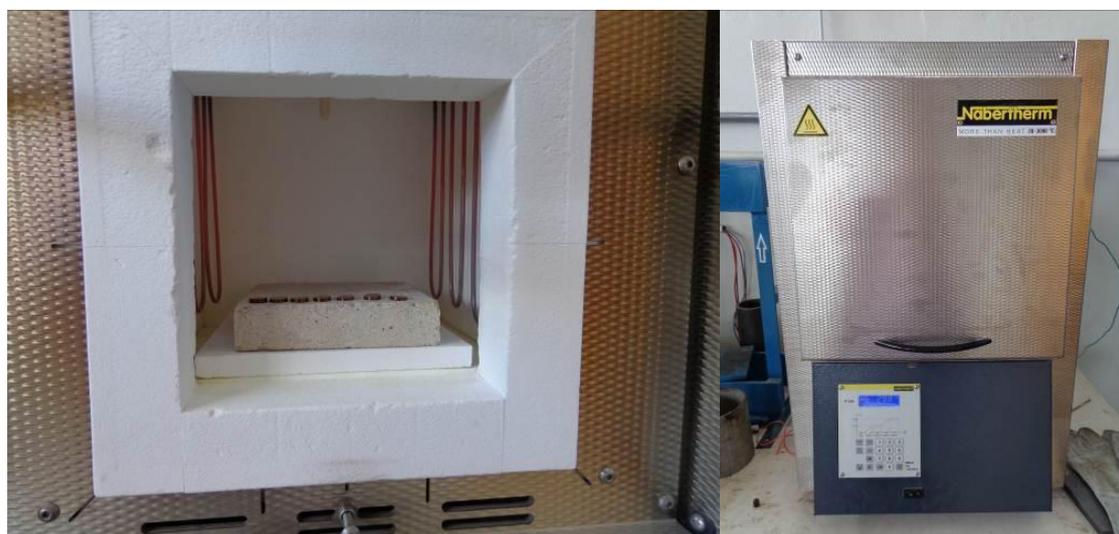
3.1 MATERIAL DE ANÁLISE E TRATAMENTO TÉRMICO

Para a realização deste trabalho foram utilizadas barras de NiTi Austeníticas e Martensíticas com diâmetro de 10mm adquiridos na empresa Nimesis Techonlogy. Através da Tabela 4 é possível identificar cada tipo de amostra de NiTi e suas siglas.

Tabela 4 - Tabela com características das ligas de NiTi fornecida pelo fabricante

Código	Material	Diâmetro	Af
LM390	NiTi- Pseudoelástico	10 mm	-15 °C
LM391	NiTi- Memória de Forma	10mm	80°C

As amostras de NiTi pseudoelásticas foram envelhecidas a 350°C, 450°C, 500°C e 600°C durante 30 minutos com posterior têmpera em água. O tratamento térmico foi realizado utilizando um forno modelo LHT407GN6, fabricado pela Nabertherm, Figura 46.

**Figura 46** - Forno Elétrico.

No presente trabalho denominaremos como pseudoelástica a liga que apresenta-se na fase austenítica a temperatura ambiente, e denominaremos com liga com efeito memória de forma a que apresenta-se na fase martensítica a temperatura ambiente.

A Tabela 5 apresenta a nomenclatura das amostras de estudo.

Tabela 5 - Nomenclaturas das amostras de NiTi

Nomenclatura	Tipo de Material	Quantidade de Amostras
PE390	NiTi Pseudoelástico com recebido	7
PE390-T01	NiTi Pseudoelástico envelhecidas a 350°C	7
PE 39 -T02	NiTi Pseudoelástico envelhecidas a 450°C	7
PE 390-T03	NiTi Pseudoelástico envelhecidas a 500°C	7
PE 390-T04	NiTi Pseudoelástico envelhecidas a 600°C	7
LM 391	NiTi Memória de Forma	7

3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE NiTi

As barras de NiTi foram cortadas em pastilhas de 10mm de diâmetro e 4mm de altura utilizando uma cortadeira automática de alta precisão *Struers*, modelo *Secotom15*, Figura 47. Durante o processo de corte foi utilizado uma velocidade de avanço de 0,005mm/s com o objetivo de evitar a indução mecânica de transformações martensíticas durante o corte. O corte foi realizado utilizando uma velocidade de 3000 rpm com disco de óxido de alumínio *Struers* modelo 30A20 com diâmetro de 200mm e espessura de 0,8mm.



Figura 47 - Cortadeira Automática Struers – Modelo Secotom15.

Após o corte as amostras de NiTi foram embutidas utilizando resina acrílica da marca Acritec modelo F-800 e catalisador acritec F810. O embutimento foi realizado para facilitar o manuseio durante o processo de lixamento e polimento da superfície, e facilitar a fixação das amostras na máquina de desgaste microabrasivo.

As amostras embutidas foram identificadas com pincel de tinta não removível a fim de evitar transtornos durante o processo de caracterização e ensaio dos materiais, após a identificação as mesmas foram guardadas em um recipiente plástico com divisórias identificadas, estas amostras são mostradas na Figura 48.

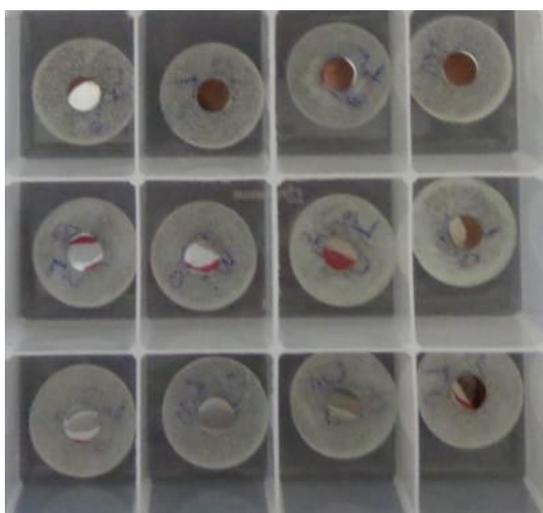


Figura 48 - Amostras de NiTi.

Depois do processo de embutimento foi realizado o lixamento e polimento de cada amostra. Este processo é fundamental, tanto para a realização da análise metalográfica quanto para a realização dos ensaios de desgaste microabrasivo. Uma vez que a rugosidade do material tem grande influência nos resultados de desgaste e metalografia. O polimento mecânico foi realizado utilizando em uma lixadeira manual da Polipan conforme ilustrado na Figura 49.



Figura 49 - Lixadeira manual Polipan-U-Pnatec.

Para o processo de lixamento foram utilizados as lixas com granulometria de 400,600,800,1200 e 2400.

Após o processo de lixamento foi realizado o polimento de cada amostra atualizando pano de polimento e alumina de 0,3 micrometros como abrasivo. A velocidade de lixamento variou de 300 a 500RPM.

Na fase de polimento foi utilizado um microscópio óptico Olympus BX51 e máquina Sony SSC-DC50A para avaliação da superfície, Figura 50. Esta avaliação tem por objetivo identificar possíveis riscos que foram provocados pelo processo de polimento. O processo de polimento foi concluído quando não era mais possível observar riscos na superfície utilizando o microscópio. Foram utilizados aumentos de até 100 vezes para realizar um controle de qualidade da superfície da amostra.



Figura 50 - Microscópio Óptico Olympus BX51 e máquina Sony SSC-DC50A.

Após o polimento as amostras serem atacadas quimicamente com a seguinte solução por 7 minutos:

- 50 ml de água destilada;
- 5 ml de ácido fluorídrico (HF);
- 6 ml de ácido nítrico (HNO_3);
- 3 ml de ácido acético (CH_3COOH).

As análises metalográficas foram realizadas utilizando o microscópio eletrônico de varredura (MEV) do laboratório de microscopia do Instituto de Geologia da Universidade Federal de Brasília, o MEV utiliza o processo de identificação da superfície e imagens por feixe de elétrons, permitindo aumentos de até 100000 vezes. O MEV é mostrado na Figura 51.

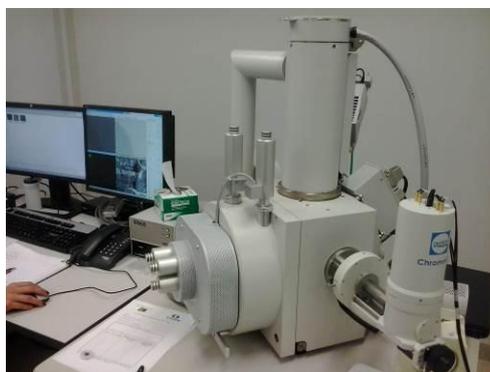


Figura 51 - MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura.

3.2 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

3.2.1 Rugosidade

A medição da rugosidade foi realizada depois do processo de polimento, tendo como objetivo identificar a rugosidade da peça antes do ensaio de desgaste.

A rugosidade foi medida utilizando o Rugosímetro Mitutoyo. Modelo: SJ201, conforme é mostrado na Figura 52.



Figura 52 - Rugosímetro Mitutoyo SJ201

Na medição da rugosidade de superfície foi avaliado os seguintes parâmetros:

- Ra - Rugosidade Média;
- Rq - Rugosidade Média Quadrática;
- Rz – Rugosidade Média dos valores da amplitude do Cut-off.

3.2.2 Caracterização por Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)

A Calorimetria Diferencial de Varredura DSC, tem por objetivo avaliar e identificar através de dados quantitativos as temperaturas de reação endotérmica e exotérmica nos materiais, temperaturas de fusão, transição vítrea, transformações de fase e capacidade calorífica.

Neste trabalho o DSC têm como principal objetivo determinar as temperaturas de transformação de fase das amostras de NiTi, denominadas (Ms, Mf, As e Af). Estas temperaturas tem grande influência nas propriedades físicas e mecânicas do material.

As temperaturas de transformação dependem da composição da liga e dos tratamentos térmicos durante o processo de fabricação (1). Os ensaios de DSC foram realizados no DSC Netzsch 200 F3 Maia que é mostrado na Figura 53.



Figura 53 - Calorímetro DSC Netzsch 200 F3 Maia e cadinhos de alumínio usados no ensaio.

Para a realização do ensaio foi utilizado o seguinte ciclo térmico:

1. Manter a temperatura a 25°C por 01 minuto;
2. Aquecer de 25°C para 150°C a 40°C/min;
3. Manter a temperatura de 150°C por 01 min;
4. Resfriar de 150°C a -70°C a 40°C/min;
5. Manter a -70°C por 01 min;
6. Aquecer de -70°C a 150°C a 20°C/min;
7. Manter a 150°C por 01 min;
8. Resfriar de 150°C a -70°C a 20°C/min.

A curva de resfriamento é traçada no passo 4, já a curva de aquecimento é traçada no passo 6.

3.2.3 Ensaio de dureza Vickers

No presente trabalho foram realizados medições de dureza Vickers com carga de 20Kgf (HV20) e ensaios Vickers de microdureza de 200gf (HV 0,2). Para

dureza HV20 foram realizados 5 medições em cada amostra e para os ensaios de microdureza foram realizados 10 medições para cada amostra. Os ensaios de dureza Vickers HV20 foram realizados no durômetro modelo ZHU250 fabricado pela Zwick/Roell, Figura 54, e os ensaios de microdureza HV0,2 foram realizados no micro-durômetro modelo FM 700 fabricado pela Future Tech, Figura 55.



Figura 54 - Durômetro ZHU250 fabricado pela Zwick/Roell.



Figura 55 - Micro durômetro FM 700 fabricado pela Future Teck.

3.4 ENSAIO DE DESGASTE MICROABRASIVO

Os ensaios de desgaste foram realizados na máquina de ensaio microabrasivo CSM Calowear do Laboratório de Caracterização e Análise de Materiais da Universidade de Brasília, UNB, e é mostrada na Figura 56.



Figura 56 - Equipamento de Teste por desgaste Microabrasivo CSM Calowear.

O Ensaio de desgaste abrasivo segue as seguintes etapas:

1. Preparação da lama abrasiva;
2. Fixação da amostra e ajuste de carga;
3. Regulagem da velocidade de giro do motor e definição do tempo de ensaio;
4. Medição da calota esférica.

3.4.1 Preparação da Lama Abrasiva

A lama abrasiva foi preparada utilizando água destilada e carbetto de silício (SiC), conforme é proposto em outros trabalhos (67). A concentração do abrasivo nos ensaios foi de 20% de volume de SiC e 80% de volume de água. Com esta concentração foi utilizado 80g de SiC e 100ml de água destilada.

Para realizar o cálculo da concentração abrasiva é necessário saber a densidade do líquido (água destilada) e do abrasivo (SiC), estes valores são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Características do abrasivo

Massa abrasiva necessária para 100cm ³ de água - Obs: 100cm ³ = 100ml				
Abrasivo	Tamanho (µm)	Densidade (cm ⁻³)	Concentração (vol %)	Massa (g)
SiC	4	3.2	20	80

Após o processo de preparação, a lama abrasiva deve ser colocada em um agitador magnético, Figura 57, para evitar que a o abrasivo decante alterando a concentração da solução e pare o processo de bombeamento.



Figura 57 - Lama abrasiva no agitador magnético.

A velocidade de bombeamento deve ser igual para todos os testes a fim de reduzir possibilidade de erros nos resultados do teste.

3.4.2 Fixação da amostra e ajuste de carga

A amostra deve estar completamente plana e deve ser fixada no porta amostras, com sua face de desgaste em paralelo com o eixo de acionamento da esfera rotativa. Isto tem por objetivo evitar alterações nos valores das cargas e dimensões da cratera de desgaste. Após a amostra ser colocada no porta amostras, o medidor de carga deve se zerado com objetivo de medir a força que a esfera exerce sobre a amostra, Figura 58.

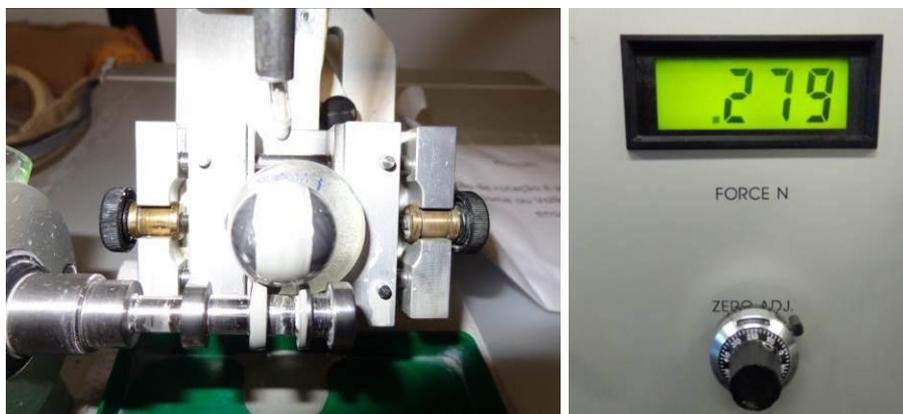


Figura 58 - Porta amostra e medidor de carga.

A carga deve ser registrada a cada 50 ciclos com objetivo de identificar possíveis variações de carga durante o processo de desgaste.

O equipamento possui uma célula de carga que realiza medições máximas de 2kgf.

3.4.3 Velocidade da Esfera e Tempo de Ensaio

A velocidade e o tempo de ensaio foram estabelecidos de acordo com a Tabela 7, (67).

Tabela 7 - Tabela com parâmetros de velocidade e tempo de ensaio.

	Velocidade do Eixo	Rotação Padrão	Tempo de Ensaio (s)
Esfera 20 mm	16 rot/10seg	508	308
		762	462
		1143	692
		1524	923
		1905	1154
		2540	1539

Para cada condição analisada foram realizados três ensaios de desgaste.

3.4.4 Medição da Calota Esférica

A medição da calota de desgaste foi realizada utilizando o microscópio óptico da CSM Calowear com aumento de 90 vezes, Figura 59.



Figura 59 - Microscópio Óptico – CSM Calowear.

Com os valores de diâmetro de cada cratera, carga aplicada durante o desgaste, diâmetro da esfera e tempo de deslizamento é possível identificar a taxa de desgaste do material, conforme é descrito na secção 2.74.

4.0 RESULTADOS E DISCURSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões relativos à influência do tratamento térmico por envelhecimento nos resultados de desgaste, na microestrutura e na dureza dos corpos de prova testados.

4.1 RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE

Na Tabela 8 estão os valores médios de rugosidade Ra, Rq e Rz.

Tabela 8 - Resultados de rugosidade da Superfície.

Rugosidade da Superfície			Ra (μm)	Rz (μm)	Rq (μm)
	Amostra recebido	como	0.9 ± 0.3	1.9 ± 0.3	1.2 ± 0.3
Amostra após polimento	PE390		0.04 ± 0.002	0.3 ± 0.001	0.06 ± 0.002
	PE390-T01		0.03 ± 0.001	0.2 ± 0.002	0.05 ± 0.002
	PE390-T02		0.04 ± 0.001	0.4 ± 0.001	0.06 ± 0.002
	PE390-T03		0.05 ± 0.002	0.6 ± 0.001	0.08 ± 0.003
	PE390-T04		0.04 ± 0.001	0.5 ± 0.002	0.06 ± 0.002
	LM391		0.04 ± 0.001	0.3 ± 0.001	0.06 ± 0.003

É possível observar que a rugosidade (Ra) da superfície após o processo de polimento está dentro dos valores pré-estabelecidos pela (NBR 4287:2002) para uma superfície com alto grau de polidez.

Esta medição foi realizada com intuito de certificar que as rugosidades superficiais das amostras apresentavam valores aproximados entre si, a fim de minimizar o erro nos resultados de desgaste microabrasivo.

4.2 RESULTADOS DE DUREZA

A liga LM391 apresentaram resultados dureza 17% menores quando comparado com a liga PE390. Para as ligas pseudoelásticas que passaram por tratamento térmico de envelhecimento foi possível identificar que para temperaturas de 350°C e 450°C os valores de dureza aumentaram, em 20% e 7% respectivamente, para os resultados de dureza HV20. Contudo, os tratamentos térmicos de envelhecimento realizados a 550°C e 600°C apresentaram redução

na dureza em 0,7% e 10% respectivamente em relação ao material como recebido. A Figura 60 mostra os resultados de coeficiente de desgaste para cada ensaio realizado.

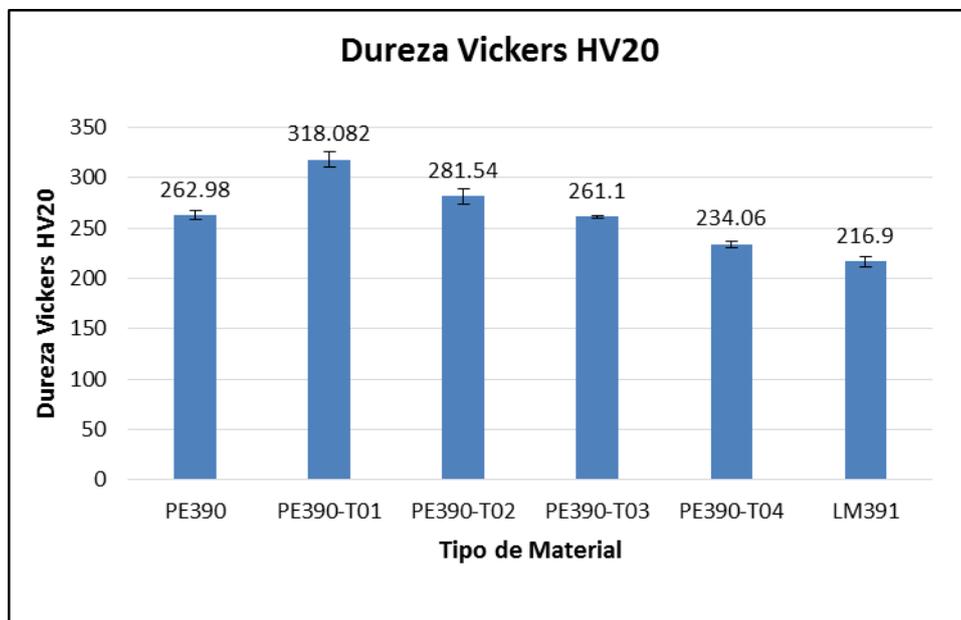


Figura 60 - Dureza HV20 para as ligas de NiTi com memória de forma e pseudoelásticas.

Os resultados de microdureza HV0,2 apresentou aumento nos valores de dureza somente para tratamentos térmicos realizados a 350°C, os demais tratamentos reduziram a dureza material, Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados de dureza Vickers – HV20 e HV0,2.

Resultados de Dureza Vickers						
	PE390	PE390-T01	PE390-T02	PE390-T03	PE390-T04	LM391
Dureza HV20	262,98±4,41	318,082±7,5	281,54±7,5	261,1±1,2	234,06±3,4	216,9±5,0
Dureza HV0,2	346,97±14,3	369,51±15,8	284,57±9,67	267,12±11,5	259,21±12,3	269,96±13,7

Contudo o desvio padrão dos resultados de dureza HV0,2 são maiores dos que os apresentados pelos resultados de dureza HV20, conforme é mostrado na \

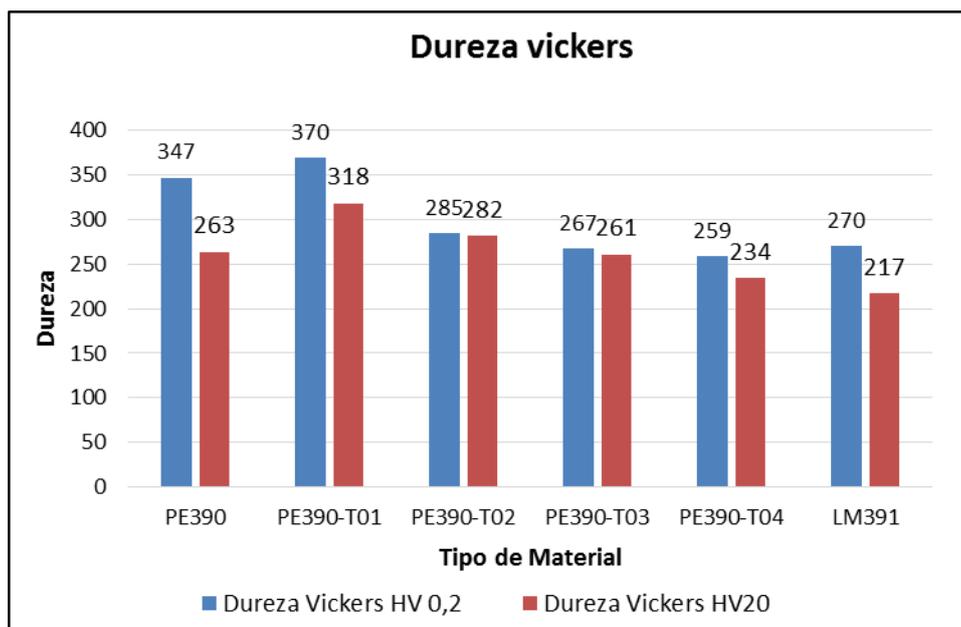


Figura 61 - Resultados de Dureza Vickers HV20 e HV0,2.

4.3 ANÁLISES METALGRÁFICAS E INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS

As microestruturas das ligas foram reveladas através de preparação metalográfica. A Figura 62 apresenta uma comparação entre a liga pseudoelástica PE390 como recebida e liga memória de forma LM391. Através das imagens foi possível identificar que a microestrutura pseudoelástica apresenta grãos equiaxiais bem definidos. Entretanto, para a microestrutura da amostra LM391 memória de forma não foi possível revelar o contorno de grão, podendo somente serem identificados alguns precipitados.

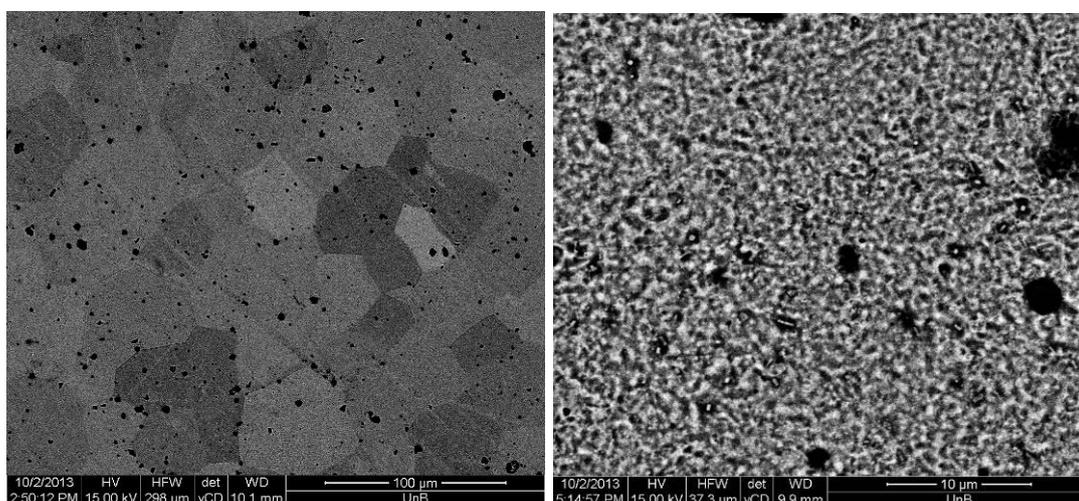


Figura 62 - Imagens realizadas no MEV (a) Microestrutura da liga PE390 Pseudoelástica como recebida (1000X) (b) Microestrutura da liga LM 391 (8000X).

Os tratamentos térmicos foram realizados somente nas amostras pseudoelásticas PE390, os resultados metalográficos de cada tratamento térmico são mostrados abaixo nas Figuras 63, 64, 65 e 66. Nas imagens são observadas alterações nas características da microestrutura após a realização dos tratamentos térmicos, em específico, o aparecimento de estrias, típicas do processo de deslizamento de planos cristalinos, dentro dos grãos. Estas estrias começam a aparecer nos tratamentos térmicos de 350°C, e vão aumentando nos tratamentos a 450°C, 500°C e 600°C. Onde na metalografia da amostra tratada a 600°C é possível observar estas estrias em todos os grãos.

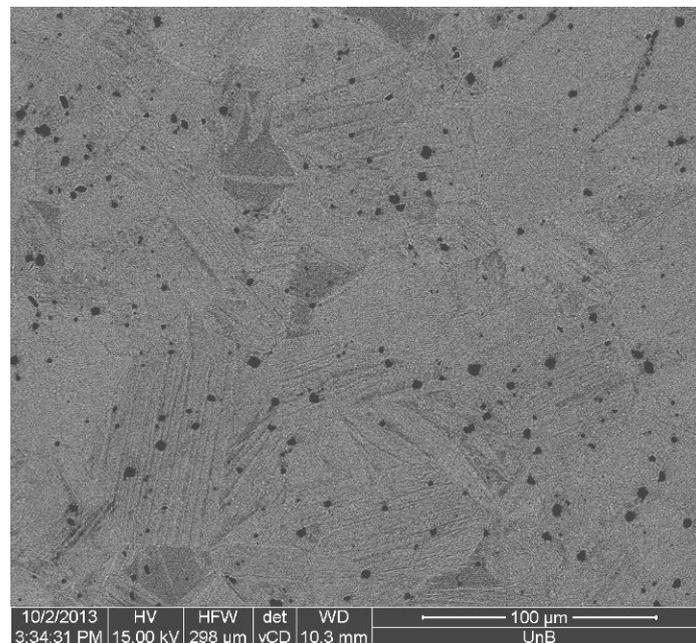


Figura 63 - Imagem realizada no MEV - Amostra PE390 Pseudoelástica – Tratada a 350° C – (1000X)

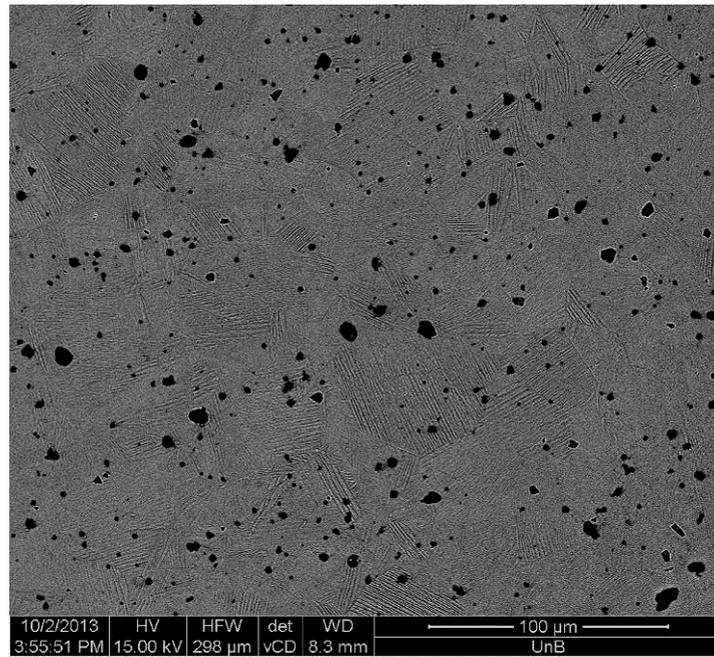


Figura 64 - Imagem realizada no MEV - Amostra PE390 Pseudoelástica – Tratada a 450° C – (1000X)

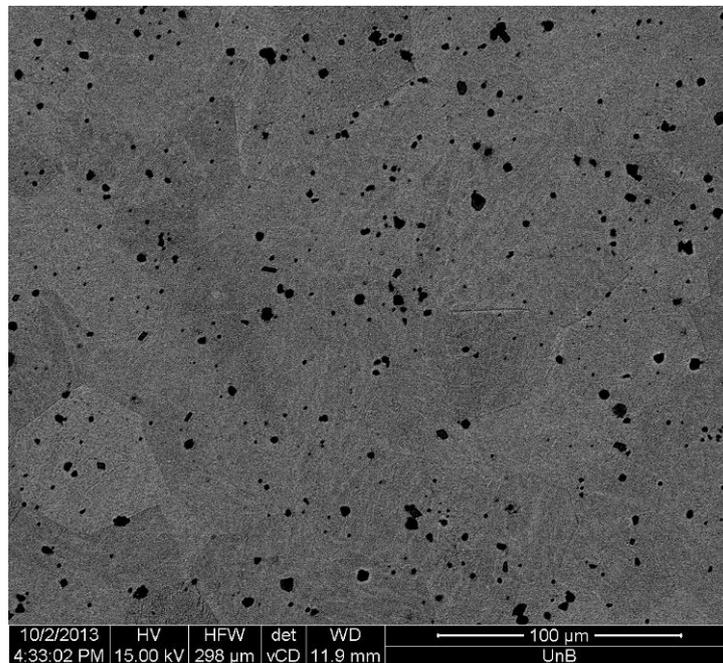


Figura 65 - Imagem realizada no MEV - Amostra PE390 Pseudoelástica – Tratada a 500° C – (1000X)

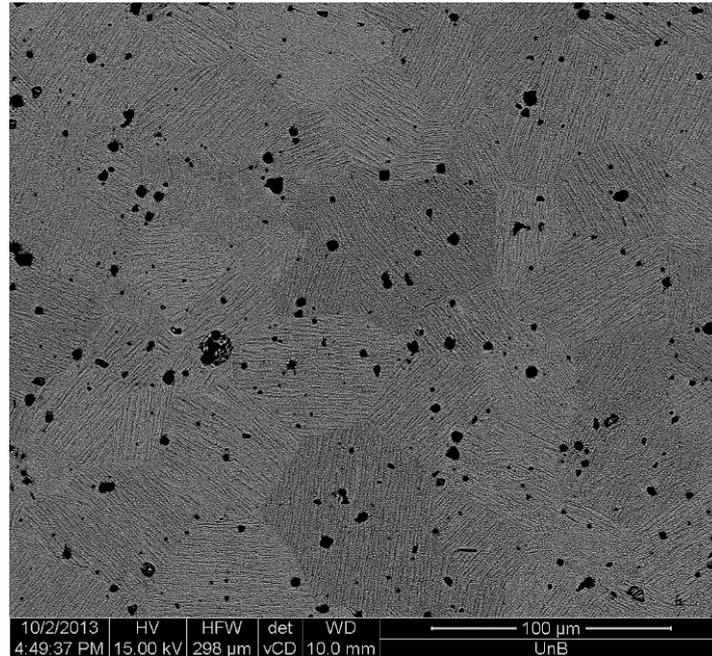


Figura 66 - Imagem realizada no MEV - Amostra PE390 Pseudoelástica – Tratada a 600° C – (1000X)

4.4 RESULTADOS DE DSC

A Figura 67 apresenta o resultado da análise de DSC realizada na amostra PE390, observa-se um pico endotérmico no aquecimento, que alcança sua amplitude máxima em $-21,50^{\circ}\text{C}$, correspondente à transformação da martensita em austenita e um pico exotérmico no resfriamento com amplitude máxima em aproximadamente -50°C , correspondente à transformação da austenita em martensita.

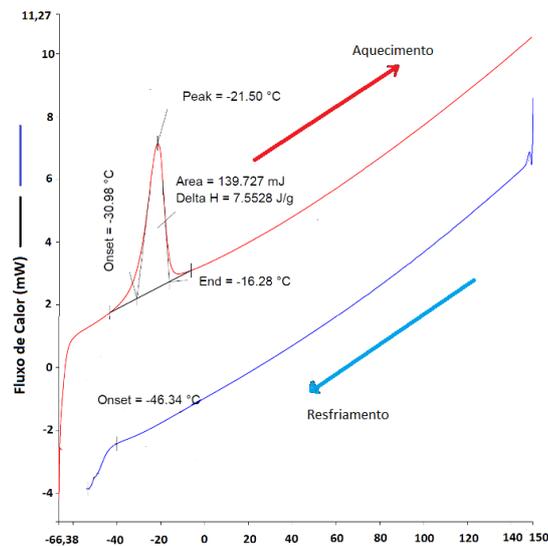


Figura 67 - Resultado de DSC amostra PE390.

Analisando o gráfico da Figura 67, bem como as temperaturas de transformação de fase, pode-se concluir que a liga é 100% austenítica.

A Figura 68 apresenta o resultado para a análise de DSC realizada na amostra PE390-T01, nesta curva é possível observar a existência de dois picos endotérmicos no aquecimento, que alcançam sua amplitude máxima em $-8,18^{\circ}\text{C}$ e $29,38^{\circ}\text{C}$. O aparecimento de dois picos endotérmicos está associado provavelmente ao aparecimento da fase R (02, 15, 16, 23), proveniente do tratamento térmico a 350°C . A configuração da transformação de fase acontece da seguinte maneira: B19' (martensita) \rightarrow Fase R \rightarrow B2 (Austenita).

Durante o resfriamento é observado somente um pico exotérmico, referente provavelmente à transformação de fase martensita em fase R, com amplitude máxima em $18,44^{\circ}\text{C}$.

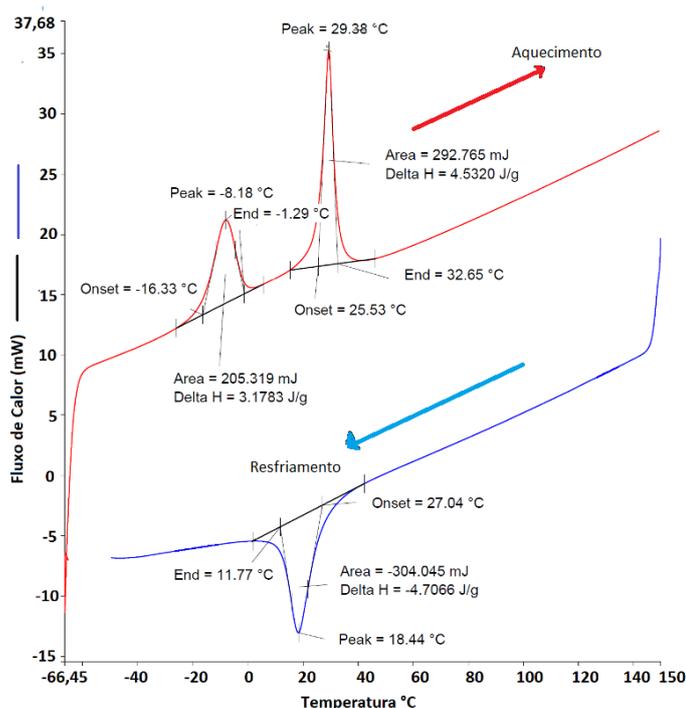


Figura 68 - Resultado de DSC amostra PE390-T01.

Através da análise do gráfico da figura 68 pode-se observar que o envelhecimento a 350°C proporcionou o aparecimento da fase R.

A Figura 69 apresenta o resultado da análise de DSC realizada na amostra PE390-T02, onde foi observado no aquecimento um pico endotérmico com amplitude máximas em $29,48^{\circ}\text{C}$ e dois picos exotérmicos no resfriamento com amplitude máxima em $-36,58^{\circ}\text{C}$ e $18,02^{\circ}$.

Foi observado o aparecimento de um segundo pico exotérmico de transformação de fase, provavelmente fase R, sendo que no aquecimento, esta fase pode estar sobreposta ao pico endotérmico principal.

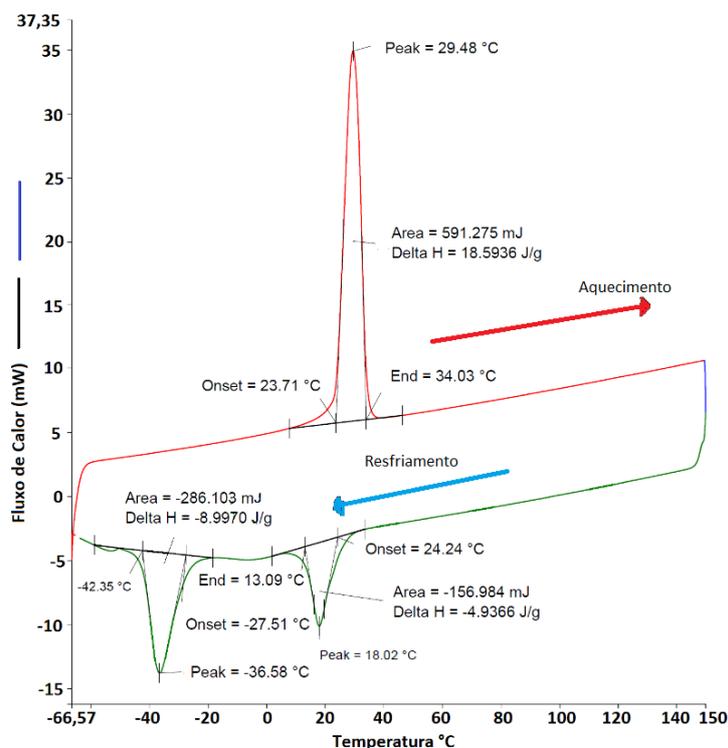


Figura 69 - Resultado de DSC amostra PE390-T02.

Analisando as temperaturas de transformação pode-se concluir novamente que esta liga provavelmente possui fase R e austenita também.

A Figura 70 mostra o resultado da análise de DSC realizada na amostra PE390-T03, neste caso são observados dois picos exotérmicos no resfriamento, com amplitude máxima em $-39,70^{\circ}\text{C}$ e $-14,80$, sendo estes característicos da transformações de fases B2 (Austenita) \rightarrow Fase R e Fase R \rightarrow B19 (Martensita), respectivamente. Já no aquecimento foi observado um pico endotérmico com amplitude máxima em $14,50^{\circ}\text{C}$, este pico possui uma grande amplitude e energia acumulada, o que sugere que nesta temperatura ocorre duas transformações, praticamente simultâneas, ou seja é transformado fase B19 (Martensita) \rightarrow Fase R \rightarrow B2 (Austenita).

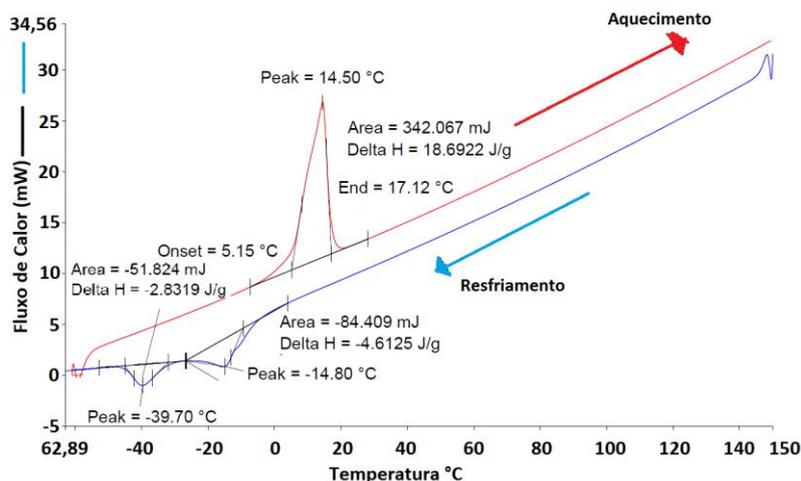


Figura 70 - Resultado de DSC amostra PE390-T03.

Pela análise do gráfico e temperaturas de transformação da amostra PE390-T03 é possível concluir que a mesma também é austenítica.

A Figura 71 mostra o resultado para a análise de DSC na amostra PE390-T04, sendo observado somente um pico endotérmico no aquecimento, que tem amplitude máxima em $-17,69^{\circ}\text{C}$, proveniente da transformação de fase $A \rightarrow M$ e um pico exotérmico no resfriamento, com amplitude máxima em $-50,18^{\circ}\text{C}$, proveniente da transformação de fase $M \rightarrow A$. É possível perceber que a provável fase R que estava presente nos tratamentos térmicos realizados nas temperaturas de 350°C , 450°C e 500°C já não está mais presente na amostra que sofreu envelhecimento a 600°C . Sendo suas características de transformação de fases semelhantes ao do material como recebido (PE390), que possui fase austenita a temperatura ambiente.

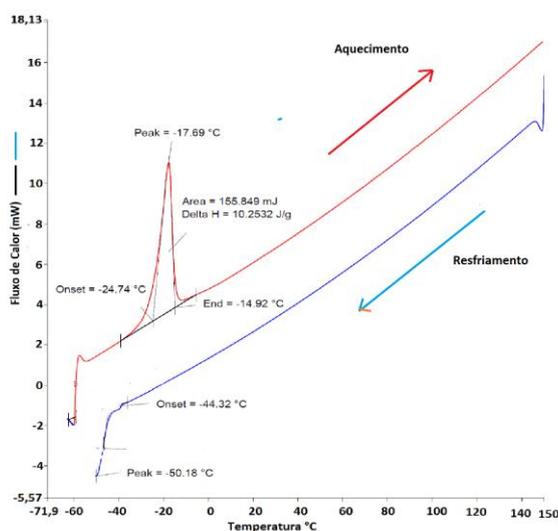


Figura 71 - Resultado de DSC amostra PE390-T04.

A Figura 72 mostra os resultados de DSC para a amostra LM391. Conforme mencionado anteriormente à amostra LM391 trata-se de uma amostra com efeito memória de forma, ou seja, possui a fase citados anteriormente que pertencem ao grupo de amostras com características de pseudoelasticidade (com fase austenita a temperatura ambiente).

Essa diferença entre fases presentes a temperatura ambiente, pode ser confirmada na análise de DSC, Figura 72, em que se observa uma reação endotérmica no aquecimento com pico de transformação de fase em 84,38°C, muito mais elevado do que as ligas pseudoelásticas e reação exotérmica no resfriamento com pico de transformação de fase em 45,99°C, ou seja, a liga é 100% martensítica à temperatura ambiente.

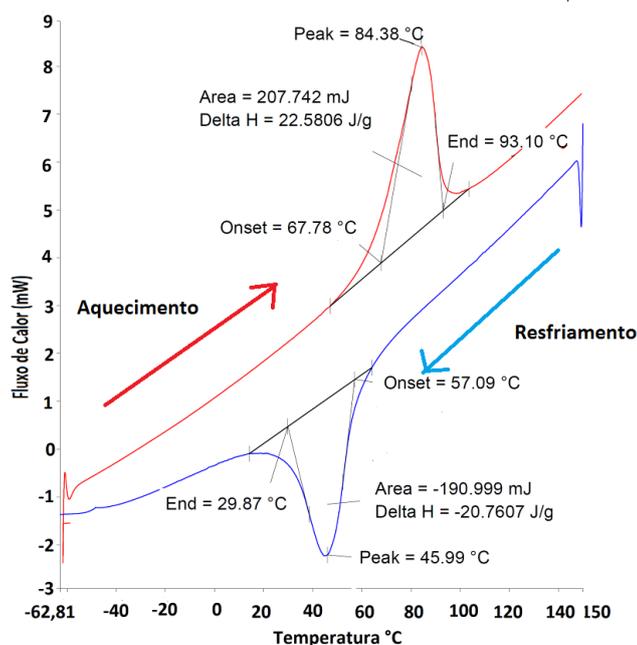


Figura 72 - Resultado de DSC amostra LM391 – Memória de Forma.

Um resumo das temperaturas de transformação de fase para as ligas estudadas é mostrado na Tabela 10. Para a liga pseudoelástica PE390 a maior variação de temperatura ocorreu após a realização de tratamento térmico a 350°C.

Na Tabela 10 também é mostrado ao valor da histerese da amostra, a histerese é a diferença das médias das temperaturas de transformação de fase da martensita e austenita (25).

Tabela 10 - Temperaturas de transformação para cada amostra.

Liga	Ms	Mf	As	Af	Histerese
LM 390	-46,34	-62,00	-30,98	-16,28	30,5
PE 390T01	27,04°C	11,77°C	25,53°C	32,65°C	9,68
PE 390T02	-27,51°C	-42,35°C	23,71°C	34,03°C	49,68
PE 390T03	-32,03°C	-45,08°C	5,15°C	17,12°C	77,82
PE 390T04	-44,32°C	-58,00°C	-24,74°C	-14,92°C	34,36
LM 391	57,09°C	29,87°C	67,78°C	93,10°C	36,96

Para as amostras PE390 e PE390-T04 os valores de transformação martensítica final foram aproximados, uma vez que os resultados de DSC não mostraram o valor das mesmas na curva.

4.5 RESULTADOS DE DESGASTE

Na Figura 73 é mostrado o gráfico com resultados de coeficiente de desgaste microabrasivo em função da distância de deslizamento, esta distância está diretamente relacionada com a quantidade de ciclos que é realizado durante o processo de desgaste. No gráfico é possível observar que o coeficiente de desgaste reduz à medida que a distância de deslizamento aumenta, nos ensaios até 90 metros de deslizamento, a partir daí observa-se um aumento no coeficiente de desgaste.

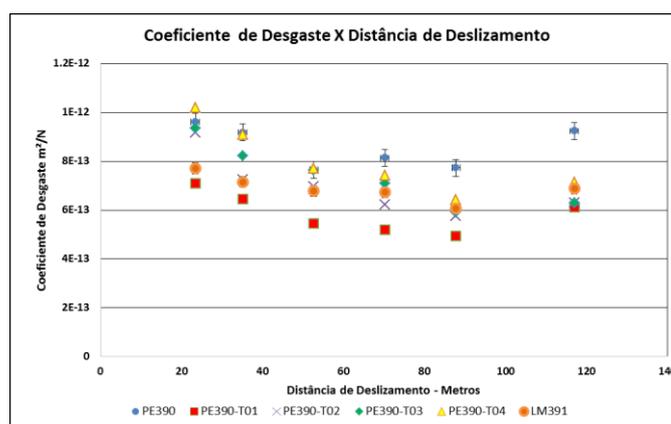


Figura 73 - Resultados de desgaste de cada tipo de amostra versus a distância de deslizamento da esfera.

Quando compara-se condição por condição, observa-se que em todas as condições existem semelhanças na tendência o coeficiente de desgaste, onde no

início existe uma fase com maior valor de coeficiente de desgaste, após esta fase é observado redução nos valores de coeficiente de desgaste, e a partir dos 90 metros de deslizamento aproximadamente o coeficiente volta a crescer.

Ao comparar a amostra PE390 (Liga pseudoelástica como recebida) com a amostra PE390-T01 (liga pseudoelástica envelhecida a 350°C), na Figura 74, se observa uma redução na média do coeficiente de desgaste em 31%.

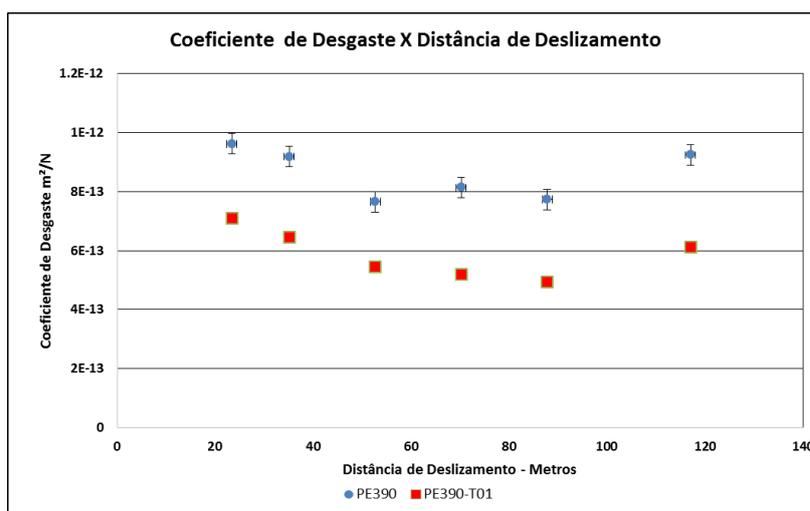


Figura 74 - Resultados de desgaste microabrasivo da amostra PE390 e PE390-T01.

Quanto à liga é envelhecida a 450°C essa redução média do coeficiente de desgaste diminui, ficando em torno de 19%, conforme é mostrado na Figura 75.

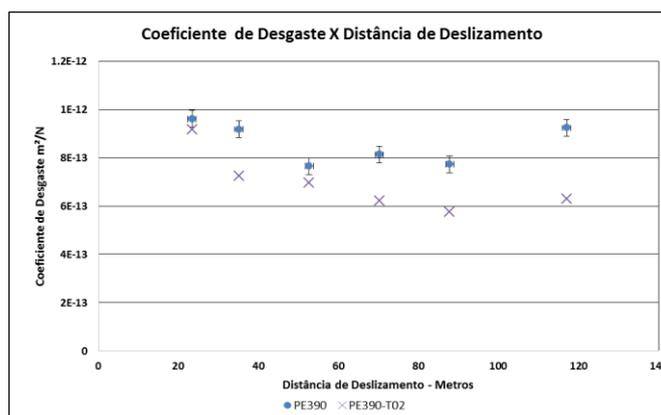


Figura 75 - Resultados de desgaste microabrasivo da amostra PE390 e PE390-T02.

O tratamento térmico de envelhecimento a 500°C da liga pseudoelástica PE390 contribuiu para a redução média do coeficiente de desgaste em 14%, conforme é mostrado na Figura 76.

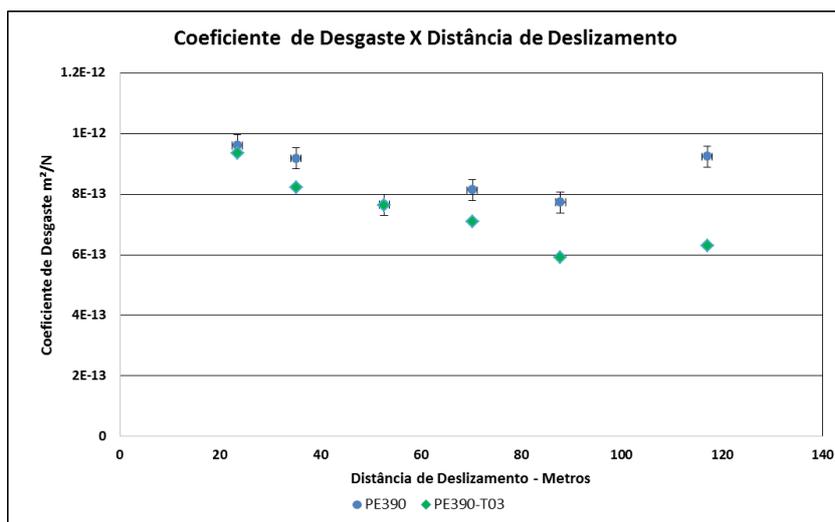


Figura 76 - Resultados de desgaste microabrasivo da amostra PE390 e PE390-T03.

O tratamento térmico de envelhecimento a 600°C na liga pseudoelástica PE390 contribuiu para a redução média do coeficiente de desgaste em 7%, conforme é mostrado na Figura 77.

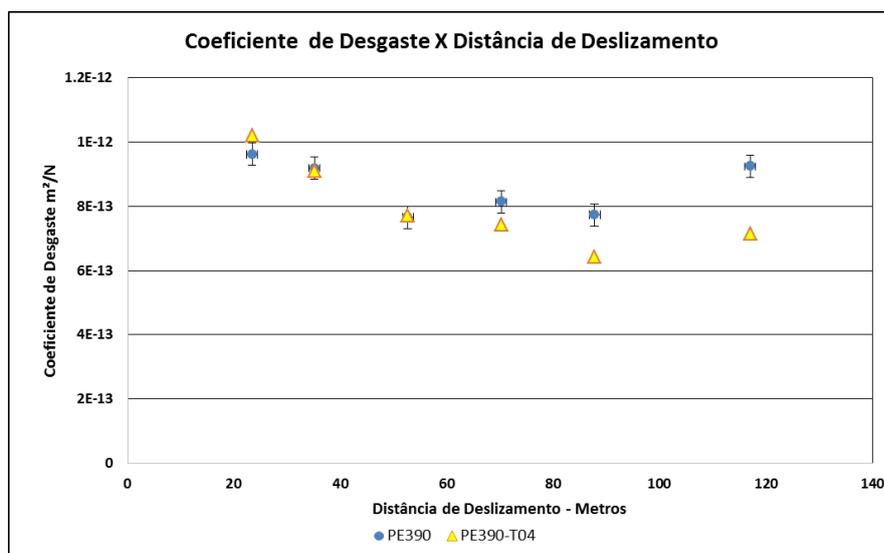


Figura 77 - Resultados de desgaste microabrasivo da amostra PE390 e PE390-T04.

O coeficiente de desgaste da liga com Memória de Forma LM391 teve valores inferiores quando comparado com a liga Pseudoelástica PE390, a liga LM391 tem o coeficiente de desgaste 14% menor quando comparado com a liga PE390, conforme mostra a Figura 78.

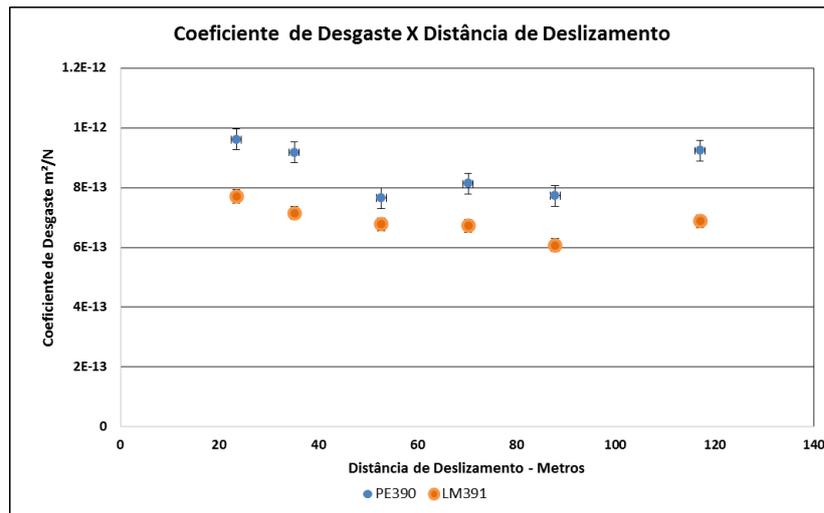


Figura 78 - Resultados de desgaste microabrasivo da amostra PE390 e LM391.

Os resultados comparativos mostraram que para todas as ligas houve um aumento no desgaste a partir dos 90 metros de deslizamento, contudo, realizando uma avaliação do desgaste em estágios, Figura 79, é possível perceber que isto ocorre somente para as ligas pseudoelásticas como recebido e pseudoelásticas envelhecidas a 350°C, Figura 80.

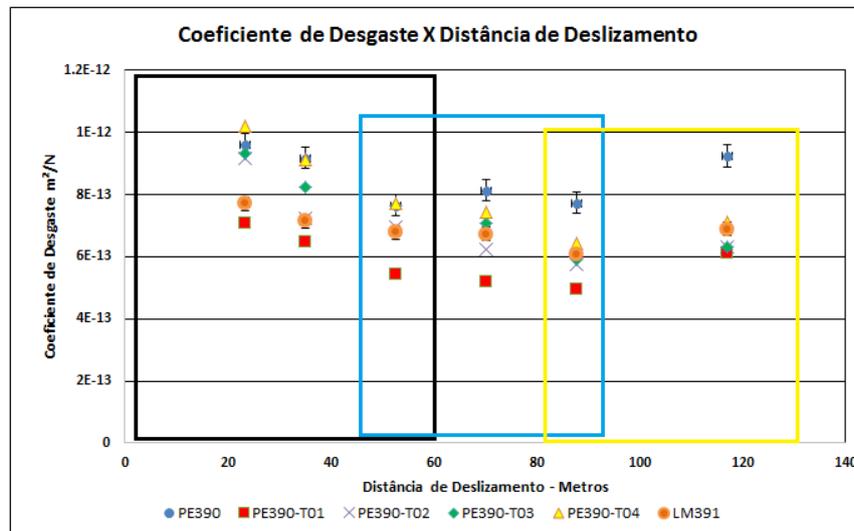


Figura 79 - Ilustração da divisão dos resultados de desgaste por estágios (Preto – Estágio -01, Azul – Estágio 02, Amarelo – estágio 03).

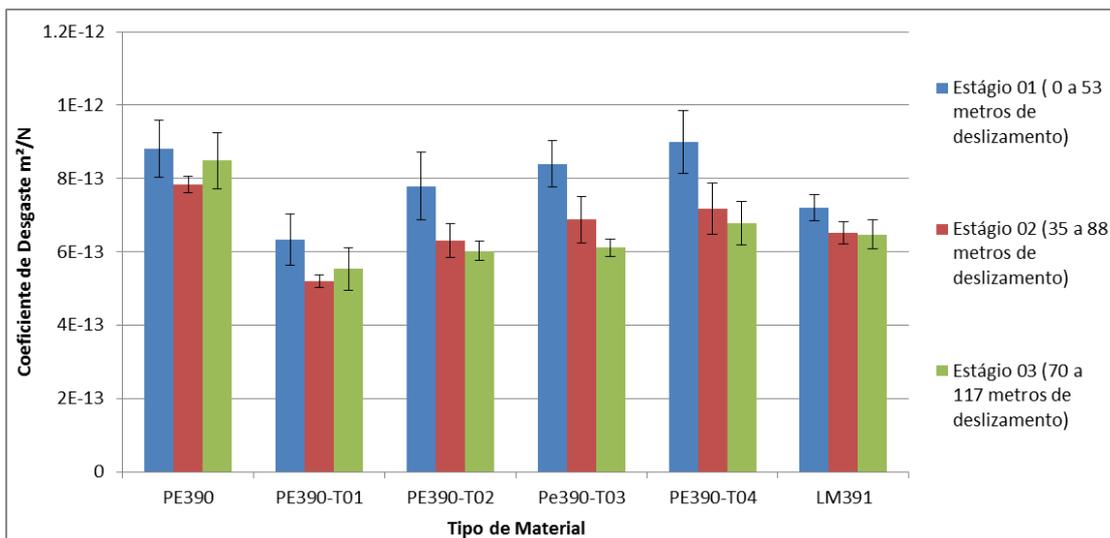


Figura 80 - Resultados de coeficiente de desgaste por estágios.

Na Figura 81 é mostrado o gráfico com o resultado médio de desgaste microabrasivo, estes resultados levam em conta a média dos resultados de desgaste para cada tipo de ciclo de desgaste, que são respectivamente ensaios de desgaste com 508, 762, 1143, 1524, 1905 e 2540 ciclos.

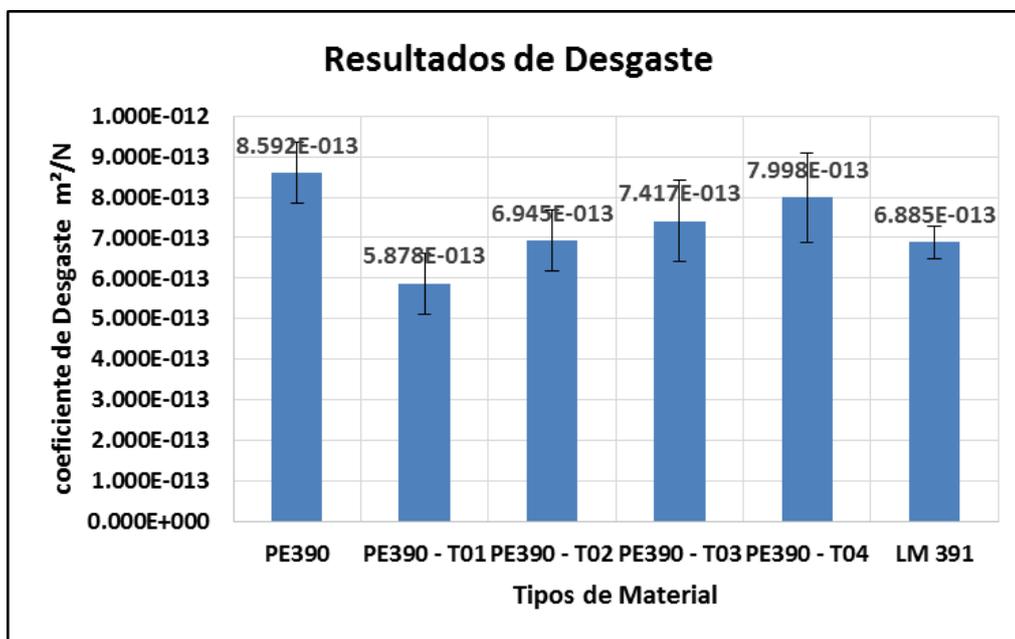


Figura 81 - Resultado do coeficiente médio de desgaste para cada tipo de amostra.

Os resultados de taxa de desgaste em mm^3/m são condizentes com os resultados do coeficiente de desgaste, este resultado representa o quanto de

material é removido a cada metro de deslizamento da esfera. Os resultados de taxa de desgaste são mostrados na Figura 82.

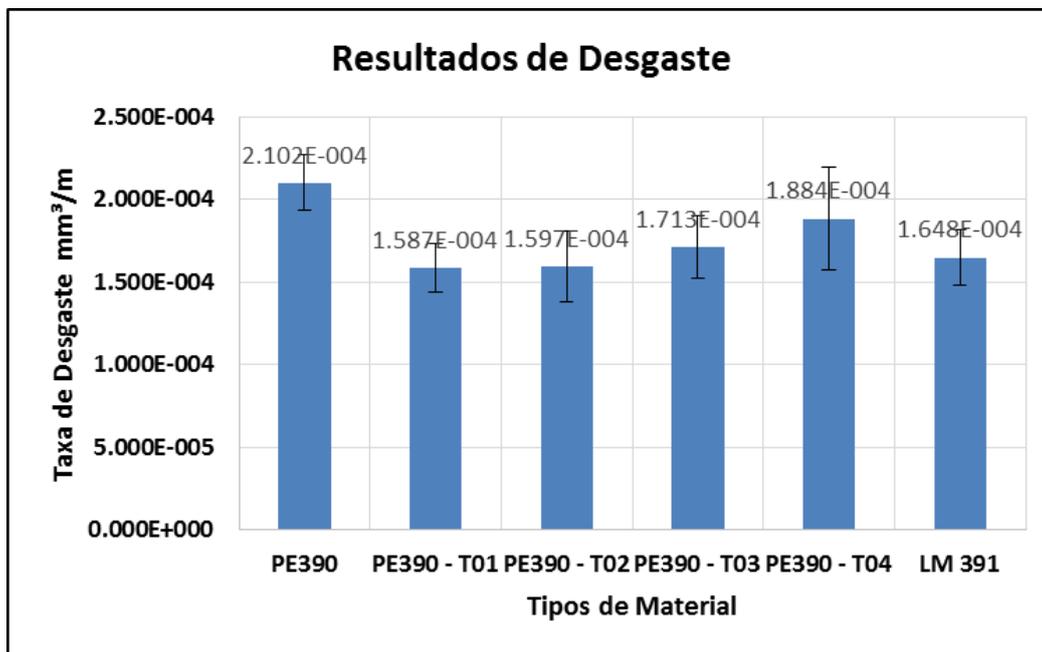


Figura 82 - Resultados de Taxa de Desgaste.

É sabido que normalmente a dureza do material é diretamente proporcional à resistência ao desgaste do mesmo. Sendo assim foram comparados os valores de dureza HV20 e taxa de desgaste das amostras em estudo, Figura 83.

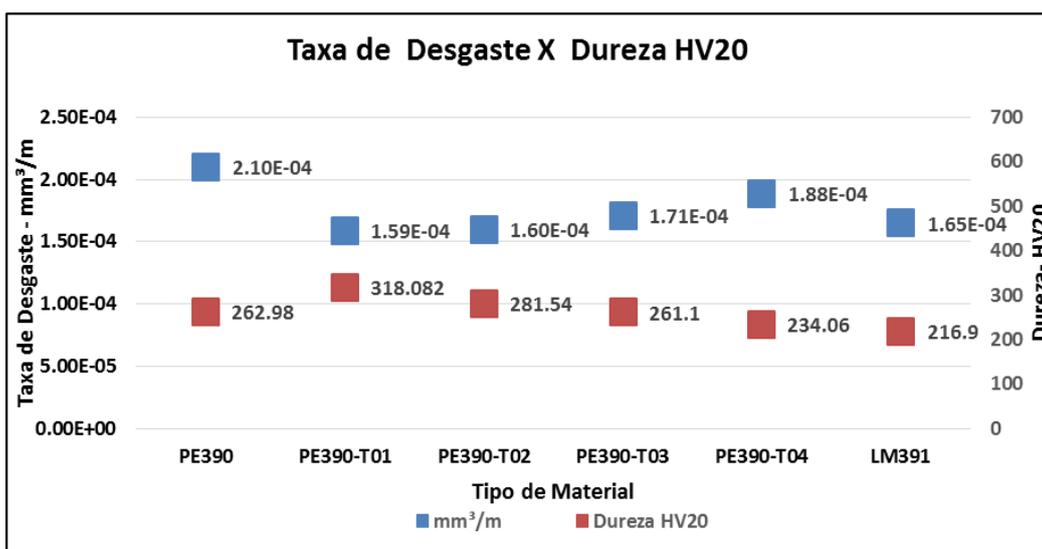


Figura 83 - Relação entre a taxa de desgaste e a Microdureza HV0,5.

Como pode-se observar na Figura 83, a amostra que apresentou a maior dureza, PE390-T01, foi também a que apresentou menor desgaste. À medida que a temperatura de envelhecimento é aumentada a dureza do material diminui e, conseqüentemente, a taxa de desgaste aumenta. Porém, no caso das amostras PE390-T03 e PE390-T04 a dureza das mesmas foi menor ou igual à dureza da amostra PE390, que apresentou o pior resultado de resistência ao desgaste. Isto significa que para estes materiais existe outro mecanismo de desgaste prevalente. Neste caso, pode ser a presença de precipitados na liga.

A Figura 84 mostra a superfície de desgaste das amostras PE390 e LM391. Pode-se observar que o desgaste foi a três corpos e que a superfície da amostra LM391 apresenta menos desgaste por lascamento quando comparada com a liga PE390.

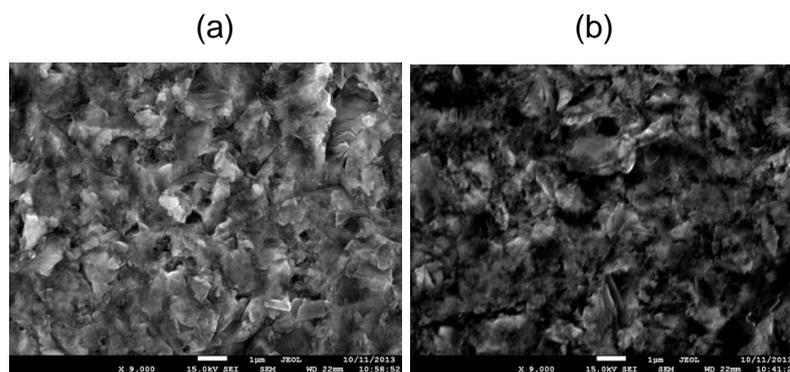


Figura 84 - (a) Característica da superfície de desgaste microabrasivo para a amostra com memória de forma LM391 (b) Característica da superfície de desgaste microabrasivo da amostra Pseudoelástica PE390.

5.0 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência do tratamento térmico de envelhecimento na resistência ao desgaste microabrasivo de ligas NiTi. Para isso, foram estudadas ligas memória de forma austeníticas (pseudoelásticas) e martensíticas (com efeito memória de forma) a temperatura ambiente.

Ensaio de dureza, metalografia e DSC foram realizados como análises complementares. Os tratamentos de envelhecimento a 350°C e 450°C provocaram um aumento de 20% na dureza da liga PE390-T01 e 7% na dureza da liga PE390-T02, o que pode estar associado ao aparecimento de precipitados. Por outro lado, a tendência de redução da dureza em 0,7% para a liga PE390-T03 e 10% para a liga PE390-T04 pode estar relacionado ao aumento da temperatura de envelhecimento, que ocasionou a solubilização destes precipitados na liga.

O aparecimento de outra fase durante o processo de transformação de fases da liga, observado através de análises de DSC, condiz com os resultados de dureza, onde é possível identificar que nas ligas com presença de possível fase R a dureza demonstrou ser superior em até 20% quando comparado com o material como recebido. Contudo ligas com ausência da fase R mostraram resultados de dureza semelhantes ou inferiores ao do material como recebido, reduzindo em até 10% a dureza do material.

Os resultados de coeficiente de desgaste foram coerentes com os valores de dureza obtidos para as ligas. À medida que a dureza resultante do envelhecimento diminuiu, maior foi o coeficiente de desgaste encontrado. Na liga PE390-T01, que obteve aumento na dureza em 20% observou-se um redução de 31% no coeficiente de desgaste, na liga PE390-T02 foi possível obter redução de 19% no coeficiente de desgaste, na liga PE390-T03 houve redução de 14% coeficiente de desgaste e na liga PE390-T04 foi identificado redução de 7% no coeficiente de desgaste. Apesar da diminuição da dureza para os tratamentos térmicos acima de 500°, foi possível observar que houve redução no coeficiente de desgaste para todos os tratamentos realizados.

Isto mostra que o envelhecimento é um meio de se alterar os valores de dureza e, conseqüentemente, os resultados de coeficiente de desgaste de ligas NiTi pseudoelásticas.

A liga com efeito memória de forma a temperatura ambiente, demonstrou ter dureza 17% menor quando comparado com a liga pseudoelástica, o que é explicado pelo fato da liga com memória de forma apresentar-se na fase martensita a temperatura ambiente. Contudo, os resultados de coeficiente de desgaste para esta liga foram 14% menores quando comparado com a liga pseudoelástica, ficando fora da regra geral, em que o material mais macio tem maior coeficiente de desgaste.

6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Alterar as configurações de temperatura de tratamento, utilizando valores intermediários no intuito de se obter um melhor mapeamento da liga nos resultados de dureza e desgaste.
- Variar a temperatura da amostra durante o processo de avaliação do desgaste microabrasivo com o objetivo de identificar o efeito da temperatura e transformação nos resultados de desgaste.

7.0 REFERÊNCIAS

- (1) Otsuka K, Ren X. Physical metallurgy of Ti-Ni based shape memory alloys. *Progress in Materials Science*. v. 50, 2005, p. 511-678.
- (2) Otsuka K, wayman CM, Introduction & Mechanism of shape memory effect and superelasticity, New York: Cambridge, 1998.
- (3) Reis WP, Caracterização de Ligas de NiTi para Ortodontia, [Dissertação de Mestrado]. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2001.
- (4) Matheus TCU, Lopes PH, Albuquerque DS, Elias CN, Carmo AMR, Otubo J. The Fracture Evaluation of NiTi SMA Endodontics Files. *Materials Research*, 2007; 395-398.
- (5) Vionet MZ, Recobrimentos de carbono amorfo para utilização em limas endodônticas, [Dissertação de Mestrado]. Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Rio de Janeiro, UFRJ, 2005.
- (6) Matheus TCU, Lopes PH, Albuquerque DS, Elias CN, Carmo AMR, Otubo J. The Fracture Evaluation of NiTi SMA Endodontics Files. *Materials Research*, 2007; 395-398.
- (7) Castilho WS, Silva EP, 2011, Algumas Aplicações das Ligas com Memória de Forma Shape Memory Alloys, Sinergia, São Paulo, 2011; 99-108.
- (8) Batra A, Shape Memory Alloys An introduction, 1999.
- (9) Ryhänen J, *Biocompatibility evaluation of nickel-titanium shape memory metal alloy*. Oulun, University of Oulu, 1999.

- (10) Ducos PC, Transformações de fase em ligas de níquel - titânio para ortodontia, [Dissertação de Mestrado]. Rio de Janeiro, Instituto Militar de Engenharia, 2006.
- (11) Dias RF, Efeito da deformação cíclica nas propriedades mecânicas de uma liga níquel-titânio superelástica, [Dissertação de Doutorado]. Belo Horizonte, Minas Gerais, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.
- (12) Kauffman GB, Mayo I, *The Story of Nitinol: The Serendipitous Discovery of the Memory Metal and Its Applications*, Springer-Verlag, New York, 1996.
- (13) Lagoudas DC, Khan MM, *Modeling and Engineering Applications*, Texas, 2001 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, New York, USA, Department of Aerospace Engineering, 2008, 10p.
- (14) Perkins J, Shape Memory Behavior and Thermoelastic Martensitic Transformations, *Materials Science and Engineering*, 1981;181-192.
- (15) Wayman CM, Shape memory and Related Phenomena, *Progress in Materials Science*, v. 36, 1992; 203-224.
- (16) Lojen G, *Microstructure of Rapidly Solidified Cu-Al-Ni Shape Memory Alloy Ribbons*, *Journal of Materials Processing Technology*, 2005; 220-229.
- (17) Gil FJ, Planell JA, Shape memory alloys for medical applications, Institution of Mechanical Engineers, *Journal of Engineering in Medicine*, 1998, v. 212, n. 6.
- (18) Ryhänen J. *Biocompatibility evaluation of nickel-titanium shape memory metal alloy*. Oulun : University of Oulu, 1999.
- (19) Mehta A, Imbeni V, Ritchie RO, Duerig TW. On the electronic and mechanical instabilities in Ni_{50.9}Ti_{49.1}. *Materials Science and Engineering A*, 2004; 130-137.

(20) Strandberg E. Caracterización de aleaciones de titânio com bajo modulo elástico y memoria de forma para aplicaciones biomédicas, 1209 – Tesis Maestria, Universitat Politècnica de Catalunya, España. 2006

(21) Wang ZG, ZU, Feng XD, Zhu S, Zhou JM, Wang LM , Annealing-induced evolution of transformation characteristics in TiNi shape memory alloys. Physical B 353, 2004, ; 9-14.

(22) PERES RV, Propriedades Mecânicas em Flexão e torção de fios de NiTi. [Dissertação de Mestrado]. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2012.

(23) Buehler WJ, Wang FE. A summary of recent research on the Nitinol alloys and their potential application in ocean engineering. Ocean Engineering 1, 1968;105–20.

(24) Andersan S, Tratamentos termomecânicos de Ligas do Sistema NiTi- Caracterização Estrutural e Optimização das Propriedades Associadas ao Efeito do Memória de Forma, [Dissertação de Doutorado], Portugal, Universidade de Nova Lisboa. 2006.

(25) Villamarin EB., Estudo das Variações Microestruturais de uma liga pseudoelástica de NiTi tratada termicamente, [Dissertação de Mestrado], Universidade Federal de Brasília, 2013.

(26) Mortagy O., Farag M., Effect of heat treatment on the superelasticity and hardness of NiTi, Science and Technology Research Center and Mechanical Engineering Department in Cairo, Egypt 2000, 17p.

(27) Uehara T, Shape Memory Alloys. In: CISMASIU, C. (Ed.). Molecular Dynamics Simulation of Shape-memory Behavior. Rijeka: Sciyo, 2010; 1-16.

- (28) Sato A, Shape memory and physical properties to Fe-Mn-Si alloys, Proceeding of the MRS International Meeting on Advanced Materials – Shape Memory Materials, May 31-June 3, Sunshine City, Ikebukuro, Tokyo, Japan, v.9, 1988; 431-445.
- (29) Auricchio F, Taylor RL, Lubliner J. Shape memory alloys: macromodelling and numerical simulations of the superelastic behavior. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v.146, 1997; 281-312.
- (30) Hutchings IM. TRIBOLOGY. Friction and Wear of Engineering Materials. Em *TRIBOLOGY Friction and Wear of Engineering Materials* Great Britain: Edward Arnold Editora, 1992.
- (31) Gall G, Tyber J, Wilkesanders G, Robertson SW, Ritchie RO, Maier HJ. Effect of microstructure on the fatigue of hot-rolled and cold-drawn NiTi shape memory alloys. *Materials Science e Enginneering*, 2007; 389-403.
- (32) Otsuka K., Kakeshita T. Science and technology of shape-memory alloys: new developments. *MRS Bulletin*, Fevereiro 2002; 91-100.
- (33) Melton KN, Simpson J, Duerig TW, A New Wide Hysteresis NiTi Based Shape Memory Alloy and its Applications; pp. 1053-1058; revista ndc; 1989; The Japan Institute of Metals”.
- (34) Miyazani S. Medical and Applications of Shape memory alloys. New York, EUA: Cambridge, 1998.
- (35) Kucharski S, Levintant-zayonts N. Surface characterization and wear behavior of ion implanted NiTi shape memory alloy; *Vacuum*; 2009, 220-223.

(36) Ryhanen J, "Evaluación de la biocompatibilidad de níquel-titanio con memoria de forma del metal de la aleación", Ph.D. Tesis de la Universidad de Oulu,Finlandia, 1999.

(37) Fernandes, FMB. Ligas com memória de forma. Seminário - Departamento de ciência dos Materiais, CENIMAT/UNL, Universidade Nova de Lisboa 2006.

(38) Cyprus University of Technology. Testes Biomedicos. Cypre. 2013 [capturado 15 dez 2013]. Disponível em: <http://www2.cut.ac.cy/mem/research/biolisys/research/projects/biocorrosion/biomechanical>

(39) Kottoor J, N. V. Effects of multiple root canal usage on the surface topography and fracture of two different NiTi rotary file systems. Indian Journal of Dental Research,2013; 42-47.

(40) Sinatora A., "Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte", Prova de Erudição, São Paulo, 2005.

(41) Halling J. *Principles of Tribology*. London: Macmillan Education LTD, 1975.

(42) Stoeterau RL, Tribologia - emc 5315 - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica – 2004-179p.

(43) Tormin ACF, COTRIM FA, FERREIRA V, SCAVONE J, LIBERTI E.– Comparação de métodos de polimento de esmalte interproximal após desgaste com instrumento rotatórios abrasivos-estudo ao microscopia eletrônica de varredura. Ortodontia.– V 34, n2 – 2001; 25-35.

(44) Machado A. Avaliação da Rugosidade em Superfícies Complexas. Joinville, Santa Catarina, Brasil, 2009.

(45) Tecnicas AB, NBR 8404-1984. *Indicação do Estado de Superfícies em Desenhos Técnicos*. Rio de Janeiro , Rio de Janeiro , Brasil, 1984.

(46) Secco AR; Vieira E, Gordo N. Aula 19: Parâmetros de rugosidade. Telecurso 2000. Curso Profissionalizante de Metrologia

(47) Arnell RD, Whomes PD, *Tribology Principles and Design Applications*. Londres: Macmillan Education TLD, 1991.

(48) Hernandez AF. Estudo da Influencia da Criogenia na Resistência ao Desgaste Abrasivo do Aço ATSM 743 TIPO CA6NM. [*Disseratação de Mestrado em Ciências Mecânicas*]. Brasília , Distrito Federal, Brasil, 2009.

(49) Tabor D. The physical meaning of indentation and scratch hardness, British J. of Applied Physics, v. 7, 1956; 159-165.

(50) COZZA RC. A study on friction coefficient and wear coefficient of coated systems submitted to micro-scale abrasion tests. *Surface e coatings Technology*,2012; 224-233.

(51) Schuitek AJ. *Estudo do Comportamento de Desgaste de Materiais Metélicos em Riscamento Circular*. São Paulo, 2007.

(52) ASTM – American Standard for Testing Materials. Annual Book of Standards Volume 03.02, Philadelphia, USA, 2001.

(53) Smith D A, Smith S, Tntstly J. “High Perfonnance ii11iiig Torque Sensor”, Trans. ASME — Journal of Mamufacturing Science and Engineering, y. 120. 1998; 504-13.

(54) Callister JR, W. D. Materials science and engineering: an introduction. 4th. ed. USA: John Wiley & Sons, 1997.

(55) Silva CA. Análise de propriedades mecânicas, tribológicas e metalográficas de material submetido ao processo de erosãocorrosão com sulfetação, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2009.

(56) Gates JD. Two-body and three-bdy abrasion: a critical discussion, *Wear*, 214, 1998; 139-146.

(57) de Mello JDB. Introdução ao estudo do desgaste. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia: 1994; 1-26.

(58) Pintaúde G, Análise do Regimes Moderado e Severo de Desgaste Abrasivo utilizando Ensaio Instrumentados de Dureza, Tese de Doutorado, USP, 2002.

(59) Zun Gahr KL. Microstructure and Wear of Materials. Tribology Series, Volume 10, Elsevier Science Publishers B. V, 1987.

(60) Trezona RI, Allsopp, D. N. and Hutchings, I. M., 1999, "Transition Between Two-Body And Three-Body Abrasive Wear: Influence Of Test Conditions In The Microscale Abrasive Wear Test.", *Wear*, volume 225 – 229; 205 – 214

(61) Cozza RC. A study on friction coefficient and wear coefficient of coated systems submitted to micro-scale abrasion tests. *Surface e coatings Technology*,2012; 224-233.

(62) REN X, MIURA N, ZHANG J, OTSUKA K, TANAKA K,. KOIWA M SUZUKI T, A comparative study of elastic constants of Ti-Ni based alloys prior to

martensitic transformation. *Materials Science and Engineering A* 312, 2001; 196–206.

(63) Jacobson S, Axén N.; Hogmark S; Friction and Wear Measurement Techniques, *Modern tribology Handbook*, 2001.

(64) Stachowiak GW, Bathcherlor AW – *Engineering Tribology*. Ed Butterworth Heinemann, 1996, 769p.

(65) Cozza RC. Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste micro-abrasivo. *Dissertação de Mestrado*, USP, 2006.

(66) Gobbi VJ, *Influência da Nitretação a Plasma na Resistência ao Desgaste Microabrasivo do Aço Ferramenta AISI D2. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas*. Brasília, Distrito Federal , Brasil, 2009.

(67) Gee MG, Gant A, Hutchings IM, Bethke R, Schiffman, K, Van Acker, K, Poulat S, Gachon Y, von Stebut J. “Progress towards standardisation of ball cratering”, *Wear*; 2003 1-13.