

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

VINÍCIUS DE LIMA CUSMA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO ENSAIO PINO SOBRE DISCO PARA
A AVALIAÇÃO DO DESGASTE DA LIGA AMORFA VITRELOY 105**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2018

VINÍCIUS DE LIMA CUSMA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO ENSAIO PINO SOBRE DISCO PARA
A AVALIAÇÃO DO DESGASTE DA LIGA AMORFA VITRELOY 105**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para o título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Andreato Batista Mendes

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a Janaína Fracaro de Souza Gonçalves

LONDRINA

2018



TERMO DE APROVAÇÃO

VINICIUS DE LIMA CUSMA

ESTUDO DA VIABILIDADE DO ENSAIO PINO SOBRE DISCO PARA A AVALIAÇÃO DO DESGASTE DA LIGA AMORFA VITRELOY 105

Trabalho de conclusão de curso apresentado no dia 06 de Dezembro de 2018 como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Márcio Andreato Mendes Batista
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Profª Drª Silvia Midori Higa
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof. Me. Diego Ruben Martin
(Editora e Distribuidora Educacional S/A)

Profª. Drª. Silvia Midori Higa
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)
Coordenadora do Curso de Engenharia de Materiais

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.”

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à minha família, meus pais Marcos Cusma e Vilma Aparecida de Lima, por todo o suporte emocional, espiritual e financeiro que me deram durante esses anos de graduação.

Agradeço imensamente ao meu orientador Prof^o Dr. Márcio Andreato Batista Mendes, pela paciência durante esse tempo que foi meu orientador, e por fazer as pontes necessárias para que eu pudesse dar início e fim ao trabalho. Posso dizer que foi uma honra ser seu aluno e orientando.

À minha co-orientadora Prof^a Dr.^a Janaina Fracaro de Souza Gonçalves, por ceder seu tempo e conseguir mediar importantes contatos, a fim de que fosse possível a realização dos ensaios de desgaste.

Ao professor Marcelo Falcão de Oliveira e ao mestrando Nelson Delfino de Campos Neto por processarem as amostras utilizadas neste trabalho.

Aos professores Silvia Midori Higa e Diego Ruben Martin por aceitarem serem parte de minha banca avaliadora.

Ao colega Felipe Prado Salgado, orientado de mestrado da Prof^a Janaina, que se dedicou a conseguir realizar os ensaios, por meio de suas ideias de adaptações para o equipamento que viria ser utilizado, e pela sua ajuda durante o decorrer do trabalho.

Aos colegas do Laboratório Aberto, no Centro de Competência em Manufatura, no DCTA – Samir, Leonardo e outros estagiários e técnicos (alguns que não me recordo do nome no momento) - os quais colaboraram de maneira excelente para que o experimento desse certo. A esses, ficam meus sinceros votos de sucesso na vida profissional.

A todos os amigos que fiz em Londrina, na graduação e fora dela, especialmente minha querida Angélica, que me deu um apoio sem igual para que eu pudesse perseverar até o fim.

Aos professores do DEMA da UTFPR/LD, que sempre fizeram o que podiam com o pouco de recurso que lhes era oferecido com o propósito de nos passar o conhecimento necessário que nos levasse ao caminho do amadurecimento profissional.

RESUMO

CUSMA, V.L. **Estudo da Viabilidade do Teste Pino Sobre Disco para a Avaliação do Desgaste da Liga Amorfa Vitreloy 105**. 2018. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2018.

O presente trabalho tem como objetivo verificar a viabilidade da utilização do ensaio de pino-sobre-disco para se avaliar a resistência ao desgaste da liga Vitreloy 105 ($Zr_{65,7}Cu_{15,6}Ni_{11,7}Al_{3,7}Ti_{3,3}$) (liga metálica de estrutura amorfa), utilizando, para isso, a norma ASTM G99 – *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*. Para a execução do ensaio foram elaboradas adaptações em um tribômetro inicialmente construído para efetuação de testes com esferas ao invés de pinos. Foram utilizados seis pares de amostras, sendo ambos os pinos e os discos do material Vitreloy 105 $Zr_{65,7}Cu_{15,6}Ni_{11,7}Al_{3,7}Ti_{3,3}$). O ensaio foi avaliado por meio do cálculo das taxas de desgaste, seguida da análise superficial das amostras desgastadas com um Perfilômetro, em que se obtiveram imagens da superfície de desgaste resultantes dos ensaios. Os resultados obtidos de taxas de desgaste e das análises das imagens se aproximaram daqueles encontrados por outros autores, comprovando a viabilidade do uso do equipamento para realização de futuros testes.

Palavras-chave: Vitreloy 105. Pino-sobre-disco. Desgaste. Metais Amorfos.

ABSTRACT

CUSMA, V.L. **Study of the Viability of the Pin-on-Disk Test for the Wear Evaluation of the Amorphous Alloy Vitreloy 105**. 2018. 58 f. Undergraduate Thesis– Material Engineering Department, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2018.

The main goal of the present work is to verify the viability of utilizing the pin-on-disk test as means to evaluate the wear resistance of an amorphous alloy denominated Vitreloy 105 ($Zr_{65,7}Cu_{15,6}Ni_{11,7}Al_{3,7}Ti_{3,3}$), in accordance with the ASTM G99 – Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. For the execution of the wear test, some adaptations were made to a tribometer designed for the use of spheres instead of pins. Six pairs of samples were used, being both the pins and disks made of Vitreloy 105. The evaluation of the test took place by calculating the wear rates and the surface analysis of the worn regions with a chromatic aberration microscope, obtaining the images of the resulting surface morphology. The results obtained for the wear rates and the surface images analysis were close to those found by other authors, testifying the viability of the use of equipment for future testing.

Keywords: Vitreloy 105. Pin-on-Disk. Wear. Amorphous Metals.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de diferenciação entre estruturas amorfa e cristalina oriundas de um processo de fundição.....	14
Figura 2 - Curva Hipotética de Resfriamento com a Variação de Volume ou Entalpia pela Temperatura.....	16
Figura 3 - Curvas de DSX (esquerda) e DSC (direita) de uma amostra de $Zr_{41}Ti_{14}Cu_{12,5}Ni_{10}Be_{22,5}$	17
Figura 4 - Curvas de Tração (a) e compressão (b) para uma amostra de Vitreloy 105 à esquerda e Macrofractografias de uma amostra de $Zr_{59}Cu_{20}Al_{10}Ni_8Ti_3$ em Tração (a) e Compressão (b).....	19
Figura 5 - Esquema representativo de uma superfície com rugosidade.	21
Figura 6 - Curva teórica do comportamento do coeficiente de atrito e seus respectivos regimes.	23
Figura 7 - Mecanismos de desgaste: a) micro sulcamento; b) micro corte; c) micro trincamento.....	25
Figura 8 – Mecanismo de Desgaste Adesivo (A seta indica o sentido do movimento).	25
Figura 9 – Formação de um fragmento deisco ao cisalhamento de camadas durante o deslizamento das superfícies.	26
Figura 10 – Superfície de desgaste da liga Vitreloy 105. Em a) visualização de sulcos de desgaste abrasivo e em b) a região de peel-off (descascamento).	27
Figura 11 – Variação do coeficiente de atrito com o aumento da carga de um pino de Vitreloy 105 sobre um disco de aço Cr-12.	28
Figura 12 - Esquema de um ensaio pino-sobre disco.	29
Figura 13 – Fluxograma de execução do presente trabalho.	31
Figura 14 - Amostras como recebidas. Em a) Forno de arco voltaico; b e c) pino e chapa nos moldes de cobre, respectivamente; d e e) chapa e pino antes do ensaio.....	33
Figura 15 – Equipamento Cyber© utilizado para a análise superficial das amostras.	34
Figura 16 – Exemplo de escolha da região a ser analisada no Cyber© (região amarela). ...	35
Figura 17 – Análises das imagens para a chapa (esquerda) e pino (direita) do par de amostras 1.....	36
Figura 18 – Partes do sistema de realização do ensaio do tribômetro utilizado.	37
Figura 19 – Chapa e pino após o ensaio de desgaste.....	38
Figura 20 – Imagem superficial do Pino 4 após o ensaio de desgaste.	40
Figura 21 - Gráfico do coeficiente de atrito x distância percorrida para os pares de amostra 1 (1 (Par 4 foi excluído por apresentar defeitos de fabricação).	41
Figura 22 – Gráficos do coeficiente de atrito x distância percorrida para os pares de amostra 2 e 5.....	41
Figura 23 - Gráficos do coeficiente de atrito x distância percorrida para os pares de amostra 3 e 6.	42
Figura 24 – Difractogramas realizadas nas chapas 1, 5 e 6.	45

Figura 25 – Análise estrutural da pista (esquerda) e pino (direita) do par de amostras 1 após ensaio.....	46
Figura 26 – Análise estrutural da pista (esquerda) e pino (direita) do par de amostras 2 pós ensaio.....	46
Figura 27 – Análise estrutural da pista (esquerda) e pino (direita) do par de amostras 3 pós ensaio.....	47
Figura 28 – Análise estrutural da pista (esquerda) e pino (direita) do par de amostras 5 pós ensaio.....	47
Figura 29 – Análise estrutural da pista (esquerda) e pino (direita) do par de amostras 6 pós ensaio.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades das ligas amorfas a base de Zircônio.	18
Tabela 2 - Composição química das ligas amorfas a base de Zircônio.....	19
Tabela 3 – Nomenclaturas para as chapas e pinos utilizados neste trabalho.	32
Tabela 4 – Dimensões das regiões de medida de rugosidade no Cyber©.	35
Tabela 5 – Dados utilizados para a realização dos ensaios.....	37
Tabela 6 – Dados de Rugosidade Ra das amostras pré ensaio.....	39
Tabela 7 – Valores de Coeficiente de Atrito para as amostras 1 a 6.	42
Tabela 8 – Valores de Coeficiente de Atrito médio para os pares ensaiados.	42
Tabela 9 – Dados obtidos durante os ensaios e taxa de desgaste específica k para as chapas.....	44
Tabela 10 – Dados obtidos para os pinos e taxa de desgaste Q.	44

LISTAS DE SIGLAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BMG	<i>Bulk Metallic Glass</i>
CCM	Centro de Competência em Manufatura
DRX	Difração de raios X
DSC	Análise Térmica por calorimetria diferencial
HV	Dureza Vickers
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
TFA	Tendência de formação de estrutura amorfa
LCE	Laboratório de Caracterização Estrutural
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MET	Microscopia Eletrônica de Transmissão
UFscar	Universidade Federal de São Carlos
USP	Universidade de São Paulo
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTAS DE ABREVIATURAS

E	Módulo de elasticidade (GPa)
Kc	Tenacidade à fratura ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)
Tg	Temperatura de transição vítrea
Tm	Temperatura de formação de compostos intermetálicos
Trg	Temperatura vítrea reduzida: (T_g/T_{liquidus})
Tx	Temperatura de cristalização
Vit 1b	Vitreloy 1b
Vitreloy 105	Vitreloy 105
Vit 106a	Vitreloy 106a
Vit 601	Vitreloy 601
ΔT_x	Intervalo de estabilidade do estado líquido super resfriado: ($T_x - T_g$)
γ	Critério gama: $T_x / (T_g + T_l)$
σ_y	Limite de escoamento (MPa)
ρ	Densidade (g/cm^3)
μ	Coefficiente de atrito
$\bar{\mu}$	Coefficiente de atrito médio
k	Taxa de desgaste específica (mm^3/Nm)
Q	Taxa de desgaste (g/m)
d	Distância percorrida (m)
Kab	Coefficiente de Archard abrasivo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	OBJETIVOS.....	13
2.1.1	OBJETIVO GERAL.....	13
2.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
2.2	JUSTIFICATIVA.....	13
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
3.1	Revisão Geral sobre Metais Amorfos.....	14
3.2	Metaestabilidade de Metais Amorfos.....	16
3.3	Propriedades e Aplicabilidade das Ligas Amorfas.....	18
3.3.1	Aplicabilidade dos metais amorfos de grande volume (<i>Bulk Metallic Glasses</i> - BMGs).....	20
4	ATRITO E DESGASTE.....	21
4.1	Ensaio de Atrito.....	21
4.2	Desgaste.....	23
4.2.1	Desgaste abrasivo.....	24
4.2.2	Desgaste Adesivo.....	25
4.2.3	Fatores que afetam o comportamento tribológicos dos BMGs.....	26
4.3	Ensaio de desgaste.....	28
5	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO.....	31
5.1	Preparação das Amostras.....	32
5.2	Análises de Rugosidade dos pinos e chapas.....	33
5.3	Ensaio de Desgaste.....	36
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
6.1	Análise Superficial inicial das amostras.....	39
6.2	Ensaio de Desgaste.....	39
6.2.1	Cálculo da taxa de desgaste das chapas e pinos.....	43
6.2.2	Análise superficial após o ensaio de desgaste.....	45
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	50
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	51
	REFERÊNCIAS.....	52
	APÊNDICE A.....	55

1 INTRODUÇÃO

Desde a descoberta de uma liga metálica amorfa de AuSi em 1960 por Dwez e a produção dos primeiros *Bulk Metallic Glasses* (BMG), no início da década de 1990, é crescente e intensivo o trabalho de pesquisadores em decifrar os mecanismos que governam os comportamentos dos metais amorfos (também chamados de metais vítreos). Suas propriedades, tais como alta resistência mecânica em compressão, baixo módulo elástico, boa resistência ao desgaste, alta resistência a corrosão e alto limite elástico geram expectativas quanto suas aplicabilidades e possíveis substituições, em alguns casos, dos metais cristalinos (QIAO, J. C.; PELLETIER, J. M., 2014)

Um dos grandes problemas do setor de tecnologia atual está relacionado com o desgaste mecânico dos dispositivos. Segundo Holmberg, K. (2017), 23% do consumo global de energia se dá somente em contatos tribológicos, e que, a economia dos países, ao serem feitos investimentos em pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias nessa área, pode chegar até cerca de 2,5% do PIB do país (HOLMBERG, K.; ERDEMIR, A., 2017).

Visto a necessidade de se obter novos materiais para aplicações tribológicas, as ligas metálicas amorfas são vistas como uma classe de materiais promissora a ser utilizada em aplicações em que se requer um rigoroso controle de propriedades e geometrias de peças complexas (HOFMANN, D. C. et al., 2016).

Dentre as primeiras ligas vítreas utilizadas comercialmente, a liga denominada Vitreloy 105 (Vit 105), produzida pela empresa Liquidmetals®, ganhou notoriedade por exibir propriedades que superam a de muitas outras ligas amorfas e aços com estrutura convencional (não amorfa). Para esta liga, seu comportamento em ensaios tribológicos, utilizando diversos materiais em contato, vêm mostrando seu grande potencial como sistemas de transmissão (HOFMANN, D. C. et al., 2016).

No entanto, estudos que utilizem ambos os corpos teste da liga amorfa não são facilmente encontrados, e por este motivo, este trabalho propõe o estudo de desgaste do material por meio de um ensaio de pino-sobre-disco, utilizando ambos o

pino e o disco da liga Vitreloy 105, tendo como objetivo verificar a viabilidade do ensaio para a promoção de estudos mais aprofundados da liga.

2 OBJETIVOS

2.1.1 OBJETIVO GERAL

Este projeto tem como objetivo o estudo da viabilidade do teste de desgaste pino-sobre-disco da liga amorfa Vitreloy 105 utilizando um tribômetro adaptado para esse ensaio.

2.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Adaptar o equipamento para os corpos de prova cilíndricos;
- Determinar o coeficiente de atrito e desgaste;
- Verificar a coerência dos resultados com testes realizados por outros autores, afim de se verificar a viabilidade do método.

2.2 JUSTIFICATIVA

Metais amorfos, por não possuírem uma estrutura cristalina, possuem um conjunto de propriedades que é lhes é exclusivo. Diante disso, o interesse em explorar essa classe de materiais vem se tornado cada vez maior no meio científico. Um dos materiais de interesse são as ligas já comerciais, como a liga Vitreloy 105 utilizada neste trabalho.

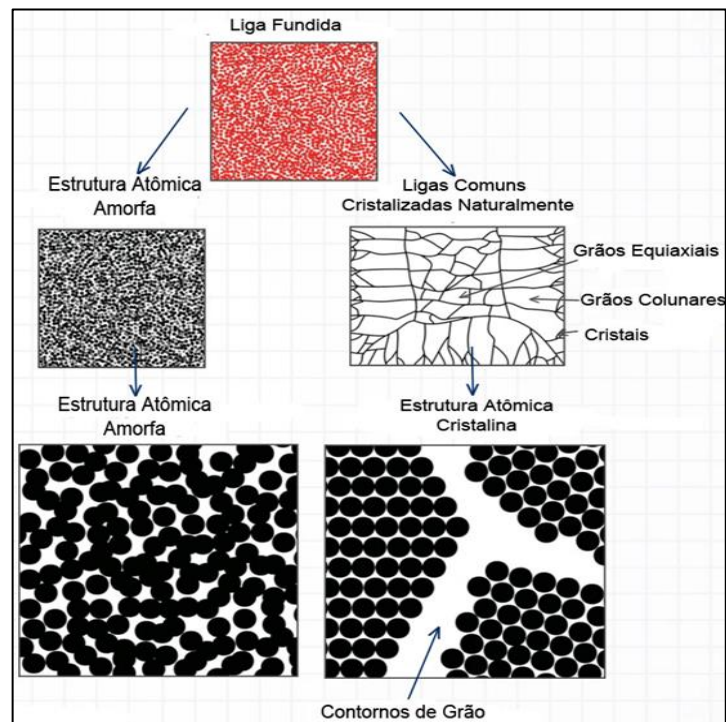
Este trabalho se justifica por contribuir com os estudos do comportamento de metais com estrutura amorfa quando são solicitados mecanicamente, especialmente sobre a questão de desgaste que é pouco explorado pelos pesquisadores, e literatura sobre a assunto são escassas. Tendo em vista que esses materiais, ao serem aplicados comercialmente, possivelmente vão estar em contato com outros materiais e sofrerão processos de desgaste, estudos como este são de grande importância tecnológica.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Revisão Geral sobre Metais Amorfos

Os termos “vidros metálicos” e “metais amorfos” referem-se à classe de materiais metálicos que apresentam uma estrutura cristalina com desordem de longo alcance (ou microestrutura periódica) na escala atômica. Essa estrutura é obtida durante a solidificação do material desde o estado líquido; assim, possuem uma estrutura desorganizada, ou seja, amorfa, no estado sólido do material, não possuindo, dessa forma, grãos cristalinos, contornos de grãos e defeitos cristalinos, como discordâncias (KIMINAMI, 2007; MARCO; AG, 2007; MENDES, 2013; QIAO; PELLETIER, 2014; ZHAO et al., 2016). A Figura 1 representa um esquema para a diferenciação das estruturas cristalinas e amorfa (SERIES, R. M., 2010).

Figura 1 - Esquema de diferenciação entre estruturas amorfa e cristalina oriundas de um processo de fundição.



Fonte: SERIES, R. M., 2010

Para que um material seja amorfo é necessário que sua estrutura esteja desordenada, assim como num líquido. No caso dos metais, a natureza das ligações químicas facilita a ordenação atômica, visto que são de natureza não-direcionais (MENDES, M. A. B., 2013), diferentemente de ligações covalente e iônicas, que possuem alto grau de direcionalidade. Logo, um metal a partir do estado líquido somente pode manter essa estrutura no estado sólido por meio de um resfriamento ultra-rápido do material para que os átomos não se ordenem.

Duvez reportou em 1960, pela primeira vez, a amorfização da liga $Au_{75}Si_{25}$, com taxas de resfriamento que chegavam a ordem de 10^5 a 10^6 K/s. Durante os subsequentes anos de pesquisa, a necessidade de se utilizar taxas elevadas se tornou um dos fatores limitantes no desenvolvimentos de peças volumosas, permitindo apenas a produção de pequenos cilindros, pós e fitas finas (MENDES, M. A. B., 2013; QIAO, J. C.; PELLETIER, J. M., 2014).

Os subsequentes anos de pesquisa levaram ao aperfeiçoamento das composições químicas das ligas amorfas e à descoberta dos BMGs, que tem como características: diversos elementos dentro de sua composição, propriedades elevadas que levam ao interesse tecnológico, peças volumosas (podendo atingir vários milímetros de espessura), alta conformabilidade mecânica, taxas menores de resfriamento (possuindo, assim, uma alta Tendência de Formação de estrutura Amorfa - TFA) (MENDES, M. A. B., 2013; MORRISON, M., 2005).

Em 1984, um grupo de pesquisadores da Universidade de Harvard reportou a fabricação do primeiro BMG a partir de uma liga $Pd_{40}Ni_{40}P_{20}$ com uma taxa de resfriamento de 10^3 K/s e esta poderia alcançar uma espessura de até 1 cm. Somente em 1990, o primeiro BMG com espessura acima de 1 cm foi produzido pelo grupo de pesquisa Johnson, na Caltech, Califórnia, a partir de uma liga $Zr_{41,2}Ti_{13,8}Cu_{12,5}Ni_{10,0}Be_{22,5}$ denominada Vitreloy 1, ou Vit 1, tida como material robusto e conformável (MARCO, E.; AG, F., 2007; QIAO, J. C.; PELLETIER, J. M., 2014). Outras ligas importantes que se destacam por suas propriedades e interesses tecnológicos são as ligas a base de Zr-, Pd-, Fe-, Cu-, Ni-, Ti-, Mg- (INOUE, A.; TAKEUCHI, A., 2011).

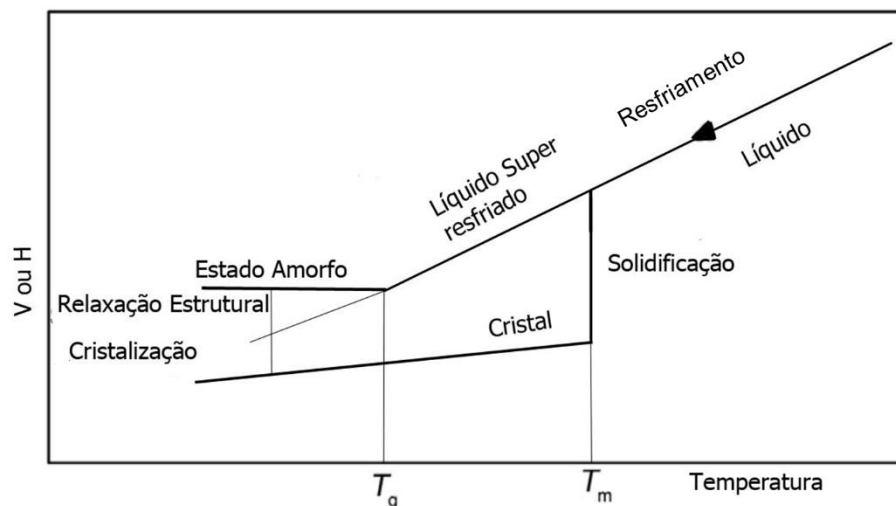
Os metais amorfos possuem propriedades que superam as propriedades de seus equivalentes cristalinos e também de muitas ligas comerciais, utilizadas nas

mais diversas áreas. Por exemplo, as ligas a base de Zr-Cu-Ni-Al possuem propriedades mecânicas elevadíssimas, como alta dureza, acima de 500 HV, tensão de escoamento de 1900 MPa (em média para tração e compressão); mas, em contrapartida, baixos módulos elásticos, sendo uma importante propriedade em implantes ortopédicos (ABBASI, M.; GHOLAMIPOUR, R.; SHAHRI, F., 2013; CHEN, M., 2011).

3.2 Metaestabilidade de Metais Amorfos

A amorfização de uma liga metálica ocorre durante seu resfriamento, em que, partindo do seu estado líquido inicial, a massa primeiramente necessita alcançar uma temperatura T_m (temperatura de formação de compostos intermetálicos), para que se iniciem os processos de decréscimo de volume livre ou entalpia do sistema, tendo então como contrapartida, o aumento da viscosidade da massa, de modo que os átomos não tenham tempo suficiente para criar retículos cristalinos (Figura 2) (MELLE, A. K., 2012; QIAO, J. C.; PELLETIER, J. M., 2014). Deste modo, tem-se que o sistema se encontra em um equilíbrio metaestável, num estado de líquido super-resfriado.

Figura 2 - Curva Hipotética de Resfriamento com a Variação de Volume ou Entalpia pela Temperatura.

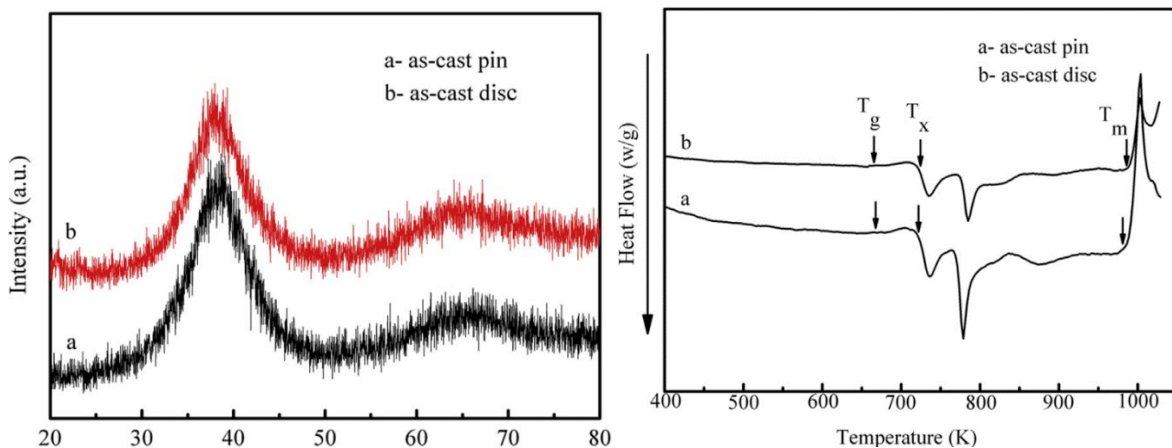


Fonte - Adaptado de QIAO, J. C.; PELLETIER, J. M., 2014

Com o decorrer do resfriamento, este líquido passa por uma faixa de temperatura de Transição Vítreia (T_g), sendo esta uma das principais características de um metal amorfo. Se houver a formação da estrutura amorfa, quando o material for reaquecido a partir da temperatura ambiente, ao passar temperatura de T_g , haverá uma redução na viscosidade do material, ou seja, aumentado o índice de plasticidade, podendo ser moldado por processos industriais antes que a cristalização ocorra.

Dessa forma, abaixo desta temperatura T_g , o material encontra-se no estado amorfo. Porém, ao ser aquecido, acima da T_g o material pode atingir outra temperatura crítica, a temperatura de cristalização T_x , onde ocorre a formação de retículos cristalinos a partir de um outro intervalo de temperatura (MENDES, M. A. B., 2013). Ambas as temperaturas são características de cada material e podem ser determinadas por meio de técnicas de calorimetria diferencial (DSC). Observa-se, no entanto, que o uso de DSC vem sempre acompanhado da caracterização por meio de Difração de Raios X (DRX) afim de comprovar a não existência de fases cristalinas, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Curvas de DRX (esquerda) e DSC (direita) de uma amostra de $Zr_{41}Ti_{14}Cu_{12,5}Ni_{10}Be_{22,5}$.



Fonte: Adaptado de ZHONG, H. et al., 2015

Um dos parâmetros mais importantes para se avaliar a empregabilidade de uma liga amorfa é denominado Tendência de Formação de Estrutura Amorfa (TFA), expressa em mm. Esse parâmetro é determinado por meios de métodos analíticos e prevê a máxima espessura que poderá ser obtida para a liga estudada. As primeiras

abordagens levaram à obtenção de determinados parâmetros, como, por exemplo, os parâmetros: Temperatura de Transição Vítre Reduzida (T_{rg} , que equivale a $T_g/T_{liquidus}$); o Intervalo de Líquido Super-Resfriado ($\Delta T_x = T_x - T_g$); e o parâmetro Gamma ($\gamma = T_x / (T_g + T_l)$). Entre muitos outros aspectos, esses parâmetros abordam soluções termodinâmicas e cinéticas afim de prever e/ou qualificar a TFA de um metal amorfo (MELLE, A. K., 2012; MENDES, M. A. B., 2013). INOUE, A.,(2000) propôs que para a formação de um BMG, três regras empíricas devem ser seguidas:

- A liga deve conter pelo menos três elementos;
- A diferença de tamanho entre os átomos deve ser a maior possível, sendo pelo menos 12% entre os elementos principais;
- A entalpia entre os elementos principais deve ser negativa.

3.3 Propriedades e Aplicabilidade das Ligas Amorfas

As propriedades mecânicas das ligas amorfas têm atraído a atenção dos pesquisadores por conta da aplicabilidade destes materiais como materiais estruturais, aplicações biomédicas, substituindo os materiais metálicos por conta de sua alta resistência à compressão, alto limite de escoamento, resistência a corrosão, oxidação e desgaste, altos valores de dureza, alta ductilidade em flexão, baixo coeficiente de atrito (MORRISON, M., 2005).

Exemplos disso são ligas que recebem os nomes de Vit 1b, Vitreloy 105, Vit 601 e Vit 106a, cujas propriedades e composições podem ser vistas nas Tabelas 1 e 2 respectivamente.

Tabela 1 - Propriedades das ligas amorfas a base de Zircônio.

Propriedade/Liga	Vit 1b	Vit 601	Vitreloy 105	Vit 106a
σ_y (Mpa)	1800	1795	1850	1800
E (GPa)	95	91	-	95
Kc (MPa \sqrt{m})	55	70	75	30
ρ (g/cm ³)	6,0	6,9	6,6	6,7
Tg (°C)	352	420	403	395
Tx (°C)	466	495	469	499
Tm (°C)	644	753	805	837

Fonte - Adaptado de Materion Data Sheet

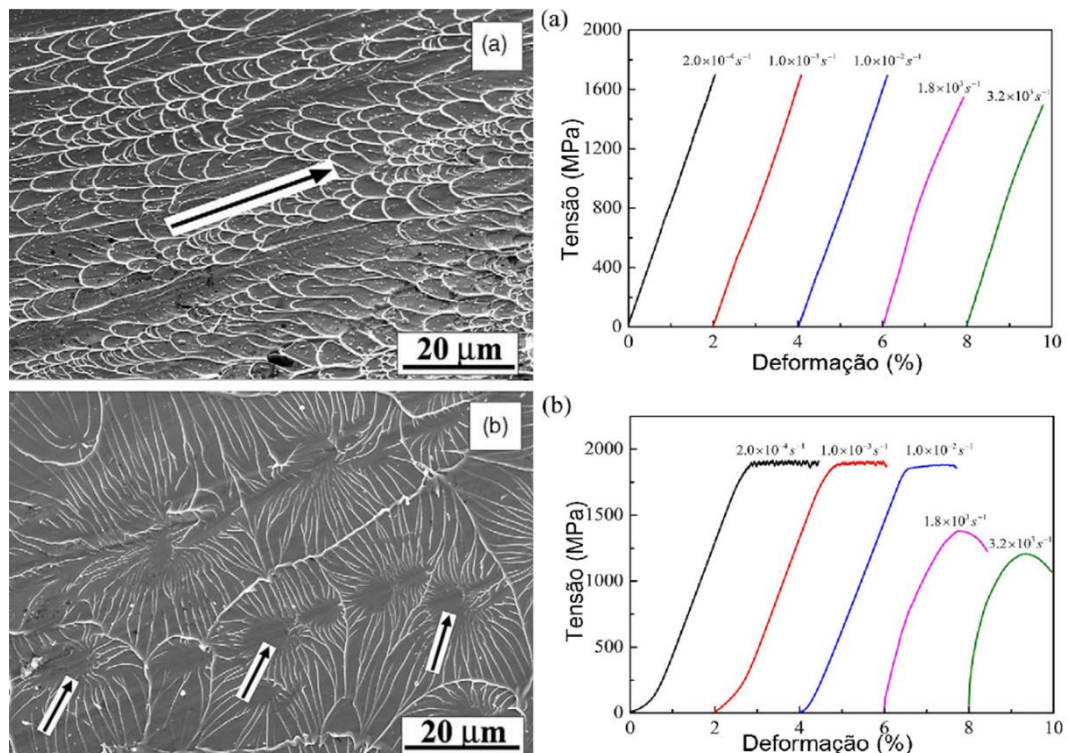
Tabela 2 - Composição química das ligas amorfas a base de Zircônio.

Liga	Composição (wt%)
Vit 1b	Zr ₆₇ Cu _{10,6} Ni _{9,8} Ti _{8,8} Be _{3,8}
Vitreloy 105	Zr _{65,7} Cu _{15,6} Ni _{11,7} Al _{3,7} Ti _{3,3}
Vit 601	Zr _{62,5} Cu ₃₁ Ni _{3,2} Al _{3,3}
Vit 106a	Zr ₇₀ Cu ₁₃ Ni _{9,9} Al _{10,3} Nb _{2,8}

Fonte: Adaptado de Materion Data Sheet.

O comportamento dos BMGs sob tração e compressão também difere dos metais cristalinos. A deformação dos metais amorfos em compressão ocorre pela proliferação de bandas de cisalhamento, que garantem certa ductilidade ao metal. Por outro lado, os metais amorfos, quando sob tração, não apresentam deformação plástica e sua fratura é catastrófica. Na Figura 4 tem-se um exemplo de formação de bandas de cisalhamento (esquerda) e testes trativos e compressivos (direita) (LI, M. C. et al., 2017; ZHANG, B. et al., 2002).

Figura 4 - Macrofractografias de uma amostra de Zr₅₉Cu₂₀Al₁₀Ni₈Ti₃ em Tração (a) e Compressão (b), à esquerda.e Curvas de Tração (a) e compressão (b) para uma amostra de Vitreloy 105 à direita.



Fonte - Adaptado de LI, M. C. et al., 2017; ZHANG, B. et al., 2002

3.3.1 Aplicabilidade dos metais amorfos de grande volume (*Bulk Metallic Glasses - BMGs*)

A possibilidade de aplicações das ligas amorfas é teoricamente vasta, porém, a dificuldade em entender o comportamento das ligas, formar teorias que descrevam seus comportamentos diante dos mais diversos cenários de trabalho e a dificuldade na fabricação de peças complexas fazem com que ainda sejam ainda utilizados em poucas áreas.

Os BMGs podem ser utilizados nos setores esportivos, como recobrimento para tacos de golfe, como as primeiras aplicações de Vitreloy 105 e até mesmo nos setores militares, em projéteis e blindagem mais leves e fortes (QIAO, J. C.; PELLETIER, J. M., 2014).

Utilizando suas propriedades de magnetos moles/duros, as primeiras ligas amorfas a base de Ferro, FINEMET® foram produzidas pela empresa Hitachi Metals Ltda. como redutor de ruídos (MARCO, E.; AG, F., 2007). Ligas amorfas de Mg, Zr, Fe, Ca, Sr e Ti tem sido explorada como substituintes dos implantes tradicionais feitos de aço 316L e Ti6Al4V e Nitinol, para *stents* vasculares na área de biomateriais (LI, H. F.; ZHENG, Y. F., 2016).

Devido às suas propriedades mecânicas e possibilidade de serem moldadas como plástico, utilizando processo de injeção por exemplo, ligas amorfas são também empregadas em sistemas de transmissão, mais especificamente como engrenagens (HOFMANN, D. C. et al., 2016). Esse é o caso da liga amorfa $Ni_{53}Nb_{20}Ti_{10}Zr_8Co_6Cu_3$, utilizada na fabricação de um micromotor destinado à equipamentos médicos, cuja vida útil se mostrou cerca de 1000 vezes maior que o aço inoxidável convencional utilizado (INOUE, A. et al., 2017).

A liga Vitreloy 105, por sua vez, vem encontrado mais espaço no mercado por meio da evolução das técnicas de fabricação e moldagem de dispositivos utilizando este material. A empresa Liquidmetals®, detentora dos direitos sobre a liga Vitreloy 105, possui em seu catálogo uma lista de dispositivos manufaturados com a liga em áreas como a biomédica (implantes, brocas), musical, industrial (engrenagens) e esportivo. A possibilidade de se conseguir implementar o mesmo material em diversos segmentos torna a liga Vitreloy 105 um material importante a ser estudado.

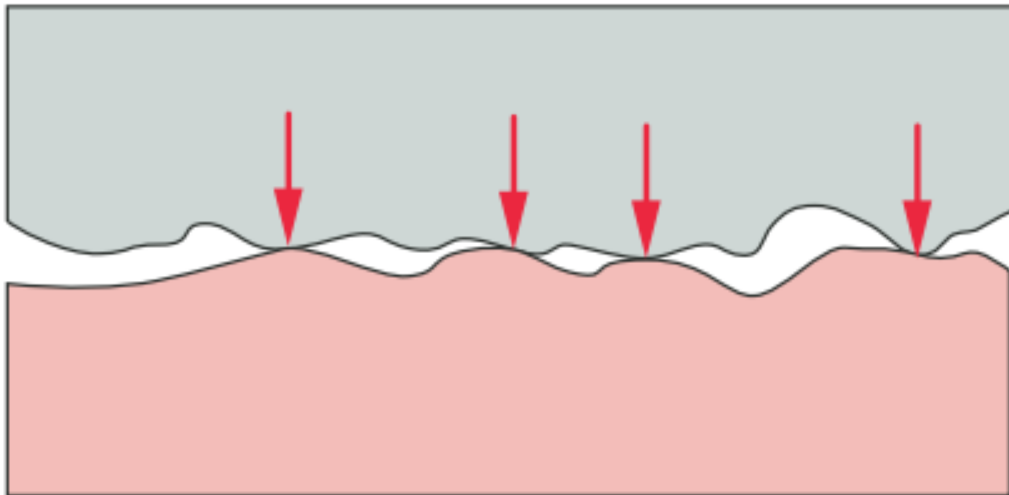
4 ATRITO E DESGASTE

4.1 Ensaio de Atrito

O estudo das interações entre as superfícies de dois sólidos é determinante nas mais diversas aplicações de engenharia, como por exemplo, o contato entre sistemas de transmissão, máquinas de corte, fresas, tornos, válvulas e até mesmo, partículas abrasivas de areia, que permeiam os fluidos de alta pressão, como o petróleo, em tubos de transporte (MELLE, A. K., 2012).

Durante o contato entre duas superfícies planas, as tensões originadas estarão concentradas em pequenas regiões, denominadas em seu conjunto total de rugosidade, a qual é responsável por suportar as forças normais impostas sobre cada superfície (Figura 5) (NORTON, R. L., 2013).

Figura 5- Esquema representativo de uma superfície com rugosidade.



Fonte - NORTON, R. L., 2013

Sendo as áreas de contato muito pequenas, conforme há o movimento (deslizamento) e contato entre as superfícies, tais tensões nessas regiões podem facilmente alcançar valores maiores que o limite de escoamento de compressão do material, ocorrendo o escoamento e a deformação de tais regiões, até o equilíbrio do sistema. Assim, para que o deslizamento das superfícies seja contínuo, é necessário

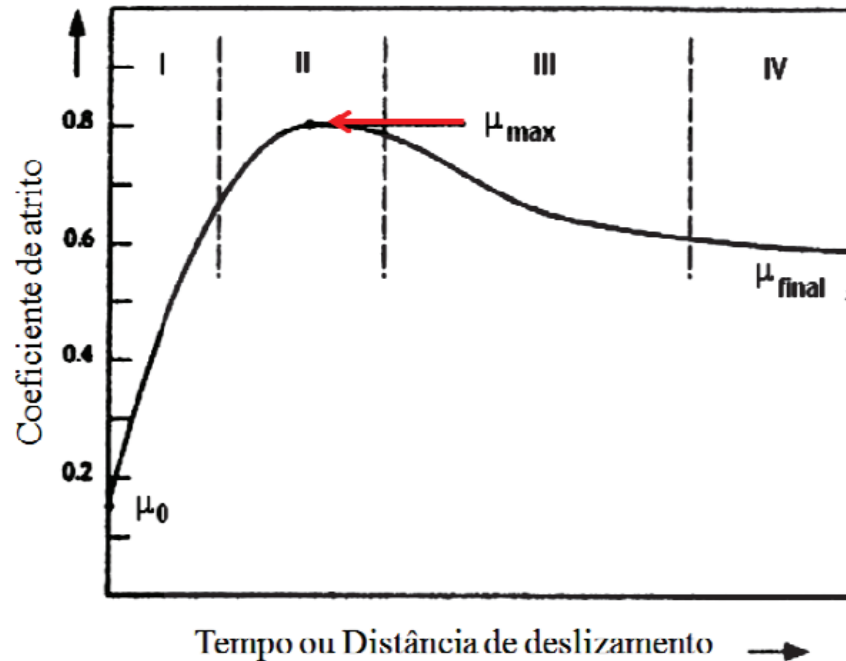
que as forças que impulsionam as superfícies sejam maiores que a resistência criada pela rugosidade, ou seja, pela força de atrito.

O atrito é um importante fator que deve ser levado em consideração em um projeto de engenharia, uma vez que, não sendo uma propriedade intrínseca do material e sim uma resposta do sistema como um todo, valores excessivos podem levar ao aumento dos níveis de desgaste no material e sua subsequente falha (NORTON, R. L., 2013). A fim de se avaliar o efeito do atrito em um sistema, os ensaios tribológicos analisam sua variação com o tempo, distância ou carga aplicada, permitindo a obtenção de curvas que podem apresentar, de maneira geral, regimes característicos do coeficiente de atrito (μ).

Durante o deslizamento, dois regimes de podem ser observados, denominados de período de *running-in* e regime permanente de atrito (DUARTE, M. C. S., 2015; ROVANI, A. C., 2014). O regime de *running-in* é o período que estabelece as primeiras interações e acomodações entre as rugosidades das superfícies, caracterizado por um aumento do coeficiente de atrito (μ_{max}), o qual decresce até um valor constante, em consequência, por exemplo, da deformação das áreas rugosas. À essa região de valor constante se dá o nome de região de regime permanente.

Na Figura 6 é mostrado, para as regiões I e II, o período de *running-in* e, em seguida, as regiões de transição entre regimes (III) e região de regime constante (IV) (ROVANI, A. C., 2014).

Figura 6 - Curva teórica do comportamento do coeficiente de atrito e seus respectivos regimes.



Fonte - ROVANI, A. C., 2014

4.2 Desgaste

As interações constantes entre as superfícies durante o deslizamento geram, por consequência, deformações localizadas, as quais podem se tornar irreversíveis, e também a perda de material, levando à falha mecânica local dessas zonas de contato. Esses contatos podem gerar desgaste nas superfícies, o qual pode ser definido como a perda progressiva de massa ou volume do material devido ao movimento relativo das superfícies em contato (ROVANI, A. C., 2014).

O desgaste por sua vez é fenômeno que possui diversos mecanismos distintos, que dependem para que possam ser ativados de variáveis como: tempo e distância percorrida pelas superfícies, carga imposta, natureza e compatibilidade química dos materiais, velocidade de deslizamento e temperatura no contato das superfícies. Os mecanismos de desgaste podem ser divididos em desgaste abrasivo, adesivo, de deformação, erosivo e por corrosão (BHUSHAN, 2013).

Dentre os mecanismos citados, este trabalho se limitará a abordar o desgaste abrasivo e adesivo, uma vez que os demais mecanismos apenas são identificados por meio de análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e

métodos mais avançados. Logo, visando alcançar os objetivos propostos, as análises de superfície realizadas com o microscópio óptico permite assumir a atuação destes mecanismos.

4.2.1 Desgaste abrasivo

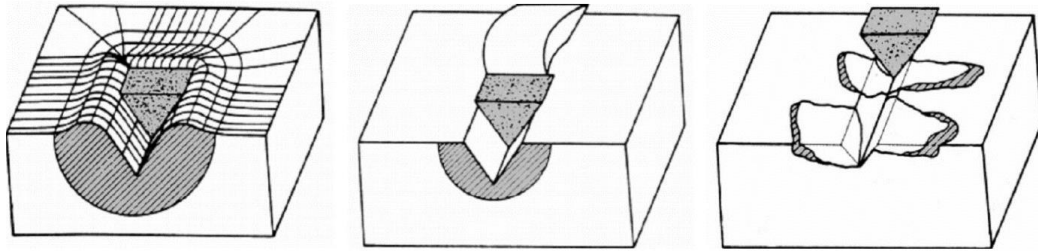
O desgaste abrasivo ocorre quando há a remoção de material pelo deslocamento de partículas duras presentes entre duas superfícies em movimento relativo, podendo ser também ocasionado por protuberâncias duras que são forçadas e deslizam sobre as superfícies, formando uma cavidade na superfície menos resistente (HUTCHINGS, I. M., 1992).

Os mecanismos de abrasão podem tanto envolver deformação plástica, quanto fratura frágil das superfícies, e são divididas basicamente em três modos conhecidos como: micro sulcamento e micro corte, para deformação plástica, e micro trincamento, para fratura frágil (BELCHIOR, H.; CUNHA, D. A, 2012). Os mecanismos podem ser observados na Figura 7.

Para o micro sulcamento, durante a passagem do material abrasivo, ocorre o espalhamento de material para as laterais da cavidade formada. O micro corte é por sua vez caracterizado pela remoção do material mais mole durante o contato, o qual formará fragmentos espalhados próximos à região desgastada. Já o micro trincamento é dependente da dureza da superfície e resistência do material desgastado, de modo que há o acúmulo de trincas sob a superfície, resultando na remoção volumosa de material (BELCHIOR, H.; CUNHA, D. A, 2012; HUTCHINGS, I. M., 1992).

O desgaste abrasivo também pode ser classificado conforme o modo em que ocorre este desgaste, sendo tratados como abrasão de dois corpos e três corpos. A abrasão de dois corpos resume-se no contato entre protuberâncias ou partículas rigidamente fixas nas superfícies. O outro modo, de três corpos, implica a presença de elementos interfaciais (detritos) livres entre as superfícies, grandes o suficiente para serem considerados um terceiro corpo, causando desgaste nas duas superfícies inicialmente em contato (BELCHIOR, H.; CUNHA, D. A, 2012).

Figura 7 - Mecanismos de desgaste: a) micro sulcamento; b) micro corte; c) micro trincamento.



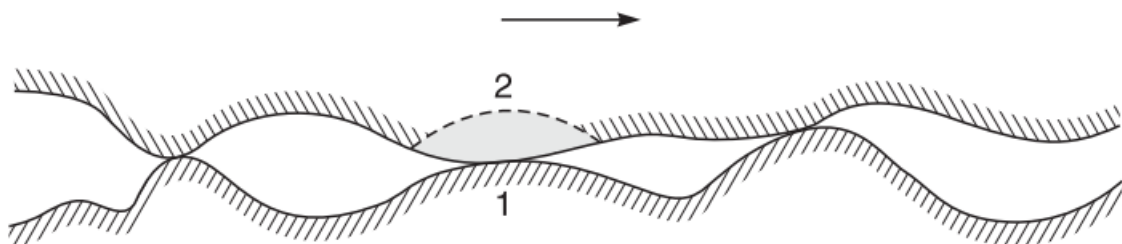
Fonte - BELCHIOR, H.; CUNHA, D. A, 2012

Para metais amorfos, a formação de detritos pode alterar significativamente o resultado de um teste de desgaste, aumentando-se as chances de erros nos cálculos, podendo-se inferir erroneamente a aplicabilidade de uma liga. Neste sentido, WANG, Y. et al., (2016) mostraram que abaixo de 1 m/s, um pino da liga $(Zr,Cu)_{95}Al_5$ contra um substrato de aço GCr₁₅ apresentou diminuição da taxa de desgaste pela formação de uma camada auto lubrificante de óxido, porém, acima desta velocidade, houve o aumento da taxa.

4.2.2 Desgaste Adesivo

Durante o deslizamento de duas superfícies, as altas tensões originadas nas pequenas regiões irregulares das rugosidades podem levar a deformações plásticas localizadas, formando junções que se rompem, após um certo tempo de movimento, por adesão. Aqui, há a liberação de partículas de uma superfície que são transferidas para outra superfície, podendo esta partícula se destacar novamente e ativar outros mecanismos de desgaste, como o abrasivo (Figura 8) (BHUSHAN, B., 2013; ROVANI, A. C., 2014).

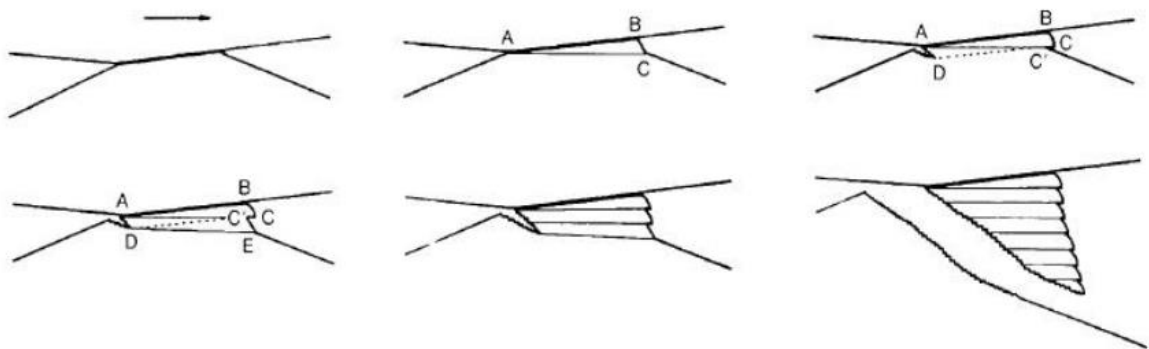
Figura 8 – Mecanismo de Desgaste Adesivo (A seta indica o sentido do movimento).



Fonte - BHUSHAN, B., 2013

Outros modelos foram concebidos para explicar a adesão de partículas durante o deslizamento, como, por exemplo, o demonstrado na Figura 9 abaixo. Neste caso, o cisalhamento plástico de diversas camadas de um contato rugoso resulta na liberação de um fragmento, conjuntamente com a formação de trincas ao longo do contorno do fragmento (HUTCHINGS, I.; SHIPWAYPHILIP, 2017)

Figura 9 – Formação de um fragmento devido ao cisalhamento de camadas durante o deslizamento das superfícies.



Fonte - BHUSHAN, B., 2013

4.2.3 Fatores que afetam o comportamento tribológicos dos BMGs

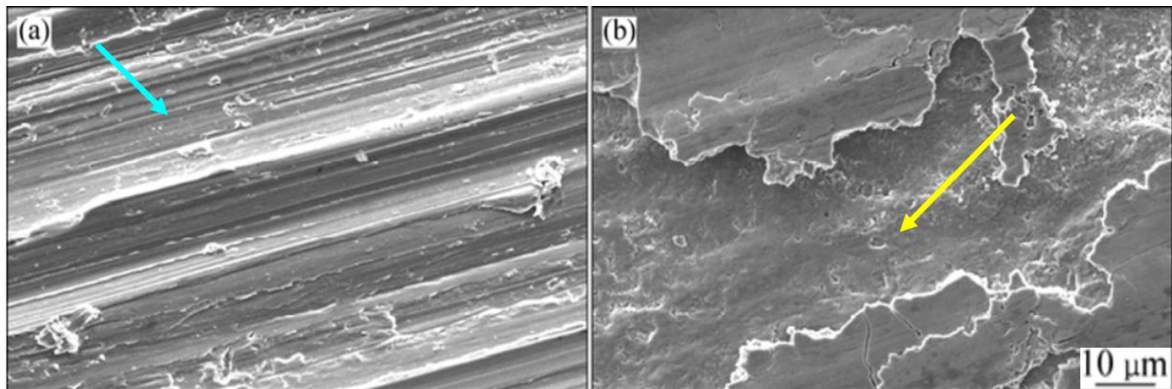
As propriedades tribológicas das ligas amorfas, como boa resistência ao desgaste em condições sem ou com lubrificação e em diferentes temperaturas, fazem com que estes materiais sejam, como mencionado, candidatos a aplicações de alta performance. Entretanto, as propriedades tribológicas destes materiais não são facilmente compreendidas, de modo que seus comportamentos variam para cada família de liga, isto é, não podem ser generalizados (RAHAMAN, M. L.; ZHANG, L. C.; RUAN, H. H., 2014).

A fim de avaliar o desgaste de uma liga amorfa, deve-se atentar para a temperatura ambiente, a temperatura no contato durante o teste, a carga sobre o material, a velocidade de deslizamento entre as superfícies dos materiais, a formação de regiões nanocristalinas e, até mesmo, a mudança microestrutural localizada (WU, H. et al., 2012).

Os mecanismos de desgaste nestas ligas são pouco compreendidos, visto que se pode haver a participação conjunta de um ou mais mecanismos. Por apresentarem uma natureza inerentemente frágil, o principal mecanismo de

desgaste nos metais amorfos é o abrasivo, caracterizado pela formação de riscos (sulcos paralelos) na região desgastada. No entanto, mecanismos de adesão são observados durante o desgaste, pela presença de deformação plástica e com a ocorrência do *peel-off* (descascamento), isto é, remoção de material de algumas regiões da superfície (JIANG, F. et al., 2009; WU, H. et al., 2012). Os dois mecanismos podem ser verificados na Figura 10.

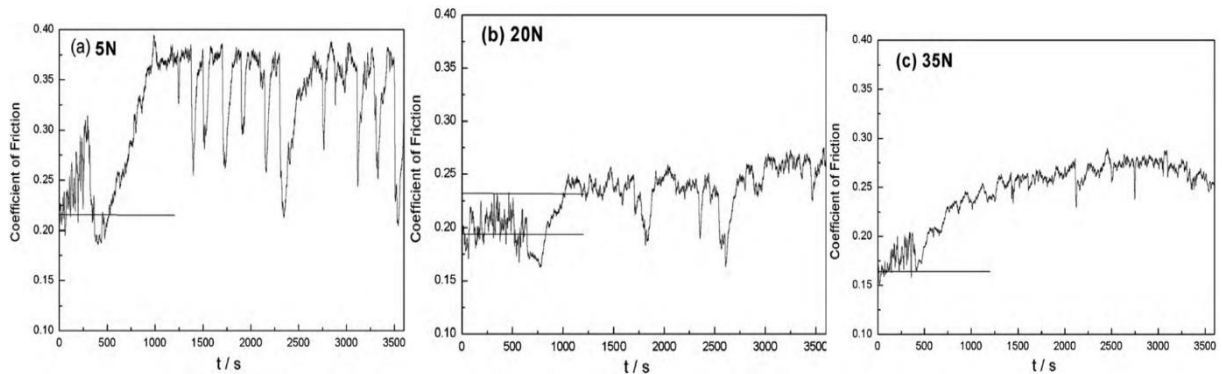
Figura 10 – Superfície de desgaste da liga Vitreloy 105. Em a) visualização de sulcos de desgaste abrasivo e em b) a região de *peel-off* (descascamento).



Fonte – Adaptado de WU, H. et al., 2012.

Durante o ensaio de desgaste, dependendo do material em que a liga amorfa estiver em contato, as curvas características do coeficiente de atrito podem apresentar comportamentos inesperados, como uma curva instável, em que há o aumento repentino do valor do coeficiente. Ainda, o aumento da carga durante o desgaste facilita a deformação plástica da superfície da liga amorfa, levando ao amolecimento da região e, como consequência, à redução do coeficiente de atrito (LIU, Y. et al., 2010), conforme mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Variação do coeficiente de atrito com o aumento da carga de um pino de Vitreloy 105 sobre um disco de aço Cr-12.



Fonte – Adaptado de (LIU, Y. et al., 2010).

4.3 Ensaio de desgaste

O funcionamento do ensaio pino-sobre-disco está representado de forma esquemática na Figura 12. No ensaio, um pino em rotação a uma taxa constante (em RPM) cilíndrico ou esférico é forçado contra um substrato de material igual ou dissemelhante ao pino. A taxa de desgaste é então medida através da variação de perda de massa do substrato/pino, pela profundidade do caminho originado pelo contato ou pela variação da perda volumétrica dos corpos. A equação 1 representa o cálculo da taxa de desgaste à perda de massa do material, em função da massa inicial do corpo, distância ou tempo de ensaio (HUTCHINGS, I. M., 1992).

$$Q = \frac{\Delta m}{d, m \text{ ou } t} \quad (1)$$

onde Q é taxa de desgaste, em (g/m, g/hr ou g/g);

Δm é variação de massa dos materiais (mg, g, kg);

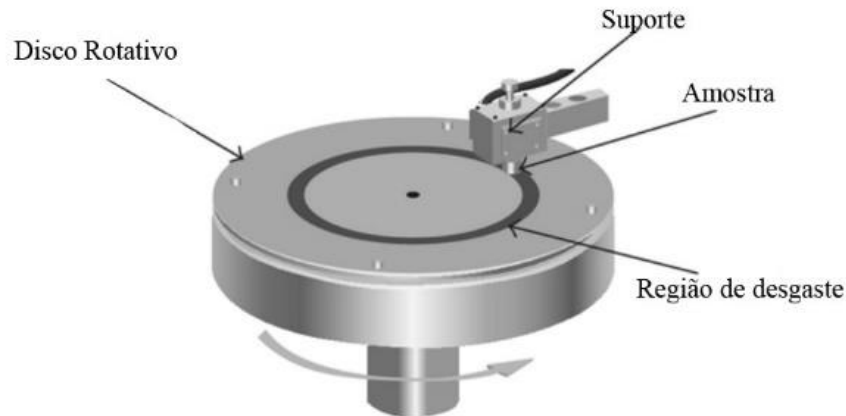
d é a distância de deslizamento percorrida pelos pinos sobre os discos (m);

m é a massa inicial do corpo (g) e

t é o tempo de ensaio (h).

Neste trabalho, a taxa de desgaste Q será calculada em função da perda de massa em relação a massa inicial dos corpos.

Figura 12 - Esquema de um ensaio pino-sobre disco.



Fonte: Adaptado de BO YUAN PENG; XUEYUAN NIE; YING CHEN, 2014.

Sabe-se, no entanto, que apenas o valor da taxa de desgaste não expressa genuinamente a verdadeira resistência ao fenômeno de um material, ao passo de que outro fator, denominado de taxa específica de desgaste, k , pode ser utilizado. Este fator relaciona o volume removido pelo desgaste com a carga aplicada e distância percorrida pelos pinos sobre os discos, podendo então atestar a severidade do desgaste observado, conforme a equação 2 (HUTCHINGS, I.; SHIPWAYPHILIP, 2017).

$$k = \frac{\Delta V}{P \cdot d} \quad (2)$$

onde, ΔV é a variação volumétrica (mm^3);

P é carga aplicada (N);

D é a distância percorrida (m)

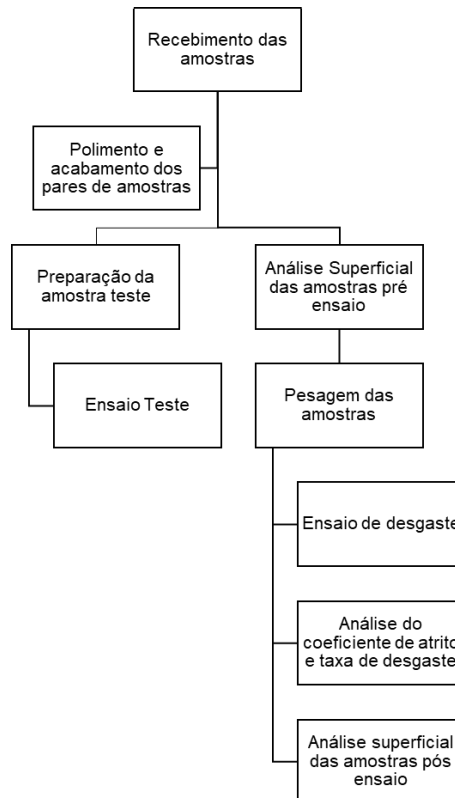
Para metais, os valores de k podem variar de 10^{-3} a 10^{-8} , correspondendo os maiores valores a desgaste mais severo, caracterizado por fenômenos de adesão.

Esses dados são úteis na investigação de possíveis mudanças estruturais (regiões cristalinas) ou alteração do mecanismo de desgaste (CHENG, J. B. et al., 2013).

5 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Os procedimentos utilizados na elaboração do presente trabalho podem ser verificados conforme o fluxograma adotado na Figura 13.

Figura 13 – Fluxograma de execução do presente trabalho.



Fonte – Autoria Própria.

As análises superficiais das amostras pré e pós o ensaio foram realizadas em um Perfilômetro equipado com um microscópio confocal de aberração cromática, da empresa Cyber© SCAN, modelo CT-100, disponibilizado pelos responsáveis do Laboratório Aberto do CCM. Para o desgaste, as superfícies dos pinos e chapas foram polidas a fim de estarem em conformidade com a norma adotada (*ASTM G99 – Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*), a qual engloba também pinos com extremidades esféricas.

5.1 Preparação das Amostras

As amostras de Vitreloy 105 utilizadas no presente trabalho foram fornecidas pelo grupo do Prof^o Dr. Marcelo de Oliveira Falcão, chefe do Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Paulo, da Universidade de São Paulo São Paulo (USP), os quais foram inicialmente separadas e identificadas em pares pino-chapa, em um total de seis pares de amostras. A Tabela 3 exemplifica as nomenclaturas acima descritas, utilizadas neste trabalho.

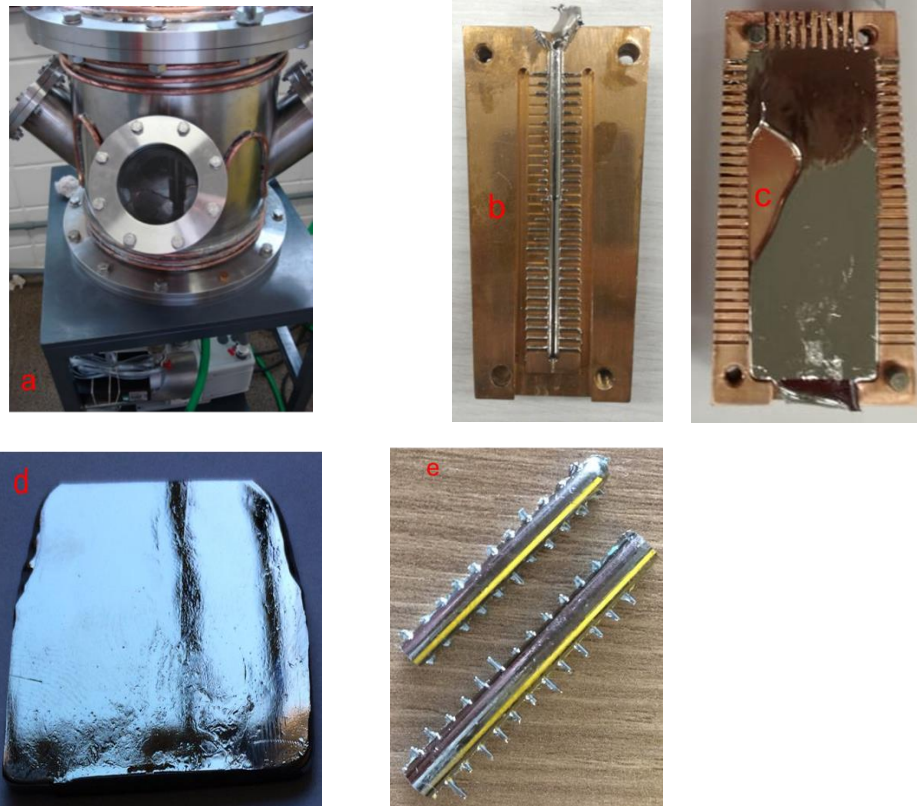
Tabela 3 – Nomenclaturas para as chapas e pinos utilizados neste trabalho.

Amostras	Pares
Chapa/Pino 1	Par 1
Chapa/Pino 2	Par 2
Chapa/Pino 3	Par 3
Chapa/Pino 4	Par 4
Chapa/Pino 5	Par 5
Chapa/Pino 6	Par 6

Fonte – Autoria Própria.

As amostras foram fundidas em um forno a arco voltaico, refundidas (para homogeneização e aumento de pureza) e coquilhadas em moldes de cobre, conforme Figura 14. Foram obtidos pinos de 3 mm de diâmetros e chapas com dimensões de (3x3) cm. As ranhuras no molde que geram as aletas mostradas na Figura 14 servem para succionar o material fundido durante o coquilhamento (por meio de depressão feita abaixo do molde).

Figura 14 - Amostras como recebidas. Em a) Forno de arco voltaico; b e c) pino e chapa nos moldes de cobre, respectivamente; d e e) chapa e pino antes do ensaio.



Fonte – Autoria Própria.

Após a retirada dos pinos e chapas dos moldes, estes apresentavam, respectivamente, aletas (rebarbas) (Figura 14-e) e uma superfície rugosa (Figura 14-d). A fim de adequar as amostras às recomendações de rugosidade superficial média (R_a) da norma ASTM G99 e adequar os diâmetros dos pinos para sua fixação no suporte fabricado, foram necessárias etapas de lixamento e polimento com lixas d'água de granulometria 320, 600 e 1200.

5.2 Análises de Rugosidade dos pinos e chapas

Para a medição da rugosidade superficial das amostras antes do ensaio de desgaste foi utilizado um perfilômetro Cyber© SCAN CT 100 (Figura 15), o qual faz uma varredura em área reduzida da superfície, obtendo, dentre os mais diversos

parâmetros tribológicos, os valores de Ra. Segundo a norma ASTM G99, valores de Ra < 0,80 μm são recomendados para se realizar o ensaio.

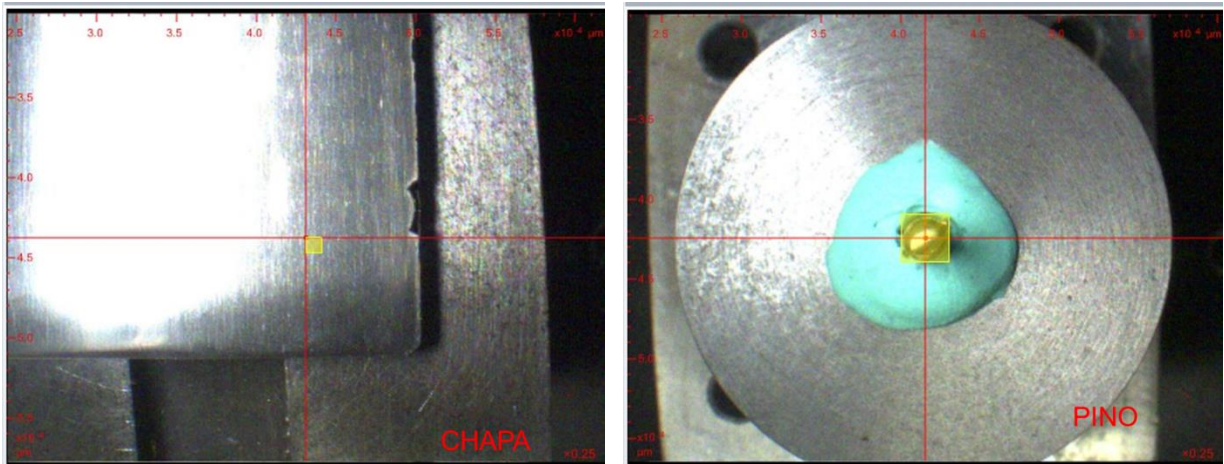
Figura 15 – Equipamento Cyber© utilizado para a análise superficial das amostras.



Fonte – Autoria Própria.

As medidas de rugosidade dos materiais foram obtidas no equipamento a partir da escolha de uma ou mais regiões para esta análise, conforme é mostrado na Figura 16. O tamanho das regiões foi determinado no próprio programa de análise do Cyber©. Para as chapas, foram estrategicamente selecionadas três regiões a fim de se obter uma representatividade de toda a sua superfície. Para os pinos, foram realizadas duas medidas, referentes ao centro da superfície abaulada e ao seu todo.

Figura 16 – Exemplo de escolha da região a ser analisada no Cyber© (região amarela).



Fonte – Autoria Própria.

As dimensões das regiões escolhidas estão dispostas na Tabela 4.

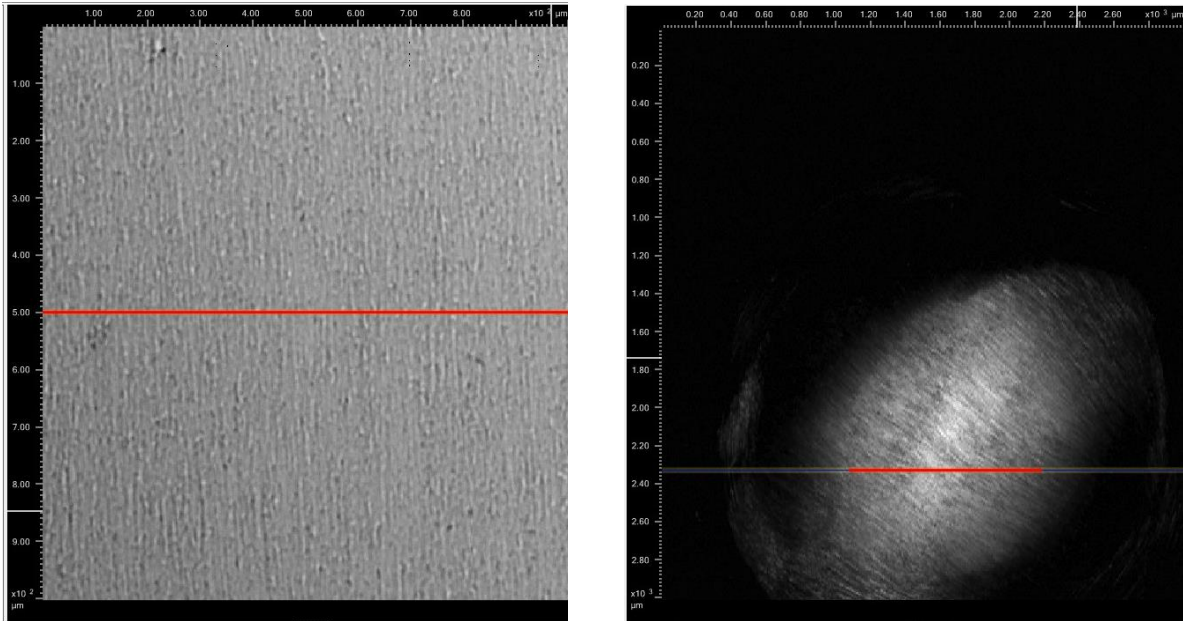
Tabela 4 – Dimensões das regiões de medida de rugosidade no Cyber©.

Chapa	Região (μm)	Pino	Região (μm)
Ponto 1	1000x1000	Superfície	3000x3000
Ponto 2	1000x1000		
Ponto 3	1000x1000	Centro	1000x1000

Fonte – Autoria Própria.

A Figura 17 representa as medidas tomadas para a chapa 1 (esquerda) e pino 1 (direita). A linha vermelha é oriunda do próprio programa e define a microrregião de análise de rugosidade. Todas as imagens analisadas podem ser visualizadas no Apêndice A.

Figura 17 – Análises das imagens para a chapa (esquerda) e pino (direita) do par de amostras 1.



Chapa 1 Ponto 1 – Ra = 0,41 μm

Fonte – Autoria Própria.

Superfície Pino 1 – Ra = 0,69 μm

5.3 Ensaios de Desgaste

A preparação dos ensaios de desgaste se deu com a adaptação do tribômetro a partir da implementação de um suporte fabricado a fim de dar suporte ao pino cilíndrico, visto que o tribômetro opera, de modo padrão, com esferas. Também foi adicionado ao conjunto uma base de Politetrafluoretileno (PTFE) para o acoplamento das chapas, conforme mostrado na Figura 18.

Figura 18 – Partes do sistema de realização do ensaio do tribômetro utilizado.



Fonte – Autoria Própria.

Posto que o dispositivo estava montado, foi realizado um ensaio teste com duração de 1 hora com um par de amostras teste, composto de um pino fabricado a partir de uma broca de aço rápido da marca DEXTER, de 4 mm de diâmetro, e uma chapa de aço SAE 1020. O objetivo era assegurar o perfeito funcionamento tanto do dispositivo quanto do suporte e base adicionados.

Os dados dos ensaios de desgaste com as amostras de Vitreloy 105 estão mostrados conforme a Tabela 5.

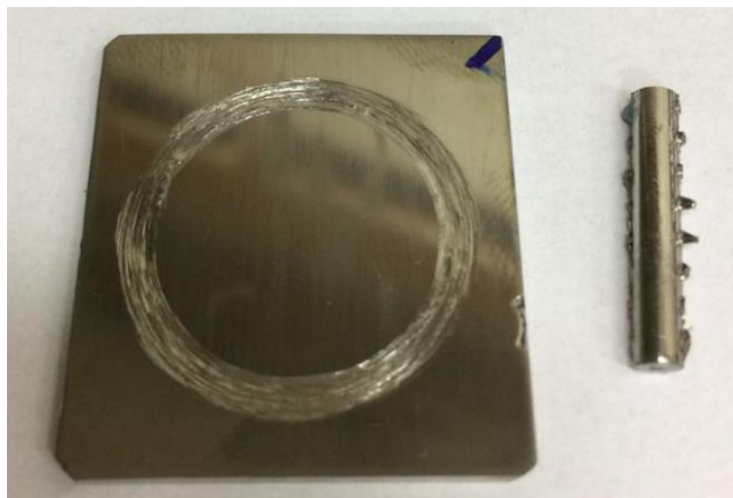
Tabela 5 – Dados utilizados para a realização dos ensaios.

Amostras	Carga (N)	Velocidade (RPM)
1 e 4	38,25	233
2 e 5	20,45	233
3 e 6	10,21	233

Fonte – Autoria Própria.

Após o fim de cada ensaio das ligas Vit 105, foram feitas medidas com um paquímetro da largura da pista de desgaste formada e pesagem das amostras com uma balança analítica Mettler Toledo, modelo AB265/FACT, que possui uma precisão de 0,00001 g, cedida pelo Departamento de Química do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA), no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), com o objetivo de obter os valores de taxa de desgaste e da taxa específica de desgaste. A Figura 19 mostra um par de amostras após o ensaio.

Figura 19 – Chapa e pino após o ensaio de desgaste.



Fonte – Autoria Própria.

Posteriormente os ensaios de desgaste, as superfícies das amostras foram reanalisadas no equipamento Cyber©, a fim de se fazer uma análise da superfície de desgaste e obter o volume perdido de material. No entanto, apenas para as chapas se conseguiu obter o volume perdido, visto que as superfícies dos pinos estavam danificadas.

Devido ao aquecimento que ocorre nos ensaios de desgaste, uma preocupação era a cristalização das amostras, mesmo constando na literatura que a temperatura de cristalização da Vit 105 é maior que 400°C (LIU, Y. et al., 2010; MATERION, [s.d.]). Dessa forma, após os ensaios, as chapas 1, 5 e 6 foram analisadas por DRX no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE), do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Análise Superficial inicial das amostras

A análise de cada superfície de cada par de amostra possibilitou verificar com maior detalhamento a condição de sua superfície antes de se dar início aos ensaios. A Tabela 6 apresenta os valores de Ra obtidos com o perfilômetro Cyber©.

Tabela 6 – Dados de Rugosidade Média (Ra) das amostras pré ensaio.

Chapas	Rugosidade Ra (μm)	Pinos	Rugosidade Ra (μm)
Chapa 1	0,34	Pino 1	0,65
Chapa 2	0,38	Pino 2	0,74
Chapa 3	0,32	Pino 3	0,73
Chapa 4	0,38	Pino 4	0,77
Chapa 5	0,53	Pino 5	0,74
Chapa 6	0,42	Pino 6	0,78

Fonte – Autoria Própria.

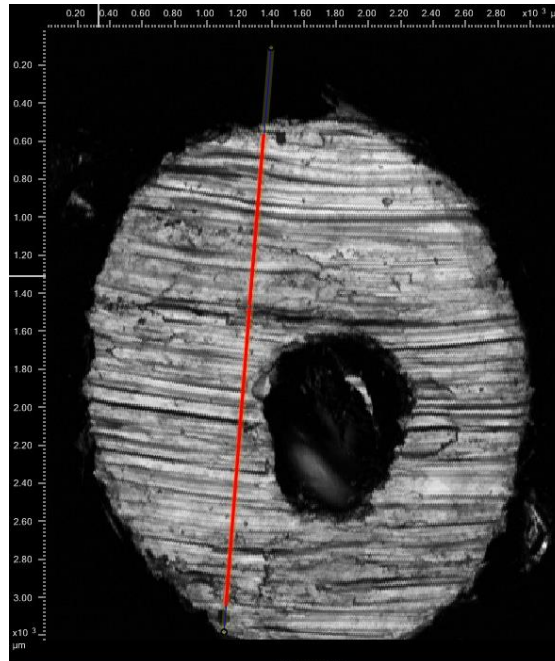
Como se observa na tabela, as rugosidades nos pontos de análise são menores que $0,80 \mu\text{m}$, estando, portanto, de acordo com as recomendações da norma *ASTM G99*.

6.2 Ensaios de Desgaste

A realização dos ensaios de desgaste resultou na obtenção de seis curvas de atrito, uma para cada par de amostra. No entanto, a amostra 4 apresentou ao fim do ensaio uma cavidade em seu interior, o que comprometeu sua análise (Figura 20). Essa cavidade, muitas vezes mencionada como vazio, são formadas durante o coquilhamento da peça, quando não se tem um preenchimento completo do molde. Isso pode ocorrer por vários motivos, como, por exemplo: falta de material fundido; rugosidade do molde (que desacelera o fluxo do fundido); temperatura ou pressão na câmara inadequada; excesso de turbilhonamento durante o preenchimento devido à viscosidade do fundido; dentre outros. Essa falta de preenchimento que

causa tais cavidades é indesejada e muito se esforço laboratorial é realizado para eliminá-los.

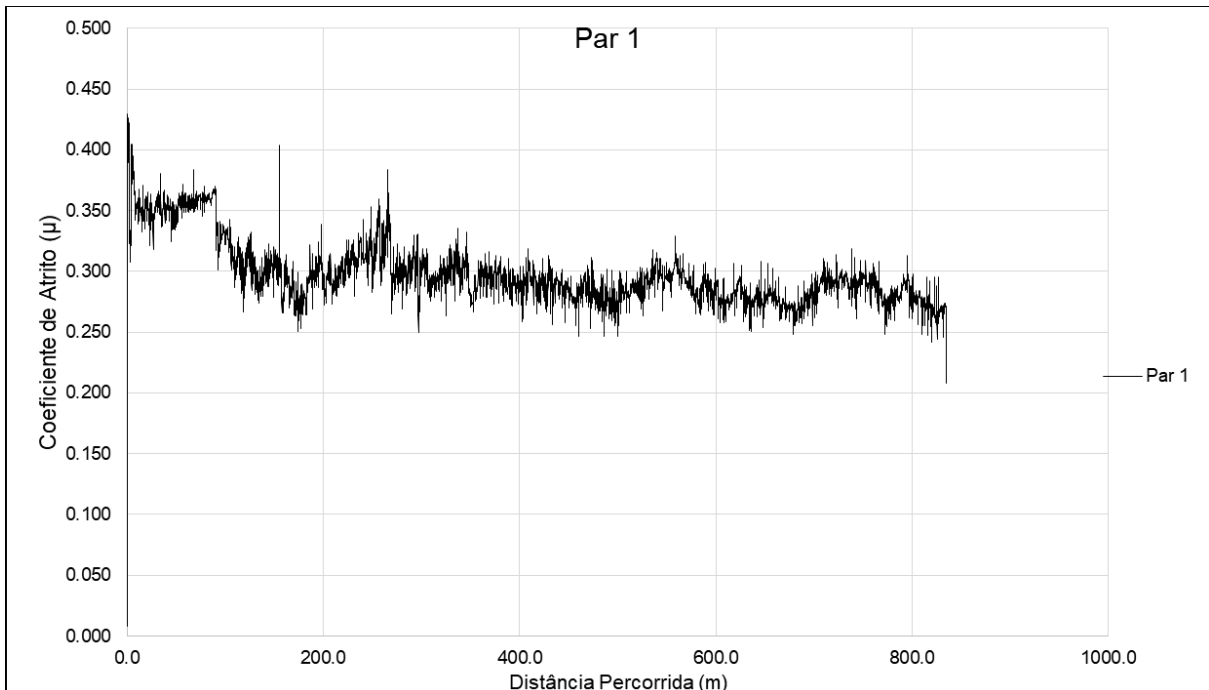
Figura 20 – Imagem superficial do Pino 4 após o ensaio de desgaste.



Fonte - Autoria Própria.

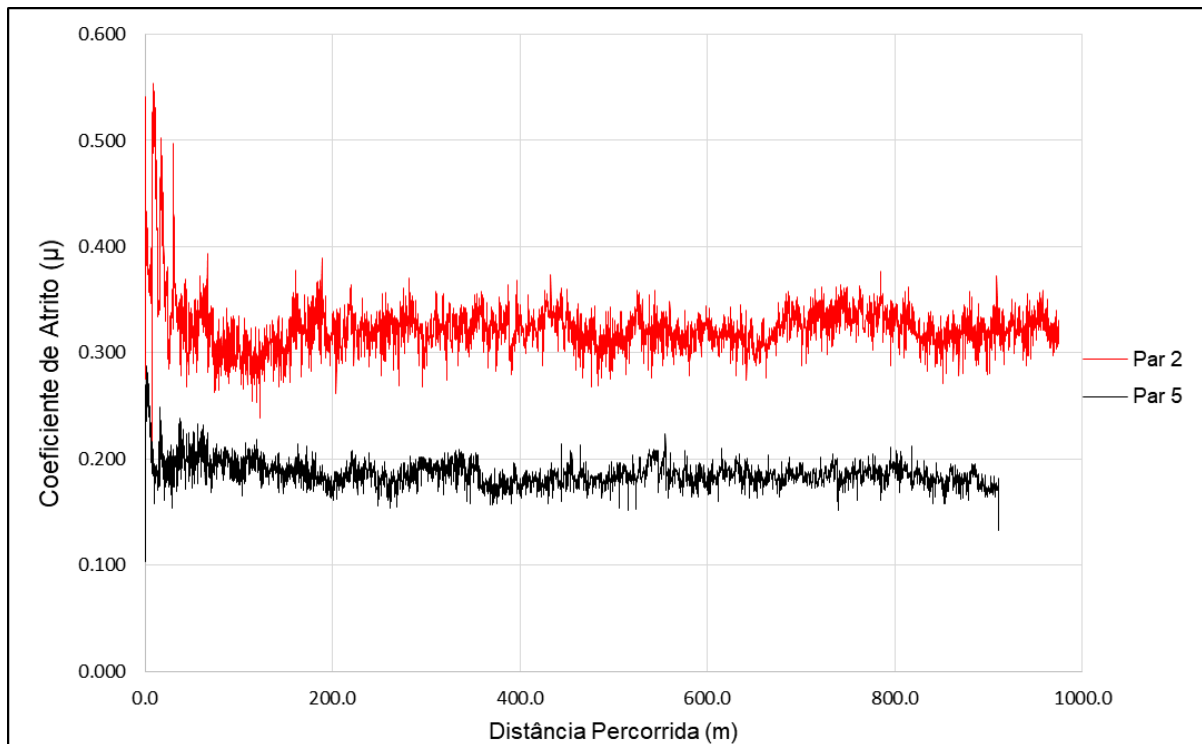
As Figuras 21 a 23 mostram as curvas resultantes para os ensaios, segundo a carga aplicada em cada amostra. É possível verificar que, conforme exemplificado na seção 4.2.4, o coeficiente de atrito (μ) decresce na medida que há o aumento da carga sobre as amostras, fato este constatado nos três primeiros ensaios. No entanto, os dois últimos resultados estão extremamente discrepantes em relação aos anteriores.

Figura 21 - Gráfico do coeficiente de atrito x distância percorrida para o par de amostra 1 (Par 4 foi excluído por apresentar defeitos de fabricação).



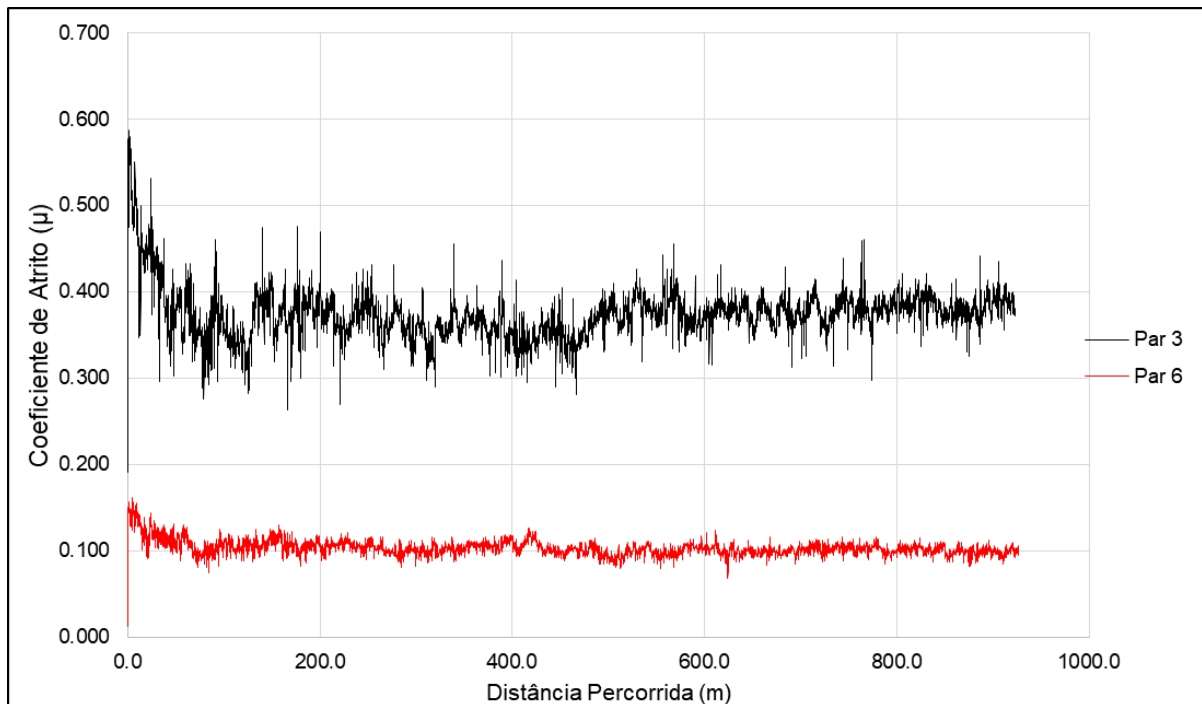
Fonte – Autoria Própria.

Figura 22 – Gráficos do coeficiente de atrito x distância percorrida para os pares de amostra 2 e 5



Fonte – Autoria Própria.

Figura 23 - Gráficos do coeficiente de atrito x distância percorrida para os pares de amostra 3 e 6.



Fonte – Autoria Própria.

Os valores dos coeficientes de atrito (μ) fornecidos pelo equipamento durante os ensaios estão informados na Tabela 7. Os valores de coeficiente de atrito médio para os ensaios com a mesma carga podem ser visualizados na Tabela 8.

Tabela 7– Valores de coeficiente de Atrito para as amostras 1 a 6.

Amostras	Coef. Atrito (μ)
1	0,29761
2	0,32112
3	0,37374
5	0,18618
6	0,10311

Fonte – Autoria Própria.

Tabela 8 – Valores de coeficiente de atrito médio para os pares ensaiados.

Amostras	Coef. Atrito médio ($\bar{\mu}$)
1	0,29761
2 e 5	0,25365
3 e 6	0,23842

Fonte – Autoria Própria

Segundo Liu, Y. et al., (2010), pinos de Vitreloy 105 ensaiados sob uma base de aço Cr-12, com uma carga aplicada entre 5 e 35 N resultaram em valores de coeficientes de atrito entre 0,24 e 0,32. Estes valores se enquadram dentro daqueles obtidos nos ensaios, com exceção dos ensaios 5 e 6.

A variação do coeficiente de atrito em metal amorfo se deve a interação entre diversas variáveis durante o movimento, como, deformação plástica, aumento (ou surgimento) de cristalinidade e amolecimento por temperatura, que são responsáveis pela redução desta grandeza (WANG, Y. et al., 2016).

Os resultados dos ensaios 5 e 6 não pode ser atribuídos diretamente a um fenômeno físico (mudança estrutural, por exemplo), uma vez o comportamento das curvas são semelhantes às curvas 1, 2 e 3, e, para que a influência de um fenômeno físico fosse constatada, o comportamento da curva deveria ser instável, conforme mostrado na Figura 11 (LIU, Y. et al., 2010). Portanto, cabe afirmar que são necessários outros testes com o intuito de se constatar o comportamento observado, de modo que, caso contrário, deve-se avaliar as condições do equipamento (calibragem, vibração, etc).

6.2.1 Cálculo da taxa de desgaste das chapas e pinos

Para se calcular as taxas de desgaste (Q) e específica (k) das amostras, utilizou-se o software do equipamento Cyber© para se obter a perda volumétrica das chapas, utilizando-se a equação 2. Para os pinos, esse processo não foi possível visto que toda suas superfícies foram danificadas, não possibilitando a obtenção da variação de volume. Aqui, foram calculadas a variação de massa por unidade de massa, conforme a equação 1

As Tabelas 9 e 10 apresentam os valores das taxas calculadas para este trabalho.

Tabela 9 – Dados obtidos durante os ensaios e taxa de desgaste específica k para as chapas.

Chapa	Distância percorrida (m)	Carga aplicada (N)	Volume perdido (mm ³)	k (mm ³ /Nm)	Q (g/g)
1	834,46984	38,26479	5,55463	1,73958E-04	1,62310E-03
2	966,22824	20,46219	5,13457	2,59700E-04	1,43970E-03
3	922,30877	10,02009	2,56015	2,77024E-04	7,44453E-04
5	904,74099	20,46219	4,07372	2,20047E-04	1,69266E-03
6	926,70072	10,02009	3,05965	3,29504E-04	9,37806E-04

Fonte – Autoria Própria.

Tabela 10 – Dados obtidos para os pinos e taxa de desgaste Q.

Pino	Distância Percorrida (m)	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa perdida (g)	Q (g/g)
1	834,46984	0,78776	0,77804	9,72E-03	1,23388E-02
2	966,22824	0,87842	0,87732	1,10E-03	1,25225E-03
3	922,30877	0,90715	0,90659	5,60E-04	6,17318E-04
5	904,74099	0,84044	0,82201	1,84E-02	2,19290E-02
6	926,70072	0,94935	0,94726	2,09E-03	2,20151E-03

Fonte – Autoria Própria.

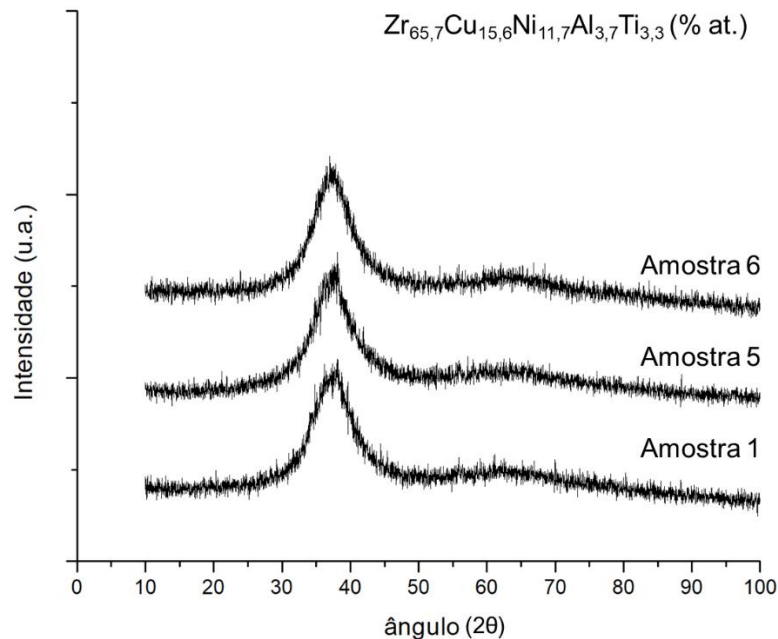
Segundo Jiang, F. et al., (2009), os ensaios resultaram em uma taxa de desgaste específica (k) entre $0,9 \cdot 10^{-4}$ a $2,6 \cdot 10^{-4}$ mm³/Nm. Para as taxas de desgaste específica k, os valores calculados se encontram dentro da faixa esperada para a liga Vitreloy 105.

Nota-se que os valores para as taxas de desgaste Q para as chapas e os pinos estão próximos, sendo maiores para os pinos. Segundo Liu, Y. et al., (2010), taxas de desgaste entre $1,93 \cdot 10^{-3}$ a $5,05 \cdot 10^{-3}$ g/g foram encontradas para os pinos de Vitreloy 105.

A diferença entre os valores das chapas e pinos não se devem à fatores como cristalização pontual das chapas, visto que, após o término dos ensaios, as curvas resultantes das análises de DRX realizados pelo LCE apresentam a morfologia típica

de um material amorfo, comprovando que as chapas continuam amorfas, conforme a Figura 24.

Figura 24 – Difractogramas realizadas nas chapas 1, 5 e 6.



Fonte – LCE, UFscar

No entanto, não foi possível analisar as superfícies das pontas dos pinos por conta do seu formato; portanto, não se pode destacar algum fenômeno de cristalização pontual do material do pino. Por outro lado, a temperatura alcançada nos contatos entre os dois materiais é a mesma e, dessa forma, não haveria cristalização pontual no pino.

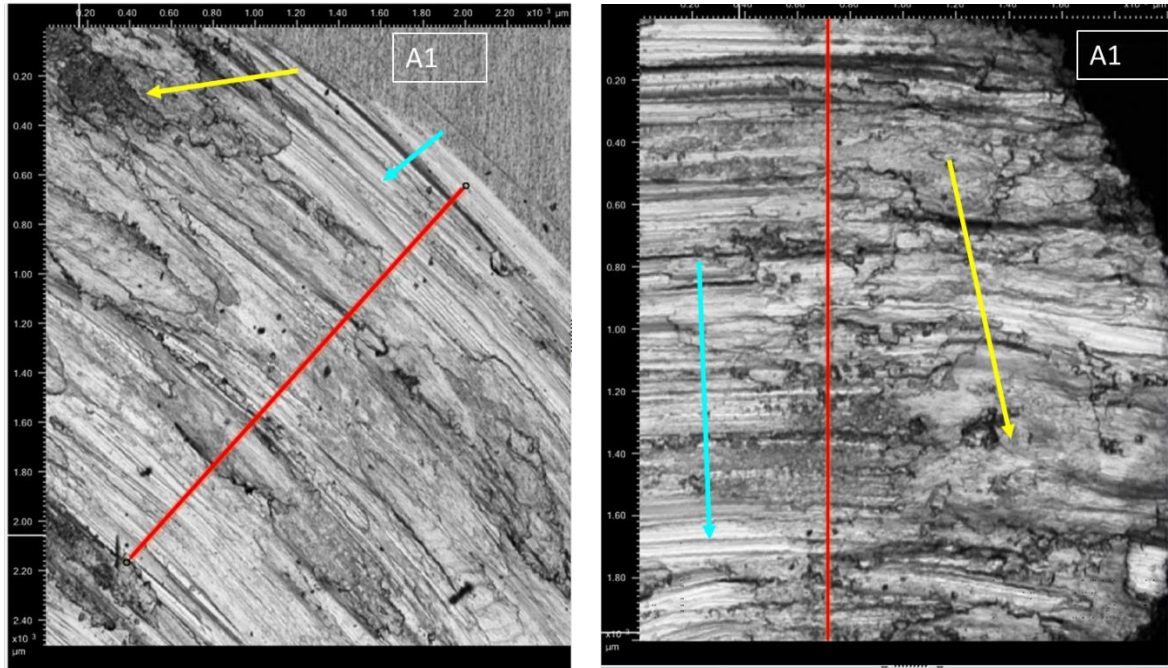
Diante dos valores das taxas k e Q encontrados, os ensaios realizados estão dentro do esperado, sendo, portanto, validados.

6.2.2 Análise superficial após o ensaio de desgaste

Nas Figuras 25 a 29, são apresentadas as imagens obtidas das superfícies desgastadas após os ensaios. À esquerda, tem-se a região da pista de desgaste da chapa e à direita, a superfície do pino. Aqui, as setas amarelas identificam as

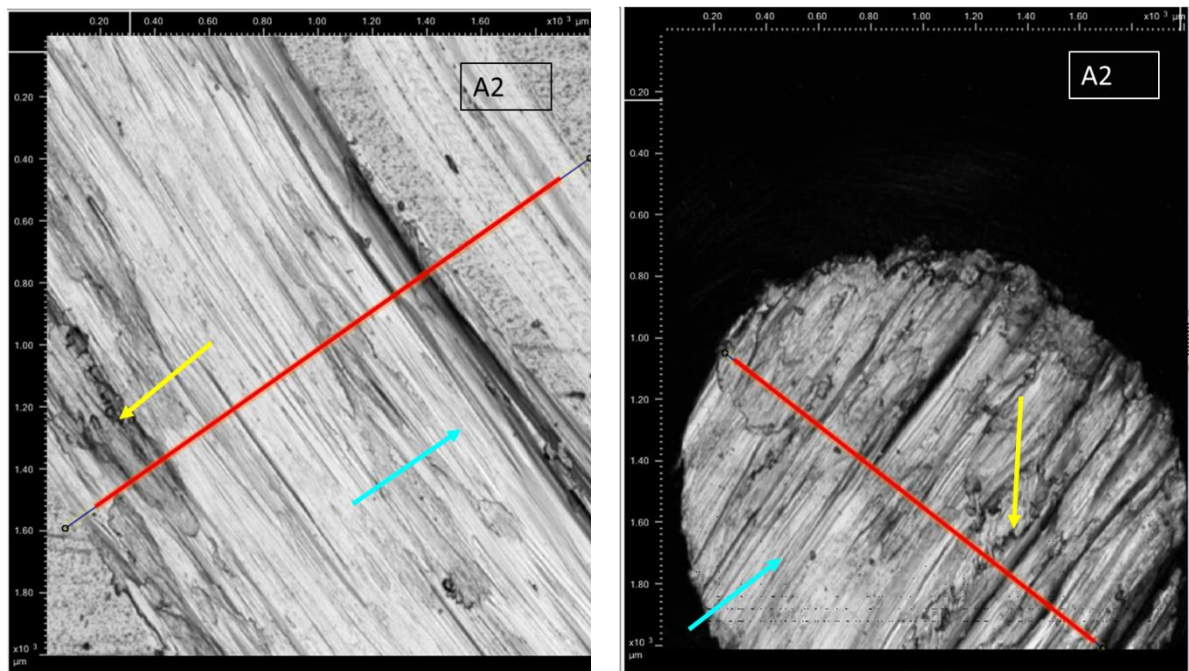
regiões de *peel-off*, oriundas de mecanismos de adesão; as setas azuis indicam os riscos (sulcos) provocados por ação do mecanismo de desgaste abrasivo.

Figura 25 – Análise estrutural da pista (esquerda) e pino (direita) do par de amostras 1 após ensaio.



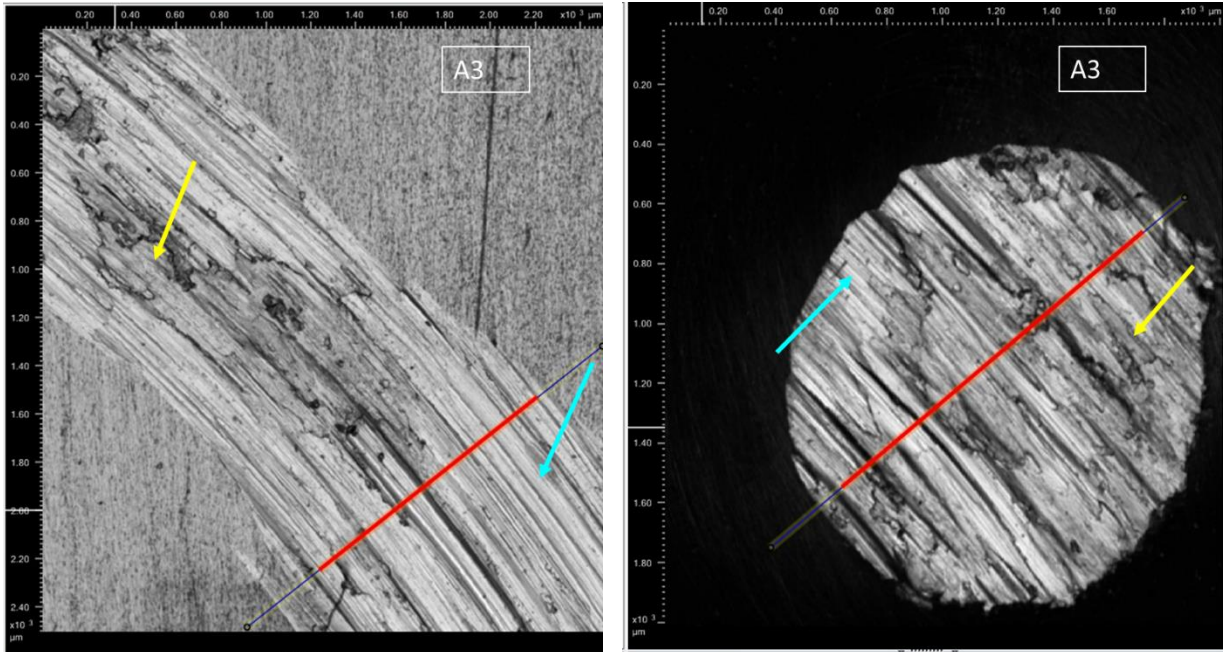
Fonte – Autoria Própria.

Figura 26 – Análise estrutural da pista (esquerda) e pino (direita) do par de amostras 2 pós ensaio.



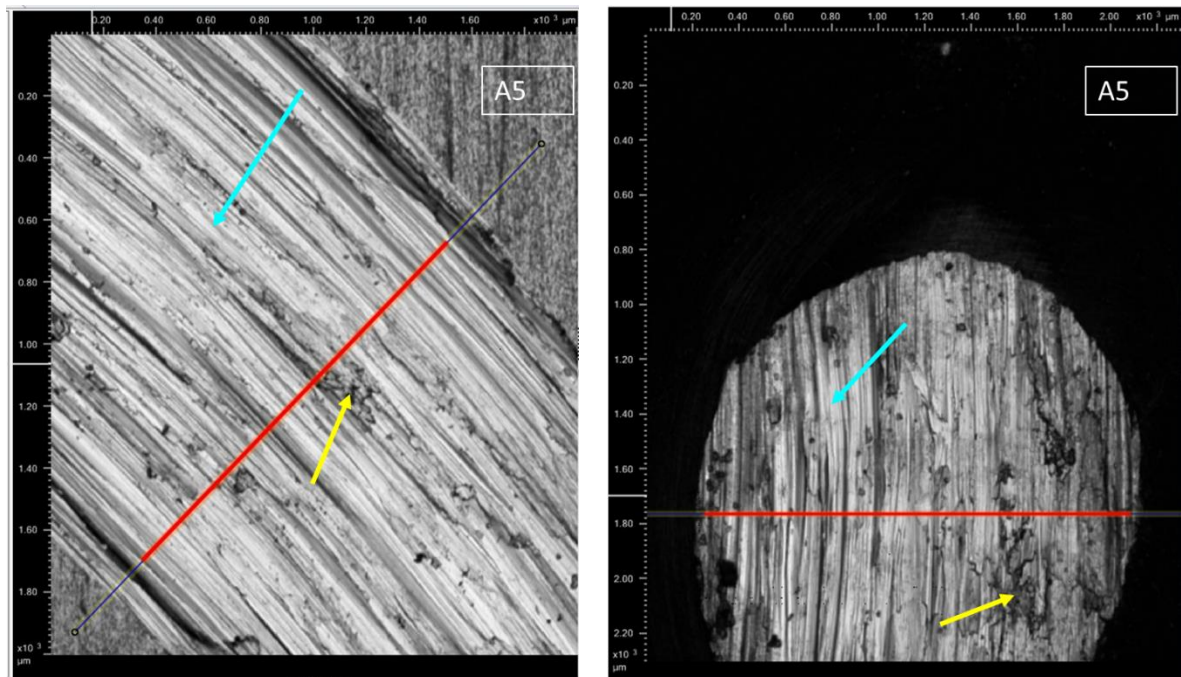
Fonte – Autoria Própria.

Figura 27 – Análise estrutural da pista (esquerda) e pino (direita) do par de amostras 3 pós ensaio.



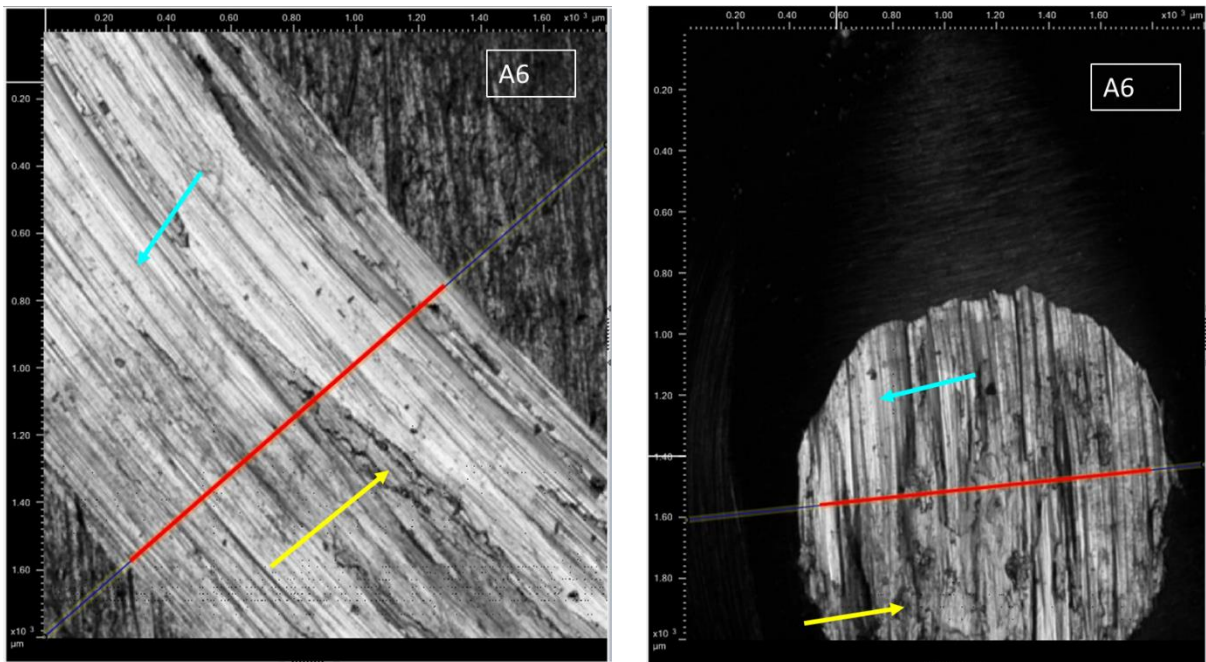
Fonte – Autoria Própria.

Figura 28 – Análise estrutural da pista (esquerda) e pino (direita) do par de amostras 5 pós ensaio



Fonte – Autoria Própria.

Figura 29 – Análise estrutural da pista (esquerda) e pino (direita) do par de amostras 6 pós ensaio.



Fonte – Autoria Própria.

De acordo com o que se encontra na literatura, a presença de dois ou mais mecanismos de desgaste em um metal amorfo depende de variáveis como dureza, velocidade de deslizamento, força aplicada, plasticidade, fragilidade, cristalinidade, temperatura local entre outros (JIANG, F. et al., 2009; LIU, Y. et al., 2010; WANG, Y. et al., 2016).

Observa-se que para o par de amostras 1, cuja força aplicada foi de 35 N, há uma maior atuação de desgaste por adesão, evidenciado pelas regiões irregulares em sua superfície. Já para os pares de amostras 2 e 5 (20 N) e 3 e 6 (10 N), a quantidade de regiões afetadas por desgaste adesivo é reduzida drasticamente, destacando a atuação dos mecanismos abrasivos (regiões uniformes).

Estes resultados estão de acordo com aqueles encontrados por Liu, Y. et al., (2010) para a liga Vitreloy 105 ensaiada sob um disco de aço Cr-12, em que, para cargas de 5 e 20 N, o mecanismo de era predominantemente abrasivo porém, ao se alterar a carga para 35 N, houve um pronunciamento expressivo de deformação plástica, característica de desgaste abrasivo.

Outra característica a se notar é que, os pares 5 e 6, que apresentaram um comportamento incomum em seus coeficientes de atrito, exibem uma morfologia superficial semelhante aos pares 2 e 3, respectivamente. Este fato demonstra que o

comportamento destes dois pares (5 e 6) não pode ser atribuído, como discutido, a um fenômeno físico (mudança estrutural, amolecimento) mas, no entanto, suas características estão em conformidade aquelas descritas na literatura.

Observando as Figuras 25, 26 e 27, nota-se que as superfícies dos pinos aparentam um maior índice de desgaste adesivo do que a região da pista analisada, podendo ser decorrente de fatores como o fator geométrico dos pinos (visto suas pequenas áreas de contato e deslizamento constante sobre as chapas) ou uma possível alteração microestrutural nos pinos, com a formação de regiões nanocristalinas ou até mesmo pela atuação do mecanismo de micro trincamento, como reportado por Liu, Y. et al., (2010), resultando em uma remoção volumosa de material.

No entanto, a atuação de outros mecanismos de desgaste somente pode ser confirmada por meio de uma investigação utilizando-se para isto, técnicas como Microscopia Eletrônica de Varredura e até mesmo, Microscopia Eletrônica de Transmissão, podendo, deste modo, inferir as condições reais dos materiais ensaiados.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ensaios de desgaste realizados no presente trabalho tiveram como objetivo adaptar um tribômetro, que realiza ensaios do tipo esfera-sobre-disco, para realizar ensaios do tipo pino-sobre-disco. Outro objetivo era o de verificar a viabilidade de se utilizar o ensaio de pino-sobre-disco para se analisar o comportamento tribológico entre o contato de materiais similares e com estruturas amorfas. Conforme os dados obtidos de taxas de desgaste e das imagens superficiais obtidas após o ensaio, é possível afirmar que:

- As adaptações implantadas no tribômetro foram suficientes para realizar o ensaio de pino-sobre-disco;
- Os dados obtidos de taxa de desgaste estavam de acordo com os valores encontrados na literatura;
- Os gráficos de coeficiente de atrito apresentaram o comportamento típico da liga Vitreloy 105 durante todo o tempo de ensaio, com exceção das amostras 5 e 6, cujo comportamento se mostrou atípico, sem causas específicas;
- As análises superficiais após o ensaio apresentaram indícios da atuação dos mecanismos de desgaste abrasivo e adesivo, de acordo com dados da literatura disponível.

Diante dessas considerações, pode-se afirmar que o método de ensaio empregado neste trabalho é viável para se realizar estudos tribológicos de deslizamento para a liga amorfa Vitreloy 105 e isso possibilitará outros trabalhos futuros

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo o equipamento adaptado para o ensaio pino-sobre-disco de materiais coquilhados para a geometria usada neste trabalho, um dos grandes desafios está em ampliar as áreas de estudo da liga, as quais podem variar de acordo com o objetivo do trabalho. Os pontos sugeridos para o avanço do estudo da liga estão relacionados às análises de mudança do comportamento tribológico do material em função da mudança de algumas variáveis.

- Analisar as superfícies de desgaste com MEV ou MET, com o objetivo de se observar a atuação de outros mecanismos de desgaste;
- Estudar a influência da cristalinidade no comportamento tribológico da liga Vitreloy 105, associando a presença de fases cristalinas ao ganho de resistência ao desgaste;
- Estudar a influência da tenacidade da liga Vitreloy 105 por meio de ensaios mecânicos, visto que estudos sugerem que este é um dos fatores que está intimamente ligado à resistência ao desgaste de ligas metálicas amorfas, tendo em vista que o comportamento destes materiais é semelhante ao de materiais cerâmicos;
- Realizar estudos das propriedades da liga Vitreloy 105 a baixas temperaturas, associando suas propriedades mecânicas com suas propriedades tribológicas nas condições de ensaio propostas.
- Estudar o comportamento tribológico da liga Vitreloy 105 com estrutura amorfa ou nanoestrutura em contato com outras ligas.

REFERÊNCIAS

- ABBASI, M.; GHOLAMIPOUR, R.; SHAHRI, F. Glass forming ability and mechanical properties of Nb-containing Cu-Zr-Al based bulk metallic glasses. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)**, v. 23, n. 7, p. 2037–2041, 2013.
- BELCHIOR, H.; CUNHA, D. A. Campus Curitiba. v. 0, p. 1–2, 2012.
- BHUSHAN, B. **Introduction to Tribology**. 2. ed. ed. [s.l.] John Wiley & Sons, LT, 2013.
- BO YUAN PENG; XUEYUAN NIE; YING CHEN. Effects of Surface Coating Preparation and Sliding Modes on Titanium Oxide Coated Titanium Alloy for Aerospace Applications. **International Journal of Aerospace Engineering**, 2014.
- CHEN, M. A brief overview of bulk metallic glasses. **NPG Asia Materials**, v. 3, n. 9, p. 82–90, 2011.
- CHENG, J. B. et al. Dry sliding friction and wear properties of metallic glass coating and martensite stainless coating. **Tribology International**, v. 60, p. 140–146, 2013.
- DUARTE, M. C. S. Mapeamento dos diferentes regimes de transição de desgaste do aço inoxidável austenítico AISI 316L cementado a plasma. **2015**, p. 53–59, 2015.
- HOFMANN, D. C. et al. Castable Bulk Metallic Glass Strain Wave Gears: Towards Decreasing the Cost of High-Performance Robotics. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 37773, 2016.
- HOLMBERG, K.; ERDEMIR, A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. **Friction**, v. 5, n. 3, p. 263–284, 2017.
- HUTCHINGS, I. M. **Tribology -- Friction and wear of engineering materials** **Tribology International**, 1992.
- HUTCHINGS, I.; SHIPWAYPHILIP. **Tribology**. [s.l.: s.n.].
- INOUE, A. Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys. **Acta Materialia**, v. 48, n. 1, p. 279–306, 2000.
- INOUE, A. et al. Peculiarities and usefulness of multicomponent bulk metallic alloys. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 707, p. 12–19, 2017.
- INOUE, A.; TAKEUCHI, A. Recent development and application products of bulk glassy alloys. **Acta Materialia**, v. 59, n. 6, p. 2243–2267, 2011.
- JIANG, F. et al. Tribological studies of a Zr-Based glass-forming alloy with different states. **Advanced Engineering Materials**, v. 11, n. 11, p. 925–931, 2009.

KIMINAMI, C. S. **Processamento de Ligas a Base de Cobre com Estruturas Amorfa e Nanocristalinas**. São Carlos: [s.n.].

LI, H. F.; ZHENG, Y. F. Recent advances in bulk metallic glasses for biomedical applications. **Acta Biomaterialia**, v. 36, p. 1–20, 2016.

LI, M. C. et al. Effect of strain rate on yielding strength of a Zr-based bulk metallic glass. **Materials Science and Engineering: A**, v. 680, n. August 2016, p. 21–26, 2017.

LIU, Y. et al. Wear behavior of a Zr-based bulk metallic glass and its composites. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 503, n. 1, p. 138–144, 2010.

MARCO, E.; AG, F. Bulk Metallic Glass Composites. **Engineering**, 2007.

MATERION. **Bulk Metallic Glass Data Sheet**. [s.l.: s.n.].

MELLE, A. K. **Produção e Caracterização de Recobrimentos de Aço, Empregando a Liga amorfizável Fe-Cr-Nb-B**. [s.l.] UFSCar-Universidade Federal de São Carlos, 2012.

MENDES, M. A. B. **Aplicação e Avaliação De Critérios Semi-Empíricos Para o Desenvolvimento de Novas Ligas Vítreas do Sistema Ti-Cu-Ni**. [s.l.] UFSCar - Universidade Federal de São Carlos, 2013.

MORRISON, M. The mechanical and electrochemical properties of bulk metallic glasses. 2005.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas**. 4. ed. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

QIAO, J. C.; PELLETIER, J. M. Dynamic Mechanical Relaxation in Bulk Metallic Glasses: A Review. **Journal of Materials Science and Technology**, v. 30, n. 6, p. 523–545, 2014.

ROVANI, A. C. Estudo Da Transição Do Regime De Desgaste Moderado Para O Desgaste Severo a Seco E Sob O Regime De Lubrificação Limítrofe. p. 191, 2014.

SERIES, R. M. Design Guide. n. December, 2010.

WANG, Y. et al. Effect of sliding velocity on the transition of wear mechanism in (Zr,Cu)₉₅Al₅ bulk metallic glass. **Tribology International**, v. 101, p. 141–151, 2016.

WU, H. et al. Dry sliding tribological behavior of Zr-based bulk metallic glass. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 22, n. 3, p. 585–589, 2012.

ZHANG, B. et al. Bulk Metallic Glass. v. 14, p. 7461–7470, 2002.

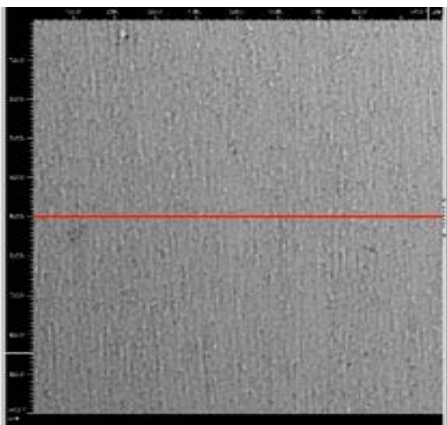
ZHAO, G. H. et al. Degradation of Zr-based bulk metallic glasses used in load-bearing implants: A tribocorrosion appraisal. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, v. 60, p. 56–67, 2016.

ZHONG, H. et al. Tribological behaviors of Zr-based bulk metallic glass versus Zr-

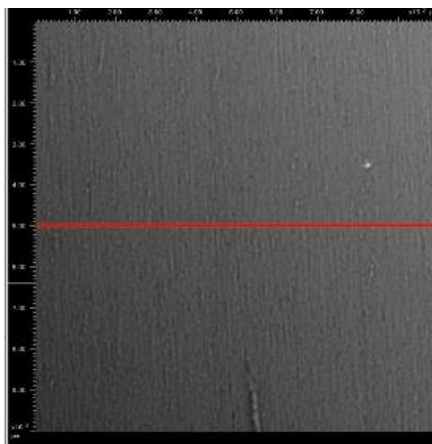
based bulk metallic glass under relative heavy loads. **Intermetallics**, v. 65, p. 88–93, 2015.

APÊNDICE A

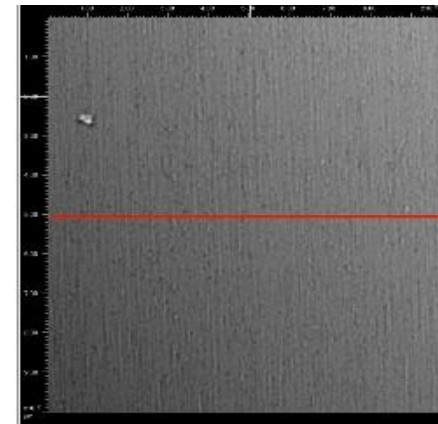
Análises de superfície de pré ensaio do par de amostras 1, obtidas com o Perfilômetro Cyber®.



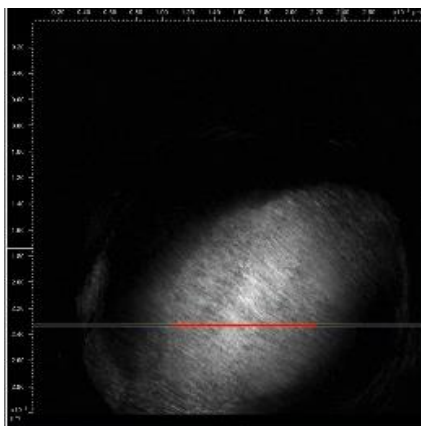
Ponto 1 Chapa 1 - Ra = 0,41 μm



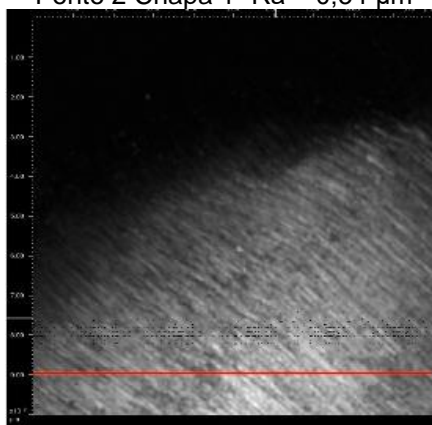
Ponto 2 Chapa 1 - Ra = 0,34 μm



Ponto 3 Chapa 1 - Ra = 0,26 μm



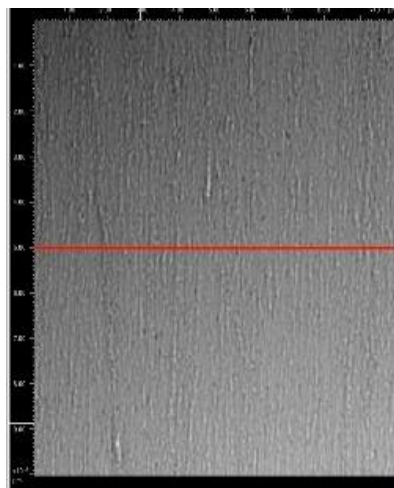
Superfície Pino 1 - Ra = 0,60 μm



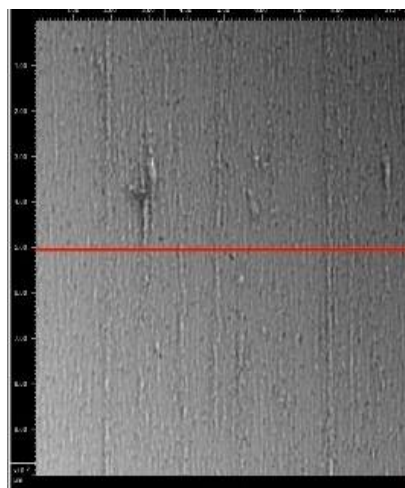
Centro Pino 1 - Ra = 0,69 μm

APÊNDICE A (cont.)

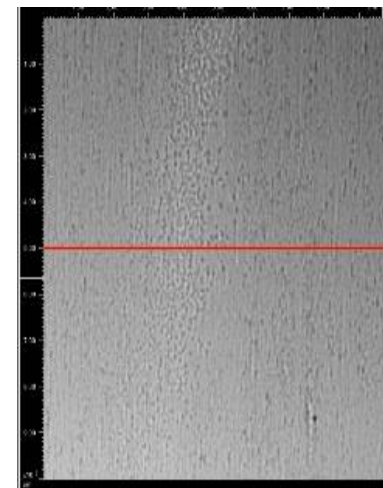
Análises de superfície de pré ensaio do par de amostras 2, obtidas com o perfilômetro cyber©.



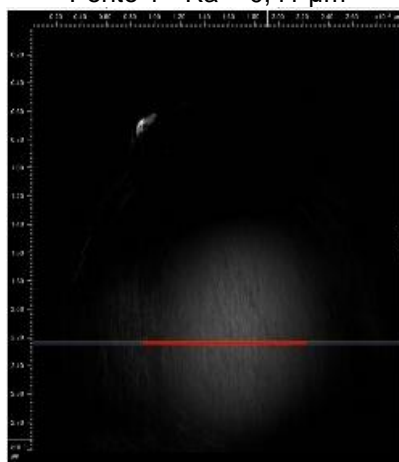
Ponto 1 - Ra = 0,41 μm



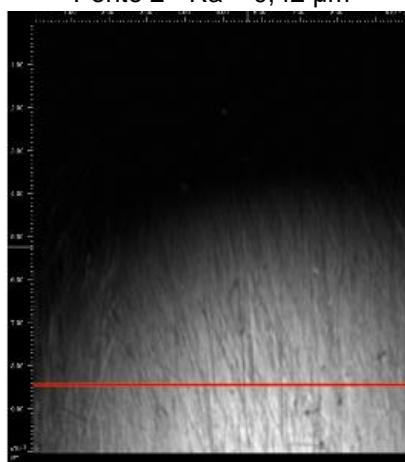
Ponto 2 - Ra = 0,42 μm



Ponto 3 - Ra = 0,35 μm



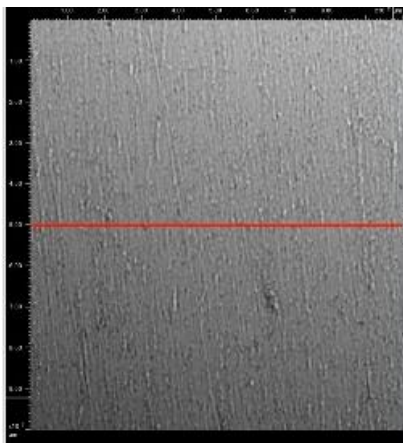
Superfície Pino - Ra = 0,76 μm



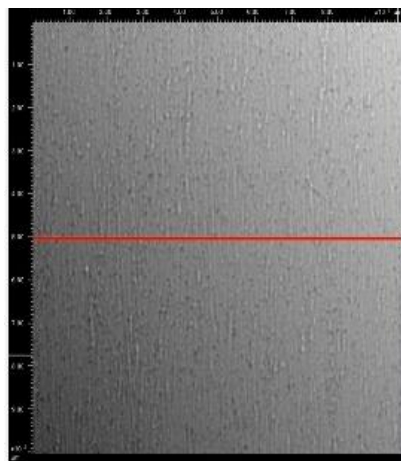
Centro Pino - Ra = 0,71 μm

APÊNDICE A (cont.)

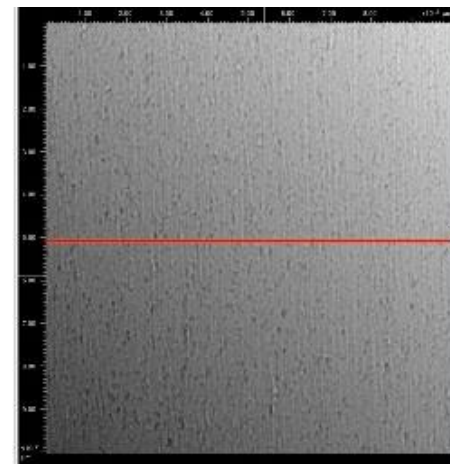
Análises de superfície de pré ensaio do par de amostras 3, obtidas com o Perfilômetro Cyber©.



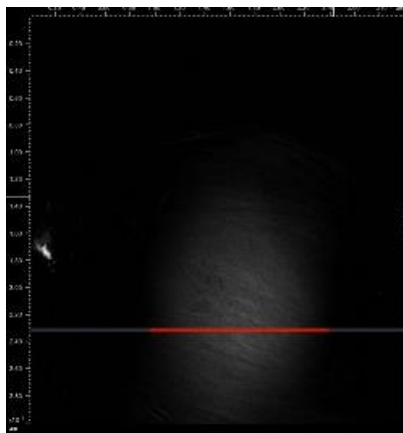
Ponto 1 - Ra = 0,36 µm



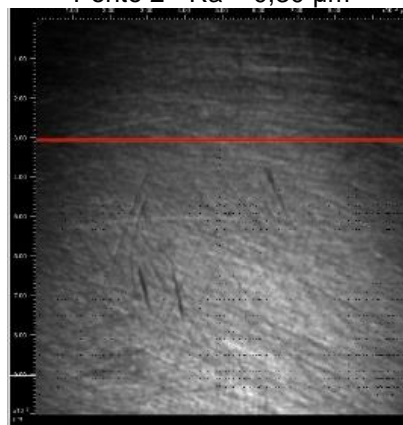
Ponto 2 - Ra = 0,30 µm



Ponto 3 - Ra = 0,30 µm



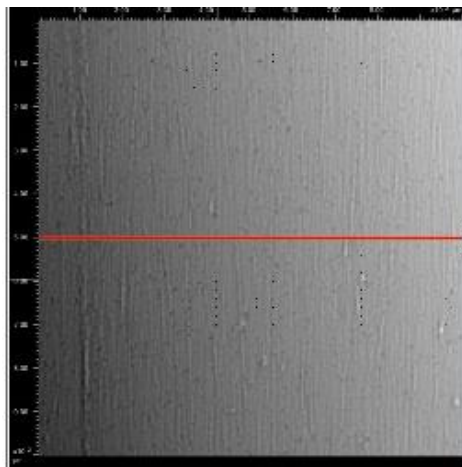
Superfície Pino - Ra = 0,68 µm



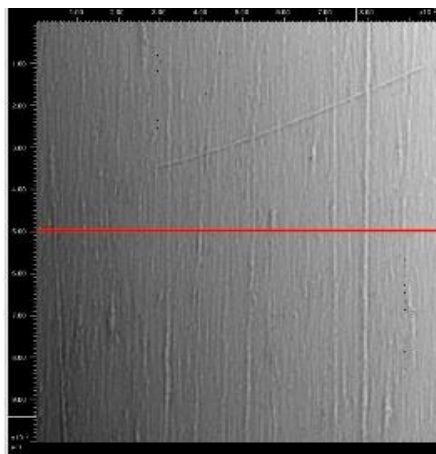
Centro Pino - Ra = 0,77 µm

APÊNDICE A (cont.)

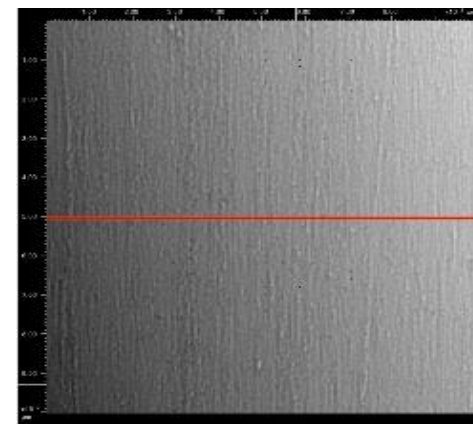
Análises de superfície de pré ensaio do par de amostras 4, obtidas com o Perfilômetro Cyber©.



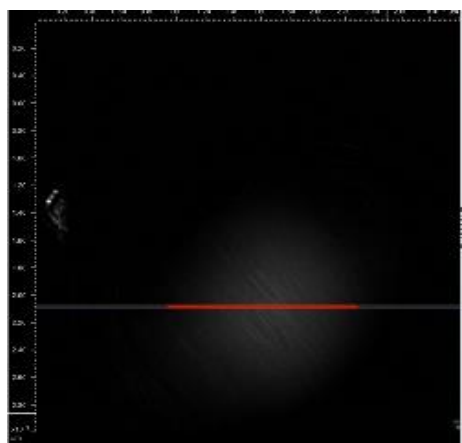
Ponto 1 - Ra = 0,32 μm



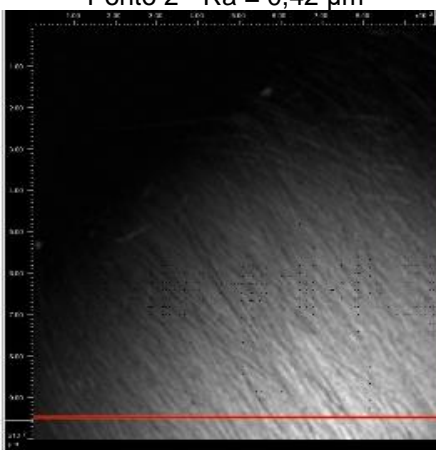
Ponto 2 - Ra = 0,42 μm



Ponto 3 - Ra = 0,39 μm



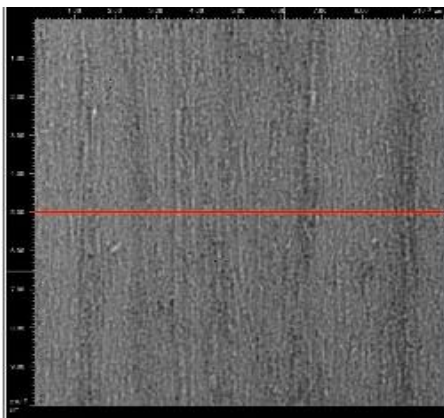
Superfície Pino - Ra = 0,75 μm



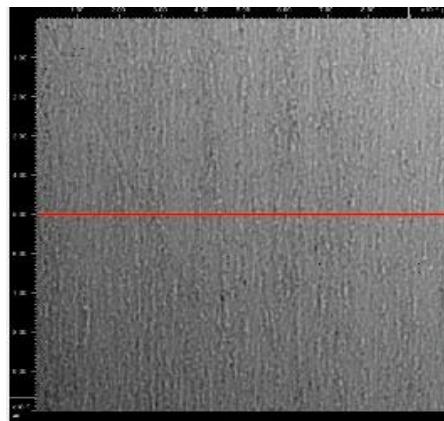
Centro Pino - Ra = 0,78 μm

APÊNDICE A – (cont.)

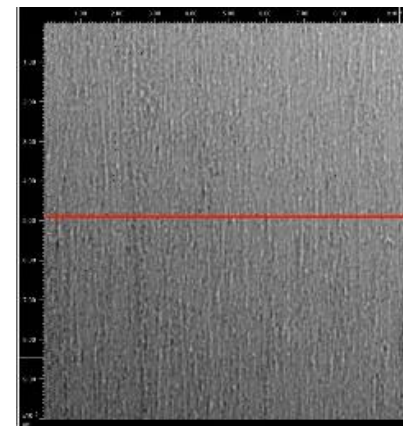
Análises de superfície de pré ensaio do par de amostras 5, obtidas com o Perfilômetro Cyber©.



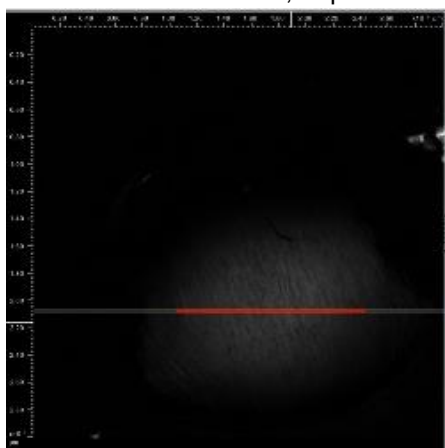
Ponto 1 - Ra = 0,58 μm



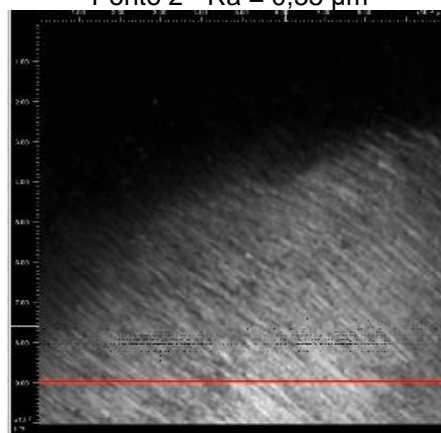
Ponto 2 - Ra = 0,55 μm



Ponto 3 - Ra = 0,46 μm



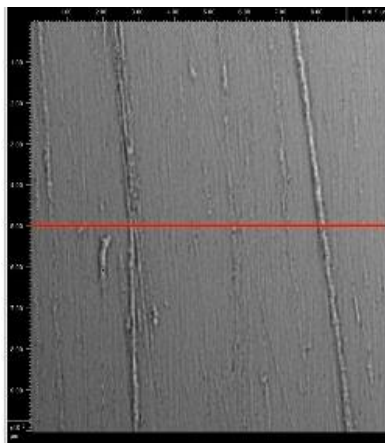
Superfície Pino - Ra = 0,69 μm



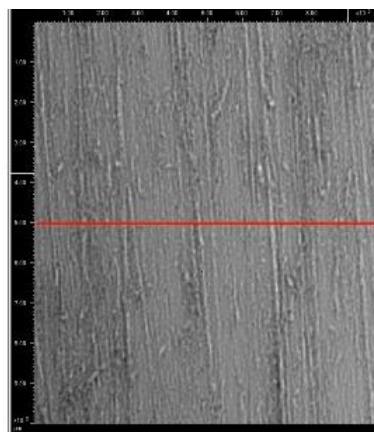
Centro Pino - Ra = 0,78 μm

APÊNDICE A (cont.)

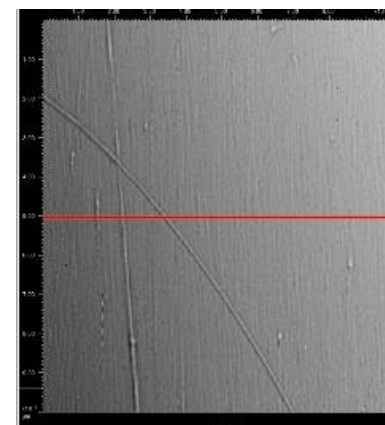
Análises de superfície de pré ensaio do par de amostras 6, obtidas com o Perfilômetro Cyber©.



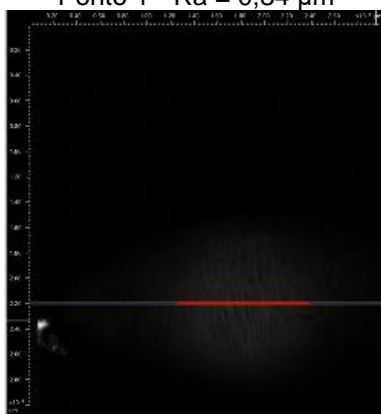
Ponto 1 - Ra = 0,34 μm



Ponto 2 - Ra = 0,68 μm



Ponto 3 - Ra = 0,25 μm



Superfície Pino - Ra = 0,80 μm



Centro Pino - Ra = 0,75 μm