

Dissertação de Mestrado

LÍVIA MIRANDA BARBOSA

ORTOMICROTRIBÔMETRO



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2018

LÍVIA MIRANDA BARBOSA

ORTOMICROTRIBÔMETRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. José Daniel Biasoli de Mello

Coorientador: Prof. Dr. Washington Martins da Silva Junior

UBERLÂNDIA – MG

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

B238o Barbosa, Livia Miranda, 1991-
2018 Ortomicrotribômetro / Livia Miranda Barbosa. - 2018.
 97 f. : il.

Orientador: José Daniel Biasoli de Mello.
Coorientador: Washington Martins da Silva Junior.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1163>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Aparelhos ortodônticos - Teses.
3. Tribologia - Teses. I. Mello, José Daniel Biasoli de. II. Silva Junior,
Washington Martins da, 1977- III. Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA



ALUNA: Livia Miranda Barbosa

NÚMERO DE MATRÍCULA: 11612EMC009

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Materiais e Processos de Fabricação

LINHA DE PESQUISA: Tribologia e Materiais

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA: NÍVEL MESTRADO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:

“Ortomicrotribômetro”

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Daniel Biasoli de Mello

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Washington Martins da Silva Júnior

A Dissertação foi **APROVADA** em reunião pública, realizada no Anfiteatro D - Bloco 5O, Campus Santa Mônica, em 21 de junho de 2018, às 14:00 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

NOME		ASSINATURA
Prof. Dr. José Daniel Biasoli de Mello	UFU	
Prof. Dr. Washington Martins da Silva Júnior	UFU	
Prof. Dr. Cleudmar Amaral de Araújo	UFU	
Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva	UTFPR	
Profa. Dra. Marina de Melo Naves	HD Ensinos Odontológicos	

Uberlândia, 21 de junho de 2018

*Dedico este trabalho
aos meus pais, irmã
e namorado.
Presentes de Deus
em minha vida!*

AGRADECIMENTOS

A Deus por trilhar meu caminho com tantas bênçãos e pela oportunidade de aqui estar.

Ao professor José Daniel Biasoli de Mello pelos valiosos ensinamentos, orientação serena e sábia, profissionalismo e dedicação a este trabalho.

Ao professor Washington Martins da Silva Júnior por todo o empenho colocado neste estudo, incentivo e motivação.

Aos meus pais Clonice e Luiz por me oferecerem todo o suporte que precisei para hoje estar aqui. Por estarem ao meu lado de modo tão amoroso e dedicado. Essa conquista é nossa!

À minha irmã Juliana pela amizade, por acreditar em mim e fazer minha vida mais colorida e alegre.

Ao meu namorado Ricardo pela amizade, apoio sincero e incansável e por caminhar ao meu lado compartilhando meus sonhos.

À minha amiga Angélica de Andrade pelo carinho, cumplicidade e ensinamentos que compartilhamos na nossa amizade.

Aos meus colegas do Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) pelo conhecimento transmitido e momentos de descontração que permitiram um trabalho mais sereno. Em especial Vinícius Carvalho e Erika Dantas pelas gentis contribuições neste estudo.

Às secretárias da pós-graduação da engenharia mecânica, e aos técnicos, em especial Jonas Profeta pela partilha de conhecimento e prontidão em me ajudar.

À banca avaliadora, professor Carlos Henrique, professora Marina de Melo e professor Cleudmar Amaral por compartilhar seus conhecimentos e pela disponibilidade em contribuir para este trabalho.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e à Universidade Federal de Uberlândia pela oportunidade de realizar este curso.

À CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo apoio financeiro.

Barbosa, L. M. **Ortomicrotribômetro**. 2018. 97f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.

RESUMO

Este trabalho consistiu na concepção e fabricação de um ortomicrotribômetro, módulo integrante de um microtribômetro que, juntamente com a metodologia desenvolvida, possibilita caracterizar a tribologia do aparelho ortodôntico fixo. O ortomicrotribômetro constitui-se de um pórtico, sistemas posicionadores, sistema de aplicação, controle e monitoração de esforços, sistema de movimentação recíproco e sistema de monitoração de posição. Permite ensaios parametrizados de forma a representar o que acontece na boca, com movimentos também representativos, ou seja, em baixas velocidades e grandes amplitudes, usando como amostra itens ortodônticos, bráquete e fio, e imersos em saliva. Para validar o equipamento e a metodologia proposta foram realizados ensaios variando a força normal (0,5; 1,0 e 1,5 N), frequência (0,1; 0,5 e 1,0 Hz) e o ambiente (seco e imerso em saliva artificial). Os valores de coeficientes de atrito e taxas de desgaste foram quantificados a fim de estudar o movimento, as reações e as interações entre o bráquete e o fio. Através de recurso computacional, denominado triboscopia, que possibilita rápida identificação visual de variações do coeficiente de atrito no decorrer do ensaio, juntamente com análises no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) e Microscópio Ótico (MO), foi possível caracterizar os efeitos das variações impostas no tribo-sistema. As análises indicam que tanto o aumento da força normal como da frequência induzem a redução do coeficiente de atrito. A taxa de desgaste diminuiu com o aumento da força normal e aumentou com o aumento da frequência. O mecanismo que rege o comportamento do tribo-sistema é a formação de tribo-camadas, e nos ensaios imersos em saliva artificial é a lubrificação que esta exerce no contato entre as duas superfícies que determina o comportamento. A estratégia experimental, concepção e construção do ortomicrotribômetro, parametrização biológica e mecânica representativas, bem como sua validação através do desenvolvimento de metodologia permitindo a caracterização tribológica de aparelhos ortodônticos, evidencia que o ortomicrotribômetro desenvolvido é um equipamento versátil e que permite o estudo em diferentes configurações de dispositivos ortodônticos em ambiente representativo da cavidade bucal bem como constitui-se de ferramenta poderosa no desenvolvimento de novos materiais para fios e bráquetes.

Palavras-chave: ortomicrotribômetro, bráquete, fio, saliva, coeficiente de atrito, triboscopia, tribo-camada.

Barbosa, L. M. **Orthomicrotribometer**. 2018. 97p. Masters Dissertation. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.

ABSTRACT

This work consisted of the conception and development of an orthomicrotribometer, integral module of a microtribometer that, together with the developed methodology, makes it possible to characterize the tribology of orthodontic appliance. The orthomicrotribometer consists of a portico, positioning systems, application, control and monitoring of efforts systems, reciprocating movement system and position monitoring system. It allows parameterized tests in order to represent what happens in the mouth, with also representative movements, that is, at low speeds and large amplitudes, using orthodontic components as sample, bracket and wire, immersed in artificial saliva. To validate the equipment and the proposed methodology, tests were conducted varying the normal force (0.5; 1.0 and 1.5 N), frequency (0.1; 0.5 and 1.0 Hz) and the environment (dry and immersed in artificial saliva). The coefficient of friction and the wear rate data were quantified in order to study the motion, the reactions and interactions between bracket and wire. Through a computational resource, named triboscopy, which enables quick visual identification of changes in coefficient of friction that occur either during the test or in a specific position in the sample, along with Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) and Optical Microscopy (OM) analyses, it was possible to characterize the effects of variations imposed on the tribo-system. The analyses indicate that both the increase of the normal force and the frequency induced the reduction of the friction coefficient. The wear rate decreased with increasing the normal force and increased with increasing frequency. The mechanism that governs the behavior of the tribo-system is the formation of tribo-layers, and in the tests with artificial saliva is the lubrication that it exerts on the contact between the two surfaces that determines the behavior. The experimental strategy, conception and development of the orthomicrotribometer, biological and mechanical representative parameterization, as well as its validation through the methodology development allowing the tribological characterization of orthodontic appliance, evidence that the developed orthomicrotribometer is a versatile equipment that allows different configurations of orthodontic components in an representative environment of the oral cavity as well as being a powerful tool in the development of new materials for wires and brackets.

Keywords: orthomicrotribometer, bracket, wire, saliva, coefficient of friction, triboscopy, tribo-layers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Atributos da curva de atrito. Adaptado de (BLAU, 2008).....	7
Figura 2.2 - Esquema de alguns micro-mecanismos encontrados no desgaste abrasivo. a) Microsulcamento. b) Microcorte. c) Microlascamento. Adaptado de (ZUM GAHR, 1987).....	8
Figura 2.3 - Configurações utilizadas em testes de desgaste por deslizamento. a) Disco-disco. b) Face-face. Pino ou esfera pressionado contra um disco em c) superfície plana, ou d) nas bordas. e) Bloco carregado contra anel. f) Pino ou esfera contra plano. Adaptado de (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).....	10
Figura 2.4 - Exemplo de imagem de triboscopia	11
Figura 2.5 - Relação de dias e taxa de movimentação dentária sob a ação de 125g de força contínua. Adaptado de (BURSTONE, 2002).....	14
Figura 2.6 - a) Geometria típica de um bráquete convencional. b) Posicionamento da ligadura elástica no bráquete (LÍDER, 2018; MORELLI, 2013).....	15
Figura 2.7 - a) Bráquete autoligável passivo. b) Bráquete autoligável ativo (ADITEK, 2017; ORTHODONTICS, 2018).....	15
Figura 2.8 - Disposição das amostras no ensaio de <i>fretting</i> . (1) fio (2) bráquete. Adaptado de (RAPIEJKO et al., 2009).....	17
Figura 2.9 - Comparação dos coeficientes de atrito médio para os diferentes pares em condições seca e com saliva artificial. Adaptado de (RAPIEJKO et al., 2009).	17
Figura 2.10 - Ensaio submerso em saliva realizado em máquina de tração. Adaptado de (PHUKAOLUAN et al., 2017)	18
Figura 2.11 - Esquema representativo do aparato de teste em tribômetro pino-disco. Adaptado de (ALFONSO et al., 2013).....	19
Figura 5.1 - Esquema do microtribômetro do LTM UFU. Adaptado de (DUTRA, 2017).....	26
Figura 5.2 - Disco com pino excêntrico e conjunto de guias. Adaptado de (DUTRA, 2017).	27
Figura 5.3 - Suporte com travamento do fio em V	28
Figura 5.4 - Suporte em U com parafuso que prende o fio por esmagamento	29
Figura 5.5 - a) Suporte de fixação do bráquete. b) Canaleta do suporte	29
Figura 5.6 - Cuba, suporte de fixação do fio e suporte do bráquete	30

Figura 5.7 - Posicionamento da sonda e resistência na cuba, componentes do controlador de temperatura da saliva artificial	31
Figura 6.1 - Suporte do bráquete.....	33
Figura 6.2 - Suporte em U com medidor de forças preso ao fio	34
Figura 6.3 - Ortomicrotribômetro com suporte em U (fixação do fio por parafuso) e suporte do bráquete	34
Figura 6.4 - Fluxograma do programa nivelamento.....	35
Figura 6.5 - Possíveis desníveis do suporte do fio a) h_1 menor que h_2 b) h_1 maior que h_2	36
Figura 6.6 - Fluxograma do programa deslizamento.....	37
Figura 6.7 - Imagem gerada com a técnica triboscopia.....	38
Figura 6.8 - Esquema da matriz usada para interpretar os dados na técnica triboscopia. Adaptado de (DOS SANTOS; COSTA; DE MELLO, 2015).....	38
Figura 6.9 - Gráfico 2D do coeficiente de atrito médio obtido a partir dos dados da matriz de triboscopia	39
Figura 7.1 - Fluxograma de efetivação dos testes do ortomicrotribômetro	40
Figura 7.2 - Curva de calibração do LVDT	41
Figura 7.3 - Curva de calibração do motor	41
Figura 7.4 - Dimensões de um bráquete da marca Morelli modelo Standard Edgewise. (Cotas em milímetros) (MORELLI, 2013)	43
Figura 7.5 - Canaleta do bráquete. a) Imagem obtida via MEV por elétrons secundários (SE). b) Imagem obtida via MEV por elétrons retro-espalhados (BSE)	43
Figura 7.6 - Análise EDS do espectro 1 da canaleta de bráquete não ensaiado. Encarte de maior ampliação da Figura 7.5b.....	44
Figura 7.7 - Imagens do fio não ensaiado. a) Imagem obtida via MEV SE. b) Imagem obtida via MEV BSE	45
Figura 7.8 - Análise EDS do espectro 2 do fio não ensaiado. Encarte de maior ampliação da Figura 7.7a	45
Figura 7.9 - Suporte em U de fixação do fio e sistema de tensionamento.....	46
Figura 7.10 - Sistema esticador do fio.....	47
Figura 7.11 - Porta-amostras com sistema tensionador do fio	47

Figura 7.12 - Esquema do aparato de teste do ortomicrotribômetro.....	48
Figura 7.13 - Componentes do sistema de controle de temperatura da saliva dentro da cuba. (1) Resistência elétrica e (2) sonda de temperatura tipo NTC.....	49
Figura 7.14 - Foto do ortomicrotribômetro.....	49
Figura 7.15 - a) Possível posicionamento do bráquete em suporte sem canaleta. b) Alinhamento do bráquete em suporte com canaleta	51
Figura 7.16 - Fluxograma da etapa 2 de alinhamento no eixo X	51
Figura 7.17 - a) Posicionamento do suporte do bráquete antes do alinhamento no eixo X. b) Posicionamento após o alinhamento no eixo X.....	52
Figura 7.18 - a) Suporte do fio desalinhado no eixo Y. b) Suporte alinhado após realizar etapa 1 de alinhamento no eixo Y.....	52
Figura 7.19 - Fluxograma da etapa 1 de alinhamento em Y.....	53
Figura 7.20 - Fluxograma da etapa 2 de alinhamento em Y.....	54
Figura 7.21 - a) Força em Y positiva. b) Força em Y negativa. c) Força em Y \cong zero	54
Figura 7.22 - Área de desgaste selecionada, em um dos lados do bráquete, via MO	55
Figura 8.1 - a) Bráquete usado em paciente por período de 2 anos, mostrando que o desgaste ocorre nas bordas 1 e 2, imagem obtida via MEV. b) Imagem com maior ampliação das bordas 1 e 2, obtida via MO.....	57
Figura 8.2 - Análise EDS do bráquete usado em paciente durante 2 anos, borda 1, sugerindo adesão do material do fio no bráquete. EDS dos espectros em amarelo 1 e 2.	58
Figura 8.3 - Análise EDS de um dos fios usado com o bráquete da Figura 8.1. EDS do espectro 3.	58
Figura 8.4 - a) Evolução típica do coeficiente de atrito ao longo do ensaio e posição da amostra. b) Evolução típica do coeficiente de atrito médio por ciclo. Ensaio de 0,5 Hz, 1 N, 26 metros	59
Figura 8.5 - Triboscopia dos ensaios realizados no ortomicrotribômetro. Parâmetros de cada teste indicados na imagem. Todas as imagens possuem a mesma escala de cores.	61
Figura 8.6 - Comportamento típico da repetibilidade dos ensaios, as três curvas correspondem a testes executados sob as mesmas condições (1 Hz e 1,5 N, a seco)	62
Figura 8.7 - Efeito dos parâmetros tribológicos impostos no coeficiente de atrito médio (regime permanente)	63

Figura 8.8 - Identificação das marcas de desgaste nos bráquetes ensaiados. Os números indicam os lados, e as setas as posições das marcas de desgaste. A canaleta possui borda interna e externa como indicado em amarelo	64
Figura 8.9 - Efeito dos parâmetros tribológicos impostos na taxa de desgaste do bráquete	64
Figura 8.10 - Seção transversal do bráquete (posição indicada em ampliação no canto superior direito), indicando a curvatura do bráquete e diferença de altura entre as bordas da canaleta	65
Figura 8.11 - Marca de desgaste centralizada em relação as paredes da canaleta	66
Figura 8.12 - Comportamento constante da força normal imposta a um ensaio de 1 N	66
Figura 8.13 - Influência da força normal no coeficiente de atrito médio.....	67
Figura 8.14 - Aspecto típico das marcas de desgaste do fio. a) Força normal de 0,5 N. b) Força normal de 1,5 N. Frequência de 1 Hz. Imagens obtidas via MEV SE. Encartes com aumento 250x maior que imagem principal. Setas vermelhas indicam ilhas/fragmentação de tribo-camadas, setas amarelas indicam sulcos/riscos.....	68
Figura 8.15 - Análise EDS, do fio ensaiado a 1 Hz e 1,5 N. EDS das regiões indicadas em amarelo na figura à esquerda (encarte de maior aumento da Figura 8.14b)	69
Figura 8.16 - Aspecto típico das marcas de desgaste do bráquete. a) Força normal de 0,5 N. b) Força normal de 1,5 N. Frequência de 1 Hz. Imagens obtidas via MEV BSE	70
Figura 8.17 - Análise EDS dos espectros em amarelo na Figura 8.16b	71
Figura 8.18 - Efeito da força normal na marca de desgaste do bráquete. a) Força normal de 0,5 N. b) Força normal de 1,5 N. Frequência de 1 Hz. As setas indicam o final da marca de desgaste. Imagens obtidas via MO	72
Figura 8.19 - Influência da força normal na taxa de desgaste do bráquete	72
Figura 8.20 - Influência da força normal no período de amaciamento.....	73
Figura 8.21 - Influência da frequência no coeficiente de atrito médio.....	74
Figura 8.22 - Efeito da frequência na morfologia do desgaste a) Bráquete ensaiado a 0,1 Hz. b) Bráquete ensaiado a 1 Hz. Força normal 0,5 N. Imagem obtida via MEV BSE.....	75
Figura 8.23 - Efeito da frequência na morfologia do desgaste a) Fio ensaiado a 0,1 Hz. b) Fio ensaiado a 1 Hz. Força normal 0,5 N. Imagem obtida via MEV BSE	76
Figura 8.24 - Análise EDS do bráquete ensaiado a 1 Hz e 0,5 N. EDS da região em amarelo na Figura 8.22b.....	76

Figura 8.25 - Efeito da frequência na marca de desgaste do bráquete. a) Frequência de 0,1 Hz. b) Frequência de 1 Hz. Força normal de 1,5 N. As setas indicam o final da marca de desgaste. Imagens obtidas via MO	77
Figura 8.26 - Influência da frequência na taxa de desgaste do bráquete	77
Figura 8.27 - Influência da frequência no período de amaciamento	78
Figura 8.28 - Efeito do ambiente no coeficiente de atrito. a) Ensaio a seco (ao ar). b) Imerso em saliva artificial. Ambos em mesma escala de cores.	80
Figura 8.29 - Comportamento do coeficiente de atrito médio em ensaio não lubrificado (a seco no ar) e imerso em saliva artificial	80
Figura 8.30 - Influência do ambiente no coeficiente de atrito médio, ensaio a 1 Hz 1,5 N....	81
Figura 8.31 - Efeito do ambiente de teste na morfologia do desgaste a) Bráquete. b) Fio. Ensaçados a 1 Hz 1,5N, imersos em saliva artificial. Imagens obtidas via MEV BSE e SE ..	81
Figura 8.32 - Análise EDS do bráquete ensaiado a 1 Hz e 1,5 N lubrificado com saliva. EDS das regiões em amarelo na Figura 8.31a.....	82
Figura 8.33 - Efeito do ambiente de teste na marca de desgaste do bráquete. a) Ensaio a seco b) Ensaio imerso em saliva artificial. Força normal de 1,5 N, frequência de 1 Hz. Imagens obtidas via interferômetro de luz branca	83
Figura 8.34 - Influência do ambiente na taxa de desgaste volumétrico do bráquete, ensaio a 1 Hz 1,5 N.....	83
Figura 8.35 - Influência do ambiente no período de amaciamento	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1 - Componentes do ortomicrotribômetro	33
Tabela 7.1 - Principais elementos químicos do aço 303Cu austenítico, % em peso, (MORELLI, 2018).....	42
Tabela 7.2 - Principais elementos químicos do aço 302 austenítico, % em peso, (MORELLI, 2018)	44
Tabela 8.1 - Principais elementos químicos do aço 17-4 PH, % em peso,(ORMCO, 2018).....	56
Tabela 8.2 - Configuração dos ensaios.....	60

LISTA DE SÍMBOLOS

AD/DA - Analógico-Digital/Digital-Analógico

ANSI - "*American National Standards Institute*" Instituto Nacional Americano de Padrões

ASTM - "*American Society for Testing and Materials*" Sociedade Americana para Testes e Materiais

ATM - Articulação Temporomandibular

DNA - "*DeoxyriboNucleic Acid*" Ácido Desoxirribonucleico

EDS - "*Energy Dispersive Spectroscopy*" Espectroscopia de Energia Dispersiva

F - Força de Atrito

F_x - Força na direção X

F_y - Força na direção Y

F_z - Força na direção Z

g - Unidade de medida para massa "grama"

Hz - Unidade de medida para frequência "Hertz"

I - Momento de inércia

keV - Unidade de Energia (kiloelétronVolt)

LTM - Laboratório de Tribologia e Materiais

LVDT - "*Linear Variable Differential Transformer*"

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

MO - Microscópio Ótico

N - Unidade de medida para força "Newton"

NTC - "*Negative Temperature Coefficient*"

PVD - "*Physical Vapor Deposition*" Deposição Física a Vapor

PZT - Piezelétrico

R - Raio da seção transversal do fio

rps - Rotações por segundo

SE - "*Secondary Electrons*" Elétrons Secundários

SiC - Carbetto de Silício

SiN - Nitreto de Silício

SS - "*Stainless Steel*" Aço Inoxidável

UFU - Universidade Federal de Uberlândia

V - Unidade de medida para tensão "Volts"

W - Força Normal

μ - Coeficiente de atrito

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 O ATRITO.....	5
2.2 MECANISMOS DE DESGASTE	7
2.2.1 Desgaste Abrasivo	7
2.2.2 Desgaste Adesivo	8
2.2.3 Desgaste Erosivo	9
2.2.4 Desgaste Corrosivo e Tribocorrosão.....	9
2.2.5 Desgaste por Fadiga de Contato.....	9
2.3 DESLIZAMENTO ALTERNADO.....	10
2.4 BIOTRIBOLOGIA BUCAL	12
2.5 ORTODONTIA	13
2.6 ESTUDOS DA INTERAÇÃO BRÁQUETE-FIO.....	16
CAPÍTULO 3 - OBJETIVO	21
3.1 OBJETIVO GERAL	21
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
CAPÍTULO 4 - DEFINIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE PROJETO.....	22
4.1 TIPO DO TESTE.....	22
4.2 AMOSTRAS.....	22
4.3 AMBIENTE.....	23
4.4 PARÂMETROS DO TESTE TRIBOLÓGICO.....	23
4.5 ALINHAMENTO	24
4.6 NIVELAMENTO	24
4.7 TENSIONAMENTO DO FIO.....	25
CAPÍTULO 5 - PROJETO E CONSTRUÇÃO DE MÓDULO ORTODÔNTICO.....	26
5.1 MOVIMENTO DE DESLIZAMENTO ALTERNADO	26

5.2	PORTA-AMOSTRAS	28
5.2.1	Fixação do Fio	28
5.2.2	Fixação do Bráquete	29
5.3	AMBIENTE.....	29
CAPÍTULO 6 - ASPECTOS CONSTRUTIVOS		32
6.1	MÓDULO	32
6.2	ROTINAS COMPUTACIONAIS.....	35
6.2.1	Programa Joystick	35
6.2.2	Programa Nivelamento	35
6.2.3	Programa Deslizamento.....	36
6.2.4	Programa Triboscopia.....	37
CAPÍTULO 7 - ANÁLISE DE DESEMPENHO.....		40
7.1	PREPARAÇÃO DO ORTOMICROTRIBÔMETRO	41
7.2	AMOSTRAS.....	42
7.2.1	Bráquete	42
7.2.2	Fio.....	44
7.3	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	46
7.4	FIXAÇÃO DAS AMOSTRAS	46
7.5	AMBIENTE.....	48
7.6	TENSIONAMENTO DO FIO.....	50
7.7	NIVELAMENTO	50
7.8	ALINHAMENTO	50
7.8.1	Eixo X	50
7.8.2	Eixo Y	52
7.9	ENSAIO TRIBOLÓGICO.....	54
7.10	TRIBOSCOPIA.....	55
7.11	CARACTERIZAÇÃO MICROSCOPICA.....	55
7.12	ANÁLISE DA ÁREA DESGASTADA.....	55
CAPÍTULO 8 - RESULTADOS E DISCUSSÕES		56

8.1	BRÁQUETE USADO <i>IN SITU</i>	56
8.2	ANÁLISE PRELIMINAR DOS ENSAIOS	59
8.3	INFLUÊNCIA DA FORÇA NORMAL	67
8.3.1	Análise do Coeficiente de Atrito	67
8.3.2	Análise do Desgaste	71
8.3.3	Análise do Amaciamento	73
8.4	INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE DESLIZAMENTO	74
8.4.1	Análise do Coeficiente de Atrito	74
8.4.2	Análise do Desgaste	77
8.4.3	Análise do Amaciamento	78
8.5	INFLUÊNCIA DO AMBIENTE DE TESTE	79
8.5.1	Análise do Coeficiente de Atrito	79
8.5.2	Análise do Desgaste	82
8.5.3	Análise do Amaciamento	84
	CAPÍTULO 9 - CONCLUSÕES	85
	CAPÍTULO 10 - SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	87
	CAPÍTULO 11 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
	ANEXOS.....	92
	ANEXO 1 – Suporte em U do fio.....	92
	ANEXO 2 – Suporte do bráquete	93
	ANEXO 3 – Tela do programa Joystick.....	94
	ANEXO 4 – Tela do programa Nivelamento	95
	ANEXO 5 – Tela do programa Deslizamento	96
	ANEXO 6 – Tela do programa Triboscopia	97

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Quando duas superfícies em contato são colocadas em movimento relativo, há uma resistência a este movimento chamada força de atrito. O atrito é na maioria das vezes indesejável, pois, quando presente, grande parte da energia empregada na movimentação dos componentes de sistemas mecânicos é dissipada. As articulações do corpo humano e dobradiças de uma porta são exemplos de sistemas que exigem baixa força de atrito para funcionamento satisfatório. Nestes casos, a redução do atrito levará a um aumento geral da eficiência do sistema. Há também situações onde o atrito é essencial, por exemplo, sistemas de freios, embreagens, movimento de rodas em uma superfície, e no contato entre o sapato e o chão ao caminhar, os quais só funcionam porque o atrito existe entre os componentes (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

A ortodontia é uma área da odontologia que tem como principal abordagem a movimentação dentária através da aplicação de forças com auxílio de dispositivos fixados aos dentes, com objetivos de melhora da saúde e estética. Modificar posições em uma arcada dentária significa lidar com um sistema complexo de forças que determinam alinhamento de oclusão, tempo de reparo ósseo com a movimentação, direções e posições dos dentes (FERREIRA, 2005).

A técnica mais utilizada na ortodontia para movimentação dos dentes consiste na instalação do aparelho fixo. Nesta, os bráquetes, que são pequenos suportes com canaleta para passagem de um fio, são colados nos dentes através de resinas apropriadas e não são removidos até o final do tratamento. O fio passa através dos bráquetes, dentro das canaletas, e são presos nestes por ligaduras elásticas, metálicas ou por sistema de bráquete autoligável. As forças biomecânicas exercidas pelo fio dentro da canaleta dos bráquetes sobre os dentes causam estímulos, de pequena amplitude e longa duração, que leva a movimentação do dente devido a remodelação óssea (GRABER; VANARSDALL, 1994; MALTAGLIATI, 2010; SMITH; BURSTONE, 1984).

O contato bráquete-fio é crítico na qualidade do tratamento ortodôntico. Quando este par apresenta elevado coeficiente de atrito, grande parte das forças impostas para movimentação dentária são dissipadas pelo atrito. Ao aumentar a força aplicada para suprir esta perda, os dentes sofrem uma sobrecarga, podendo causar absorção do osso e complicações clínicas prejudiciais à saúde bucal do paciente. O organismo interpreta estas sobrecargas como uma agressão e atua contra as modificações, diminuindo a eficiência da movimentação ortodôntica (SCHEMANN et al., 2012).

A reação dos tecidos devido a forças ortodônticas é uma abordagem de interesse de ortodontistas para que consigam uma configuração onde se aplica um sistema de força que, gere a máxima movimentação dos dentes com o mínimo dano aos processos alveolares (BURSTONE, 2002; STOREY, 1973).

Diversos testes que visam quantificar o coeficiente de atrito e desgaste em aparelhos ortodônticos, podem ser encontrados literatura. Estes tem como objetivo, dentre outros, analisar diferentes revestimentos aplicados nos itens ortodônticos, o estudo da influência dos tipos de ligas de fabricação dos itens, força normal aplicada, diferentes tipos de ligaduras, etc. Diferentes metodologias de testes são adotadas, dentre outras, testes em máquina de *fretting* (CLOCHERET et al., 2004; RAPIEJKO et al., 2009; WILLEMS et al., 2001), máquina de ensaio de tração (LOFTUS et al., 1999; MICHELBERGER et al., 2000; PACHECO et al., 2011; PHUKAOLUAN et al., 2017; REZNIKOV et al., 2010; STANNARD; GAU; HANNA, 1986) e utilizando tribômetro na configuração pino-disco (ALFONSO et al., 2013).

Os testes abordados na literatura falham no quesito representatividade do ambiente *in-situ*. Os realizados em máquinas de *fretting* impõem ao sistema uma alta energia, e a dissipação desta através de calor pode alterar os processos tribológicos que acontecem na área de contato do deslizamento entre bráquete e fio, a força de atrito e o desgaste passam então a não ser representativos do que ocorre com estes itens na boca. Os ensaios realizados em máquinas de tração quantificam apenas o momento inicial de movimento, os dados obtidos são dos primeiros momentos de deslizamento, no qual os resultados são influenciados pela contaminação e topografia das amostras, este intervalo conhecido como amaciamento deve ser desconsiderado em análises de coeficiente de atrito. Testes utilizando tribômetro na configuração pino-disco foram feitos fixando um fio ortodôntico na circunferência do disco e pinos confeccionados em materiais comumente usados na fabricação de bráquetes. O teste, por usar pinos com material similar ao bráquete, e não o próprio item ortodôntico, deixa de abordar a influência da geometria e dos métodos de fabricação das amostras nos ensaios.

Os tribômetros são equipamentos utilizados para estudos tribológicos com o intuito de acompanhar o desgaste e atrito de um tribo-sistema que, eventualmente, reproduz uma situação em campo. Os ensaios são realizados sob condições controladas permitindo

resultados em tempos significativamente menores que o necessário em campo. Construído visando a rigidez para evitar vibrações mecânicas, permite a fixação do par tribológico, controle e monitoramento de forças e posições (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2006; ZUM GAHR, 1987).

O movimento de deslizamento alternado, obtido por um dos tipos de tribômetros, é caracterizado pelo deslizamento entre duas superfícies em uma única direção, com um corpo fixo e o contra corpo em movimento relativo, o sentido do movimento muda continuamente com velocidade determinada pela frequência adotada. Este tipo de movimento apresenta acelerações positivas e negativas, com velocidade máxima no centro do movimento e próximo a zero nas extremidades. A principal característica dos ensaios de deslizamento alternado são as grandes forças de inércia devido a troca de sentido (WARD, 1970).

Utilizar componentes reais, no caso, o fio e o bráquete como amostras para o ensaio, e não amostras fabricadas apenas com as mesmas características de composição, permitem englobar nos resultados a influência da geometria, das dimensões e dos processos de fabricação dos mesmos. Em um teste tribológico representativo do ambiente bucal pode-se também, além do controle da temperatura, utilizar a saliva artificial para aproximar do meio encontrado na boca.

A confecção de um módulo integrante de um microtribômetro, para testes de dispositivos ortodônticos, denominado ortomicrotribômetro, que permita ensaios parametrizados de forma a representar o que acontece na boca, com movimentos também representativos, ou seja, em baixas cargas, baixas velocidades e amplitudes de deslizamento que minimizem o aumento de temperatura no contato, usando como amostra itens ortodônticos, bráquete e fio imersos em saliva aquecida, em movimento deslizante, se mostra ideal para caracterizar a tribologia do aparelho ortodôntico de forma mais próxima a situação real.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O nome tribologia vem do grego, *tribos* e significa roçar, atritar, esfregar, deslizar, assim sua tradução literária é ciência do atrito. É, portanto, definida como a ciência e tecnologia de superfícies interagindo em movimento relativo e das práticas e assuntos associados. O estudo da tribologia, envolve, além do atrito, o desgaste e a lubrificação. O desgaste é o principal responsável pela perda de desempenho mecânico e consumo de material em um sistema. O atrito é a principal causa de dissipação de energia. Portanto muitos estudos focam no controle do atrito. A lubrificação se mostra efetiva no controle do desgaste através da redução do atrito (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017; STACHOWIAK; BATCHELOR, 2006).

Os testes tribológicos visam entender o comportamento dos sistemas tribológicos. Para tal é necessária uma caracterização do contato tribológico, afim de simular em laboratório o que acontece na situação prática. A interação entre as superfícies dos materiais, em uma visão tribológica é complexa devido à quantidade de variáveis determinantes do sistema, sendo, portanto, um campo de estudo multidisciplinar (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

A tribologia possui caráter crucial na indústria atual, por estar diretamente ligada a economia de um país. Os custos que podem ser reduzidos e o aumento de segurança quando se tem conhecimento do comportamento do sistema a ser utilizado, é altamente significativo no mundo atual e compõem uma grande parcela do montante do PIB de um país. Jost (1966) produziu um relatório, para o governo inglês, no qual foi abordado, pela primeira vez, os impactos econômicos devido à utilização dos conhecimentos em tribologia, relatório este considerado um marco de criação da tribologia (BHUSHAN, 2013; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

2.1 O ATRITO

Quando duas superfícies em contato são colocadas em movimento relativo, há uma resistência a este movimento chamada força de atrito. Esta força é estabelecida por três leis: 1) a força de atrito é proporcional a força normal; 2) a força de atrito é independente da área aparente de contato; 3) a força de atrito é independente da velocidade de deslizamento. Estas leis possuem exceções para alguns casos (BHUSHAN, 2013; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

A definição de atrito aborda duas classes de movimento relativo: deslizamento e rolamento. Em ambos, uma força tangencial se faz necessária para a movimentação do corpo. A relação entre a força de atrito (F) e a força normal (W) é conhecida como coeficiente de atrito (μ), dada pela Eq.(2.1) (BHUSHAN, 2013; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

$$\mu = \frac{F}{W} \quad (2.1)$$

Em todos os modos de contato e movimento relativo, há mecanismos de dissipação de energia. A dissipação ocorre, principalmente, na forma de calor provocando o aumento da temperatura na interface, por deformação plástica, comum em metais e por comportamento viscoelástico no caso de polímeros. No atrito por deslizamento, a força de atrito tem origem, principalmente, em dois fatores: na força de adesão na área real de contato entre as duas superfícies, e a força de deformação, para sulcar/riscar as asperidades, de uma superfície mais dura em uma superfície com menor dureza. Na prática, estes dois mecanismos aparecem juntos (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

As superfícies dos materiais, em escala microscópica, mesmo polidas, apresentarão picos e vales. Quando duas superfícies são colocadas em contato, são estas asperidades que vão entrar em contato em um primeiro momento. A área de contato destas asperidades é denominada área de contato real, muito menor do que a área vista a olho nu como superfície, denominada área de contato aparente (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Com o movimento relativo, a morfologia da superfície muda rapidamente. Mesmo quantidades relativamente pequenas de desgaste podem alterar a topografia da superfície em uma microescala. Em alguns casos existe uma relação direta entre a força de atrito e a textura da superfície no contato inicial, mas essa relação rapidamente muda pois com a força normal e movimento relativo, a morfologia da superfície passa a ser determinada pelo desgaste, havendo transferência de material e formação de tribo-camadas (BLAU, 2008).

Quando duas superfícies estão em contato e em movimento relativo em presença de ar ou oxigênio, camadas de óxido podem se formar em poucos minutos nas superfícies. As

temperaturas locais influenciam fortemente a cinética de oxidação. Partículas de desgaste advindas de deformações e fraturas das asperidades da superfície, se aglomeram, são oxidadas e devido a continuidade do movimento relativo e pressão exercida na superfície, se forma uma tribo-camada. Este tribo-filme tem papel importante no comportamento do deslizamento. Em algumas situações, este tribo-filme separa as duas superfícies e há pouco ou nenhum contato metal-metal, reduzindo as forças de adesão na interface de contato. Por consequência, o coeficiente de atrito se torna menor, explicado pela baixa tensão cisalhante do tribo-filme ou porque sua elevada dureza limita o crescimento de junções (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017; LIM; ASHBY; BRUNTON, 1987).

A curva de coeficiente de atrito de um dado par tribológico, possui mudanças no seu decorrer. O período de amaciamento, mudança no coeficiente de atrito na fase inicial de um processo de desgaste em função do tempo, número de ciclos ou distância de deslizamento, corresponde ao tempo que o tribo-sistema requer para atingir o estado estacionário (BLAU, 2008).

Formas comuns da curva de evolução do coeficiente de atrito em função do tempo são abordadas na literatura e também os mecanismos mais prováveis de acontecer que determinam estas formas. Acontecem neste período transições naturais onde os materiais e o tribo-sistema mudam sem estímulo externo. Estas mudanças podem ser diferentes mesmo com ensaios sob as mesmas condições de teste, afetando a repetibilidade dos dados. As situações mais prováveis de acontecer, ocasionando transições na curva de evolução do atrito em ensaios de deslizamento, são: transferência de metal, formação/degradação de tribo-filmes, geração de debris e deterioração cíclica da superfície (BLAU, 1981, 2008).

O comportamento deste período de transição e sua duração, dependerão principalmente dos materiais deslizantes, da geometria de contato, do ambiente térmico e químico no contato e os parâmetros mecânicos impostos ao sistema (BLAU, 1981).

A Figura 2.1 mostra como uma curva de atrito pode ser analisada em função do comportamento do coeficiente de atrito.

A análise do período de amaciamento na curva de atrito requer atenção a três atributos em função do tempo, são eles: a forma geral da curva, que representa a tendência geral de um determinado sistema, a duração de certas características, que implica na velocidade em que os processos tendem para estado estacionário, e a duração da magnitude de flutuações, que reflete a estabilidade dos eventos em micro ou nanoescala e contribuem para o comportamento geral do atrito (BLAU, 2008).

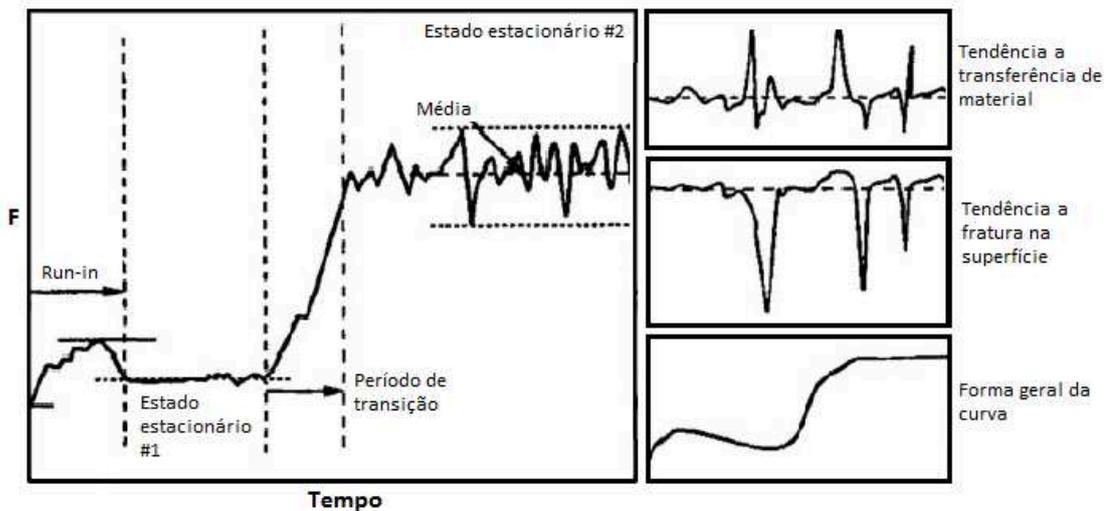


Figura 2.1 - Atributos da curva de atrito. Adaptado de (BLAU, 2008)

O atrito não é uma propriedade intrínseca ao material, este é dependente do sistema no qual se encontra os corpos. Portando a necessidade de controle rigoroso de todas as variáveis impostas em seu estudo, pois serão também determinantes na resposta (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Devido esta natureza sistêmica, diversos são os mecanismos que podem acontecer ao variar as configurações impostas ao movimento relativo, variando a resposta do material. Alguns exemplos são: deformações elásticas e/ou plásticas, transformações de fase, mudanças na microestrutura da superfície, na resposta mecânica do material, mudança na taxa de oxidação, de difusão, de adesão, dentre outros. Numerosas são as teorias que abordam a interação entre as superfícies dos materiais influenciando o coeficiente de atrito (BOWDEN; TABOR, 2001; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

2.2 MECANISMOS DE DESGASTE

O desgaste pode ser classificado em cinco tipos principais, que tem em comum a característica de remover material. São eles: abrasão, adesão, erosão, corrosão, fadiga de contato, dentre outros (DIN 50320, 1979).

2.2.1 Desgaste Abrasivo

Quando duas superfícies estão em movimento relativo, o desgaste abrasivo corresponde à perda de material devido principalmente à ação de asperidades duras de uma

das superfícies, ou de partículas soltas (partículas abrasivas), ou engastadas em uma das superfícies (BHUSHAN, 2013; JOST, 1966).

Estas asperidades ou partículas, na interação entre as superfícies provocam o surgimento de micro-mecanismos de abrasão. São eles i- microsulcamento, Figura 2.2a , no qual uma única interação da partícula abrasiva provoca deformações plásticas, com movimentação da matéria provocando um sulco com acúmulo de material frontal e lateral, não há perda de material. A remoção da matéria pode ocorrer neste tipo de micro-mecanismo quando muitas partículas abrasivas atuam simultânea ou sucessivamente, há uma sobreposição de eventos, provocando sucessivos eventos de microsulcamento; ii- microcorte, Figura 2.2b , deformação plástica lateral, com remoção de material formando microcavacos à frente da partícula ou asperidade causadora, promovendo um risco na superfície; e iii- microlascamento, Figura 2.2c, restrito a materiais frágeis, acontece quando as tensões impostas fazem com que o material exceda sua capacidade de resistir a formação e propagação de trincas, surgindo assim as microtrincas que induzem ao lascamento e destacamento de material (ZUM GAHR, 1987).

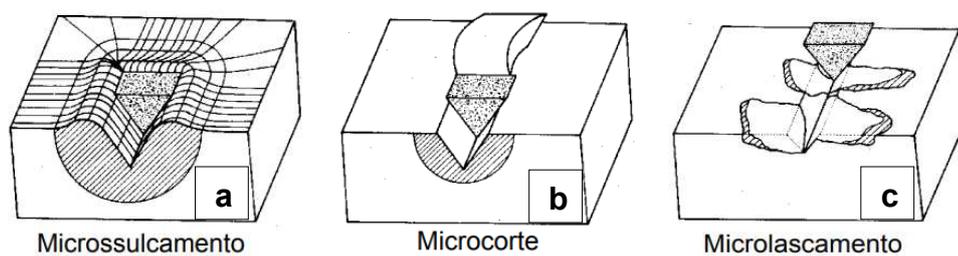


Figura 2.2 - Esquema de alguns micro-mecanismos encontrados no desgaste abrasivo. a) Microsulcamento. b) Microcorte. c) Microlascamento. Adaptado de (ZUM GAHR, 1987)

O desgaste abrasivo também pode ocorrer devido ao rolamento de partículas. Neste processo a região de contato entre a partícula abrasiva e a superfície de desgaste é continuamente mudada. As superfícies de desgaste são altamente deformadas, com a presença de indentações múltiplas, e com pouca ou nenhuma direcionalidade (TREZONA; ALLSOPP; HUTCHINGS, 1999).

2.2.2 Desgaste Adesivo

Desgaste devido a junção localizada de matéria, levando a transferência de material de uma superfície para a outra, ou perda em uma delas. Ocorre na fase inicial do processo de desgaste, onde o contato entre as asperezas é mais intenso e surgem forças de interação

atômica não negligenciáveis. Quando há a estabilidade entre forças repulsivas e atrativas, estas asperezas em contato encontram-se aderidas (soldadas) (ZUM GAHR, 1987).

2.2.3 Desgaste Erosivo

Ocorre quando partículas sólidas, com pequena massa unitária, porém grande velocidade, impingem a superfície. Há perda progressiva do material original, devido à exposição contínua a estes impactos. O desgaste dependerá principalmente da velocidade e ângulo de impacto e tamanho da partícula erosiva (BHUSHAN, 2013).

Este mecanismo é comum em indústrias de beneficiamento de minério, ventiladores, acessórios (válvulas, conexões, etc.), em bocais de foguetes, motores de helicópteros que operam em terrenos com poeira, dentre outros.

2.2.4 Desgaste Corrosivo e Tribocorrosão

Desgaste corrosivo, acontece quando as superfícies em contato e movimento relativo interagem com o meio em que se encontram, sendo este meio corrosivo, podendo ser gasoso ou líquido. Nestas superfícies, ocorre constantemente formação e remoção de filmes e a cinética deste processo determinará o desgaste (ZUM GAHR, 1987).

A tribocorrosão é uma transformação irreversível do material, interações físico-químicas e mecânicas acontecem em conjunto na superfície, portanto é uma combinação de desgaste corrosivo com desgaste mecânico. Neste caso o desgaste expõe as superfícies dos metais deixando-as mais reativas e sensíveis aos meios que se encontram, acelerando o processo de corrosão (LANDOLT et al., 2004).

2.2.5 Desgaste por Fadiga de Contato

Caracterizado por formação de trincas e destacamentos de material devido a cargas cíclicas na superfície. As tensões de cisalhamento cíclicas concentradas na subsuperfície de contato podem interagir com alguma inclusão da microestrutura ou outros defeitos advindos de outros processos, sendo este o ponto inicial de deformação localizada. A partir deste ponto, pode se formar uma trinca que será nucleada e se propagará pelo material até a superfície. Com a continuidade desse processo, devido ao carregamento ou movimento cíclico, há o desprendimento de um volume do material, formando uma cratera. Movimentos de rolamento e deslizamento cíclicos também podem ocasionar uma tensão cíclica induzindo este tipo de desgaste (ZUM GAHR, 1987).

2.3 DESLIZAMENTO ALTERNADO

Os tribômetros são equipamentos utilizados para estudos tribológicos com o intuito de avaliar o desgaste e atrito de um tribo-sistema que reproduz, eventualmente, uma situação em campo. Os ensaios são realizados sob condições controladas permitindo resultados de desgaste em curto tempo. Construído visando a rigidez para evitar vibrações mecânicas, permite a fixação do par tribológico, controle e monitoramento de forças e posições (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2006; ZUM GAHR, 1987).

Ao caracterizar o tipo de desgaste que ocorre nas amostras de campo, o tipo de tribômetro pode ser escolhido. Há o controle do movimento pertinente de cada tribômetro e da força normal que é aplicada ao par tribológico, sendo obtidas informações da magnitude da força de atrito. As configurações do par tribológico mais comuns podem ser agrupadas como conformes, com corpos tipo disco-disco (a) ou face-face (b), e não-conformes como pino ou esfera pressionado contra um disco, seja na superfície plana (c), ou nas bordas (d), bloco carregado contra anel (e) e pino ou esfera contra plano em movimento linear (f), vistas na Figura 2.3 (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

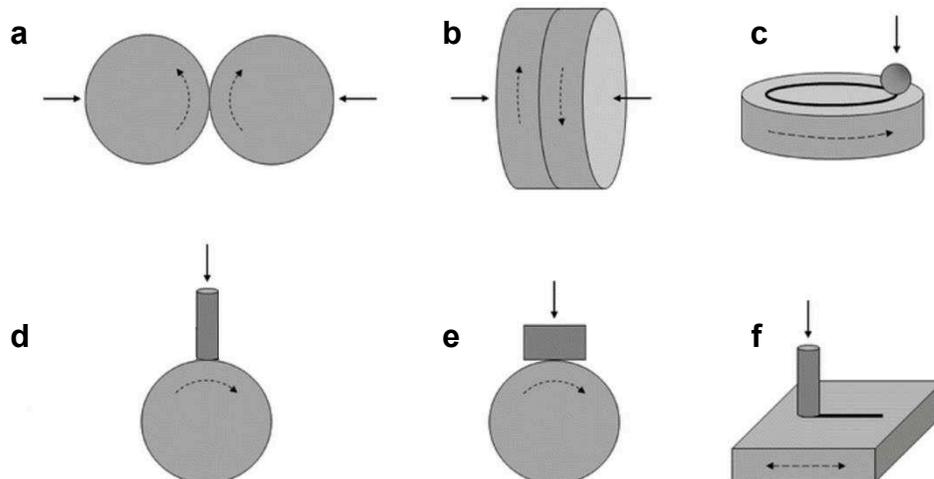


Figura 2.3 - Configurações utilizadas em testes de desgaste por deslizamento. a) Disco-disco. b) Face-face. Pino ou esfera pressionado contra um disco em c) superfície plana, ou d) nas bordas. e) Bloco carregado contra anel. f) Pino ou esfera contra plano. Adaptado de (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017)

O movimento de deslizamento alternado, é caracterizado pelo deslizamento entre duas superfícies em uma única direção, com um corpo fixo e o contra corpo em movimento relativo, o sentido do movimento muda continuamente com velocidade determinada pela frequência

adotada. Este tipo de movimento apresenta acelerações positivas e negativas, com velocidade máxima no centro do movimento e próximo a zero nas extremidades. A principal característica dos ensaios de deslizamento alternado são as grandes forças de inércia devido a troca de sentido (WARD, 1970). Para realizar este tipo de movimento com parâmetros controlados, utiliza-se principalmente a configuração ou pino ou esfera contra plano mostrada na Figura 2.3f.

Após aquisição dos valores de força de atrito obtidos através da realização de ensaios de deslizamento, a técnica denominada triboscopia pode ser utilizada como ferramenta de análise qualitativa dos resultados. É um recurso computacional que gera imagens numéricas dos sinais adquiridos nos ensaios sendo uma representação tridimensional da variação dos parâmetros físicos. No eixo X apresenta a distância percorrida, número de ciclos ou tempo, no eixo Y o posicionamento na extensão da amostra e no eixo Z informações do coeficiente de atrito ou força de atrito, em função dos dois outros eixos, como mostra Figura 2.4. Esta técnica possibilita rápida identificação visual de variações instantâneas que podem ocorrer seja no decorrer do ensaio ou em uma posição específica da amostra (DOS SANTOS; COSTA; DE MELLO, 2015).

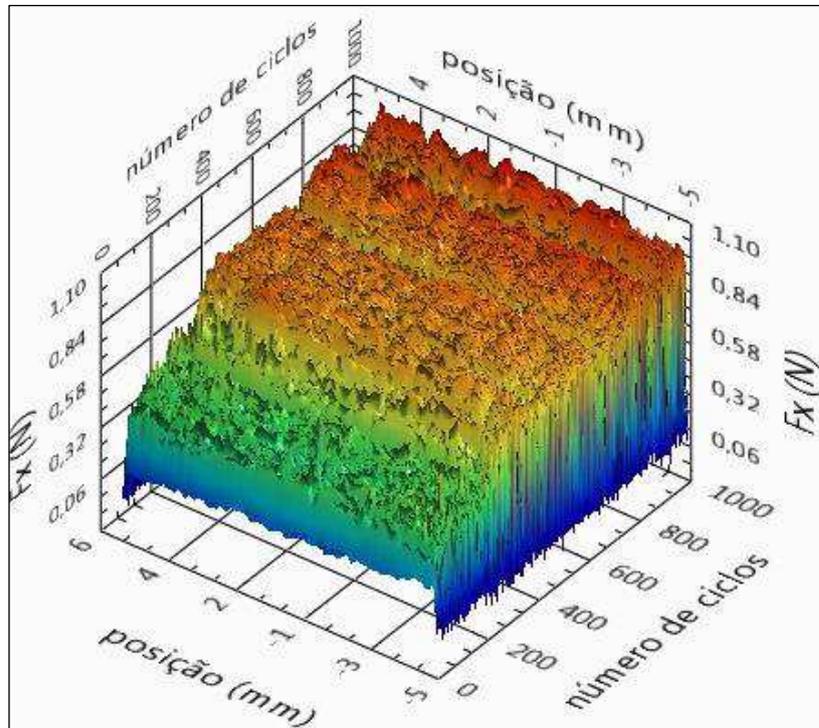


Figura 2.4 - Exemplo de imagem de triboscopia

2.4 BIOTRIBOLOGIA BUCAL

A cavidade oral é a primeira parte do sistema digestivo. É através dela que entra os alimentos e começa o processo de digestão. Faz parte também do sistema de produção de som, voz e da respiração. Tem como contorno os vestíbulos superior e inferior, que é o espaço entre os dentes, gengivas e os lábios (SEELEY; STEPHENS; TATE, 2011; VELAYOS; SANTANA, 1997).

O sistema mastigatório é composto pelos dentes e as estruturas que os suportam, pelo maxilar, mandíbula, músculos inseridos na mandíbula, articulação temporomandibular (ATM), lábios, língua, sistema vascular e nervoso dos tecidos e participantes da mastigação. Esse conjunto visa cortar e triturar o alimento preparando-o para a deglutição. Com o alimento reduzido a partículas, se junta à saliva que possui ação misturadora formando o bolo alimentar (SEELEY; STEPHENS; TATE, 2011).

A cavidade oral é um ambiente quente, úmido e rico em nutrientes, sua temperatura é de $36,8 \pm 0,4$ °C (LONGO et al., 2012). Em constante exposição a mudanças físicas e químicas, o ambiente bucal é alterado através da ingestão de alimentos, líquidos, medicamentos dentre outros, que alteram temperatura, pH, quantidade de saliva, flora bacteriana, atividade enzimática, proteínas, etc. Mudanças físicas como forças mecânicas variam de acordo com a comida consumida, mordida e transtornos funcionais como o bruxismo (SAJEWICZ; KULESZA, 2007; UPADHYAY et al., 2006).

A saliva, constituída principalmente de água, enzimas, minerais e aminoácidos, age como um tampão fisiológico eliminando o excesso de ácido ou base mantendo o pH. Assim a saliva tem diversas funções: ação antimicrobiana, percepção gustativa dos alimentos, neutralização, digestão, lubrificação, e limpeza da boca. Desta forma o sistema mastigatório possui aspectos biomecânicos, bacteriológicos e enzimáticos, com reações mecânicas, térmicas e químicas. Sendo que todos estes processos variam com fatores como idade, patologias e hábitos (SAJEWICZ; KULESZA, 2007; SOUSA, 2015; UPADHYAY et al., 2006).

Os dentes e quaisquer componentes metálicos usados na cavidade bucal irão sofrer danos devido aos processos químicos e eletroquímicos, causando desgaste corrosivo, ocasionados por agentes naturais como água, saliva, alimentos, bebidas dentre diversos outros, resultando em dissolução parcial ou completa, em deterioração ou enfraquecimento das estruturas atacadas (MENEZES; FREITAS; GONÇALVES, 2009; UPADHYAY et al., 2006).

A liberação de materiais de itens instalados na boca ocorre não somente em processo de corrosão. Os materiais utilizados na ortodontia, em principal os metais, são foco de diversos estudos devido à liberação de componentes e íons no organismo, que podem causar

efeitos adversos como irritação, inflamação e o aumento da concentração iônica no corpo. Alguns desses íons metálicos possuem potencial genotóxico, citotóxico e carcinogênico. Um exemplo são os metais níquel e cromo que podem ser liberados de aparelhos ortodônticos causando quebras do DNA de células da mucosa bucal (MENEZES; FREITAS; GONÇALVES, 2009; RAPIEJKO et al., 2009).

2.5 ORTODONTIA

A ortodontia é uma área da odontologia que tem como principal abordagem a movimentação dentária através da aplicação de forças com auxílio de dispositivos fixados aos dentes, com objetivos de melhora da saúde e estética. Modificar posições em uma arcada dentária significa lidar com um sistema complexo de forças que determinam alinhamento de oclusão, tempo de reparo ósseo com a movimentação, direção e posições dos dentes (FERREIRA, 2005).

A taxa de movimentação dentária é dada pelo deslocamento dos dentes, em milímetros, pelo tempo necessário para esta movimentação, dado em dias ou semanas. Há uma dificuldade considerável quando se tenta relacionar força aplicada com movimento dentário desejado, pois são inúmeras as variáveis intrínsecas biológicas que podem influenciar a taxa de movimentação, assim se tem apenas uma estimativa de força atuante e deslocamento obtido. Algumas destas forças que influem na movimentação, são as forças dos tecidos conjuntivos circundantes (gengiva, força da língua, fibras transeptais) e dos músculos da mastigação (BURSTONE, 2002; FERREIRA, 2005).

A Figura 2.5 mostra o comportamento da taxa movimentação em dias de um dente no qual foi instalado aparelho ortodôntico fixo com uma força de aproximadamente 125g (BURSTONE, 2002).

A movimentação dentária pode ser dividida em três fases:

1) Fase inicial – rápida movimentação em curto período de tempo, movimentação imediata ao aplicar a força, esta fase dura poucos dias.

2) Fase de redução – nesta fase o dente não se move, ou o faz com uma taxa de deslocamento muito baixa. Neste período está ocorrendo a hialinização do ligamento periodontal, o movimento não ocorre até que a área hialinizada seja removida pela atividade celular.

3) Fase de aumento – a taxa de movimentação volta a aumentar gradativamente.

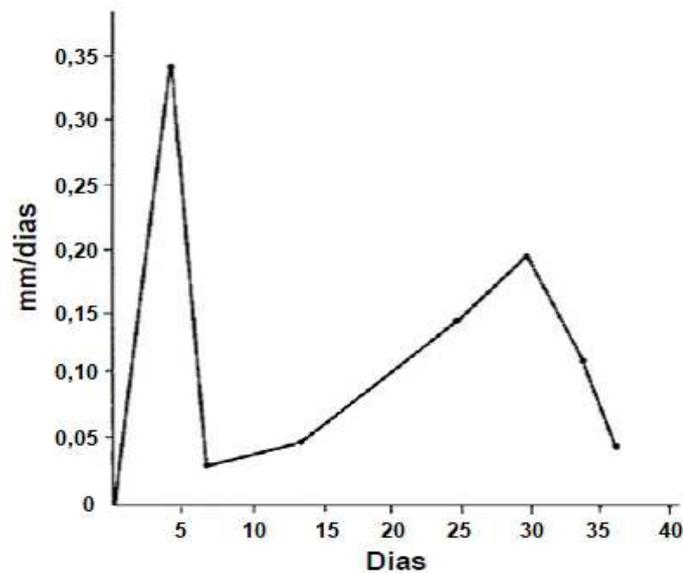


Figura 2.5 - Relação de dias e taxa de movimentação dentária sob a ação de 125g de força contínua. Adaptado de (BURSTONE, 2002)

A reação dos tecidos devido a forças ortodônticas é uma abordagem de interesse de ortodontistas para que consiga uma configuração onde se aplica um sistema de força que gere a máxima movimentação dos dentes com o mínimo dano aos processos alveolares (BURSTONE, 2002; STOREY, 1973).

A movimentação dentária seja em virtude de forças fisiológica seja por forças extrínsecas, advindas de componentes ortodônticos, é obtida através de alterações tissulares dadas pelas atividades das células nas estruturas de suporte dos dentes. As mudanças histológicas que ocorrem em consequência destas atividades, são as mesmas em mudanças fisiológicas e por ação de forças ortodônticas, o que as diferencia é o tempo necessário para formação óssea. Quando se tem uma tensão trativa devida a mudanças fisiológicas, 4 a 5 dias são necessários para que haja formação óssea, enquanto que a mesma configuração em forças ortodônticas é necessário de 8 a 10 dias, isto porque nesta última os dentes se movem rapidamente causando mudanças abruptas tissulares, de recuperação mais lenta (BURSTONE, 2002).

A técnica mais utilizada na ortodontia para movimentação dos dentes consiste na instalação do aparelho fixo. Nesta, os bráquetes, que são pequenos suportes com canaleta para passagem de um fio, são colados nos dentes por meio de resinas apropriadas e não são removidos até o final do tratamento. O fio passa através dos bráquetes, dentro das canaletas, e é preso nestes por ligaduras elásticas, metálicas ou por sistema de bráquete autoligável, o qual possui fechamento da canaleta através de um *clip* que prende o fio dentro desta. As forças biomecânicas exercidas pelo fio dentro da canaleta dos bráquetes, sobre os dentes,

causam estímulos, de pequena amplitude e longa duração, que leva a movimentação dentária devido a remodelação óssea. A Figura 2.6a mostra a geometria de um bráquete e a Figura 2.6b como a ligadura elástica mantém o fio dentro da canaleta (GRABER; VANARSDALL, 1994; MALTAGLIATI, 2010; SMITH; BURSTONE, 1984).

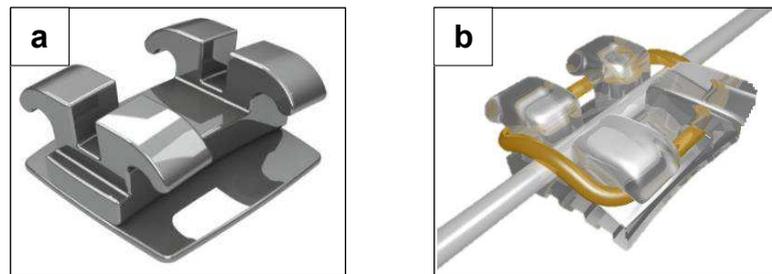


Figura 2.6 - a) Geometria típica de um bráquete convencional. b) Posicionamento da ligadura elástica no bráquete (LÍDER, 2018; MORELLI, 2013)

Os bráquetes autoligáveis podem ser passivos ou ativos, neste primeiro a canaleta não tem sua área alterada, o *clip* se fecha e o fio tem maior liberdade de movimento como mostrado na Figura 2.7a. No modo ativo o *clip* adentra a região onde o fio passa, diminuindo a área livre, pressionando o fio contra o fundo da canaleta como mostra Figura 2.7b.

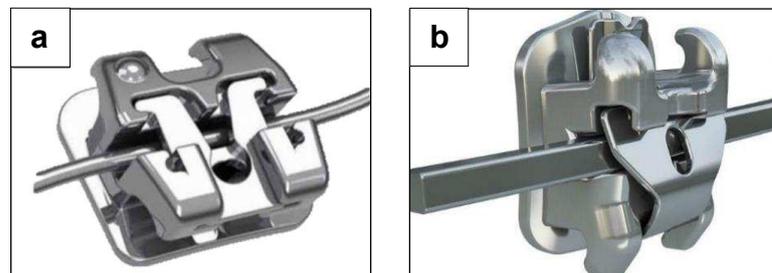


Figura 2.7 - a) Bráquete autoligável passivo. b) Bráquete autoligável ativo (ADITEK, 2017; ORTHODONTICS, 2018)

Um estudo realizado por Barbosa (2014) mostra que aparelhos com ligaduras elásticas geram uma força de 125 g a 152 g, amarrações metálicas aproximadamente 97 g e os aparelhos autoligáveis com bráquete ativa em torno de 54 g enquanto que os autoligáveis passivos forças de 0,25 g.

O fio é o responsável pela aplicação da carga que movimenta os dentes. Devido a sua importante participação, vários fatores devem ser considerados no seu estudo e escolha, são eles: propriedades mecânicas, secção transversal, composição do material de fabricação,

características e tratamentos superficiais, interação do material do bráquete e do fio (interface), curvatura do arco, entre outros (SCHEMANN et al., 2012).

O contato bráquete-fio é crítico na qualidade do tratamento ortodôntico. Quando este par apresenta elevado coeficiente de atrito, grande parte das forças impostas para movimentação dentária são dissipadas pelo atrito. Ao aumentar a força aplicada para suprir esta perda, os dentes sofrem uma sobrecarga, podendo causar absorção do osso e complicações clínicas prejudiciais à saúde bucal do paciente. O organismo interpreta estas sobrecargas como uma agressão e atua contra as modificações, diminuindo a eficiência da movimentação ortodôntica (SCHEMANN et al., 2012).

2.6 ESTUDOS DA INTERAÇÃO BRÁQUETE-FIO

Na literatura encontra-se diversos testes com o objetivo de quantificar o coeficiente de atrito em aparelhos ortodônticos. Diversos são os parâmetros analisados, por exemplo, diferentes revestimentos aplicados nos itens ortodônticos, influência dos tipos de ligas de fabricação dos itens, força normal, diferentes tipos de ligaduras, etc. Diferentes metodologias de testes são adotadas, dentre outras, testes em máquina de *fretting* (CLOCHERET et al., 2004; RAPIEJKO et al., 2009; WILLEMS et al., 2001), máquina de ensaio de tração (LOFTUS et al., 1999; MICHELBERGER et al., 2000; PACHECO et al., 2011; PHUKAOLUAN et al., 2017; REZNIKOV et al., 2010; STANNARD; GAU; HANNA, 1986) e utilizando tribômetro na configuração pino-disco (ALFONSO et al., 2013).

Rapiejko et al (2009) realizaram testes em máquina de *fretting* para investigar o desgaste por deslizamento no contato bráquete-fio. O objetivo do teste era analisar a melhora da resposta da superfície, em termos de resistência química e à corrosão eletroquímica, bem como a resistência ao desgaste e redução do atrito, depositando camadas de SiC e SiN em aço inoxidável austenítico 304, via deposição física de vapor (PVD). Uma vez que estas camadas podem reduzir o desgaste.

A carga adotada nesses testes foi de 5 N. Com o objetivo de aumentar a cinética do desgaste, os testes iniciaram em condições secas (sem o uso de saliva artificial), e na sequência houve a imersão em saliva artificial. Uma bomba peristáltica foi utilizada para manter circulação da saliva, mantida a 37 °C. Foram feitos testes com as seguintes configurações: SS-SS, SS-SiC, SS-SiN, SiN-SiC. Onde SS é aço inoxidável. Os testes foram elaborados combinando pequenos movimentos alternativos senoidais (com amplitudes de $\pm 50 \mu\text{m}$ e frequência de 5 Hz, com 432.000 ciclos) e lento movimento linear de 1 mm, simulando desta forma o deslocamento dos dentes. A força de atrito foi adquirida durante os testes. O bráquete foi fixado com resina em um suporte acoplado ao equipamento, sendo esta a parte

fixa, e o fio que se deslocando produzindo o movimento relativo, como mostrado na Figura 2.8.

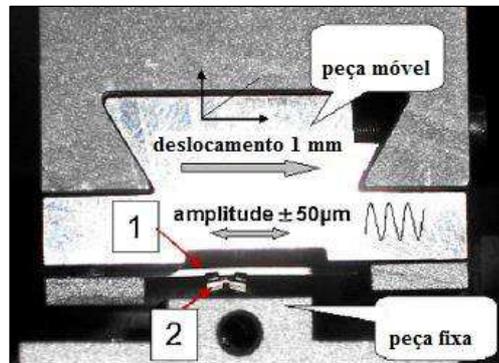


Figura 2.8 - Disposição das amostras no ensaio de *fretting*. (1) fio (2) bráquete. Adaptado de (RAPIEJKO et al., 2009)

O conjunto de dados adquiridos nos ensaios possibilitou a análise do atrito e desgaste das diferentes configurações de amostras. A Figura 2.9 mostra um dos gráficos obtidos comparando o coeficiente de atrito médio obtido em cada revestimento sob condições seca e com saliva artificial.

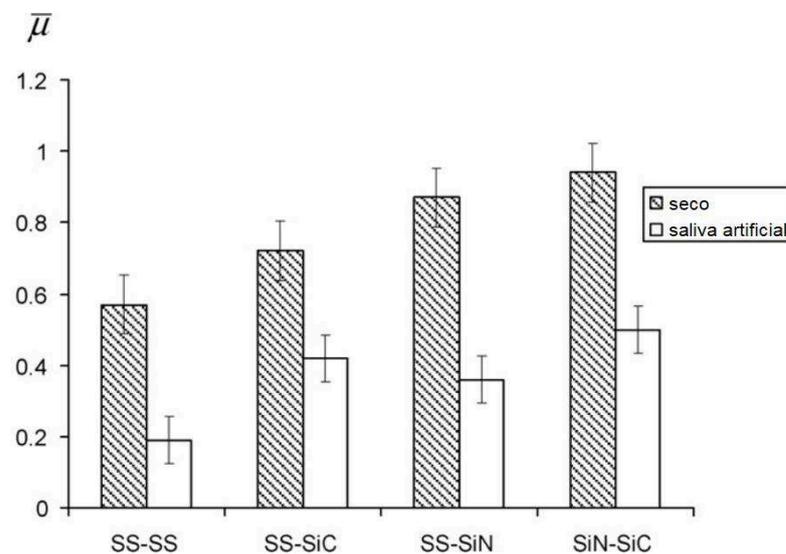


Figura 2.9 - Comparação dos coeficientes de atrito médio para os diferentes pares em condições seca e com saliva artificial. Adaptado de (RAPIEJKO et al., 2009).

Nestes ensaios a amplitude do movimento alternado com a frequência adotada, proporcionam ao sistema alta energia cinética, ocasionando aumento da temperatura e mudanças físicas e químicas da superfície. A taxa de troca de calor do ensaio não se dá de

maneira próxima a que ocorre na boca, podendo modificar o processo de desgaste, não sendo representativo do ambiente bucal.

O estudo de Phukaoluan et al. (2017) teve como objetivo comparar as forças de atrito entre bráquete de aço inox e cinco fios de diferentes ligas, em meio seco e imerso em saliva artificial. Forças de atrito cinética e estática foram obtidas com um equipamento adaptado.

Os testes foram feitos em uma máquina de tração submersos em saliva artificial de pH 5,35 e temperatura 37 ± 1 °C. O fio foi colocado verticalmente e o deslizamento ocorreu em 3 mm do comprimento do mesmo. A Figura 2.10 mostra como foi realizada a montagem.

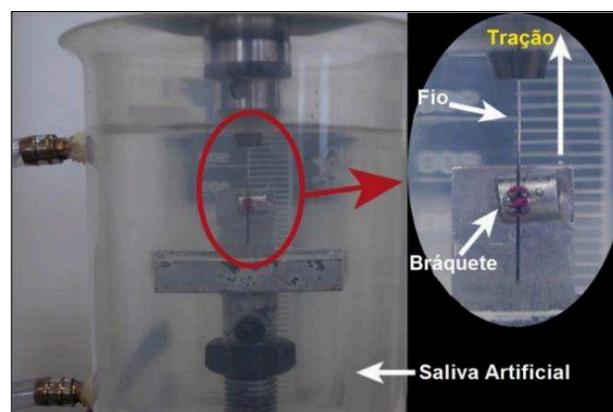


Figura 2.10 - Ensaio submerso em saliva realizado em máquina de tração. Adaptado de (PHUKAOLUAN et al., 2017)

O ensaio em máquina de tração não proporciona dados relativos ao real coeficiente de atrito entre bráquete e fio, pois o movimento de deslizamento é executado apenas uma vez, a aquisição dos dados é feita enquanto os aspectos superficiais como contaminação e topografia das amostras ainda estão influenciando fortemente os resultados.

Alfonso et al. (2013) realizaram testes com o objetivo de verificar a influência de fios ortodônticos de diferentes ligas no coeficiente de atrito e taxa de desgaste, entre o fio e materiais usados na fabricação de bráquetes. A geometria, dimensões e rugosidade (poliu-se as amostras com pó de diamante) dos fios eram similares, o que os diferenciava era a dureza.

Em um tribômetro pino-disco, o pino foi substituído pelo fio. O fio foi fixado com cianocrilato no suporte como mostrado na Figura 2.11. O plano de contato do fio com o disco estava na direção longitudinal para simular o contato completo entre fio e bráquete. O tribômetro foi imerso em recipiente contendo saliva a 37 °C.

O disco foi submetido a velocidade angular de 0,524 rad/s e uma força normal de 10 N com a intenção de garantir o contato total entre as superfícies.

O coeficiente de atrito cinético foi determinado e a taxa de desgaste do fio ortodôntico contra materiais comumente usados em bráquetes foi também medida. As amostras foram pesadas antes e após o ensaio para determinar a massa perdida e assim quantificar o desgaste. Os dados coletados foram aplicados em análises estatísticas com o objetivo de verificar a diferença entre os grupos de amostras.

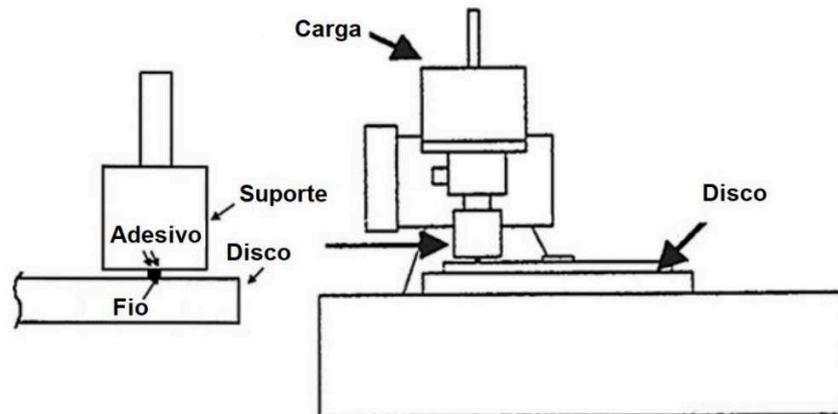


Figura 2.11 - Esquema representativo do aparato de teste em tribômetro pino-disco. Adaptado de (ALFONSO et al., 2013)

A aquisição do coeficiente de atrito utilizando configuração fio-disco não leva em conta a influência do processo de fabricação dos bráquetes. A representação do bráquete apenas através do seu material não aborda também a influência de sua geometria, pontos de contatos na canaleta e dimensões desta.

Os testes abordados na literatura falham no quesito representatividade do ambiente *in-situ*. Os realizados em máquinas de *fretting* impõem ao sistema uma alta energia, e a dissipação desta através de calor pode alterar os processos tribológicos que acontecem na área de contato do deslizamento entre bráquete e fio, a força de atrito e o desgaste passam então a não ser representativos do que ocorre com estes itens na boca. Os ensaios realizados em máquinas de ensaio de tração quantificam apenas o momento inicial de movimento, os dados obtidos são dos primeiros momentos de deslizamento, nos quais os resultados são influenciados pela contaminação e topografia das amostras, este intervalo conhecido como amaciamento deve ser desconsiderado em análises de coeficiente de atrito. Testes utilizando tribômetro na configuração pino-disco adotaram um disco com os mesmos materiais de bráquetes, o teste deixa de abordar a influência da geometria e dos métodos de fabricação das amostras.

Assim objetiva-se com este trabalho a elaboração de um teste parametrizado de forma a representar o que acontece na boca, com movimentos também representativos, ou seja, em

baixas velocidades e amplitudes de deslizamento que minimizem o aumento de temperatura no contato. Usando como amostra itens ortodônticos, bráquete e fio, em movimento deslizante, permitindo assim uma análise tribológica do processo e determinação do coeficiente de atrito de forma mais próxima a situação real.

CAPÍTULO III

OBJETIVO

3.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é a concepção e fabricação de um ortomicrotribômetro. Este consiste em um módulo do equipamento microtribômetro instrumentado, de forma a permitir a análise tribológica de dispositivos utilizados na ortodontia. Espera-se, ainda, desenvolver uma metodologia permitindo caracterizar a tribologia do aparelho ortodôntico.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificação das características essenciais para o projeto do ortomicrotribômetro
- Concepção e fabricação do ortomicrotribômetro
- Aquisição do coeficiente de atrito entre bráquete e fio em ambiente representativo bucal
- Estudar o movimento, desgaste, reações e interações que ocorrem entre um bráquete e fio de aparelhos ortodônticos

CAPÍTULO IV

DEFINIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE PROJETO

Através da revisão bibliográfica, foram identificadas as características essenciais para o projeto do ortomicrotribômetro.

4.1 TIPO DO TESTE

A análise bibliográfica evidenciou que os tipos de testes usualmente adotados falham no quesito representatividade dos fenômenos *in-situ*. Assim, a proposta para o teste de atrito entre fio e bráquete são ensaios de deslizamento alternado de baixa frequência e grande amplitude com os próprios itens ortodônticos. Nos quais uma força normal é aplicada nas amostras, desta forma os testes se aproximam mais da situação real que acontece na boca do paciente.

A construção de um módulo ortodôntico do microtribômetro, o ortomicrotribômetro, que permita ensaios com aplicação de baixas cargas, baixas frequências, grandes amplitudes de deslizamento e imersos em saliva artificial aquecida, se mostra ideal para a representatividade e proporcionará um mecanismo de degradação semelhante ao real.

4.2 AMOSTRAS

Utilizar componentes reais, no caso, o fio e o bráquete como amostras para os ensaios, e não amostras fabricadas apenas com as mesmas características de composição, permitem englobar nos resultados a influência da geometria, das dimensões e dos processos de fabricação dos mesmos. Ao se produzir uma amostra específica com mesma composição, este tipo de informação é perdida, e pode comprometer os resultados ao não ser considerada a situação real. Com ênfase neste tipo de teste, no qual as dimensões das peças são

reduzidas, o encaixe do fio e também a relação de tamanho entre canaleta do bráquete e espessura do fio possuem grande influência nos resultados.

Portanto, é mandatário que sejam utilizados os componentes reais para os testes, obtendo assim maior similaridade com a situação real.

Para a análise de desempenho do equipamento, apenas um tipo de par bráquete-fio é suficiente, pois, o principal interesse é a construção e análise do desempenho do equipamento e não a comparação entre diferentes tipos de fios e bráquetes. Portanto, a escolha é por um par que facilite a fixação e análise das marcas de desgaste e que seja, financeiramente, viável.

4.3 AMBIENTE

Em um teste tribológico representativo do ambiente bucal pode-se utilizar a saliva artificial aquecida para aproximar do meio encontrado na boca.

No caso de testes de deslizamento, a saliva altera tanto os mecanismos de desgaste, como a interação dos corpos e contra-corpos durante movimento relativo, modificando o coeficiente de atrito. Na caracterização da interação bráquete-fio se faz necessário, portanto, ensaios em meio lubrificado por saliva artificial.

A temperatura como visto no capítulo II pode influenciar a força de atrito. Manter a saliva durante o teste em temperatura próxima à da boca permite maior aproximação do ambiente *in-situ*. É indispensável que os testes lubrificados em saliva possuam sistema de controle de temperatura que mantenha a saliva entre 36,4 °C e 37,2 °C, variações possíveis de encontrar no ambiente bucal (LONGO et al., 2012).

4.4 PARÂMETROS DO TESTE TRIBOLÓGICO

A escolha de parâmetros como força normal e frequência do movimento alternado impostos nas amostras são fatores primordiais e que podem influenciar os resultados. Como visto no capítulo II, estes podem modificar a temperatura na interface, o contato entre as asperezas das superfícies, dentre outros fatores.

A escolha dos parâmetros adotados nos testes apresentados neste estudo, foi obtida através de estudo bibliográfico com a intenção de se aproximar o máximo possível dos valores de força e frequência observados em aparelhos ortodônticos instalados na boca.

A força normal aplicada foi escolhida observando os valores reais de carga para alguns tipos de aparelho com o intuito de verificar a versatilidade do ortomicrotribômetro. Como abordado anteriormente, aparelhos com ligaduras elásticas geram uma força de 125 g a 152 g, ou seja, aproximadamente, 1,5 N. Com amarrações metálicas, em torno de 97 g, ou seja,

próximo a 1,0 N e os aparelhos autoligáveis com bráquete ativo, forças de 54 g, que é aproximadamente 0,5 N. Desta forma, o instrumento deverá permitir a aplicação de força normal na faixa de 0,5 a 1,5 N.

A movimentação dentária é lenta e varia no decorrer do tratamento. Além da movimentação dentária, fios com espessura menor que a canaleta do bráquete, muito utilizados no início do tratamento, movimentam sem que haja necessariamente o movimento do dente, durante a mastigação e fala por exemplo. Com isso, três valores de frequências foram adotados, representando assim as baixas frequências de movimentação dentária e um pouco mais elevadas abordando também a movimentação extra que pode ocorrer, ou seja, frequências entre 0,1 e 1,0 Hz.

4.5 ALINHAMENTO

Alinhar as amostras para que o fio esteja simetricamente encaixado na canaleta do bráquete garante que a força contrária ao movimento seja, somente, a força de atrito, eliminando o efeito de forças mal distribuídas quando o fio encosta na lateral do bráquete.

Para ensaios onde a amostra seja um fio de dimensões muito próximas àquelas da canaleta do bráquete, haverá o contato das superfícies laterais, porém, este contato deve possuir forças iguais em ambos os lados para que este efeito não influencie nos resultados finais. Desta forma, tanto para fios de menor dimensão que a canaleta quanto para aqueles com dimensões próximas, se faz necessário um processo de alinhamento do mesmo em relação ao bráquete.

4.6 NIVELAMENTO

Durante todo o movimento alternado, a carga aplicada deve ser constante. Um desnível entre as extremidades do fio faz com que o sistema de controle de carga tenha que responder continuamente e de forma rápida para manter a mesma constante durante o deslizamento. Devido ao tempo de resposta de adequação, a correção pode não ocorrer na posição solicitada, por causa da continuidade do movimento, havendo assim, posições onde a carga não é mantida.

O incremento ou decremento de movimento do atuador responsável por aplicar a carga, pode ter sua faixa de atuação excedida quando há desníveis. Portanto, reduzir o desnível aumenta a eficiência do sistema de controle da carga. Assim é preciso uma rotina que garanta o nivelamento do fio em relação ao bráquete.

4.7 TENSIONAMENTO DO FIO

O tensionamento do fio também colabora para que o sistema de controle de carga, dentro de sua faixa de atuação, mantenha a força normal constante, que é uma premissa do projeto do equipamento. Este tensionamento do fio diminui a mobilidade do mesmo, visto que, a resistência a flexão do fio é baixa, pois possui um pequeno raio e , conseqüentemente, baixo momento de inércia ($I = \pi \cdot R^4 / 4$). Este procedimento é feito de forma padronizada, assim, todos os testes possuirão o mesmo tensionamento, permitindo a comparação entre eles.

O mesmo constitui-se de um pórtico, sistemas posicionadores, sistema de aplicação, controle e monitoração de esforços, sistema de movimentação recíproco, sistema de monitoração de posição e de visualização.

O sistema posicionador constitui-se de 3 mesas coordenadas, duas delas permitem movimento horizontal da amostra, nos eixos X e Y. Estas duas mesas movimentam uma mesa móvel, mostrada na Figura 5.1. Esta mesa possui diversos furos roscados em sua superfície possibilitando a fixação de amostras de diferentes formas. A outra mesa, designada por mesa Z, permite deslocamento vertical, ao longo do eixo Z, movimentando perpendicularmente à mesa móvel.

O sistema de monitoração e controle dos esforços atuantes é composto por uma célula de carga tridimensional acoplada à mesa Z e permite a aquisição das forças em X, Y e Z. Sendo que a força na direção X corresponde a força de atrito ou força tangencial e a força na direção Z é a força normal. Estas duas forças adquiridas permitem o cálculo do coeficiente de atrito através da lei de Coulomb. Acoplado também a mesa Z existe um translador do tipo piezolétrico (PZT) que, como complemento a mesa Z, permite um movimento unidirecional da amostra fixada nesta mesa. A mesa móvel é acoplada a um LVDT (do inglês *Linear Variable Differential Transformer*) instrumento analógico que registra o posicionamento da amostra ao longo do deslizamento.

O movimento recíproco é obtido através da utilização de um disco com pino excêntrico conectado à mesa móvel, que possui um sistema de guias lineares, com esferas recirculantes unidirecionais. A frequência do movimento é obtida através da rotação de um motor, ao qual é utilizado um sistema de redução (1:30) do tipo parafuso coroa sem fim. A amplitude do movimento é dada pela excentricidade do pino, de forma proporcional, ou seja, quanto maior a excentricidade maior será a amplitude. O disco é ligado, em sua face inferior, ao eixo da coroa sem fim e, em sua face superior, ao pino excêntrico, como mostra Figura 5.2.

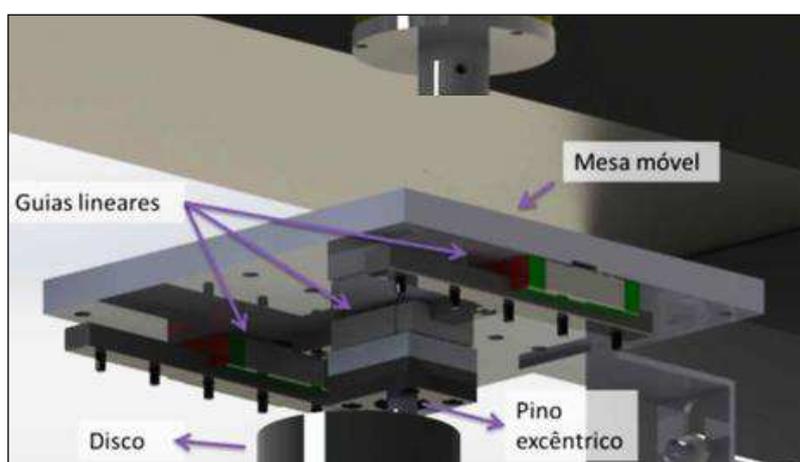


Figura 5.2 - Disco com pino excêntrico e conjunto de guias. Adaptado de (DUTRA, 2017).

5.2 PORTA-AMOSTRAS

Com o objetivo de fixar o fio e o bráquete no equipamento, um dispositivo porta-amostras foi projetado.

5.2.1 Fixação do Fio

A primeira proposta para o suporte do fio foi de fixação por travamento através de duas peças adicionais em V parafusadas ao suporte, Figura 5.3.

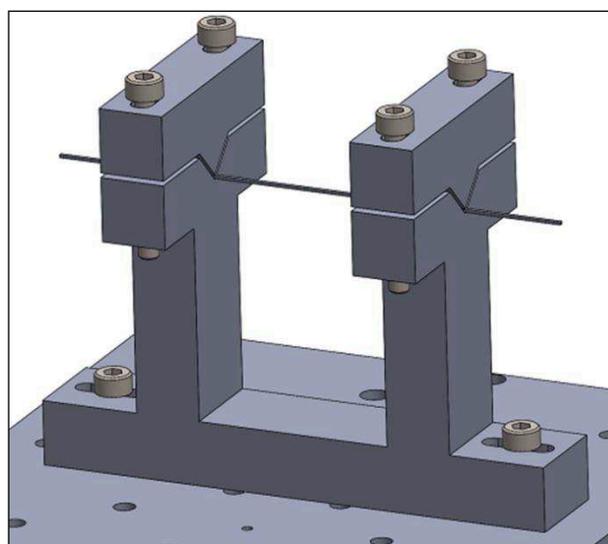


Figura 5.3 - Suporte com travamento do fio em V

Este projeto tem como desvantagem a dificuldade de manter o fio na ponta do V uma vez que o mesmo tem a tendência de movimentar para a lateral do suporte, e também pela dificuldade de equilibrar o aperto dos parafusos dos dois lados do V, e ao mesmo tempo manter o tensionamento do fio. Este projeto foi substituído por outro suporte em U com fixação por parafuso.

Neste esboço o fio foi fixado nas extremidades do U através de esmagamento por parafusos, Figura 5.4. A ponta destes pressionará o fio contra o suporte até o travamento. As dimensões deste suporte podem ser vistas no Anexo 1.

A extremidade do fio será dobrada possibilitando o encaixe de um dinamômetro. A função do dinamômetro, neste caso, é quantificar a força aplicada para puxar o fio de tal forma que a mesma força seja aplicada em todos os testes, eliminando assim erros com fios tensionados de forma diferente. Quando a força determinada for atingida, o parafuso é rosqueado.

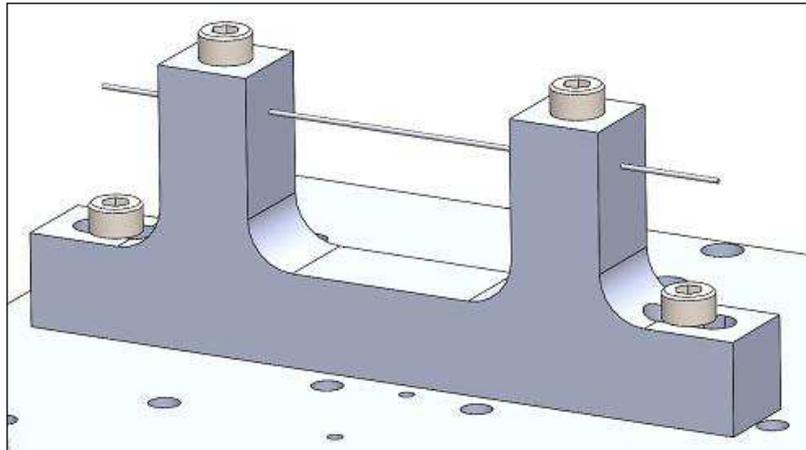


Figura 5.4 - Suporte em U com parafuso que prende o fio por esmagamento

5.2.2 Fixação do Bráquete

Para a fixação do bráquete foi projetado um suporte acoplado à parte inferior da célula de carga, mesa Z. Este suporte possui em sua lateral duas abas com furo passante que com um parafuso prende de cada lado uma pequena chapa de 1 mm de espessura que se apoia à base do bráquete pressionando-o. A Figura 5.5a mostra como o bráquete fica fixado ao suporte. Este suporte possui também uma canaleta de dimensão próxima à do bráquete, mostrado na Figura 5.5b que garantirá alinhamento na direção X do bráquete em relação ao suporte. As dimensões deste suporte podem ser vistas no Anexo 2.

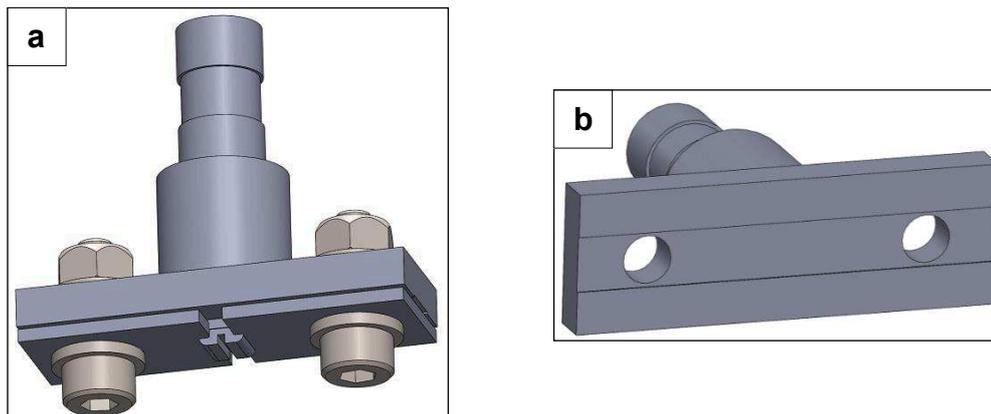


Figura 5.5 - a) Suporte de fixação do bráquete. b) Canaleta do suporte

5.3 AMBIENTE

Os testes poderão ser realizados em ambiente lubrificado com saliva. Para isso, foi projetada uma cuba com tamanho de 30 x 40 x 25 cm para se encaixar no vão do suporte em

U de fixação do fio. A cuba possui dois furos laterais por onde o fio passa, de maneira que apenas o fio dentro do vão, bráquete e parte do suporte do bráquete estejam em contato com a saliva. Este posicionamento da cuba colabora para a redução de itens em contato com a saliva, diminuindo assim possíveis contaminantes, contribuindo para pequeno volume de saliva artificial a ser colocada em cada teste, uma vez que a mesma é renovada a cada ensaio. E além disso, reduzir o tempo de aquecimento da saliva devido ao pequeno volume da mesma. A cuba possui também em suas laterais um revestimento termicamente isolante para evitar perdas de energia térmica por condução em suas paredes.

A Figura 5.6 mostra a cuba montada no suporte de fixação do fio.

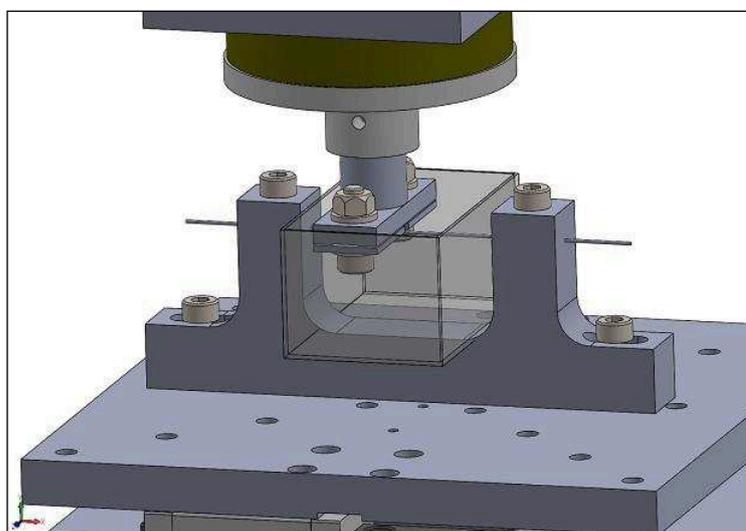


Figura 5.6 - Cuba, suporte de fixação do fio e suporte do bráquete

O controle da temperatura da saliva artificial é obtido através de um controlador de temperatura digital do tipo liga-desliga, que ficará posicionado próximo ao aparato experimental. Este controlador permite definir a faixa de temperatura de trabalho da saliva desejada. Uma sonda conectada a ele, faz leituras da temperatura e informa os valores em tempo real. Conectado a este controlador, se encontra também uma resistência apropriada para trabalhar em ambientes aquosos. Ambas são coladas na lateral interna da cuba afim de se manterem próximas a região onde ocorre o deslizamento.

O controlador recebe a informação de temperatura enviada pela sonda, e analisa se a mesma se encontra no intervalo de temperatura desejada, que por sua vez, envia o comando para ligar ou desligar a resistência de imersão afim de manter a mesma dentro da faixa escolhida.

A Figura 5.7 mostra o posicionamento da sonda e da resistência dentro da cuba.

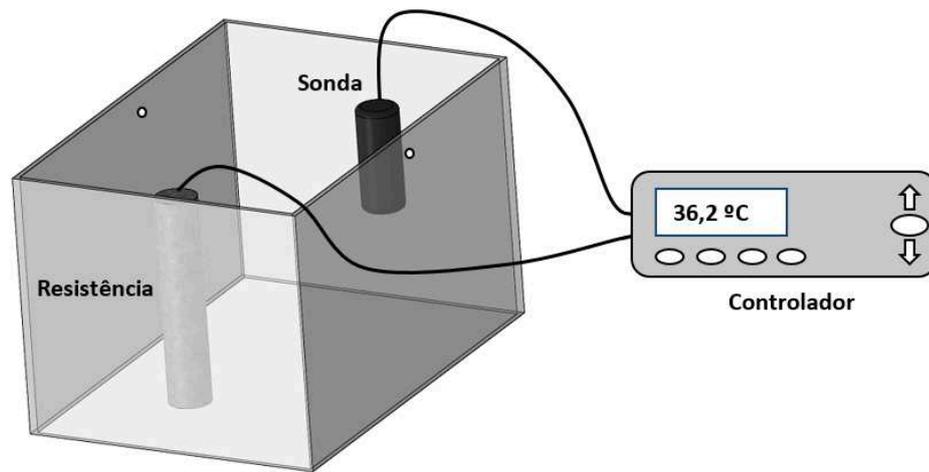


Figura 5.7 - Posicionamento da sonda e resistência na cuba, componentes do controlador de temperatura da saliva artificial

CAPÍTULO VI

ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Este capítulo abrange a especificação dos instrumentos a serem utilizados e o desenvolvimento de rotinas computacionais usadas para controle destes.

6.1 MÓDULO

As duas mesas coordenadas que permitem a movimentação da mesa móvel e a mesa Z, se comunicam com o computador através de uma interface de barramento de propósito geral. Junto com a mesa Z, está associado o PZT que possui curso de 120 μm e resolução de 2,4 nm. Seu controle é analógico e é feito através da comunicação entre computador e placa de aquisição analógico-digital.

A célula de carga tridimensional responsável pela aquisição das forças em X, Y e Z é um instrumento analógico com fundo de escala (FE) de 120 N e resolução de 0,02 N na direção de Z, 40 N e 0,002 N na direção de X e Y. Os dados são coletados através da placa de aquisição analógica-digital.

O LVDT possui resolução de 100 μm e gera uma tensão em volts (V) em uma escala de 0 V a 10 V, correspondente a posição da amostra ao longo do movimento, a tensão é adquirida pela placa de aquisição analógico-digital.

O servo-motor utilizado no movimento alternado possui controle através do envio de tensão de 0 V a 10 V através da placa analógico-digital ao seu *driver* de comando. Cada velocidade corresponde a um sinal de tensão enviado.

O pino excêntrico que determina a amplitude do movimento, conectado ao disco, possui excentricidade de 5 mm, ou seja, cada ciclo (ida e volta) corresponde a uma distância deslizada de 20 mm.

Na Tabela 6.1 estão listados os componentes do ortomicrotribômetro e suas informações técnicas.

Tabela 6.1 - Componentes do ortomicrotribômetro

Componentes	Resolução	Fabricante	Modelo	Interface
Mesa x	0,0001 mm	Physik Intrumente	M-535.22	-
Mesa y	0,0001 mm	Physik Intrumente	M-150.11	-
Mesa z	0,0001 mm	Physik Intrumente	M-150.11	-
Controlador das mesas	-	Physik Intrumente	C804	Digital GPIB ANSI/IEEE 488.2
PZT	2,4 nm Curso 120 μ m	Physik Intrumente	P-216.80	-
Controlador do PZT	-	Physik Intrumente	E-508	Analógica AD/DA
LVDT	100 μ m	Metrolog	DCTH-1000C	Analógica AD/DA
Motor	24 bits	Kollmorgen	AKM11B	Analógica AD/DA
Driver do motor	-	Kollmorgen	AKD-P00606- NBEC-000	Kollmorgen Analógica
Célula de carga	Z - 0,02 N FE 120 N X e Y - 0,002 N FE 40 N	ATI - Industrial Automation	Nano 43 F/T sensor	Analógica AD/DA
Placa de aquisição	16 bits	National Instruments	BNC-2120	Analógica AD/DA

A Figura 6.1 mostra o suporte do bráquete com as chapas de 1 mm de espessura prendendo o bráquete dentro da canaleta.



Figura 6.1 - Suporte do bráquete

O suporte em U com fio preso por travamento com parafusos, tensionamento manual do fio e medidor de forças de tensionamento, podem ser vistos na Figura 6.2.



Figura 6.2 - Suporte em U com medidor de forças preso ao fio

A foto do ortomicrotribômetro e porta-amostras pode ser vista na Figura 6.3.



Figura 6.3 - Ortomicrotribômetro com suporte em U (fixação do fio por parafuso) e suporte do bráquete

6.2 ROTINAS COMPUTACIONAIS

Foram desenvolvidas rotinas computacionais na plataforma LabVIEW para comando das mesas, do movimento de deslizamento, da aplicação e controle da força normal bem como do monitoramento dos esforços atuantes e da posição relativa bráquete-fio.

6.2.1 Programa Joystick

Rotina que possibilita o posicionamento das mesas e verificação das forças, tem funcionamento simples e foi denominado Joystick. Ele envia comandos para movimentação das mesas X, Y e Z e permite que estes movimentos ocorram em velocidade lenta, intermediária ou rápida, bem como faz leituras instantâneas das forças nos três eixos. A tela do programa Joystick pode ser vista no Anexo 3.

6.2.2 Programa Nivelamento

Este programa é responsável por verificar o nivelamento do fio, e funciona seguindo as etapas do fluxograma da Figura 6.4.

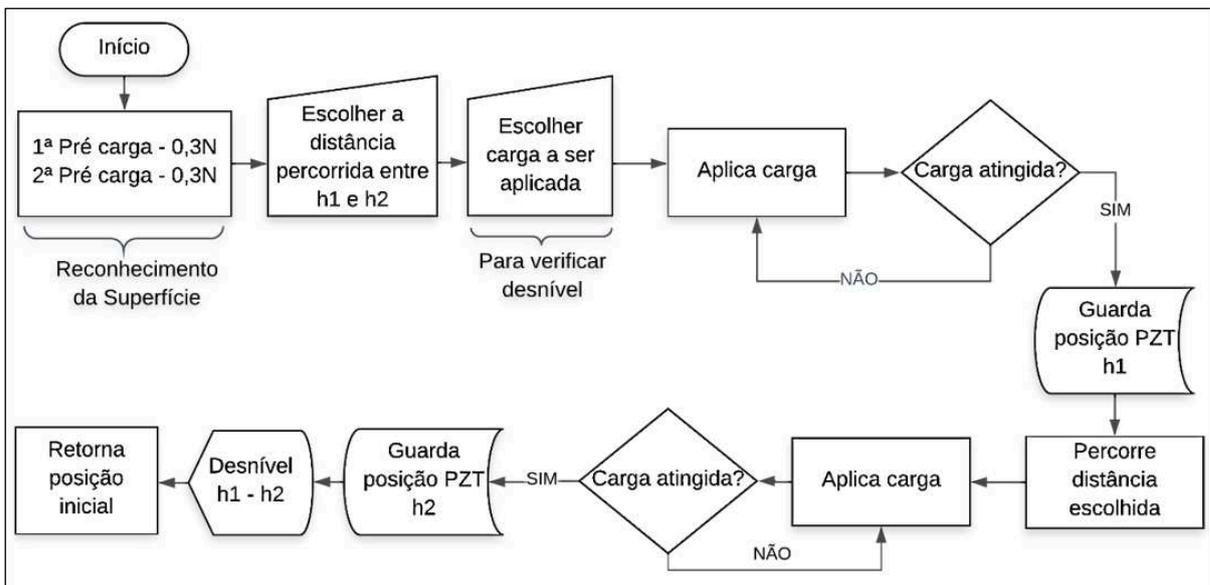


Figura 6.4 - Fluxograma do programa nivelamento

O desnível é a diferença de altura $h1 - h2$, que são os deslocamentos percorridos pelo PZT para atingir a carga escolhida. A distância entre $h1$ e $h2$ é determinada pelo usuário.

Se o deslocamento do PZT no primeiro toque, h_1 , for menor que o do segundo toque, h_2 , o desnível ocorre como mostra Figura 6.5a. Caso h_1 seja maior que h_2 , desnível ocorre como o mostrado na Figura 6.5b.

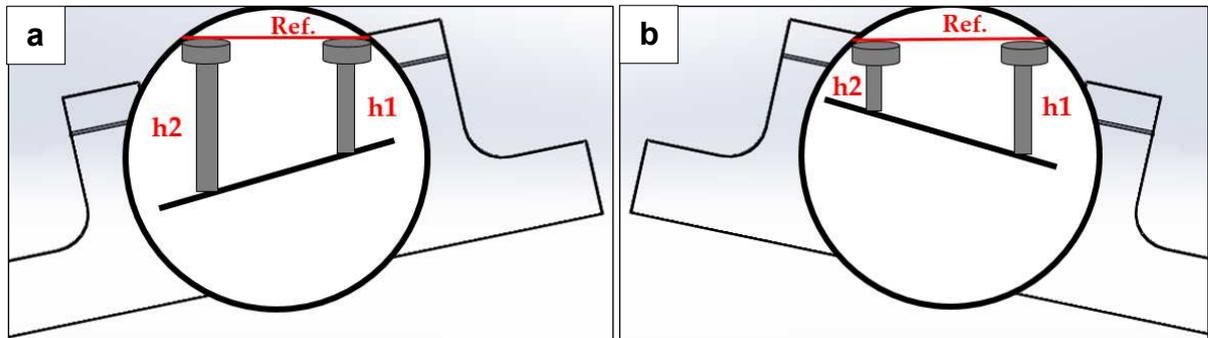


Figura 6.5 - Possíveis desníveis do suporte do fio a) h_1 menor que h_2 b) h_1 maior que h_2

A correção é feita através de calço na base do suporte, o software monitora a resposta em tempo real, portanto após corrigido o desnível com calço, é recomendável executar novamente o procedimento do programa para verificação do nivelamento. A tela deste programa pode ser vista no Anexo 4.

6.2.3 Programa Deslizamento

O software de deslizamento criado na plataforma LabVIEW, é o programa principal para realização dos testes. Quando todos os procedimentos de fixação das amostras, tensionamento do fio, nivelamento e alinhamento forem executados, o conjunto se encontra apto para realização de testes.

Este programa permite a escolha do tempo de ensaio, frequência de deslizamento e força normal aplicada. Mostra em tempo real informações como: força normal, força transversal (em Y), força de atrito (em X), posição do LVDT, posição do PZT e o tempo decorrido. A tela principal pode ser vista no Anexo 5.

O fluxograma da Figura 6.6 mostra de forma reduzida a rotina de tarefas do programa computacional.

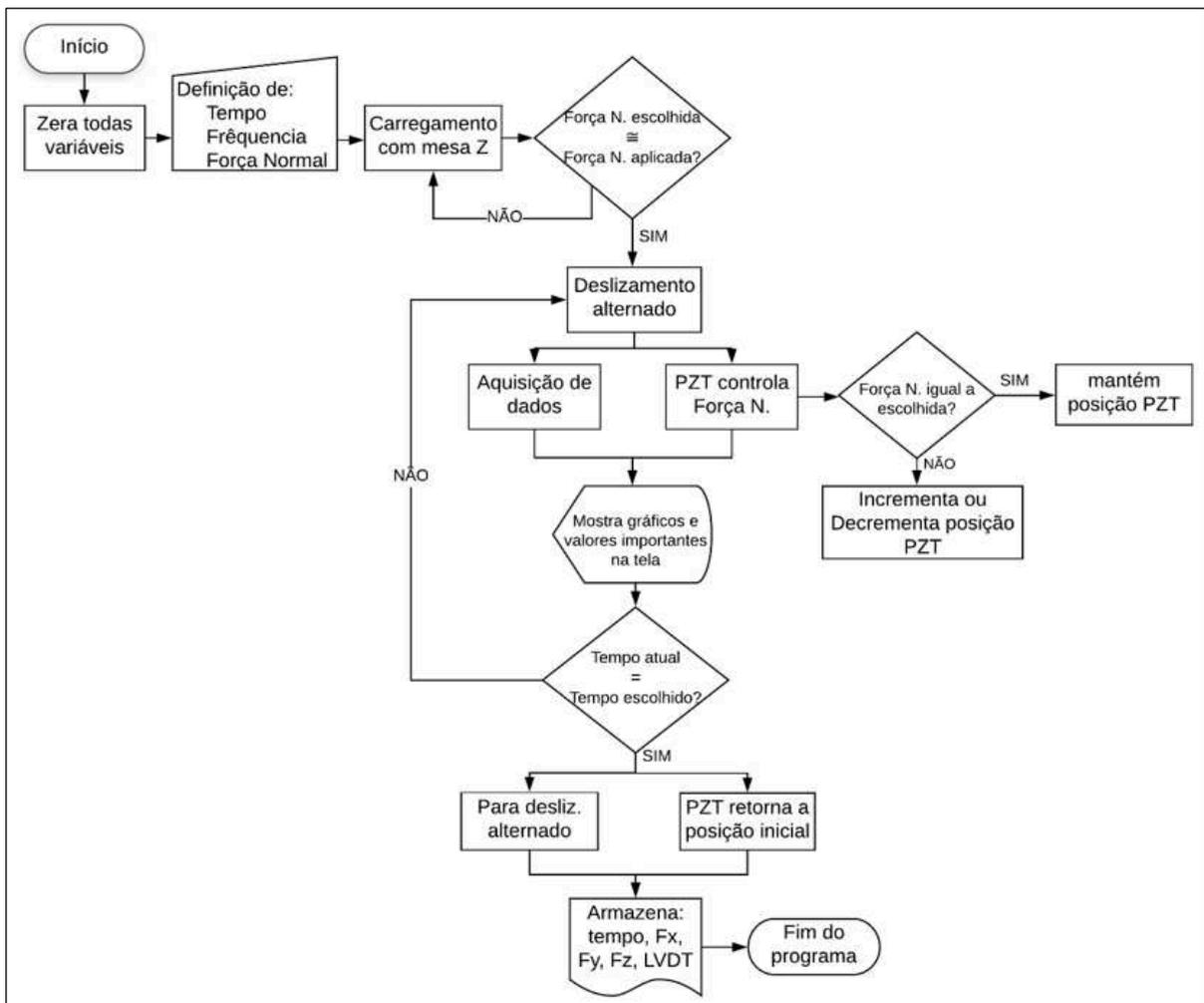


Figura 6.6 - Fluxograma do programa deslizamento

O tempo é a condição de parada do teste. Quando é atingido o tempo estipulado e o ensaio termina, um arquivo é gerado contendo os dados que serão utilizados para análise dos resultados. Este arquivo é composto pelos vetores de tempo, força de atrito, força transversal (em Y), força normal e deslocamento adquirido pelo LVDT. O tempo de parada dos ensaios é calculado de acordo com a distância deslizada total (número de ciclos) desejada.

6.2.4 Programa Triboscopia

Esta rotina, criada na plataforma LabVIEW, recebe os dados em formato de texto (.txt) obtidos no programa deslizamento e gera os mapas de triboscopia, como abordado no capítulo II, imagens numéricas tridimensionais, como a da Figura 6.7, que permite observar eventos do coeficiente de atrito em função da distância percorrida ou número de ciclos, e posição da amostra, auxiliando na análise espacial dos fenômenos tribológicos.

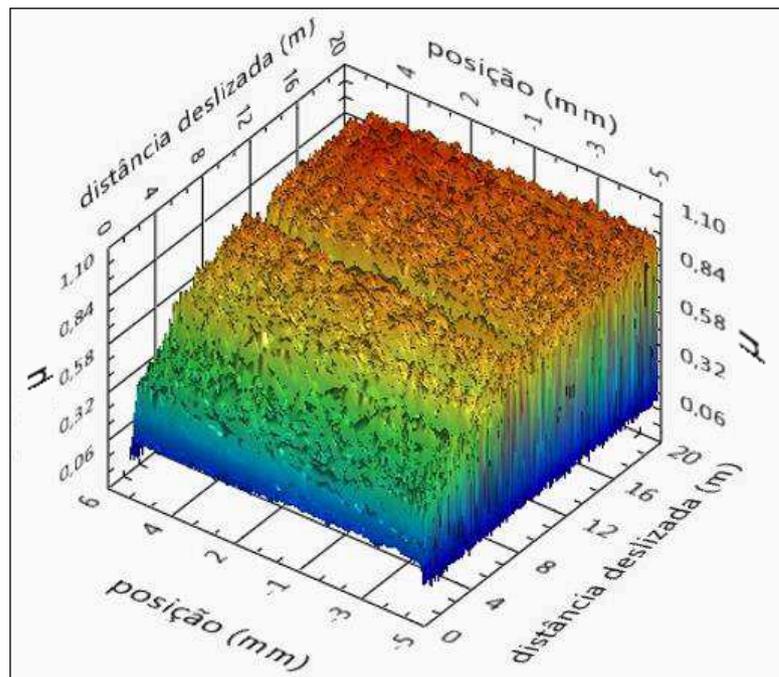


Figura 6.7 - Imagem gerada com a técnica triboscopia

A Figura 6.8 mostra como a matriz de triboscopia é criada. Os elementos da matriz representam a média de dois valores, de ida e volta, do coeficiente de atrito, para uma dada posição.

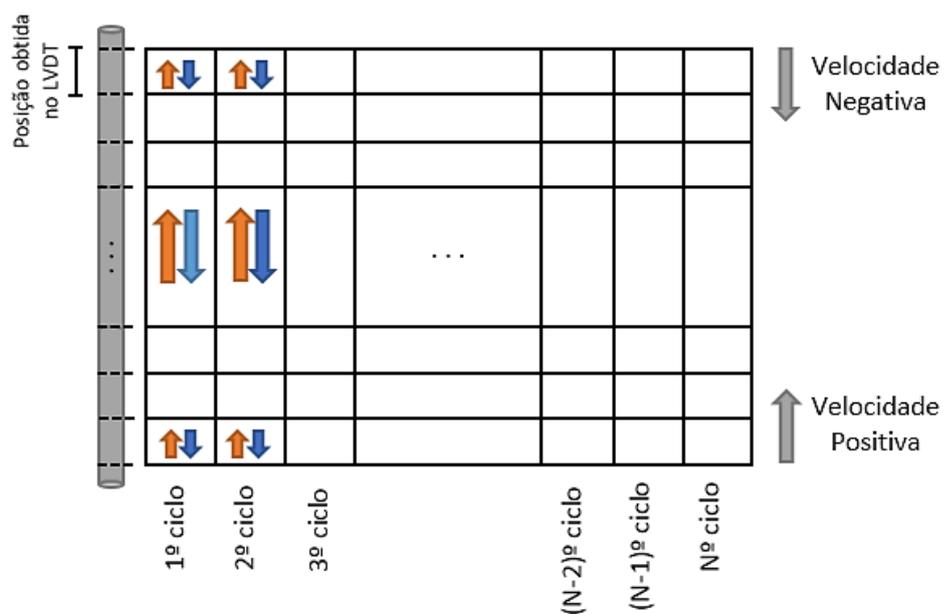


Figura 6.8 - Esquema da matriz usada para interpretar os dados na técnica triboscopia. Adaptado de (DOS SANTOS; COSTA; DE MELLO, 2015)

Através desta matriz de pontos é possível obter também, valores de coeficiente de atrito médio de cada ciclo, como mostra Figura 6.9, obtida via MatLab. Esta curva é obtida através do cálculo da média do coeficiente de atrito em cada ciclo, sendo esta média um ponto da curva, em função da distância percorrida.

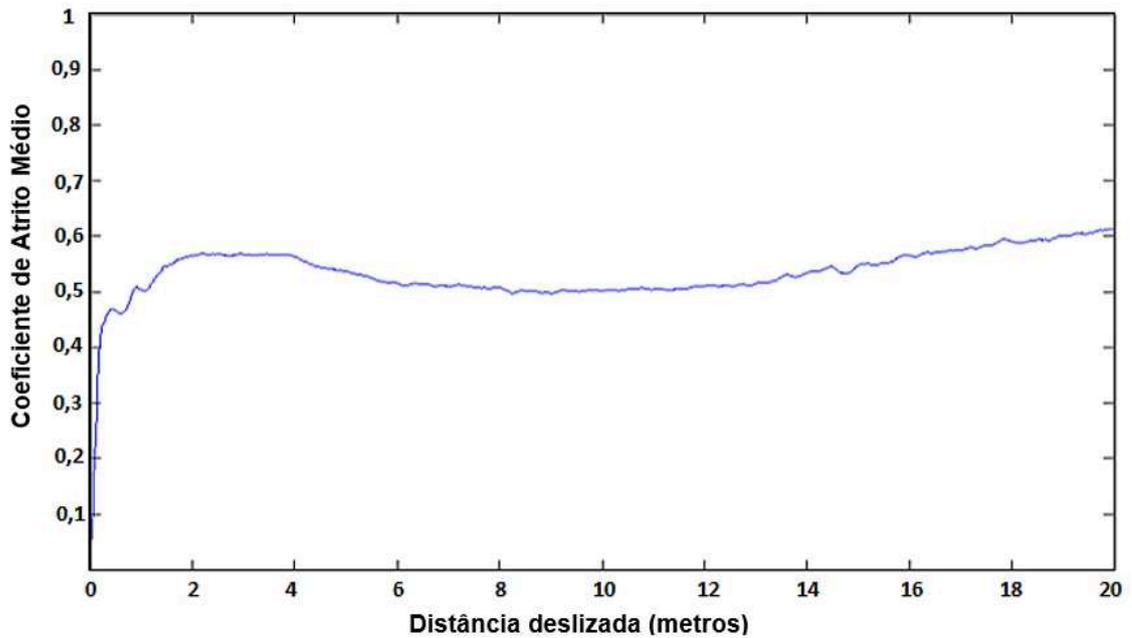


Figura 6.9 - Gráfico 2D do coeficiente de atrito médio obtido a partir dos dados da matriz de triboscopia

CAPÍTULO VII

ANÁLISE DE DESEMPENHO

A Figura 7.1 mostra o fluxograma a ser seguido para a efetivação dos testes no ortomicrotribômetro.

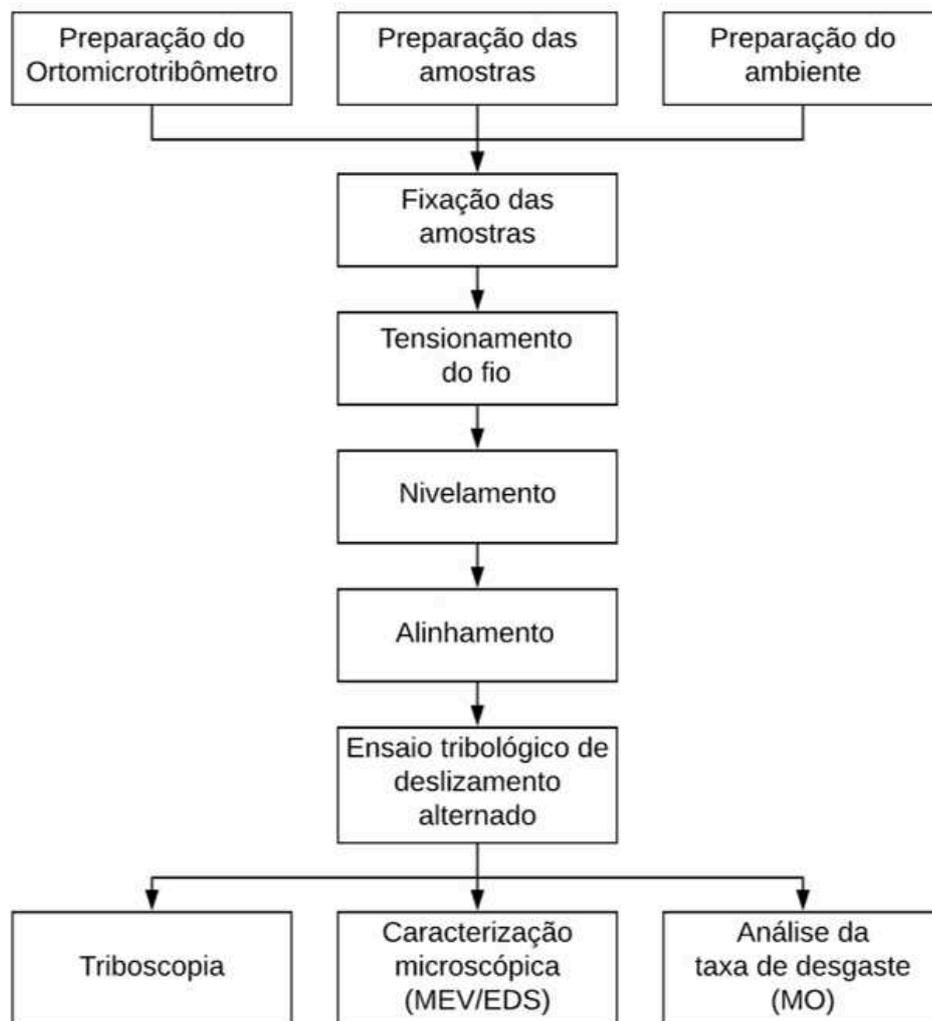


Figura 7.1 - Fluxograma de efetivação dos testes do ortomicrotribômetro

7.1 PREPARAÇÃO DO ORTOMICROTRIBÔMETRO

Todos os equipamentos que compõem o ortomicrotribômetro foram devidamente calibrados antes da execução dos testes.

A curva de calibração do LVDT foi obtida através das leituras do sinal de tensão adquirido em diferentes posições do LVDT, Figura 7.2. As posições foram medidas com paquímetro com resolução de 0,1 mm em um curso de 50 mm do braço do LVDT.

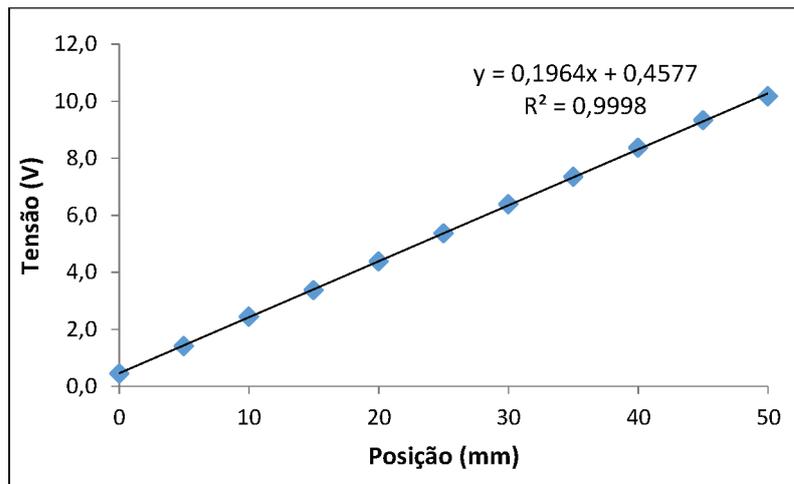


Figura 7.2 - Curva de calibração do LVDT

Para obter a curva de calibração do motor responsável pelo movimento alternado, uma tensão conhecida foi aplicada e com um tacômetro, a velocidade angular (rps) do movimento foi mensurada, Figura 7.3. A velocidade angular é, após este passo, convertida em velocidade linear.

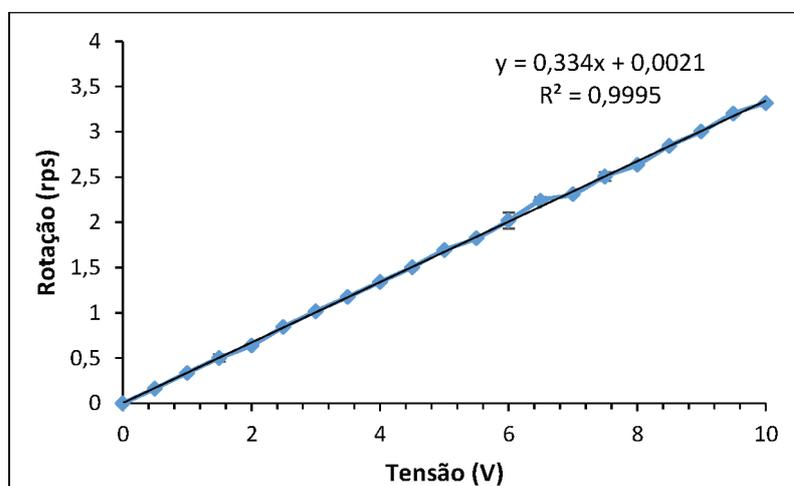


Figura 7.3 - Curva de calibração do motor

Um resíduo pode ser observado na curva e equação de calibração do LVDT. Este ocorreu, pois, a posição adotada como 0 mm, se deu em posição diferente ao limite de curso inferior do LVDT, apresentando, portanto, um valor de tensão diferente de zero. Este posicionamento foi adotado como referência devido a imprecisão de tensões observadas ao colocar o LVDT no final de sua escala inferior.

7.2 AMOSTRAS

Com a intenção de quantificar o coeficiente de atrito entre bráquete e fio ortodôntico, foram utilizados os seguintes materiais para o estudo completo do fenômeno:

7.2.1 Bráquete

A análise de desempenho do equipamento foi feita utilizando bráquetes de reposição metálicos do tipo Standard Edgewise da marca Morelli, com slot (canaleta) de 0,022". Este tipo de bráquete é constituído de um suporte de aço inoxidável austenítico tipo 303Cu, laminado e micro-usinado, unido por brasagem, através de uma liga de prata, à sua base. A Tabela 7.1 mostra os principais elementos deste tipo de aço, informações gentilmente fornecidas pela equipe da empresa Morelli.

Tabela 7.1 - Principais elementos químicos do aço 303Cu austenítico, % em peso, (MORELLI, 2018).

Tipo de Aço Inoxidável	Número UNS	Elemento Químico			
		Cr	Ni	Mo	Cu
303Cu	S30330	17,0 - 19,0	8,0 - 10,0	---	1,5 - 3,5

UNS = Unified Numbering System, Fe +C+Mn+N+Si+P+S = restante, Mn ≤ 2,0%

Este modelo de bráquete é indicado para o tratamento de maloclusão dentária. A linha Standard foi escolhida para este estudo por ser de tamanho e comprimento maior que as demais linhas desta marca, o que proporcionaria maior facilidade de manuseio na fixação e também facilidade na análise das marcas de desgaste em sua superfície. Edgewise é uma técnica utilizada na ortodontia que utiliza bráquetes com sistema de ligadura elástica e possui canaleta retangular. Na técnica a canaleta tem 90° de angulação com a base do bráquete. Desta forma, bráquetes desenvolvidos para esta técnica possuem torque e ângulo zero,

características favoráveis para análise da marca de desgaste. A marca Morelli foi escolhida devido ao menor custo de aquisição das amostras no mercado.

A Figura 7.4 mostra as dimensões dos bráquetes usados nos testes.

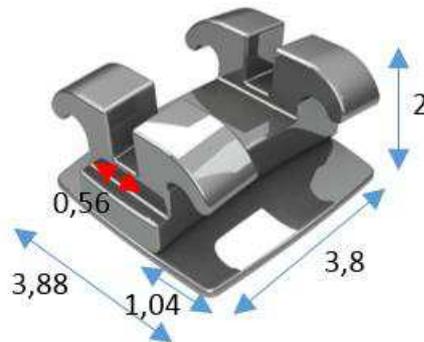


Figura 7.4 - Dimensões de um bráquete da marca Morelli modelo Standard Edgewise. (Cotas em milímetros) (MORELLI, 2013)

A parte em contato com o fio é a canaleta. Na Figura 7.5 é possível observá-la em imagens obtidas via MEV.

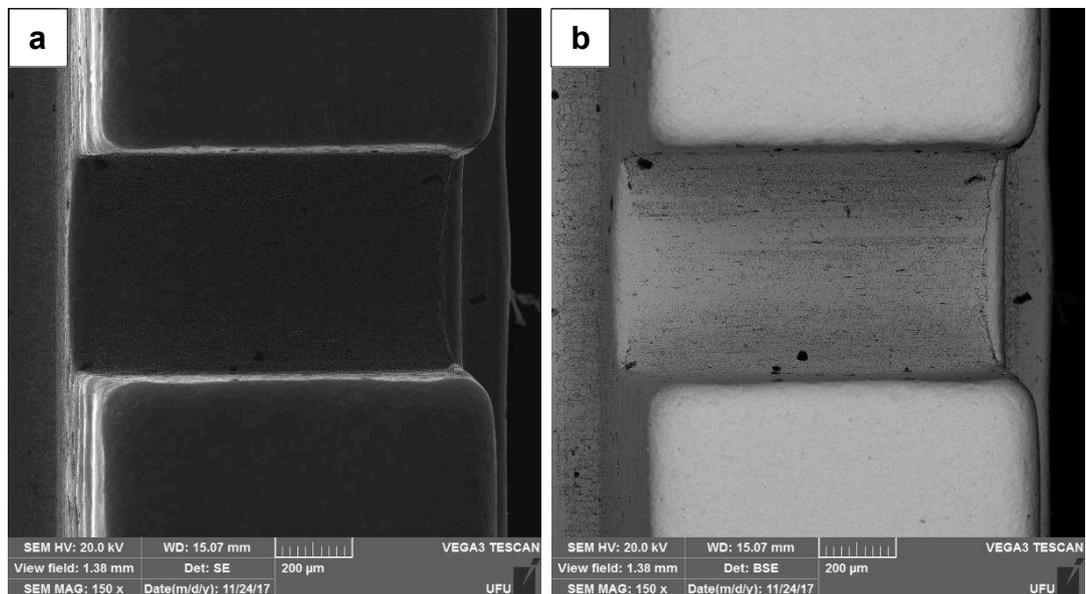


Figura 7.5 - Canaleta do bráquete. a) Imagem obtida via MEV por elétrons secundários (SE). b) Imagem obtida via MEV por elétrons retro-espalhados (BSE)

A análise via EDS da canaleta do bráquete, Figura 7.6 no espectro 1, mostra que os principais componentes que aparecem antes da amostra ser ensaiada são: Ferro, Cromo,

Cobre e Níquel, estes componentes correspondem à composição informada pelo fabricante (MORELLI, 2018).

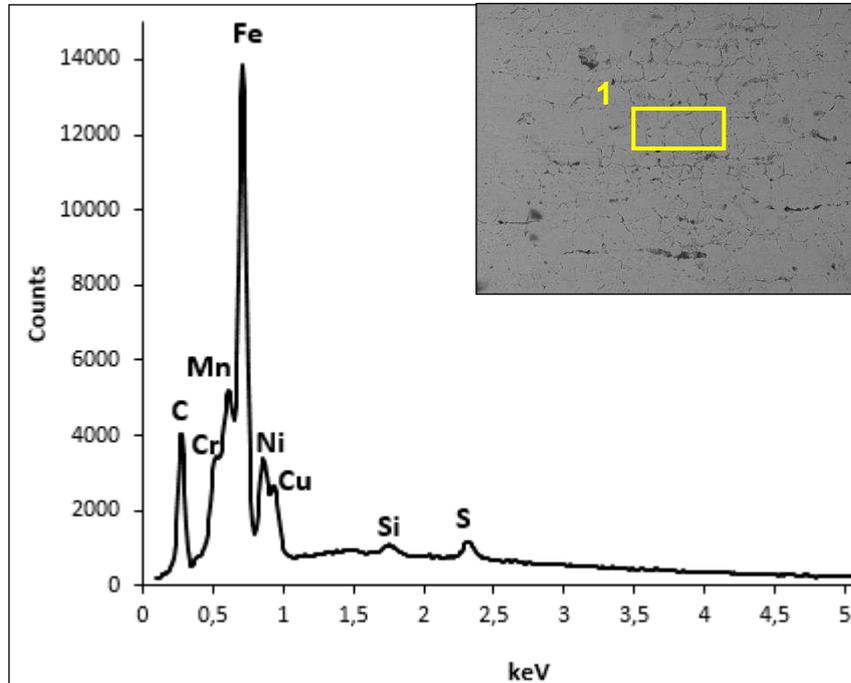


Figura 7.6 - Análise EDS do espectro 1 da canaleta de bráquete não ensaiado. Encarte de maior ampliação da Figura 7.5b

7.2.2 Fio

O fio escolhido para os testes possui seção circular de 0,5 mm de diâmetro, confeccionado em aço inoxidável austenítico tipo 302 da marca Morelli.

A Tabela 7.2 mostra os principais elementos químicos presentes no material do fio.

Tabela 7.2 - Principais elementos químicos do aço 302 austenítico, % em peso, (MORELLI, 2018)

Tipo de Aço Inoxidável	Número UNS	Elemento Químico			
		Cr	Ni	Mo	Cu
302	S30200	17,0 - 19,0	8,0 - 10,0	---	---

UNS = Unified Numbering System, Fe +C+Mn+N+Si+P+S = restante, Mn ≤ 2,0%

Este fio foi escolhido por ser o mais comum em aplicações ortodônticas e por ser disponibilizado no mercado em rolo, sendo uma maior quantidade por um menor custo. A

Figura 7.7 mostra a superfície do fio não ensaiado. As marcas superficiais presentes no fio advêm do processo de fabricação.

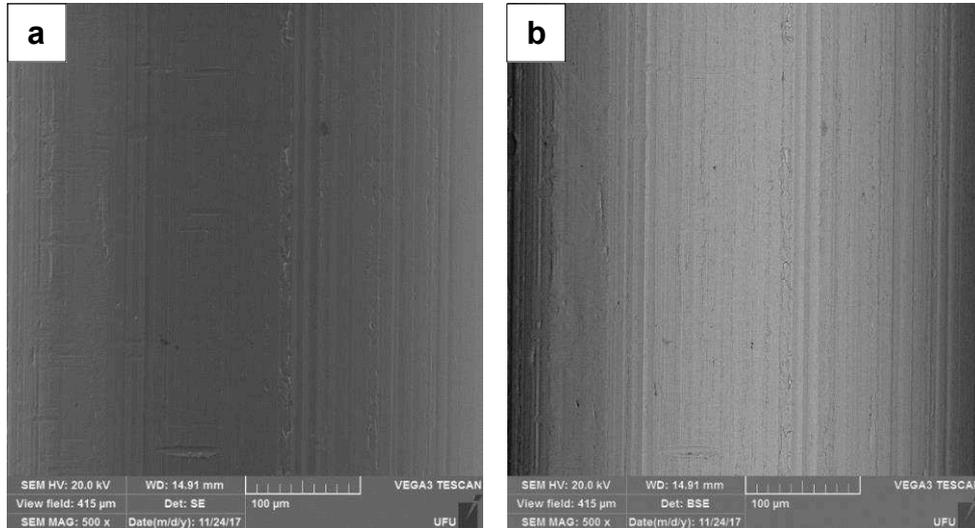


Figura 7.7 - Imagens do fio não ensaiado. a) Imagem obtida via MEV SE. b) Imagem obtida via MEV BSE

A análise EDS do fio não ensaiado, Figura 7.8 no espectro 2, mostra que os principais componentes que aparecem são: Ferro, Cromo e Níquel, estes componentes correspondem à composição informada pelo fabricante (MORELLI, 2018).

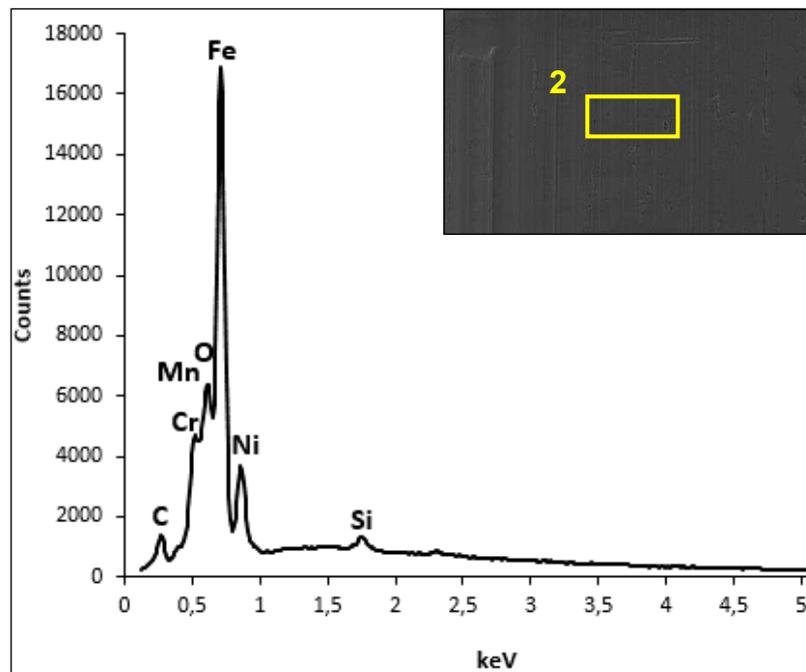


Figura 7.8 - Análise EDS do espectro 2 do fio não ensaiado. Encarte de maior ampliação da Figura 7.7a

7.3 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Todas as amostras foram limpas antes e depois dos ensaios em acetona para análise (P.A) por vibração ultrassônica durante 5 minutos e secas com ar quente imediatamente após serem retiradas deste líquido.

7.4 FIXAÇÃO DAS AMOSTRAS

O suporte em U utilizando parafusos para prender o fio por esmagamento e dinamômetro para quantificar a força de tensionamento, apresentou alguns problemas nos experimentos. Como se tratava de um tensionamento manual do fio, a tração obtida não era suficiente para manter o fio sem flexão, o que tornava difícil condicionar a força normal igualmente aplicada em todo o percurso de deslizamento. O incremento de movimento para o PZT adequar a carga, excedia sua faixa de atuação. Foi necessário elaborar um sistema mais eficaz para tensionar o fio.

O projeto do novo sistema tensionador do fio foi constituído por dois esticadores de fio do tipo rosca sem fim que possui em sua extensão um furo passante para o encaixe do fio. À medida que a engrenagem é girada, o fio se enrola no esticador provocando o seu tensionamento. Dois esticadores são posicionados nas laterais do suporte em U, prendendo as duas extremidades do fio. Os dois parafusos auxiliam no nivelamento do fio pressionando-o para o fundo do furo passante do suporte. A Figura 7.9 mostra como o fio é fixado no suporte em U e no esticador.

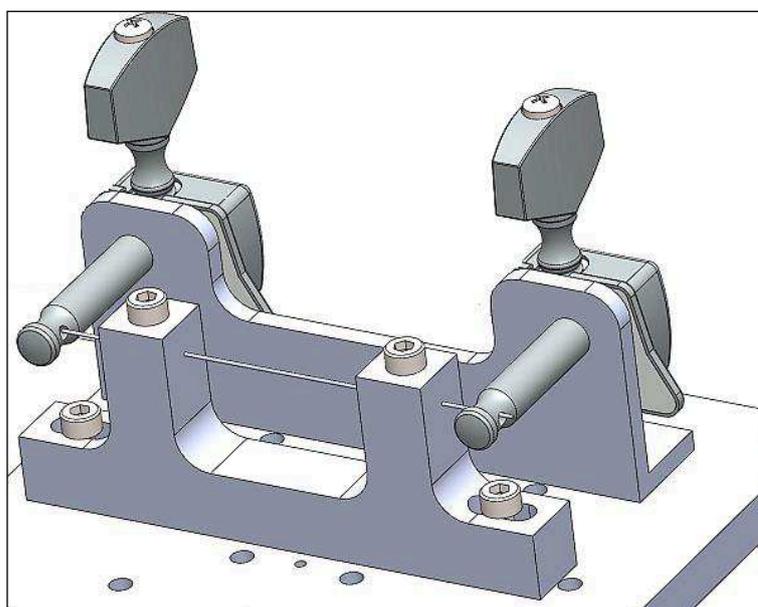


Figura 7.9 - Suporte em U de fixação do fio e sistema de tensionamento

O sistema tensionador é mostrado na Figura 7.10.

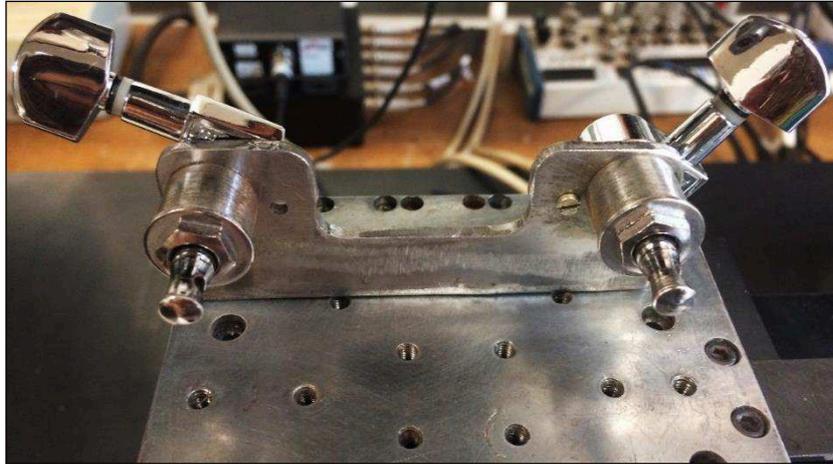


Figura 7.10 - Sistema esticador do fio

O bráquete é encaixado na canaleta do seu suporte e sua base é presa nas laterais pelas chapas de 1 mm apertadas com parafuso.

O conjunto utilizando o sistema tensionador pode ser visto na Figura 7.11.



Figura 7.11 - Porta-amostras com sistema tensionador do fio

A Figura 7.12 mostra, portanto, o esquema do aparato a ser utilizado nos ensaios lubrificados utilizando a cuba, e a seco sem a cuba.

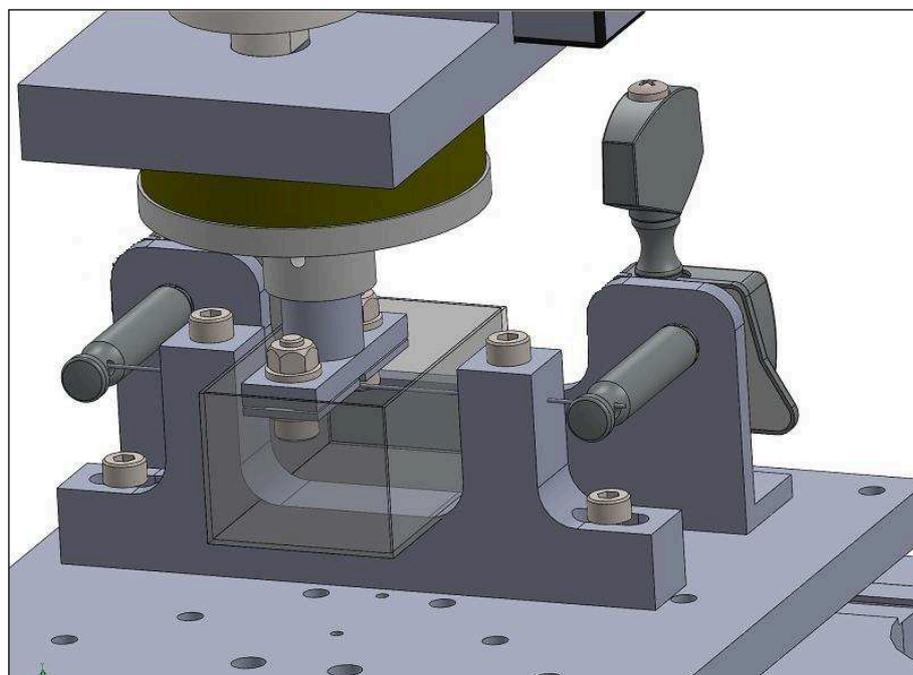


Figura 7.12 - Esquema do aparato de teste do ortomicrotribômetro

Os suportes do bráquete e do fio, bem como o sistema de tensionamento do fio, foram confeccionados em aço inoxidável 304.

7.5 AMBIENTE

Para representatividade do ambiente bucal alguns testes foram executados em ambiente lubrificado com saliva artificial. A saliva utilizada possui em sua composição: água deionizada (1000 ml), sorbitol líquido (3 %), carboximetil celulose (1 %), cloreto de potássio (0,12 %), cloreto de sódio (0,08 %), citrato de potássio (0,03 %) e carbonato de cálcio (0,015 %) manipulada em farmácia especializada.

O controle da temperatura da saliva artificial foi feito com controlador de temperatura digital do tipo liga-desliga, da marca Coel, modelo TLZ10, que possui uma sonda do tipo *Negative Temperature Coefficient* (NTC), que mede a temperatura e resistência de imersão de 12 W responsável pelo aquecimento, submersas na saliva. A sonda faz a leitura da temperatura, quando a mesma está abaixo de 36,4 °C, o controlador liga a resistência, quando a temperatura está acima de 37,2 °C, o controlador desliga a resistência. A Figura 7.13 mostra a sonda e a resistência elétrica dentro da cuba.

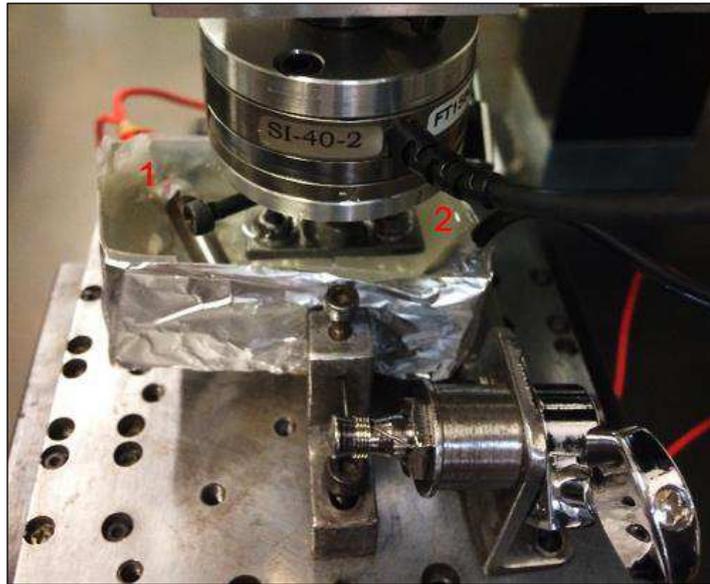


Figura 7.13 - Componentes do sistema de controle de temperatura da saliva dentro da cuba. (1) Resistência elétrica e (2) sonda de temperatura tipo NTC

A foto do ortomicrotribômetro com suporte em U de fixação do fio, esticadores, suporte de fixação do bráquete, cuba e todos os demais instrumentos que garantem o movimento de deslizamento podem ser vistos na Figura 7.14.

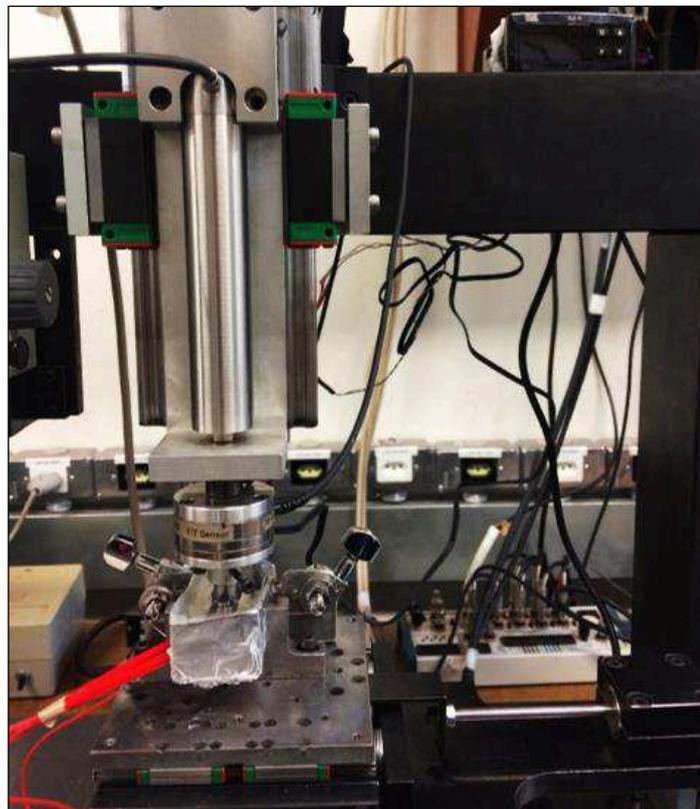


Figura 7.14 - Foto do ortomicrotribômetro

7.6 TENSIONAMENTO DO FIO

O tensionamento do fio é importante para que a força normal seja mantida durante o ensaio, é importante também que haja um padrão de tensão entre os testes para que isso não interfira ao comparar testes diferentes. Com o fio devidamente posicionado no suporte, com o programa Joystick a mesa móvel é movida de forma que o bráquete fique no meio da área útil de deslizamento do fio. A mesa Z sobe até o seu fim de curso tomando esta posição como referência. Executa-se o comando para descer 39 mm, esta distância é o suficiente para o fundo da canaleta do bráquete tocar o fio e exercer uma força sobre ele. A força exercida foi estipulada para ser 8,5 N, em todos os ensaios, caso a força no eixo Z, apresentada no programa Joystick, for maior que esta, deve-se aliviar um os esticadores até atingi-la, se a força apresentada em Z for menor, gira-se um dos esticadores, tensionando o fio, até obtê-la.

7.7 NIVELAMENTO

A base do ortomicrotribômetro está apoiada sobre pés de borracha para amortecimento de vibrações e excitações.

Após execução da etapa de tensionamento, é preciso verificar o nivelamento, o mesmo é analisado através do software Nivelamento com funcionamento já mencionado no tópico rotinas computacionais.

7.8 ALINHAMENTO

Antes de executar testes no ortomicrotribômetro, alguns passos de alinhamento no eixo x e y são necessários para garantir a qualidade dos resultados.

7.8.1 Eixo X

Após instalado o fio e bráquete no porta-amostras, o primeiro passo a ser executado é o alinhamento na direção do eixo X.

- **Etapa 1**

O alinhamento no eixo X é, em parte, garantido através do encaixe do bráquete na canaleta do suporte. Quando posicionado na mesma, o bráquete não possui liberdade de movimentação neste eixo em relação ao suporte.

A Figura 7.15 exemplifica como o bráquete poderia ficar sem a canaleta e como ele fica quando encaixado na mesma.

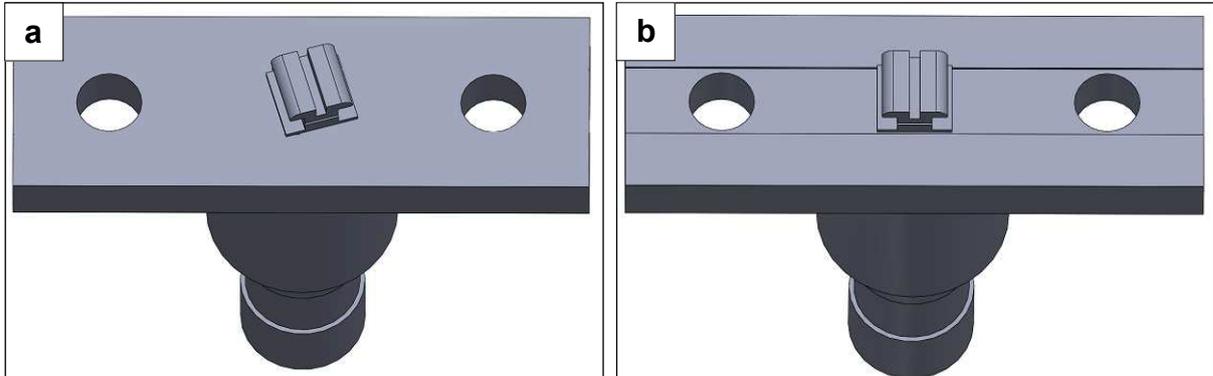


Figura 7.15 - a) Possível posicionamento do bráquete em suporte sem canaleta. b) Alinhamento do bráquete em suporte com canaleta

- **Etapa 2**

O alinhamento do suporte do bráquete em relação ao fio é obtido através das etapas mostradas no fluxograma da Figura 7.16.

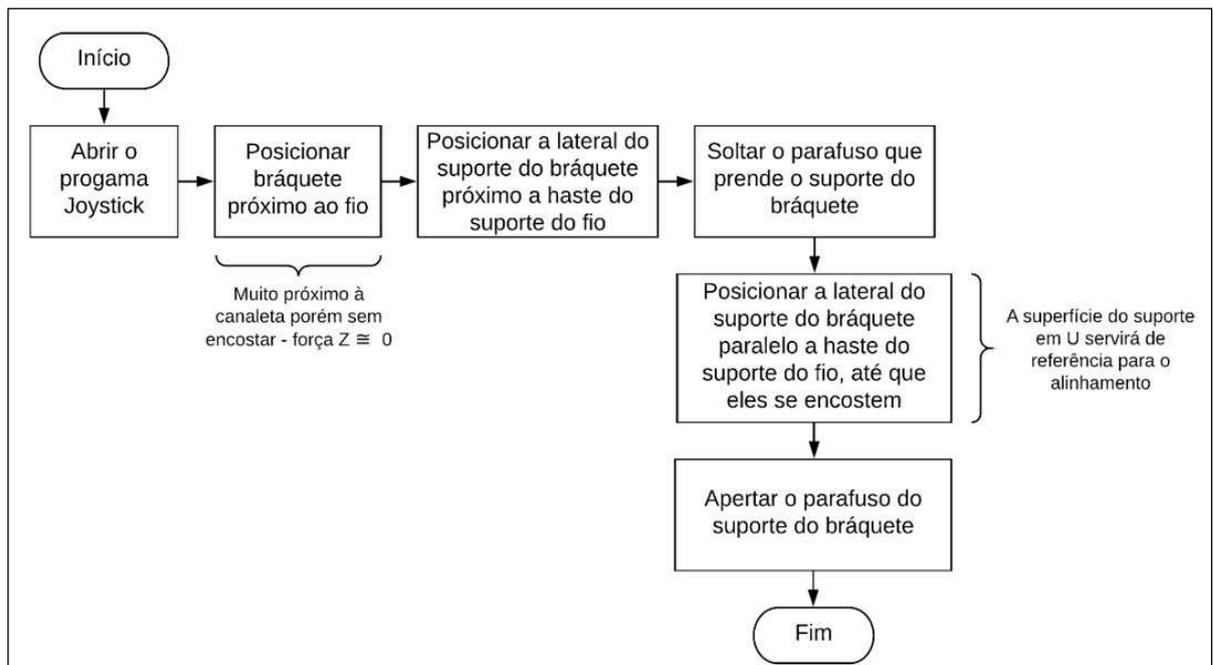


Figura 7.16 - Fluxograma da etapa 2 de alinhamento no eixo X

A Figura 7.17 mostra como é o posicionamento antes e o depois do alinhamento do suporte de fixação do bráquete em relação ao fio.

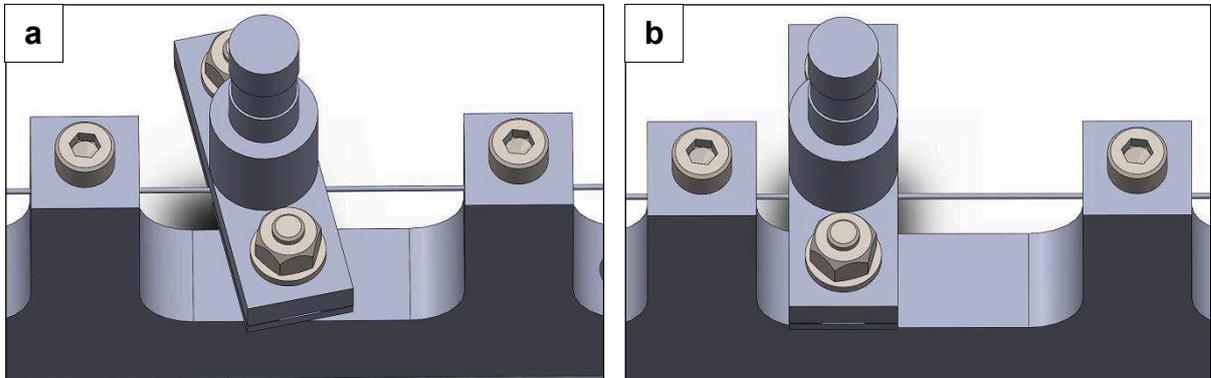


Figura 7.17 - a) Posicionamento do suporte do bráquete antes do alinhamento no eixo X. b) Posicionamento após o alinhamento no eixo X

7.8.2 Eixo Y

- **Etapa 1**

A seguir é feito o primeiro alinhamento no eixo Y, ou seja, do suporte do fio em relação ao bráquete.

O suporte do fio possui em suas abas furos oblongos para esta finalidade de alinhamento em Y. A Figura 7.18a mostra o suporte desalinhado neste eixo e Figura 7.18b após alinhamento.

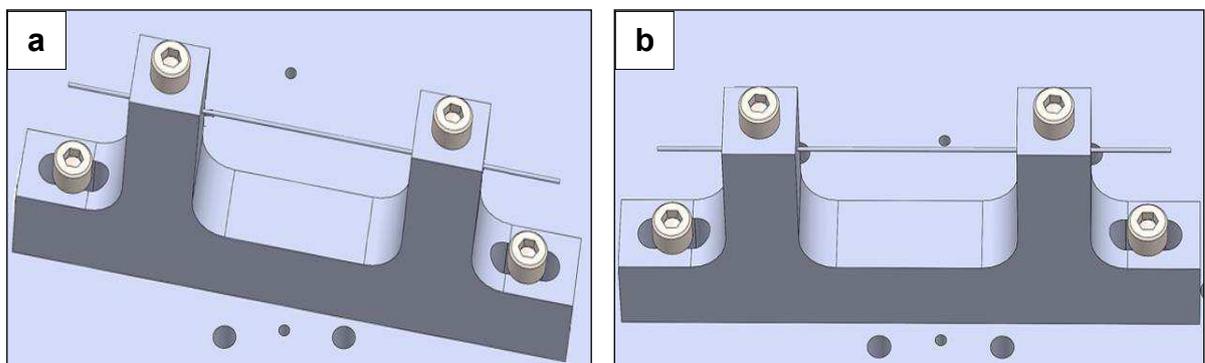


Figura 7.18 - a) Suporte do fio desalinhado no eixo Y. b) Suporte alinhado após realizar etapa 1 de alinhamento no eixo Y

O fluxograma da Figura 7.19 mostra as etapas a serem seguidas para realizar este alinhamento.

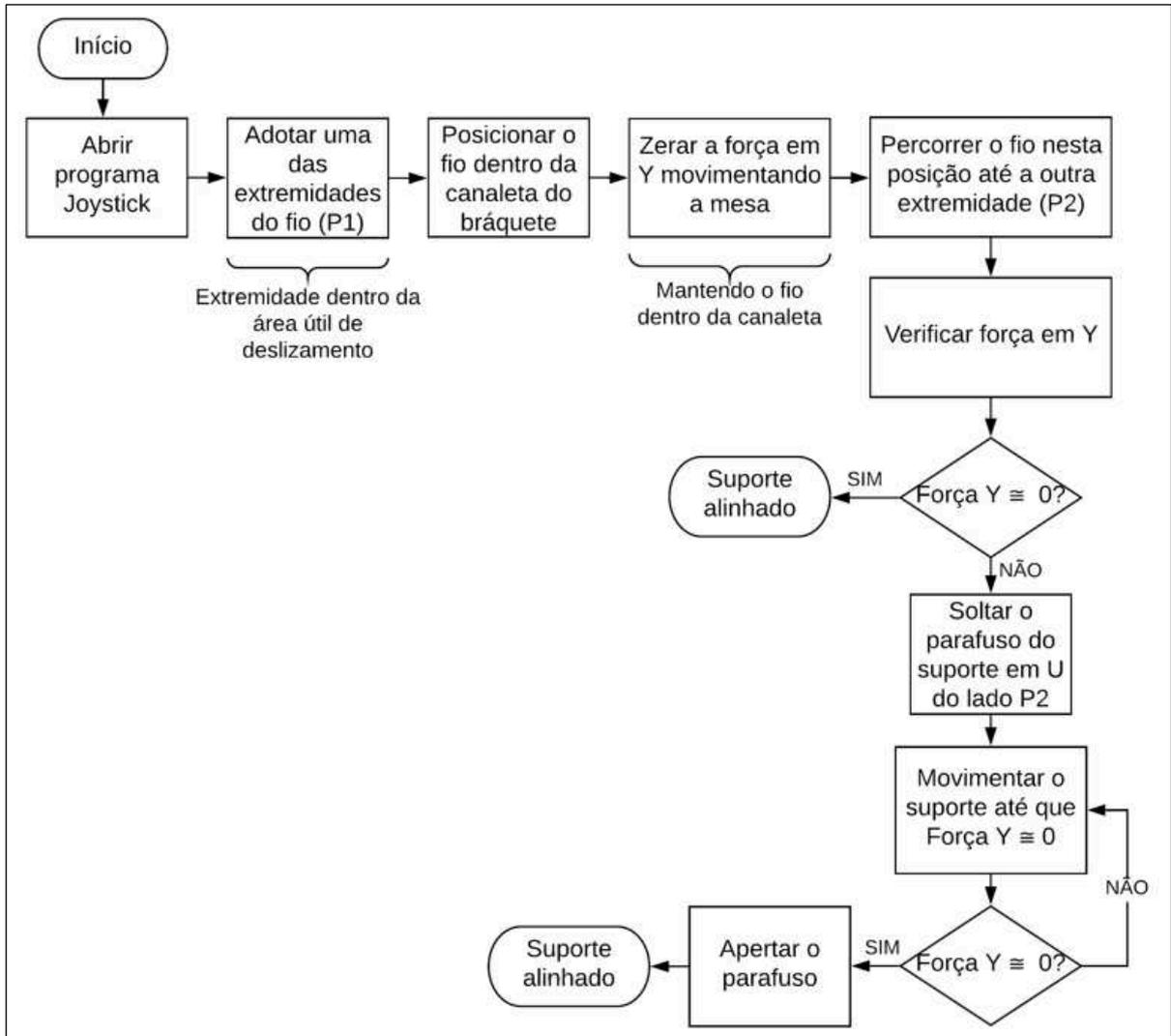


Figura 7.19 - Fluxograma da etapa 1 de alinhamento em Y

Recomenda-se após o alinhamento, uma segunda execução das etapas do fluxograma para verificação.

- **Etapa 2**

Após o ajuste da etapa 1, necessita-se alinhar o fio em relação ao bráquete. As etapas a serem seguidas estão mostradas no fluxograma da Figura 7.20. O posicionamento do fio dentro da canaleta deve ocorrer sem que haja forças em Z, ou seja, sem encostar no fundo da mesma.

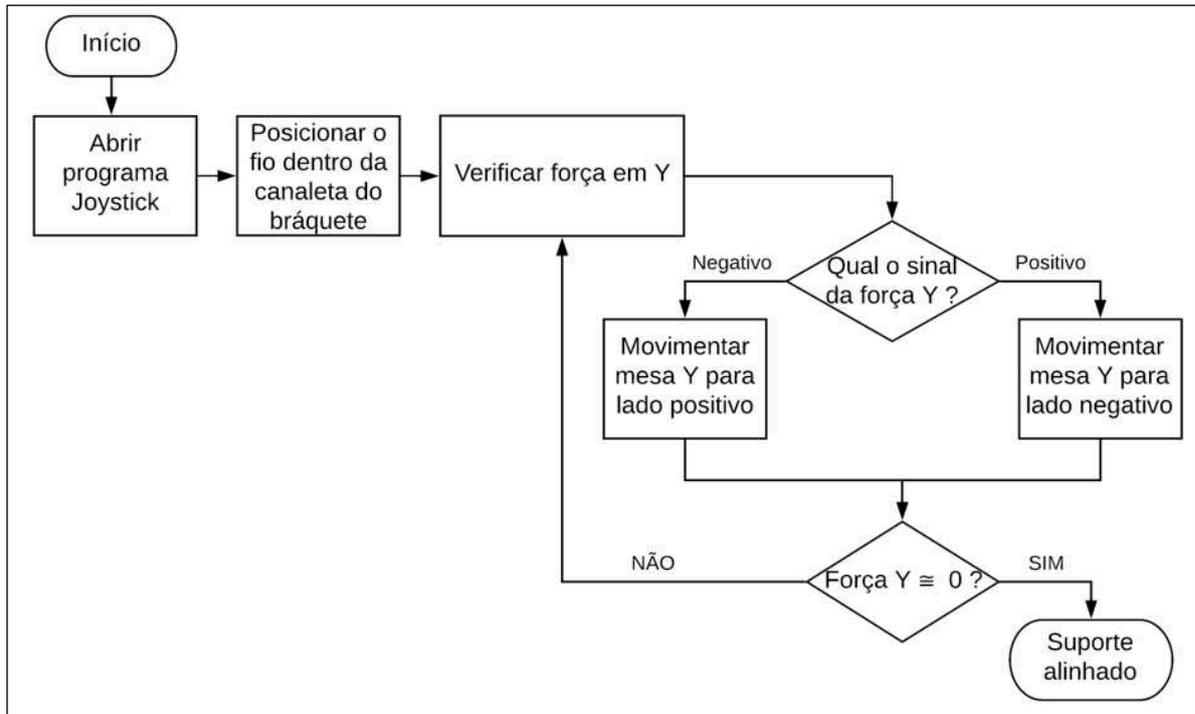


Figura 7.20 - Fluxograma da etapa 2 de alinhamento em Y

A Figura 7.21 mostra qual a lateral do bráquete está encostando no fio, marcação em vermelho, quando a força apresentada em Y é positiva (a), negativa (b) e qual deve ser o sentido do movimento para adequação, em (c) mostra a posição do bráquete em relação ao fio quando a força em Y próximo de zero, nesta condição a etapa está devidamente concluída.

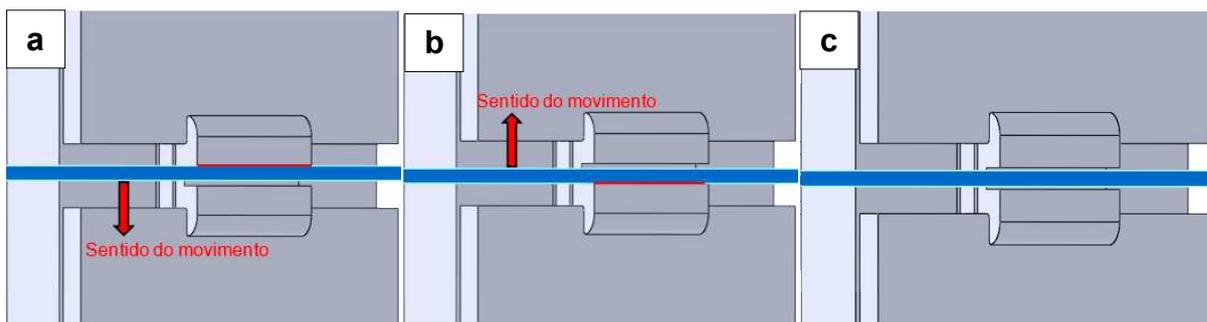


Figura 7.21 - a) Força em Y positiva. b) Força em Y negativa. c) Força em Y \cong zero

7.9 ENSAIO TRIBOLÓGICO

Para cada conjunto de parâmetro adotado foram realizados três ensaios afim de verificar a repetibilidade dos resultados. Foram adotadas três frequências, 0,1 Hz, 0,5 Hz e 1 Hz e também três cargas 0,5 N, 1,0 N e 1,5 N, totalizando, portanto, 9 combinações, tem-se um total de 27 ensaios a seco. Dentre estes foi escolhido a combinação de parâmetros que

teve o melhor comportamento em repetibilidade para realizar os ensaios lubrificados em saliva artificial, somando assim mais 3 testes, totalizando, portanto, 30 ensaios.

7.10 TRIBOSCOPIA

O programa triboscopia gera gráficos que auxiliam a análise espacial dos fenômenos tribológicos. Apresenta imagens 3D da força normal, força de atrito, força de atrito topográfica, coeficiente de atrito dentre outros gráficos. A tela do programa pode ser vista no Anexo 6.

7.11 CARACTERIZAÇÃO MICROSCÓPICA

Bráquete e fio não ensaiados e aqueles ensaiados com os parâmetros mais relevantes, foram submetidas a análise via MEV em equipamento modelo TESCA3 VEGAN e também analisados sob a técnica EDS em instrumento da marca Oxford Instruments INCA x-act, modelo 51-ADD0007 e sensor 51-1385-026, com o intuito de caracterizar a superfície microscopicamente. Os equipamentos estão localizados no Laboratório Multiusuários do Instituto de Química, na Universidade Federal de Uberlândia.

7.12 ANÁLISE DA ÁREA DESGASTADA

O programa de controle e análise do microscópio ótico, marca Olympus e modelo BX51M, possui uma função de cálculo da área selecionada pelo usuário. Foram utilizadas imagens da marca de desgaste encontradas na região da canaleta do bráquete ensaiado. Neste caso ambos os lados do bráquete tiveram suas marcas de desgaste mensuradas. Desta forma, a análise de imagem fornece uma resposta em área que representa uma estimativa aproximada do volume desgastado. A Figura 7.22 mostra a área desgastada selecionada, de um dos lados do bráquete. O MO utilizado está localizado no LTM UFU.

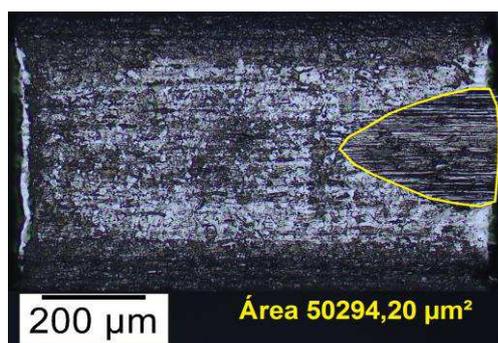


Figura 7.22 - Área de desgaste selecionada, em um dos lados do bráquete, via MO

CAPÍTULO VIII

RESULTADOS E DISCUSSÕES

8.1 BRÁQUETE USADO *IN SITU*

Com o objetivo de verificar se o desgaste que ocorre nas amostras impostas nos testes do ortomicrotribômetro se assemelham ao desgaste que ocorre nos itens ortodônticos instalados na boca, foram feitas imagens no MEV e MO de um bráquete da marca Ormco Damon System modelo Damon 3MX, fabricado em aço 17-4 PH, que permaneceu na boca de um paciente durante 2 anos. As marcas do desgaste no fio não puderam ser identificadas devido a constante troca deste item durante o tratamento.

A Tabela 8.1 mostra os principais elementos do aço inoxidável utilizado na fabricação deste bráquete, informações gentilmente fornecidas pela equipe da empresa Ormco Damon System (ORMCO, 2018).

Tabela 8.1 - Principais elementos químicos do aço 17-4 PH, % em peso,(ORMCO, 2018)

Tipo de Aço Inoxidável	Elemento Químico				
	C	Mn	Si	Cr	Ni
17-4 PH	0,07	0,5	1,0	15,0 – 17,5	3,0 – 5,0

P (0,04), S (0,03), Cu (3,0 – 5,0), Nb (0,15 – 0,45), Fe (restante). Componente magnético

Apesar da Figura 8.1a mostrar que o formato do bráquete é um pouco diferente daquele usado nos testes deste estudo (Figura 8.8), sua canaleta possui geometria semelhante. Observa-se que o desgaste está concentrado nas bordas 1 e 2, mostrados com as setas vermelhas, e podem ser vistas ampliadas com MO na Figura 8.1b.

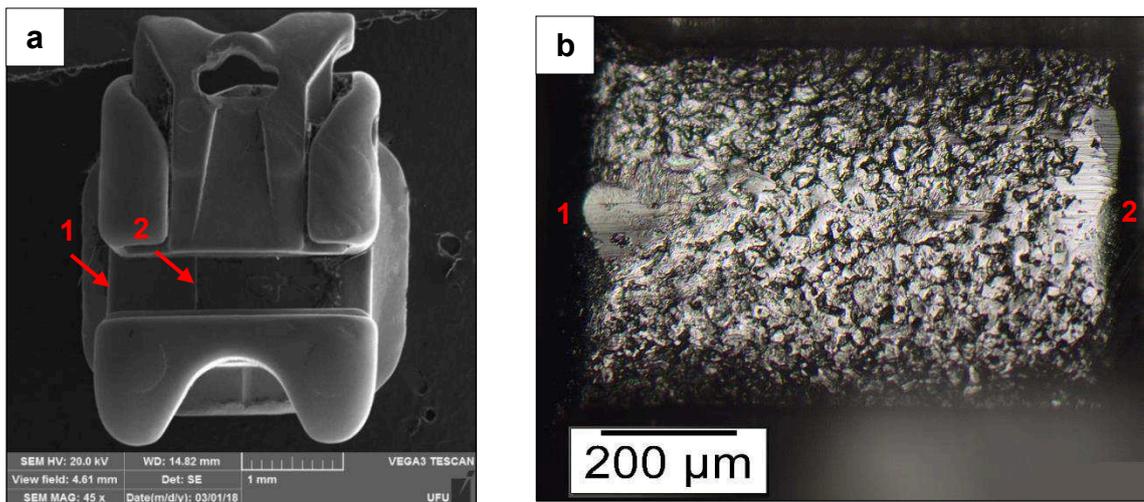


Figura 8.1 - a) Bráquete usado em paciente por período de 2 anos, mostrando que o desgaste ocorre nas bordas 1 e 2, imagem obtida via MEV. b) Imagem com maior ampliação das bordas 1 e 2, obtida via MO

Foram utilizados diversos fios durante o tratamento do paciente, com seção circular e retangulares, neste mesmo bráquete. A marca de desgaste é composta pelo efeito de todos eles. São apresentados na Figura 8.1b, pequenos poros na superfície advindos do processo de fabricação (sinterização) e sulcos/riscos dentro das marcas de desgaste, característicos de processos de deformação plástica. Estas marcas de desgaste se assemelham com aquelas encontradas nos ensaios do ortomicrotribômetro como será demonstrado na sequência.

A análise via EDS do bráquete na borda 1, Figura 8.2, mostra alguns pontos com concentração de titânio e alta concentração de níquel, visto no espectro 1. O titânio não é componente deste item ortodôntico, bem como não é característico do bráquete alta concentração em níquel, como mostra o espectro 2, região sem marcas de deslizamento, e as informações fornecidas pelo fabricante, Tabela 8.1. Estes componentes e concentrações são característicos dos fios utilizados no decorrer do tratamento, como mostra a EDS da Figura 8.3.

Estas evidências sugerem que, quando o fio foi colocado em contato e em movimento relativo com o bráquete, a tensão na superfície foi distribuída nas asperidades em contato do corpo e contra-corpo, estas por sua vez vieram a se fraturar e formar partículas de desgaste. Com a continuidade da tensão sobre a superfície e movimento relativo entre elas, estas partículas geradas foram cominuídas e misturadas, formando um aglomerado que permaneceu aderido à superfície do bráquete. Ressalta-se que estas partículas de desgaste podem ter originado as marcas características de deformação plástica observadas no bráquete.

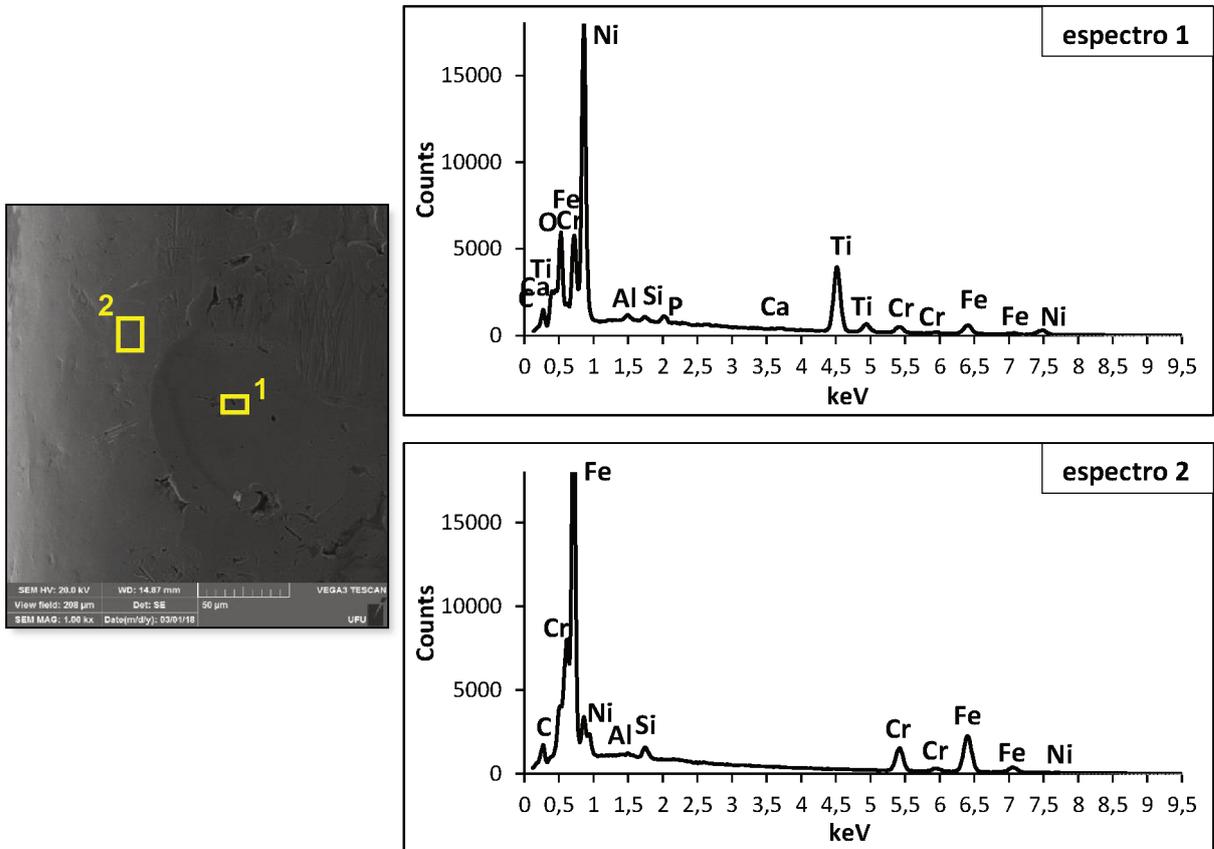


Figura 8.2 - Análise EDS do bráquete usado em paciente durante 2 anos, borda 1, sugerindo adesão do material do fio no bráquete. EDS dos espectros em amarelo 1 e 2.

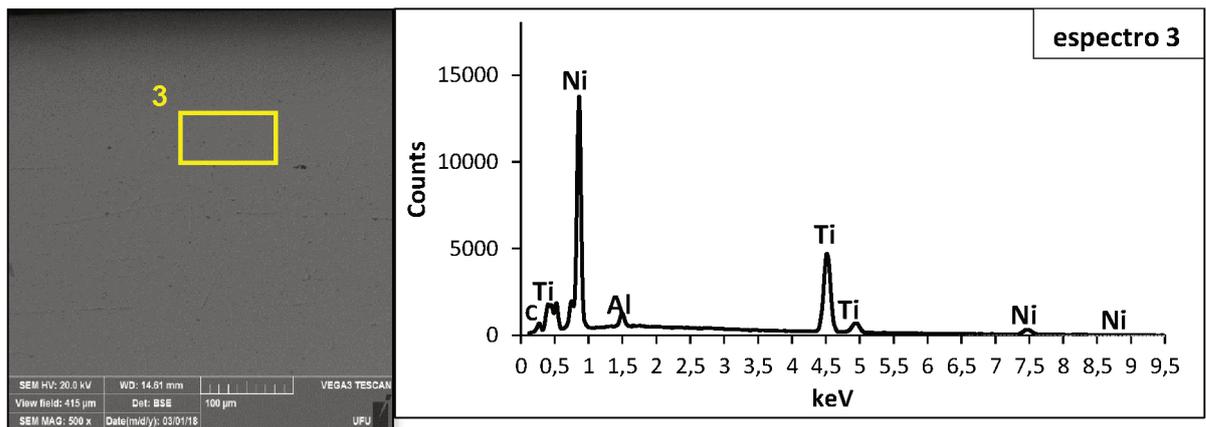


Figura 8.3 - Análise EDS de um dos fios usado com o bráquete da Figura 8.1. EDS do espectro 3.

Nas sessões seguintes, serão discutidos de forma qualitativa e quantitativa os resultados dos ensaios realizados no ortomicrotribômetro.

8.2 ANÁLISE PRELIMINAR DOS ENSAIOS

Para validar o módulo e a metodologia proposta foram realizados ensaios variando a força normal, a frequência e o meio.

Em geral, utiliza-se o tempo de ensaio como parâmetro de controle de ensaios tribológicos. No presente trabalho, houve a variação da frequência do movimento que leva a diferentes distâncias de deslizamento caso seja mantido o mesmo tempo de teste. Assim, para permitir a comparação dos resultados, o parâmetro distância percorrida, foi adotado como parâmetro de controle dos ensaios.

Após efetivado os ensaios de adequação do equipamento, e posterior ajuste para correção das incoerências encontradas, descritas no capítulo anterior, foi realizado um ensaio para a definição da distância a ser percorrida. Este ensaio consiste em um teste de 26 metros deslizados (e três repetições) para observação dos fenômenos tribológicos e assim determinar a distância de deslizamento dos demais testes. Foram selecionadas a frequência de 0,5 Hz e a força normal de 1 N, pois são valores centrais ao intervalo da faixa escolhida para os testes.

A Figura 8.4a mostra a evolução típica do coeficiente de atrito com a distância deslizada e com a posição do contra-corpo em cada ciclo do teste. E a Figura 8.4b apresenta o comportamento típico do coeficiente de atrito médio em cada ciclo em função da distância percorrida, esta curva é obtida através do cálculo da média do coeficiente de atrito em cada ciclo, sendo esta média um ponto da curva, em função da distância percorrida.

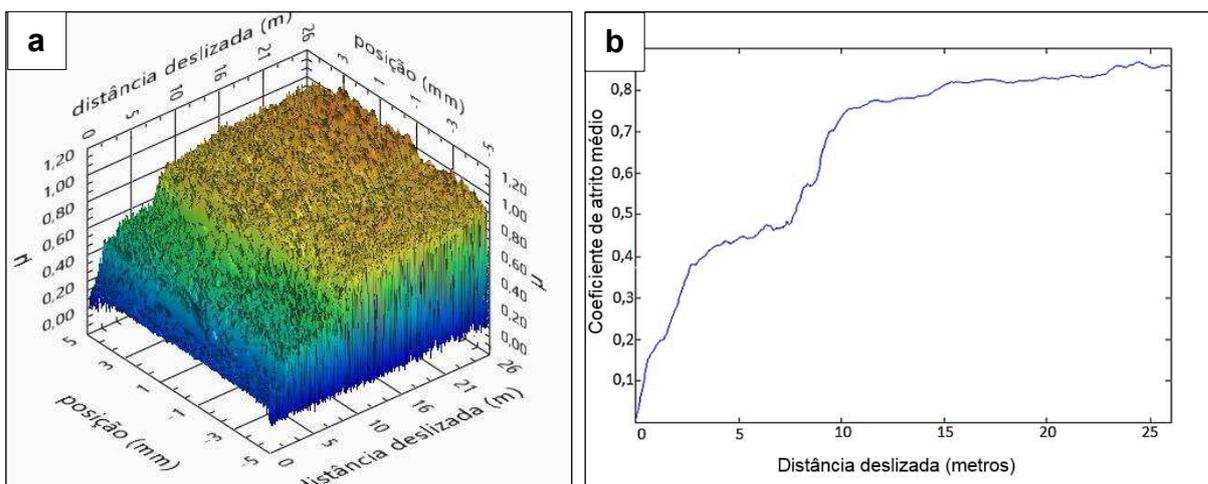


Figura 8.4 - a) Evolução típica do coeficiente de atrito ao longo do ensaio e posição da amostra. b) Evolução típica do coeficiente de atrito médio por ciclo. Ensaio de 0,5 Hz, 1 N, 26 metros

Apresentando-se constante no decorrer da posição do contra corpo, sem variações abruptas, com passagem do regime transitório inicial para regime permanente bem definida, e com comportamento constante em regime permanente, o ensaio se mostra adequado para definição da distância deslizada dos demais testes.

No estudo do coeficiente de atrito médio, o período de amaciamento, estágio de instabilidade desta variável, deve ser identificado para que os valores de coeficiente de atrito referência de cada ensaio, sejam quantificados apenas com os dados obtidos após atingir o regime permanente (estável).

Analisando a Figura 8.4b, o período de amaciamento permanece até a distância aproximada de 10 metros percorridos. Após esta distância o coeficiente de atrito estabilizou. Portanto, para os ensaios seguintes foi adotada a distância deslizada total de 20 metros, suficiente para a obtenção dos valores de coeficiente de atrito médios em regime permanente.

Os ensaios subsequentes foram realizados de acordo com os parâmetros mostrados na Tabela 8.2.

Tabela 8.2 - Configuração dos ensaios

Ambiente	Frequência (Hz)	Carga (N)	Distância deslizada (m)	Número de ciclos	Tempo (min)
Seco	0,1	0,5 1,0 e 1,5	20	1000	166,66
Seco	0,5	0,5 1,0 e 1,5	20	1000	33,33
Seco	1,0	0,5 1,0 e 1,5	20	1000	16,66
Saliva	1,0	1,5	20	1000	16,66

O comportamento dos ensaios realizados no ortomicrotribômetro são ilustrados qualitativamente pela Figura 8.5, que mostra a evolução do coeficiente de atrito ao longo do ensaio (distância deslizada) e da posição em cada ciclo para as frequências limites (0,1 Hz e 1 Hz) e para as forças normais impostas.

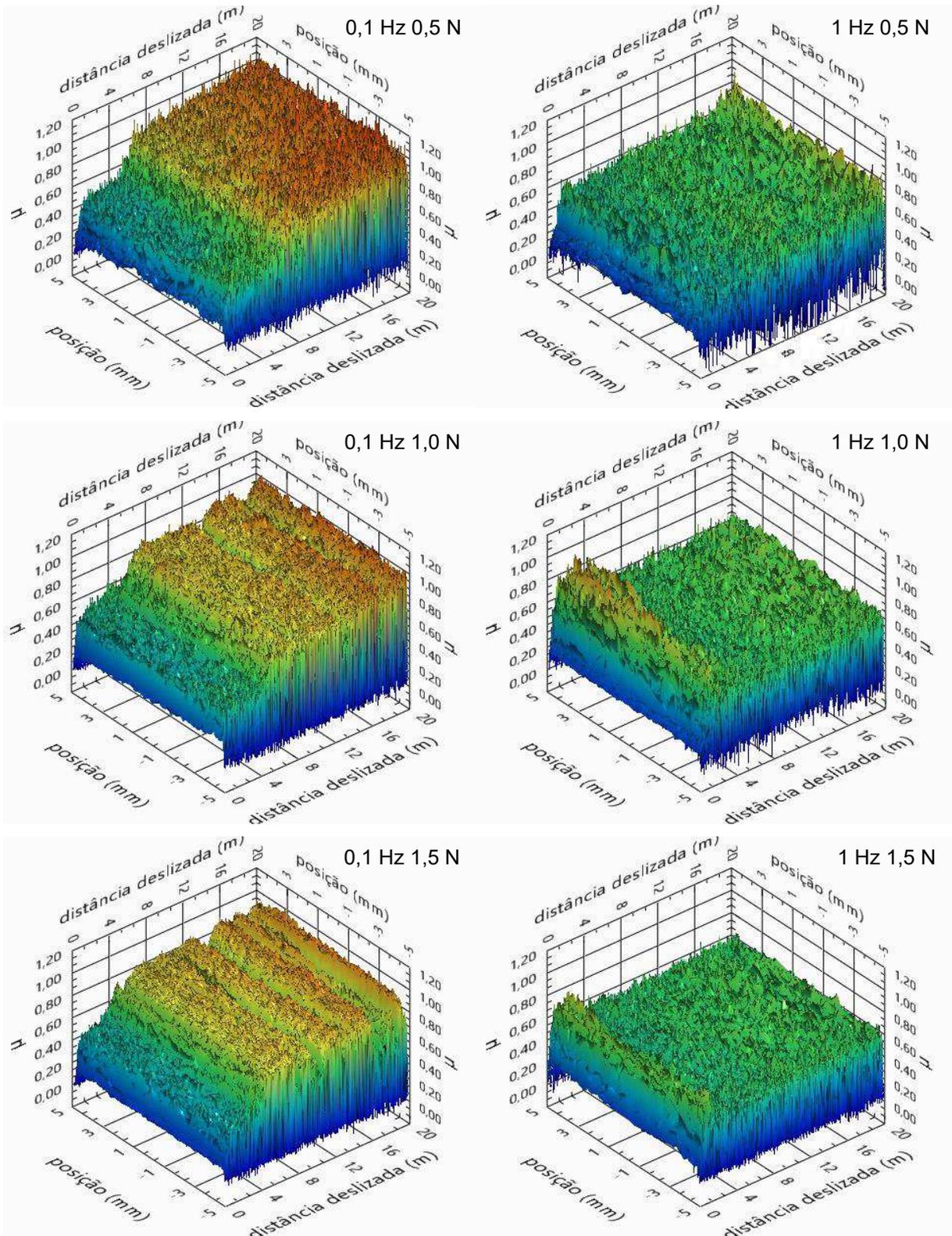


Figura 8.5 - Triboscopia dos ensaios realizados no ortomicrotribômetro. Parâmetros de cada teste indicados na imagem. Todas as imagens possuem a mesma escala de cores.

De maneira geral, o coeficiente de atrito se apresenta constante ao longo da posição em cada ciclo. Se mostra também estável de acordo com a distância deslizada após período de amaciamento. Observa-se que para as baixas frequências a evolução do coeficiente de atrito apresenta algumas irregularidades representadas por reduções abruptas do mesmo seguidas de restabelecimento ao valor estável.

Qualitativamente, aumentar a frequência e/ou a força normal, induz a redução no coeficiente de atrito. O período de amaciamento apresenta valores crescentes de coeficiente de atrito até atingir estabilidade para frequência de 0,1 Hz e crescimento seguido de queda antes de atingir regime permanente de coeficiente de atrito para frequência de 1 Hz. Apresentando transição bem definida entre regimes.

A Figura 8.6 apresenta a evolução típica do coeficiente de atrito médio em cada ciclo para três ensaios sob as mesmas condições (1 Hz 1,5 N), permite avaliar a repetibilidade dos resultados.

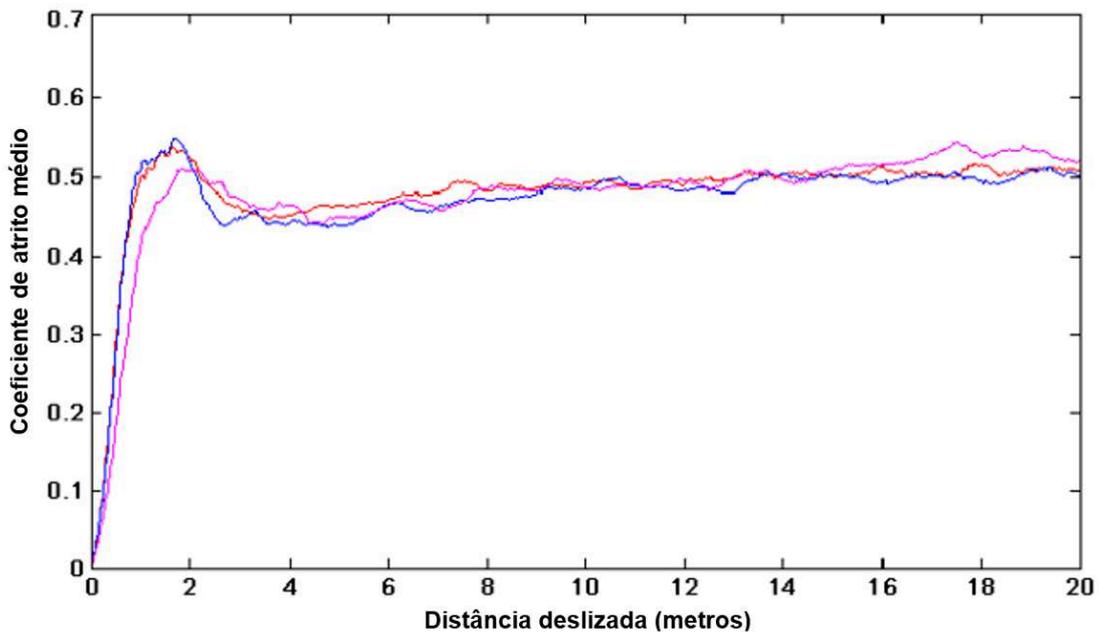


Figura 8.6 - Comportamento típico da repetibilidade dos ensaios, as três curvas correspondem a testes executados sob as mesmas condições (1 Hz e 1,5 N, a seco)

Nota-se que os ensaios apresentam excelente repetibilidade, com comportamentos semelhantes tanto no período de amaciamento como em regime permanente. As pequenas variações no coeficiente de atrito entre os testes e dentro dos regimes, revelam a sensibilidade do equipamento na aquisição dos dados. A repetibilidade dos demais ensaios, ainda que um pouco menor, como sintetizado na Figura 8.13, é semelhante e bastante satisfatória, apresentado erro relativo máximo de 14,7 %. Este erro máximo foi calculado utilizando o maior

desvio padrão encontrado nos valores de coeficiente de atrito, dividido pelo valor de sua respectiva média.

A Figura 8.7 mostra a influência da força normal e da frequência no coeficiente de atrito médio. Para o cálculo do coeficiente de atrito, foram considerados apenas dados no regime permanente, selecionados via rotina computacional no MatLab.

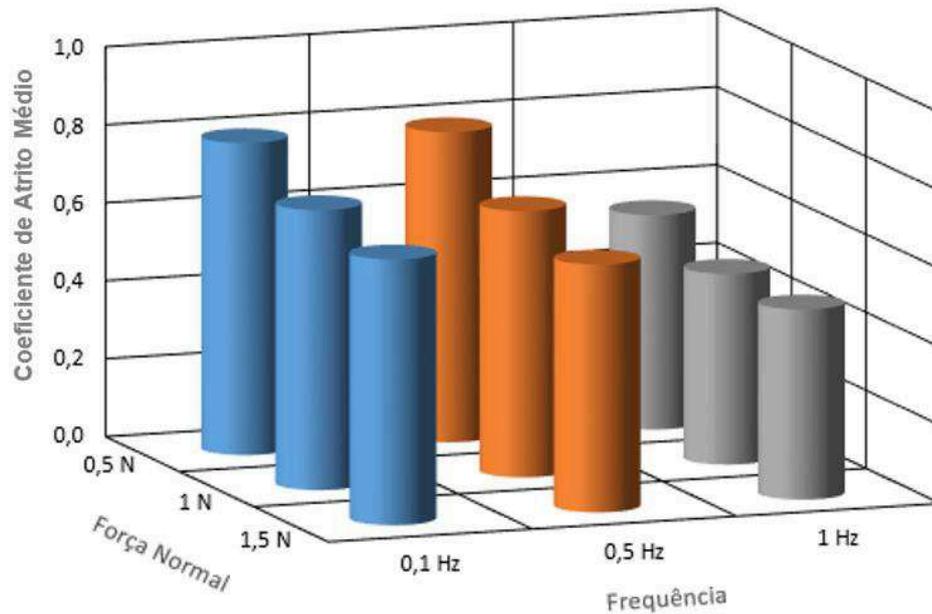


Figura 8.7 - Efeito dos parâmetros tribológicos impostos no coeficiente de atrito médio (regime permanente)

Elevações tanto na força normal como na frequência de deslizamento aplicadas nos ensaios, induzem uma tendência a redução do coeficiente de atrito.

Afim de analisar a influência dos parâmetros tribológicos, impostos nos ensaios, no desgaste, foi mensurada a área desgastada na canaleta do bráquete. A canaleta do modelo de bráquete usado nos ensaios possui dois lados, identificados como lado 1 e 2, como mostra as marcações da Figura 8.8, as setas indicam os locais onde ocorreram as marcas de desgaste, sendo estas localizadas na borda interna da canaleta.

A área quantificada corresponde a somatória de ambos os lados, porém nas análises de imagens das sessões seguintes, será apresentado apenas o lado 1, permitindo assim uma comparação entre ensaios.

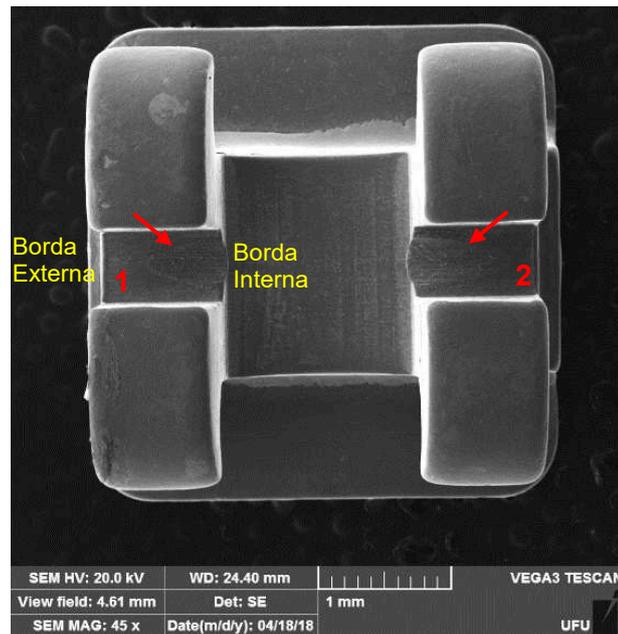


Figura 8.8 - Identificação das marcas de desgaste nos bráquetes ensaiados. Os números indicam os lados, e as setas as posições das marcas de desgaste. A canaleta possui borda interna e externa como indicado em amarelo

A Figura 8.9 mostra a influência da força normal e da frequência na taxa de desgaste do bráquete, sendo esta dada pela Eq.(8.1):

$$\text{Taxa de desgaste} = [\text{área desgastada}] \cdot [\text{força normal}]^{-1} \cdot [\text{distância deslizada}]^{-1} \quad (8.1)$$

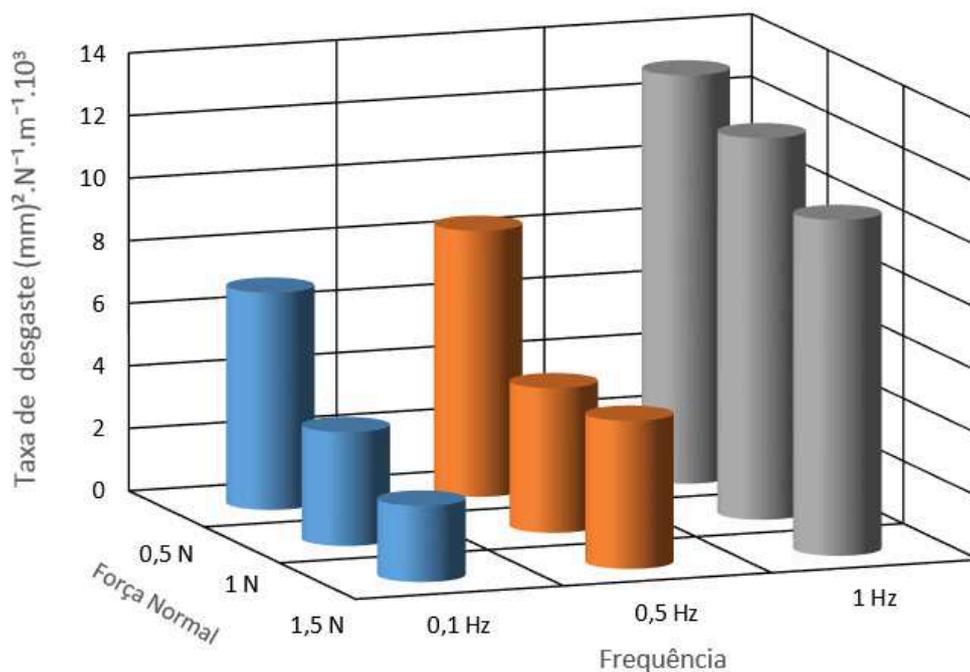


Figura 8.9 - Efeito dos parâmetros tribológicos impostos na taxa de desgaste do bráquete

A taxa de desgaste diminuiu com o aumento da força normal para as três frequências apresentadas. A variação da força normal possui maior influência na baixa frequência. Ao aumentar a frequência, a taxa de desgaste aumentou para uma força normal fixa.

Em todos os ensaios, a marca de desgaste do bráquete acontece, no lado 1 e 2, na borda interna da canaleta, como mostra a Figura 8.8. O bráquete possuindo uma curvatura para melhor fixação na superfície do dente, apresenta alturas diferentes entre as bordas da canaleta. A Figura 8.10 é uma seção transversal feita em um bráquete não ensaiado (posição indicada em ampliação no canto superior direito), mostrando a diferença de altura entre a borda interna e externa da canaleta.

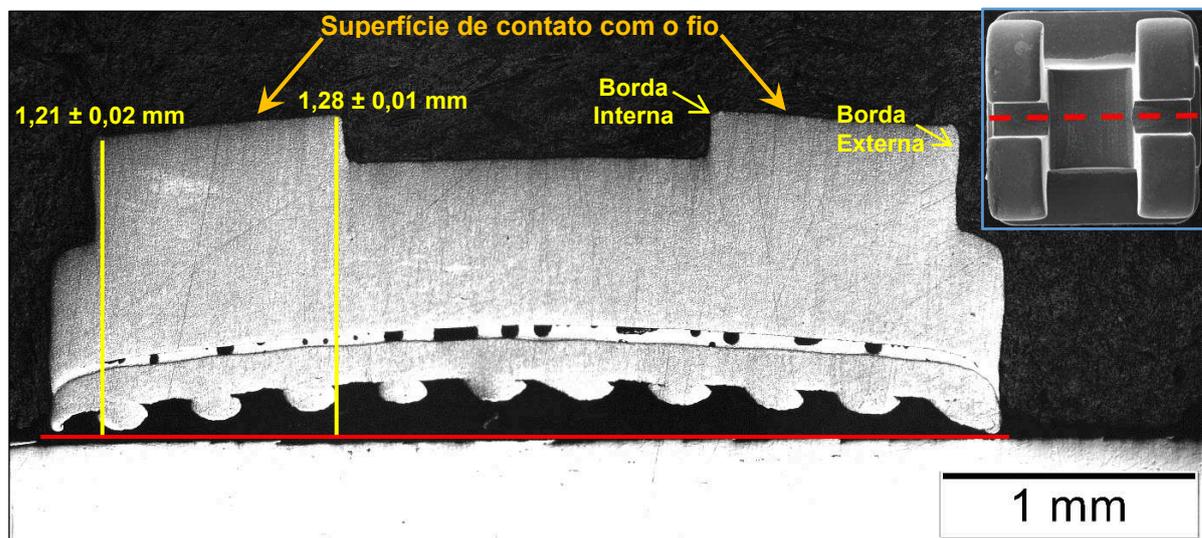


Figura 8.10 - Seção transversal do bráquete (posição indicada em ampliação no canto superior direito), indicando a curvatura do bráquete e diferença de altura entre as bordas da canaleta

Esta diferença de altura é suficiente para que o fio toque primeiro na superfície da borda interna da canaleta, fazendo com que a marca de desgaste aconteça nesta posição.

As dimensões aproximadas entre a marca de desgaste do lado 1 da canaleta e do lado 2, mostradas Figura 8.8, revelam que o procedimento de nivelamento atingiu seu objetivo satisfatoriamente, fazendo com que a força normal seja igualmente aplicada na região de contato entre o fio e bráquete.

A marca de desgaste encontra-se bem centralizada em relação as paredes na canaleta, como mostra a Figura 8.8 e Figura 8.11, evidenciando a eficácia da metodologia de alinhamento.

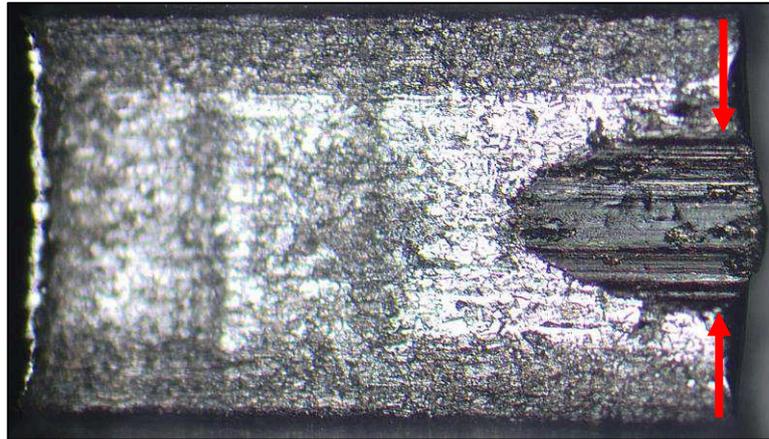


Figura 8.11 - Marca de desgaste centralizada em relação as paredes da canaleta

O sistema de fixação do bráquete e do fio se mostra eficiente, permitindo uma correta atuação do sistema de controle ativo da força normal, durante todo o ensaio, como mostra a Figura 8.12. A metodologia de tensionamento do fio também foi satisfatória, confirmada ao analisar a repetibilidade dos valores de coeficiente de atrito, ver Figura 8.6, fazendo com que todos os fios ensaiados tenham o mesmo tensionamento, não interferindo, portanto, na resposta do sistema.

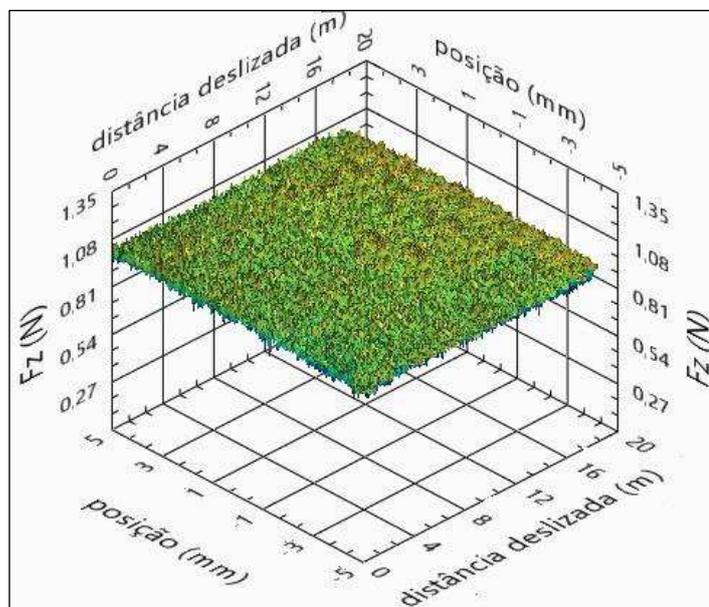


Figura 8.12 - Comportamento constante da força normal imposta a um ensaio de 1 N

A influência dos parâmetros tribológicos impostos aos ensaios, será avaliada qualitativamente nos tópicos seguintes.

8.3 INFLUÊNCIA DA FORÇA NORMAL

8.3.1 Análise do Coeficiente de Atrito

A Figura 8.13 apresenta a influência da força normal no coeficiente de atrito médio (regime permanente).

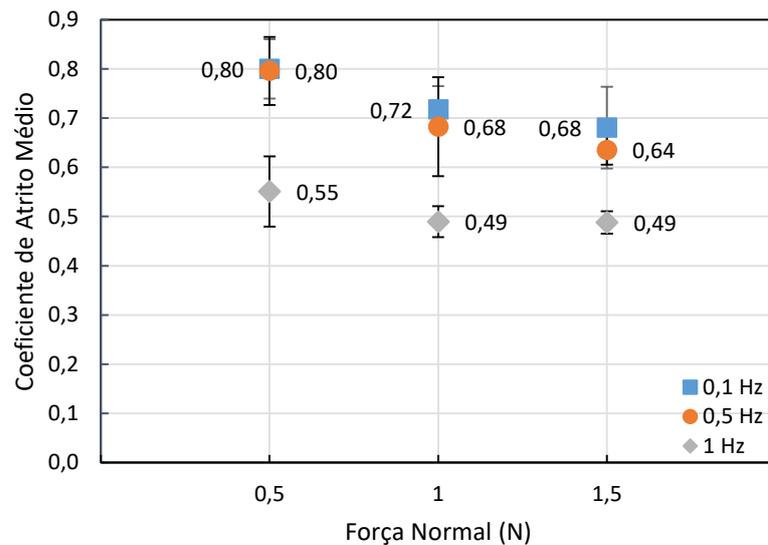


Figura 8.13 - Influência da força normal no coeficiente de atrito médio

Ao comparar os valores de coeficiente de atrito para as três forças normais, observa-se que o aumento da carga, provoca uma tendência à redução do coeficiente de atrito para uma frequência fixa. Para a alta frequência, a influência da força normal se mostra menos expressiva, não apresentando diferenças significativas no coeficiente de atrito ao mudar força normal imposta. Enquanto que para as menores frequências, o coeficiente de atrito tem maior influência da força normal, apresentando variações significativas com a mudança desta. Confirmado através da técnica estatística, Análise de Variância (ANOVA), com intervalo de confiança de 90%.

Os resultados em frequência 0,5 Hz são estatisticamente equivalentes àqueles encontrados em 0,1 Hz para as três forças impostas. Portanto, os resultados relativos aos ensaios efetuados com a frequência 0,5 Hz não serão abordados nas demais análises. A equivalência foi verificada através da técnica ANOVA, com intervalo de confiança de 90%.

Uma das prováveis justificativas para este comportamento, onde o coeficiente de atrito diminui com o aumento da força normal, é dada pela teoria da deformação plástica. O fio fabricado em aço 302 possui dureza Brinell máxima de 201 HB, de acordo com a norma ASTM

A240/A240M (2015), e o bráquete produzido em aço 303Cu, possui dureza Brinell de 215 HB (METALCOR, 2018). Nesta perspectiva, apesar dos valores de dureza se aproximarem, as asperidades da superfície mais dura (bráquete) podem provocar sulcos/riscos nas superfícies mais dúcteis (fio), estes, por sua vez, levam à deformação plástica da superfície/subsuperfície, podendo induzir o encruamento contribuindo para aumento da dureza superficial com consequente redução do coeficiente de atrito (BLAU, 2008). Este é um mecanismo secundário, não sendo, portanto, o principal determinante no comportamento do tribo-sistema. O mesmo acontece junto com os demais fenômenos apresentados a seguir.

Na Figura 8.14 é possível perceber estes sulcos/riscos (setas amarelas) característicos de desgaste abrasivo, como mostra o encarte de maior ampliação, e ilhas/fragmentação de tribo-camadas (setas vermelhas) na superfície do fio. Estes eventos são menos frequentes no ensaio com carga de 0,5 N (Figura 8.14a), do que no ensaio com carga de 1,5 N (Figura 8.14b).

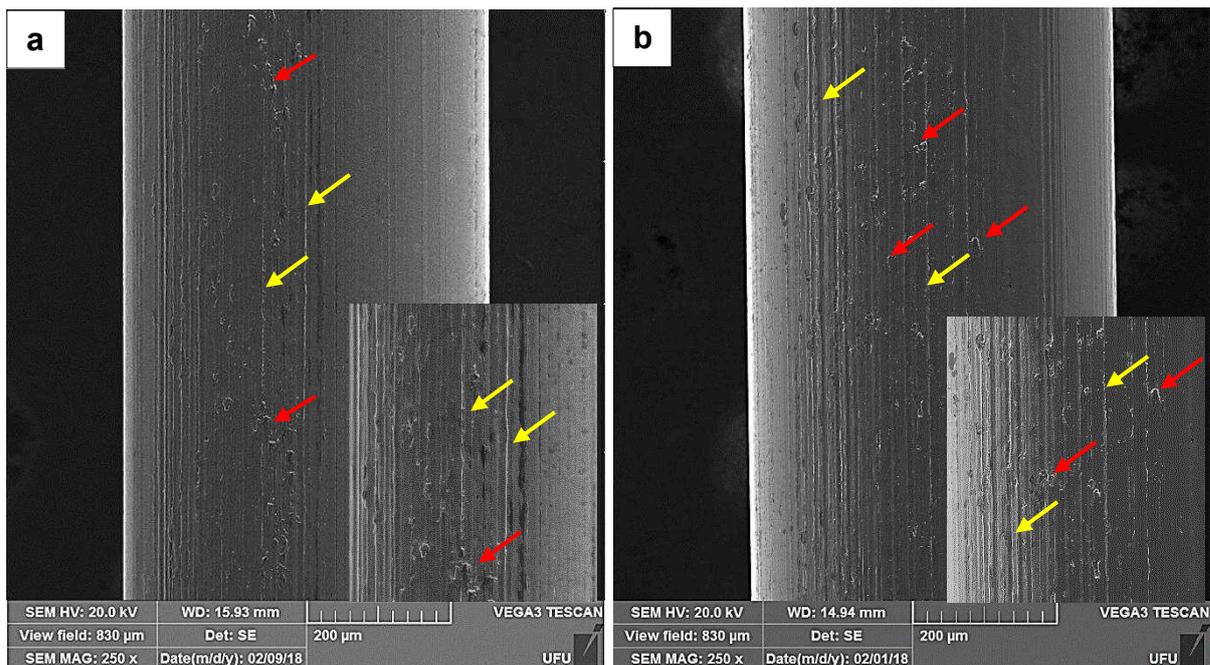


Figura 8.14 - Aspecto típico das marcas de desgaste do fio. a) Força normal de 0,5 N. b) Força normal de 1,5 N. Frequência de 1 Hz. Imagens obtidas via MEV SE. Encartes com aumento 250x maior que imagem principal. Setas vermelhas indicam ilhas/fragmentação de tribo-camadas, setas amarelas indicam sulcos/riscos.

As superfícies dos itens ortodônticos, não são idealmente lisas, apresentando em escala microscópica picos e vales. Quando colocadas em contato, corpo e contra-corpo, as asperidades se tocam. Nos pontos de contato das asperidades, a tensão de contato pode exceder a resistência mecânica do material. Este processo está ainda mais propenso a ocorrer

com o aumento da força normal. Ao exceder a resistência mecânica do material, deformações localizadas podem gerar uma solda a frio e união dos dois materiais. Com a continuidade do movimento relativo, esta parte deformada pode vir a se fraturar, gerando debris. Ressalta-se que estes debris podem também ser a origem das marcas características de desgaste abrasivo presente nos fios (BLAU, 2015; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Estas partículas de desgaste, por sua vez, se misturam, e com a continuidade do movimento relativo, são cominuídas na interface e interações físicas e químicas acontecem. Forma-se assim um novo compósito, a tribo-camada. Este compósito está sempre em contínua deformação, adesão e fragmentação (HOLMBERG; MATTHEWS; RONKAINEN, 1998; LUO et al., 2009).

A análise via EDS de uma destas ilhas/fragmentações de tribo-camada, indicadas na Figura 8.14, e também de uma região onde ocorreu movimento relativo, porém sem presença notável de sulcos/riscos ou tribo-camadas, é mostrada na Figura 8.15. A análise da ilha/fragmentação, espectro 1, mostra elevada concentração de oxigênio, indicando presença de tribo-camada. Enquanto que na outra região, espectro 2, os componentes encontrados não indicam formação desta.

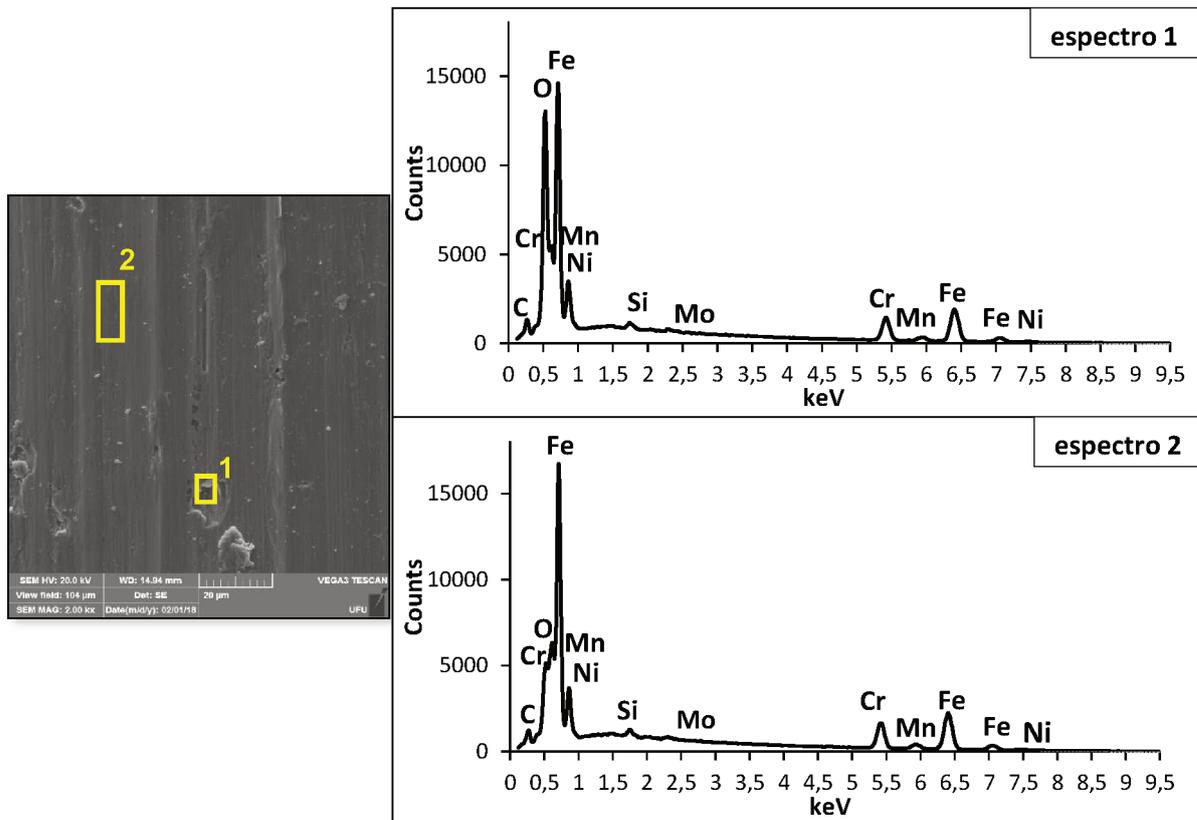


Figura 8.15 - Análise EDS, do fio ensaiado a 1 Hz e 1,5 N. EDS das regiões indicadas em amarelo na figura à esquerda (encarte de maior aumento da Figura 8.14b)

O aumento da força normal pode induzir o aumento da temperatura na interface, sendo esta, intimamente relacionada com o potencial de oxidação, aumentando a taxa de formação de óxidos no tribo-filme. Tais filmes podem agir como camada protetora separando as duas superfícies, induzindo uma menor área de contato metal-metal. Neste caso, o coeficiente de atrito é reduzido, explicado pela baixa tensão cisalhante dada a natureza do tribo-filme e devido ao fato de sua maior dureza limitar o crescimento de junções na interface de contato, (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017; LIM; ASHBY; BRUNTON, 1987).

As tribo-camadas podem ser identificadas como regiões cinza escuro indicadas pelas setas vermelhas nos bráquetes, na Figura 8.16a (0,5 N) e Figura 8.16b (1,5 N) com maior número de ocorrências nesta última (ensaio com maior carga). Estas regiões possuem teor elevado de oxigênio, como mostra o espectro 1 EDS da Figura 8.17 (áreas indicadas em amarelo na Figura 8.16b), por isso deduz-se que seja uma área de formação de tribo-filme. Diferente das regiões cinza claro, sem aparente formação de tribo-filme, como mostra resultado apresentado no espectro 2 EDS da Figura 8.17, no qual o teor de oxigênio é baixo.

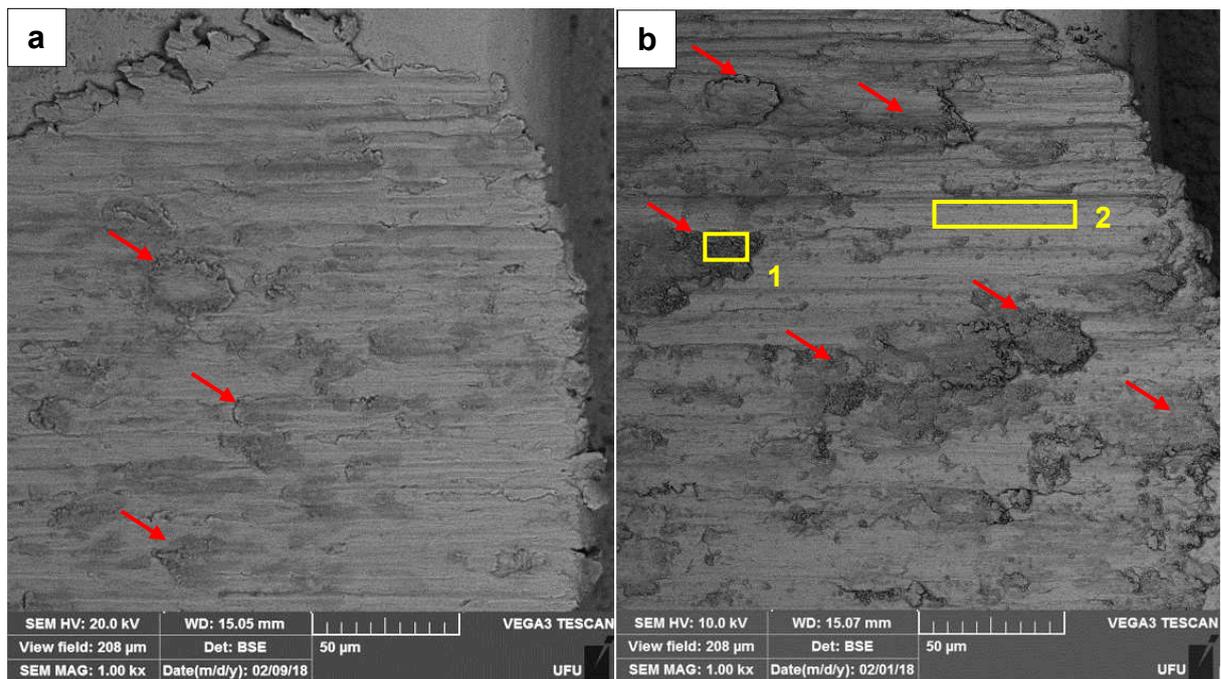


Figura 8.16 - Aspecto típico das marcas de desgaste do bráquete. a) Força normal de 0,5 N. b) Força normal de 1,5 N. Frequência de 1 Hz. Imagens obtidas via MEV BSE

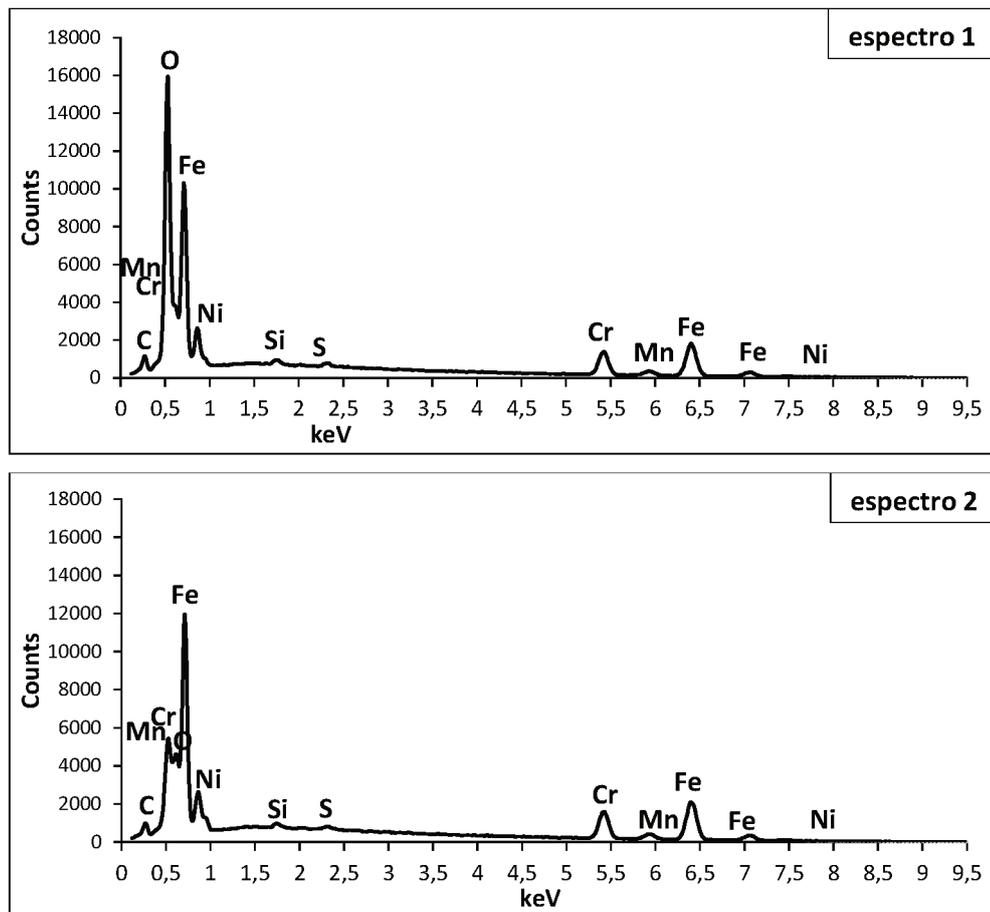


Figura 8.17 - Análise EDS dos espectros em amarelo na Figura 8.16b

Para as altas frequências e cargas maiores, o coeficiente de atrito se estabiliza mesmo com o aumento da força normal, como mostra Figura 8.13, indicando que a taxa de formação/degradação da tribo-camada se estabilizou. A tribo-camada passa então a governar o comportamento tribológico deste tribo-sistema.

Através destes resultados, conclui-se que o mecanismo que rege o comportamento do coeficiente de atrito em função da força normal no estudo do atrito bráquete-fio, é a formação de tribo-camadas que com elevada dureza e em maior quantidade ao aumentar a força normal, reduz o coeficiente de atrito. Estes tribo-filmes agem inibindo o contato metal-metal e exercendo um papel de lubrificação sólida.

8.3.2 Análise do Desgaste

A Figura 8.18a mostra que a marca de desgaste do bráquete em ensaio a 0,5 N é menor que a marca de desgaste do ensaio a 1,5 N, Figura 8.18b.

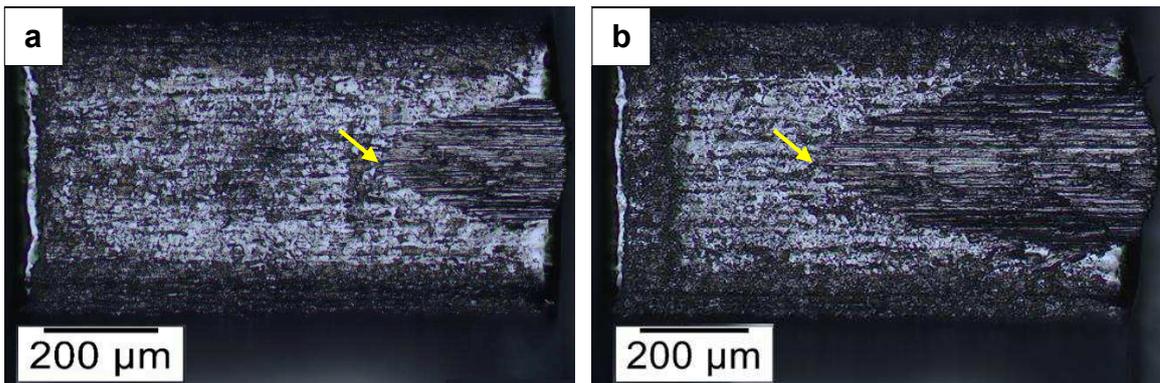


Figura 8.18 - Efeito da força normal na marca de desgaste do bráquete. a) Força normal de 0,5 N. b) Força normal de 1,5 N. Frequência de 1 Hz. As setas indicam o final da marca de desgaste. Imagens obtidas via MO

A Figura 8.19 apresenta a influência da força normal na taxa de desgaste dos bráquetes.

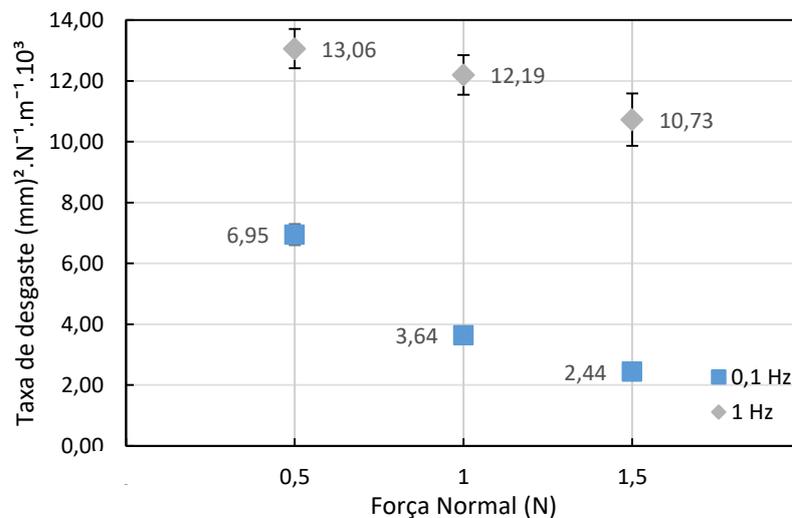


Figura 8.19 - Influência da força normal na taxa de desgaste do bráquete

Tanto para a baixa frequência como para a alta, o aumento da força normal, induz a redução da taxa de desgaste do bráquete, porém com menor influência na alta frequência, na qual os valores de taxa de desgaste não apresentam variações significativas com a mudança da força normal, verificado através da técnica ANOVA, com intervalo de confiança de 90%.

A cinética de formação e degradação da tribo-camada é de suma importância neste processo. Na baixa frequência, a maior influência da força normal na taxa de desgaste indica que taxa de formação/degradação de tribo-camada presente na superfície não está estabilizada, a cinética de formação e degradação do tribo-filme sofre influência da força

normal imposta no tribo-sistema. Na alta frequência, como já discutido no tópico anterior, a menor influência da força normal indica que a taxa de formação/degradação da tribo-camada é mais estável, protegendo a superfície e reduzindo a taxa de desgaste, apresentando valores próximos ao mudar a carga imposta.

Apesar da Figura 8.18 mostrar que o desgaste é maior no ensaio com maior carga, a taxa de desgaste diminui ao aumentar a força normal, como mostra a Figura 8.19. Neste caso, a área desgastada não aumenta na mesma proporção que a força normal aplicada. Supõe-se que o aumento da área desgastada com o aumento da força normal, produziu maior quantidade de debris, aumentando a quantidade de matéria prima disponível para formação de tribo-camada. Esta por sua vez, protegeu a superfície induzindo a redução da taxa de desgaste. Enquanto que, ao diminuir a força normal, a menor área desgastada apresentou menos matéria prima disponível para formação de tribo-camada, com menor proteção da superfície, induzindo, portanto, a uma maior taxa de desgaste.

8.3.3 Análise do Amaciamento

Caracterizado pelas mudanças no coeficiente de atrito na fase inicial em função do tempo, número de ciclos ou distância de deslizamento, o amaciamento corresponde ao tempo que o tribo-sistema requer para atingir o estado estacionário.

A Figura 8.20 ilustra a influência da força normal na distância percorrida necessária para atingir regime permanente de coeficiente de atrito.

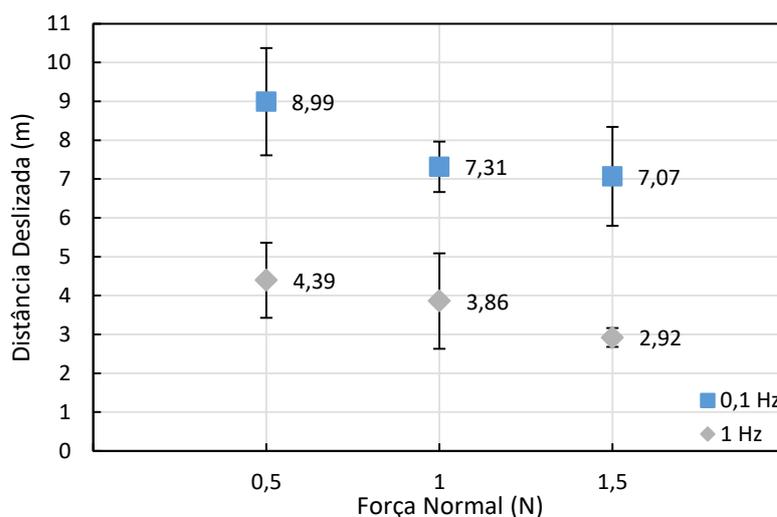


Figura 8.20 - Influência da força normal no período de amaciamento

Ao aumentar a força normal, para uma dada frequência, os períodos de amaciamento são menores. Este comportamento se repete tanto na baixa frequência como na alta. Apesar

desta tendência à redução do período de amaciamento, a variação não se mostra significativa de acordo com a técnica estatística ANOVA, com intervalo de confiança de 90%.

Transições naturais, sem estímulo externo ocorrem no tribo-sistema. Diversas podem ser as causas para o menor período de amaciamento com o aumento da força normal. Estas transições naturais podem variar de um experimento para o outro mesmo que estes estejam sob os mesmos parâmetros, afetando a repetibilidade dos dados, podendo assim justificar um maior desvio padrão para a maioria dos ensaios como mostra a Figura 8.20 (BLAU, 2015).

O menor período de amaciamento com o aumento da força normal, pode ser justificado pela maior velocidade das reações entre as superfícies, aumentando a taxa de transferência de material e formação de tribo-camadas induzindo a maior presença destas na superfície com o aumento da força normal. Estes materiais aderidos a superfície alteram de diversas formas a natureza desta, ocasionando mudança na área real de contato, propriedades mecânicas como dureza, cobrindo as asperezas duras e afiadas que ainda não se transformaram em debris, etc, mudando o comportamento do deslizamento (BLAU, 1981, 2015).

Para as menores cargas, as partículas de desgaste misturadas e as tribo-camadas demoram mais a serem formadas, as interações entre as asperezas das superfícies ocorrem por mais tempo, prolongando o período de amaciamento.

8.4 INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE DESLIZAMENTO

8.4.1 Análise do Coeficiente de Atrito

A Figura 8.21 mostra a influência da frequência de deslizamento nos valores de coeficiente de atrito médio.

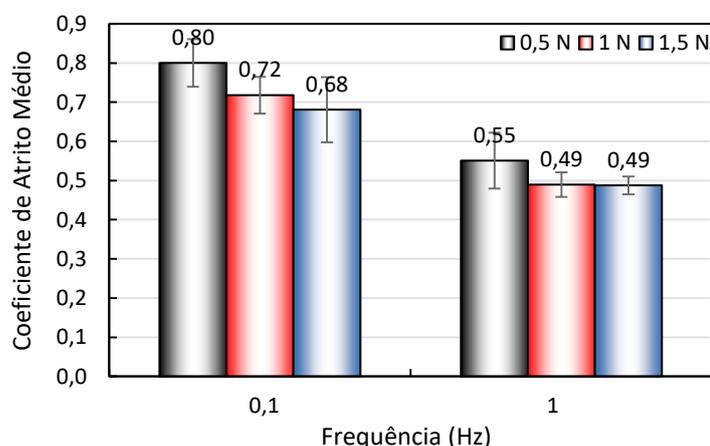


Figura 8.21 - Influência da frequência no coeficiente de atrito médio

Ao analisar estes dados, deduz-se que, quanto maior a frequência de deslizamento, menor o coeficiente de atrito. Há uma significativa diferença de valores do coeficiente de atrito entre a baixa frequência e a alta, confirmada através da técnica ANOVA com intervalo de confiança de 90%. Porém em uma mesma frequência, os resultados de coeficiente de atrito em diferentes cargas se aproximam, não apresentando diferença relevante. Neste caso, a frequência de deslizamento apresenta maior influência no tribo-sistema que a força normal imposta.

A frequência do deslizamento está diretamente relacionada com a temperatura no contato entre as asperezas. Quanto maior a frequência, mais energia dissipada em forma de calor, aumentando a temperatura local e reatividade da superfície. O aumento da frequência, assim como explicado na influência da carga, aumenta a quantidade de partículas de desgaste presente no contato. Há uma mútua transferência de material que juntamente às reações com a atmosfera, geram as tribo-camadas (HOLMBERG; MATTHEWS; RONKAINEN, 1998; LUO et al., 2009).

Os locais de formação de tribo-filme, pontos cinza escuro, indicados pelas setas vermelhas, são ilustrados nos bráquetes na Figura 8.22(a e b) em ensaio a 0,1 Hz e 1 Hz respectivamente, e nos fios na Figura 8.23(a e b) em ensaio a 0,1 Hz e 1 Hz, respectivamente. Estas ilhas de tribo-camadas possuem teor elevado de oxigênio, como mostra a EDS da Figura 8.24. O tribo-filme reduz a área de contato metal-metal entre as superfícies, impedindo o crescimento de junções, reduzindo a resistência ao cisalhamento e conseqüentemente, diminuindo o coeficiente de atrito (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017; LANCASTER, 1963).

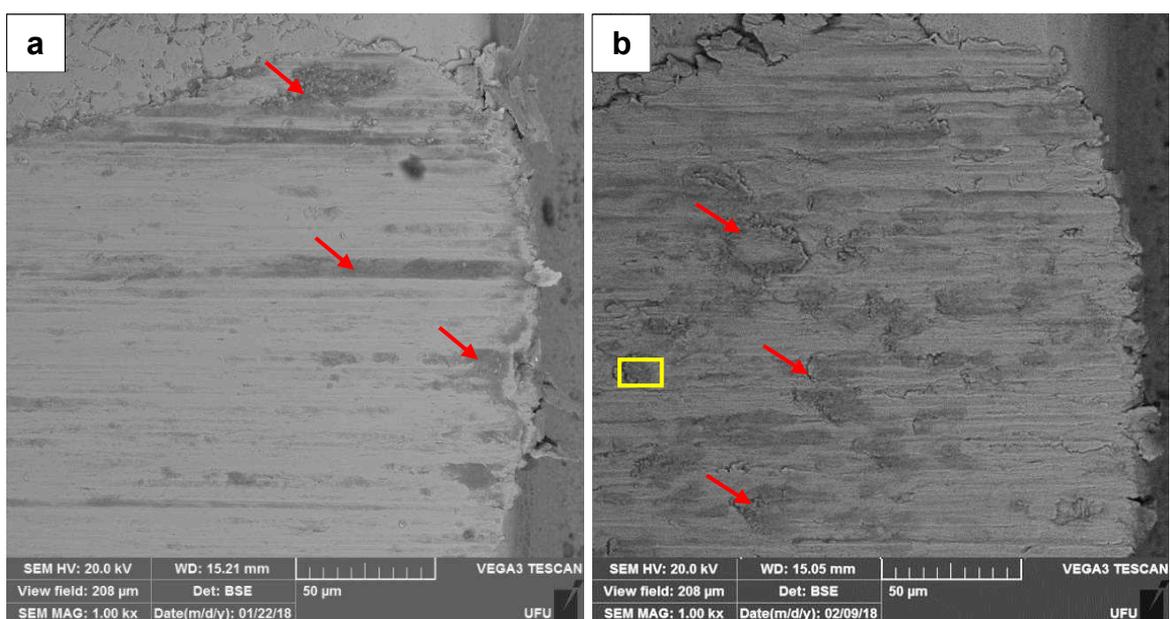


Figura 8.22 - Efeito da frequência na morfologia do desgaste a) Bráquete ensaiado a 0,1 Hz. b) Bráquete ensaiado a 1 Hz. Força normal 0,5 N. Imagem obtida via MEV BSE

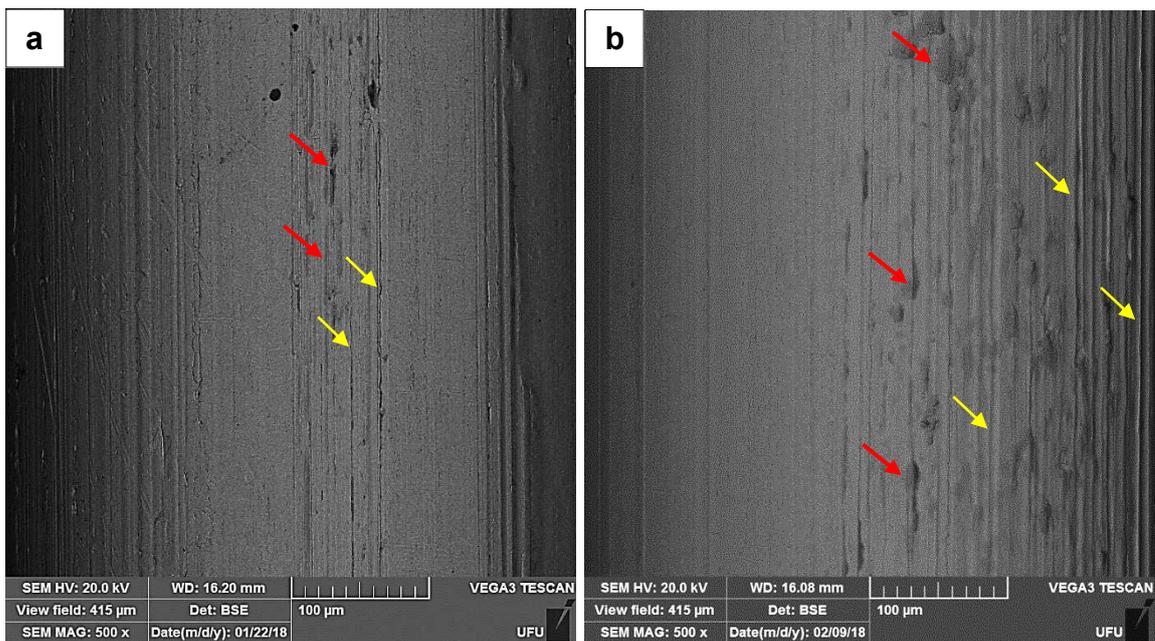


Figura 8.23 - Efeito da frequência na morfologia do desgaste a) Fio ensaiado a 0,1 Hz. b) Fio ensaiado a 1 Hz. Força normal 0,5 N. Imagem obtida via MEV BSE

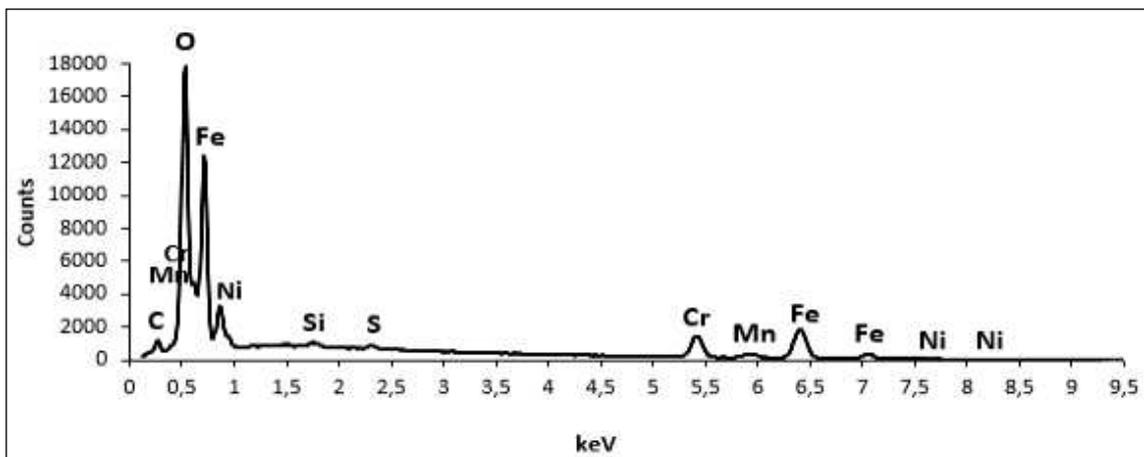


Figura 8.24 - Análise EDS do bráquete ensaiado a 1 Hz e 0,5 N. EDS da região em amarelo na Figura 8.22b

Observa-se também na Figura 8.22 e Figura 8.23 que as regiões cinza escuras, tribo-camadas, são menos frequentes em 0,1 Hz, tanto no fio como no bráquete. Devido a menor dissipação de energia e por consequência, menores temperaturas provavelmente atingidas durante o deslizamento nesta frequência, comparado ao teste de 1 Hz, formou-se menos tribo-filmes na superfície. Há uma maior área de contato metal-metal durante o deslizamento, apresentando maior coeficiente de atrito que o ensaio de 1 Hz na mesma carga.

Os debris formados podem também, além de participar da formação dos tribo-filmes, ocasionar desgaste abrasivo, indicados pelas setas amarelas na Figura 8.23 e em maior

número de ocorrências para a alta frequência, devido a maior geração destas partículas nesta condição.

8.4.2 Análise do Desgaste

A variação da frequência de deslizamento provoca significativa variação do desgaste como ilustrado pela Figura 8.25a, que mostra o desgaste do bráquete em ensaio a 0,1 Hz, e Figura 8.25b mostrando o desgaste em ensaio a 1 Hz.

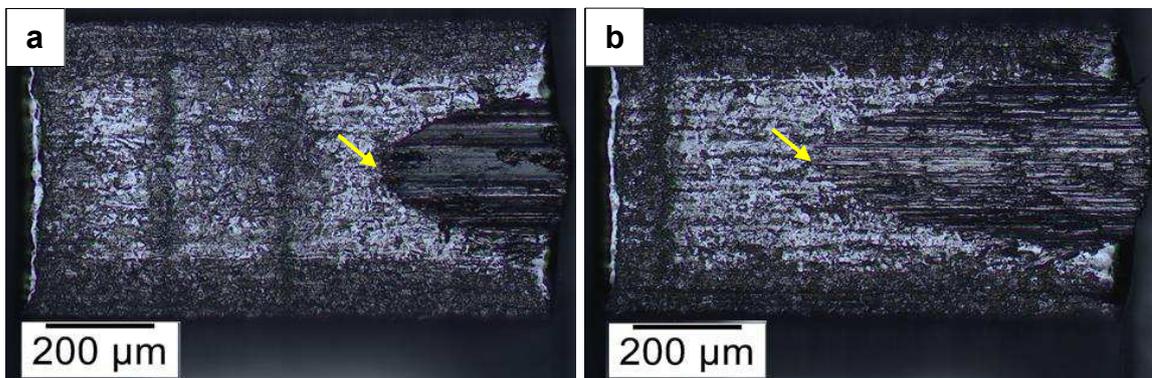


Figura 8.25 - Efeito da frequência na marca de desgaste do bráquete. a) Frequência de 0,1 Hz. b) Frequência de 1 Hz. Força normal de 1,5 N. As setas indicam o final da marca de desgaste. Imagens obtidas via MO

O aumento da frequência de deslizamento provoca significativo aumento da taxa de desgaste, Figura 8.26.

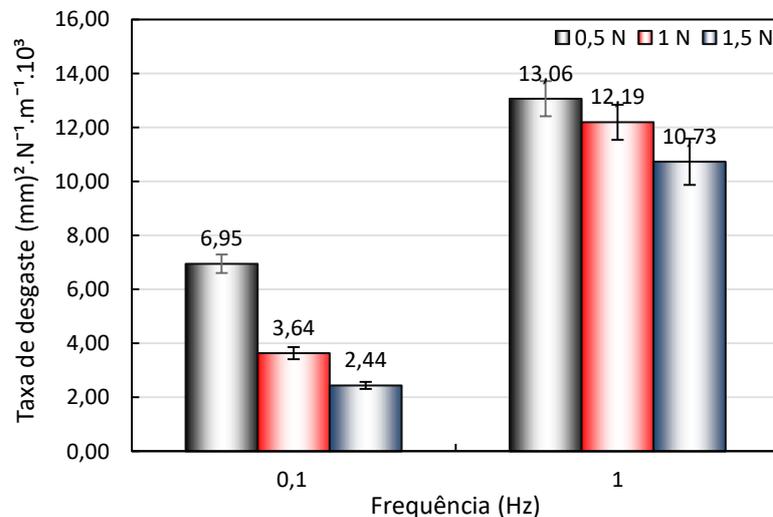


Figura 8.26 - Influência da frequência na taxa de desgaste do bráquete

Em baixas frequências a mudança da carga tem maior influência na taxa de desgaste, indicando que nestas frequências, a taxa de formação/degradação de tribo-camada não está estabilizada, ou seja, a cinética de formação e degradação do tribo-filme sofre influência da força normal imposta no tribo-sistema. Para altas frequências, a força normal tem menor influência na taxa de desgaste, os valores se aproximam, indicando, portanto, que a taxa de formação/degradação do tribo-filme é mais estável para estas frequências. O aumento da taxa de desgaste com o aumento da frequência é um fenômeno que ainda não está bem compreendido e necessita de aprofundamento no estudo em trabalhos futuros.

8.4.3 Análise do Amaciamento

A Figura 8.27 mostra um comparativo das distâncias percorridas, para frequências de 0,1 Hz e 1 Hz, até atingir o regime de estabilidade do coeficiente de atrito. Quanto maior a frequência, menor o período de amaciamento.

A mudança da frequência provoca maior influência nas distâncias para entrar no regime permanente, apresentando valores bem distintos ao variar este parâmetro, do que a mudança da força normal, onde os valores de distância se aproximam.

Assim como ocorre com o aumento da força normal, o aumento da frequência acelera o processo de adaptação da morfologia da superfície. As deformações plásticas e fragmentação das asperidades ocorrem em menor intervalo de distância, estas por sua vez cominuídas na superfície são matéria prima para formação de tribo-camadas, que mudam a natureza da superfície em uma menor distância percorrida. Na baixa frequência, esta distância percorrida para mudança da natureza da superfície se faz maior.

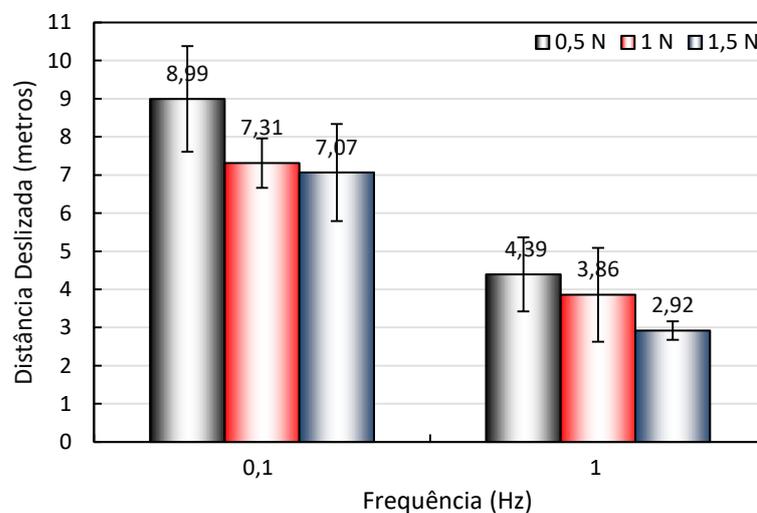


Figura 8.27 - Influência da frequência no período de amaciamento

Observou-se na Figura 8.5 que para a frequência de 0,1 Hz a evolução do coeficiente de atrito apresentou alguns transientes, representados por reduções abruptas do mesmo, seguidos de restabelecimento ao valor estável. Duas hipóteses são abordadas para estas reduções no coeficiente de atrito. O fio apresentando baixa resistência a flexão, pode ter se flexionado durante o ensaio, o atuador piezoelétrico ainda na sua faixa de atuação, conseguiu reestabelecer a força normal aplicada que não apresentou variações. Neste caso o fio menos tensionado apresentou abrupta redução do coeficiente de atrito seguido de reestabelecimento deste valor. O monitoramento do atuador durante todo o ensaio, com aquisição de dados da posição deste, é uma solução para verificar se esta hipótese ocorre, podendo ser implementado em rotina computacional em ensaios futuros.

A segunda hipótese se baseia na formação de tribo-camadas em específicas distâncias percorridas de ensaio. Estas tribo-camadas formadas na superfície, protegendo-a e induzindo menor contato metal-metal, ocasionou redução do coeficiente de atrito. Para verificação desta hipótese, sugere-se a realização de ensaios interrompidos antes da redução do coeficiente de atrito e após este fenômeno, que podem indicar se houve formação/degradação de tribo-camadas nestes instantes.

8.5 INFLUÊNCIA DO AMBIENTE DE TESTE

O ensaio que obteve melhor resultado em repetibilidade foi o de 1 Hz e 1,5 N, como mostra o gráfico comparativo da Figura 8.13, com menor desvio padrão. Afim de analisar a influência do meio lubrificado com saliva artificial, estes parâmetros foram adotados com o intuito de facilitar a análise comparativa.

8.5.1 Análise do Coeficiente de Atrito

Ao comparar o ensaio a seco, Figura 8.28a, com o ensaio imerso em saliva, Figura 8.28b, observa-se que o ensaio lubrificado é o que apresenta menor coeficiente de atrito e menor variação de valores no seu comportamento.

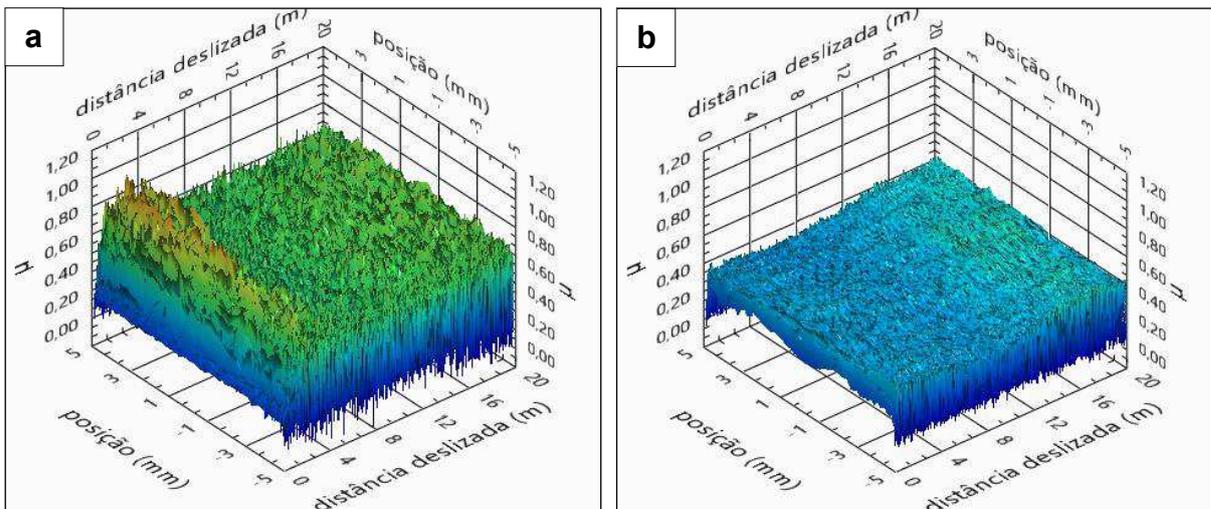


Figura 8.28 - Efeito do ambiente no coeficiente de atrito. a) Ensaio a seco (ao ar). b) Imerso em saliva artificial. Ambos em mesma escala de cores.

As menores variações de coeficiente de atrito no decorrer do ensaio imerso em saliva, quando comparado ao ensaio a seco, são evidenciadas na Figura 8.29.

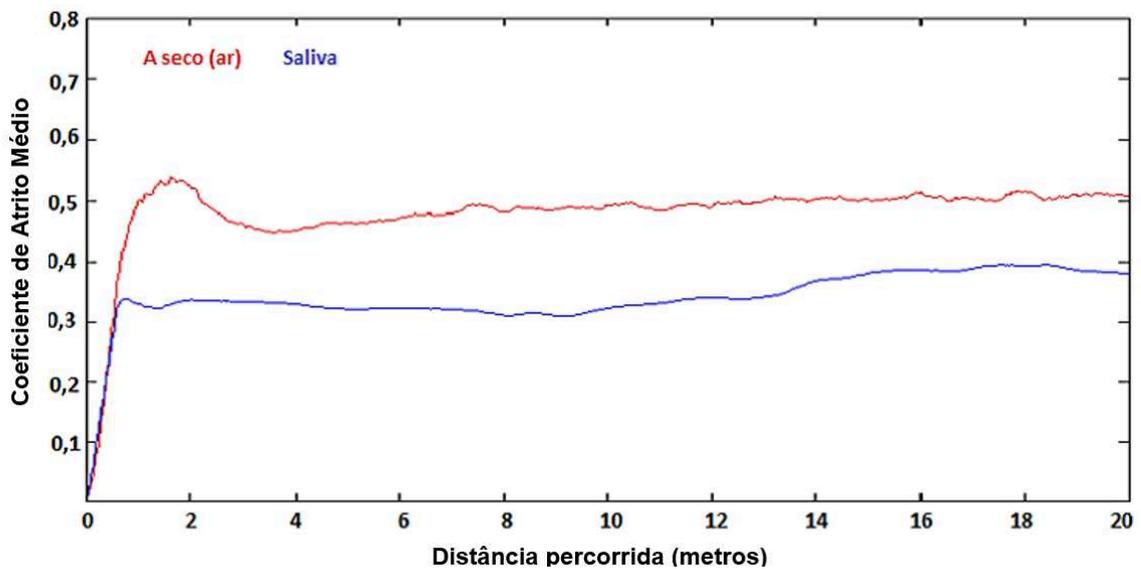


Figura 8.29 - Comportamento do coeficiente de atrito médio em ensaio não lubrificado (a seco no ar) e imerso em saliva artificial

A influência do ambiente no coeficiente de atrito pode ser observada na Figura 8.30, onde são apresentados os resultados do ensaio realizado a seco, e em banho de saliva artificial mantida a temperatura entre 36,4 °C a 37,2 °C.

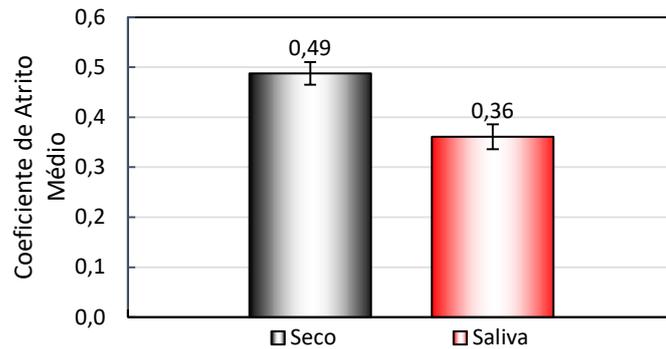


Figura 8.30 - Influência do ambiente no coeficiente de atrito médio, ensaio a 1 Hz 1,5 N

O coeficiente de atrito sofreu influência do ambiente de teste, apresentando valores menores nos ensaios imersos em saliva artificial.

Ao introduzir saliva artificial no sistema, este se comporta em regime lubrificado, no qual o coeficiente de atrito é menor que nas condições sem lubrificação (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2006).

As superfícies desgastadas apresentam morfologia mais homogênea no ensaio lubrificado do que todos os outros casos, como visto na Figura 8.31.

O fio apresenta alguns sulcos/riscos em sua superfície na direção do deslizamento, indicando desgaste abrasivo, setas amarelas, porém sem ilhas de tribo-filme ou aparente material aderido em sua superfície, como visto frequentemente nos demais ensaios. A superfície onde houve o deslizamento no bráquete revela também sulcos/riscos, indicando desgaste abrasivo, setas amarelas, e poucas e pequenas regiões onde formou tribo-filmes, setas vermelhas.

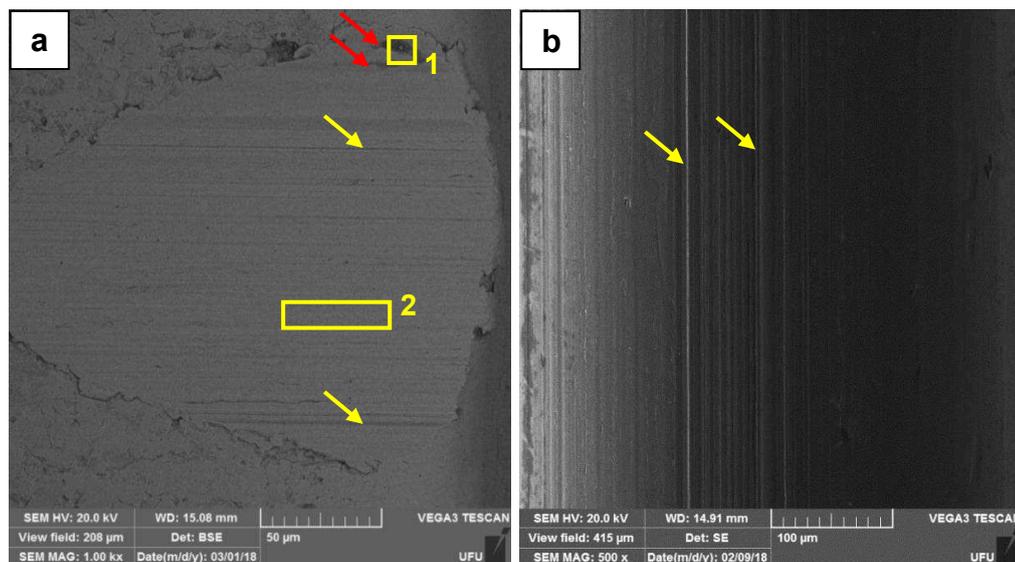


Figura 8.31 - Efeito do ambiente de teste na morfologia do desgaste a) Bráquete. b) Fio. Ensaíados a 1 Hz 1,5N, imersos em saliva artificial. Imagens obtidas via MEV BSE e SE

A Figura 8.32, espectro 1, mostra a análise via EDS de uma destas pequenas áreas (região 1 na Figura 8.31a) que apresenta aumento na concentração de oxigênio, indicando a formação de tribo-camadas. Diferente de uma região onde não há evidências de formação de tribocamadas (região 2 na Figura 8.31a), na qual a análise EDS, vista no espectro 2, mostra menor concentração de oxigênio. A menor quantidade de tribo-camada presente nos itens ortodônticos no ensaio imerso em saliva, evidencia que o ambiente de ensaio exerce forte influência na formação desta (XIA; LI, 2008).

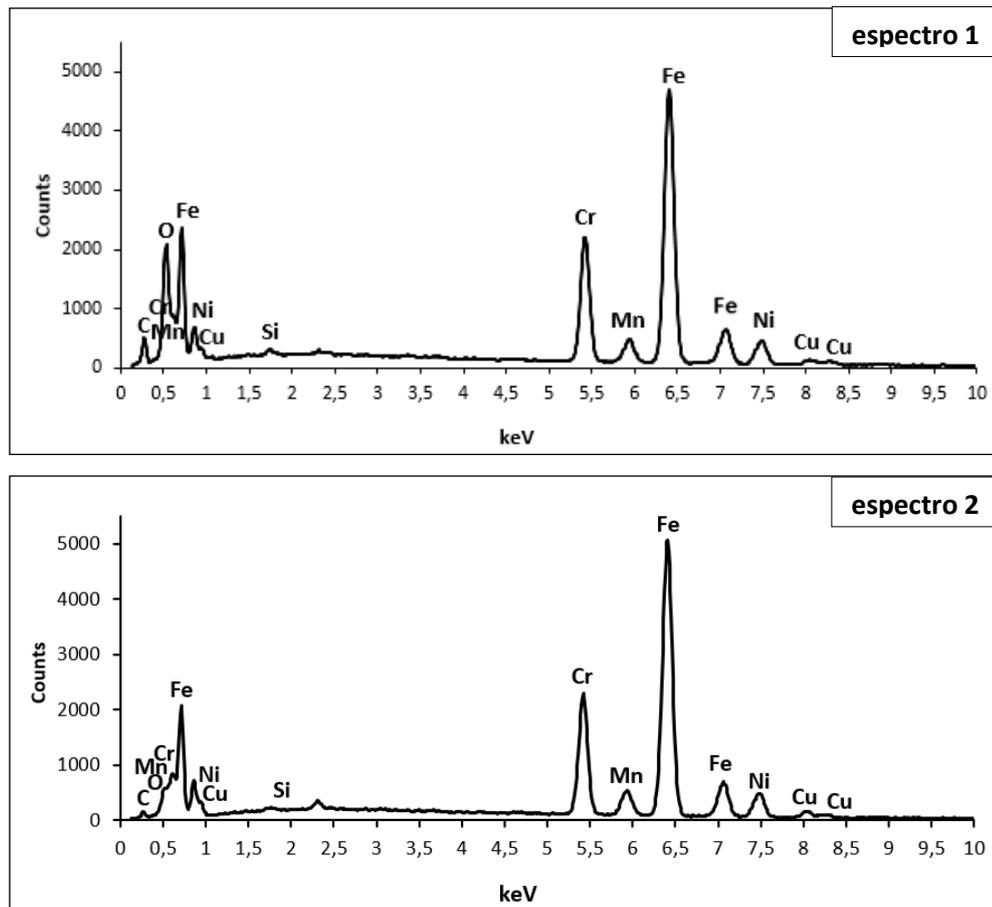


Figura 8.32 - Análise EDS do bráquete ensaiado a 1 Hz e 1,5 N lubrificado com saliva. EDS das regiões em amarelo na Figura 8.31a

8.5.2 Análise do Desgaste

Nesta análise foi utilizado um interferômetro de luz branca, marca e modelo Zygo NewView 7300, afim de quantificar o volume do desgaste das amostras. Todo o processamento de dados topográficos foi realizado usando o software MountainsMap Universal 3.0. Para medir o volume desgastado da amostra, foi utilizado um algoritmo que avalia toda a região de desgaste em um único mapa topográfico. Após nivelamento, um perfil

médio foi obtido, e o desgaste volumétrico foi quantificado através da função volume de picos/cavidades.

A Figura 8.33 apresenta imagens obtidas via interferometria de luz branca, onde se visualiza que a marca de desgaste no bráquete ensaiado a seco é significativamente maior que a do bráquete ensaiado imerso em saliva artificial.

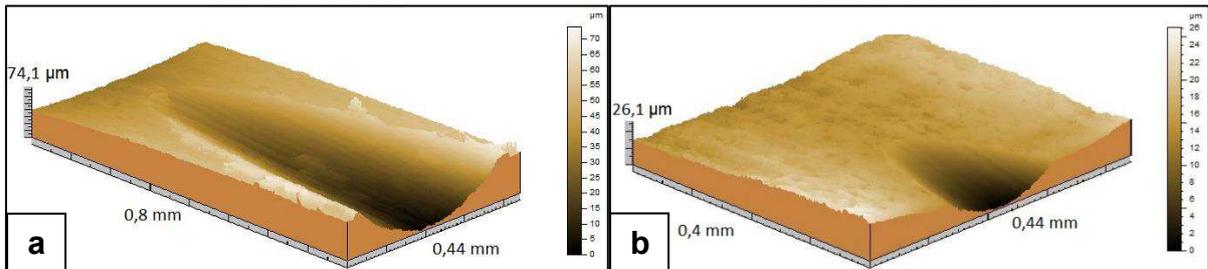


Figura 8.33 - Efeito do ambiente de teste na marca de desgaste do bráquete. a) Ensaio a seco b) Ensaio imerso em saliva artificial. Força normal de 1,5 N, frequência de 1 Hz. Imagens obtidas via interferômetro de luz branca

A Figura 8.34 mostra a influência do ambiente de ensaio na taxa de desgaste volumétrico do bráquete.

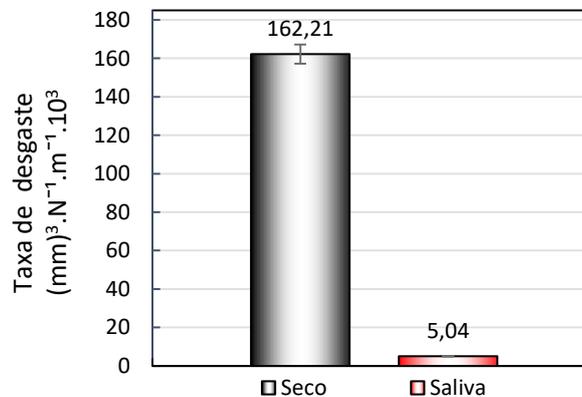


Figura 8.34 - Influência do ambiente na taxa de desgaste volumétrico do bráquete, ensaio a 1 Hz 1,5 N

A taxa de desgaste em ensaio imerso em saliva é duas ordens de grandeza menor que a do ensaio a seco. Apesar da saliva induzir um efeito lubrificante, há o contato entre as asperidades. O desgaste ainda ocorre, mas se mostra substancialmente menor que nos ensaios a seco.

8.5.3 Análise do Amaciamento

As distâncias deslizadas para atingir o regime permanente, em ensaio a seco e em ambiente lubrificado, podem ser vistas na Figura 8.35.

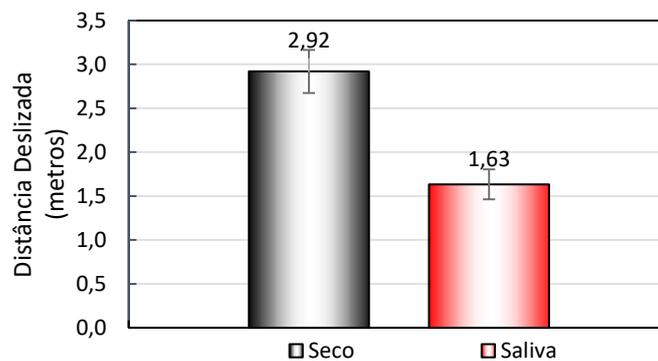


Figura 8.35 - Influência do ambiente no período de amaciamento

A estabilização do coeficiente de atrito acontece em distância deslizada menor em ensaio imerso em saliva, pois nesta configuração o sistema se comporta em regime de lubrificação. Apesar de haver o contato entre as asperidades, há a presença de fina camada de saliva em parte da superfície, com menores deformações das asperidades, o contato começa a acontecer em maior área protegida pela saliva, entrando mais rapidamente no regime permanente.

Conclui-se, portanto, que a configuração de parâmetros que apresentou menor coeficiente de atrito, menor taxa de desgaste e menor período de amaciamento, bem como melhor repetibilidade nestes quesitos, foi o ensaio em frequência de 1 Hz, força normal de 1,5 N e imerso em saliva artificial aquecida.

Nos ensaios a seco, o mecanismo que governa o comportamento do tribo-sistema é a cinética de formação/degradação de tribo-camadas, enquanto que, nos ensaios imersos em saliva artificial, é a lubrificação que a saliva exerce no contato entre as duas superfícies que rege o comportamento.

O ensaio imerso em saliva, apresentando poucas evidências de tribo-camadas e predominância de sulcos/riscos, indicando desgaste abrasivo, é a situação que mais se assemelha daquela encontrada no bráquete usado em paciente, no qual foram encontradas evidências de desgaste abrasivo semelhantes àquelas dos ensaios laboratoriais e não foram encontradas evidências de formação de tribo-camadas.

CAPÍTULO IX

CONCLUSÕES

1. Em todos os ensaios, a marca de desgaste do bráquete aconteceu na extremidade interna da canaleta devido a curvatura que o bráquete apresenta.

2. As dimensões aproximadas entre a marca de desgaste do lado 1 da canaleta e do lado 2, mostram que a força normal é igualmente aplicada na região de contato entre o fio e bráquete, evidenciando a efetividade na metodologia de nivelamento. A marca de desgaste bem centralizada em relação as paredes na canaleta, evidencia a eficácia da metodologia de alinhamento. A metodologia de tensionamento do fio se mostra também satisfatória, confirmada ao analisar a repetibilidade dos resultados de coeficiente de atrito.

3. O aumento da força normal nos ensaios, para uma frequência fixa, provoca: redução do coeficiente de atrito, redução da taxa de desgaste do bráquete e menor período de amaciamento. A mudança da força normal é mais influente nas baixas frequências do que nas altas.

4. O aumento da frequência de deslizamento, para uma força normal fixa, provoca: redução do coeficiente de atrito, aumento da taxa de desgaste do bráquete e menor período de amaciamento.

5. A frequência de deslizamento, em todos os itens analisados (coeficiente de atrito, taxa de desgaste e período de amaciamento), apresenta maior influência no tribo-sistema que a força normal imposta.

6. A imersão do ensaio em saliva artificial aquecida, em comparação ao ensaio a seco sob a mesma força normal e frequência, provoca: redução do coeficiente de atrito, redução da taxa de desgaste do bráquete em duas ordens de grandeza e menor período de amaciamento, sendo os menores valores encontrados em relação a todos os demais ensaios.

7. Conclui-se que o mecanismo que rege o comportamento do coeficiente de atrito, taxa de desgaste e período de amaciamento no estudo de bráquetes e fios ortodônticos em ensaios a seco, é a formação de tribo-camadas, influenciada nestes ensaios, pela força

normal, frequência e ambiente. Estes tribo-filmes agem, inibindo o contato metal-metal e exercendo um papel de lubrificação. Nos ensaios imersos em saliva artificial é a lubrificação que esta exerce no contato entre as duas superfícies que determina o comportamento do tribo-sistema.

8. O ensaio imerso em saliva, apresentando poucas evidencias de tribo-camadas e predominância de sulcos/riscos, indicando desgaste abrasivo, é a situação que mais se assemelha daquela encontrada no bráquete usado em paciente, no qual foram encontradas evidências de desgaste abrasivo semelhantes àquelas dos ensaios laboratoriais e não foram encontradas evidencias de formação de tribo-camadas.

9. O ortomicrotribômetro e a metodologia desenvolvida, permitem ensaios parametrizados de forma a representar o que acontece na boca, com movimentos também representativos, ou seja, em baixas cargas, baixas velocidades e grandes amplitudes. Usando como amostra itens ortodônticos, bráquete e fio, em ensaios a seco e imersos em saliva aquecida, em movimento deslizante. Se mostrando ideal para caracterizar a tribologia do aparelho ortodôntico de forma mais próxima a situação real.

CAPÍTULO X

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Os trabalhos sugeridos a serem executados em continuidade desta dissertação são:

1. Para compreensão dos transientes, representados por reduções abruptas no coeficiente de atrito, seguidos de restabelecimento ao valor estável, observados na frequência de 0,1 Hz, sugere-se o monitoramento do acionador de carga durante todo o ensaio, com aquisição de dados da posição deste, implementado em rotina computacional, bem como a interrupção dos ensaios em momentos críticos com posterior caracterização dos mecanismos de desgaste atuantes.
2. Quantificar as regiões de desgaste em volume através de interferometria a laser.
3. Explicar através de aprofundamento do estudo, quais os mecanismos predominantes do tribo-sistema que induzem o aumento da taxa de desgaste com o aumento da frequência.

CAPÍTULO XI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADITEK. **Catálogo de Produtos Aditek - Autoligado EasyClip Roth**, 2017.

ALFONSO, M. V. et al. Friction coefficients and wear rates of different orthodontic archwires in artificial saliva. **Journal of Materials Science: Materials in Medicine**, v. 24, n. 5, p. 1327–1332, 2013.

<https://doi.org/10.1007/s10856-013-4887-4>

ASTM. **ASTM A240/A240M – 15a / Standard Specification for Heat-Resisting Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels**1, 2015.

BARBOSA, J. **Autoligado Com Excelencia: Protocolo Clínico**. 1ª ed. Napoleão, 2014.

BHUSHAN, B. **Introduction to Tribology**. 2ª ed. Columbus, Ohio USA: John Wiley & Sons, 2013.

<https://doi.org/10.1002/9781118403259>

BLAU, P. J. Mechanisms for transitional friction and wear behavior of sliding metals. **Wear**, v. 72, n. 1, p. 55–66, out. 1981.

[https://doi.org/10.1016/0043-1648\(81\)90283-0](https://doi.org/10.1016/0043-1648(81)90283-0)

BLAU, P. J. **Friction science and technology : from concepts to applications**. 2ª ed. Taylor & Francis Group, 2008.

BLAU, P. J. How common is the steady-state? The implications of wear transitions for materials selection and design. **Wear**, v. 332–333, p. 1120–1128, maio 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.11.018>

BOWDEN, F. P.; TABOR, D. **The Friction and Lubrication of Solids**. Oxford, 2001.

BURSTONE, C. J. Aplicação de Bioengenharia na Ortodontia. In: GRABER, T. M.; VANARSDALL JR., R. L.; W.L, K. (Eds.). **Ortodontia: Princípios e técnicas atuais**. 5ª ed. Rio de Janeiro, Guanabara Koogan: Elsevier, 2002. p. 233–236.

CLOCHERET, K. et al. Dynamic frictional behaviour of orthodontic archwires and brackets. **European Journal of Orthodontics**, v. 26, n. 2, p. 163–170, 2004.

<https://doi.org/10.1093/ejo/26.2.163>

DIN 50320. **Wear - Terms - Systems Analysis Of Wear Processes - Classification Of The Field Of Wear**, 1979.

DOS SANTOS, M. B.; COSTA, H. L.; DE MELLO, J. D. B. Potentiality of triboscopy to monitor friction and wear. **Wear**, v. 332–333, p. 1134–1144, maio 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.10.017>

DUTRA, R. M. A. **Controle e validação de um microtribômetro instrumentado para observar a evolução da marca de desgaste via microscopia óptica**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

FERREIRA, J. T. L. **Avaliação da resistência à corrosão de materiais metálicos utilizados em aparelhos ortodônticos fixos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

GRABER, T. M.; VANARSDALL, R. L. **Orthodontics: current principles and techniques**. Mosby, 1994.

HOLMBERG, K.; MATTHEWS, A.; RONKAINEN, H. Coatings tribology - Contact mechanisms and surface design. **Tribology International**, v. 31, n. 1–3, p. 107–120, jan. 1998.

[https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(98\)00013-9](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(98)00013-9)

HUTCHINGS, I. M.; SHIPWAY, P. **Tribology: Triction and Wear of Engineering Materials**. 2ª ed. Butterworth-Heinemann, 2017.

JOST, H. P. **Lubrication (Tribology) Education and Research. A Report on the Present Position and Industry's Needs**. London, 1966.

LANCASTER, J. K. The Formation of Surface Films at the Transition between Mild and Severe Metallic Wear. **Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 273, n. 1355, p. 466–483, 11 jun. 1963.

<https://doi.org/10.1098/rspa.1963.0103>

LANDOLT, D. et al. Third body effects and material fluxes in tribocorrosion systems involving a sliding contact. **Wear**, v. 256, n. 5, p. 517–524, mar. 2004.

[https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00561-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00561-1)

LÍDER, O. **Tipos de aparelhos - Aparelho convencional metálico**. Disponível em: <<http://ortodontialider.com.br/ortodontia/#1442403014307-0d066891-97e3>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

LIM, S. C.; ASHBY, M. F.; BRUNTON, J. H. Wear-rate transitions and their relationship to wear mechanisms. **Acta Metallurgica**, v. 35, n. 6, p. 1343–1348, jun. 1987.

[https://doi.org/10.1016/0001-6160\(87\)90016-2](https://doi.org/10.1016/0001-6160(87)90016-2)

LOFTUS, B. P. et al. Evaluation of friction during sliding tooth movement in various bracket-arch wire combinations. **American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics**, v. 116, n. 3, p. 336–345, 1999.

[https://doi.org/10.1016/S0889-5406\(99\)70247-7](https://doi.org/10.1016/S0889-5406(99)70247-7)

LONGO, D. L. et al. **Harrison's Principles of Internal Medicine**. 18^a ed. McGraw-Hill Companies, 2012.

LUO, Q. et al. Effect of Tribofilm Formation on the Dry Sliding Friction and Wear Properties of Magnetron Sputtered TiAlCrYN Coatings. **Tribology Letters**, v. 34, n. 2, p. 113–124, 19 maio 2009.

<https://doi.org/10.1007/s11249-009-9415-9>

MALTAGLIATI, L. Á. Braquetes autoligados ativos x passivos. **Rev. Clín. Ortodon. Dental Press**, v. 9, 2010.

MENEZES, L. M. DE; FREITAS, M. P. M.; GONÇALVES, T. S. Biocompatibilidade dos materiais em Ortodontia: mito ou realidade? **Revista Dental Press de Ortodontia e Ortopedia Facial**, v. 14, n. 2, p. 144–157, abr. 2009.

<https://doi.org/10.1590/S1415-54192009000200016>

METALCOR. **Datasheet AISI 303 Cu**. Disponível em: <<http://www.metalcor.de/en/datenblatt/46/>>. Acesso em: 22 abr. 2018.

MICHELBERGER, D. J. et al. The friction and wear patterns of orthodontic brackets and archwires in the dry state. **American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics**, v. 118, n. 6, p. 662–674, dez. 2000.

<https://doi.org/10.1067/mod.2000.105529>

MORELLI. **Bráquetes Prescrições. Catálogo de Produtos Morelli**. 6^a ed. 2013.

MORELLI. **Material Safety Data Sheet -SD-0005**, 2018.

ORMCO. **Material-Compositions Ormco - Part1**. Netherlands Ormco Europe, 2018.

ORTHODONTICS, A. **Bráquetes de metal Empower**. Disponível em: <<http://www.americanortho.com/pt/empower-metal.html>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

PACHECO, M. R. et al. Evaluation of friction in self-ligating brackets subjected to sliding mechanics : an in vitro study. **Dental Press J Orthod**, v. 16, n. 1, p. 107–116, 2011.

<https://doi.org/10.1590/S2176-94512011000100016>

PHUKAOLUAN, A. et al. Comparison of friction forces between stainless orthodontic steel brackets and TiNi wires in wet and dry conditions. **International Orthodontics**, v. 15, n. 1, p. 13–24, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.ortho.2016.12.017>

RAPIEJKO, C. et al. A representative ex-situ fretting wear investigation of orthodontic arch-wire/bracket contacts. **Wear**, v. 266, n. 7–8, p. 850–858, mar. 2009.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.12.013>

REZNIKOV, N. et al. Measurement of friction forces between stainless steel wires and “reduced-friction” self-ligating brackets. **American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics**, v. 138, n. 3, p. 330–338, 2010.

<https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2008.07.025>

SAJEWICZ, E.; KULESZA, Z. A new tribometer for friction and wear studies of dental materials and hard tooth tissues. **Tribology International**, v. 40, n. 5, p. 885–895, maio 2007.

<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2006.09.006>

SCHEMANN, M. F. et al. Comparative analysis of load/deflection ratios of conventional and heat-activated rectangular NiTi wires. **Dental Press Journal of Orthodontics**, v.17, n. 3, p. 1-6, 2012.

<https://doi.org/10.1590/S2176-94512012000300007>

SEELEY, R. R.; STEPHENS, T. D.; TATE, P. **Anatomia e fisiologia**. 8ª ed. Loures: Lusociência, 2011.

SMITH, R. J.; BURSTONE, C. J. Mechanics of tooth movement. **American Journal of Orthodontics**, v. 85, n. 4, p. 294–307, 1984.

[https://doi.org/10.1016/0002-9416\(84\)90187-8](https://doi.org/10.1016/0002-9416(84)90187-8)

SOUSA, J. **Avaliação do impacto da presença de bactérias no par tribológico dente/zircónia**. Dissertação de Mestrado. Instituto Politécnico de Setúbal, 2015.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**. 3ª ed. Butterworth-Heinemann, 2006.

STANNARD, G. J.; GAU, M. J.; HANNA, M. Comparative friction of orthodontic wires under dry and wet conditions. **American Journal of Orthodontics**, v. 89, p. 485–491, 1986.

[https://doi.org/10.1016/0002-9416\(86\)90006-0](https://doi.org/10.1016/0002-9416(86)90006-0)

STOREY, E. The nature of tooth movement. **American Journal of Orthodontics**, v. 63, n. 3, p. 292–314, mar. 1973.

[https://doi.org/10.1016/0002-9416\(73\)90353-9](https://doi.org/10.1016/0002-9416(73)90353-9)

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

[https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(98\)00358-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(98)00358-5)

UPADHYAY, D. et al. Corrosion of alloys used in dentistry: A review. **Materials Science and Engineering: A**, v. 432, n. 1–2, p. 1–11, set. 2006.

<https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.05.003>

VELAYOS, J. L.; SANTANA, H. D. **Anatomia de la cabeza con enfoque odontoestomatológico**. Editorial Médica Panamericana, 1997.

WARD, R. A comparison of reciprocating and continuous sliding wear. **Wear**, v. 15, n. 6, p. 423–434, jun. 1970.

[https://doi.org/10.1016/0043-1648\(70\)90237-1](https://doi.org/10.1016/0043-1648(70)90237-1)

WILLEMS, G. et al. Frictional behavior of stainless steel bracket-wire combinations subjected to small oscillating displacements. **American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics**, v. 120, n. 4, p. 371–377, 2001.

<https://doi.org/10.1067/mod.2001.116088>

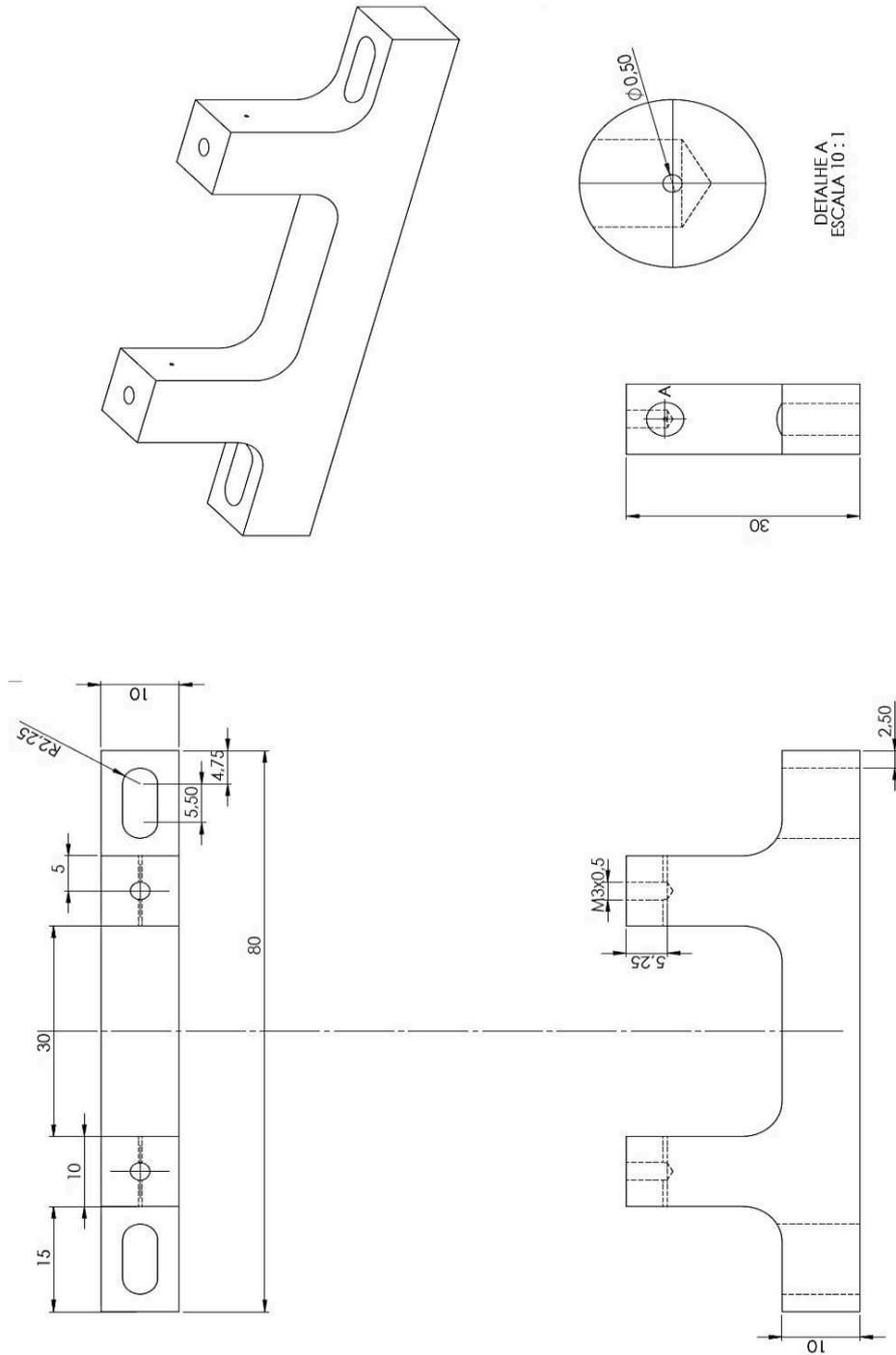
XIA, L.; LI, G. The frictional behavior of DLC films against bearing steel balls and Si3N4 balls in different humid air and vacuum environments. **Wear**, v. 264, n. 11–12, p. 1077–1084, maio 2008.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.08.010>

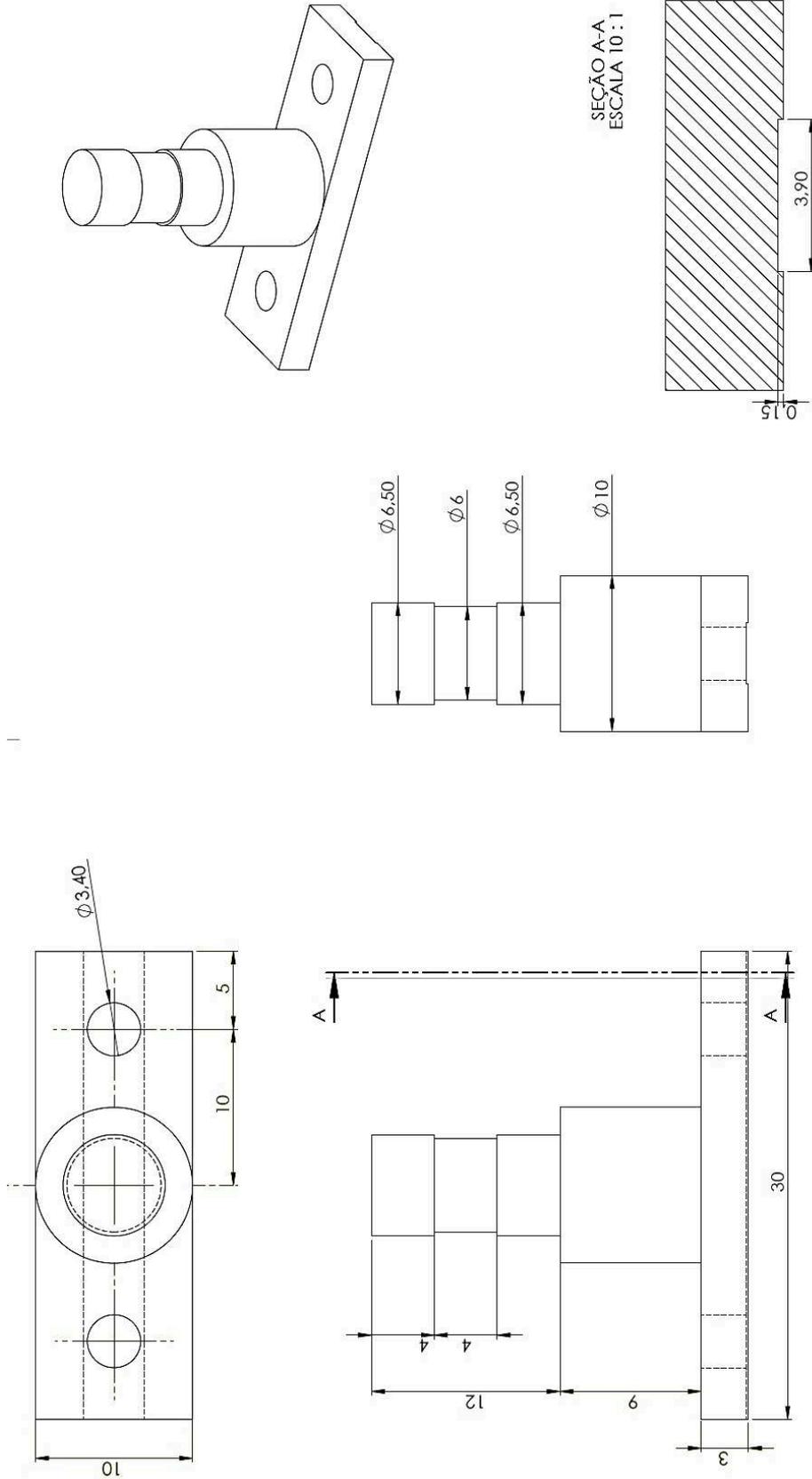
ZUM GAHR, K.-H. **Microstructure and Wear of Materials**. 1ª ed. North Holland, 1987.

ANEXOS

ANEXO 1 – Suporte em U do fio



ANEXO 2 – Suporte do bráquete



ANEXO 3 – Tela do programa Joystick

Movimentação

1-Home 2-Movimenta para posição definida

Movimenta para:	posição atual	zera posição atual	Fx (N) 2
eixo x-1 (mm) 0,0000	eixo x-1 (mm) 2 0,0000		-0,016
eixo y-2 (mm) 0,0000	eixo y-2 (mm) 2 0,0000		Fy (N) 2
eixo z-3 (mm) 0,0000	eixo z-3 (mm) 2 0,0000	Fz (N) 2	
movimenta	velocidade intermediaria	0,087	
Sair			

Aborta Movimento Robô **Finaliza o Programa**

ANEXO 4 – Tela do programa Nivelamento

Encontra desnível

comprimento (mm) <input type="text" value="1,000"/>	posição do eixo-1 (counts) <input type="text" value="0"/>	aproximação na segunda casa decimal <input type="text" value="0,0000"/>
carga de parada (N) <input type="text" value="0,300"/>	força z (N) <input type="text" value="0,0000"/>	aproximação na segunda casa decimal 2 <input type="text" value="0,0000"/>
incremento (µm) <input type="text" value="0,0100"/>	posição do penetrador (counts) <input type="text" value="0"/>	
carga de parada (N) 2 <input type="text" value="0,300"/>	força z (N) 2 <input type="text" value="0,0000"/>	
incremento (µm) 2 <input type="text" value="0,0100"/>	posição do eixo-2 (counts) <input type="text" value="0"/>	
Posição início PZT (µm) <input type="text" value="20"/>	intervalo do ciclo do PZT (ms) <input type="text" value="20"/>	
	Tensão enviada para o PZT (V) <input type="text" value="0,000000"/>	
	carga de ind (N) <input type="text" value="0,3"/>	
controla no início com PZT =>	ind ok <input type="checkbox"/>	retorno ok <input type="checkbox"/>
	PARA	
controla no final com PZT =>	ind ok 2 <input type="checkbox"/>	
	PARA	
	Força em 0 (N) <input type="text" value="0"/>	desnível (µm) <input type="text" value="0"/>
	Carga dentro do limite 2 <input type="checkbox"/>	desnível (µm/mm) <input type="text" value="0"/>
	Pos PZT em 0 (µm) <input type="text" value="0"/>	
	Força no fim (N) <input type="text" value="0"/>	
	Carga dentro do limite <input type="checkbox"/>	incremento env (nm) <input type="text" value="0"/>
	Pos. PZT no segundo ponto (µm) <input type="text" value="0"/>	incremento máximo (nm) <input type="text" value="250"/>
		incremento mínimo (nm) <input type="text" value="5"/>
		KP <input type="text" value="1"/>
		Tempo do ciclo <input type="text" value="20"/>
		Tempo do ciclo <input type="text" value="20"/>

Aborta Movimento

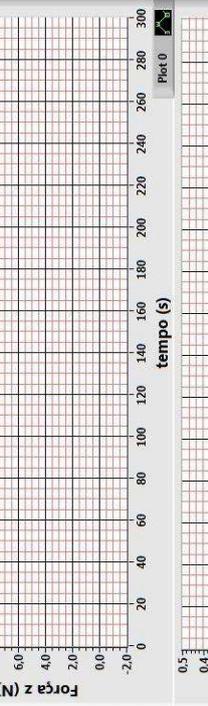
Finaliza o Programa

ANEXO 5 – Tela do programa Deslizamento



ORTOMICROTRIBÔMETRO
Prof. responsável: Washington Martins

Laboratório de Tribologia e Materiais

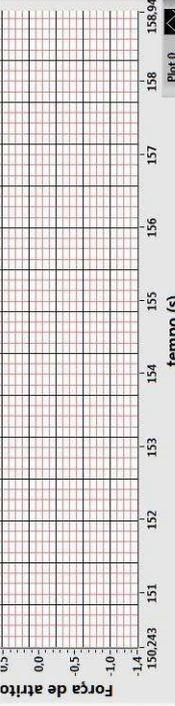
Tempo do ensaio (min)	posição do penetrador (counts)	posição eixo 1 (counts)	Waveform Chart Fz	Plot 0
3	0	0		
Frequência Hz	posição início PZT	incremento env. (mm)	Fx (N)	
0,500	60	0	0	
num de ciclos	incremento máximo (mm)	incremento mínimo (mm)	Fy (N)	
0	250	0	0	
Carga (N)	incremento mínimo (mm)	Fx (N)	Posição LVD1 (µm)	
1,000	15	0	0	
numero pontos por ciclo de eq	KP	PZT (µm)	Tensão enviada para o PZT (V)	
20	8	0	0,00000	
incremento md (µm)	carregamento ok			
0,2000	<input checked="" type="checkbox"/>			
	Carga dentro do limite	tempo min	tempo de caida	
	<input checked="" type="checkbox"/>	0	5	
	retorno ok			
	<input checked="" type="checkbox"/>			
nome da amostra:				
8				
salvando em:				
8				

Aborta Movimento

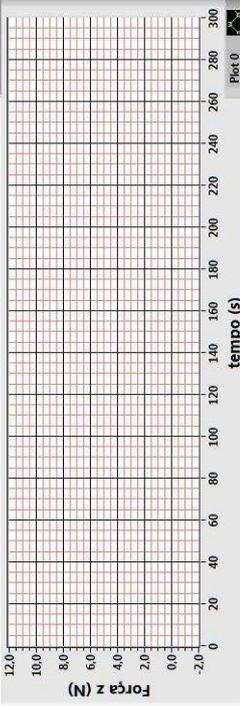
Finaliza o Programa

 Robô

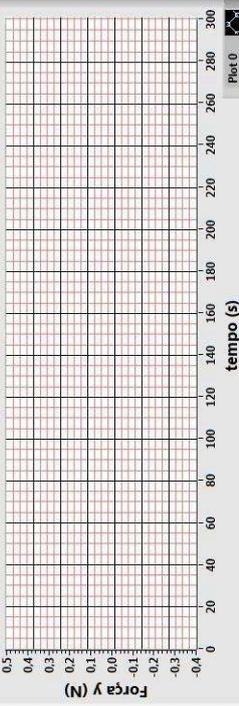
Força de atrito



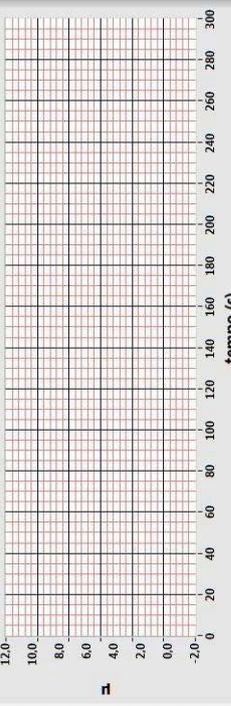
Força z (N)



Força y (N)



µ



ANEXO 6 – Tela do programa Triboscopia

