



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**CONCEPÇÃO, FABRICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM
DISPOSITIVO DE FADIGA POR *FRETTING* EM FIOS DE
ALUMÍNIO DE CABOS CONDUTORES.**

MIGUEL ANGEL GARCIA

Brasília, junho de 2019

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**CONCEPÇÃO, FABRICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM
DISPOSITIVO DE ENSAIO DE FADIGA POR *FRETTING* EM
FIOS DE ALUMÍNIO DE CABOS CONDUTORES.**

MIGUEL ANGEL GARCIA

ORIENTADOR: COSME ROBERTO MOREIRA DA SILVA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

PUBLICAÇÃO: ENM. DM – XX/19

BRASÍLIA/DF: JUNHO – 2019

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**CONCEPÇÃO, FABRICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM
DISPOSITIVO DE FADIGA POR *FRETTING* EM FIOS DE
ALUMÍNIO DE CABOS CONDUTORES.**

MIGUEL ANGEL GARCIA

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE
BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM SISTEMAS MECATRÔNICOS.**

APROVADA POR:

**Prof. Dr. Cosme Roberto Moreira da Silva, Ph.D. (ENM-PPMEC/UnB)
(Orientador)**

**Prof. Rodrigo Arbey Muñoz Meneses, Ph.D. (ENM-PPMEC/UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Jorge Luiz de Almeida Ferreira, D.Sc. (ENM-UnB)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 26 DE JUNHO DE 2019

FICHA CATALOGRÁFICA

GARCIA, MIGUEL ANGEL

Concepção, fabricação e avaliação de um dispositivo de fadiga por *fretting* em fios de alumínio de cabos condutores - [Distrito Federal] 2019.

xxi, 148 p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2019).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Fadiga por *fretting*

2. Fios de alumínio

3. Grampo de suspensão

4. Cabo condutor de energia

I. ENM/FT/UnB

II. ENM.DT-005/10

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GARCIA, M. A., (2019). Concepção, fabricação e avaliação de um dispositivo de fadiga por *fretting* em fios de alumínio de cabos condutores. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DT-xxx/19, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 148p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Miguel Angel Garcia.

TÍTULO: Concepção, fabricação e avaliação de um dispositivo de fadiga por *fretting* em fios de alumínio de cabos condutores - [Distrito Federal] 2019.

GRAU: Mestre

ANO: 2019

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

Miguel Angel Garcia

SQN 409 Bloco I Apto 106

70857-090 – Brasília - DF- Brasil

Correio Eletrônico: migueltgarcia.unb@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Ao meu filho Caetano, a pessoa mais doce e agradável do mundo. *Merci mon petit lapin.*

A minha companheira Leandra Alves Irmão, meu amor e minha amiga, obrigado pelo apoio para concluir mais uma etapa da minha vida.

A minha família, longe dos meus olhos, mas tão perto do meu coração. Agradeço a minha mãe, meu pai e meu irmão por todo o carinho e o suporte que me deram em todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Cosme Roberto por todo apoio fornecido durante a realização desse trabalho, pela disponibilidade e a paciência.

Aos Professores e amigos, Alex e Brasil, que foram de grande ajuda para minha integração profissional no Brasil.

Aos professores, colegas e amigos que gentilmente contribuíram para o aperfeiçoamento deste trabalho. Agradeço às benéficas energias dos parceiros e amigos do SG-09: José, Remy, Gustavo, Gabriel, Lucas (x2), Pedro (x2), Erick e André. Sem esquecer o inestimável apoio dos amigos do bloco G, Nela, Raphael e Ana Rafaela.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e à Transmissora Brasileira de Energia (TBE) pelo apoio ao projeto.

DEDICATÓRIA

*À minha família,
meu filho Caetano
e a minha esposa Leandra.*

“Le progrès, ce n’est pas l’acquisition de biens. C’est l’élévation de l’individu, son émancipation, sa compréhension du monde. Et pour ça il faut du temps pour lire, s’instruire, se consacrer aux autres.”

“O progresso não é a aquisição de bens. É a elevação do indivíduo, sua emancipação, sua compreensão do mundo. E para isso, precisa de tempo para ler, aprender, se dedicar aos outros.”

Christiane Taubira

“Appliquée ou fondamentale, la recherche est une question de curiosité.”

“Aplicada ou fundamental, a pesquisa é questão de curiosidade.”

Yves Chauvin (prêmio Nobel de química 2005).

RESUMO

CONCEPÇÃO, FABRICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM DISPOSITIVO DE FADIGA POR *FRETTING* EM FIOS DE ALUMÍNIO DE CABOS CONDUTORES.

Autor: Miguel Angel Garcia

Orientador: Cosme Roberto Moreira da Silva

Programa de Pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos

Brasília, junho de 2019.

O presente trabalho tem como objetivos a concepção, fabricação e avaliação de um Dispositivo de Fadiga por *Fretting* em fios de alumínio que funciona acoplado a uma máquina de ensaio universal (MTS). No setor elétrico a fadiga por *fretting* é a principal causa de falha em cabos de transmissão de energia. Estas falhas são causadas por vibrações de origem eólica e surgem principalmente nos pontos de restrição ao movimento oscilatório tais como grampos de suspensão, espaçadores e amortecedores. O dispositivo foi projetado baseado na avaliação do fenômeno de fadiga por *fretting*, e este projeto levou a produção de um conjunto de especificações que incluiu todas aquelas necessárias para atender os requisitos previstos para este tipo de teste. O dispositivo permite a execução de testes de fadiga por *fretting* sob condições controladas de carga, que permite a análise detalhada de parâmetros que influenciam o processo de fadiga por *fretting*, quais sejam, força de atrito, nível de desgaste e morfologia da superfície de desgaste. Dessa forma o dispositivo atende as duas necessidades primordiais para que haja *fretting*, ou seja, o movimento cíclico de escorregamento entre as duas superfícies em contato e a força de contato entre elas. A carga cisalhante que provoca o microdeslizamento é induzida através da estrutura do dispositivo que é fixado a um atuador hidráulico no topo da máquina de ensaio. Sendo assim o dispositivo oscila livremente na direção vertical. Por fim, realizaram-se testes de avaliação a fim de verificar que o dispositivo atenda aos requisitos do caderno de encargos. Aperfeiçoamentos e alterações foram realizados para concluir essa meta. Outro objetivo desses testes foi a geração de uma curva S-N para o fio de cabo de alumínio liga 6201 termicamente tratado (CAL 900) e dessa forma obter uma previsão da vida em fadiga desse fio. Para concluir esse trabalho, as superfícies de falha dos fios foram analisadas através do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). O dispositivo desenvolvido neste trabalho mostrou-se capaz de induzir a fadiga por *fretting* em fios de ensaio, tal como ocorre nos fios de um condutor na região do grampo de suspensão.

Visando avaliar o desempenho e validar o dispositivo, testes experimentais de fadiga por *fretting* foram realizados em fios de alumínio da liga 6201, com pressão de contato de 250N.

Baseado nos resultados obtidos concluiu-se que, nas condições de teste adotadas, o dispositivo desenvolvido neste trabalho atende aos requisitos do projeto e que o fenômeno de fadiga por *fretting* em fios de alumínio de cabos condutores é reproduzido de forma eficaz.

Palavras chave: Fadiga, *Fretting*, Cabos Condutores, Fio, Alumínio Liga.

ABSTRACT

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF A FRETTING FATIGUE DEVICE TO TEST ALUMINUM WIRES OF OVERHEAD CONDUCTORS.

Author: Miguel Angel Garcia
Supervisor: Cosme Roberto Moreira da Silva
Master degree in Mechatronic Systems
Brasília, june of 2019.

The aim of this work is to develop and manufacture a fretting fatigue device to test aluminum wires. The device operates through a Material Testing Machine (MTS). In the energy sector fretting fatigue is the main cause of failure in overhead conductors. The failures and ruptures are from Aeolian origin and arise where the aluminum wires from the cable are in contact with the suspension clamp, spacers and dampers. In order to design a device to meet all the needs for fretting to occur in wires, a study on the phenomenon of fretting fatigue was conducted. For the same purpose, a specification was also written that collects all the requirements and conditions that the device must meet. In this way the device meets the two primary needs for fretting, that is, the cyclic movement of slip between the two surfaces in contact and the force of contact between them. The shear load that causes the micro-slip is induced through the structure of the device which is attached to a hydraulic actuator at the top of the test machine. Thus, the device oscillates freely in the vertical direction. Finally, evaluation tests are carried out to demonstrate that the device meets the requirements of the specifications. Improvements and changes have been made to complete this goal. The other aim of these tests was to generate the SN curve of the AAAC 900 MCM single wire and to evaluate the fretting effect on fatigue life of this wire. Failure analysis was also conducted on individual wires by using optical and scanning electron microscope (SEM). The device is able to induce fretting fatigue in aluminum wires of overhead conductors, similar to the observed at suspension clamp region. The observed results confirm that, under test conditions used in this work, the device meets the project requirements and the fretting fatigue in aluminum wires of conductors is successfully reproduced.

Key words: Fatigue, Fretting, Cable Conductors, Wire, Aluminum Alloy.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTO DO DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	1
1.2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	3
1.3. JUSTIFICATIVA	7
1.4. OBJETIVO DO TRABALHO.....	8
1.5. O ESTADO DA ARTE.....	9
1.5.1. Ensaio em escala real em laboratório	9
1.5.2. Testes com fios isolados	15
1.5.3. Situação da pesquisa no Brasil e no mundo.....	19
1.5.4. Considerações finais	20
1.6. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2. FADIGA - REVISÃO TEÓRICA	22
2.1. CONCEITO DE FADIGA	22
2.2. CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE FADIGA	23
2.3. DEFINIÇÕES FUNDAMENTAIS E CLASSIFICAÇÃO	25
2.4. MÉTODOS DE PREVISÃO DA VIDA EM FADIGA.....	27
2.4.1. Método da Tensão - Vida ($S-N$)	27
2.4.2. Método da Deformação - Vida ($\epsilon-N$)	28
2.4.3. Método da Mecânica de Fratura Elástica Linear (LEFM)	28
2.5. FADIGA POR <i>FRETTING</i>	28
2.6. FADIGA EM CABOS CONDUTORES	38
3. CONCEPÇÃO E FABRICAÇÃO DO DISPOSITIVO	40
3.1. INTRODUÇÃO.....	41
3.2. METODOLOGIA.....	41
3.3. CADERNO DE ENCARGOS	41
3.3.1. Contexto e Objetivos	42
3.3.2. Descrição do produto.....	42
3.3.3. Expressão dos requisitos.....	44
3.3.3.1. Dimensões do dispositivo.....	45
3.3.3.2. Tipos de fios que podem ser ensaiados.....	46
3.3.3.3. Ângulos de cruzamento utilizáveis	49

3.3.3.4. Valores a serem atingidos pelo dispositivo.....	50
3.3.4. Expressão de restrições.....	53
3.4. APRESENTAÇÃO DA MÁQUINA E DO DISPOSITIVO	53
3.4.1. Descrição da Máquina MTS.....	53
3.4.2. Descrição do Dispositivo.....	57
3.4.2.1. Dimensões do dispositivo (proposta técnica)	57
3.4.2.2. Tipos de fios que podem ser ensaiados (proposta técnica)	59
3.4.2.3. Ângulos de cruzamento utilizáveis (proposta técnica).....	60
3.4.2.4. Valores a serem atingidos pelo dispositivo (proposta técnica).....	62
3.4.2.5. Atuador para carga normal P	65
3.4.2.6. Célula de carga para carga normal P	69
3.4.2.7. Controle de dados para testes de fadiga por <i>fretting</i>	70
3.5. VALIDAÇÃO DOS COMPONENTES PROJETADOS	74
3.5.1. Coeficiente de segurança.....	75
3.5.2. Suporte de fios	76
3.5.3. Mesa deslizante.....	78
3.6. FOTOS DO DISPOSITIVO	79
4. AVALIAÇÃO DO DISPOSITIVO / RESULTADOS E DISCUSSÃO....	84
4.1. TESTES DE AVALIAÇÃO	84
4.1.1. Corpos de Prova e sapatas	84
4.1.2. Aperfeiçoamento do dispositivo	87
4.1.3. Testes de fadiga por <i>fretting</i> com fios de cabo CAL 900	88
4.2. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	90
4.2.1. Marcas de <i>fretting</i>	92
4.2.2. Avaliação das superfícies de falha	98
5. CONCLUSÕES	102
5.1. PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS.....	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105
ANEXOS	
A. NOMENCLATURA E DESENHOS TÉCNICOS DO DISPOSITIVO	111
B. TUTORIAL PARA ENSAIO DE FADIGA POR <i>FRETTING</i>	133

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Expansão anual da rede básica de transmissão (ANEEL, 2014).	1
Figura 1.2 – Linhas de transmissão do Sistema Integrado Nacional (NOS, 2017).....	2
Figura 1.3 – Torre 241 vista da torre 238. Linha de transmissão Tucuruí-Macapá- Manaus com 300 m de altura e 2,5 km de espaçamento entre elas (WIKIPEDIA.ORG, 2017).....	2
Figura 1.4 – Detalhe do grampo de suspensão que fixa o cabo à torre (EPRI, 2006).	4
Figura 1.5 – (a) Grampo de suspensão. (b) Parafuso tipo U (AZEVEDO et al., 2009).....	4
Figura 1.6 – Exemplo de um cabo de alumínio utilizado em linhas de transmissão (NEXANS, 2017).....	5
Figura 1.7 – Arranjo das camadas de fios de alumínio e aço.....	5
Figura 1.8 – Pontos onde ocorre os contatos e onde prevalece a fadiga por <i>fretting</i>	6
Figura 1.9 – Tipos de contato entre os fios (RAOOF, 1990).	6
Figura 1.10 – Visão geral de Bancadas de Ensaios Mecânicos para avaliação da resistência à Fadiga de Cabos Condutores de Energia. Laboratório GFFM do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB.....	7
Figura 1.11 – Esquema da montagem cabo/grampo mostrando a posição padrão de medida pico a pico do deslocamento Y_b	9
Figura 1.12 – Desenho esquemático da montagem da bancada de ensaios de fadiga em cabos condutores (FADEL, 2010).....	11
Figura 1.13– Região da conexão do Cabo condutor com o grampo de suspensão, composto de flange/base do grampo (ZHOU et al., 1994).	12
Figura 1.14 – Análise de fios após testes de fadiga por <i>fretting</i> (ZHOU et al., 1994).....	12
Figura 1.15 – (a) Detalhes dos danos na camada externa do cabo. (b) Danos na camada interna. Notam-se marcas elípticas de <i>fretting</i> e um fio rompido (AZEVEDO et al., 2009).....	13
Figura 1.16 – Imagem do MEV de superfície de fratura fio de alumínio após ensaio de cabo condutor (a) Início da trinca na marca de <i>fretting</i> e propagação da fratura representada nas marcas de praias. (b) Zoom na região do início da trinca (KALOMBO et al., 2016).....	13
Figura 1.17 – Imagem do MEV de superfície de fratura de outro fio de alumínio após ensaio de cabo condutor. (KALOMBO et al., 2016).....	14
Figura 1.18 – Posicionamento de extensômetros, acelerômetros e laser em relação à boca do grampo (FADEL, 2010).	14
Figura 1.19 – Bancada de testes de fadiga por <i>fretting</i> desenvolvida por Zhou e al. (ZHOU et al., 1995) - modificado.....	15
Figura 1.20– Fio retirado de um cabo condutor sendo ensaiado individualmente, sob condições uniaxiais, com defeitos superficiais, em uma máquina de ensaios universal (ADRIANO, 2017).	16

Figura 1.21 – Marcas de desgaste com diferentes ângulos em fios de aço com uma carga normal de 1N (CRUZADO et al., 2011).....	17
Figura 1.22 – Fadiga por <i>fretting</i> em fio de aço (modificado) (ZHANG et al., 2013).	17
Figura 1.23 – Esquema do dispositivo de fadiga por <i>fretting</i> em fio de aço (WANG et al., 2013).....	18
Figura 1.24 – Dispositivo montado em uma máquina MTS 370.10 para ensaios de fadiga em fios: (a) Cabo ACSR 630/45; (b) Esquema do dispositivo; (c, d) fotos do dispositivo (MA et al., 2017).....	19
Figura 2.1 – Nucleação de trincas em componentes sujeitos a esforços cíclicos (Garcia et al., 2000).....	23
Figura 2.2 – Mecanismo de crescimento de trinca (FADEL, 2010).....	24
Figura 2.3 – Imagem (MEV) de fio após falha por ruptura (KALOMBO et al., 2016).	25
Figura 2.4 – Ciclo de tensões alternadas (CALLISTER, 2015).....	25
Figura 2.5 – Ciclo de tensões repetidas (CALLISTER, 2015).	26
Figura 2.6 – Ciclo de tensões aleatórias (CALLISTER, 2015).	26
Figura 2.7 – Exemplo de curvas <i>S-N</i> (DOWLING, 2013).....	27
Figura 2.8 – Esquema de contato entre dois fios (FADEL, 2010).....	29
Figura 2.9 – Zonas de adesão e escorregamento para contato entre cilindros em regime de escorregamento parcial (HILLS e NOWELL, 1994)	30
Figura 2.10 – Regimes de <i>fretting</i> e trincas associadas (ZHOU et al., 1995).	31
Figura 2.11 – Contato entre dois corpos elasticamente deformáveis submetidos à força normal, <i>P</i> , e tangencial, <i>Q</i> (MARTINS, 2008).....	32
Figura 2.12 – Regiões de escorregamento e de adesão para o contato entre cilindros em regime de escorregamento parcial (MENDES, 2006).....	33
Figura 2.13 – Perfil da distribuição de pressão e tensão cisalhante para três configurações de carregamento.....	34
Figura 2.14 – Distribuição de carga tangencial <i>Q</i> ao longo do tempo (HILLS e NOWELL, 1994).	35
Figura 2.15 – Distribuição de tensão cisalhante durante um ciclo completo.	36
Figura 2.16 – Efeito da carga remota de fadiga no ciclo de carregamento.....	37
Figura 3.1 – Esquema de funcionamento e movimentação dos fios posicionados na máquina de ensaio.....	40
Figura 3.2– Configurações de posicionamento dos fios na máquina de ensaios, contato perpendicular ou com ângulos.....	40
Figura 3.3– Contato elíptico e linear (LALONDE et al., 2017) – modificado.....	42
Figura 3.4 – Esquema da máquina MTS.....	43
Figura 3.5 – Esquema conceptual do dispositivo de ensaio de fios (versão com dois fios em contato ou com rolamento/fio).	44
Figura 3.6 – Desenho conceptual da máquina de fadiga por <i>fretting</i> 25 kN (MTS).....	46

Figura 3.7 – Cabo Orchid, 37 fios de Ø3,33 mm (Catálogo Técnico ALUBAR, Condutores Elétricos de Alumínio, 2015).....	47
Figura 3.8 – Cabos IBIS e TERN (Catálogo Técnico ALUBAR, Condutores Elétricos de Alumínio, 2015).....	47
Figura 3.9 – Cabos CAL 900 e CAL 1055 (Catálogo Técnico ALUBAR, Condutores Elétricos de Alumínio, 2015).....	48
Figura 3.10 – Comparação entre as marcas de contato geradas por ensaio mecânico (a e b) com as obtidas numericamente (c) e as resultante do processo de montagem cabo-grampo em uma LT (d).....	51
Figura 3.11 – Corpo de prova plano em contato com sapatas cilíndricas.	52
Figura 3.12 – Esquema do controle das cargas P através da resposta das células de cargas.....	52
Figura 3.13 – Máquina de Ensaio Universal uniaxial MTS 370,02/318,25s (MTS, 2015).....	54
Figura 3.14 – Desenho técnico da trave intermediária.	55
Figura 3.15 – Máquina MTS customizada.....	56
Figura 3.16 – Esquema e foto do dispositivo de fadiga por <i>fretting</i> da UnB (FERRY, 2017).....	57
Figura 3.17 – Desenhos ilustrativos do dispositivo de fadiga por <i>fretting</i>	58
Figura 3.18 – Dispositivo acoplado à máquina MTS.....	58
Figura 3.19 – Esquema da proposta para fixação dos fios de contato (sapatas).	59
Figura 3.20 – (a) Detalhe da proposta de concepção do suporte de fio, (b) suporte de fio em posição 90°.....	61
Figura 3.21 – Lista das opções possíveis de montagem dos fios na configuração CP com duas sapatas.....	62
Figura 3.22 – Mesas deslizantes com eixos e trilhos (MITAY).	63
Figura 3.23 – Mesa deslizante com trilhos MDT (MITAY).....	63
Figura 3.24 – Rolamento linear aberto (MITAY).	63
Figura 3.25 – Sistema de movimentação dos suportes de fios.....	64
Figura 3.26 – Desenho técnico para fabricação das buchas de bronze.....	64
Figura 3.27 – Versão do dispositivo com atuadores pneumáticos opostos funcionando em avanço.....	66
Figura 3.28 – Versão do dispositivo com atuadores pneumáticos paralelos funcionando em retorno.....	66
Figura 3.29 – Montagem com dois atuadores CDC-63-100. Verifica-se interferência entre os corpos dos atuadores e as colunas do dispositivo.	67
Figura 3.30 – Dimensões dos atuadores pneumáticos Ø80 mm (METALWORK).	68
Figura 3.31 – Esquema da célula de carga (HONEYWELL).....	70
Figura 3.32 – Concepção mecânica do dispositivo de fadiga por <i>fretting</i> de fios.....	70

Figura 3.33 – Esquema do sistema de controle da máquina MTS (MONROY, 2018).	71
Figura 3.34 – Esquema do circuito pneumático com a válvula proporcional.	72
Figura 3.35 – Diagramas de funcionamento do sistema de controle do dispositivo (LYNX).	73
Figura 3.36 – Programa LYNX.	74
Figura 3.37 – Condições de carregamento aplicadas no suporte de fios.	77
Figura 3.38 – Distribuição de tensões no Suporte de fios submetido à carga unitária.	77
Figura 3.39 – Deslocamentos sofridos pelo Suporte de fios submetido à carga unitária.	78
Figura 3.40 – Distribuição de tensões na mesa deslizante submetida à carga unitária.	79
Figura 3.41 – Projeto executivo do dispositivo de fadiga por <i>fretting</i> em fios de alumínio.	80
Figura 3.42 – Atuador pneumático METALWORK para carga normal P .	80
Figura 3.43 – Placa de <i>fretting</i> inferior com os trilhos montados.	81
Figura 3.44 – Mesa deslizante com suporte de fio.	81
Figura 3.45 – Mesa deslizante com rolamento.	81
Figura 3.46 – Conjunto placa inferior, mesas deslizantes, suporte de fio, rolamento e atuadores pneumáticos.	82
Figura 3.47 – Dispositivo acoplado à máquina MTS.	82
Figura 3.48 – Parte do dispositivo acoplado ao atuador superior MTS.	83
Figura 3.49 – Controlador de aquisição de dados Lynx.	83
Figura 4.1 – Ilustração esquemática da seção transversal do cabo CAL 900 (GOMES, 2016).	84
Figura 4.2 – (a) Peça do cabo retirado da bobina; (b) Fio retirado do conjunto antes do esticamento; (c) Fio colocado na máquina; (d) Fio já esticado (UnB, 2018).	86
Figura 4.3 – Dispositivo com as presilhas de aperto para mesas deslizantes.	87
Figura 4.4 – Esquema da alteração da mesa deslizante para o aperto de ajuste bucha/eixo.	88
Figura 4.5 – Dispositivo configurado para opção fio-rolamento.	89
Figura 4.6 – Curva $S-N$ par força normal de 250 N, $R = 0, 1$.	92
Figura 4.7 – Marca de <i>fretting</i> gerada pelo dispositivo. Observam-se as zonas de adesão e de escorregamento.	93
Figura 4.8 – Detalhe da zona de adesão e de escorregamento.	93
Figura 4.9 – Imagem da marca de <i>fretting</i> (MEV), espectrograma e quantidade em massa dos elementos presentes (EDS).	95
Figura 4.10 – Mapeamento EDS do fio, (a) repartição do oxigênio na amostra analisada, (b) repartição do alumínio, (c) repartição do alumínio e do oxigênio conjunto.	96

Figura 4.11 – Presença de pó escura acima dos mordentes inferiores da máquina MTS.....	96
Figura 4.12 – Mapeamento EDS do fio, (a) imagem do fio analisado, (b) repartição do alumínio, (c) repartição do oxigênio, (d) repartição do magnésio, (e) repartição do silício, (f) repartição Al + O + Mg + Si.....	97
Figura 4.13 – Imagem e mapeamento (Al + O) do corpo de prova CP-35- $P = 500N$	98
Figura 4.14 – Zona de propagação da trinca por fadiga por <i>fretting</i>	99
Figura 4.15 – Propagação de trincas concêntricas à marca de contato fio/fio e marcas de sargento.....	100
Figura 4.16 – (a) Imagem da zona de propagação, (b) e (c) detalhes na zone de fratura (<i>dimples</i>), (d) e (e) detalhes da microestrutura na zona de propagação da trinca.....	100
Figura 4.17 – Marcas de falha por fadiga por <i>fretting</i> , (a) parte superior do CP, (b) parte inferior do CP.	101
Figura 4.18 – (a) Superfície de falha por fadiga por <i>fretting</i> , (b) detalhe na zona de fratura (<i>dimples</i>), (c) <i>zoom</i> na zona de contato fio/fio.....	101
Figura B1 – Tela de controle da bomba MTS quando ligada.	133
Figura B2 – Interruptor do controlador MTS.	133
Figura B3 – Janela “ <i>Station Manager</i> ”.....	134
Figura B4 – Definir a configuração do ensaio.....	134
Figura B5 – Janela “ <i>Station Manager</i> ”. Localização do “ <i>Exclusive Control</i> ”.....	135
Figura B6 – HPU estágio 3 ligado.	135
Figura B7 – HPU e HSM em estágio 3.....	135
Figura B8 – Controlador de aquisição Lynx.	136
Figura B9 – Programa Lynx ATMP 2.2.	136
Figura B10 – Janela <i>CMD/Static</i>	137
Figura B11 – Válvula de ar comprimido.	137
Figura B12 – Janela <i>Test Setup</i>	138
Figura B13 – Janela <i>Data Acquisition</i>	139
Figura B14 – Janela <i>Data File</i>	139
Figura B15 – Imagem da sapata (fio) posicionada no suporte.....	140
Figura B16 – Exemplo de marcação do CP.....	141
Figura B17 – Controle das garras MTS. Garra inferior fechada.....	141
Figura B18 – Manômetro de pressão nas garras MTS.....	141
Figura B19 – Configuração para subir ou descer o atuador superior.	142
Figura B20 – Configuração para subir ou descer o atuador inferior.....	142
Figura B21 – Controle das garras MTS. Garra superior fechada.	143
Figura B22 – Janela <i>Signal Auto Offset</i>	143

Figura B23 – Configuração para aplicação da carga.....	144
Figura B24 – Janela PID.....	144
Figura B25 – Janela CMD.....	145
Figura B26 – Janela do programa da Lynx após a configuração das cargas dos atuadores pneumáticos.....	146
Figura B27 – Janela <i>Detectors</i>	146
Figura B28 – Exemplo de configuração de tela MTS para acompanhar o ensaio.	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Distribuição de tensão cisalhante no descarregamento.....	36
Tabela 3.1 – Expressão funcional das necessidades do projeto.....	45
Tabela 3.2 – Dada técnicos do cabo Orchid (Catálogo Técnico ALUBAR, Condutores Elétricos de Alumínio, 2015).....	47
Tabela 3.3 – Dada técnicos dos cabos Ibis e Tern (Catálogo Técnico ALUBAR, Condutores Elétricos de Alumínio, 2015).	48
Tabela 3.4 – Dada técnicos dos cabos CAL 900 e CAL 1055 (Catálogos Técnicos ALUBAR e NEXANS, Condutores Elétricos de Alumínio, 2015).....	48
Tabela 3.5 – Lista dos fios que podem ser ensaiados no dispositivo de fadiga por <i>fretting</i>	49
Tabela 3.6 – Componente da Figura 3.15.	56
Tabela 3.7 – Componentes do dispositivo de fadiga por <i>fretting</i> (Figura 3.17).....	59
Tabela 3.8 – Força em avanço e em retorno de um atuador pneumático em função da pressão de ar (METALWORK).	68
Tabela 3.9 – Intervalo de força admitido pela célula de carga a suas principais dimensões (HONEYWELL).	69
Tabela 3.10 – Coeficiente de segurança s em projetos mecânicos (SPENLÉ e GOURHANT, 1995-1196).....	75
Tabela 3.11 – Propriedades mecânicas e físicas do aço 1040.....	76
Tabela 3.12 – Propriedades mecânicas e físicas do aço ST52.	78
Tabela 4.1– Composição química em % da liga de alumínio 6201-T81.....	85
Tabela 4.2– Propriedades mecânicas da liga de alumínio 6201-T81.	85
Tabela 4.3– Resultados de vida em fadiga do fio 6201-T81 para $P = 250$ N.	91

LISTA DE ABREVIACÕES

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials.</i>
CA (AAC)	Cabos de Alumínio (<i>All Aluminium Conductor</i>).
CAA (ACSR)	Cabos de Alumínio com Alma de Aço (<i>Aluminium Conductor Steel Reinforced</i>).
CAL (AAAC) Cabos de Alumínio Liga (<i>All Aluminium Alloy Conductor</i>).
CATIA	<i>Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée (Computer-Aided Threedimensional Interactive Application).</i>
CIGRE	<i>Conseil International des Grands Réseaux Electriques (International Council on Large Electric Systems).</i>
CP	Corpo de Prova.
EDS	<i>Every Day Stress</i> ou Carga diária média de tracionamento à qual o cabo é submetido ao longo da vida em serviço. É um percentual da Tensão limite de ruptura à tração do condutor.
EDS	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i> , Espectroscopia de Energia Dispersiva.
EPI	Equipamentos de Proteção Individual.
GFFM	Grupo de Fadiga e Fratura dos Materiais.
HV	<i>Vickers Hardness</i> , Escala de dureza Vickers.
LT	Linha de Transmissão.
MEF	Método dos Elementos Finitos.
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura.
MTS	<i>Material Test System</i> , máquina de ensaio universal.
P-S	Poffenberger-Swart (expressão que correlaciona severidade de vibração e tensão).
RMC	Resistência Mecânica do Cabo.
SEM	<i>Scanning Electron Microscope</i> .
SIN	Sistema Integrado Nacional.
UnB	Universidade de Brasília.
UPC	Último Ponto de Contato.

LISTA DE SÍMBOLOS

Latinos

a	metade do tamanho da zona de contato, [mm].
B	carga remota de fadiga, [N].
c	tamanho da zona de adesão, [mm].
c'	tamanho de escorregamento reverso, [mm].
d	diâmetro, [mm]
D	diâmetro nominal do cabo condutor, [mm].
d_a	diâmetro do fio de aço, [mm].
d_{al}	diâmetro do fio de alumínio, [mm].
e	tamanho do deslocamento da zona de adesão devido ao efeito da tensão remota, [mm].
e'	tamanho do deslocamento da zona de adesão devido ao efeito da variação cíclica da tensão remota, [mm].
E	módulo de elasticidade, [GPa].
E_1, E_2	módulo de elasticidade dos corpos 1 e 2, [GPa].
E_{al}	módulo de elasticidade do alumínio, [GPa].
E^*	módulo de elasticidade equivalente, [GPa].
EDS	<i>every day stress</i> , [%].
f	frequência de aplicação da carga em ciclos por segundo, [Hz].
f	coeficiente de atrito nas superfícies em contato (<i>fretting</i>).
I	momento de inércia, [kg·m ²].
I_{\min}	momento de inércia mínimo, [kg·m ²].
K	constante da fórmula de Poffenberger-Swart.
n_a	número de fio de aço.
n_{al}	número de fio de alumínio.
N	número de ciclos, [ciclos].
N_f	número de ciclos de vida, [ciclos].
P	carga normal no contato em <i>fretting</i> , [N].
p	tensão normal ou pressão de contato, [MPa].
p_{PS}	parâmetro de rigidez para a fórmula de Poffenberger-Swart (<i>stiffness parameter</i>), [1/mm].
p_0	pressão máxima ou de pico, [MPa].

- Q carga tangencial ou cisalhante, [N].
- $q(x)$ distribuição da tensão cisalhante na superfície.
- $q'(x)$ perturbação na distribuição da tensão cisalhante na superfície.
- $q''(x)$ termo de correção para a distribuição de pressão cisalhante na superfície.
- $Q_{m\acute{a}x}$ carga cisalhante máxima, [N].
- R razão de tensão.
- R_1, R_2 raios dos corpos, [mm].
- R_{eq} raio equivalente, [mm].
- s Coeficiente de segurança.
- S_a tensão dinâmica da fórmula de Poffenberger-Swart, [Mpa].
- t tempo.
- T tração no cabo condutor, [N].
- X_b distancia padrão entre o último ponto de contato cabo/grampo e o ponto de medição, [mm].
- Y_b amplitude de deslocamento por flexão do cabo, [mm].

Gregos

- σ_a tensão alternada ou amplitude de tensão, [MPa].
- σ_{adm} tensão admissível, [MPa].
- σ_{ar} tensão normal média, [MPa].
- σ_B tensão remota de fadiga, [MPa].
- $\sigma_{Bm\acute{a}x}$ tensão máxima remota de fadiga, [MPa].
- σ_i intervalo de tensões, [MPa].
- σ_m tensão média, [MPa].
- $\sigma_{m\acute{a}x}$ tensão máxima, [MPa].
- $\sigma_{m\acute{i}n}$ tensão mínima, [MPa].
- σ_u limite de resistência a tração, [MPa].
- σ_y limite de escoamento, [MPa].
- ν coeficiente de Poisson.
- ν_1, ν_2 coeficiente de Poisson dos corpos 1 e 2.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTO DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Devido ao aumento de demanda pelo consumo de energia elétrica no Brasil, setor de geração e transmissão de energia tem sido objeto de grandes investimentos. A expansão do sistema de transmissão alcançou, em 2013, uma extensão de mais de 111 mil Km (Figura 1.1).

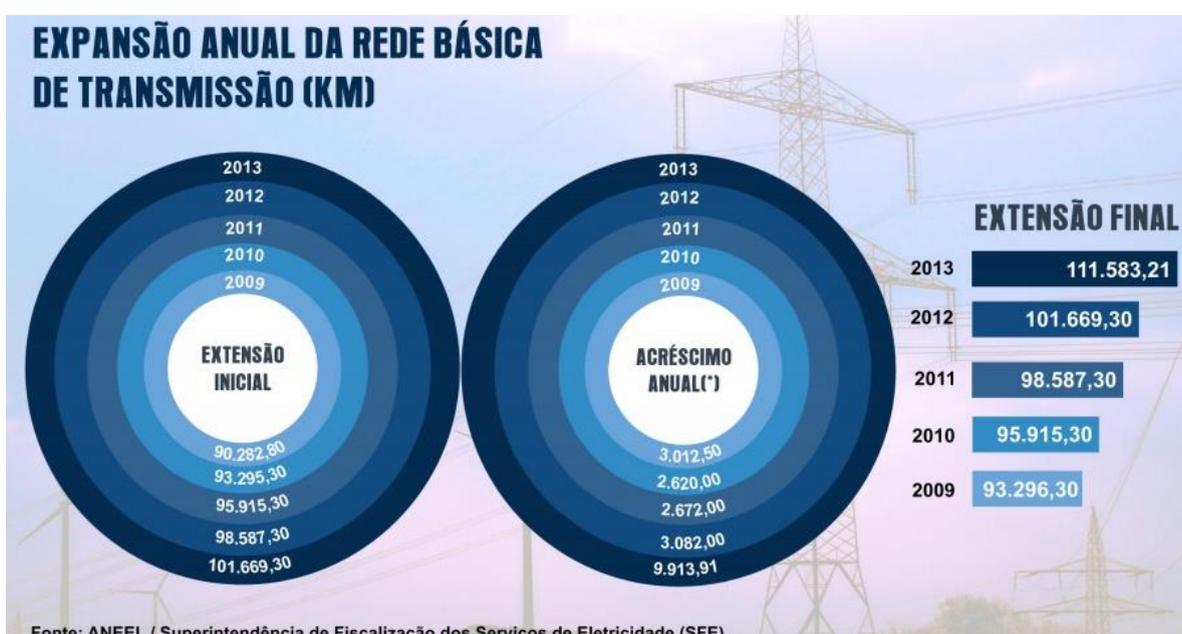


Figura 1.1: Expansão anual da rede básica de transmissão (ANEEL, 2014).

Em 2017, o Brasil possui instalações de transmissão de até 765 kV, com a perspectiva de chegar a 800 kV em breve (ONS, 2017). A figura 1.2 ilustra o mapa do SIN (Sistema Integrado Nacional) com o horizonte de 2017. As futuras linhas indicadas no mapa testemunham desta expansão energética brasileira.

Em um projeto de rede de linha de transmissão (LT) o componente mais importante é o cabo condutor, cujo custo pode atingir até 40% do custo total do projeto (ABREU et al., 2010).

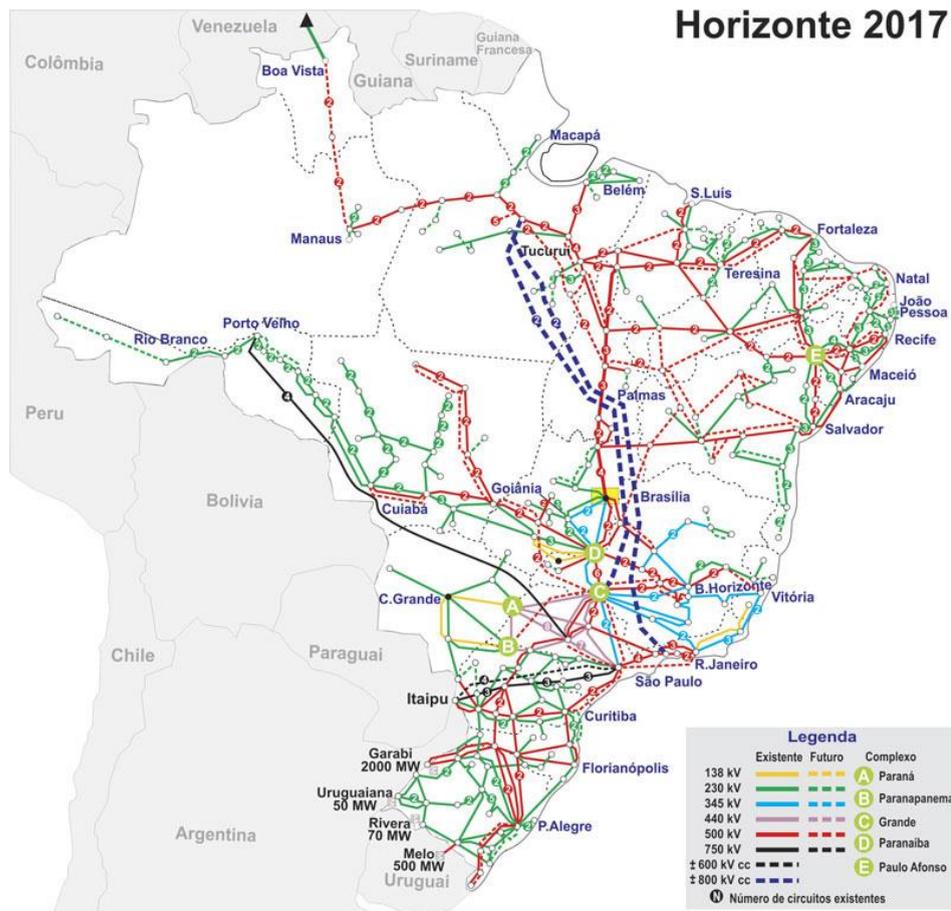


Figura 1.2: Linhas de transmissão do Sistema Integrado Nacional (NOS, 2017).

O Brasil possui um relevo e uma hidrografia que podem exigir a utilização de torres de transmissão muito altas e espaçadas entre si, demandando cabos muito compridos e elevada solicitação mecânica, de acordo com o demonstrado na Figura 1.3 a seguir. Para uma linha de 400 kV com torres de 70 a 90 m e com um relevo plano as distâncias medias entre duas torres são de aproximadamente 500 m (RTE France, 2017).



Figura 1.3: Torre 241 vista da torre 238. Linha de transmissão Tucuruí-Macapá-Manaus com 300 m de altura e 2,5 km de espaçamento entre elas (WIKIPEDIA.ORG, 2017).

1.2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

É consenso na literatura revisada que o processo de fadiga por *fretting* é a principal causa da ruptura de cabos de transmissão de energia devido ao vento (AZEVEDO et al., 2009; ABREU et al., 2010; FADEL, 2010). A origem primária desse processo de falha estrutural se deve a ação eólica que induz vibrações que impõem ao cabo uma flexão cíclica (fadiga). A frequência dessas vibrações pode variar entre 10 e 40 Hz (AZEVEDO et al., 2009). Deste modo as forças de fricção aliadas a essa flexão causam o *fretting* entre os fios do cabo.

Hills e Nowell (1994) definem o *fretting* como o desgaste superficial devido ao pequeno movimento oscilatório (da ordem de microns) entre superfícies em contato ocorrido em montagens mecânicas sujeitas a vibrações. Se, além desse fenômeno de *fretting*, uma das peças em contato for submetida a uma tensão cíclica, têm-se as condições do processo denominado fadiga por *fretting*. A ocorrência de trincas prematuras na região do contato pode ocasionar a ruptura das peças envolvidas. Evidências experimentais mostram que a ação combinada de *fretting* e fadiga degrada o limite de fadiga em materiais metálicos (MARTINS et al., 2008).

A ruptura de cabos condutores pode gerar consequências muito graves, tais como o conhecido “*apagão*” ocorrido em 2001, que afetou aproximadamente 67 milhões de habitantes das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil que ficaram sem energia elétrica por várias horas. A origem desse *apagão* foi a ruptura por fadiga de uma linha de transmissão de 460 kV que atravessava o Rio Paraná, no estado de São Paulo (ABREU et al., 2010; AZEVEDO e CESCO, 2002). Isso afetou todo o setor produtivo dessas regiões paralisando suas atividades econômicas. Um melhor conhecimento nessa área é fundamental para dar mais confiabilidade aos projetos de rede de LT e reduzir gastos desnecessários associados a falhas prematuras.

Pesquisas na área de condutores aéreos (CIGRE, 1985) revelam que as falhas e rupturas surgem onde o cabo está em contato com ferragens tais como grampos de suspensão, espaçadores, sinalizadores e amortecedores. Nessas ferragens e particularmente no grampo de suspensão, há uma restrição ao movimento causado pelas vibrações eólicas. Sendo as condições para fadiga por *fretting* satisfeitas, esses pontos se tornam mais sujeitos à falha.

O grampo de suspensão é a ferragem que fixa o cabo às torres de transmissão (Figura 1.4).



Figura 1.4: Detalhe do grampo de suspensão que fixa o cabo à torre (EPRI, 2006).

As falhas nos cabos condutores costumam ocorrer na parte interna do grampo devido à dificuldade da execução de inspeção visual ou o uso de sensores para medição das tensões (FADEL, 2010). Como detalhado na Figura 1.5, a geometria da base do grampo e o *design* da tampa superior não permitem tais controles.

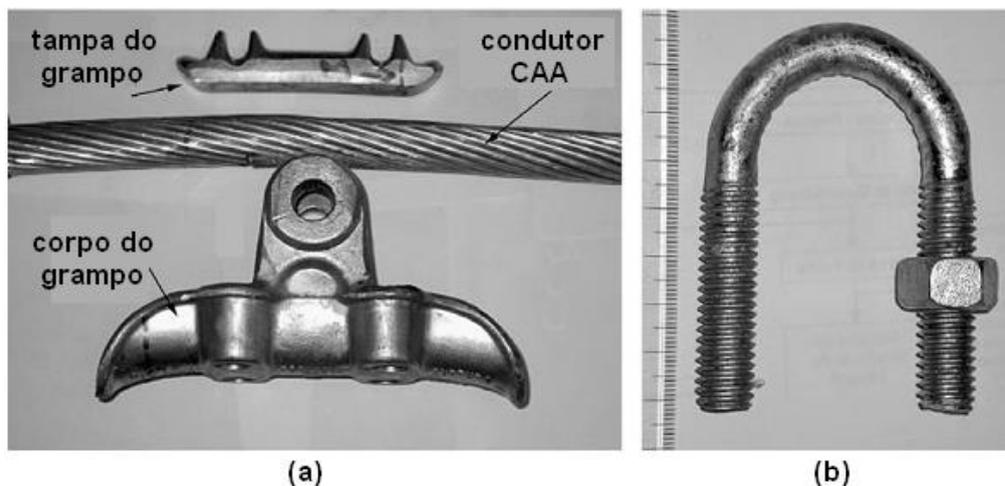


Figura 1.5: (a) Grampo de suspensão. (b) Parafuso tipo U (AZEVEDO et al., 2009).

O grampo de suspensão é composto por dois flanges e dois parafusos em formato de “U”. O flange inferior abriga o cabo condutor, com extremidades que permitem a flexão do cabo. O torque de aperto dos parafusos varia entre 50 e 60 N.m. Tal torque deve ser o suficiente para evitar o deslizamento entre o cabo e o grampo, porém, não deve gerar deformação plástica excessiva nos fios do cabo.



Figura 1.6: Exemplo de um cabo de alumínio utilizado em linhas de transmissão (NEXANS, 2017).

Existem diversos tipos de cabos condutores. São constituídos de vários fios encordoados em diferentes camadas cruzadas (Figura 1.6). Nas camadas externas, os fios são fabricados em ligas de alumínio ou alumínio puro. A alma do cabo pode, dependendo do tipo, ser feita de aço (Figura 1.7) ou também de alumínio ou alumínio liga. Os diâmetros dos fios variam segundo os modelos e os fabricantes.

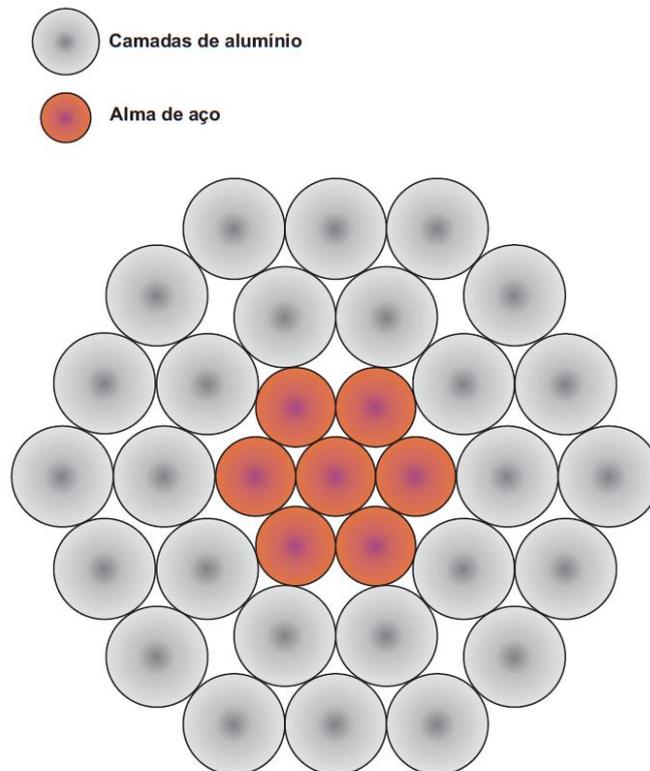


Figura 1.7: Arranjo das camadas de fios de alumínio e aço.

Conforme exposto, a fadiga por *fretting* acontece entre os fios de alumínio que formam as diferentes camadas do cabo condutor, principalmente na região do grampo de suspensão. O ponto B da Figura 1.8 indica o contato entre fios de camadas diferentes. Fios da mesma camada têm contato no ponto C. Também se observa a fadiga por *fretting* entre os fios da camada externa e o próprio grampo (ponto A na Figura 1.8). Outro local de contato é entre

a camada interna de alumínio e as camadas de aço do núcleo (ponto D).

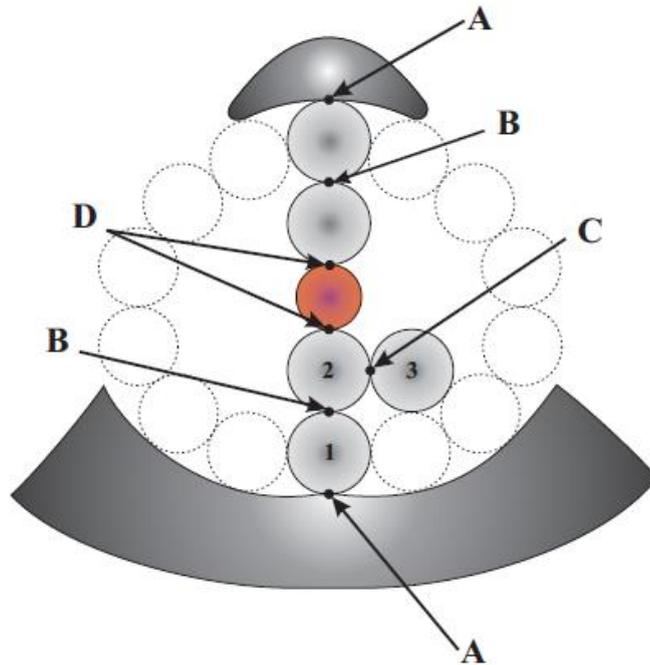


Figura 1.8: Pontos onde ocorre os contatos e onde prevalece a fadiga por *fretting*.

Contatos entre fios podem se resumir em dois tipos como mostrado na Figura 1.9:

- O contato B ocorre entre fios de diferentes camadas. Nesse ponto os fios se cruzam e o contato é elíptico (RAOOF, 1990).
- Os pontos A mostram o contato entre fios da mesma camada. Nesse caso, o contato é linear.

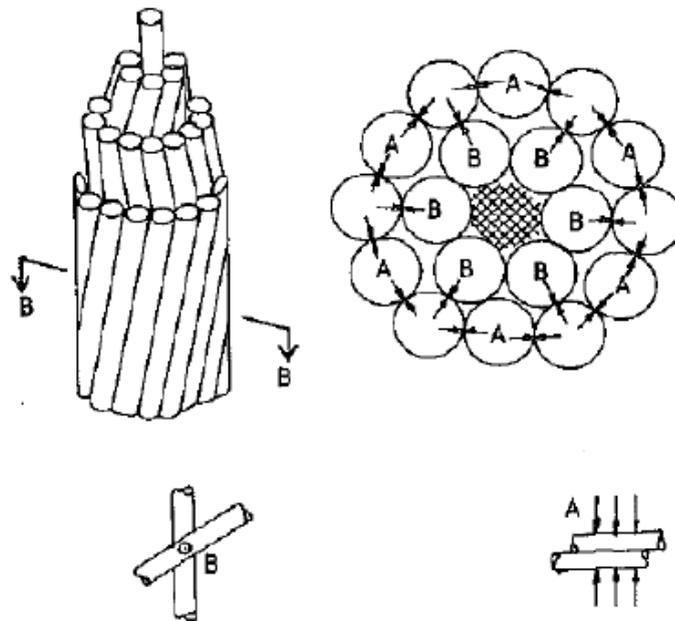


Figura 1.9: Tipos de contato entre os fios (RAOOF, 1990).

Existem diversos fatores que influenciam a fadiga por *fretting* em cabos condutores dentro do grampo de suspensão: Carga de contato, amplitude do escorregamento entre os fios, coeficiente de fricção, tipo de material em contato, estado da superfície do material e obviamente as condições do ambiente externo.

Os fios escorregam entre si em pequenos movimentos devido ao aperto do grampo (restrição ao movimento) gerando o *fretting*. Se uma trinca for induzida por *fretting*, ela irá se propagar por fadiga causando a fratura do fio.

1.3. JUSTIFICATIVA

As empresas de energia elétrica utilizam dados e informações a fim de efetuarem projetos de novas linhas de transmissão de forma confiável e eficiente. O objetivo não é prever se ocorrerá falha, mas sim avaliar quando ela irá ocorrer. Para atender essa necessidade, são efetuados testes laboratoriais em amostras de cabos reais, utilizando-se aparatos experimentais apresentados na Figura 1.10.

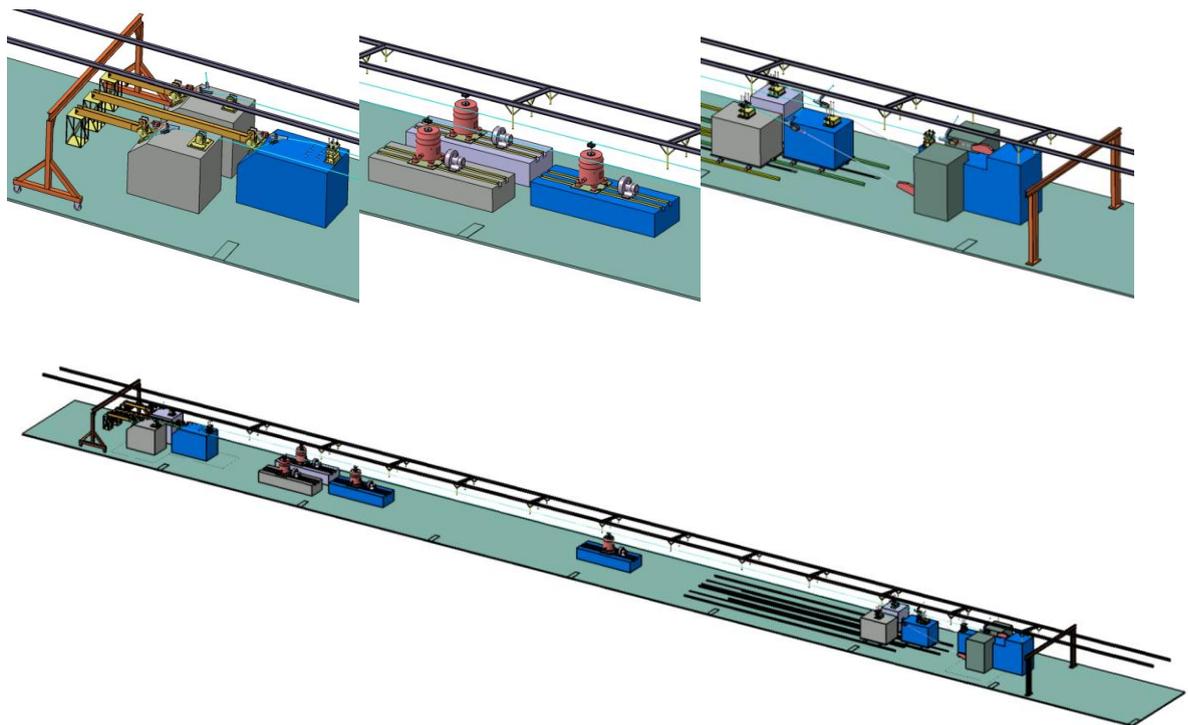


Figura 1.10: Visão geral de Bancadas de Ensaios Mecânicos para avaliação da resistência à Fadiga de Cabos Condutores de Energia. Laboratório GFFM do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB.

Estes ensaios em escala real apresentam alguns inconvenientes, tais como custos elevados, uso de espaço físico considerável, tempo excessivo de ensaio e complexidade das tensões multiaxiais presentes nas regiões de restrição ao movimento do cabo

condutor (grampos de suspensão, amortecedores, espaçadores, etc.). Segundo o GFFM (Grupo de Fadiga e Fratura dos Materiais) da Universidade de Brasília (UnB), o custo para um ensaio de fadiga em cabos condutores gira em torno de R\$ 100.000. É preciso refinar a pesquisa de fadiga do cabo na região do grampo, tendo em vista ser a fadiga por *fretting* uma das principais causas de fratura em cabos condutores.

O início das trincas normalmente inicia-se nas indentações produzidas nas zonas de contato entre os fios ou entre estes fios e o grampo de suspensão. Cargas de esticamento e aquelas atuando no grampo de suspensão criam tensões multiaxiais nos fios que, combinados com o regime de deslizamento parcial entre as camadas de fios, geram o aparecimento de trincas localizadas e deformações na zona de contato, levando a fratura por fadiga do cabo condutor.

O sistema linha de transmissão – grampo de suspensão é extremamente complexo, com diferentes fenômenos interagindo simultaneamente durante o processo de vibração (fadiga por *fretting*, contato mecânico, marcas causadas pelo aperto do grampo, etc.). Aplicar estes fenômenos para calcular os estados de tensões nas zonas de contato do grampo com o cabo condutor usando métodos numéricos iria requerer uso de ferramentas computacionais complexas e de alto custo. Desta forma, o presente dispositivo permite uma forma inovadora e simplificada de estudar a influencia da concentração de tensão na vida em fadiga de fios individuais. É uma forma simplificada de avaliar o problema de contato que ocorre no ponto de conexão cabo/grampo e entre os fios individuais na linha de transmissão. Os resultados obtidos servirão como etapas intermediárias para incorporação e validação dos novos modelos de previsão de vida em fadiga em linhas de transmissão.

1.4. OBJETIVO DO TRABALHO

O presente trabalho teve como objetivo geral projetar, construir e testar um dispositivo experimental para realização de testes de fadiga sob condições de *fretting* em fios de alumínio. O dispositivo permite simular os contatos entre os fios de diferentes camadas (fio cruzados, contato elíptico), mas também entre fios da mesma camada (fios paralelos, contato linear).

O dispositivo experimental foi acoplado a uma máquina de ensaios universal MTS com dois atuadores, montada no Laboratório de Ensaios dos Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB.

De forma geral, o dispositivo foi usado na caracterização da resistência em fadiga dos fios de alumínio. Isso permite isolar parte do fenômeno de fadiga que ocorre dentro do grampo de suspensão.

Os objetivos específicos foram projetar o dispositivo com base na redação de um caderno de encargos e avaliá-lo através de uma série de testes de caracterização de fios de cabo condutor CAL 900. Segundo esses resultados, foram propostas possíveis alterações a fim de melhorar e aperfeiçoar o dispositivo.

1.5. O ESTADO DA ARTE

1.5.1. Ensaios em escala real em laboratório.

Em 1965, Poffenberger e Swart desenvolveram uma fórmula (1.1) que relaciona o deslocamento e a flexão sofrida pelos fios do cabo (POFFENBERGER e SWART, 1965)

$$S_a = KY_b, \quad (1.1)$$

onde S_a é a tensão dinâmica pico a pico, Y_b é a amplitude de deslocamento indicada na Figura 1.11:

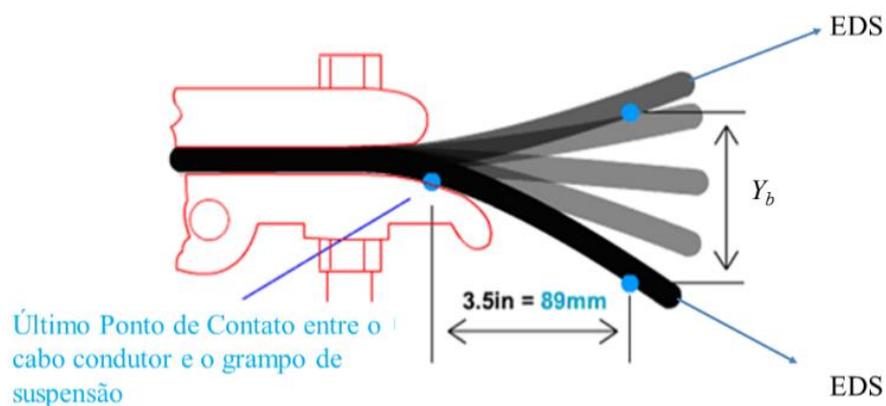


Figura 1.11: Esquema da montagem cabo/grampo mostrando a posição padrão de medida pico a pico do deslocamento Y_b .

K é o fator de conversão dado por:

$$K = \frac{E_a d_a l p_{PS}^2}{4(e^{-pX_b} - 1 + pX_b)}, \quad (1.2)$$

onde E_{al} é o módulo de elasticidade de um fio da camada mais externa, d_{al} é o diâmetro do fio da camada mais externa, X_b é a distância de 89 mm indicada na Figura 1.11 e o parâmetro de rigidez p_{PS} (*stiffness parameter*) é determinado por:

$$p_{PS} = \sqrt{\frac{T}{EI_{min}}} \quad (1.3)$$

onde EI_{min} é a rigidez do cabo à flexão e T a tração do cabo condutor. A fórmula de Poffenberger-Swart (1.1) tem suas limitações. A variação da rigidez à flexão do cabo em função do comportamento dinâmico não é levada em conta. Ela é apenas válida para as camadas mais externas do cabo. Outra limitação segundo Cardou et al. (1994) e Zhou et al. (1996), é que a fratura do fio não é induzida apenas pela flexão alternada do cabo, mas também por um estado de tensão local complexo que tem origem no contato mecânico sob regime de escorregamento parcial. Mesmo assim, a equação de Poffenberger-Swart (1.1) tem sido usada por décadas devido a sua aplicação simples e direta.

Em 1981, no laboratório de Ramey e Silva foi desenvolvido um aparato experimental para simular o carregamento cíclico devido a forças eólicas sofridas pelo cabo em campo (RAMEY e SILVA, 1981). Tratava-se de um cabo CAA (Cabo de Alumínio com alma de Aço). Em conclusão desse trabalho, os autores recomendaram o uso de amortecedores para reduzir as vibrações eólicas e conseqüentemente aumentar a vida em fadiga do cabo condutor. Nem sempre o uso de amortecedores resolve o problema de resistência à fadiga. Ao contrário, em alguns casos pode ser a origem do problema como revelado por Kalombo et al. em 2016.

Em 1986, o mesmo Ramey junto com outros colaboradores elaborou uma bancada experimental composta de uma montagem cabo/grampo de suspensão conectada a um excitador de vibrações eletromagnético. Esta pesquisa permitiu estabelecer o limite de fadiga (21,31 MPa) do cabo testado considerando a ruptura do primeiro fio.

A pesquisa sobre fadiga em cabo condutor começou a concentrar sua atenção no grampo de suspensão. McGill e Ramey (1986) estudaram o *design* do grampo de suspensão, pois sua geometria tinha um papel importante no processo de fadiga do cabo. Testaram três tipos de grampo com raios longitudinais diferentes. Foi observado que a resistência à fadiga era maior aumentado o raio de curvatura do grampo. Essa

mesma pesquisa revelou que os fios quebravam na zona dos últimos pontos de contato (UPC) entre o cabo e as partes superiores e inferiores do grampo. Também, foi notado que 75% dos fios rompidos pertenciam às camadas intermediárias do cabo (desgaste por *fretting* mais intenso).

Um desenho esquemático das bancadas desenvolvidas para os estudos de fadiga em cabos condutores na UnB está apresentado na Figura 1.12 (AZEVEDO et al., 2009 e FADEL, 2010).

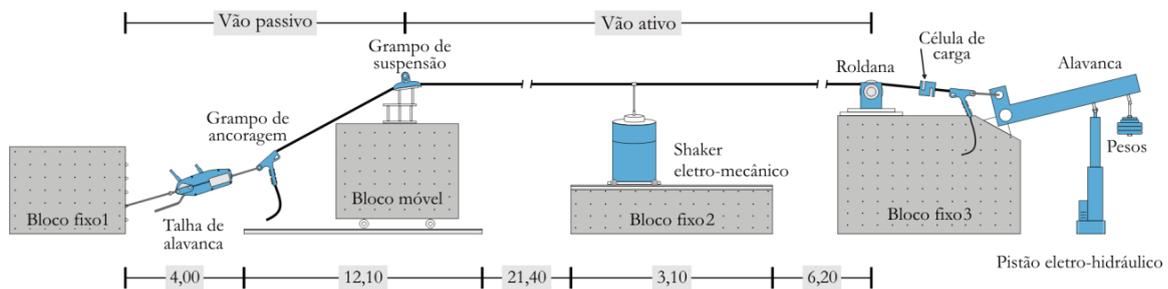


Figura 1.12: Desenho esquemático da montagem da bancada de ensaios de fadiga em cabos condutores (FADEL, 2010).

Conforme descrito anteriormente, o objetivo desse tipo de ensaio é prever a vida útil de um cabo condutor. Para isso são correlacionados os dados de tensão *versus* o número de ciclos até a falha, organizando estes dados em forma de gráficos amplitude de tensão x número de ciclos, denominadas curvas S-N (*S-stress* e *N-number of cycles*). Atualmente, este procedimento é amplamente utilizado para determinação dos limites de fadiga de materiais metálicos.

Alguns testes de fadiga em cabos condutores foram realizados por Fadel (FADEL, 2010) visando verificar a influência da carga de esticamento (EDS) na vida em fadiga destes cabos. Esses ensaios apresentavam uma limitação na avaliação e interpretação dos fenômenos que ocorrem na parte interna dos grampos de suspensão e nas camadas internas dos condutores.

Em 1994, Zhou e colaboradores (ZHOU et al, 1994) efetuaram um mapeamento dos danos superficiais nos fios do cabo condutor, que ocorrem na região da conexão cabo/grampo, apresentada de forma detalhada na figura 1.13. UPC corresponde ao Último Ponto de Contato entre o cabo e o grampo.

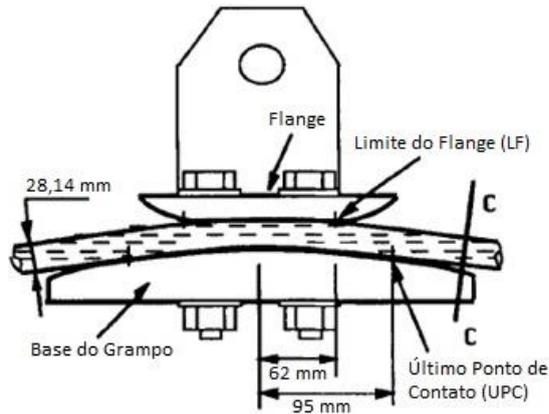


Figura 1.13: Região da conexão do Cabo condutor com o grampo de suspensão, composto de flange/base do grampo (ZHOU et al., 1994).

Na Figura 1.14 (a) observam-se grandes zonas de desgaste geradas nos contatos entre a camada externa e o grampo. Os desgastes causados pelos contatos da camada externa com a camada interna estão apresentados na (Figura 1.14 b). A Figura 1.14 (c) mostra os contatos da camada interna com a segunda camada interna. Já na Figura 1.14 (d), aparecem os contatos entres fios da mesma camada (externa). É interessante notar que as zonas em preto indicam onde o autor identificou a presença do pó de alumina (Al_2O_3). Zhou concluiu ser necessário simular contatos de *fretting* em fios isolados para saber quais são os tipos de contato em jogo.

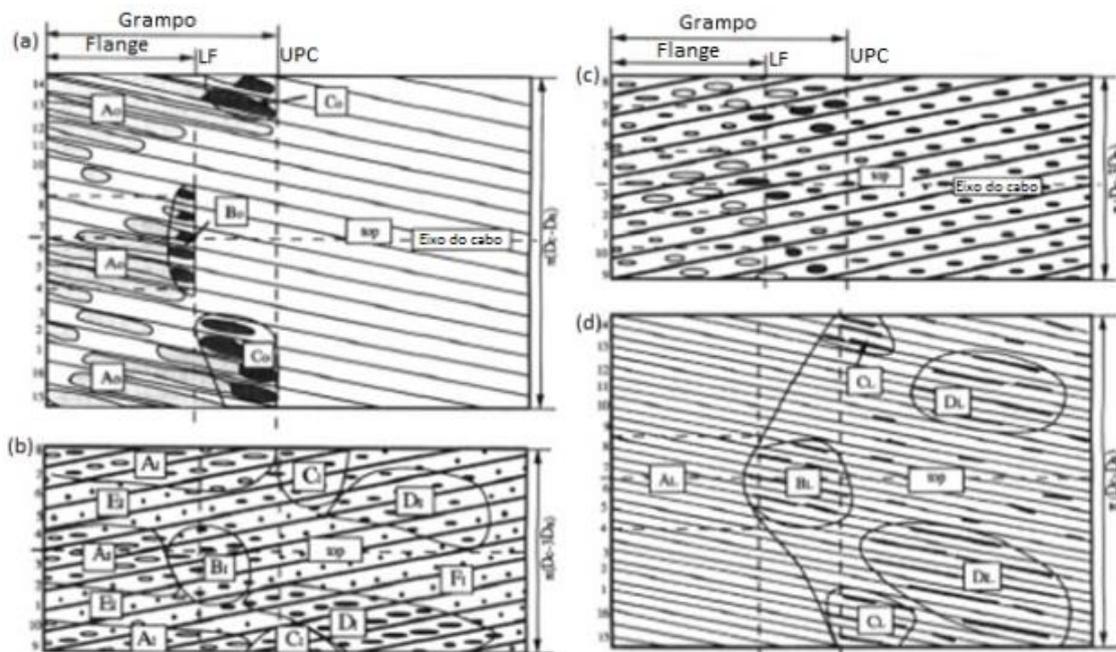


Figura 1.14: Análise de fios após testes de fadiga por *fretting* (ZHOU et al., 1994).

Em 2009, Azevedo e colaboradores (AZEVEDO et al., 2009) também efetuaram análises em fios de alumínio de um cabo de alumínio com alma de aço (CAA) testados em

fadiga sob flexão até 1.1×10^6 ciclos com amplitude de deslocamento de 3 mm e usando uma carga de esticamento de 18% (Figura 1.15).

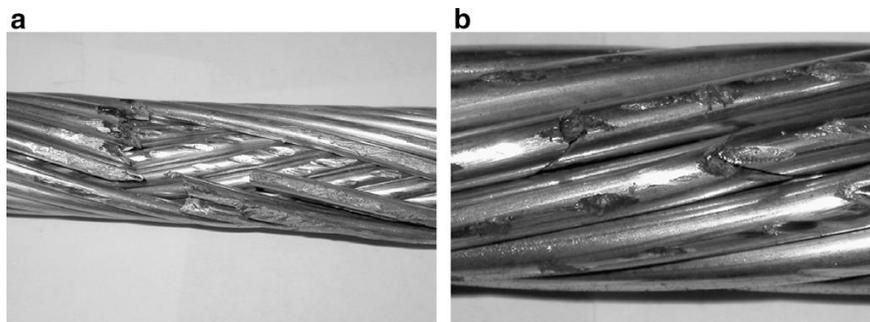


Figura 1.15: (a) Detalhes dos danos na camada externa do cabo. (b) Danos na camada interna. Notam-se marcas elípticas de *fretting* e um fio rompido (AZEVEDO et al., 2009).

Uma análise por EDS por microscopia eletrônica de varredura demonstrou que os resíduos oriundos do desgaste por *fretting* eram formados basicamente por óxido de alumínio (Al_2O_3) e de silício (SiO_2), extremamente abrasivos e com um papel importante na aceleração do desgaste dos fios. Pós com características semelhantes já foram relatados pela CIGRE em 1988 para condutores que falharam sob fadiga.

Trabalho anterior (KALOMBO et al., 2016) demonstrou que o microscópio eletrônico de varredura (MEV) revelou-se uma excelente ferramenta para analisar os fios rompidos após ensaios de fadiga em cabos condutores. As imagens obtidas neste trabalho (Figuras 1.16 e 1.17) permitiu identificar de forma clara os mecanismos de iniciação e propagação de trincas.

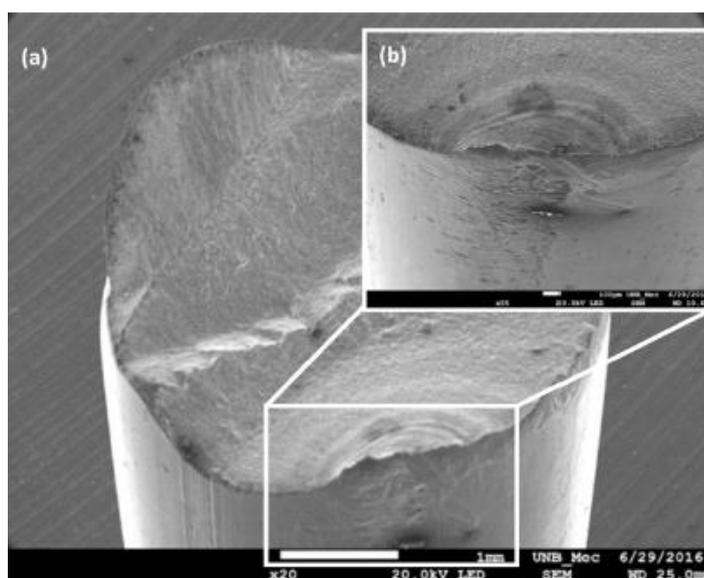


Figura 1.16: Imagem do MEV de superfície de fratura fio de alumínio após ensaio de cabo condutor (a) Início da trinca na marca de *fretting* e propagação da fratura representada nas marcas de praias. (b) Zoom na região do início da trinca (KALOMBO et al., 2016).

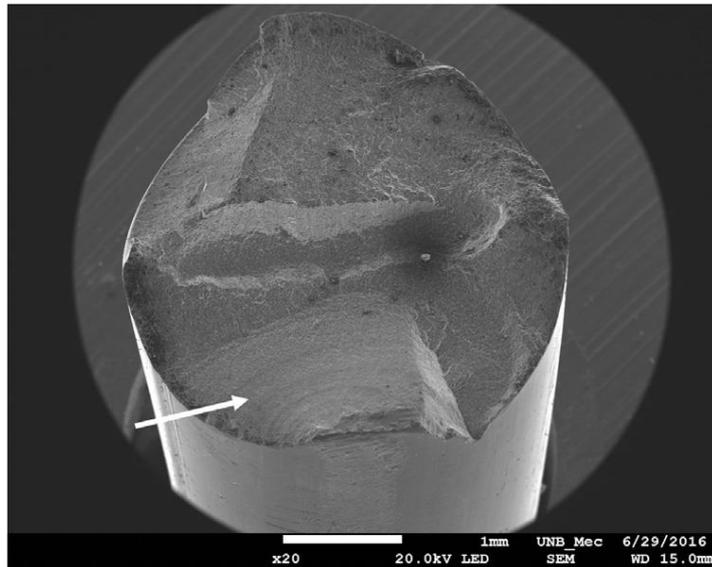


Figura 1.17: Imagem do MEV de superfície de fratura de outro fio de alumínio após ensaio de cabo condutor. (KALOMBO et al., 2016).

É extremamente complexo o monitoramento do comportamento dos fios dentro do grampo durante o ensaio. Porém é possível monitorar os fios da camada externa na saída do grampo com extensômetros conforme observado no trabalho realizado por Fadel em 2010 (UnB). Isso permite medir os dados de entrada para a equação de Poffenberger-Swart (1.1). Um dispositivo a laser identifica o momento da falha determinado pela ruptura de um dado número de fios do cabo (Figura 1.18). Em algumas normas o encerramento do ensaio de fadiga ocorre com a ocorrência da ruptura de 10% de fios quebrados. Costuma-se, em algumas situações, interromper os testes após três fios quebrados (CIGRE, 2008). O posicionamento de extensômetros, acelerômetros e do laser durante o ensaio está apresentado na figura 1.18.

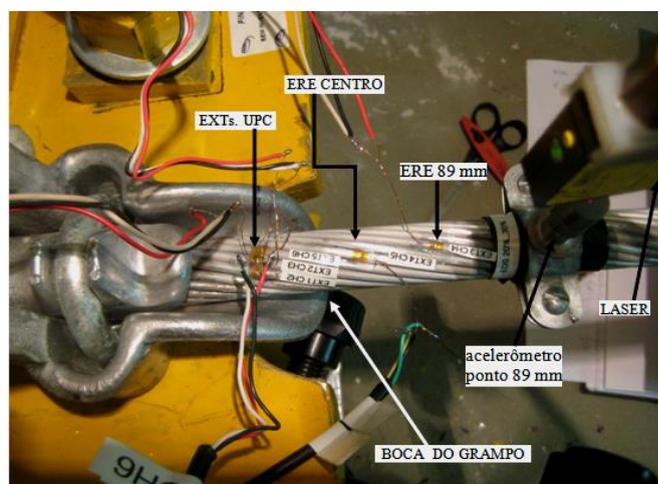


Figura 1.18: Posicionamento de extensômetros, acelerômetros e laser em relação à boca do grampo (FADEL, 2010).

1.5.2. Testes com fios isolados.

Nos itens anteriores, foram apresentadas pesquisas com aparatos em escala real para avaliação da vida em fadiga do cabo/grampo de suspensão. Apresenta-se no próximo item o estado da arte sobre trabalhos científicos que tinham como objetivo avaliar a vida em fadiga dos fios do cabo condutor.

Com base no trabalho de 1994, Zhou e colaboradores desenvolveram o dispositivo de ensaios de fios apresentado na figura 1.19. Consideraram ser o ponto A de contato fio/grampo da figura 1.8 o mais crítico nos ensaios de fadiga. O dispositivo permite simular o contato entre um fio de alumínio e o grampo de suspensão. A tensão de fadiga, o deslocamento e a amplitude de oscilação no fio de alumínio são aplicados através de um motor-excêntrico. A carga normal do grampo de suspensão é gerada por um parafuso e uma mola. Ambas as cargas são medidas por extensômetros e célula de carga respectivamente.

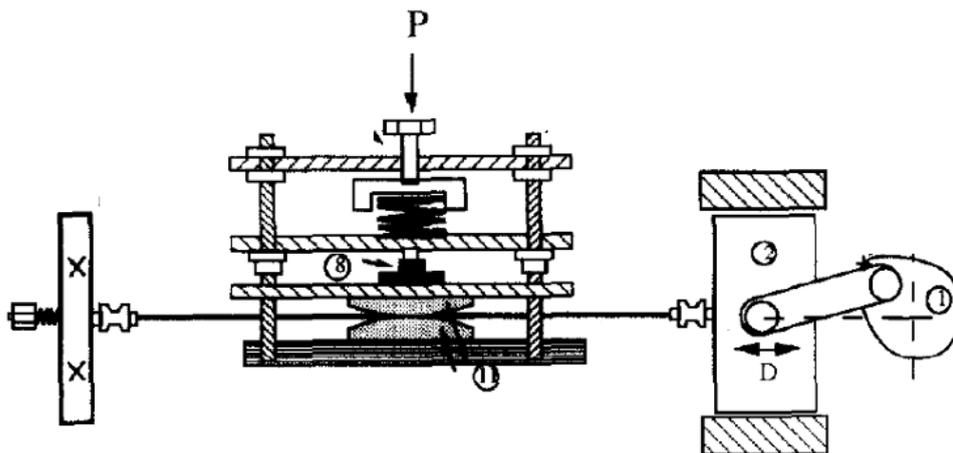


Figura 1.19: Bancada de testes de fadiga por *fretting* desenvolvida por Zhou e al. (ZHOU et al., 1995) - modificado.

Os resultados, em termos de amplitude de tensão de fadiga, de início de trincas e de número de ciclos, são equivalentes aos ensaios anteriores em escala real. A partir de um dispositivo simples que simula o que acontece dentro do grampo de suspensão, e os pesquisadores supracitados conseguiram reproduzir algumas condições reais (cargas, tensões remotas e ciclos). Uma serie de análises mostrou que as características das zonas em contato, assim como os modos de nucleação e propagação das trincas eram similares ao comportamento à fadiga do conjunto cabo/grampo. Isso mostra que é possível reduzir os custos em ensaios de cabos condutores com dispositivos simplificados e de menor escala que uma bancada convencional.

O trabalho de Zhou abriu o caminho para pesquisas de fadiga em fios isolados. No Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia da Universidade de Brasília (UnB), avalia-se a resistência a fadiga uniaxial dos fios que compõem os cabos de forma individual. Os fios são retirados dos cabos e são testados em máquinas de ensaios universais (Figura 1.20). O objetivo dessa metodologia é avaliar as propriedades do fio com defeitos superficiais e correlacioná-las com a resistência à fadiga do cabo (ADRIANO, 2017).

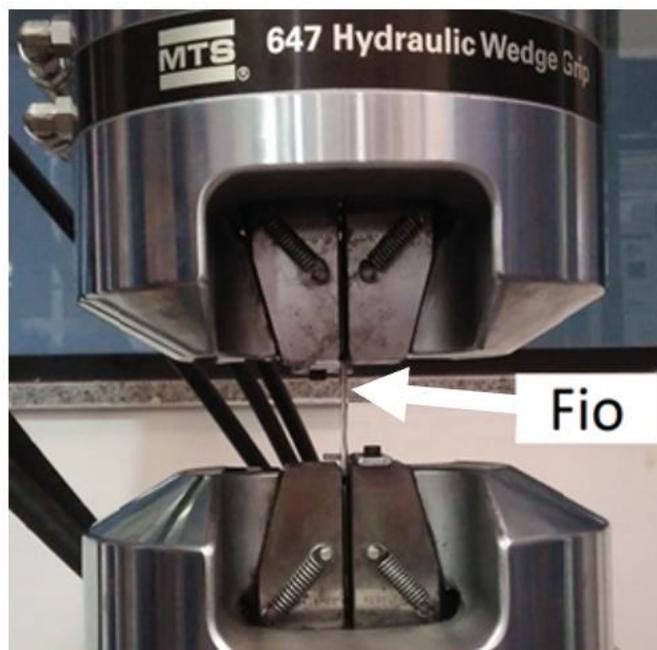


Figura 1.20: Fio retirado de um cabo condutor sendo ensaiado individualmente, sob condições uniaxiais, com defeitos superficiais, em uma máquina de ensaios universal (ADRIANO, 2017).

Outros trabalhos também se interessaram em avaliar o comportamento dos fios entre si, mas não para cabos condutores. Trata-se de cabos de aço que têm aplicações em projetos de pontes, elevadores e plataformas *offshore*, conforme ressalta Raouf (1990). Mesmo em fios com aplicações diferentes alguns mecanismos de falhas são similares. Por exemplo, no caso de cabos usados em elevadores, as falhas devido ao *fretting* se concentram na roldana. Portanto a comparação com o cabo condutor e o grampo de suspensão é viável.

Em 2010, Cruzado e colaboradores estudaram a influência do ângulo de cruzamento entre os fios em contato (Figura 1.21).

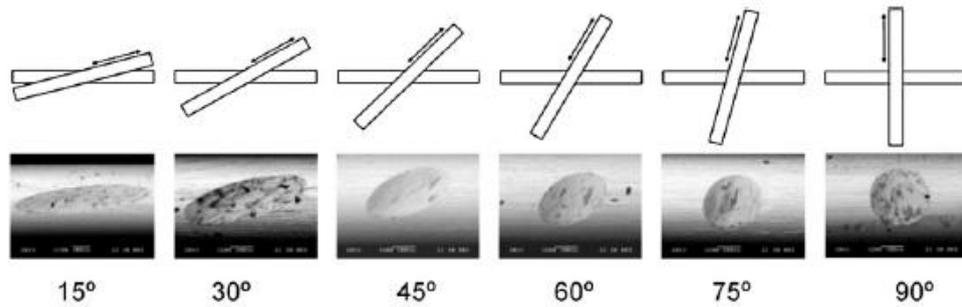


Figura 1.21: Marcas de desgaste com diferentes ângulos em fios de aço com uma carga normal de 1N (CRUZADO et al., 2011).

Mesmo com carga normal aplicada relativamente baixa (1N) quando comparada com as cargas sofridas pelos fios de cabos condutores (de 130 até 4000N) no trabalho de Zhou e coautores, esse estudo revelou informações importantes sobre a influência do ângulo de cruzamento entre fios. Notou-se que o volume de desgaste aumenta com o aumento do ângulo. Também, observou-se que com maiores ângulos, menos energia é necessária para remover uma mesma quantidade de material por desgaste.

Em 2018, Zhang et al. estudaram o comportamento em fadiga por *fretting* em fios de aço com ângulo de cruzamento de 18° e compararam com o trabalho feito em 2013 com ângulo de 90° percebendo que a vida em fadiga dos fios aumentou com o ângulo de 18°. Observou-se também que as marcas elípticas de *fretting* tinham um ângulo de 9°, ou seja, a metade do ângulo de cruzamento.

Em 2012, Wang e colaboradores desenvolveram um dispositivo de fadiga por *fretting* em fios de aço. A partir de uma máquina de ensaios universal, foi montado um aparato que permite aplicar uma carga normal através de dois fios (Figura 1.22).

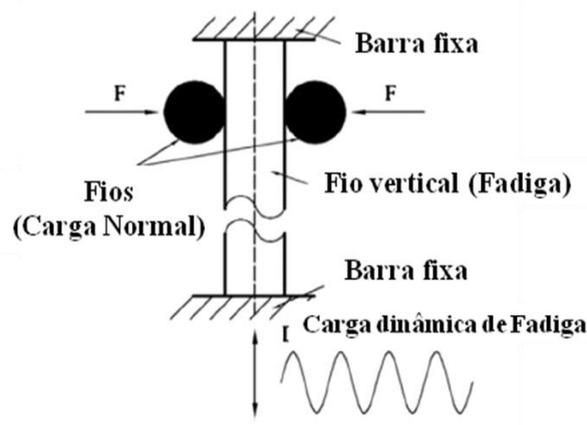


Figura 1.22: Fadiga por *fretting* em fio de aço (modificado) (ZHANG et al., 2013).

No aparato de Wang, o fio vertical é submetido a uma carga de fadiga aplicada através do atuador da máquina universal. A força de contato (60N) dos fios laterais é aplicada por um sistema de roldana e pesos (Figura 1.23). Nesse trabalho foi avaliado o comportamento do desgaste variando a amplitude de deslocamento. Observa-se que nesse trabalho não tem controle da força normal de contato. Mesmo assim o aparelho é inspirador para pesquisa sobre fadiga por *fretting* em fios de cabos condutores.

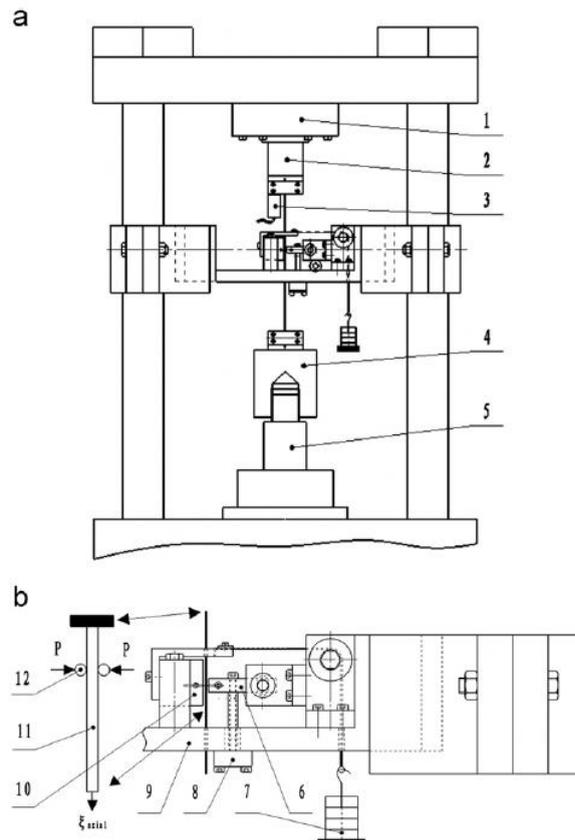


Figura 1.23: Esquema do dispositivo de fadiga por *fretting* em fio de aço (WANG et al.,2013).

Ma e colaboradores (Ma et al., 2017), recentemente, desenvolveram um dispositivo também montado em uma máquina servo hidráulica de ensaios com o objetivo de estudar o comportamento de desgaste por *fretting* em fios de alumínio de cabos ACSR (CAA). É interessante notar que nesse projeto os fios são montados mantendo o perfil de encordoamento da camada estudada (Figura 1.24). O dispositivo possui também um sistema de pulverização de uma solução de NaCl a fim de estudar o desgaste por *fretting* em ambiente corrosivo, pois os cabos estudados por Ma (2017) são instalados em ambiente marinho.

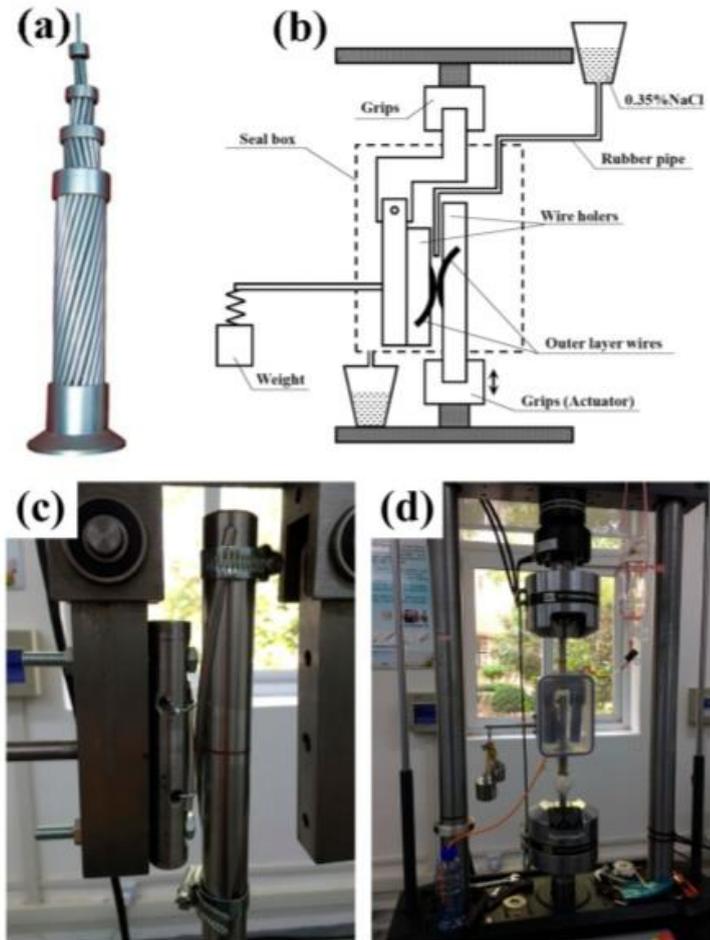


Figura 1.24: Dispositivo montado em uma máquina MTS 370.10 para ensaios de fadiga em fios: (a) Cabo ACSR 630/45; (b) Esquema do dispositivo; (c, d) fotos do dispositivo (MA et al., 2017).

1.5.3. Situação da pesquisa no Brasil e no mundo.

Já em 2010, Abreu e colaboradores realizaram uma pesquisa sobre os trabalhos científicos realizados entre 2001 e 2010 sobre fadiga de cabos condutores (ABREU et al., 2010). As palavras-chave foram: Cabos condutores, Fadiga, Vibração Eólica, Autoamortecimento, Amortecedores para linhas, Vibrógrafo, Linhas de Transmissão, Medidor de vibrações e *Stockbridge*. Foram encontrados 17 artigos publicados em revistas internacionais. Apenas 13 grupos de pesquisa foram identificados no Brasil, com trabalhos nesta área.

Com um refinamento da pesquisa à fadiga por *fretting* em fios (palavras-chave: *fretting fatigue*, *wire*, *electrical conductor* e *wear*) e descartando os artigos sobre fadiga por *fretting* em fio de aço para construção ou elevadores o resultado mostra que há uma necessidade de crescimento nesse tema devido ao pequeno número de publicações sobre o tema (apenas cinco artigos de relevância).

1.5.4. Considerações finais.

Apesar da fadiga em cabos condutores ser um dos principais problemas no projeto de uma linha de transmissão, a pesquisa científica nessa área no Brasil ainda é insipiente.

Ensaio em escala real produziram dados úteis para avaliar a resistência à fadiga de cabos. Esses resultados impactaram na vida útil de uma linha de transmissão. Todavia, a interpretação dos fenômenos que ocorrem entre o cabo condutor e o grampo de suspensão apresentam relativa complexidade, tendo em vista a ocorrência simultânea de *fretting*, concentração de tensão nas marcas produzidas nos contatos fio-grampo, cargas multiaxiais etc.

Os custos envolvidos nos ensaios em escala real e a infraestrutura laboratorial necessária também são significativos. A pesquisa, por conseguinte, pode ser refinada, avaliando-se os fenômenos de fadiga por *fretting* que ocorrem nos fios de alumínio, utilizando-se dispositivo em escala menor.

Cada tipo de contato mostrado na Figura 1.8 pode ser o tema de um trabalho de pesquisa como Zhou e colaboradores fizeram com o contato fio/grampo em 1994. Acoplar um dispositivo a uma máquina de ensaio universal permitindo simular os contatos de fios tendo um deles submetido a uma carga remota de fadiga seria uma metodologia pertinente para avaliar a resistência à fadiga por *fretting* em fios de alumínio e buscar compreender os mecanismos de falha. O dispositivo desenvolvido neste trabalho permite, de forma inovadora e simplificada, avaliar a resistência a fadiga de fios individuais sob condições de *fretting*. Busca replicar, de forma simplificada, o contato que ocorre no ponto de conexão cabo/grampo e entre os fios individuais na linha de transmissão. Com os dados gerados, serão desenvolvidas etapas intermediárias para futura incorporação e validação dos novos modelos de previsão de vida em fadiga de cabos condutores usados em linhas de transmissão.

1.6. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos, sendo descritos no primeiro capítulo o contexto que justifica o surgimento da proposta, os aspectos técnicos relacionados ao problema em estudo, os objetivos desse trabalho, a justificativa técnica, bem como uma revisão do estado da arte, apontando para as contribuições do trabalho proposto à pesquisa científica nesta área de conhecimento.

O segundo capítulo abrange uma revisão teórica sobre fadiga, onde também é apresentada uma breve revisão sobre o conceito de fadiga por *fretting* e finalmente, fadiga por *fretting* em cabos condutores.

O terceiro capítulo trata da concepção e fabricação do dispositivo e da metodologia seguida para atingir este objetivo através da redação de um caderno de encargos. Esta também incluída a descrição do dispositivo com as respostas técnicas aos requisitos listados no caderno de encargos.

Os testes de avaliação do dispositivo assim como os resultados estão descritos no capítulo quatro.

No quinto capítulo, são apresentadas as conclusões e propostas para eventuais trabalhos futuros.

Os anexos apresentam os detalhamentos de desenhos e tabelas usadas neste trabalho.

CAPÍTULO 2

2. FADIGA - REVISÃO TEÓRICA

2.1. CONCEITO DE FADIGA

Na década de 1850, August Wöhler, motivado pelas falhas em eixos ferroviários, desenvolveu as primeiras metodologias de estudo do comportamento de materiais metálicos submetidos a cargas cíclicas. Wöhler realizou ensaios correlacionando tensões *versus* número de ciclos até a falha de corpos de prova. Organizou tais dados em gráficos denominados “Curvas de Wöhler” ou curvas *S-N* (*S-stress* e *N-number of cycles*). Desde então, este método é amplamente utilizado para determinar os limites de fadiga de materiais metálicos.

Conforme à ASTM STP E1823 (2013), o fenômeno de fadiga pode ser definido como o “processo de alteração estrutural permanente, progressivo e localizado, que ocorre em um material sujeito a condições que produzem, em um ponto ou em vários pontos, tensões ou deformações dinâmicas, capazes de culminar em trincas ou em uma fratura completa após um número suficiente de variações de carga”. Materiais metálicos submetidos a cargas cíclicas rompem-se em níveis de tensão inferiores ao limite à tração e até mesmo em níveis inferiores ao limite de escoamento do material (DOWLING, 2013). Tais falhas ocorrem após longo período de tensões repetitivas pela iniciação e propagação de trincas, geralmente na direção perpendicular à tensão de tração.

A pesquisa em resistência à fadiga permitiu a exploração de diversos materiais e processos, bem como o desenvolvimento de métodos de concepção e de cálculos de novos componentes e estruturas, tendo como objetivos prolongar a vida de componentes sujeitos à fadiga, diminuir custos em material e garantir segurança aos projetos. Apesar disso a fadiga é um fenômeno que precisa ser mais compreendido, pois ainda ocorrem acidentes devido à falha por fadiga.

2.2. CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE FADIGA

O processo de fadiga resultante de tensões dinâmicas ocorre em três etapas básicas: *i*) nucleação da trinca, *ii*) propagação da trinca, ou crescimento macroscópico, *iii*) fratura final.

- **Nucleação**

Trincas não perceptível ao olho nu surgem no material. Iniciam-se em inclusões, fronteiras de grãos, defeitos internos e bandas de deslizamento (Figura 2.1). A carga cíclica faz com que os planos de deslizamento da estrutura cristalina se movam para dentro ou fora da superfície. Isso gera extrusões e intrusões na superfície (Figura 2.1c).

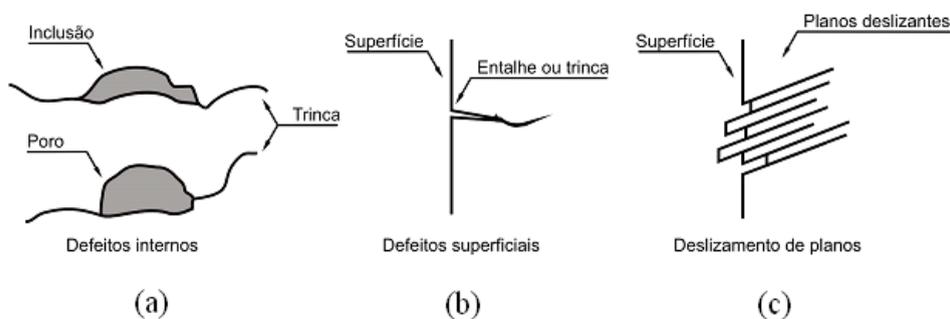


Figura 2.1: Nucleação de trincas em componentes sujeitos a esforços cíclicos (GARCIA et al., 2000).

- **Propagação**

Depois da nucleação, vem o processo de propagação, no qual a trinca avança lentamente com o número de ciclos. Em materiais policristalinos, essa propagação ocorre ao longo dos planos cristalográficos onde a tensão de cisalhamento é máxima. Esse processo é denominado de estágio de Propagação I. As trincas se estendem a apenas alguns grãos, formando uma superfície de fadiga com aparência quase plana (Figura 2.2).

O estágio de Propagação II se inicia quando o fator de intensidade de tensão atinge um valor crítico. Há uma mudança na direção de propagação da trinca para uma direção perpendicular a carga aplicada. A trinca cresce mais rapidamente. A superfície de fratura formada pode ser caracterizada por dois tipos de imagens: marcas de praias e estrias.

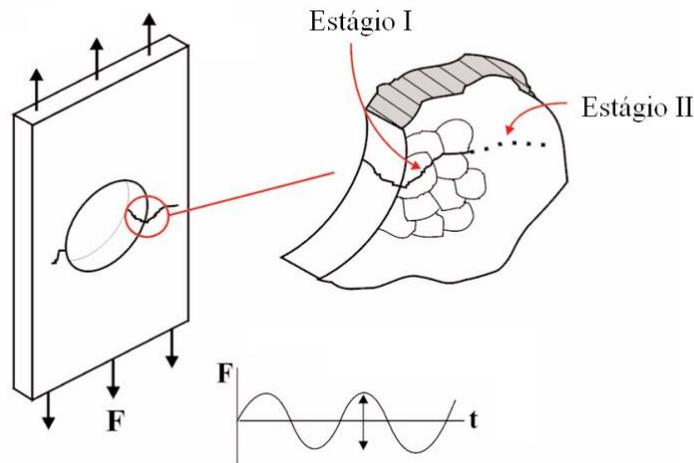


Figura 2.2: Mecanismo de crescimento de trinca (FADEL, 2010).

As marcas de praia ou “*beach marks*”, conforme mostrado na Figura 2.3, são linhas curvas em relação à origem da trinca. Tais marcas permitem identificar o ponto de início do processo de fratura. Podem ser observadas a olho nu ou microscópio ópticos ou eletrônicos com pequeno aumento, pois elas possuem dimensões macroscópicas. Uma marca de praia corresponde a um período de tempo durante o qual a trinca evoluiu devido a variação no estado de tensões. As estrias apresentam uma aparência similar às marcas de praia, e correspondem ao avanço da ponta da trinca durante um ciclo de carregamento. Só observáveis com grandes aumentos. Uma marca de praia pode conter centenas de estrias.

É importante ressaltar que se a presença de marcas de praia e estrias confirma que a causa de falha foi por fadiga, a ausência dessas marcas não descarta a fadiga como responsável da falha (ADRIANO, 2017).

- **Fratura**

Quando a trinca atingir um tamanho crítico, ocorre uma falha final por fratura. Essa falha pode ocorrer de forma dúctil, quando envolve grandes deformações ou frágil. Dependerá do tipo de material, dimensões e condições de carregamento.

A superfície de fratura final é normalmente áspera e irregular (Figura 2.3).

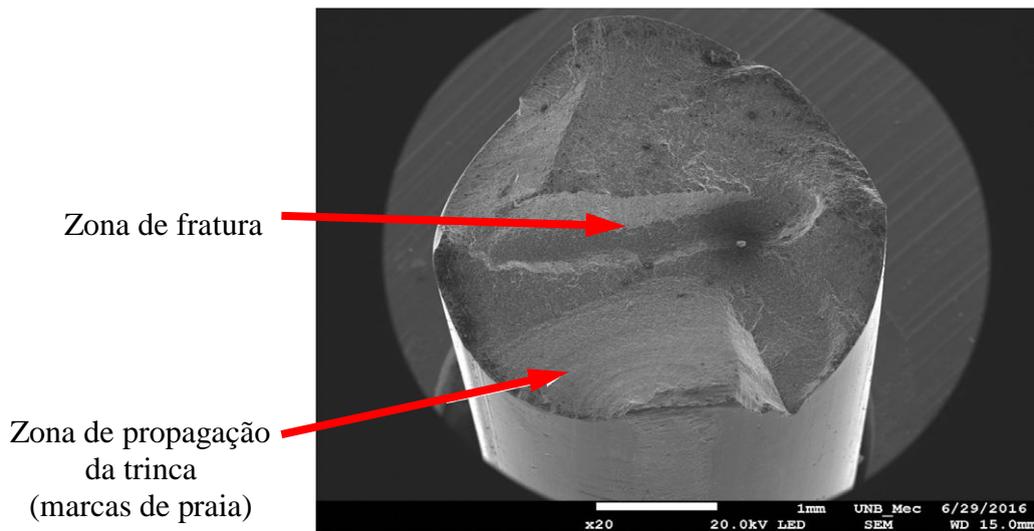


Figura 2.3: Imagem (MEV) de fio após falha por ruptura (KALOMBO et al., 2016).

2.3. DEFINIÇÕES FUNDAMENTAIS E CLASSIFICAÇÃO

Como descrito anteriormente, a fadiga é uma forma de falha que ocorre em estruturas ou montagens sujeitas a tensões dinâmicas e oscilantes. Essas tensões cíclicas podem ser de natureza axial (tração-compressão), flexão (dobramento) ou torcional (torção).

Podem-se classificar os tipos de ciclos de tensão em dois grupos:

- Ciclos com amplitude de tensão constante: Tem-se uma dependência regular e senoidal com o tempo. A amplitude é simétrica em torno de um nível médio de tensão, podendo ser zero como na Figura 2.4. Os ciclos alternam entre tensão máxima de tração ($\sigma_{m\acute{a}x}$) e tensão mínima de compressão ($\sigma_{m\acute{i}n}$) de igual amplitude. São conhecidos como ciclo de tensões alternadas e repetidas (Figuras 2.4 e 2.5).

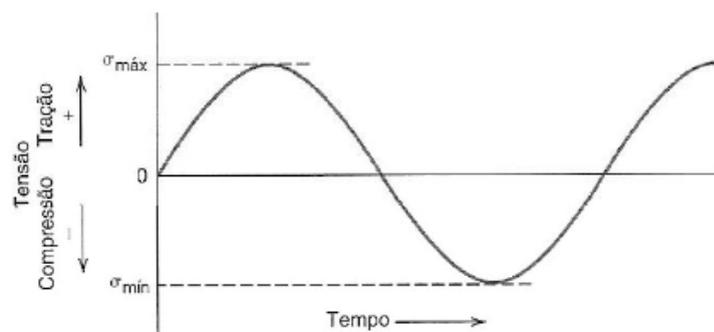
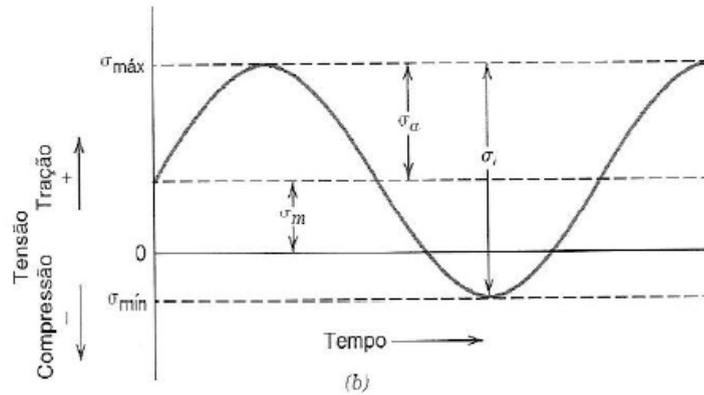


Figure 2.4: Ciclo de tensões alternadas (CALLISTER, 2015).



σ_m – tensão média
 σ_i – intervalo de tensões
 σ_a – amplitude da tensão

Figura 2.5: Ciclo de tensões repetidas (CALLISTER, 2015).

- Ciclos de tensões aleatórias: O nível de tensão pode variar aleatoriamente em amplitude e frequência (Figura 2.6).

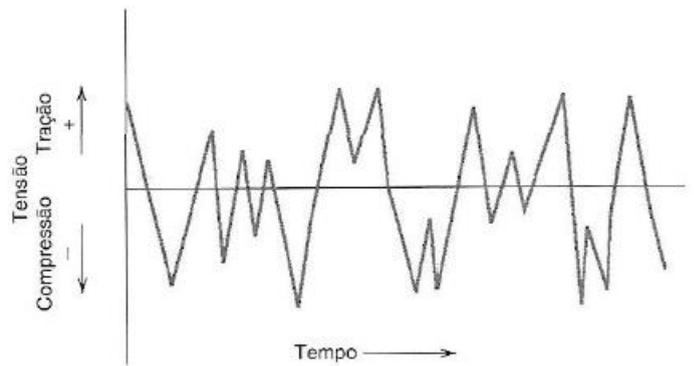


Figura 2.6: Ciclo de tensões aleatórias (CALLISTER, 2015).

Das figuras acima, nota-se parâmetros que precisam ser destacados. Entre eles, destaca-se a tensão máxima ($\sigma_{máx}$) e a tensão mínima ($\sigma_{mín}$) que determinam qual é a tensão máxima e mínima que o material estará submetido durante o ensaio. A partir destes dois parâmetros, podem ser calculadas a tensão média (σ_m) e a amplitude de tensão ou tensão alternada (σ_a).

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{máx} + \sigma_{mín}}{2} \quad (2.1)$$

$$\sigma_a = \sigma_{máx} - \sigma_m = \frac{\sigma_{máx} - \sigma_{mín}}{2} \quad (2.2)$$

O intervalo de tensão, $\Delta\sigma$, é duas vezes a amplitude da tensão. Assim tem-se:

$$\Delta\sigma = 2\sigma_a = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n} \quad (2.3)$$

A tensão média (σ_m) é normalmente quantificada pela razão de tensão, R , a qual é definida pela equação:

$$R = \frac{\sigma_{m\acute{i}n}}{\sigma_{m\acute{a}x}} \quad (2.4)$$

Assim, para um ciclo alternado de tensões, onde os valores absolutos da tensão máxima e mínima são simétricos, tem-se que $R = -1$, e no repetido, $R = 0$.

2.4. MÉTODOS DE PREVISÃO DA VIDA EM FADIGA

A fadiga é um fenômeno complexo que depende de diversos fatores. Por isso existem diferentes abordagens que auxiliam na concepção de equipamentos contra falha por fadiga. Os principais métodos utilizados para garantir que não haja falha em componentes mecânicos ou para acompanhar o dano causado pela fadiga com o objetivo de não ocorrer falha são descritos a seguir:

2.4.1. Método da Tensão - Vida (S-N)

Trata-se do método mais simples de ser aplicado, pois utiliza apenas valores de tensões nos pontos mais críticos do componente para calcular sua vida em fadiga (número N_f de ciclos necessários para causar a falha). A representação gráfica que correlaciona os dados de amplitude de tensão com o número de ciclos até falha é chamada de curva S-N (Figura 2.7).

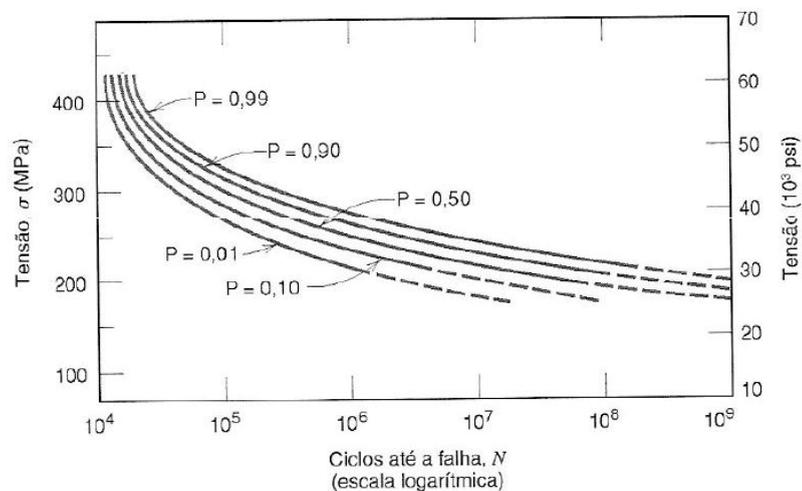


Figura 2.7: Exemplo de curvas S-N (DOWLING, 2013).

O método da Tensão-Vida é aplicável somente em caso de vida em fadiga de alto ciclo, ou seja, vida em fadiga superior a 10^5 ciclos. Os níveis de tensão são baixos e produzem basicamente deformações elásticas.

2.4.2. Método da Deformação - Vida (ϵ - N)

Ao contrário do método Tensão-Vida, o método Deformação-Vida considera as deformações plásticas dos pontos críticos, portanto é aplicado em análise de processos de vida em fadiga dominados por deformação plástica.

O método da Deformação-Vida é difícil de ser aplicado em projeto de engenharia mecânica. Mesmo com o auxílio do método de elementos finitos é difícil avaliar o nível de deformação nos pontos mais críticos do componente analisado.

2.4.3. Método da Mecânica de Fratura Elástica Linear (LEFM)

Trata-se de um acompanhamento do tamanho de trincas conforme ao nível de tensão aplicado no equipamento. Esse método é baseado na teoria de mecânica da fratura. Uma trinca já está presente e foi detectada. A partir desse dado o método LEFM prevê seu crescimento em relação à intensidade da tensão. Essa abordagem é mais adequada para grandes estruturas, como em asas e fuselagem de avião (inspeções periódicas).

Neste trabalho, será adotado o método da Tensão-Vida, pois as falhas por fadiga em cabos condutores ocorrem em alto ciclo.

2.5. FADIGA POR *FRETTING*

No caso de cabos condutores a excitação eólica gera um movimento de flexão alternada do cabo que pode levar a falha por fadiga. Outro fenômeno envolvido no processo de falha é o *fretting*. Esse fenômeno mecânico ocorre quando duas superfícies em contato estão sujeitas a cargas oscilatórias. Isso gera zonas de microdeslizamento onde as duas superfícies deslizam entre si. Para que haja fadiga por *fretting* é necessário ter a presença de três tipos de carga: a carga normal de contato P , a carga cisalhante $Q(t)$ e a carga remota de fadiga $B(t)$. Dois fenômenos podem surgir com os fios de alumínio:

- Desgaste por *fretting*: Desgaste das superfícies em contato. Ocorre quando o deslocamento relativo atinge um valor crítico no qual o desgaste supera a fadiga, lixando e removendo as trincas prematuramente;

- Fadiga por *fretting*: Ocorre abaixo do deslocamento crítico. Surgem inícios de trincas nas regiões de contato reduzindo a resistência à fadiga do fio. Tem-se escorregamento parcial.

A fadiga por *fretting* é um problema mecânico altamente complexo e difícil de compreensão, pois diversos aspectos estão envolvidos como mecânica da fadiga, mecânica do contato, mecânica da fratura, tribologia e ciência dos materiais. A corrosão é ainda outro aspecto envolvido no processo de fadiga por *fretting* (DOWLING, 2013).

Como já ressaltado, a fadiga por *fretting* é caracterizada pela presença de uma carga de fadiga e de cargas de contato. No caso de cabos de transmissão o contato ocorre entre os fios de camadas vizinhas o que pode ser ilustrado pelo contato entre dois cilindros como mostrado na Figura 2.8. Diversos trabalhos científicos (CRUZADO et al., 2010, 2011 e 2012) tentam reproduzir este modelo de contato de forma experimental ou atreves do Método dos Elementos Finitos (MEF). Observa-se a presença de uma carga radial P que comprime os cilindros entre si tendo um dos cilindros submetido a uma carga axial cíclica Q . O atrito provocado pelo efeito das cargas P e Q associadas gera na zona de contato uma marca (em escuro na Figura 2.8) de forma elíptica.

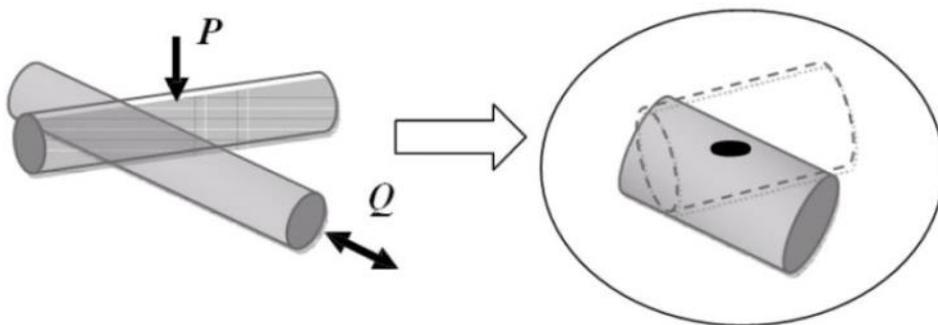


Figura 2.8: Esquema de contato entre dois fios (FADEL, 2010).

As superfícies em contato geram gradientes elevados de tensão na região do contato. Esses gradientes combinados com o atrito provocam danos superficiais. Nowell (1994) explica que essa combinação acelera o processo nucleação e crescimento de trincas.

Dentro da zona de contato, Nowell (1994) distingue duas regiões distintas conforme apresentado na Figura 2.9. A primeira região é a zona de adesão (*Stick zone*) delimitada pelo intervalo $[-c, c]$. Os intervalos $[-a, -c]$ e $[c, a]$ delimitam a zona de escorregamento (*Slip zone*). Essas duas regiões dependem das cargas P e Q .

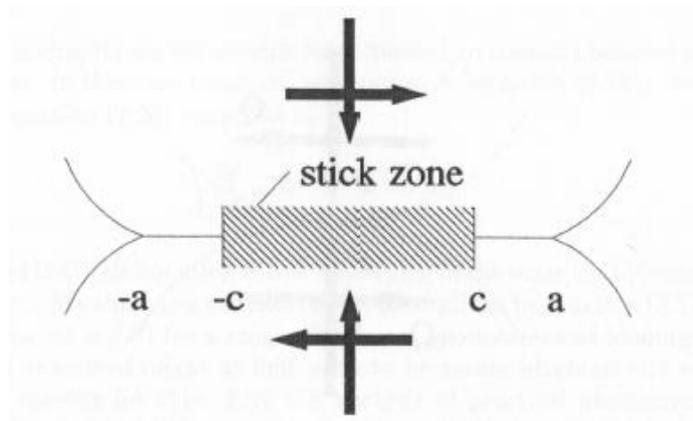


Figura 2.9: Zonas de adesão e escorregamento para contato entre cilindros em regime de escorregamento parcial (HILLS e NOWELL, 1994).

Dentro dessa configuração de zonas, três regimes de *fretting* são definidos:

- Regime de Escorregamento Parcial (*Partial Slip Regime*);
- Regime de Escorregamento Total (*Gross Slip regime*);
- Regime Misto de *Fretting* (*Mixed Fretting Regime*);

No trabalho de Zhou e colaboradores em 1996 sobre fadiga por *fretting* em cabos condutores, três regimes de *fretting* foram observados:

- Regime de Adesão (*Sticking Regime*): Ocorre em geral em contato fio-grampo e fio-fio onde a carga radial P é maior, ou seja, nas regiões que ficam presas dentro do grampo de suspensão. Observa-se microdeslizamento nas margens da marca de contato (Figura 2.10a). Podem aparecer trincas, mas apenas após número de ciclos entre 1 e 10 milhões.
- Regime de Escorregamento (*Slip Regime*): Essas zonas aparecem fora da região de aperto do grampo onde a carga radial P é menor e a amplitude de oscilação do cabo maior. O desgaste é maior e o tamanho da marca aumenta com o número de ciclos (Figura 2.10b). O desgaste é tal que não é possível ter nucleação de trincas.
- Regime Misto de *Fretting* (*Mixed Fretting Regime*): Trata-se de um regime intermediário entre os dois anteriormente descritos. Observa-se na zona do Último Ponto de Contato do grampo (Figura 1.14). Os ensaios mostraram que essas marcas são as mais críticas em termo de início de trincas (Figura 2.10c). Podem aparecer trincas de pequeno tamanho após um número baixo de ciclos.

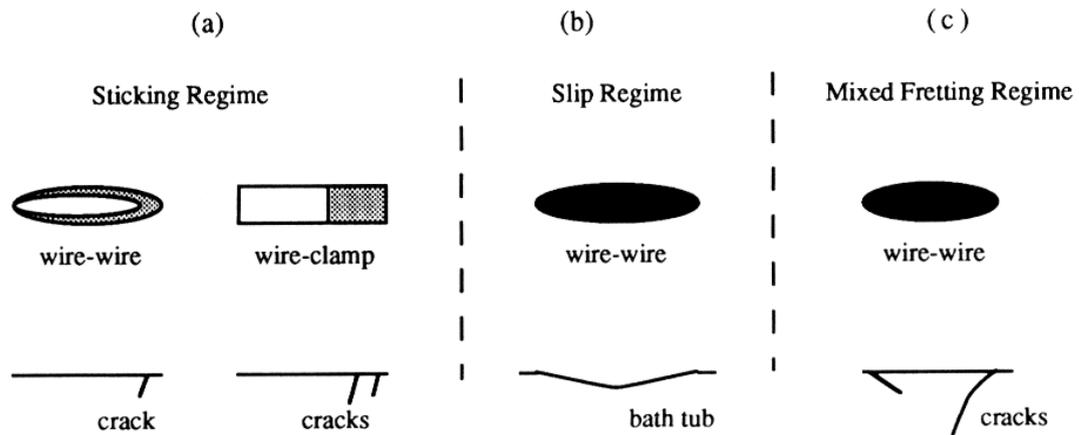


Figura 2.10: Regimes de *fretting* e trincas associadas (ZHOU et al., 1995).

As marcas de *fretting* em fios de cabo condutores ocorrem em três etapas: A pré-carga de tração (EDS), a carga de aperto gerada pelo grampo de suspensão e finalmente a carga cíclica devido a vibração eólica.

Como já mencionado, a fadiga por *fretting* envolve diversos aspectos da engenharia mecânica, mas as teorias principais ligadas a esse fenômeno são as da mecânica do contato sendo as de Hertz, Mindlin e Muskhelishvili. Os três tipos de cargas que geram fadiga por *fretting*, ou seja, carga normal P , carga tangencial Q e carga remota de fadiga B , são relacionadas a essas teorias. A seguir serão descritas as teorias e equações que regem cada uma dessas cargas.

- **Carga normal de contato P**

A Figura 2.11 mostra uma configuração adotada em testes de fadiga por *fretting* por pesquisadores como Nowell em 1988 e Araújo em 2000. Em 1882, os resultados de Hertz preveem que devido à força normal estática entre dois cilindros, uma distribuição de pressão elíptica é gerada. Tal distribuição de pressão é aplicada na direção x e é mostrada na formula 2.5. É importante ressaltar que o raio do cilindro, R , e o carregamento normal por unidade de comprimento, P , foram definidos considerando cada corpo em contato como um semiplano elástico.

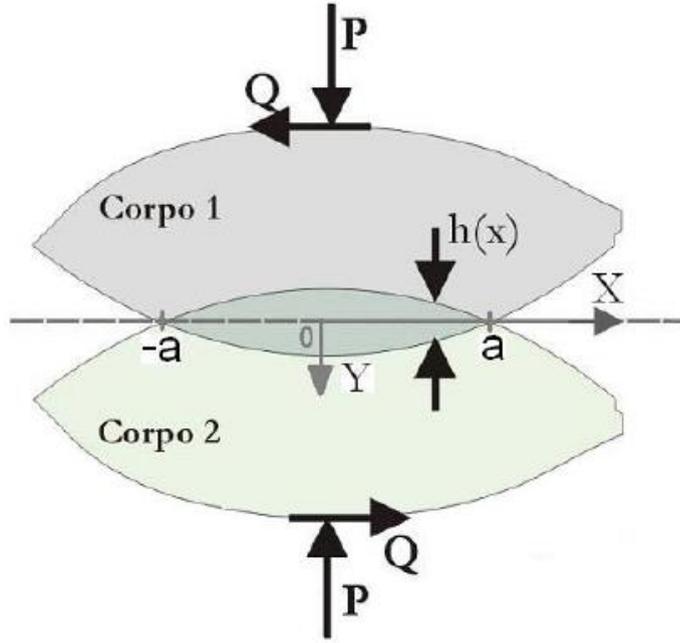


Figura 2.11: Contato entre dois corpos elasticamente deformáveis submetidos à força normal, P , e tangencial, Q (MARTINS, 2008).

$$p(x) = -p_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2}, \quad (2.5)$$

Onde p_0 é o valor máximo da pressão no contato em condição de equilíbrio

$$p_0 = \frac{2P}{\pi a}, \quad (2.6)$$

a é a metade do comprimento do contato

$$a = \sqrt{\frac{4PR_{eq}}{\pi E^*}}, \quad (2.7)$$

R_{eq} e E^* são definidos pelas relações:

$$R_{eq} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)^{-1} \quad (2.8)$$

$$E^* = \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}\right) \quad (2.9)$$

E é o módulo de elasticidade e ν é o coeficiente de Poisson. Os subscritos 1 e 2 referem-se aos corpos 1 e 2 da Figura 2.11.

- **Carga tangencial Q**

Ao aplicar uma carga tangencial Q surgem tensões cisalhantes na superfície dos corpos em contato como descrito por Cattaneo em 1938 e Mindlin em 1949. No caso de fadiga por *fretting*, o carregamento cisalhante aplicado é menor que o limite para escorregamento total. Tem-se um regime de escorregamento parcial delimitado por duas regiões distintas dentro da zona de contato (Figura 2.12). A zona de adesão encontra-se na região central no intervalo $[-c, c]$, onde não ocorre movimento relativo entre os pontos em contato. A outra região, chamada de zona de escorregamento, encontra-se entres os intervalos simétricos $[-a, -c]$ e $[c, a]$, ou seja, nas extremidades da zona de contato.

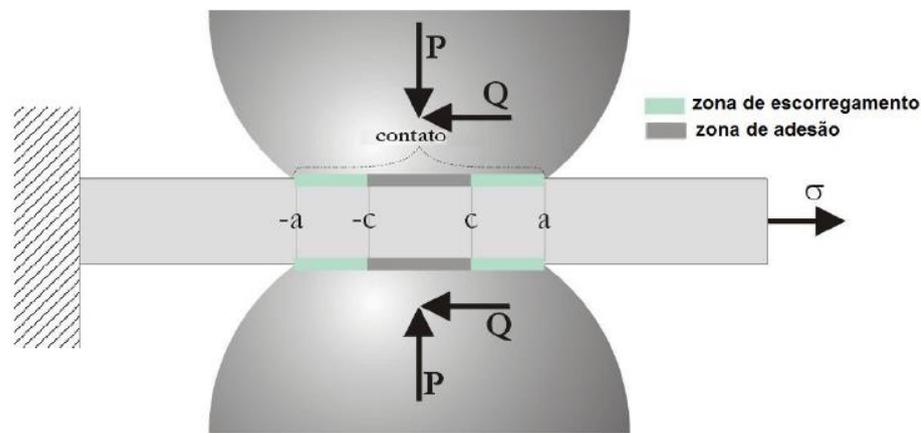


Figura 2.12: Regiões de escorregamento e de adesão para o contato entre cilindros em regime de escorregamento parcial (MENDES, 2006).

A distribuição de tensões cisalhantes $q(x)$ é modelada como uma solução do escorregamento total perturbada por $q'(x)$:

$$q(x) = fp_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} - q'(x) \quad (2.10)$$

Onde f é o coeficiente de atrito.

A perturbação $q'(x)$ é definida por:

$$q'(x) = fp_0 \frac{c}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{c}\right)^2} \quad (2.11)$$

Na zona de escorregamento $q'(x) = 0$. O tamanho da zona de adesão, c , é encontrado ao se resolver a condição de equilíbrio tangencial, obtendo:

$$\frac{c}{a} = \sqrt{1 - \left(\frac{Q_{m\acute{a}x}}{fP}\right)^2} \quad (2.12)$$

A Figura 2.13 mostra a distribuição de pressão e das tensões cisalhantes no contato para uma faixa de valores de forças tangenciais. Pode-se notar que na zona de adesão central as tensões de cisalhamento são reduzidas devido a perturbação na solução.

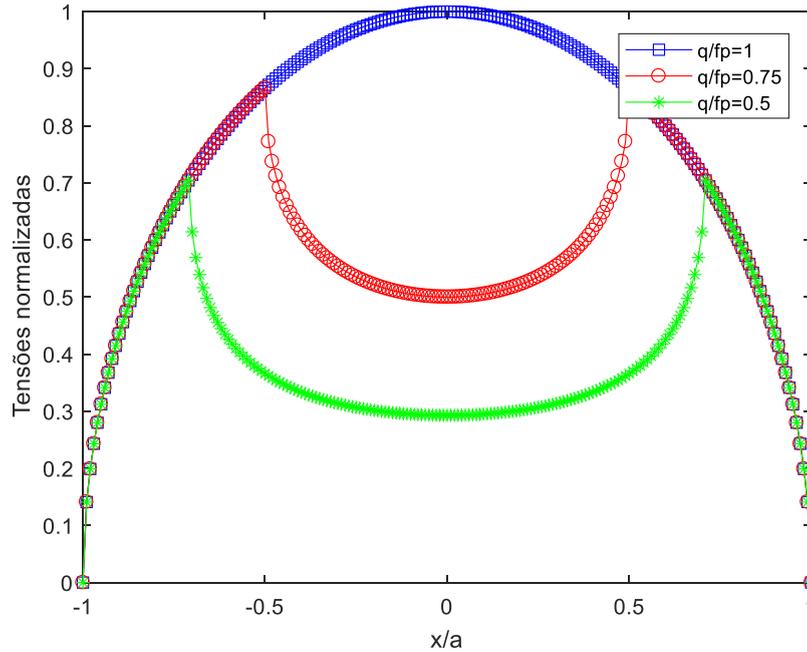


Figura 2.13: Perfil da distribuição de pressão e tensão cisalhante para três configurações de carregamento.

As expressões desenvolvidas para a distribuição de tensão cisalhante são apenas viáveis quando a força tangencial está no valor máximo de carregamento. Para observar os outros instantes do ciclo de *fretting* é necessário analisar o que ocorre no carregamento reverso. A seguir será apresentado uma forma resumida para resolver esse tipo de problema. Uma forma mais detalhada pode ser encontrada no trabalho de Hills e Nowell (1994).

Para continuar faz-se necessário recordar as condições de contorno na interface do contato. Dentro da zona de escorregamento as tensões são relacionadas pela lei de Amontons (1699).

$$|q(x)| = -fp(x) \quad (2.13)$$

Na zona de adesão as tensões de cisalhamento devem ser menores que as limite de fricção (HILLS e NOWELL, 1994).

$$|q(x)| < -fp(x) \quad (2.14)$$

A Figura 2.14 mostra a variação da carga tangencial Q com o tempo t . O carregamento tangencial parte do zero e atinge seu valor máximo no ponto A. Porém, do ponto A para o ponto B inicia-se o descarregamento. O deslocamento relativo muda de sinal e causa uma violação da Eq. 2.15 que é válida durante o carregamento.

$$\text{sgn}(q(x)) = -\text{sgn}\left(\frac{\partial g}{\partial t}\right) \quad (2.15)$$

$\frac{\partial g}{\partial t}$ é a taxa de deslocamento na direção x .

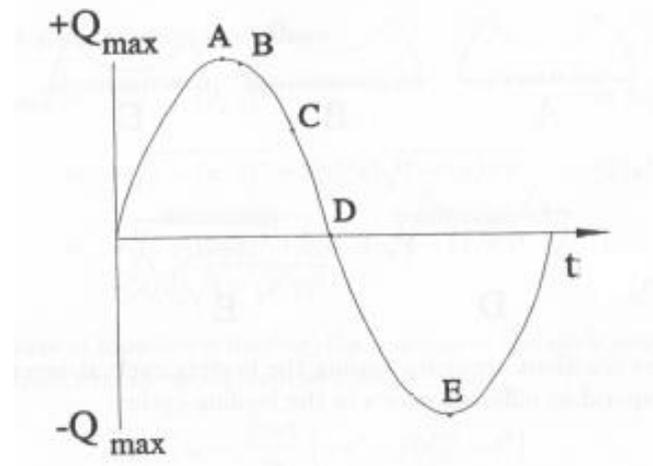


Figura 2.14: Distribuição de carga tangencial Q ao longo do tempo (HILLS e NOWELL, 1994).

Continuando o descarregamento até o ponto C da Figura 2.14 pode-se notar que nessa nova zona de escorregamento ($c' \leq |x| < a$), as tensões cisalhantes superficiais mudam de $fp(x)\sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2}$ para $-fp(x)\sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2}$. Por analogia, é possível concluir que dentro da zona de adesão, a tensão superficial necessária para prever o escorregamento será:

$$q''(x) = 2fp_0 \frac{c'}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{c'}\right)^2} \quad (2.16)$$

O fator de 2, na Eq. 2.16, é necessário pois este termo corretivo deve cancelar os deslocamentos relativos ocorrido quando a tensão cisalhante superficial muda de $2fp(x)\sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2}$ ao invés de $fp(x)\sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2}$ durante a fase de carregamento. As distribuições das tensões cisalhantes superficiais para cada região de descarregamento são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Distribuição de tensão cisalhante no descarregamento.

$q(x)/fp_0$	Zona de aplicação
$-\sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2}$	$c' < x \leq a$
$-\sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} + 2\frac{c'}{a}\sqrt{1 - \left(\frac{x}{c'}\right)^2}$	$c < x \leq c'$
$-\sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} + 2\frac{c'}{a}\sqrt{1 - \left(\frac{x}{c'}\right)^2} - \frac{c}{a}\sqrt{1 - \left(\frac{x}{c}\right)^2}$	$ x \leq c$

O tamanho da nova zona de adesão no carregamento reverso é dado por:

$$\left(\frac{c'}{a}\right)^2 = 1 - \left(\frac{Q_{m\acute{a}x} - Q(t)}{2fP}\right). \quad (2.17)$$

A Figura 2.15 mostra a distribuição de tensões cisalhantes para diferentes valores de Q , correspondentes aos pontos A , C , D , E e F (Figura 2.14) do ciclo de *fretting*. É interessante notar que as curvas das tensões cisalhantes superficiais para valores extremos (pontos A e F) são iguais e simétricas. Observa-se também que para uma força cisalhante nula (ponto D), persistem tensões cisalhantes superficiais.

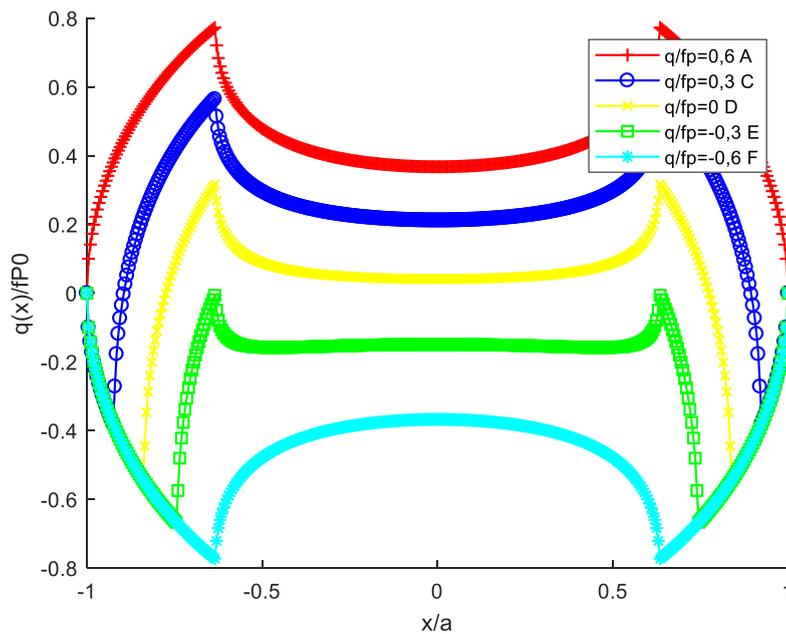


Figura 2.15: Distribuição de tensão cisalhante durante um ciclo completo.

- **Carga remota de fadiga B**

Se uma carga remota de fadiga $B(t)$ for aplicada em fase com a carga tangencial $Q(t)$ haverá um deslocamento da zona de adesão. Tal deslocamento é representado por e (nos pontos máximo e mínimo de B) e e' (durante o carregamento ou descarregamento de B). Novamente, mais detalhes sobre essas expressões podem ser encontrados no trabalho de Hills e Nowell (1994).

$$\frac{e}{a} = \frac{\sigma_{B_{\max}}}{4fP_0} \quad (2.18)$$

$$\frac{e'}{a} = \frac{\sigma_{B_{\max}} - \sigma_{B(t)}}{8fP_0} \quad (2.19)$$

A Figura 2.16 representa a história das tensões cisalhantes superficiais para uma combinação de carga tangencial e remota de fadiga. Observa-se perfeitamente o deslocamento da zona de adesão devido à presença da carga remota de fadiga.

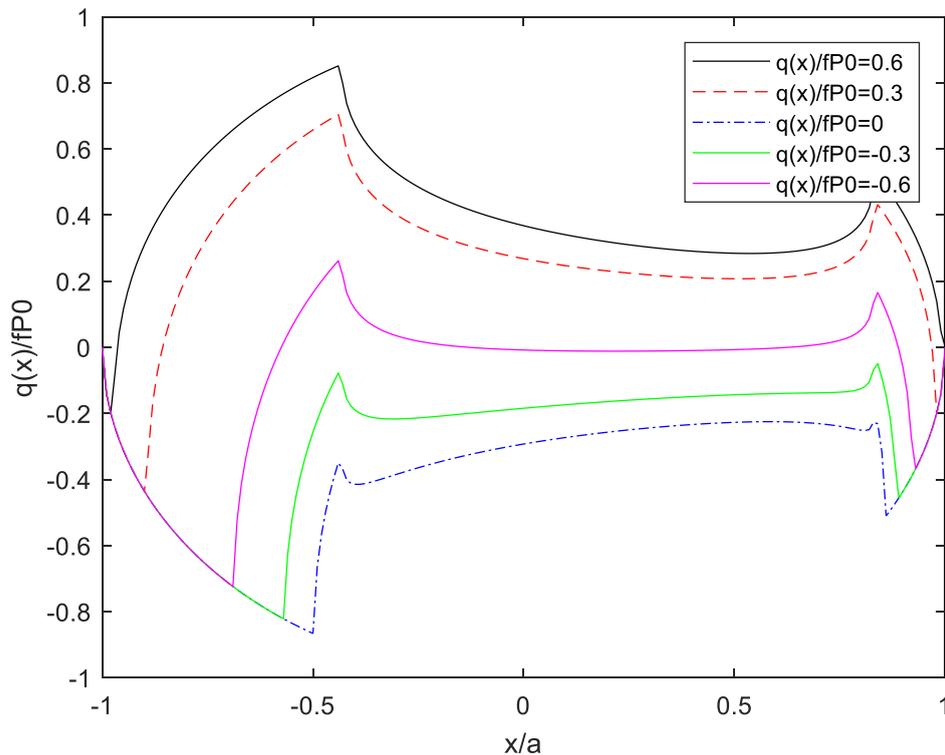


Figura 2.16: Efeito da carga remota de fadiga no ciclo de carregamento.

2.6. FADIGA EM CABOS CONDUTORES

Introdução

Como já discutido, é fato que a principal causa de falhas em cabos de transmissão tem como origem a ação do vento. O efeito do vento provoca movimentos oscilatórios sobre o cabo o que induz o fenômeno de fadiga. Tais falhas têm início onde o cabo está em contato com o grampo de suspensão ou outras ferragens de fixação (CIGRE, 1985).

As vibrações eólicas do cabo condutor dependem da velocidade do vento, do ângulo de incidência do vento no cabo, da carga de esticamento, do tipo do cabo e do vão livre. Mesmo com ventos de baixa velocidade, as vibrações induzidas podem prejudicar a vida útil do cabo. A frequência induzida pelo vento acumulada com a frequência natural do cabo suspenso aumenta a amplitude de vibração perigosamente.

Tipo de vibrações em linhas de transmissão de energia

Existem três principais tipos de vibrações que podem acontecer a partir do efeito do vento:

- **Vibração eólica:**

A vibração eólica se caracteriza por movimentos de pequena amplitude e elevada frequência causada por vento de baixa velocidade. O deslocamento provocado é difícil de detecção, pois a amplitude de vibração pico a pico apenas ultrapassa o diâmetro do próprio condutor. Embora a descrição desse tipo vibração não apresente perigo evidente para o cabo condutor, tal vibração é a principal causa de fadiga em cabos condutores. Como a velocidade necessária é baixa (1 a 7 m/s), facilmente o cabo será submetido às altas frequências associadas o que afetará rapidamente sua vida útil.

- **Oscilação de sub-vão:**

Também conhecida como vibração de esteira, ocorre em feixes de condutores, ou seja, cabos agrupados por espaçadores. Quando um dos cabos é submetido ao vento, a vibração induzida se estende ao cabo atrás deste. Este tipo de vibração se caracteriza por frequências baixas e amplitudes moderadas a altas (até 80 vezes o diâmetro do cabo).

- **Galope do condutor:**

Este tipo de vibração não envolve o fenômeno de fadiga. Ocorre quando a superfície do cabo é coberta por uma camada de gelo e que ventos moderados a fortes incidem transversalmente sobre ele. Nesse caso as vibrações são de baixa frequência e de grandes

amplitudes (até 300 vezes o diâmetro do cabo de pico a pico). Apesar de ser vibrações de curto período, os danos podem ser gravíssimos prejudicando não apenas o cabo condutor, mas também outros componentes da LT como grampos, pontos de ancoragem, e até a própria estrutura da torre. Esse tipo de vibração é raro no Brasil devido ao clima predominante em suas diversas regiões.

CAPÍTULO 3

3. CONCEPÇÃO E FABRICAÇÃO DO DISPOSITIVO

Este capítulo apresenta o conjunto máquina servo hidráulica de ensaios MTS e o dispositivo de fadiga por *fretting* em fios de alumínio. A máquina MTS permite aplicar e controlar a carga cisalhante, $Q(t)$, e a carga remota de fadiga, $B(t)$. Como foi discutido nos capítulos anteriores, para que haja *fretting*, é necessário que exista uma carga de compressão entre os fios. Tal carga, denominada carga normal P , é aplicada pelo dispositivo apresentado de forma resumida na Figura 3.1.

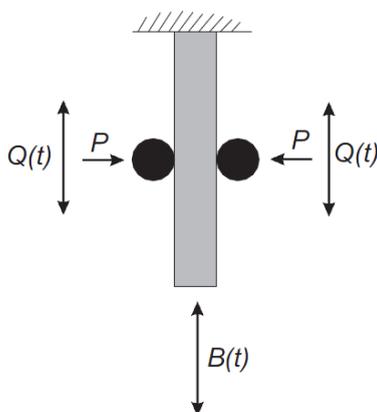


Figura 3.1: Esquema de funcionamento e movimentação dos fios posicionados na máquina de ensaio.

Um fio é montado nas garras da máquina submetido à carga de fadiga e dois fios são montados em contato com o primeiro, conforme apresentado na Figura 3.2. Comparando com ensaios de fadiga por *fretting* como descritos por Martins em 2008 ou Bellecave em 2015, o fio vertical seria o corpo de prova (*specimen*) e os fios em contato seriam as sapatas (*pads*).

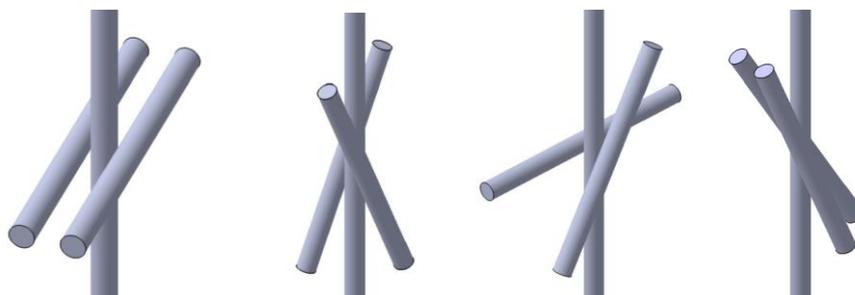


Figura 3.2: Configurações de posicionamento dos fios na máquina de ensaios, contato perpendicular ou com ângulos.

Nas seções seguintes desse capítulo, será descrito o desenvolvimento do dispositivo das primeiras propostas até a fabricação final.

3.1. INTRODUÇÃO

Após uma revisão do estado da arte e outra sobre fadiga por *fretting*, partiu-se para uma nova etapa do trabalho. A concepção e a fabricação do dispositivo de ensaio de fadiga por *fretting* em fios de alumínio é abordada em detalhes nas próximas seções.

3.2. METODOLOGIA

Para realizar o projeto mecânico do dispositivo, utilizou-se o sistema de Desenhos Assistidos por Computador (CAD) CATIA V5. O sistema serviu tanto para o projeto básico quanto para o projeto executivo.

Os desenhos para fabricação também foram realizados com o sistema CATIA V5 (ver anexo A). Tais desenhos foram elaborados conforme as normas e padrões listados por Chevalier (1988 e 2004).

As peças que precisavam de atenção em termos de resistência dos materiais foram analisadas por Elementos Finitos. O sistema CATIA V5 pode atender essa necessidade através da opção “*Analyse & Simulation/Generative Structural Analysis*”.

Por fim, para que o dispositivo responda a todas as exigências em caracterização de fios de alumínio, um caderno de encargos foi produzido.

3.3. CADERNO DE ENCARGOS

O caderno de encargos é uma documentação contendo uma coletânea de orientações e referências que devem ser obedecidas na concepção e execução de um projeto. Geralmente, essas orientações são especificadas por uma empresa contratante, de modo que possa uniformizar condutas dos projetistas. No caso de um projeto de pesquisa, o caderno de encargos é escrito pelo pesquisador conjunto com o projetista.

Um caderno de encargos pode conter descrições e diagramas da metodologia executiva de um projeto, detalhes construtivos, lista de verificação de itens, critérios de medição, requisitos de aceitação do projeto e outras definições.

3.3.1. Contexto e Objetivos

Áreas de atividade envolvidas: Setor elétrico, transmissão de energia, pesquisa e desenvolvimento.

Tipo de produto: Dispositivo de ensaio de Fadiga por *Fretting* em fios de alumínio.

Objetivo geral: Caracterização da resistência em fadiga por *fretting* dos fios de alumínio (ou liga de alumínio) que compõem cabos condutores.

Os objetivos específicos foram:

- Projetar e construir um dispositivo experimental para realização de testes de fadiga sob condições de *fretting* em fios de alumínio. O dispositivo permitirá simular os contatos entre os fios de diferentes camadas (fio cruzados, contato elíptico), mas também entre fios da mesma camada (fios paralelos, contato linear) como mostrado na Figura 3.3.

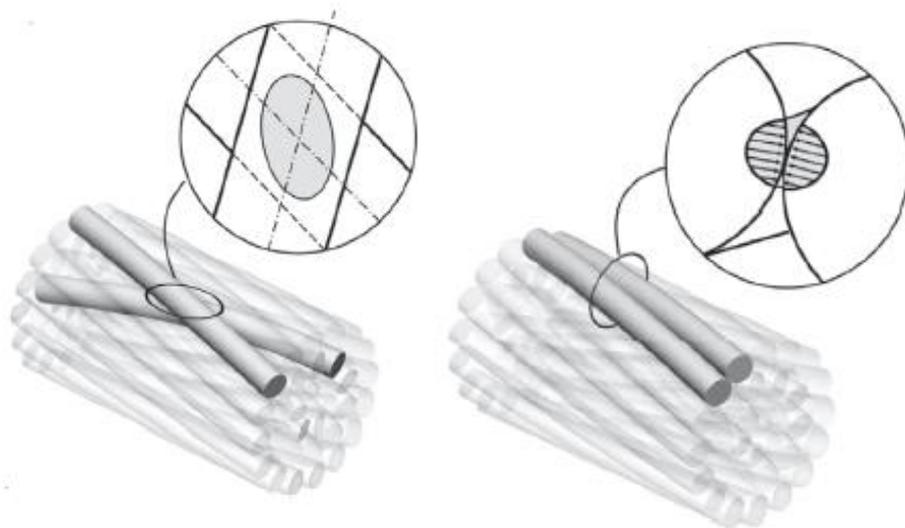


Figura 3.3: Contato elíptico e linear (LALONDE et al., 2017) – modificado.

- Avaliar o dispositivo através de uma série de testes. Segundo esses resultados, serão propostas possíveis alterações a fim de melhorar e aperfeiçoar o dispositivo.

3.3.2. Descrição do produto

O dispositivo experimental foi acoplado a uma máquina de ensaios universal MTS com dois atuadores independentes que foi montada no Laboratório de Ensaios dos

Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB (Figura 3.4). Esta máquina foi customizada a partir do modelo conceito MTS 370,02/318,25s.

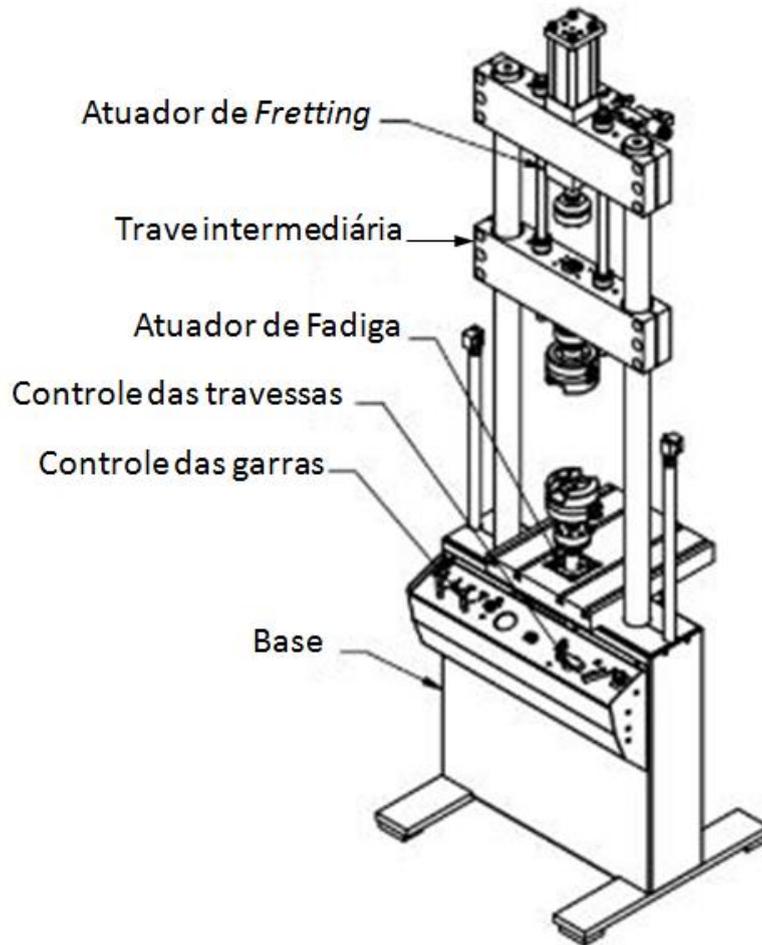


Figura 3.4: Esquema da máquina MTS.

O atuador inferior aplica a carga remota de fadiga $B(t)$ e o superior, a carga cisalhante ou tangencial $Q(t)$ (Figura 3.5). O fato de ter dois atuadores independentes é de grande interesse, pois isso permite aplicar programa de carregamento síncrono ou assíncrono, em fase ou fora de fase e variável como ressaltado no trabalho de Ferry em 2017. Também, a frequência das duas cargas pode ser diferente se necessário. Os dispositivos de fadiga por *fretting* com um único atuador têm as cargas $B(t)$ e $Q(t)$ sincronizadas (MARTINS, 2008), pois a carga cisalhante é gerada pela carga remota de fadiga.

No dispositivo desenvolvido nesta dissertação, um fio (corpo de prova) pode ser submetido a uma carga de fadiga $B(t)$ e outros dois fios (sapatas) podem ser

utilizados para a carga normal de contato P . É possível, caso necessário, utilizar apenas um fio de contato, sendo o segundo fio de contato substituído por um rolamento.

É importante ressaltar que a carga tangencial $Q(t)$ pode ser controlada no ensaio, mas também pode ser produzida na reação da sapata (fio em contato) com a carga remota $B(t)$.

O dispositivo é composto por dois atuadores pneumáticos que permitem que a carga de contato P aplicada seja constante durante toda a realização dos ensaios.

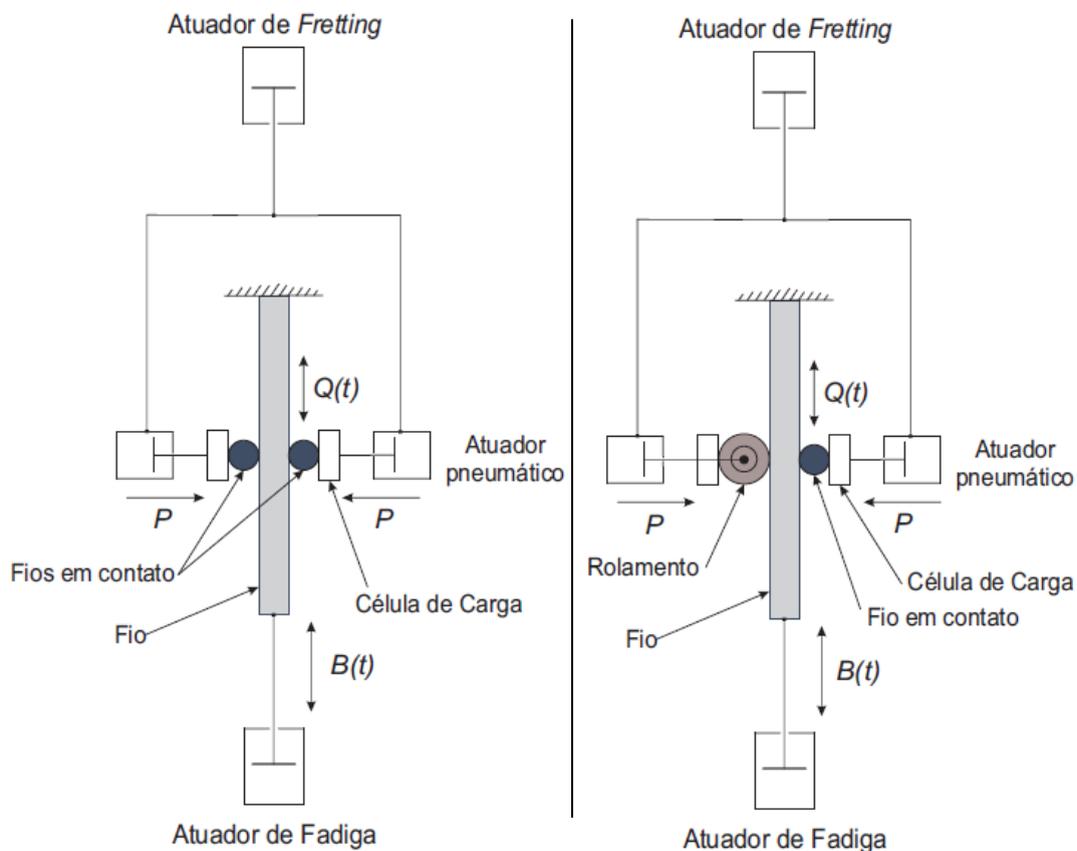


Figura 3.5: Esquema conceitual do dispositivo de ensaio de fios (versão com dois fios em contato ou com rolamento/fio).

3.3.3. Expressão dos requisitos

Todas as funções, requisitos e restrições listadas nesse caderno de encargos devem responder a um nível de prioridade expressado na Tabela 3.1 a seguir.

Tabela 3.1: Expressão funcional das necessidades do projeto.

Nível de prioridade	Definição
A	Diretamente ligado com as necessidades, se não for atingida, o produto não funciona.
B	Precisa ser atingida, mas poderia, por exemplo, ser feita através de outro dispositivo.
C	Útil, mas não a qualquer preço.
D	Aparência prática ou de conforto, não será mantida se ela gerar modificações ou custos importantes.

3.3.3.1. Dimensões do dispositivo

O aparato experimental deve caber dentro do espaço útil da máquina de ensaios MTS respeitando as dimensões indicadas na Figura 3.6. Tal espaço varia em função do curso mínimo e máximo dos dois atuadores (Prioridade de nível A na Tabela 3.1).

A máquina MTS precisa ter mordentes adaptados aos diâmetros de fios utilizados (Prioridade de nível A na Tabela 3.1).

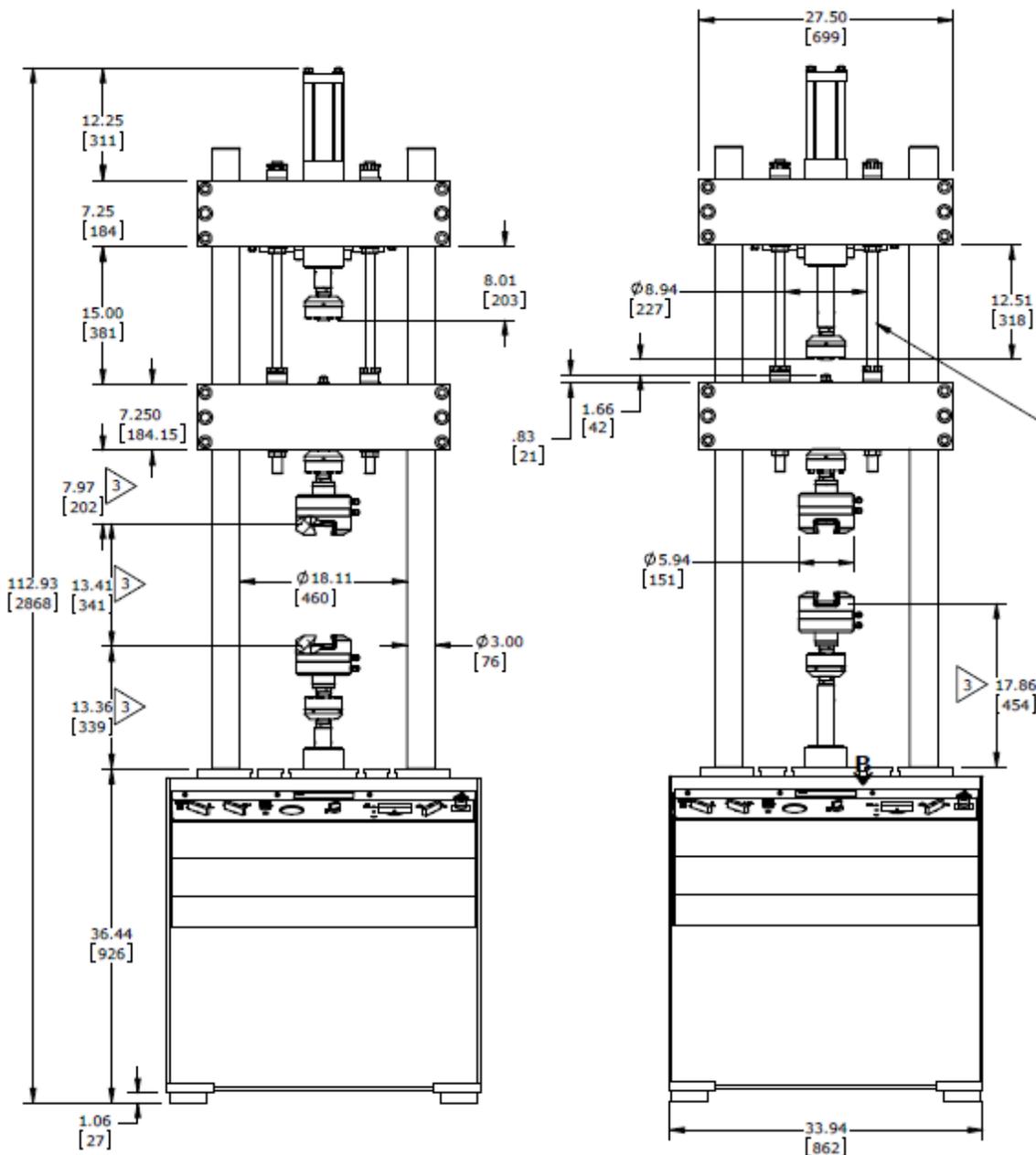


Figura 3.6: Desenho conceptual da máquina de fadiga por *fretting* 25 kN (MTS).

3.3.3.2. Tipos de fios que podem ser ensaiados

Os fios de alguns cabos, tendo em vista suas dimensões, poderiam ser ensaiados sob *fretting* com o dispositivo desenvolvido neste trabalho. Estão listadas a seguir as características destes cabos.

- ORCHID: O cabo ORCHID é um Condutor de Alumínio (CA) encordoado em coroas concêntricas, composto de 37 fios de alumínio 1350.

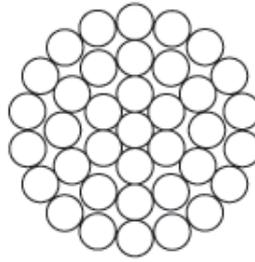


Figura 3.7: Cabo Orchid, 37 fios de Ø3,33 mm (Catálogo Técnico ALUBAR, Condutores Elétricos de Alumínio, 2015).

Tabela 3.2: Dados técnicos do cabo Orchid (Catálogo Técnico ALUBAR, Condutores Elétricos de Alumínio, 2015).

CA - Condutores de Alumínio - De acordo com as Normas NBR7271 / ASTM B231M

Cabo	AWG/MCM	Área	Formação, Número e Diâmetros dos Fios	Diâmetro Nominal do Cabo	Massa Linear	RMC	Resistência Elétrica CC a 20°C	Capacidade de Corrente 75°C
		mm ²	N° x mm	mm	Kg/Km	kN	Ω/km	A
Orchid	636,0	322,24	37 x 3,33	23,31	888,44	50,44	0,0892	859

- IBIS e TERN: Condutor de Alumínio com Alma de Aço (CAA) composto por fios de alumínio 1350/H19 encordoados em coroas concêntricas ao redor de uma alma de aço galvanizado. A resistência elétrica a 20°C é de 0,1434 Ω/km para o cabo IBIS e de 0,0715 Ω/km para o TERN. A capacidade de corrente a 75°C é de 652 A para o IBIS e de 993 A para o TERN (mais dados na Tabela 3.3). O cabo IBIS tem sido uma referencia em diversos trabalhos científicos da Universidade de Brasília (UnB) como para Fadel (2010), Fadel et al. (2012) e Kalombo et al. (2015), por isso os fios do cabo IBIS serão com certeza os primeiros a serem ensaiados com o dispositivo.

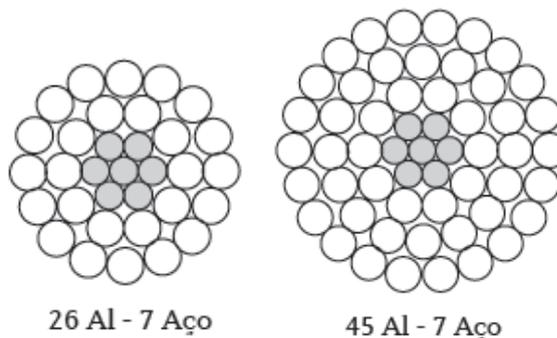


Figura 3.8: Cabos IBIS e TERN (Catálogo Técnico ALUBAR, Condutores Elétricos de Alumínio, 2015).

Tabela 3.3: Dados técnicos dos cabos Ibis e Tern (Catálogo Técnico ALUBAR, Condutores Elétricos de Alumínio, 2015).

CAA - Condutores de Alumínio com Alma de Aço - De acordo com as Normas NBR7270 / ASTM B232M

Cabo	AWG/MCM	Área			Formação, Número e Diâmetros dos Fios		D	Massa			% AL	% Aço	RMC	
		AL	Aço	Total	AL	Aço		AL	Aço	Total			Classe 1	Classe 2
		mm ²	mm ²	mm ²	N° x mm	N° x mm		mm	Kg/km	Kg/km			Kg/km	kN
Ibis	397,5	201,34	32,73	234,07	26 x 3,14	7 x 2,44	19,88	558,29	255,20	813,49	68,63	31,37	72,43	70,23
Tern	795,0	403,77	27,83	431,60	45 x 3,38	7 x 2,25	27,03	1118,74	217,34	1336,08	83,73	16,27	98,20	96,33

- CAL 900 e CAL 1055 (Condutores de Alumínio Liga): Compostos por fios de alumínio liga 6201-T81 encordoados em coroas concêntricas.

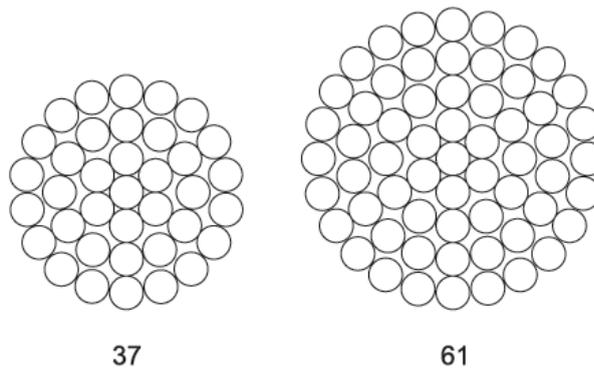


Figura 3.9: Cabos CAL 900 e CAL 1055 (Catálogo Técnico ALUBAR, Condutores Elétricos de Alumínio, 2015).

Tabela 3.4: Dados técnicos dos cabos CAL 900 e CAL 1055 (Catálogos Técnicos ALUBAR e NEXANS, Condutores Elétricos de Alumínio, 2015).

CAL - Condutores de Alumínio Liga - De acordo a Norma ASTM B399M (Nexans)

Cabo	Área	Formação, Número e Diâmetros dos Fios	Diâmetro Nominal do Cabo	Massa Linear	RMC	Resistência Elétrica CC a 20°C	Capacidade de Corrente 75°C
	mm ²	N° x mm	mm	Kg/Km	kN	Ω/km	A
900	456,26	37 x 3,962	27,74	1251,90	131,46	0,0734	1000
1055	534,46	61 x 3,34	30,06	1461	152,48		

- CAL 876 MCM (Condutor de Alumínio Liga): Compostos por fios ($\varnothing 3,79$ mm) de alumínio liga 1120 encordados em coroas concêntricas.

Resumindo, os diâmetros de fios que podem ser utilizados com o dispositivo variam de 3,14 mm mínimo a 3,962 mm máximo (Tabela 3.5).

Tabela 3.5: Lista dos fios que podem ser ensaiados no dispositivo de fadiga por *fretting*.

Fios que podem ser ensaiados no dispositivo de fadiga por <i>fretting</i>			
Fio	Material	Diâmetro [mm]	Referência
ORCHID	Alumínio 1350	3,33	Alubar
IBIS	Alumínio 1350/H19	3,14	Alubar
TERN	Alumínio 1350/H19	3,38	Alubar
CAL 900	Liga de Alumínio 6201	3,962	Nexans
CAL 1055	Liga de Alumínio 6201	3,34	Nexans
CAL 876	Liga de Alumínio 1120	3,79	Nexans

3.3.3.3. Ângulos de cruzamento utilizáveis

Como mostrado anteriormente, os cabos condutores têm os seus fios de alumínio enrolados de forma helicoidal em diversas camadas. O dispositivo pode simular este ângulo de torção e permitir o ensaio de ângulos distintos. Esses ângulos não são definidos pelos fabricantes, mas são resultantes do passo de encordoamento do fio durante a fabricação do cabo. Sendo assim, foi definida uma serie de ângulos possíveis para ensaios com o dispositivo, quais sejam: 0° , 13° , 16° , 20° , 29° e 90° em relação ao eixo do corpo de prova (fio vertical).

O ângulo de 0° simularia contato entre fios da mesma camada (contato linear). Essa configuração de ensaio não tem previsão de estudos imediata por isso foi classificada como nível de prioridade D (Tabela 3.1).

O posicionamento perpendicular (ângulo de 90°) não corresponde a nenhum tipo de contato de um cabo condutor, porém é de grande interesse em termo de fadiga por

fretting. Dessa forma foi possível comparar os resultados com os trabalhos de Cruzado et al. (2010), Wang et al. (2013) ou Zhang et al. (2013) que optaram por cruzamento perpendicular (Prioridade de nível A na Tabela 3.1).

Os ângulos de cruzamento 13° , 16° e 29° servem para os fios IBIS (Nexans). O ângulo de 16° corresponde à camada externa em relação ao eixo do cabo e o de 13° à camada interna. O cruzamento do fio da camada externa com o fio da camada interna é de aproximadamente 29° .

Por fim, os ângulos de 20° e também 29° foram pré-definidos para uma melhor aproximação dos ângulos de torção dos outros tipos de cabos (ORCHID, TERN e CAL) que têm combinações de encordoamento semelhantes.

3.3.3.4. Valores a serem atingidos pelo dispositivo

- Carga de fadiga $B(t)$: 1 a 5 kN.
- Frequência de oscilação de fadiga f entre 10 e 30 Hz.
- Carga de cisalhante (*fretting*) $Q(t)$: 1 a 5 kN.
- Frequência de oscilação de *fretting* f entre 10 e 30 Hz.
- Carga normal P : 100 N até 2810 N máximo. Valores determinados a partir das marcas deixadas em cabos IBIS que sofrem compressão transversal pelo processo de aperto do grampo de suspensão com um torque de 50 N.m (FADEL et al. 2012) e pelo Método dos Elementos Finitos (NUNES FILHO, 2016).

Todos os valores indicados acima são de nível A (Tabela 3.1).

A compressão dos fios é fundamental para o sucesso do ensaio. Sem contato entre os fios através da carga normal P não haverá carregamento tangencial sobre eles. É de extrema complexidade estimar analiticamente a intensidade da carga P resultante do aperto do grampo de suspensão. Com o objetivo de verificar para qual força a marca deixada nos fios ensaiados se aproxima mais das marcas desejadas, um ensaio de compressão (aplicação de carga normal) foi realizado com forças de 500, 1000, 2000 e 2400 N (Figura 3.10) com fios de cabo IBIS. Em 2016, Nunes Filho estimou a carga de aperto máxima sofrido pelo fio do mesmo cabo usando o Método dos Elementos Finitos. O valor de 2810 N foi então determinado e

escolhido como a carga máxima a ser considerada para a concepção do dispositivo. Mais recentemente, um trabalho foi realizado com fios de cabo CAL 900 (ROCHA, 2019). Nessa metodologia que combinou trabalho numérico e experimental, chegou-se na conclusão que a carga de aperto variava entre 100 e 1280 N. Em adição, observou-se o regime de escorregamento parcial nas marcas de contato com uma carga em torno de 500 N. Além de 990 N tem-se regime de adesão total e abaixo de 400 N notou-se regime de escorregamento total.

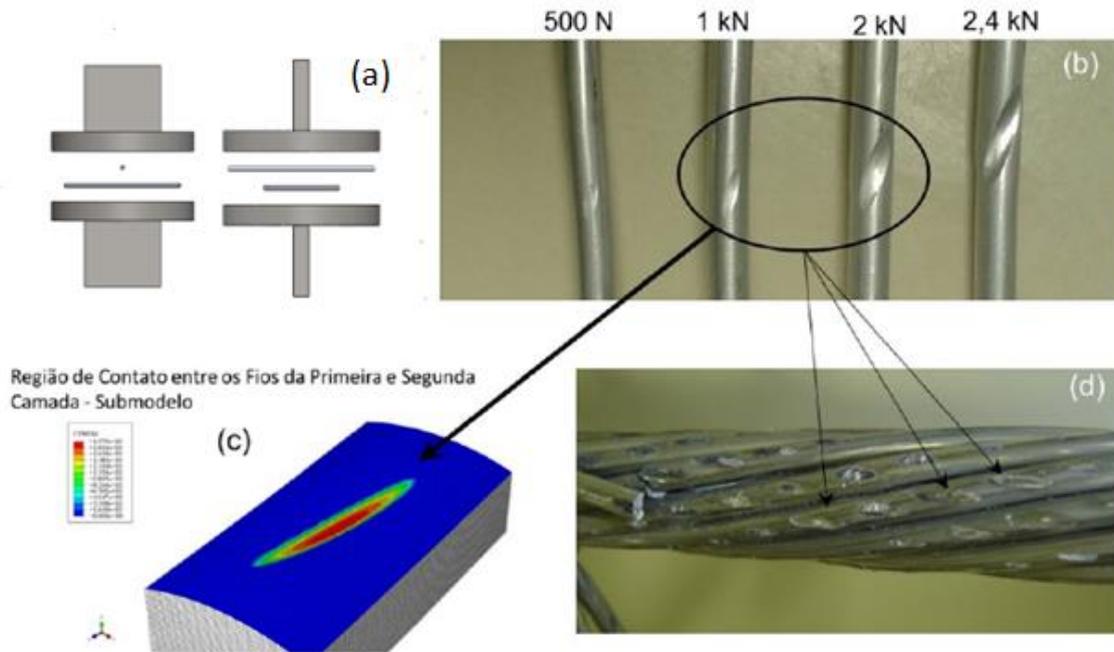


Figura 3.10: Comparação entre as marcas de contato geradas por ensaio mecânico (a e b) com as obtidas numericamente (c) e as resultante do processo de montagem cabo-grampo em uma LT (d).

Cada carga pode ser medida. As cargas de fadiga e de *fretting* são induzidas pelos atuadores hidráulicos da máquina MTS. Isso garante controle das ditas cargas em força ou em deslocamento.

No caso do controle da carga P , o dispositivo inclui uma medição e um sistema que permite manter a carga normal constante durante o ensaio. Em 2008, Martins projetou um aparato de ensaios de fadiga por *fretting* com corpos de prova plano (tipo “osso de cachorro”) utilizando sapatas cilíndricas para o contato (Figura 3.11).

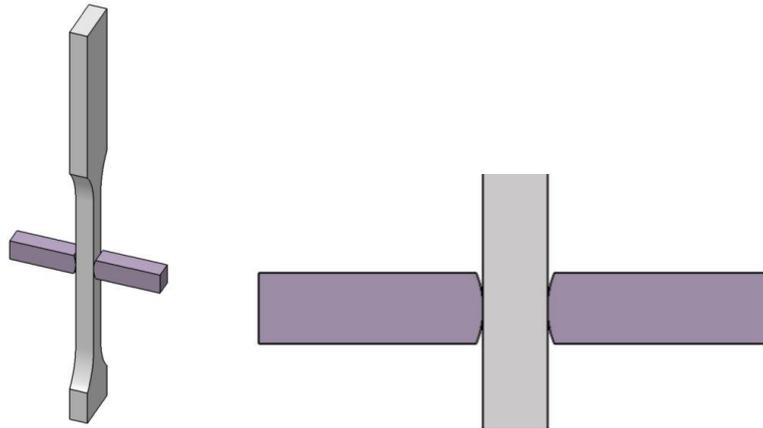


Figura 3.11: Corpo de prova plano em contato com sapatas cilíndricas.

Observou-se que com alto número de ciclos o desgaste gera perda de material na zona de contato e as sapatas tendem a se deslocar em direção ao corpo de prova o que provoca perda de carga no circuito hidráulico. O mesmo fenômeno aconteceria provavelmente com fios. Por isso existe no dispositivo uma forma de compensar essa perda de carga.

Como mostrado acima na Figura 3.5, uma célula de carga foi intercalada entre o fio em contato e o atuador que aplica a carga normal. O sinal emitido pela célula de carga pode ser utilizado para monitorar e controlar a força existente no conjunto de fios. As pequenas variações de força percebida pela célula de carga são enviadas para controladores que respondem conforme a necessidade, como ressaltado de forma esquemática na Figura 3.12 (Prioridade de nível A na Tabela 3.1).

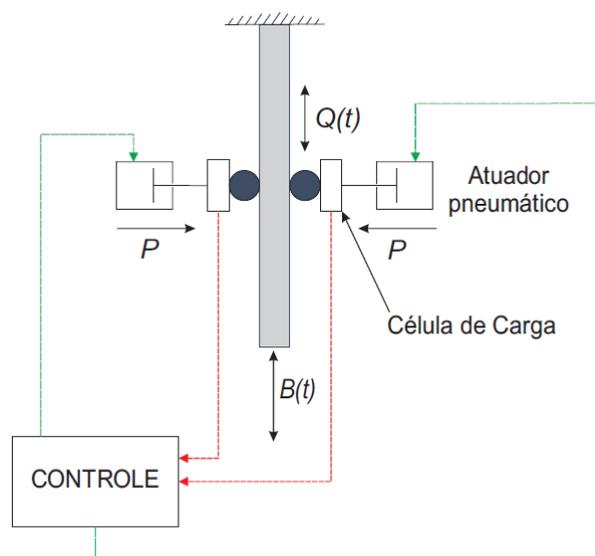


Figura 3.12: Esquema do controle das cargas P através da resposta das células de cargas.

3.3.4. Expressão de restrições

Para a escolha dos atuadores que aplicam a carga normal P é necessário comparar duas opções: hidráulica ou pneumática. Devido à necessidade de ter um controle da carga normal P e aos valores relativamente baixos dessa carga, um atuador pneumático pareceu ser a opção mais realista. Mesmo assim, não se pode descartar a opção hidráulica.

No caso de uma solução pneumática é fundamental ter uma rede em ar comprimido de fácil acesso no laboratório onde foi instalado o conjunto máquina MTS é o dispositivo. Tal rede deve garantir uma pressão em ar entre 6 e 8 bar para alimentar corretamente os atuadores escolhidos.

Para a solução hidráulica, uma simples bomba manual seria amplamente suficiente como descritos nos trabalhos de Martins em 2008 ou de Ferry em 2017. Para controlar a carga P , o circuito hidráulico tem acumuladores de pressão que compensam a perda de carga devido ao leve deslocamento das sapatas (MARTINS, 2008).

A célula de carga que mede a carga normal P deve resistir a uma carga máxima de 3 kN (674,43 lbf). Esse valor foi definido tendo em conta a carga nominal máxima a ser usada durante os ensaios (2,81 kN) agregando 10% de segurança. Dessa forma a célula de carga sempre será usada dentro de seus limites funcionais. Funciona em modo de compressão. Uma precisão entre 0,05 % e 0,1% da capacidade nominal atende perfeitamente os resultados da pesquisa (Prioridade de nível A).

3.4. APRESENTAÇÃO DA MÁQUINA E DO DISPOSITIVO

Nesse parágrafo são descritas as propostas técnicas em resposta ao caderno de encargos detalhado acima. Essa metodologia levou à concepção final do conjunto máquina servo hidráulica e dispositivo de fadiga por *fretting*.

3.4.1. Descrição da Máquina MTS

Como especificado no caderno de encargos a máquina de ensaio foi customizada com base no modelo MTS 370,02/318,25s (Figura 3.13).



Figura 3.13: Máquina de Ensaio Universal uniaxial MTS 370,02/318,25s (MTS, 2015).

As modificações técnicas foram as seguintes:

- Introdução de uma trave móvel extra que deve ficar acima da trave móvel padrão (já existente). Essa trave extra destina-se a acomodar mais um atuador com capacidade de 15 kN (Atuador de *Fretting*) e uma célula de carga. Esse subsistema é utilizado para a aplicação e controle da carga de cisalhamento $Q(t)$ e para a sustentação do dispositivo responsável pela aplicação da carga P ;
- Instalação no interior da mesa de um sistema de atuação e controle com capacidade de carga de 25 kN (Atuador de Fadiga), destinada a aplicação e controle da carga remota $B(t)$;
- O controlador deve ter disponibilidade de acesso a, pelo menos, quatro canais de monitoração (sendo dois deles destinados também ao controle da carga Q e da carga B);
- Instalação na trave intermediária de uma garra e de uma célula de carga extra com capacidade de 25 kN. Essa célula de carga extra permite a estimativa precisa da carga de *fretting* Q atuante sobre o fio;
- Instalação de duas colunas de ligação entre a trave superior e a intermediária;

- Furação da trave intermediária para a fixação das guias de apoio do dispositivo. O desenho técnico (Figura 3.14) foi mandado para MTS com o objetivo de receber à máquina pronta para receber o dispositivo.

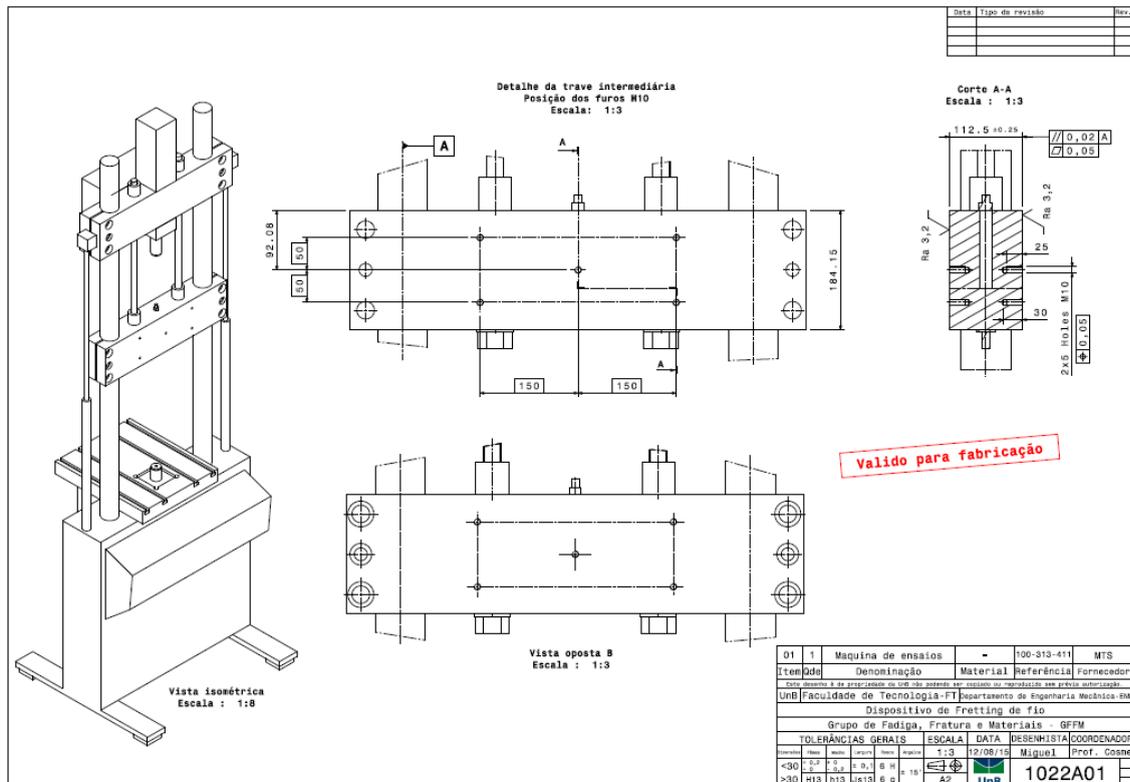


Figura 3.14: Desenho técnico da trave intermediária.

Após essas modificações, a máquina customizada teve os seguintes componentes e aspectos listados na Figura 3.15 e Tabela 3.6). Em destaque, tem-se o item 5, que é o atuador responsável por carregar e movimentar o dispositivo projetado.

Merece destaque também o item 7 que são as garras hidráulicas que fixarão o fio vertical. Tais garras são equipadas de mordentes adaptados a corpos de prova cilindros.

Os mordentes das garras são perfeitamente adaptados aos fios a serem ensaiados (Tabela 3.5) com o dispositivo, podendo segurar corpos de prova com diâmetros entre 3 e 9,4 mm.

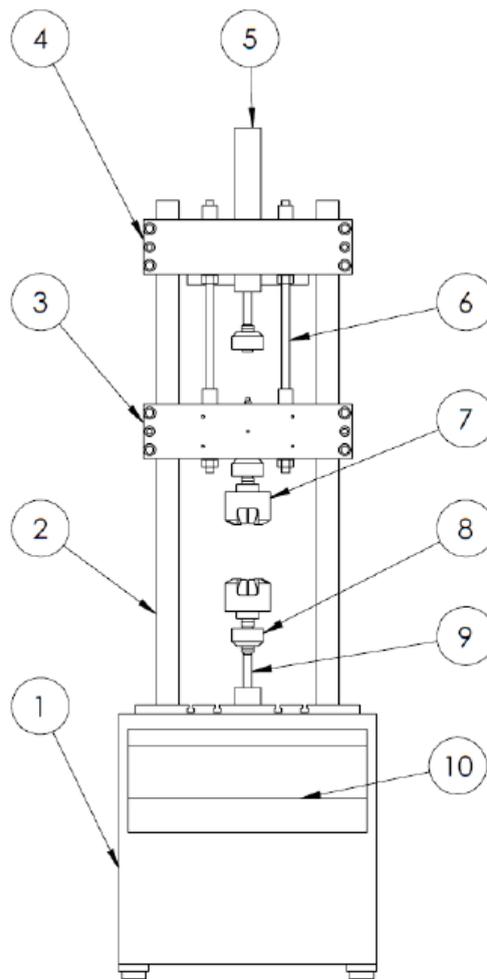


Figura 3.15: Máquina MTS customizada.

Tabela 3.6: Componentes da Figura 3.15.

Numeração	Nome
1	Carcaça da máquina
2	Coluna de sustentação
3	Trave intermediária
4	Trave superior
5	Atuador superior
6	Coluna de sustentação das travessas
7	Garras hidráulicas
8	Célula de carga
9	Haste do atuador inferior
10	Painel de controle

3.4.2. Descrição do Dispositivo

O aparelho foi inspirado em um projeto presente nos trabalhos de Hills *and* Nowell (1994) e no trabalho mais recente de Ferry em 2017 (Figura 3.16) que realizou ensaios de fadiga por *fretting* com uma máquina servo hidráulica de dois atuadores na Universidade de Brasília (UnB).

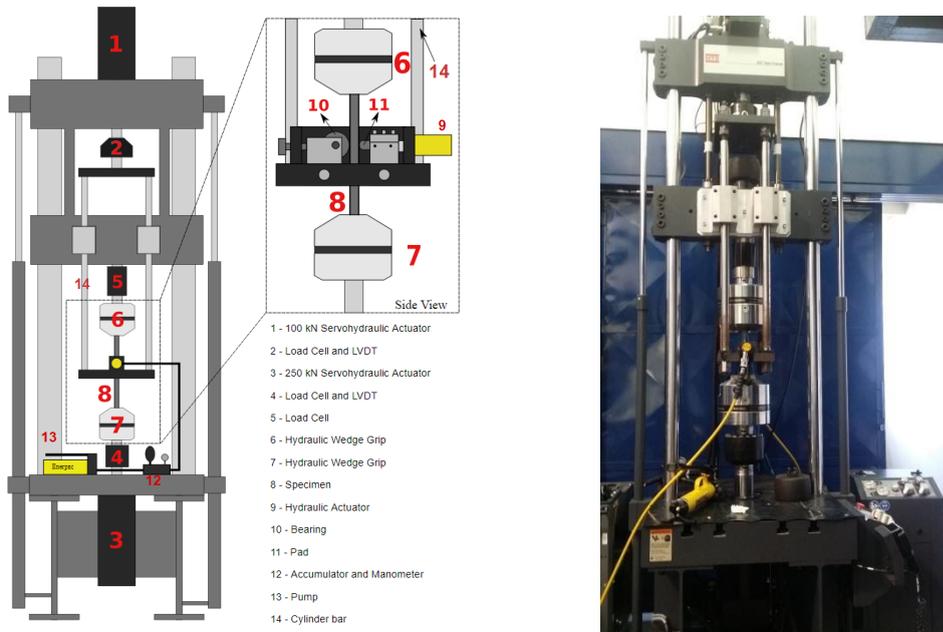


Figura 3.16: Esquema e foto do dispositivo de fadiga por *fretting* da UnB (FERRY, 2017).

A concepção mecânica consistiu em adaptar o *design* do aparelho da UnB a ensaios de fadiga por *fretting* em fios de alumínio.

3.4.2.1. Dimensões do dispositivo (proposta técnica)

Como descrito no caderno de encargos, o aparelho se encaixa perfeitamente dentro do espaço útil da Máquina MTS apresentada no parágrafo anterior. A parte do dispositivo que aplica a carga normal P permanece entre as duas garras MTS, item 7 da Figura 3.15. Tal parte deve se deslocar verticalmente com a ação do atuador superior (item 5 da Figura 3.15). Para fixar o aparelho ao atuador, uma placa com quatro colunas foi parafusada no pistão do atuador. Dessa forma o dispositivo completo é fixado ao atuador da máquina MTS. A Figura 3.17 a seguir ilustra o dispositivo de fadiga por *fretting* isolado (Itens listados na Tabela 3.7). O dispositivo acoplado à máquina MTS é mostrado na Figura 3.18.

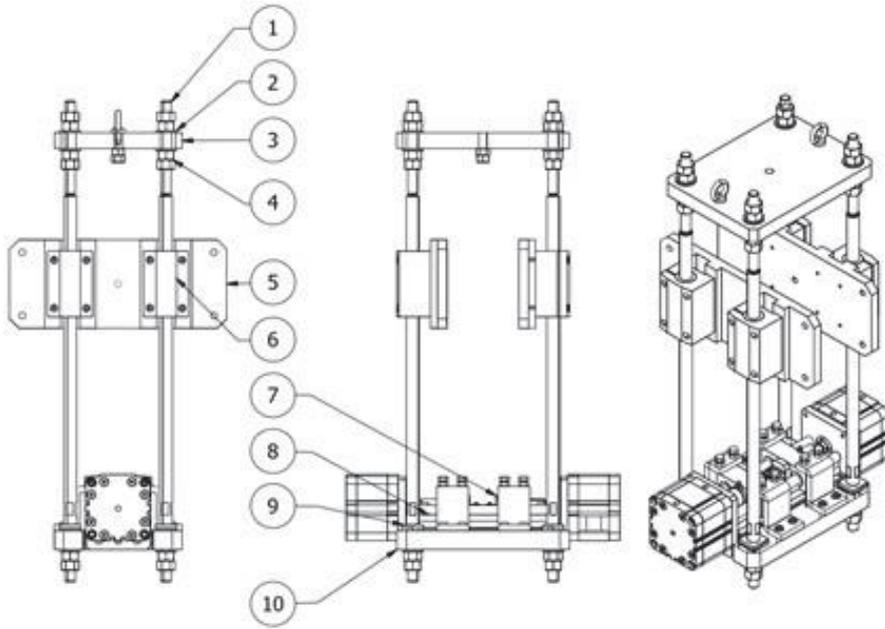


Figura 3.17: Desenhos ilustrativos do dispositivo de fadiga por *fretting*.

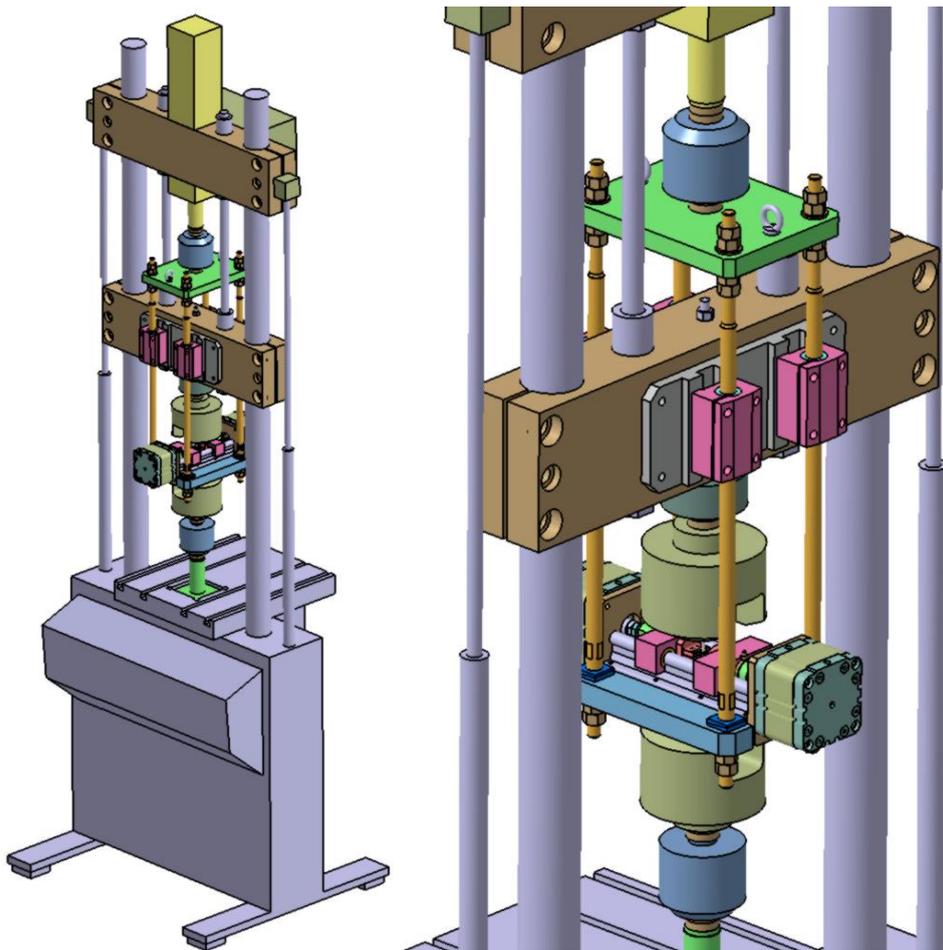


Figura 3.18: Dispositivo acoplado à máquina MTS.

Tabela 3.7: Componentes do dispositivo de fadiga por *fretting* (Figura 3.17).

Numeração	Nome	Material
1	Coluna do dispositivo	Aço temperado
2	Arruela M16	Aço
3	Placa superior	SAE 1020
4	Porca H M16	Aço
5	Suporte intermediário	Alumínio
6	Suporte guia colunas	Alumínio
7	Mesa deslizante	SAE 1045
8	Guias das mesas deslizantes	Aço
9	Arruela-cunha	SAE 1020
10	Placa inferior	SAE 1020

3.4.2.2. Tipos de fios que podem ser ensaiados (proposta técnica)

Como listado na Tabela 3.5 do caderno de encargos, o aparato deve se adaptar aos diferentes fios a serem ensaiados. Para o fio que serve como corpo de prova, foi mostrado anteriormente que a máquina MTS atende essa exigência. Para os fios em contato, ou sapatas, foi necessário projetar um suporte de fio que permitisse prender os diferentes diâmetros de fios. Foi imaginada uma peça semiaberta com um furo que abriga o fio e parafusos para apertar este fio (Figura 3.19).

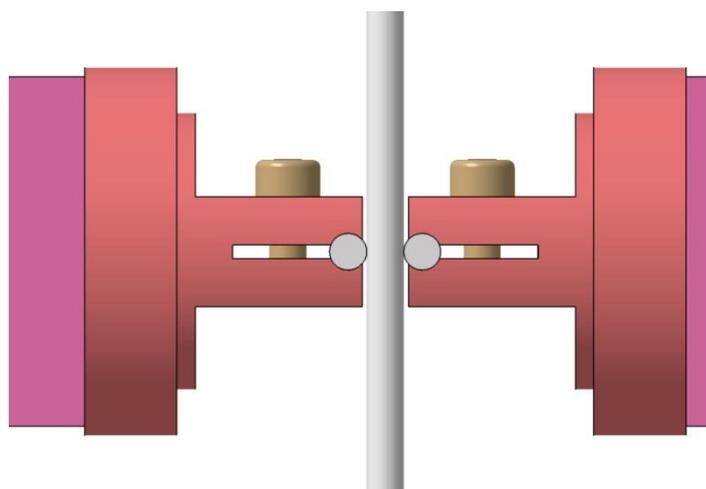


Figura 3.19: Esquema da proposta para fixação dos fios de contato (sapatas).

Espera-se que o fio de contato possa penetrar no fio vertical aproximadamente 1 mm, no caso de um fio de cabo Ibis isso representa quase 33% do diâmetro do fio.

Devido aos diferentes diâmetros de fios (Tabela 3.5), não foi possível fabricar uma peça única que consiga prender todos os tipos fios. Em função disso, decidiu-se realizar um par de suportes para os fios Ibis ($\varnothing 3,14$ mm) e outro par de suportes para os fios CAL 900 ($\varnothing 3,962$ mm). Estes dois fios foram priorizados por serem já programados em futuros trabalhos com o dispositivo. Futuramente, um terceiro par de peças poderá ser fabricado que poderá prender os outros fios restantes que são de diâmetros próximos.

3.4.2.3. Ângulos de cruzamento utilizáveis (proposta técnica)

O caderno de encargos fornece uma lista dos ângulos de cruzamento que os fios em contato deveriam formar com o fio vertical (corpo de prova), ou seja, 0° , 13° , 16° , 20° , 29° e 90° . Para atender tal requisito duas propostas foram analisadas:

- Um sistema de regulagem do ângulo entre 0° e 90° do suporte de fio de contato. Basta girar o suporte até o ângulo desejado e fixa-lo com um parafuso.
- Utilização de um pino de centragem e de furos posicionados nos ângulos fixados pelo caderno de encargos.

A primeira solução tem como vantagem que cada ângulo entre 0° e 90° poderá ser regulado apesar de isso não ser uma exigência do caderno de encargos. O problema dessa proposta é como garantir que durante o ensaio as cargas aplicadas no fio vertical não alterem a regulagem do ângulo. Além disso, o sistema ocuparia muito espaço e será de difícil acesso após o acoplamento do dispositivo na máquina MTS.

A segunda proposta é bem mais simples e viável e atende perfeitamente o requisito do caderno de encargos. Sendo uma função de nível de prioridade D (Tabela 3.1), a opção com ângulo de 0° foi descartada para facilitar a fabricação do suporte apresentado na Figura 3.20. No futuro, essa opção poderá ser atendida de forma simples fabricando um par de suportes de fio com o pino deslocado de 90° .

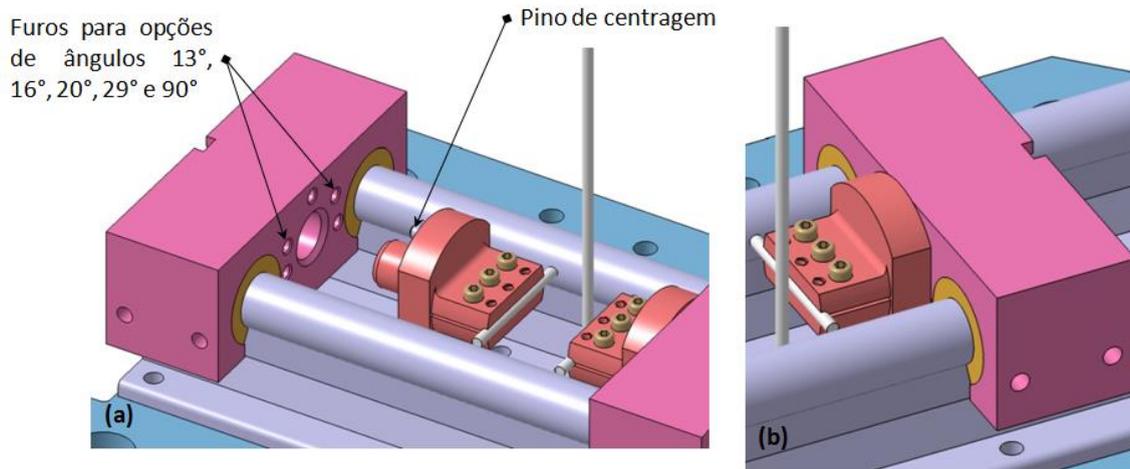
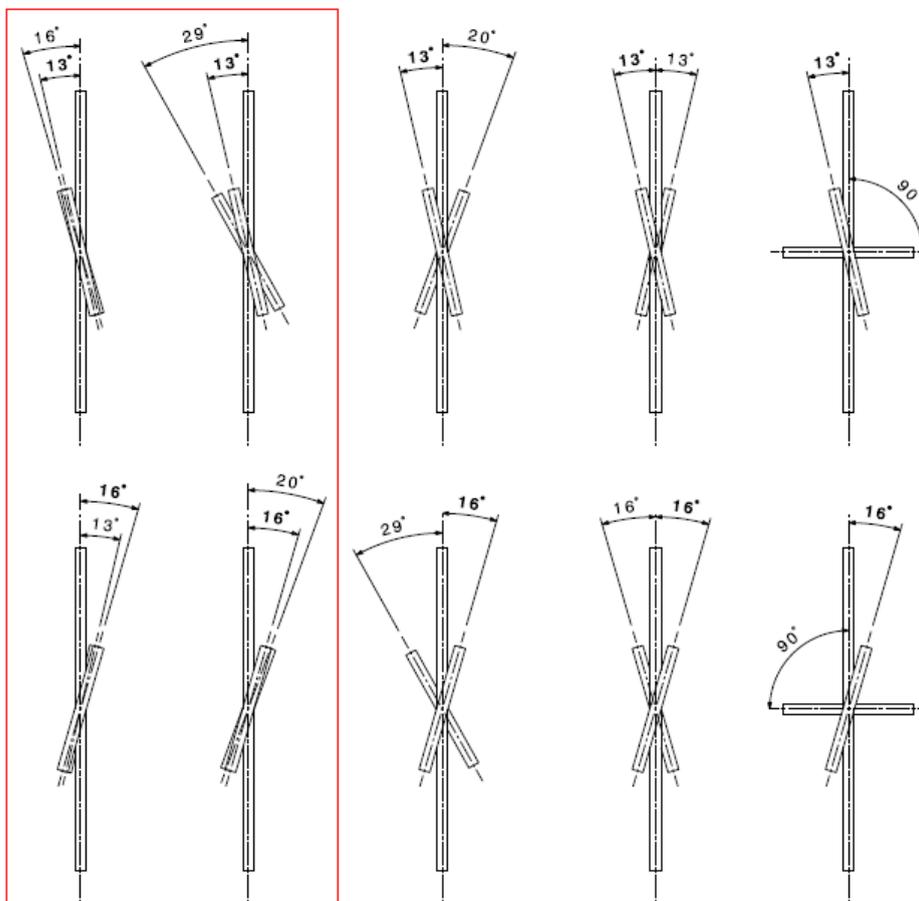


Figura 3.20: (a) Detalhe da proposta de concepção do suporte de fio, (b) suporte de fio em posição 90°.

Com essa concepção as opções de montagem de fios são diversas como mostrado na Figura 3.21 onde o fio vertical é o CP. Podem-se simular os contatos da camada externa de um cabo condutor (primeira sapata) com a primeira camada interna (CP) e a segunda camada interna (segunda sapata). Tal configuração corresponde às opções destacadas em vermelho.



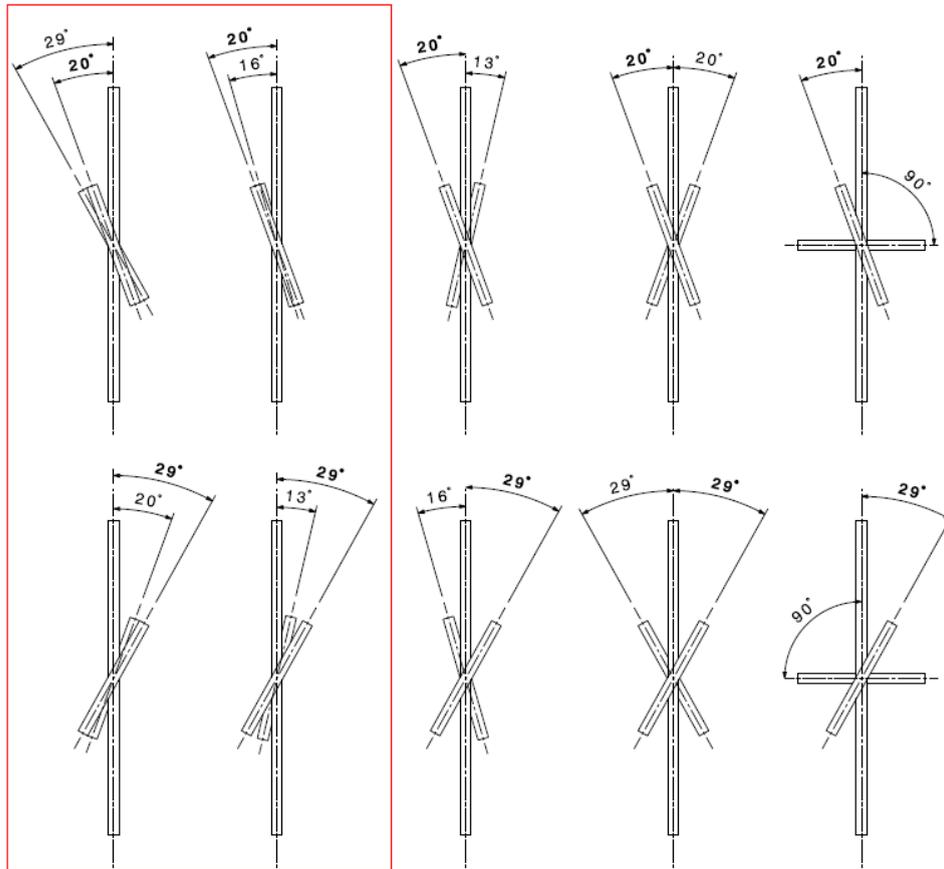


Figura 3.21: Lista das opções possíveis de montagem dos fios na configuração CP com duas sapatas.

3.4.2.4. Valores a serem atingidos pelo dispositivo (proposta técnica)

Como foi ressaltado na descrição da máquina MTS, as cargas de fadiga e cisalhantes serão aplicadas pelos próprios atuadores, os valores desejados no caderno de encargos são plenamente garantidos, pois os atuadores MTS têm capacidades de 25 kN e 15 kN. Da mesma forma, a frequência das cargas $B(t)$ e $Q(t)$ são garantidas já que os dois atuadores funcionam até 100 Hz.

Para aplicar a carga normal P , independentemente da opção hidráulica ou pneumática, faz-se necessário encontrar um modo de movimentar horizontalmente o conjunto fio (sapata) e suporte de fio de forma precisa e com o mínimo de folga mecânica. Para isso, inspirou-se das mesas deslizantes usadas em aplicações industriais onde estreitas tolerâncias são necessárias. Tais mesas deslizam através de rolamentos lineares sobre eixos ou trilhos de alta precisão (Figura 3.22).

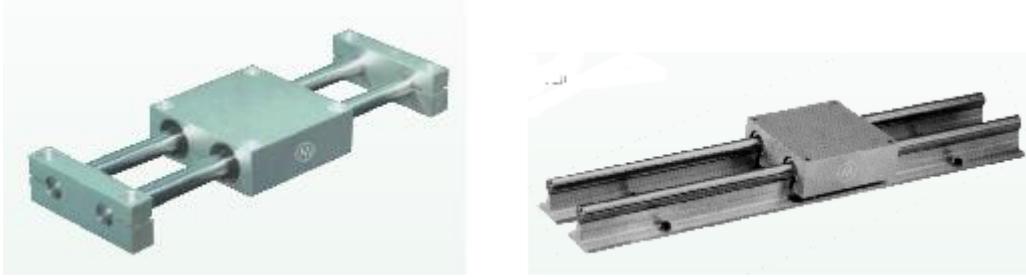


Figura 3.22: Mesas deslizantes com eixos e trilhos (MITAY).

A mesa deslizante é o apoio do suporte de fio (sapata) definido anteriormente, sendo empurrada pelo atuador para aplicar a carga normal P . Já que o dispositivo tem uma placa que suporta todo o sistema de *fretting*, a solução da mesa deslizante com trilhos (Figura 3.23) destacou-se como uma opção mais simples de incluir no aparato.

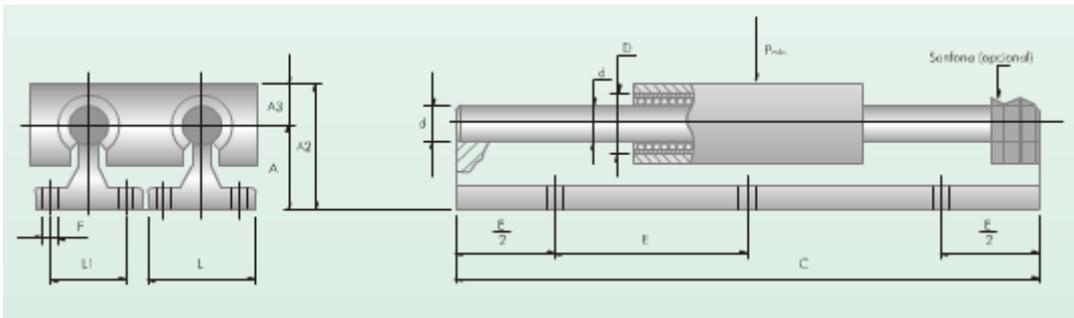


Figura 3.23: Mesa deslizante com trilhos MDT (MITAY).

As mesas deslizantes com trilhos usam rolamentos lineares abertos (Figura 3.24). Esse tipo de rolamento tem uma leve folga radial que poderia prejudicar os ensaios. Os rolamentos foram substituídos por buchas de bronze com as mesmas dimensões.

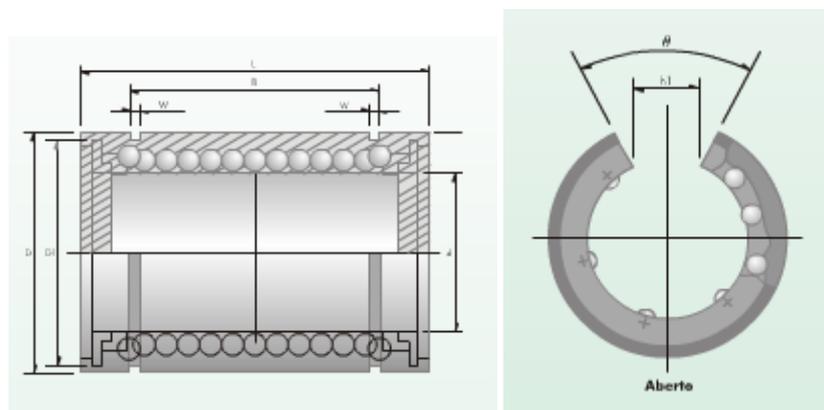


Figura 3.24: Rolamento linear aberto (MITAY).

Sendo assim, o dispositivo terá dois trilhos e duas mesas deslizantes nas quais são fixados os suportes de fios para contato (Figura 3.25). Para garantir o mínimo de folga usam-se buchas de bronze com ajustes de alta precisão como detalhado na Figura 3.26.

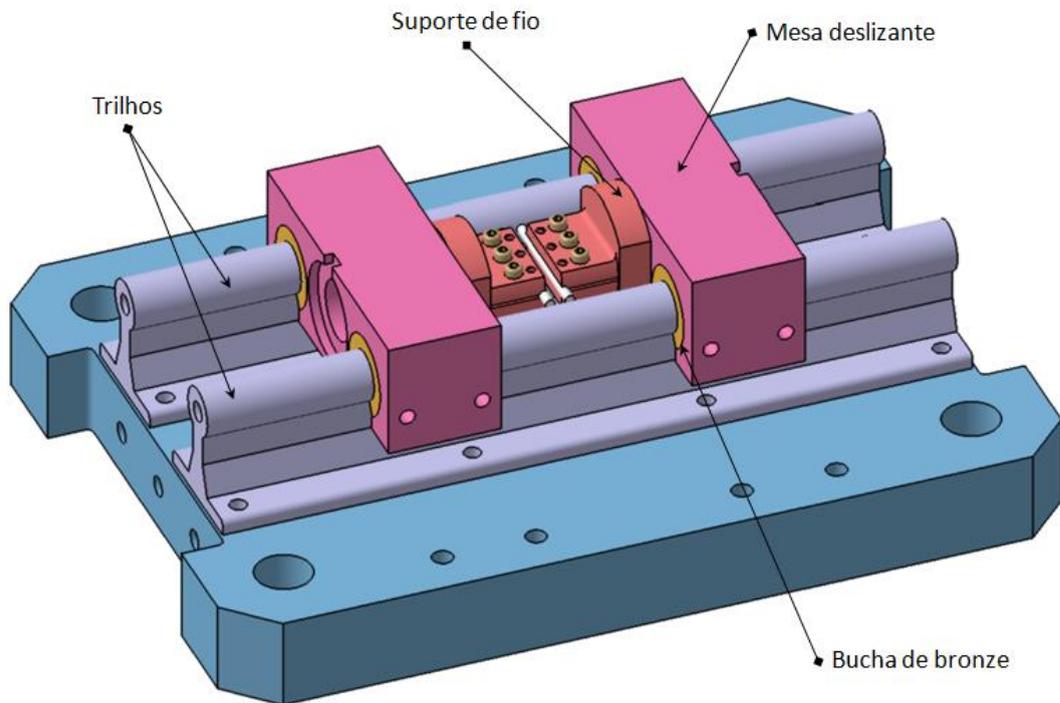


Figura 3.25: Sistema de movimentação dos suportes de fios.

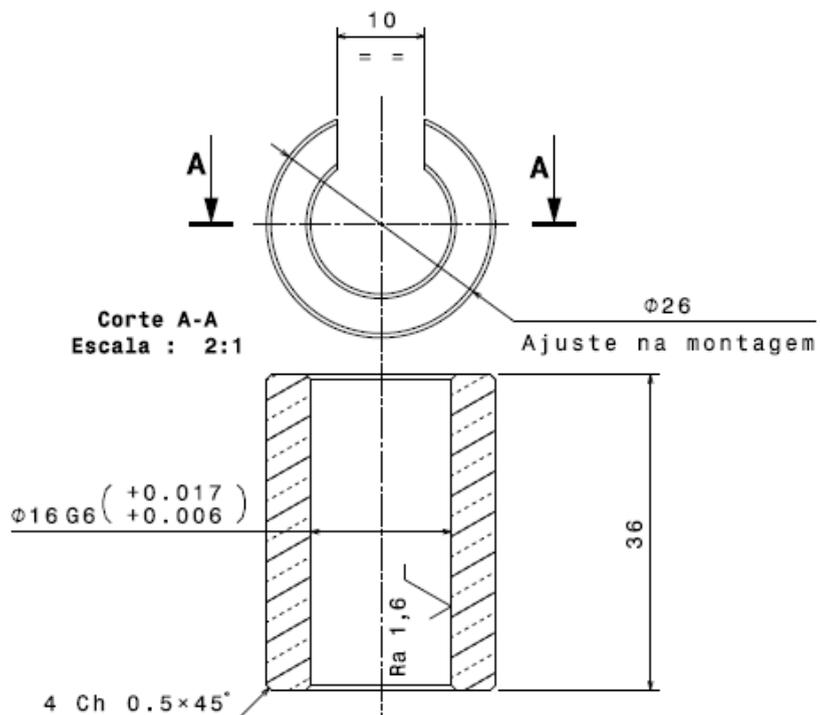


Figura 3.26: Desenho técnico para fabricação das buchas de bronze.

3.4.2.5. Atuador para carga normal P

A força de compressão sobre os fios pode ser conseguida tanto por atuadores pneumáticos ou hidráulicos. Nos trabalhos de Martins (2008) e Ferry (2017), usam-se atuadores hidráulicos para aplicar a carga normal P . Nesses casos a carga P é bem maior. A carga máxima do atuador escolhido por Martins atinge 50 kN. Tal valor não pode ser atendido por um atuador pneumático. Devido ao valor P especificado no caderno de encargos, tornou-se viável considerar a solução pneumática.

O uso de um acumulador para manter a carga P constante durante o ensaio mostrou-se complexo na preparação dos ensaios de Martins e Ferry, pois era necessário trocar o acumulador em função da carga P escolhida (P muda em função do raio e do material da sapata). Tal troca implicava em purgar o circuito hidráulico do dispositivo, tirar os conectores e refazer as vedações antes de conectá-los.

Atuador pneumático atende a demanda de força e tem um custo inferior relativo ao atuador hidráulico. Outro ponto é que atuadores pneumáticos existem em versões bem mais compactas e devido ao espaço útil da máquina MTS (Figura 3.6) seria uma vantagem em termo de conforto de uso do dispositivo.

Por fim, a versão pneumática é mais adequada para o uso de um sistema de controle da carga P por intermédio da resposta da célula de carga acoplada.

Com a solução pneumática escolhida, duas concepções do dispositivo foram definidas em paralelo. A primeira com os dois atuadores opostos funcionando em avanço para gerar a carga de contato P . Essa versão permite usar atuadores de pequenos cursos (25 mm máximo) e precisa de duas células de carga para medir as forças de contato (Figura 3.27). Também o fato de ter os atuadores montados opostos garante um melhor alinhamento do conjunto.

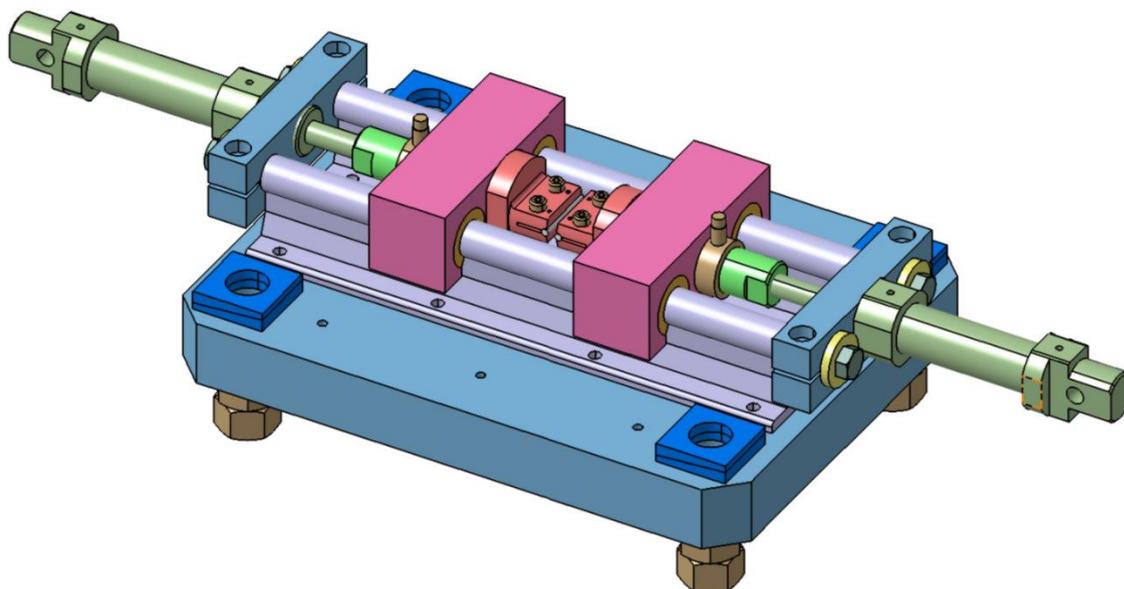


Figura 3.27: Versão do dispositivo com atuadores pneumáticos opostos funcionando em avanço.

A segunda versão usa dois atuadores em paralelo funcionando em retorno. Com tal concepção é necessário apenas uma célula de carga. Os atuadores têm curso bem maior (100 mm), mas precisam da metade da carga, comparado com a primeira versão (Figura 3.28).

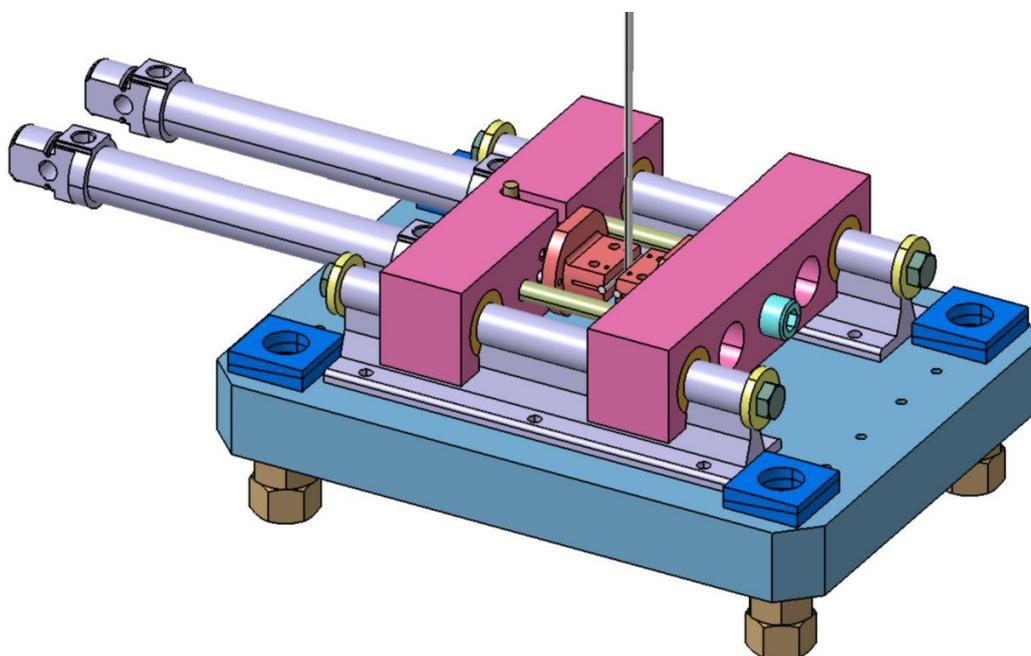


Figura 3.28: Versão do dispositivo com atuadores pneumáticos paralelos funcionando em retorno.

Para a primeira solução o atuador precisa ter uma carga de pelo menos 2800 N com uma pressão de ar comprimido entre 6 e 7 bar. Agora para a segunda concepção, dois atuadores de 1400 N serão suficientes. Como nesse caso os atuadores ficarão lado a lado o tamanho do corpo vai ser determinante. Fabricantes de atuadores pneumáticos usam as mesmas normas para dimensionar seus produtos, ou seja, as dimensões do corpo dos atuadores não vão mudar de forma significativa segundo as marcas (Festo, Parker, MetalWork, etc.). Para a solução de atuadores funcionando em retorno seria necessário um atuador com eixo de $\text{Ø}63$ mm. Selecionando um modelo Festo de referencia CDC-63-100 (curso de 100 mm) com capacidade de carga em retorno de 1750 N as dimensões do corpo descartam definitivamente essa solução (Figura 3.29).

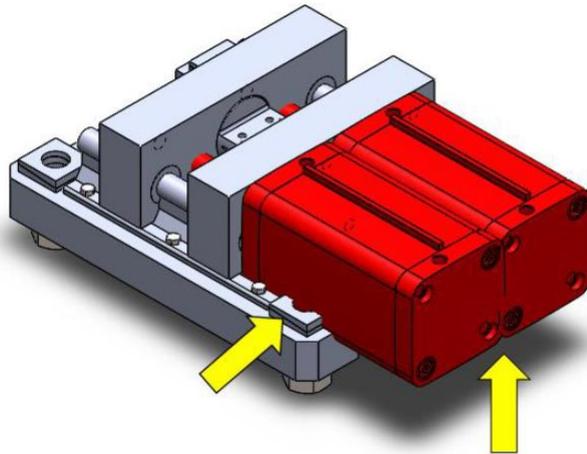


Figura 3.29: Montagem com dois atuadores CDC-63-100. Verifica-se interferência entre os corpos dos atuadores e as colunas do dispositivo.

Voltando para a solução com atuadores opostos atuando em avanço, tornou-se necessário definir o modelo adequado. A tabela 3.8 a seguir permite, em função da pressão de ar disponível e da força em avanço desejada (2810 N máximo), determinar o diâmetro do atuador. Sendo assim, só resta escolher o tipo de atuador e o curso. A rede de ar comprimido disponível no laboratório da UnB é de 7 a 8 bar. Considera-se uma rede de ar comprimido eficiente quando é garantido uma pressão mínima de 6 bar. Esse valor serviu de referência para obter o diâmetro de atuador e garantir a carga normal P máxima exigida pelo caderno de encargos.

Tabela 3.8: Força em avanço e em retorno de um atuador pneumático em função da pressão de ar (METALWORK).

Ø do atuador D mm	Ø do eixo d mm	Força	Área efetiva cm ²	Força em avanço e em retorno em função da pressão de ar (daN)									
				1 bar	2 bar	3 bar	4 bar	5 bar	6 bar	7 bar	8 bar	9 bar	10 bar
63	16	Avanço	31,17	31,2	62,3	93,5	124,7	155,9	187,0	218,2	249,4	280,6	311,7
		Retorno	29,16	29,2	58,3	87,5	116,6	145,8	175,0	204,1	233,3	262,5	291,6
63	20	Avanço	31,17	31,2	62,3	93,5	124,7	155,9	187,0	218,2	249,4	280,6	311,7
		Retorno	28,03	28,0	56,1	84,1	112,1	140,2	168,2	196,2	224,2	252,3	280,3
80	20	Avanço	50,27	50,3	100,5	150,8	201,1	251,3	301,6	351,9	402,1	452,4	502,7
		Retorno	47,12	47,1	94,2	141,4	188,5	235,6	282,7	329,9	377,0	424,1	471,2
80	25	Avanço	50,27	50,3	100,5	150,8	201,1	251,3	301,6	351,9	402,1	452,4	502,7
		Retorno	45,36	45,4	90,7	136,1	181,4	226,8	272,1	317,5	362,9	408,2	453,6
100	25	Avanço	78,54	78,5	157,1	235,6	314,2	392,7	471,2	549,8	628,3	706,9	785,4
		Retorno	73,63	73,6	147,3	220,9	294,5	368,2	441,8	515,4	589,0	662,7	736,3

Para diâmetro de 80 mm, MetalWork oferece um modelo compacto de pequeno curso (25 mm) que atende os requisitos do projeto (Figura 3.30).

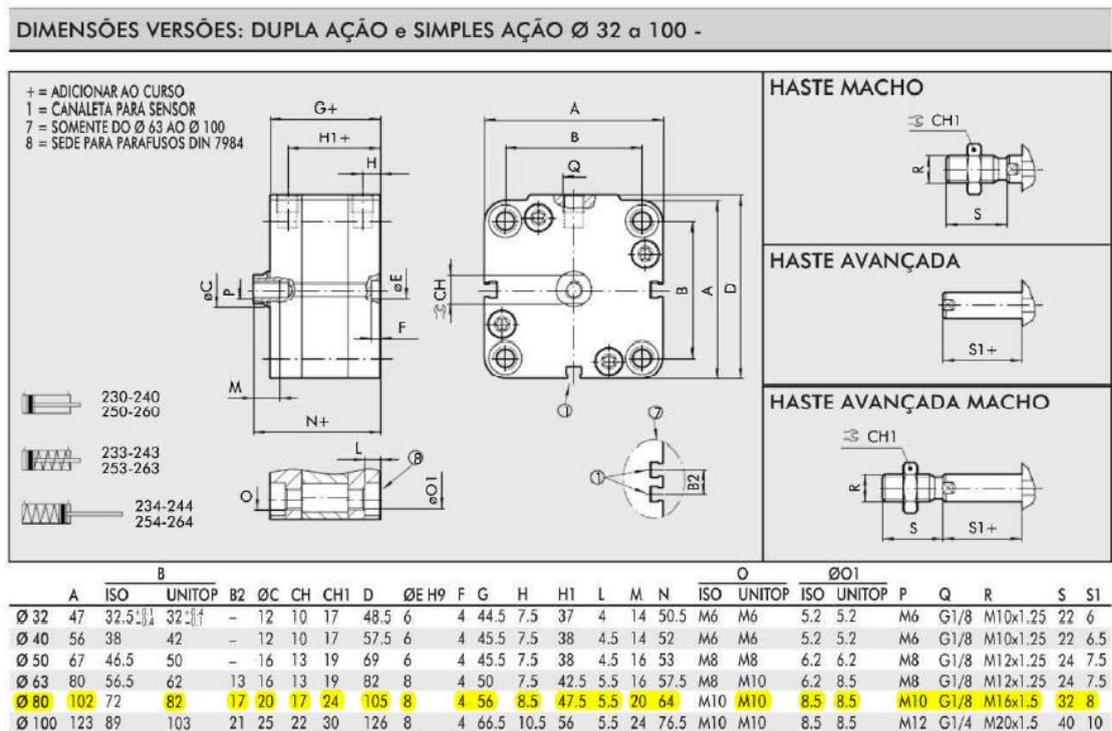


Figura 3.30: Dimensões dos atuadores pneumáticos Ø80 mm (METALWORK).

3.4.2.6. Célula de carga para carga normal *P*

Células de carga são elementos cuja função é converter um sinal de entrada (nesse caso, uma força) em um sinal elétrico que possa ser medido, lido e registrado. O objetivo da célula de carga no dispositivo é monitorar e controlar a força existente no conjunto de fios, ou seja, que a célula de carga possa perceber pequenas variações de força e enviar os sinais elétricos para um controlador.

Devido à concepção do dispositivo, deu-se prioridade a modelos de célula de carga que funcionem em compressão e que possam medir forças da ordem de grandeza de 3000 N (674,43 lbf) como descrita anteriormente.

Um fabricante que atendeu as exigências do caderno de encargos foi a Honeywell, que fabrica células de carga com dimensões reduzidas. Trata-se de um modelo que pertence a série MODEL 53. De acordo com a Tabela 3.9 retirada do catálogo da Honeywell, a célula de carga que atende o valor de 674,43 lbf está destacada em vermelho.

Tabela 3.9: Intervalo de força admitido pela célula de carga a suas principais dimensões (HONEYWELL).

MOUNTING DIMENSIONS							
Ranges lb	D1 mm [in]	D2 mm [in]	H mm [in]	L mm [in]	A in	B mm [in]	G mm [in]
5, 10, 25, 50, 100	25,4 [1.00]	5,33 [0.21]	15,75 [0.62]	1,27 [0.05]	#4-40 UNC	5,59 [0.22]	19,05 [0.750]
250, 500, 1000, 2000	31,75 [1.25]	8,13 [0.32]	9,91 [0.39]	1,78 [0.07]	#6-32 UNC	6,35 [0.25]	25,4 [1.000]
3000, 4000, 5000, 7500, 10K	38,1 [1.50]	10,16 [0.40]	16,0 [0.63]	2,03 [0.08]	#6-32 UNC	6,35 [0.25]	31,75 [1.250]
15K, 20K, 30K	50,8 [2.00]	15,24 [0.60]	25,4 [1.00]	3,05 [0.12]	#6-32 UNC	6,35 [0.25]	41,28 [1.625]
50K	76,2 [3.00]	19,81 [0.78]	38,1 [1.50]	4,57 [0.18]	#6-32 UNC	6,35 [0.25]	60,33 [2.375]

As dimensões da célula de carga destacada acima podem ser consultadas com auxílio da Figura 3.31.

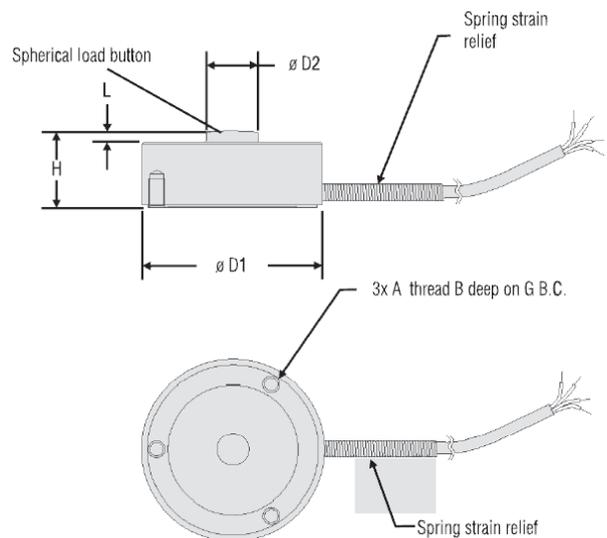


Figura 3.31: Esquema da célula de carga (HONEYWELL).

Nessa etapa do trabalho, a concepção mecânica do dispositivo está concluída. A Figura 3.32 mostra um corte da versão final do aparato com os itens principais.

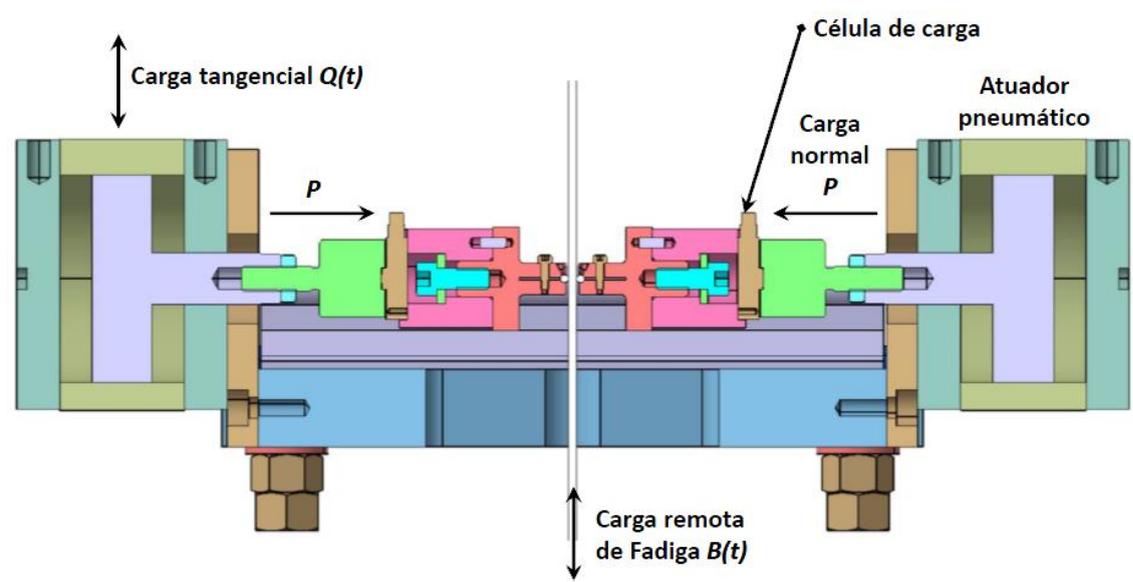


Figura 3.32: Concepção mecânica do dispositivo de fadiga por *fretting* de fios.

3.4.2.7. Controle de dados para testes de fadiga por *fretting*

Como especificado no caderno de encargos, alguns parâmetros serão controlados e salvos durante o ensaio pela própria máquina MTS através de um programa *Station Manager*. Os parâmetros registrados são:

- A carga tangencial $Q(t)$ de contato.
- O deslocamento relativo entre as zonas de contato (Corpo de prova e sapata).
- A carga remota de fadiga $B(t)$.
- O deslocamento do corpo de prova devido à força remota.
- A carga reativa do mordente fixo (superior) da máquina MTS.

Tais dados são monitorados por três células de cargas integradas na máquina MTS. O controlador MTS aplica as cargas ou deslocamentos através de servo-válvulas acopladas aos atuadores MTS e recebe e envia as informações para o sistema de aquisição de dados MTS (Figura 3.33). O computador MTS pode além dos deslocamentos e tensões citados acima, registrar o tempo e o número de ciclos.



Figura 3.33: Esquema do sistema de controle da máquina MTS (MONROY, 2018).

Como ressaltado na Figura 3.12 do caderno de encargos, é preciso ter um controle da carga de contato normal P que é aplicada pelo atuador pneumático através da mesa deslizante e dos suportes de fio e rolamento. Tal sistema de aquisição de dados será

independente da máquina MTS. Para isso, foi consultada a empresa LYNX que já realizou vários sistemas de aquisição no laboratório GFFM da UnB com sucesso. A primeira proposta técnica sugerida pela LYNX foi de instalar uma válvula controladora de vazão proporcional no circuito pneumático (Figura 3.34). Vale a pena ressaltar que esta configuração funcionará por controle de vazão e não de pressão para controlar a força, de forma que o controle pneumático fica igual ao controle hidráulico com servo-válvulas.

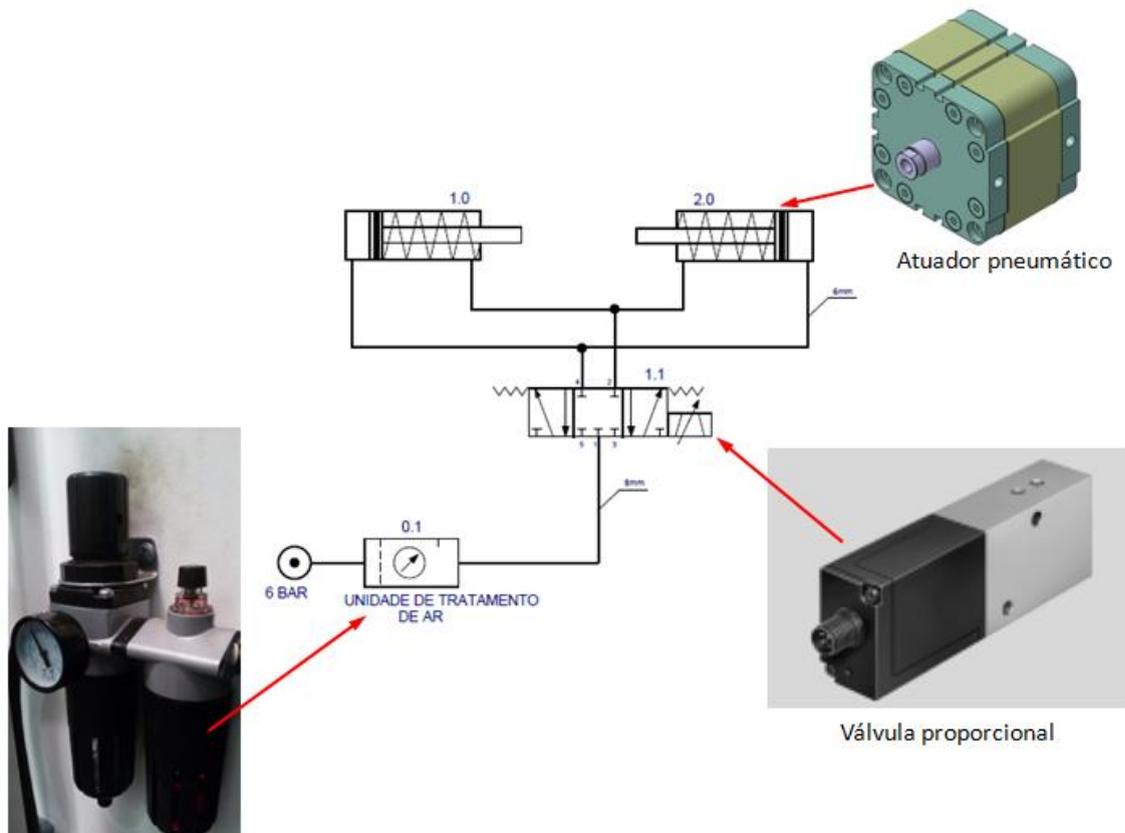


Figura 3.34: Esquema do circuito pneumático com a válvula proporcional.

A válvula proporcional permitirá ter um controle da velocidade e da direção de movimento dos cilindros em função das informações dadas pelas células de carga. A proposta técnica da LYNX consiste também em um sistema de controle acoplado a um computador independente que permitirá aplicar a carga P e mantê-la constante via à resposta das células de carga. O *software* da LYNX permitirá não apenas aplicar a carga desejada, mas também definir a velocidade da aplicação da força de contato (Figura 3.35).

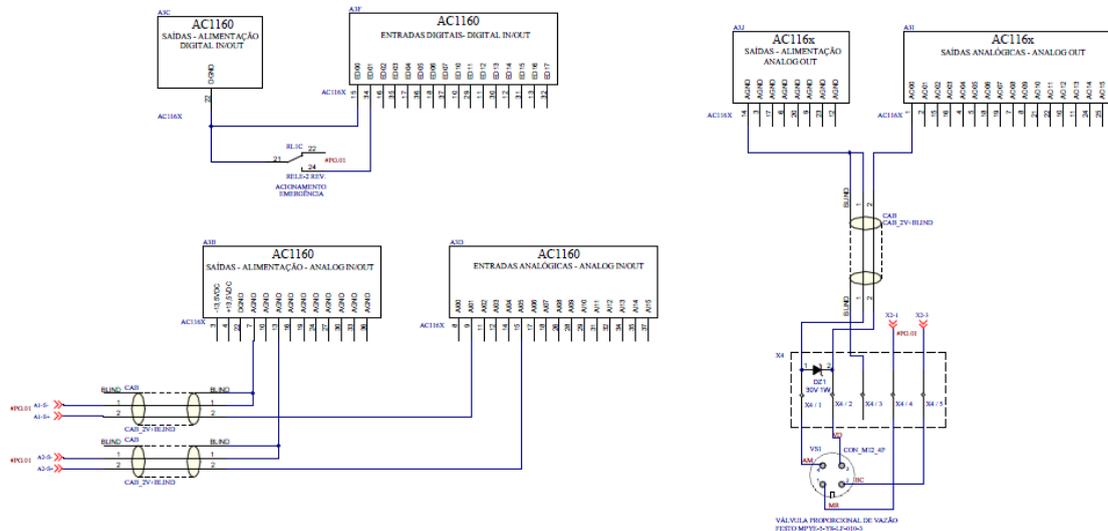
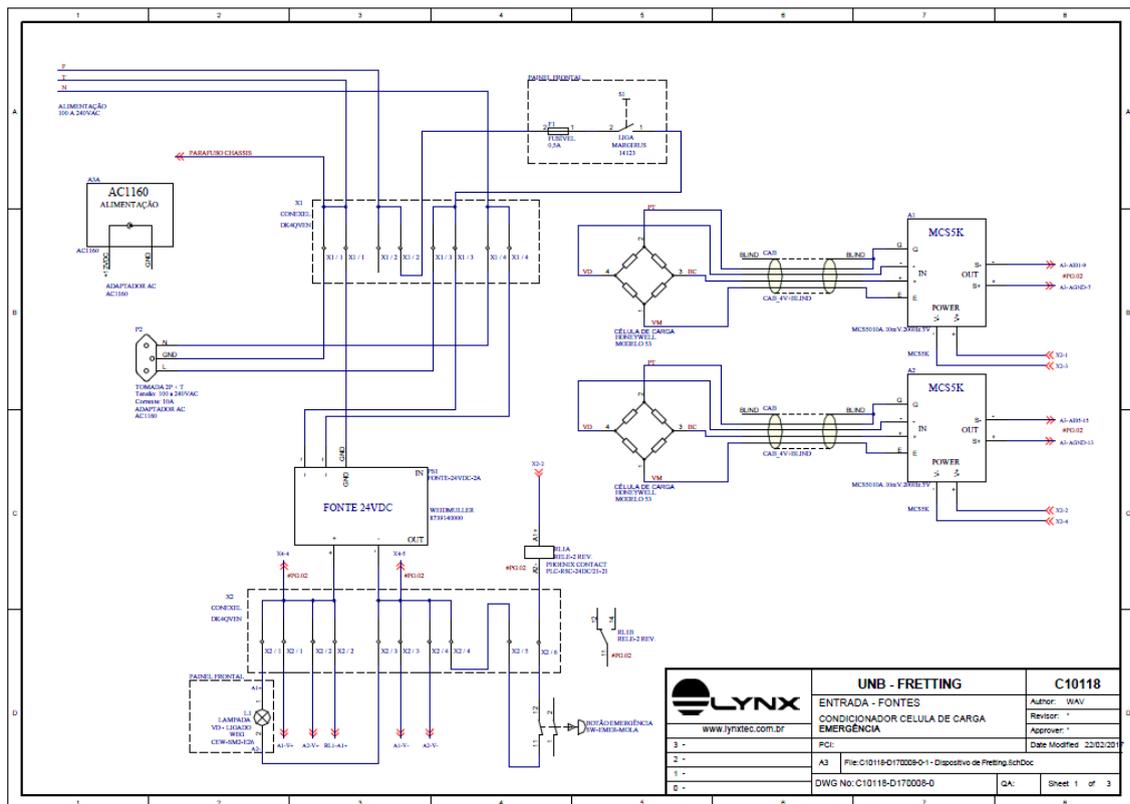


Figura 3.35: Diagramas de funcionamento do sistema de controle do dispositivo (LYNX).

O sistema é formado por um servo-controlador PID digital (AC1160) (Figura 3.35), a válvula de controle de vazão de ar, os dois atuadores pneumáticos (em paralelo) e as células de carga. O servo-controlador é uma malha fechada com

estratégia PID (*Proporcional, Integrador e Derivador*). A malha faz com que a força nos atuadores seja igual à força desejada. A força é alcançada pelo zeramento do erro entre a força desejada e a força medida (Figura 3.36). Para zerar o erro, o controlador envia um sinal em tensão para a válvula proporcional de vazão que controla o quanto de ar terá cada câmara dos atuadores. Caso a força esteja abaixo do desejado, mais ar é injetado até a força chegar ao ponto desejado, neste caso a vazão é interrompida. Caso a força aumente, a válvula reverte a direção até a força ser compensada. Esta compensação é calculada em função do erro. Assim o comando é proporcional ao erro, como o erro vai diminuindo até ser zerado, o comando também é zerado. O fator *Integrador* é usado para compensar não linearidades ou *offsets*. Ajuda também no caso que o comando não é suficiente para zerar o erro somente com o fator *Proporcional*. Por fim, o fator *Derivador* compensa problemas de velocidade na operação.

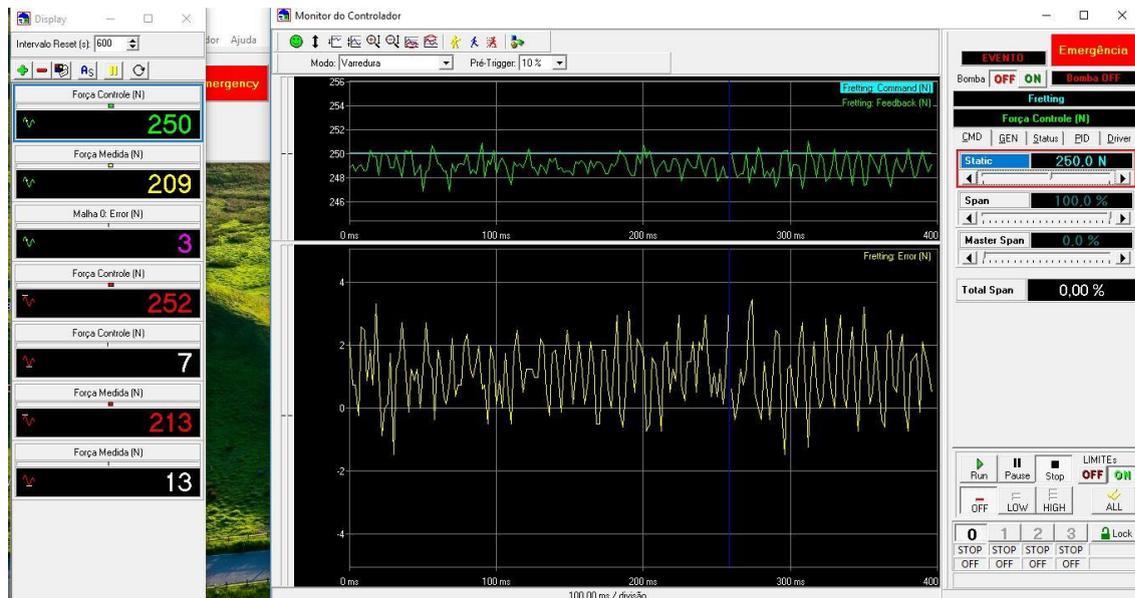


Figura 3.36: Programa LYNX.

3.5. VALIDAÇÃO DOS COMPONENTES PROJETADOS

A fim de garantir que as peças projetadas suportem as cargas de trabalho, foram feitas simulações no *software* CATIA V5, através do Método dos Elementos Finitos (MEF). Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos a partir da análise de elementos finitos nas peças mais sensíveis do dispositivo em termo de resistência mecânica. Trata-se dos suportes de fios (Figura 3.20) e da mesa deslizante (Figura 3.25). Os itens 1, 3 e 10 da Figura 3.17, ou seja, as placas e colunas, não foram

analisadas por elementos finitos. Essas peças apresentam as mesmas dimensões e são fabricadas a partir do mesmo material (aço 1020) que no dispositivo de *fretting* apresentado na Figura 3.16, como as cargas aplicadas no trabalho de Ferry são 10 vezes maiores, não foi necessário analisar a resistência mecânica.

3.5.1. Coeficiente de segurança

A escolha do fator de segurança é de grande importância em um projeto de concepção mecânica. Fatores muito grandes podem exigir excesso de material e conseqüentemente aumentar os custos de fabricação. Por outro lado, fatores de segurança muito baixos aumentam o risco de falha prematura de um componente. Desta forma, é necessário que o fator de segurança seja escolhido de forma adequada, conforme o projeto.

Em geral, projetos mecânicos usam fatores de segurança entre 1,2 e 5 (AGATI et al., 2002). Na Tabela 3.10, encontra-se um método mais detalhado da escolha do fator de segurança em projetos mecânicos que não atendem normas específicas, o que é o caso do trabalho apresentado nessa dissertação.

Tabela 3.10: Coeficiente de segurança s em projetos mecânicos (SPENLÉ e GOURHANT, 1995-1196).

Coeficiente de segurança (s)	Condições gerais de cálculo (exceto regulamentos especiais)
1,5 a 2	Casos excepcionais de grande leveza. Suposições de cargas supervalorizadas.
2 a 3	Construção onde se procura leveza (aviação). Suposições de cálculos de pior caso.
3 a 4	Boa fabricação, cálculos finos, cabos para sustentar pontes.
4 a 5	Construção comum (leves esforços dinâmicos não tomados em consideração). Guinchos.
5 a 8	Cálculos simplificados. Esforços difíceis de quantificar (casos de choques, movimentos alternativos, dispositivos de elevação, manutenção).
8 a 10	Materiais não homogêneos. Choques, estilingues de levantamento.
10 a 15	Choques muito importantes, mal conhecidos (prensas). Elevadores.

Este caso encontra-se entre as linhas “2 a 3” e “3 a 4” da Tabela 3.10. Portanto, foi adotado um coeficiente de segurança de $s = 3$.

3.5.2. Suporte de fios

Nos suportes dos fios observa-se a presença de esforços devido à carga normal P que pode atingir 3 kN. Os esforços devido ao atrito entre o fio vertical (corpo de prova) e o fio em contato (sapata) não são conhecidos. O suporte foi fabricado com aço 1040, suas propriedades mecânicas são listadas na Tabela 3.11 a seguir.

Tabela 3.11: Propriedades mecânicas e físicas do aço 1040.

Aço	Módulo de Elasticidade E (GPa)	Coefficiente de Poisson ν	Limite de escoamento σ_y (MPa)	Densidade (Kg/m³)
1040	200	0,29	450	7845

Por segurança, as tensões admissíveis deverão ser inferiores à tensão de escoamento dividida pelo fator de segurança (SPENLÉ e GOURHANT, 1995-1196) como mostrado na expressão (3.1).

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_o}{s} \quad (3.1)$$

A tensão admissível será então de 150 MPa. A análise mostrará os pontos que ultrapassam esse valor.

Para obter análises numéricas foi distribuída uma carga unitária ao longo da superfície superior que abriga o fio (Figura 3.37). Já que durante o ensaio o conjunto é deslocado para cima e para baixo, a superfície selecionada poderia ser a inferior dando o mesmo resultado. Também a carga é aplicada ao longo da superfície mesmo se na realidade tal carga será mais localizada na zona central dessa superfície onde a sapata entra em contato com o corpo de prova. Isso para simplificar a simulação.

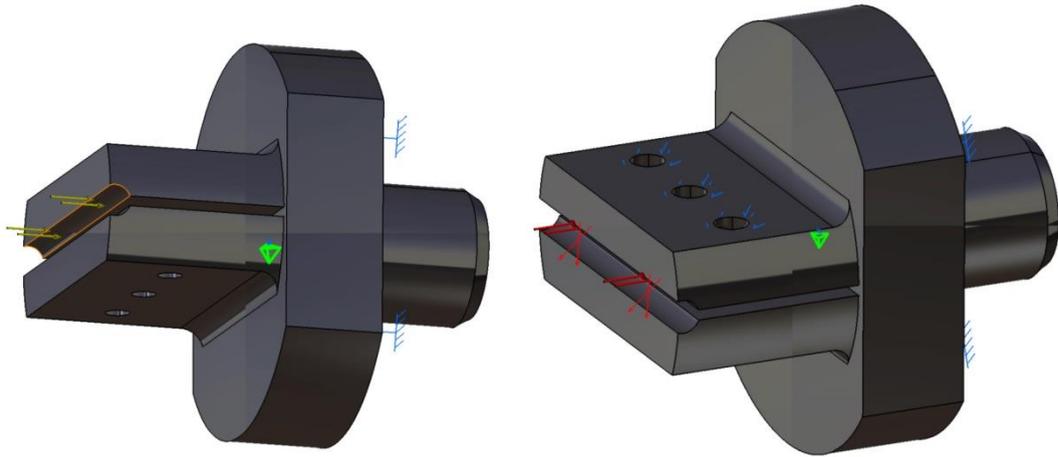


Figura 3.37: Condições de carregamento aplicadas no suporte de fios.

Em seguida a parte traseira da peça foi fixada, pois fica alojada no interior da mesa deslizante. Os três furos para prender o fio também foram fixados (Figura 3.37).

Os resultados da análise numérica mostram que as tensões admissíveis ficam abaixo de 150 MPa ao longo do alojamento do fio, região mais solicitada. Apenas um ponto da malha atinge um valor acima do limite fixado, mas sendo localizado na extremidade do alojamento do fio, esse alerta pode ser descartado (Figura 3.38).

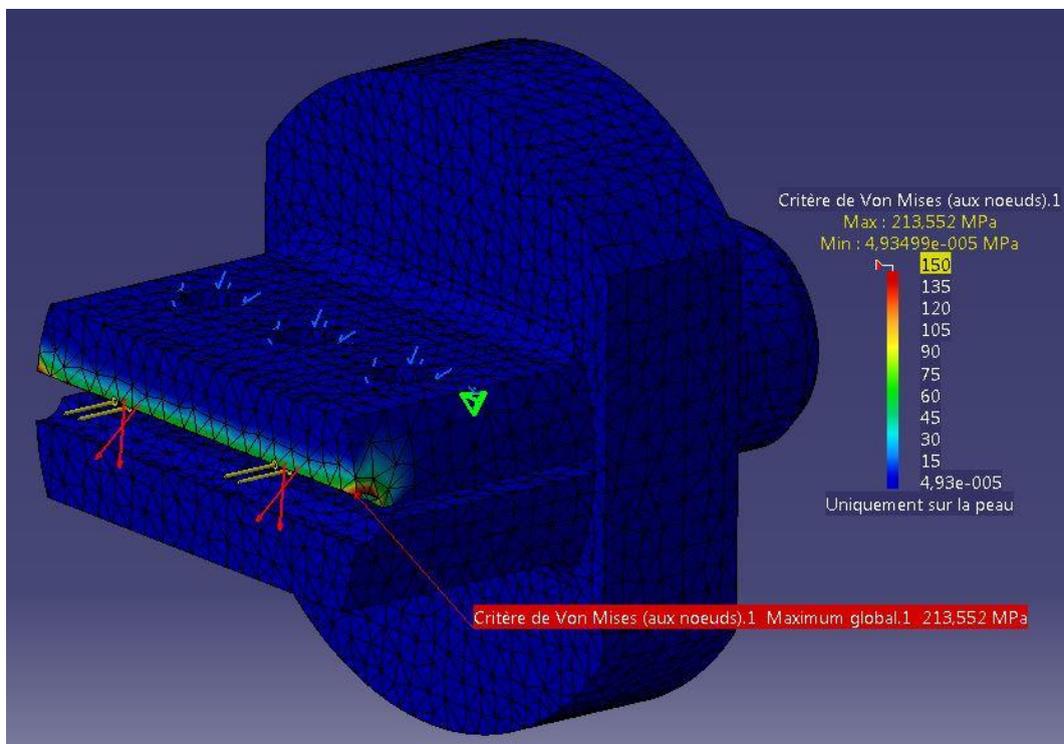


Figura 3.38: Distribuição de tensões no Suporte de fios submetido à carga unitária.

Em termo de deformação o suporte de fios atende os requisitos do projeto com um deslocamento máximo de 0,00146 mm (Figura 3.39).

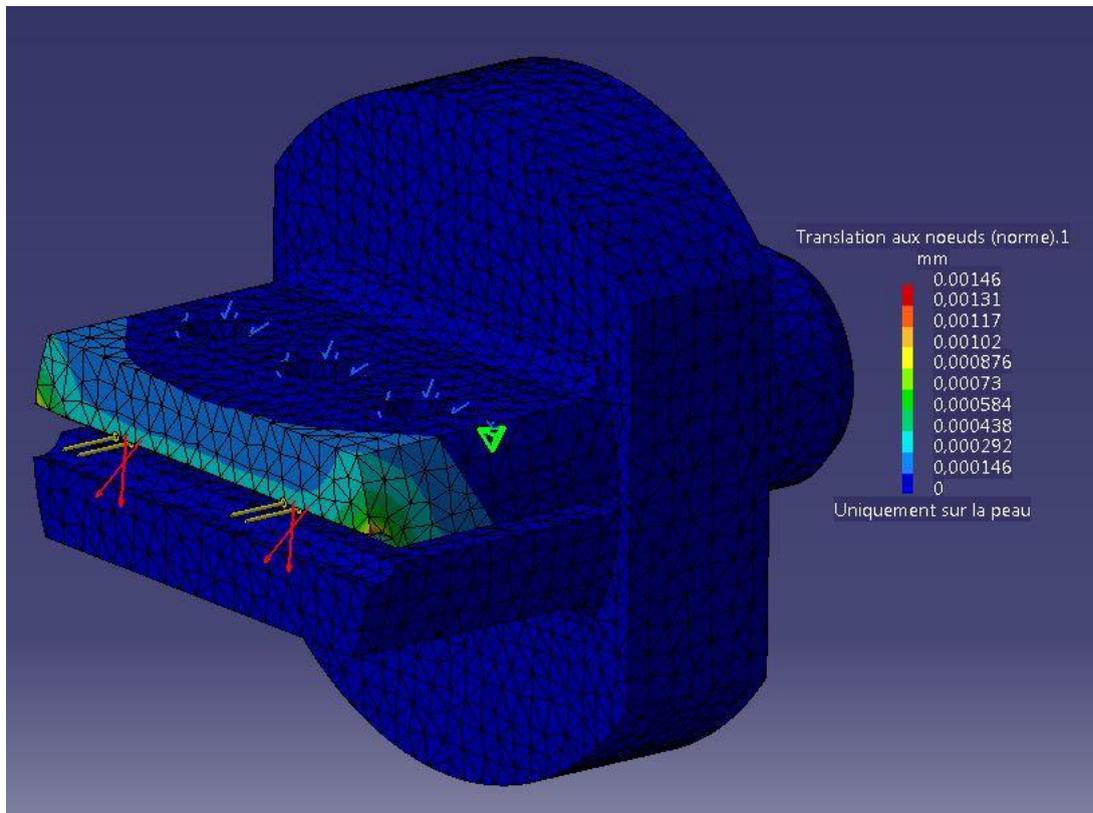


Figura 3.39: Deslocamentos sofridos pelo Suporte de fios submetido à carga unitária.

3.5.3. Mesa deslizante

No caso da mesa deslizante observam-se os mesmos esforços devido à carga normal P . Pelo fato do material e as dimensões externas dessa peça serem impostos pelo fabricante, mostrou-se necessário fazer uma avaliação por elementos finitos. A carga foi aplicada no alojamento da célula de carga e foi fixada a zona onde o suporte de fios é alojado. A mesa foi fabricada com aço ST52 e suas propriedades mecânicas são listadas na Tabela 3.12 a seguir.

Tabela 3.12: Propriedades mecânicas e físicas do aço ST52.

Aço	Módulo de Elasticidade E (GPa)	Coefficiente de Poisson ν	Limite de escoamento σ_y (MPa)	Densidade (Kg/m ³)
ST52	200	0,3	335	7800

Pode-se perceber que a tensão máxima sofrida pelo componente é inferior ao limite de escoamento dividido pelo fator de segurança (3.1), ou seja, 111,67 MPa (Figura 3.40). Portanto as dimensões e o material foram aprovados.

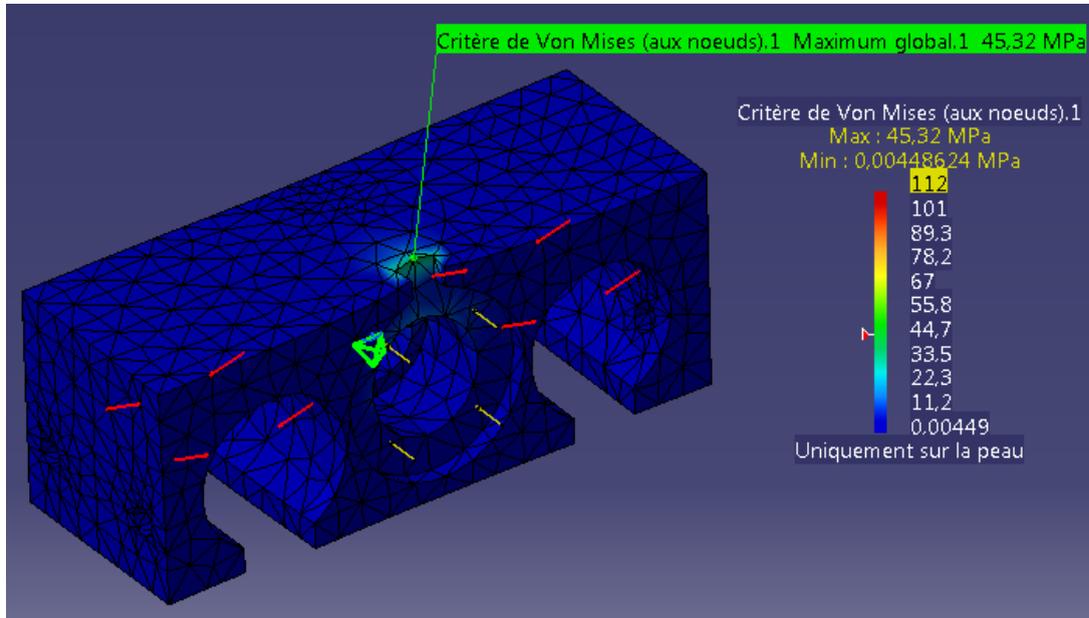


Figura 3.40: Distribuição de tensões na mesa deslizante submetida à carga unitária.

3.6. FOTOS DO DISPOSITIVO

Após ter atendido todos os requisitos do caderno de encargos (metodologia), chegou-se a um projeto executivo pronto para fabricação (Figura 3.41). Os desenhos técnicos e a nomenclatura do dispositivo encontram-se no anexo A. Com base nesses desenhos técnicos foram consultadas empresas especializadas em usinagem de precisão e após análise das ofertas recebidas foi selecionada uma empresa que fabricou as peças conforme aos desenhos do projeto. Em paralelo foi fabricado e montado o controlador de aquisição de dados detalhado anteriormente. A seguir fotos do dispositivo e seus componentes principais após recepção e fotos do dispositivo completo acoplado à máquina MTS.

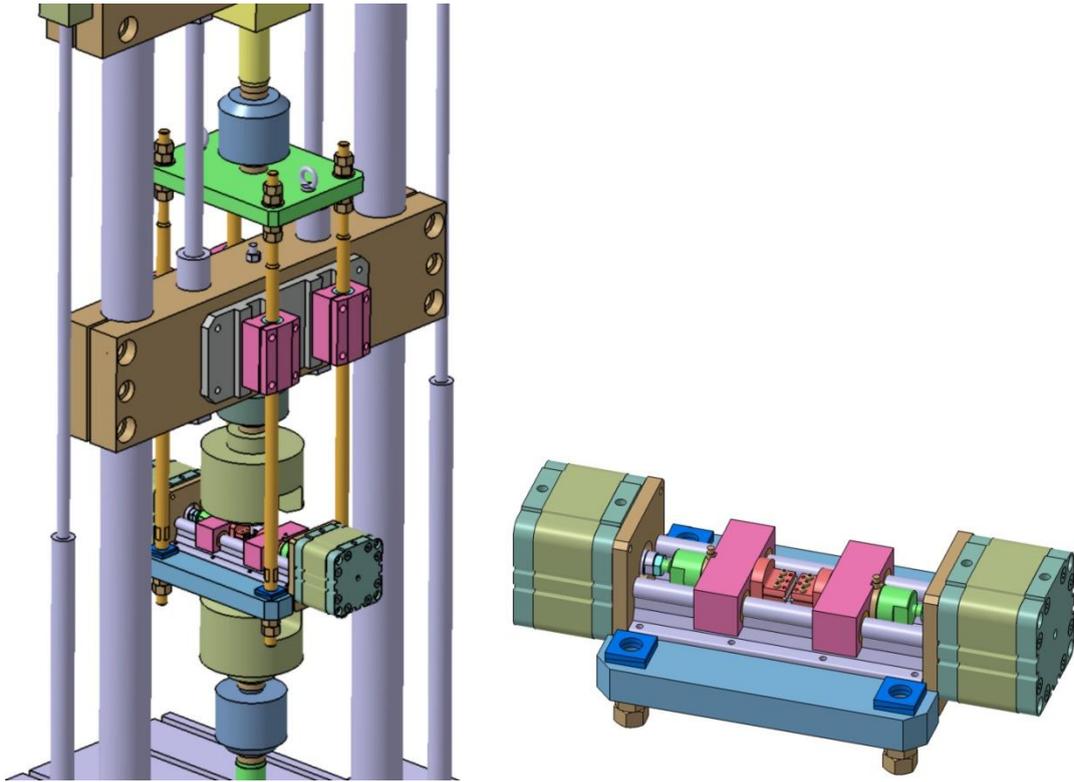


Figura 3.41: Projeto executivo do dispositivo de fadiga por *fretting* em fios de alumínio.



Figura 3.42: Atuador pneumático METALWORK para carga normal P .



Figura 3.43: Placa de *fretting* inferior com os trilhos montados.



Figura 3.44: Mesa deslizante com suporte de fio.



Figura 3.45: Mesa deslizante com rolamento.

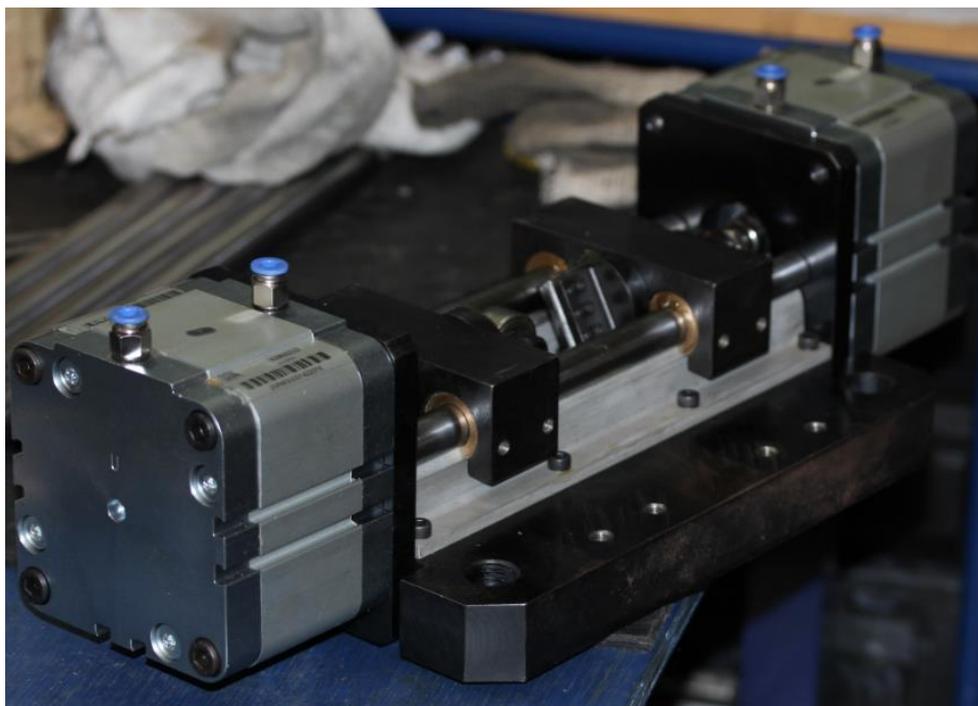


Figura 3.46: Conjunto placa inferior, mesas deslizantes, suporte de fio, rolamento e atuadores pneumáticos.

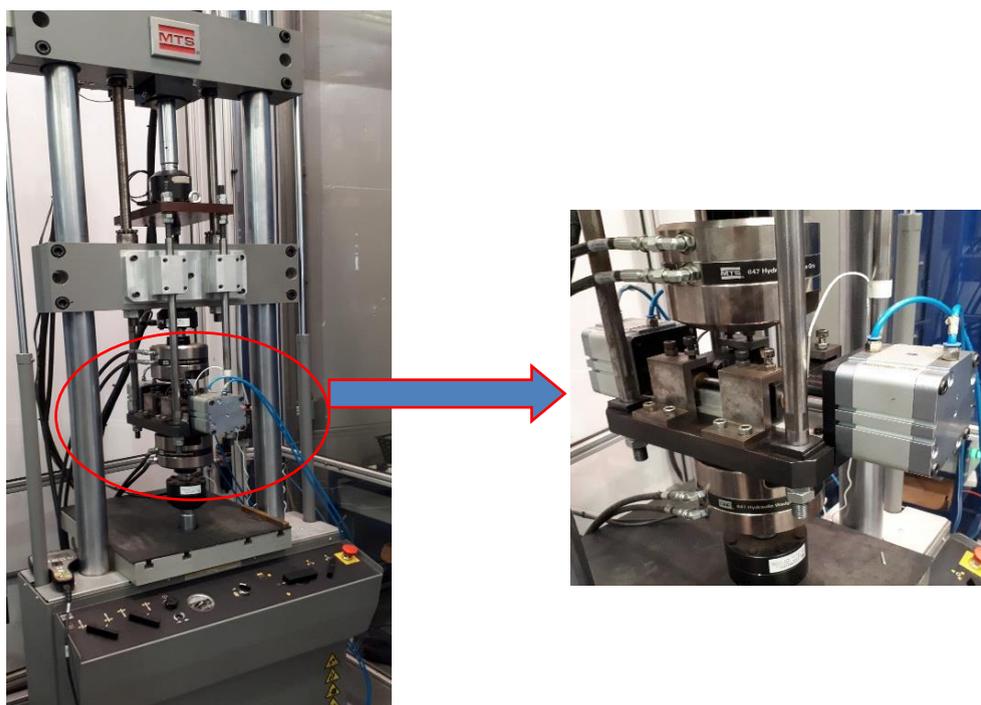


Figura 3.47: Dispositivo acoplado à máquina MTS.

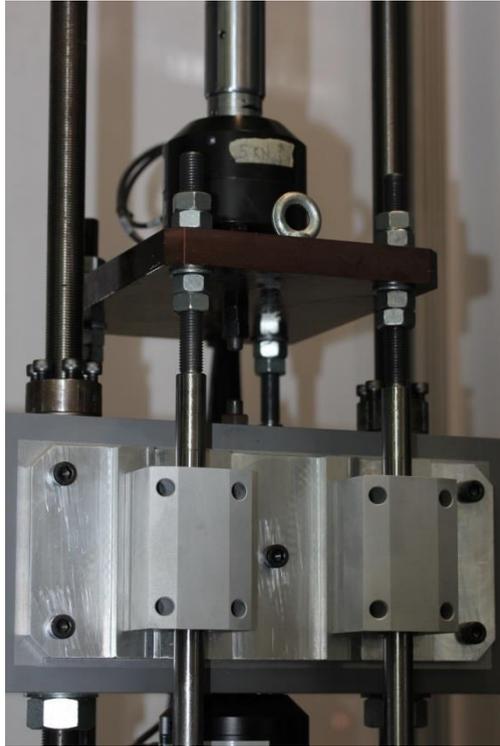


Figura 3.48: Parte do dispositivo acoplado ao atuador superior MTS.



Figura 3.49: Controlador de aquisição de dados Lynx.

CAPÍTULO 4

4. AVALIAÇÃO DO DISPOSITIVO / RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os testes de avaliação do dispositivo de fadiga por *fretting* em fios de alumínio. Tais testes são primordiais para validar o funcionamento mecânico do dispositivo acoplado à máquina MTS, verificar que a parte instrumentação esteja operacional e finalmente, avaliar que as condições de fadiga por *fretting* em fios sejam reproduzidas corretamente pelo dispositivo. Para tal avaliação, decidiu-se realizar ensaios de caracterização de fios de liga de alumínio retirados de um cabo condutor CAL 900. Dessa forma, obteve-se não apenas uma avaliação do dispositivo, mas também uma caracterização de um fio específico.

4.1. TESTES DE AVALIAÇÃO

Além de avaliar o dispositivo, os testes descritos a seguir permitiram a redação de um tutorial de ensaios de fadiga por *fretting* em fios de alumínio (ver anexo B) que servirá de apoio para futuros usuários do dispositivo.

4.1.1. Corpos de Prova e sapatas

Para todos os testes, foram utilizados fios de cabo condutor CAL 900 (Figura 4.1). Trata-se de um cabo com fios de liga de alumínio 6201-T81. Os fios da camada externa servem para o contato (sapata), os fios utilizados como corpo de prova vêm da camada interna.

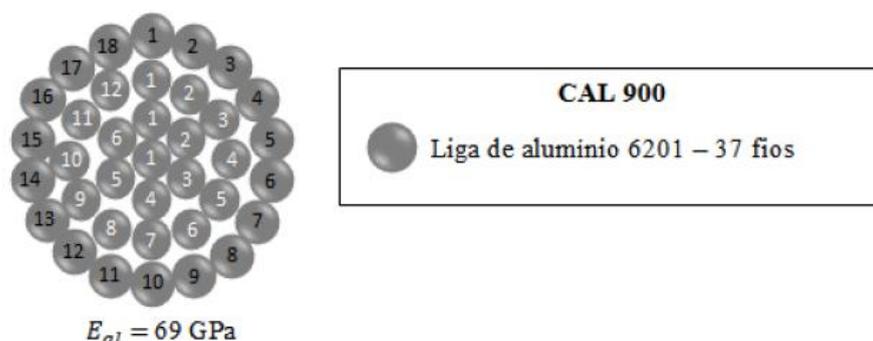


Figura 4.1: Ilustração esquemática da seção transversal do cabo CAL 900 (GOMES, 2016).

Condutores CAL foram desenvolvidos por motivos econômicos em aplicações aéreas onde existe a necessidade de uma maior resistência mecânica que aquela obtida com condutores CA. O cabo CAL possui uma melhor resistência à corrosão que o cabo CAA. Por outro lado, sua resistência à fadiga mostrou-se significativamente menor para um certo lote específico (KALOMBO et al., 2016 e 2018). Condutores de liga 6201-T81 tem uma dureza mais alta que os de alumínio 1350-H19, portanto, têm maior resistência à abrasão. O cabo CAL 900 tem uma carga de ruptura de 131,46 kN (Tabela 3.4) e é usado em linhas de transmissão de 230 kV (KALOMBO et al., 2016).

Como mostrado na Figura 4.1, a camada externa é formada por 18 fios. O cabo possui duas camadas internas de 12 e 6 fios mais um fio central. A liga de alumínio 6201-T81 corresponde a série 6XXX na classificação dos alumínios, que representa o grupo de ligas Alumínio-Magnésio-Silício. O magnésio e o silício combinam-se para formar o composto intermetálico Mg_2Si que é o responsável pelo endurecimento dessas ligas. O X20X caracteriza a liga (composição específica) e o XXX1 indica lingotes. Finalmente a classificação T81 indica que o material foi tratado por solubilização, encruado (trabalhado a frio) e envelhecido artificialmente. Nas Tabelas 4.1 e 4.2 são apresentadas a composição química e as propriedades mecânicas dessa liga respectivamente.

Tabela 4.1: Composição química em % da liga de alumínio 6201-T81.

Liga de alumínio	Mg	Si	B	Cr	Cu	Fe	Mn	Zn	Al
6201-T81	0,65	0,58	≤0,032	≤0,01	≤ 0,1	≤0,21	≤0,01	≤0,01	Restante

Tabela 4.2: Propriedades mecânicas da liga de alumínio 6201-T81.

Liga de alumínio	Limite de escoamento σ_y (MPa)	Limite de resistência a tração σ_u (MPa)
6201-T81	310	330

Quando os fios são retirados do cabo, precisam ser retificados para o ensaio de fadiga, pois foram torcidos de forma helicoidal no processo de encordoamento da fabricação do cabo (Figura 4.2). Para isso, usou-se uma máquina servo-hidráulica para tracionar os fios com uma taxa decrescente de 10 mm/min até 1 mm/min até atingir uma força de aproximadamente 3900 N (equivalente a uma tensão de 323 MPa). Como a carga aplicada é superior ao limite de escoamento da liga alumínio 6201-T81, este processo gera tensões residuais nos fios a serem ensaiados. A partir de um fio da camada externa esticado, corta-se as sapatas com comprimento de 35 mm. Os corpos de prova são cortados a partir dos fios da camada interna e têm um comprimento de 220 mm.

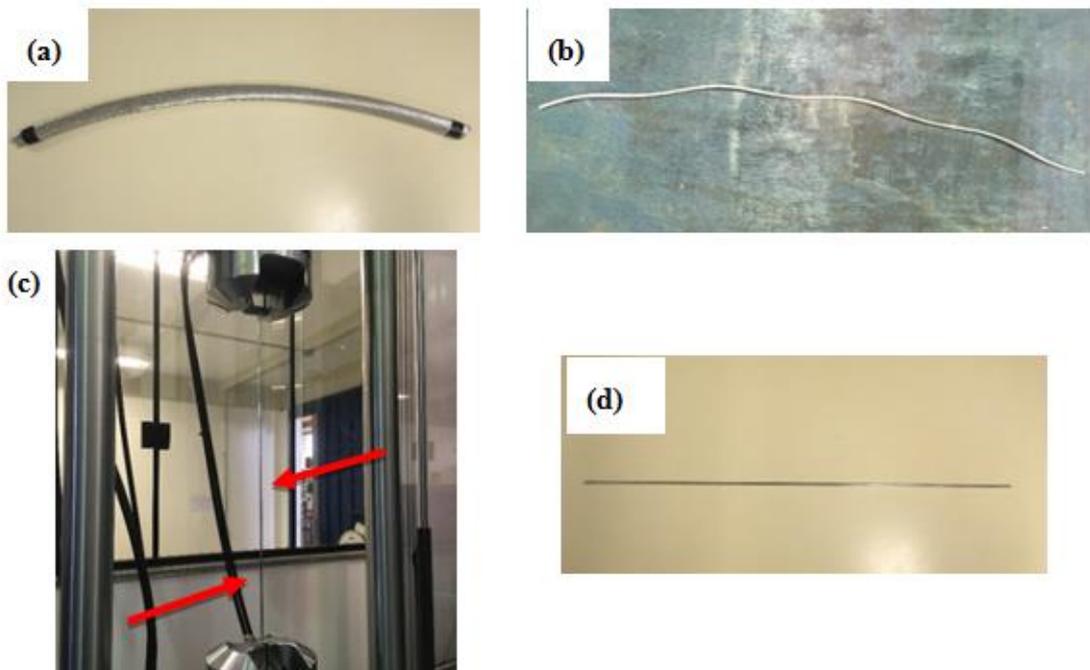


Figura 4.2: (a) Peça do cabo retirado da bobina; (b) Fio retirado do conjunto antes do esticamento; (c) Fio colocado na máquina; (d) Fio já esticado (UnB, 2018).

Para definir a quantidade de corpos de prova (CP's) é preciso conhecer o índice de replicação. Segundo a norma ASTM E739-91 (2012) para estabelecer uma curva Tensão-Vida (curva *S-N*) deve ter um índice de replicação de 33% a 50%. A partir da equação 4.1 e adotando um índice de replicação e uma quantidade de níveis de tensão é possível definir a quantidade de corpos de prova a serem testados.

$$\% \text{ replicação} = 100 \times \frac{\text{Níveis de tensão}}{\text{Número de CP's testados}} \quad (4.1)$$

Para este projeto foi adotado um índice de 33% e uma quantidade de níveis de tensões de 4. Isolando o número de CP's testados na equação 4.1 observou-se que para atender a norma ASTM E739-91 foi preciso um número mínimo de 12 corpos de prova.

4.1.2. Aperfeiçoamento do dispositivo

Os primeiros testes permitiram destacar uma leve vibração das mesas deslizantes devido à folga de ajuste mecânico entre as buchas de bronze e os eixos de $\text{Ø}16\text{h}6$ (Tolerância $0/-11\ \mu\text{m}$). Apesar de esse ajuste ser do tipo G6/h6, ou seja, uma folga que pode variar entre 6 e $28\ \mu\text{m}$, percebeu-se uma leve folga durante os primeiros ensaios. Não houve erro de fabricação. As peças estão dentro das tolerâncias exigidas nos desenhos técnicos. Foram tomadas duas medidas para corrigir esse defeito. A primeira consistiu em fabricar quatro presilhas em formato de "S" (Desenho técnico N°1022B41, ver Anexo A) fixadas na placa de base e que permitem apertar as mesas deslizantes através de parafusos e porcas antes de iniciar o ensaio (Figura 4.3).

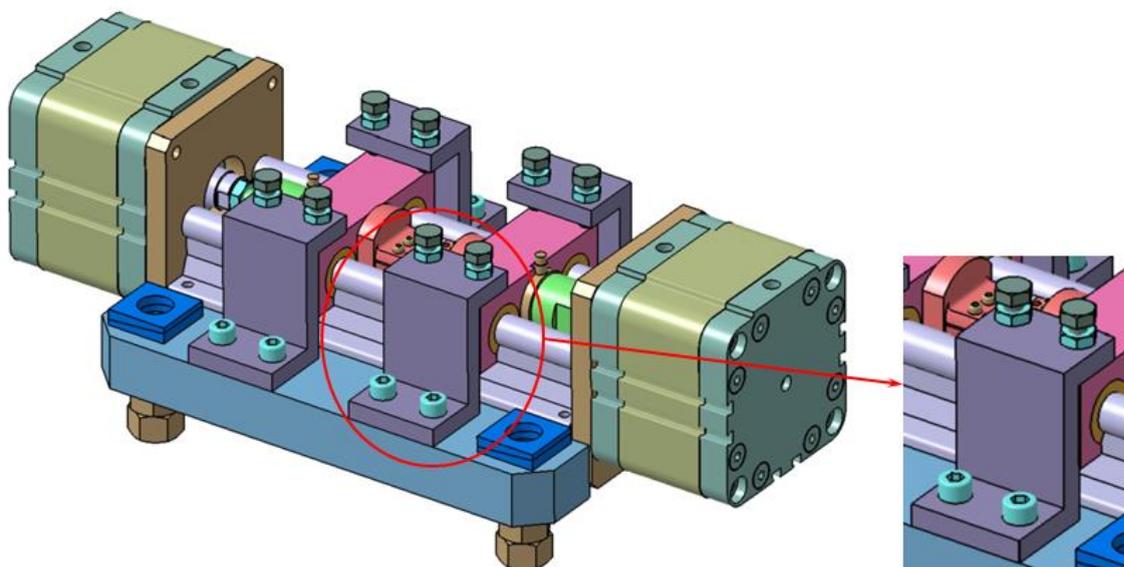


Figura 4.3: Dispositivo com as presilhas de aperto para mesas deslizantes.

A segunda medida consistiu na usinagem de furos M6 nas faces laterais das mesas deslizante na altura do alojamento das buchas de bronze. Sendo as buchas de bronze peças semiabertas, tal medida permitiu apertar o ajuste entre o diâmetro

interno da bucha e o eixo (Figura 4.4) com parafusos. Esse aperto seria realizado caso a primeira medida não fosse suficiente para eliminar as vibrações.

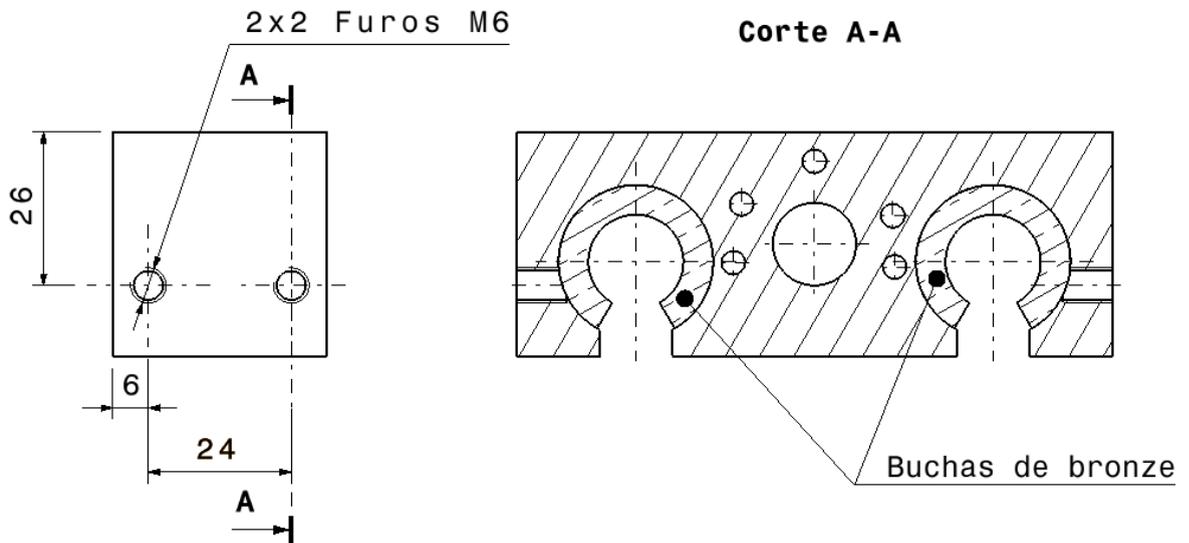


Figura 4.4: Esquema da alteração da mesa deslizante para o aperto de ajuste bucha/eixo.

As medidas mostraram-se eficazes e deu-se prosseguimento aos testes.

4.1.3. Testes de fadiga por *fretting* com fios de cabo CAL 900

Para avaliar o dispositivo foram realizados ensaios de fadiga por *fretting* com carga tangencial $Q(t)$ gerada pela carga remota de fadiga $B(t)$, ou seja, o atuador superior da máquina MTS é desabilitado durante o ensaio. Ensaios de fadiga por *fretting* com carga tangencial controlada serão realizados em futuros trabalhos.

A carga P foi fixada a 250 N. Os testes foram realizados com um ângulo de cruzamento de fios de 29° , a opção de montagem fio-rolamento (Figura 4.5), uma razão de tensão R de 0,1 (condição de tração-tração) e finalmente com uma frequência de oscilação de 20 Hz.

A carga P de 250 N foi fixada conforme ao trabalho de Rocha (2019) onde ensaios foram realizados com cargas de aperto de 250 N e 500 N. Com $R = 0,1$, as condições de ensaios são similares às do cabo na vida real, onde não há compressão devido à pré-carga de tração associada ao carregamento cíclico da ação do vento. Da mesma forma, a frequência foi escolhida conforme aos testes dirigidos em 2016 na UnB por Kalombo

et al. (2016) com cabos CAL 900, onde a faixa de frequência variou entre 20 e 30 Hz. Escolheu-se a menor frequência para garantir a estabilidade dos ensaios e evitar um aquecimento excessivo do corpo de prova na zona de contato.

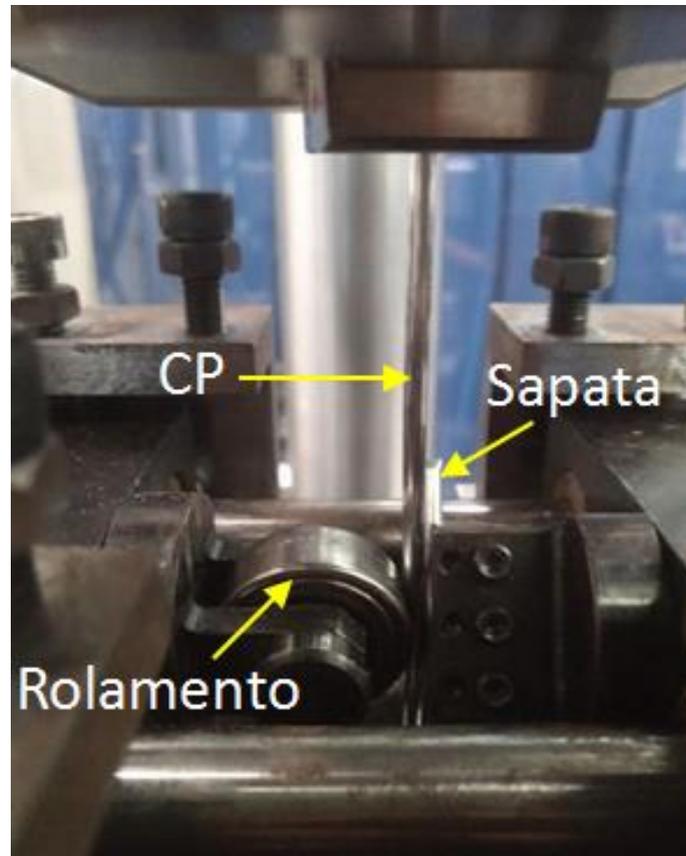


Figura 4.5: Dispositivo configurado para opção fio-rolamento.

Variou-se também a carga B conforme os valores de $\sigma_{m\acute{a}x}$ escolhidos. Dessa forma determina-se a tensão mínima considerando a Eq. 2.4. A partir do valor $\sigma_{m\acute{i}n}$, pode-se calcular a tensão média σ_m com a Eq. 2.1. Por fim, determina-se a tensão de amplitude σ_a com a Eq. 2.2.

Para esses ensaios foi definido um número máximo de ciclos para vida infinita de cinco milhões. Dessa forma, se o ensaio atinge tal valor e o CP não falhou, podendo-se encerrar o ensaio. A vida em fadiga do corpo de prova, neste caso, foi considerada infinita. Foi necessário atingir a vida infinita nessa série de ensaios com o objetivo de obterem-se curvas $S-N$ mais realistas possíveis.

De modo geral, as principais etapas para realização dos ensaios de fadiga por *fretting* em fios de alumínio estão descritas a seguir (mais detalhes em anexo B):

- Configurar os parâmetros de ensaios no software da máquina MTS.
- Aplicar a tração correspondente à tensão média no corpo de prova.
- Aplicar a carga normal P através dos atuadores pneumáticos.
- Executar o teste até a falha do CP ou até cinco milhões ciclos.

Foi realizado mais um ensaio com força normal P de 500 N com o objetivo de identificar o tipo de regime de *fretting* observado e compará-lo com os ensaios realizados com força normal de 250 N.

4.2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico será apresentada a curva $S-N$ obtida para avaliar o comportamento de fadiga por *fretting* em fios de liga de alumínio 6201-T81. A curva foi produzida em razão de carregamento $R = 0,1$, obtida conforme a norma ASTM E769 (2012) e é relativa à tensão aplicada na secção transversal do fio ($\varnothing 3,962$ mm). A curva $S-N$ relaciona a amplitude de tensão (σ_a) com a vida em fadiga dos corpos de prova até ruptura (N_f).

A partir dos pontos obtidos nos ensaios de fadiga por *fretting*, realizou-se um ajuste linear baseado no método dos mínimos quadrados. Com a linha de tendência resultante observou-se o comportamento de fadiga por *fretting* dos fios estudados.

CURVA $S-N$ COM FORÇA NORMAL 250 N

Uma vez os ensaios de fadiga por *fretting* concluídos, construiu-se a curva $S-N$. Na Tabela 4.3 são mostrados os quatros níveis de tensão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$) utilizados, as tensões de amplitude correspondentes, a vida em fadiga para cada CP assim como a vida em fadiga média para os quatros níveis de tensão.

A curva $S-N$ (Figura 4.6) apresenta a linha de tendência dos dados obtidos nesses ensaios. Cada ponto preto representa um ensaio de fadiga por *fretting* concluído pela falha do CP. Os ensaios que não falharam (*run out*) são também indicados no gráfico através de um círculo com uma seta.

Tabela 4.3: Resultados de vida em fadiga do fio 6201-T81 para $P = 250$ N.

$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	σ_a (MPa)	CP (fio)	Vida em fadiga (Número de ciclos)	Vida em fadiga média (Número de ciclos)
220	99	CP-04	115 079	119 313
		CP-09	114 791	
		CP-15	128 069	
180	81	CP-19	204 721	231 911
		CP-20	167 259	
		CP-33	323 754	
160	72	CP_21	317 895	347 939
		CP-23	441 576	
		CP-34	355 424	
140	63	CP-26	1 785 416	3 002 246
		CP-27	<i>Run out</i>	
		CP-32	4 219 076	

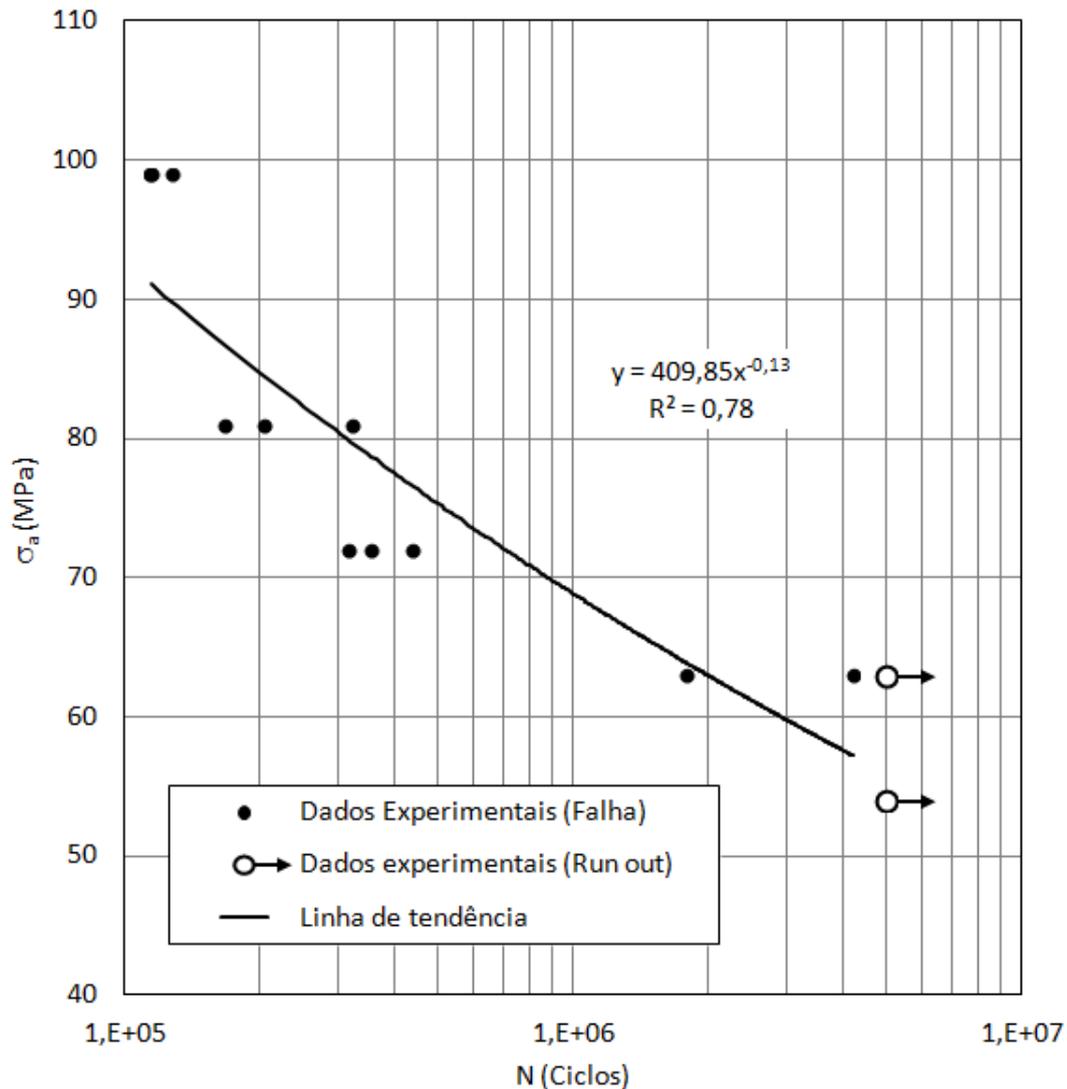


Figura 4.6: Curva S-N para força normal de 250 N, $R = 0,1$.

Nota-se na curva obtida (Figura 4.6) que o coeficiente de correlação da linha de tendência ($R^2 = 0,78$) é aceitável tendo em conta as dispersões em vida em fadiga obtidas nos níveis de tensão mais baixos dos ensaios. Essa série de ensaios avaliou a concepção mecânica do dispositivo mostrando uma boa repetitividade.

4.2.1. Marcas de *fretting*

Para avaliar o dispositivo, uma das primeiras observações a ser feita foi a análise das marcas elípticas de *fretting* geradas pelo contato fio/fio. Foram analisados CPs que não chegaram até falha para obter uma marca de *fretting* completa. Usou-se para este fim o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) que forneceu informações sobre a estrutura e a composição.

Na região de contato (Figura 4.7), observam-se duas regiões distintas que caracterizam o regime de escorregamento parcial, ou seja, a zona de adesão localizada no centro da marca delimitada pela linha amarela e a zona de escorregamento encerrada pela elipse vermelha. A fronteira entre as duas zonas aparece de forma mais evidente na Figura 4.8. Tratou-se de um ensaio que foi interrompido (CP-22: 382 219 ciclos, $\sigma_{m\acute{a}x} = 160$ MPa, $P = 250$ N).

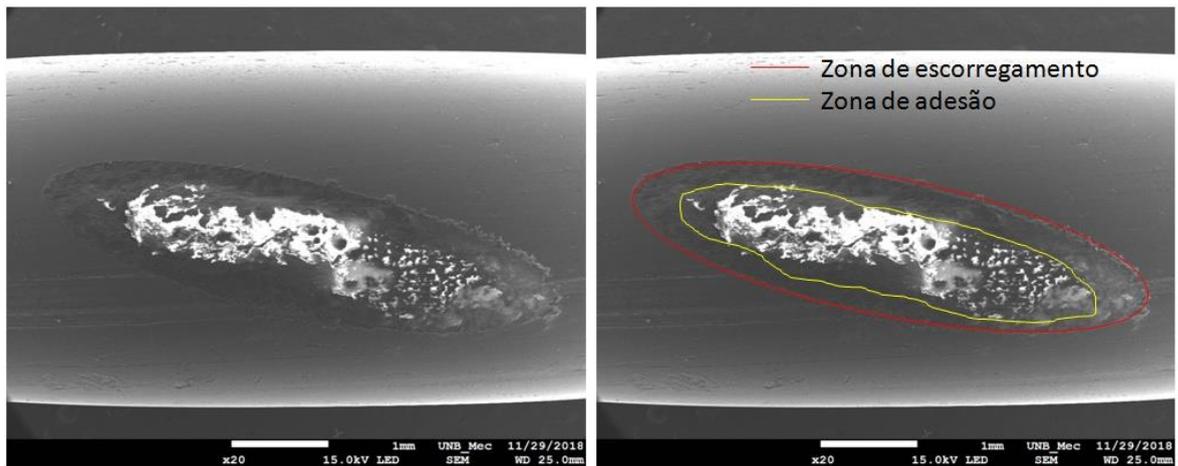


Figura 4.7: Marca de *fretting* gerada pelo dispositivo. Observam-se as zonas de adesão e de escorregamento.

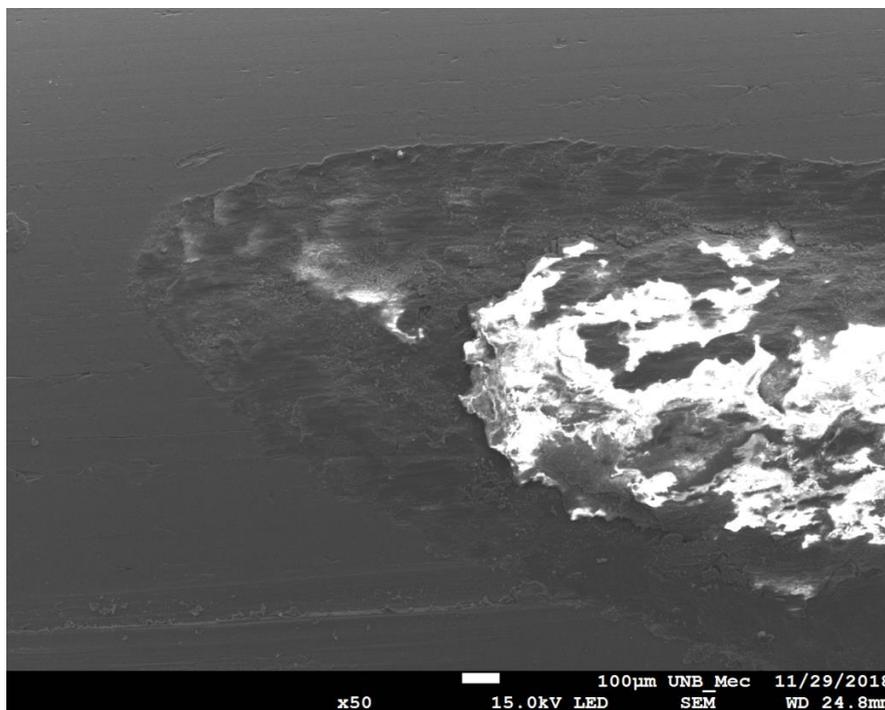
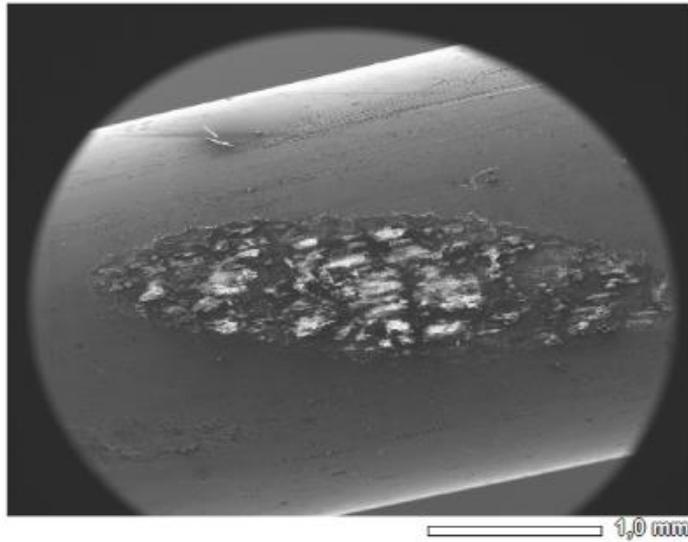
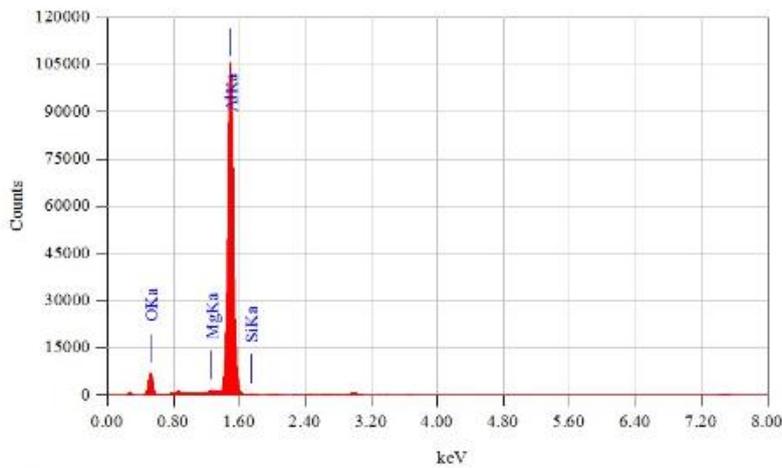


Figura 4.8: Detalhe da zona de adesão e de escorregamento.

Outras superfícies de contato foram também analisadas por espectroscopia de energia dispersiva (EDS). Tal análise química foi realizada com o MEV por equipamentos acessórios acoplados. A Figura 4.9 apresenta a análise EDS da primeira marca de *fretting* gerada com o dispositivo (CP-01: 310 851 ciclos, $\sigma_{m\acute{a}x} = 220$ MPa, $P = 250$ N). Nesse ensaio o fio quebrou no mordente. Ao contrário da Figura 4.7, nessa marca não se destacam as zonas de adesão e de escorregamento. Os elementos químicos presentes são obviamente o alumínio (Al) e os dois principais elementos da liga 6201-T81, o magnésio (Mg) e o silício (Si). Nota-se que a proporção de Mg e de Si está próxima àquela indicada na Tabela 4.1. Observa-se também uma grande quantidade de oxigênio (32,17%) que pode estar relacionada com a formação de óxido de alumínio devido ao desgaste por *fretting* durante o ensaio. Essa presença de óxido de alumínio (ou alumina Al_2O_3), já observada por Azevedo et al. em 2009 ou Reinke em 2017, está localizada apenas na marca elíptica de *fretting* como mostrado no mapeamento EDS (Figura 4.10) onde a presença de oxigênio é destacada em vermelho (Figura 4.10c). As partículas de alumínio arrancadas durante o desgaste reagem com o meio ambiente, nesse caso o ar atmosférico e a alta temperatura gerada pelo *fretting*, formando alumina. Tais partículas apresentam alta dureza (2000 HV) reduzindo a resistência à fadiga do fio (AZEVEDO et al., 2009). O fato de existir oxigênio na totalidade da marca de contato indica que houve desgaste por *fretting* e não fadiga por *fretting*, ou seja, escorregamento total (*Gross Slip regime*). Isso pode explicar porque não ocorreu falha na marca, pois como exposto anteriormente o desgaste supera a fadiga, lixando e removendo as trincas prematuramente.



Title : IMG1
 Instrument : 7100F
 Volt : 20,00 kV
 Mag. : x 30
 Date : 2018/11/05
 Pixel : 1024 x 768



Acquisition Parameter
 Instrument : 7100F
 Acc. Voltage : 20.0 kV
 Probe Current: 1.00000 nA
 PHA mode : T2
 Real Time : 57.76 sec
 Live Time : 50.00 sec
 Dead Time : 13 %
 Counting Rate: 24461 cps
 Energy Range : 0 - 20 keV

ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
 Fitting Coefficient : 0.0369

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%	Compound	Mass%	Cation	K
O	0.525	32.17	0.19	44.43				33.9761
Mg	1.253	0.51	0.02	0.46				0.3966
Al	1.486	66.83	0.12	54.72				65.4087
Si	1.739	0.49	0.02	0.39				0.2186
Total		100.00		100.00				

Figura 4.9: Imagem da marca de *fretting* (MEV), espectrograma e quantidade em massa dos elementos presentes (EDS).

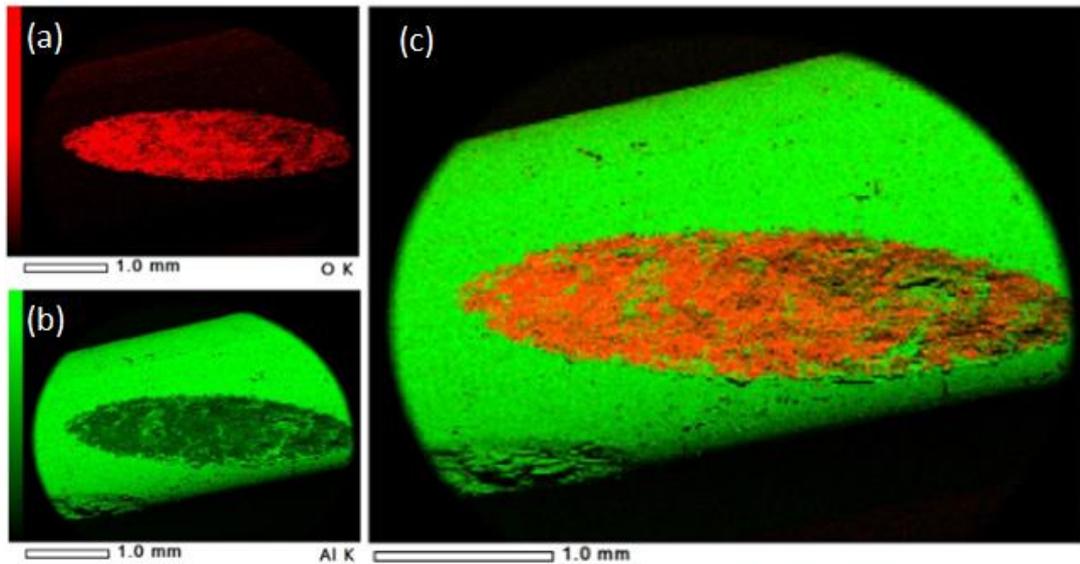


Figura 4.10: Mapeamento EDS do fio, (a) repartição do oxigênio na amostra analisada, (b) repartição do alumínio, (c) repartição do alumínio e do oxigênio conjunto.

A presença de alumina já é perceptível a olho nu, observando-se um pó escuro na zona central da marca de *fretting* após cada ensaio. Encontra-se também esse pó escuro na superfície dos mordentes inferiores da máquina MTS como mostrado na Figura 4.11.

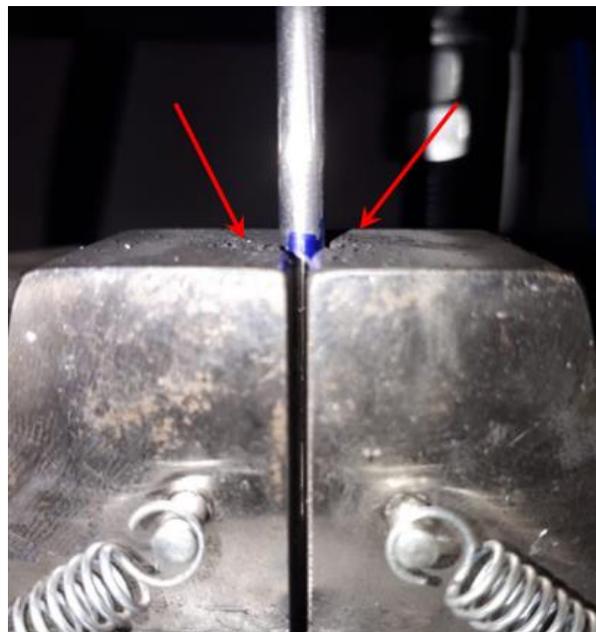


Figura 4.11: Presença de pó escura encima dos mordentes inferiores da máquina MTS.

A mesma análise foi realizada com os CPs que evoluíram até a falha. A partir da imagem do fio obtida com o MEV (Figura 4.12a) foi realizado um espectrograma destacando a repartição dos três principais elementos da liga de alumínio 6201-T81,

ou seja, o alumínio, o magnésio e o silício (Figuras 4.12b, 4.12d e 4.12e). Novamente a presença do oxigênio foi revelada com forte destaque na zona externa da marca de *fretting* (Figura 4.12c). Finalmente, pode-se comparar a concentração desses quatro elementos no Figura 4.12f, onde a zona externa da marca se destaca pela cor azul devido à presença do óxido de alumínio. Nota-se que a zona central permanece verde com forte concentração de alumínio e pouco óxido de alumínio, demonstrando que não houve oxidação pelo fato desta superfície não ter sido exposta ao ar. Resumindo, observa-se neste caso um regime de escorregamento parcial, caracterizado pela existência das zonas de escorregamento e de adesão perfeitamente destacadas. Lembrando que na zona de adesão não há movimento relativo entre as superfícies em contato, enquanto na zona de escorregamento as tensões são relacionadas pela lei de Amontons (1699). Como observado no capítulo 2 desse trabalho, é dentro dessa zona que as tensões são mais críticas.

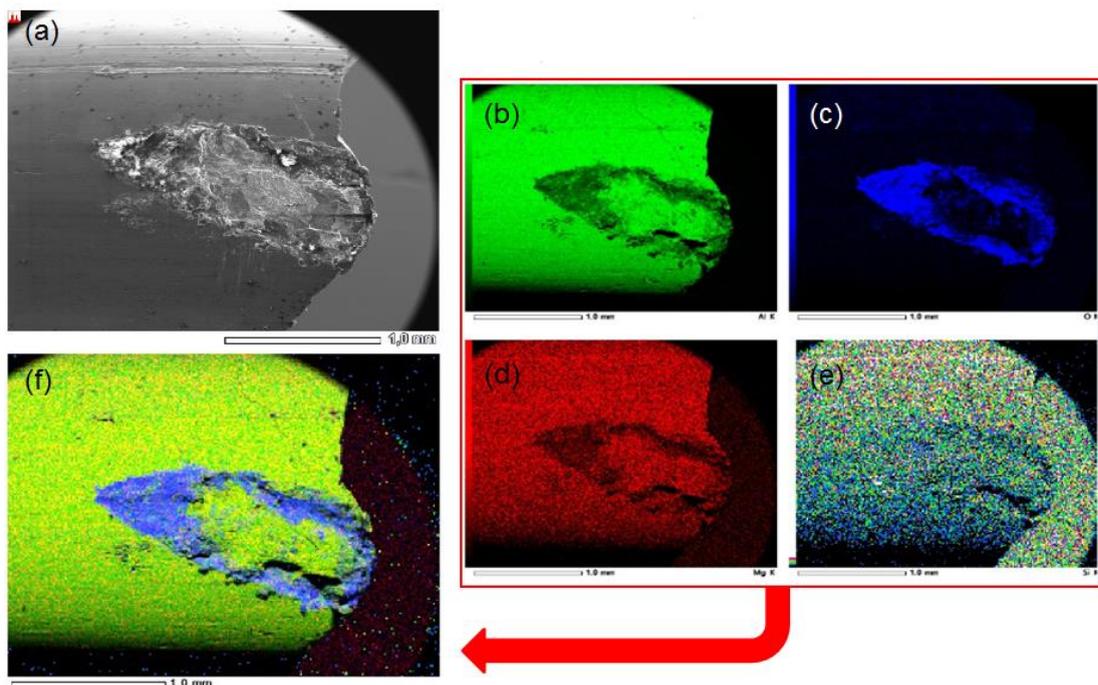


Figura 4.12: Mapeamento EDS do fio, (a) imagem do fio analisado, (b) repartição do alumínio, (c) repartição do oxigênio, (d) repartição do magnésio, (e) repartição do silício, (f) repartição Al + O + Mg + Si.

O mesmo resultado foi observado com o ensaio realizado com força normal de 500 N (CP-35: 681 033 ciclos, $\sigma_{m\acute{a}x} = 160$ MPa) como mostrado na Figura 4.13. A presença de oxigênio é destacada pela cor azul e o alumínio pela cor verde. A zona de adesão aparece claramente e observa-se a falha na ponta da marca elíptica dentro da zona de

escorregamento, demonstrando que também houve regime de escorregamento parcial para ensaios de *fretting* com uma força normal de 500 N.

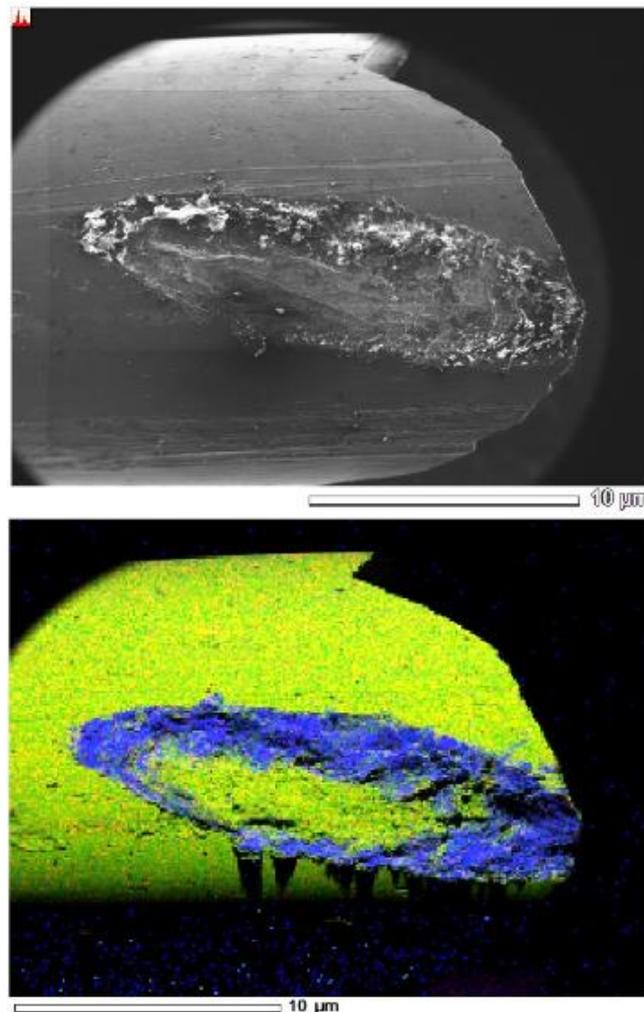


Figura 4.13: Imagem e mapeamento (Al + O) do corpo de prova CP-35- $P = 500\text{N}$.

Após análises das marcas de contato fio/fio, observaram-se evidências do mecanismo de fadiga por *fretting*. Deste modo o dispositivo atende seus objetivos previstos no projeto.

4.2.2. Avaliação das superfícies de falha

Ainda com o objetivo de avaliar o dispositivo, fez-se necessário analisar as superfícies de falha dos fios para verificar se as características de fratura por fadiga estavam presentes. Novamente, o auxílio do MEV foi determinante nessa etapa do projeto de pesquisa. Os mecanismos de falha buscados nas imagens obtidas são

aqueles descritos no capítulo 2 desse trabalho, ou seja, nucleação da trinca, propagação e ruptura final.

Na Figura 4.14, observam-se as diferentes áreas da superfície de fratura de fadiga por *fretting*. O ponto A representa a iniciação da trinca localizada na marca de contato fio/fio. A área B é a região de propagação da trinca que tende a se propagar de forma concêntrica ao ponto A. Finalmente a área C é a zona de fratura caracterizada pela forma irregular e a superfície rugosa.

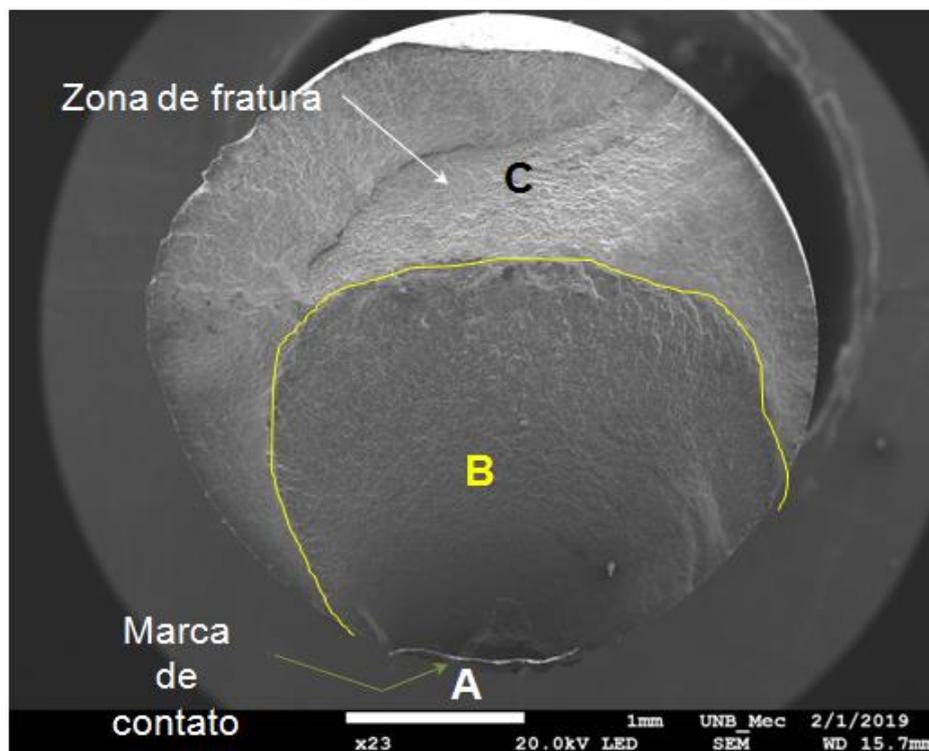


Figura 4.14: Zona de propagação da trinca por fadiga por *fretting*.

Apesar de não terem sido identificadas marcas de praia nas imagens obtidas no MEV, observa-se que a propagação da trinca evolui de forma concêntrica, tendo como origem a marca de contato fio/fio (Figura 4.15). Notou-se também a presença de marcas de sargento que apontam no início da trinca. Dentro da zona de propagação, nota-se a presença de micro trincas como mostrado na Figura 4.16d e 4.16e. Observa-se também a presença de *dimples*, característicos de uma fratura dúctil dentro da zona de fratura (Figuras 4.16b e 4.16c). O formato equiaxial desses *dimples* sugere que o modo de carregamento foi por tração (REINKE, 2017).

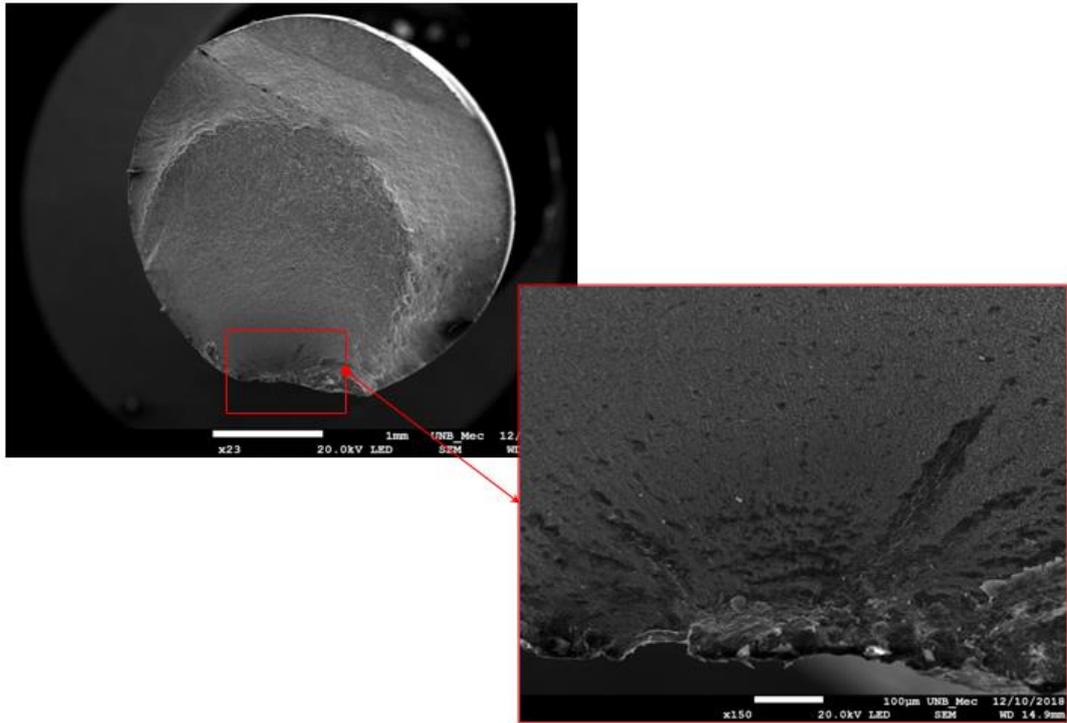


Figura 4.15: Propagação de trincas concêntricas à marca de contato fio/fio e marcas de sargento.

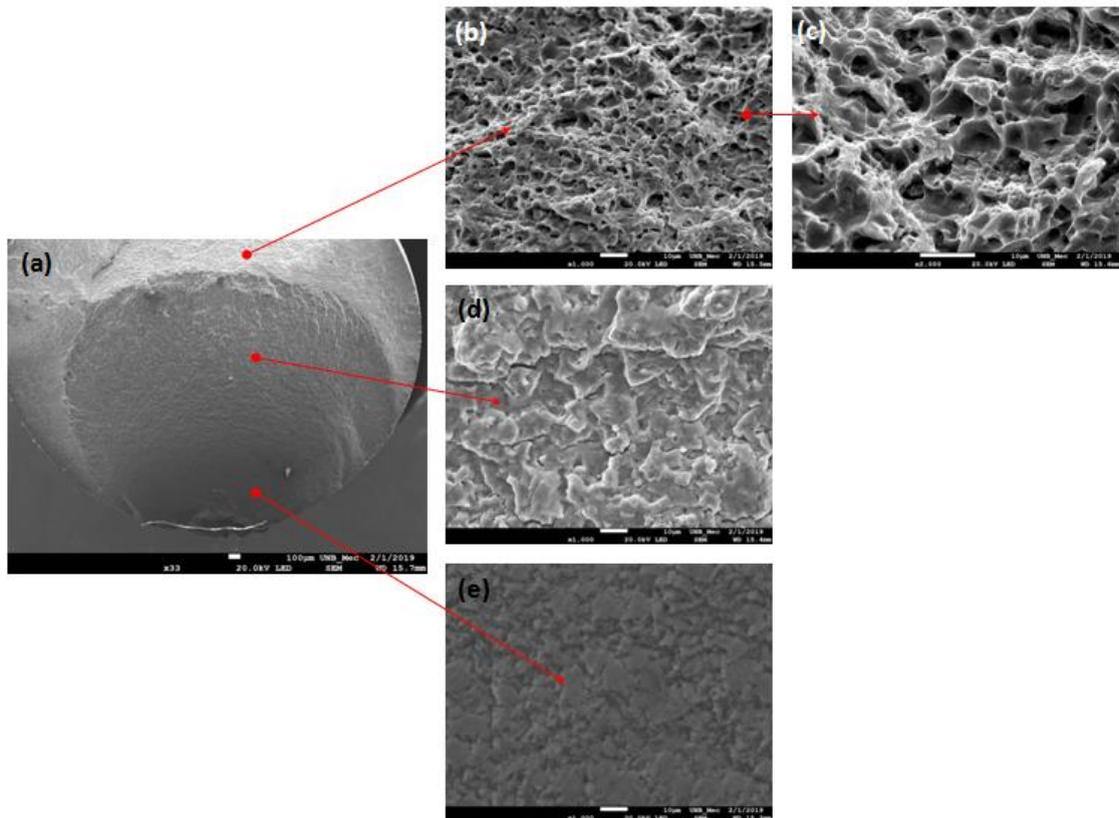


Figura 4.16: (a) Imagem da zona de propagação, (b) e (c) detalhes na zone de fratura (*dimples*), (d) e (e) detalhes da microestrutura na zona de propagação da trinca.

As Figuras 4.17 e 4.18 mostram o padrão de falha por fadiga por *fretting* observado nos ensaios realizados nesse trabalho de pesquisa. A iniciação da trinca ocorreu sempre na parte inferior da marca de contato fio/fio. Novamente observa-se a propagação de trinca concêntrica (Figura 4.18c) e os *dimples* na zona de fratura (Figura 4.18b). Portanto, o dispositivo de fadiga por *fretting* projetado nessa pesquisa cumpre as exigências previstas do caderno de encargos.

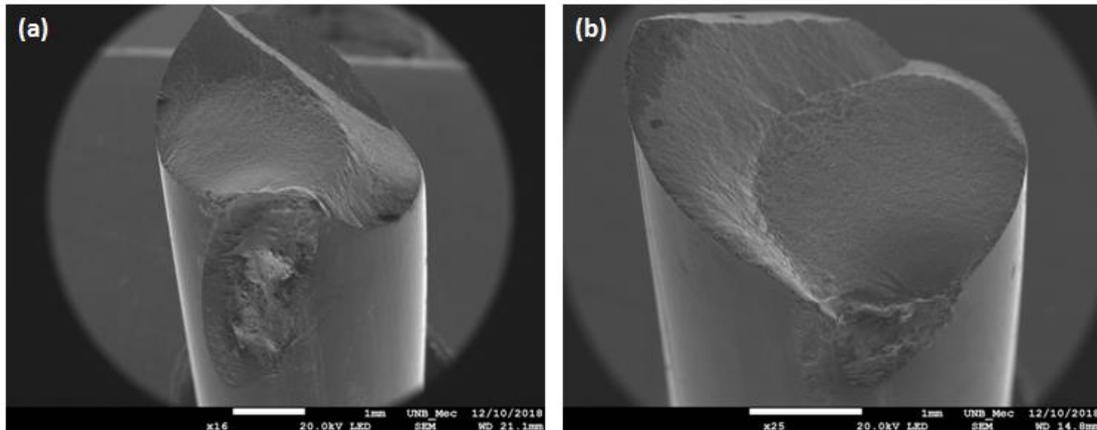


Figura 4.17: Marcas de falha por fadiga por *fretting*, (a) parte superior do CP, (b) parte inferior do CP.

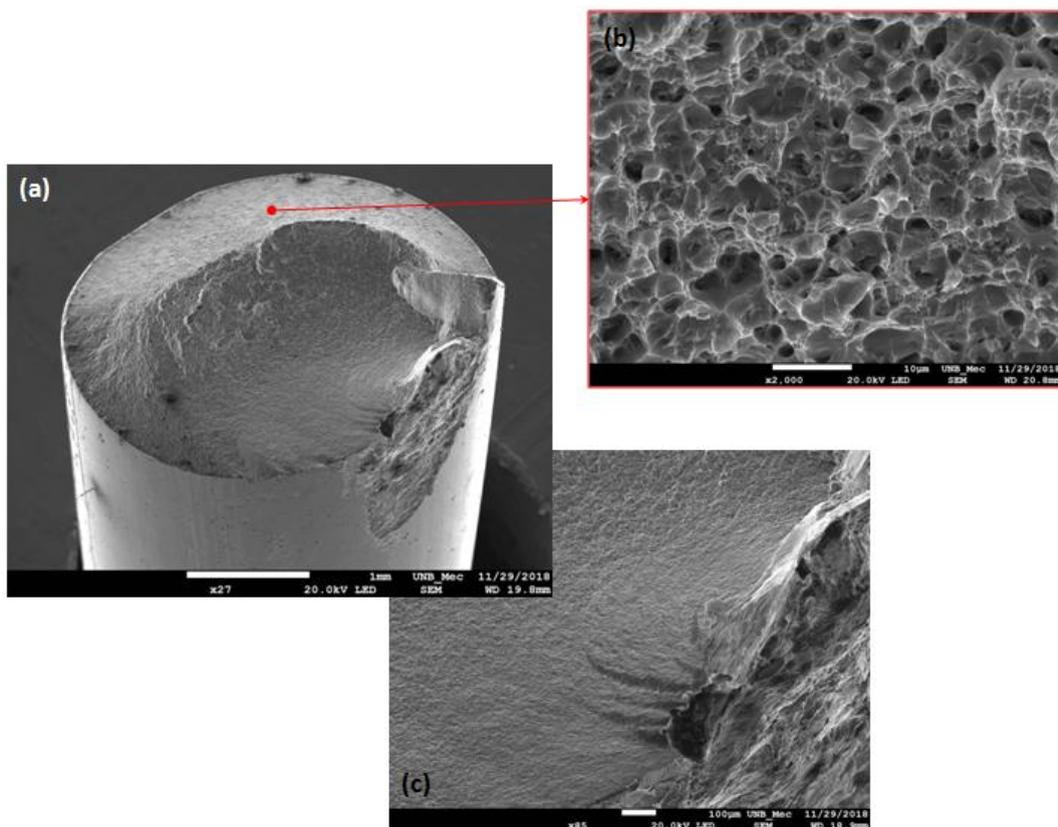


Figura 4.18: (a) Superfície de falha por fadiga por *fretting*, (b) detalhe na zona de fratura (*dimples*), (c) zoom na zona de contato fio/fio.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÕES

Para a avaliação simplificada da vida em fadiga de cabos condutores foi proposto neste trabalho estudar as condições de fadiga por *fretting* dos fios de alumínio que compõem os condutores supracitados. Para este fim, foi projetado, desenvolvido um dispositivo de fadiga por *fretting* em fios. O referido dispositivo foi testado num ensaio de fadiga por *fretting* em fio de liga de alumínio 6201. A concepção do dispositivo foi baseada numa revisão sobre fadiga por *fretting* em fios e da redação de um caderno de encargos. Após a fabricação e a instalação do dispositivo, foram conduzidos testes de avaliação. A partir dos resultados obtidos é possível concluir que o dispositivo:

- Atende plenamente as orientações e os requisitos propostos no caderno de encargos.
- Foi capaz de reproduzir um ensaio de fadiga por *fretting* em fios de cabos condutores de energia, induzindo marcas elípticas de *fretting* comparáveis às marcas geradas nestes cabos condutores. As marcas fio/fio geradas pelo dispositivo apresentam todas as características encontradas em camadas internas de cabo fraturado em serviço em fadiga sob *fretting*, caracterizada pela presença de oxido de alumínio e as zonas de escorregamento e adesão claramente definidas, confirmando a ocorrência do regime de escorregamento parcial. Tal regime foi identificado para uma carga normal de 250 N e de 500 N. As falhas ocorrem majoritariamente na parte inferior das marcas de *fretting*, ou seja, dentro da zona de escorregamento, como observado em trabalhos anteriores (ZHOU et al., 1995).
- As avaliações das superfícies de falha também mostraram as características de ruptura por fadiga. Todas as superfícies de fratura mostraram três regiões distintas (início da trinca na zona de contato, propagação de trinca e ruptura final).
- O dispositivo é capaz de registrar as cargas normais e tangenciais e os deslocamentos relativos produzidos pelo fenômeno de *fretting*.
- Os ensaios realizados com o dispositivo permitiram a construção de uma curva *S-N* permitindo avaliar a vida em fadiga dos fios testados (CAL 900). O

dispositivo desenvolvido neste trabalho permite, de forma inovadora e simplificada, avaliar a resistência à fadiga de fios individuais sob condições de *fretting*. Busca replicar, de forma simplificada, o contato que ocorre no ponto de conexão cabo/grampo e entre os fios individuais na linha de transmissão. Com os dados gerados, serão desenvolvidas etapas intermediárias para futura incorporação e validação dos novos modelos de previsão de vida em fadiga de cabos condutores usados em linhas de transmissão.

Esse trabalho permitiu, além da concepção do dispositivo, desenvolver uma técnica de análise de marcas de *fretting* através do uso do MEV e especificamente da opção de espectroscopia por dispersão de raios X (EDS). Isso permitiu mapear as imagens de marcas obtidas com o MEV e destacar a presença do alumínio e do oxigênio mostrando dessa forma as zonas de adesão e de escorregamento. Dependendo da presença ou ausência dessas zonas se pode concluir se houve escorregamento parcial ou total, ou seja, fadiga por *fretting* ou desgaste por *fretting*.

5.1. PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento do presente trabalho apontou novos caminhos para pesquisas futuras, que incluem:

- Realizar ensaios com duas sapatas e dois ângulos podendo assim simular dois contatos de um mesmo cabo condutor, ou seja, o contato da camada externa com a camada interna (primeira sapata com o CP) e o contato da primeira camada interna com a segunda camada interna (CP com a segunda sapata).
- Realizar ensaios controlando o deslocamento ou a força, ou seja, com operação do atuador superior da máquina MTS.
- Estudar os diferentes pontos onde ocorre a fadiga por *fretting* (Figura 1.8) dentro do grampo de suspensão, ou seja, contato entre fios de camada diferentes usando as opções de ângulos que oferece o dispositivo, contato entre fios da mesma camada ou até o contato entre um fio da camada interna de alumínio e um fio de aço da alma do cabo.
- Analisar que tipo de desgaste ocorre nas zonas de escorregamento observadas nesse trabalho.
- Efetuar ensaios em fios oriundos de cabos condutores de ligas distintas, incluindo fios de alta temperatura e compósitos.

- O dispositivo pode ter aplicações para outros tipos de cabos que não sejam condutores como os cabos de aço usados para projetos de pontes, elevadores e plataformas *offshore* já que o mecanismo de falha desses fios é similar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, A. M., Saavedra, A. R., Araújo, J. A., Murça, L. B., Fragelli, R. R., Frontin, S. O. e Rêgo, V. B., Prospecção e hierarquização de linhas de transmissão aplicadas a linhas de transmissão. 1^a ed. Brasília: Teixeira Gráfica, 2010.
- Adriano, V. S. R., (2017). Previsão de Vida à Fadiga em Fios de Alumínio Liga, Utilizados em Cabos Condutores, Contendo Descontinuidades Geométricas. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM-DM 262/2017, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Agati, P., Lerouge, F. e Mattera, N., *Mécanique appliquée – 2^{ème} édition*, édition Dunod, 2002.
- Amontons, G. *De la résistance causée dans les machines, tant par les frottements des parties qui les composent, que par la raideur des cordes qu'on y employe, et la manière de calculer l'un et l'autre. Mem. L'Académie R, 1699.*
- Araújo, J. A. (2000). *On the initiation and arrest fretting fatigue cracks* (Doctoral dissertation, University of Oxford).
- ASTM (2012). Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (e -N) Fatigue Data 1. Annual Book of ASTM Standards, v. i, n. (Reapproved):1–7.
- ASTM E1823. *Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing*. West Conshohocken, PA, 2013.
- Azevedo, C. R. F., & Cescon, T. (2002). Failure analysis of aluminum cable steel reinforced (ACSR) conductor of the transmission line crossing the Parana River. *Engineering Failure Analysis*, 9(6), 645-664.
- Azevedo, C.R.F. , Henriques, A. M. D., Pulino Filho, A. R., Ferreira, J. L. A., Araújo J. A. (2009), “*Fretting Fatigue in Overhead Conductors: Rig Design and Failure Analysis of a Grosbeak Aluminium Cable Steel Reinforced Conductor*”, *Engineering Failure Analysis*, 16, pp 136-151.
- Bellecave, J. (2015). *Stress Gradients In Fretting Fatigue* (Doctoral dissertation, École normale supérieure de Cachan-ENS (Cachan)).
- Cardou, A., Leblond, A., Goudreau, S., Cloutier, L., *Electrical Conductor Bending Fatigue at Suspension Clamp : a Fretting Fatigue Problem, Fretting Fatigue*, ESIS 18, *Mechanical Engineering Publications*, London, 1994, pp.357-266.

- Cattaneo, C. (1938). Sul Contatto di due Corpi Elastiche: Distribuzione Locale Degli Sforzi. *Reconditi dell'Accademia Nazionale dei Lincei*, 27, 474-478.
- Chevalier, A., *Guide du dessinateur industriel*, Hachette Technique, 1988.
- Chevalier, A., *Guide du dessinateur industriel*, Hachette Technique, 2004.
- CIGRE, SC22, WG04 (1985), "Guide for Endurance Tests of Conductors Inside Clamps", *Electra*, No100, pp. 77-86, May.
- CIGRE, SC22 (1988), "Final Report of Working Group 4, Endurance Capability of Conductors Inside Clamps", Paris, Jul 1988, 19p.
- CIGRE, WG B2.30 (2008), "Engineering Guidelines Relating to Fatigue Endurance Capability of Conductor/Clamp Systems", October.
- Cruzado, A., Hartelt, M., Wäsche, R., Urchegui, M.A. e Gómez, X., "Fretting wear of thin steel wires. Part 1: influence of contact pressure". *Wear* 268 (2010) 1409–1416.
- Cruzado, A., Hartelt, M., Wäsche, R., Urchegui, M.A. e Gómez, X., "Fretting wear of thin steel wires. Part 2: influence of crossing angle". *Wear* 273 (2011) 60–69.
- Cruzado, A., Urchegui, M. A., & Gómez, X. (2012). Finite element modeling and experimental validation of fretting wear scars in thin steel wires. *Wear*, 289, 26-38.
- Dowling, N. E. *Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*. 4ªEd. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2013.
- Fadel, A. A. Avaliação do Efeito de Tracionamento em Elevados Níveis de EDS Sobre a Resistência em Fadiga do Condutor IBIS (CAA 397,5 MCM). [s.l.] Tese de Doutorado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM.TD-005/2010, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010.
- Fadel, A. A., Rosa, D., Murça, L. B., Ferreira, J. L. A., & Araújo, J. A. (2012). Effect of high mean tensile stress on the fretting fatigue life of an Ibis steel reinforced aluminium conductor. *International Journal of Fatigue*, 42, 24-34.
- Ferry, B. M. C. (2017). *Study of the stress gradient and the size effect in fretting fatigue*.
- Garcia, A., Spim, J. A., Santos, C. A. (2000), "Ensaio dos Materiais", LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 247p.
- Gomes, F. B. (2016). Análise comparativa de aparelhos para medição de vibração em cabos condutores de energia e cálculo da vida remanescente em cabos.
- Hertz, H. R. (1882). *Über die Berührung fester elastischer Körper und Über die Härte*. *Verhandlung des Vereins zur Beförderung des Gewerbefleißes*, Berlin, 449.
- Hills, D.A. e Nowell, D. (1994), "Mechanics of Fretting Fatigue, Solid Mechanics and its Applications", *Kluwer Academic Publishers*

- Kalombo, R. B., Martínez, J. M. G., Ferreira, J. L. A., Da Silva, C. R. M., & Araújo, J. A. (2015). *Comparative fatigue resistance of overhead conductors made of aluminium and aluminium alloy: tests and analysis*. *Procedia Engineering*, 133, 223-232.
- Kalombo, R. B., Araújo, J. A., Ferreira, J. L. A., Da Silva, C. R. M., Alencar, R., & Capra, A. R. (2016). *Assessment of the fatigue failure of an All Aluminium Alloy Cable (AAAC) for a 230 kV transmission line in the Center-West of Brazil*. *Engineering Failure Analysis*, 61, 77-87.
- Kalombo, R. B., Pestana, M. S., Ferreira, J. L. A., da Silva, C. R. M., & Araújo, J. A. (2017). *Influence of the catenary parameter (H/w) on the fatigue life of overhead conductors*. *Tribology International*, 108, 141-149.
- Kalombo, R. B., Miranda, T. B., Rocha, P. H. C., Ferreira, J. L. A., da Silva, C. R. M., & Araújo, J. A. (2018). *Fatigue performance of overhead conductors tested under the same value of H/w parameter*. *Procedia engineering*, 213, 346-358.
- Lalonde, S., Guilbault, R., & Légeron, F. (2017). *Modeling multilayered wire strands, a strategy based on 3D finite element beam-to-beam contacts-Part I: Model formulation and validation*. *International Journal of Mechanical Sciences*, 126, 281-296.
- Martins, L. H. L., (2008) Projeto de aparato experimental e avaliação da resistência à fadiga sob condições de *fretting*. Dissertação de Mestrado, Publicação ENM.DM-125A-08, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 118p.
- Martins, L. H. L., Rossino, L. S., Filho, W. B., & Araújo, J. A. (2008). Detailed design of fretting fatigue apparatus and tests on 7050-T7451 Al alloy. *Tribology-Materials, Surfaces & Interfaces*, 2(1), 39-49.
- McGill, P.B. e Ramey, G.E. (1986), “*Effect of Suspension Clamp Geometry on Transmission Line Fatigue*”. *Journal of Energy Engineering*, v. 112, n. 3.
- Mendes, M. F. R. (2006). Estimativa do limite de fadiga sob condições de fretting considerando o método da distância crítica do ponto em uma abordagem por elementos finitos.
- Mindlin, R. D. (1949). *Compliance of elastic bodies in contact*. *J. Appl. Mech., ASME*, 16, 259-268.
- Muskhelishvili, N. I. (2013). *Some basic problems of the mathematical theory of elasticity*. Springer Science & Business Media.

- Nowell, D. (1988). *An analysis of fretting fatigue* (Doctoral dissertation, University of Oxford).
- Nunes Filho, E. L. S. D. (2016). Análise de tensões e deformações em fios de cabos condutores de linhas de transmissão.
- Poffenberger, J.C., and Swart, R. L. (1965), “*Differential Displacement and Dynamic Conductor Strain*”, IEEE Transactions Paper, Vol PAS 84, pp. 281-289
- Ramey, G.E. e Silva, J.M. (1981), “*An Experimental Evaluation of Conductor Aeolian Fatigue Damage Mitigation by Amplitude Reduction*”. *IEEE PES Summer Meeting*, Portland, Oregon, pp. 26-31, July.
- Ramey, G.E., Asce, A.M., Duncan, R.R. e Brunair, R.M. (1986). “*Experimental Evaluation of S-N Curves for Drake ACSR Conductor*”. *Journal of Energy Engineering*, v. 112, n. 02, pp. 138-151.
- Raouf, M. (1990), “*Axial Fatigue of Multilayered Strands*”. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 116, N°. 10, October.
- Reinke, G. (2017). Influência do tratamento térmico nas propriedades mecânicas de fios de alumínio liga usados em cabos condutores submetidos a ensaios de fadiga.
- Rocha, P. H. C., (2019). *Studies on fatigue of two contacting wires of overhead conductors: experiments and modeling*. Dissertação de mestrado, Publicação ENM.DM-210A/2019, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, DF, 62p.
- Spénlé, D. e Gourhant, R., *Guide du calcul en mécanique*, Hachette Technique, 1995-1996.
- Wang, D., Zhang, D. e Ge, S. (2013). “*Effect of displacement amplitude on fretting fatigue behavior of hoisting rope wires in low cycle fatigue*”. *Tribology International* 52 (2012) 178–189.
- Zhang, D. K., Geng, H., Zhang, Z. F., Wang, D. G., Wang, S. Q., & Ge, S. R. (2013). *Investigation on the fretting fatigue behaviors of steel wires under different strain ratios*. *Wear*, 303(1-2), 334-342.
- Zhang, D., Yang, X., Chen, K., & Zhang, Z. (2018). *Fretting fatigue behavior of steel wires contact interface under different crossing angles*. *Wear*, 400, 52-61.
- Zhou, Z. R., Cardou, A., Goudreau, S., e Fiset, M., (1994), “*Fretting patterns in a conductor-clamp contact zone*”. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 17, issue 6, pp. 661-669.

Zhou, Z. R., Goudreau, S., Cardou, A. e Fiset, M., (1995). “*Single wire fretting fatigue tests for electrical conductor bending fatigue evaluation*”. *Wear*, pp. 181-183, pp. 531-536.

Zhou, Z. R., Cardou, A., Goudreau, S., e Fiset, M., (1996), “*Fundamental investigations of electrical conductor fretting fatigue*”, *Tribology International*, 29, pp. 221–232.

ANEXOS

- ANEXO A -
NOMENCLATURA E DESENHOS TÉCNICOS DO
DISPOSITIVO

**UNB**

Projeto nº: 1022B00 (1022A00)

Folha 1 / 2

Nomenclatura: Dispositivo de Fadiga por Fretting de Fios - Carga de 3000 N

Tipo de revisão

Data

Novo Item N°36 - Modificações nos Itens 10, 11 e 33
Diversas alterações + Item 3911/06/2018
13/07/2018a
b

Nº Desenhos	Item	Qde	Denominação	Dimensões	Material	Fornecedor	Referência	Observações	Ver
	00								
1022A01	01	1	Maquina de ensaio universal	25 kN/15 kN	ACO AISI 1020	MTS		2 atuadores - 2 crossheads	a
1022B02	02	1	Placa Fretting Inferior		ACO SAE 1060			Oxidação negra	a
1022A03	03	4	Coluna		ACO AISI 1040			Temperado por indução com 60 a 63 HRC	
1022B04	04	2	Suporte fio Ibis		ACO AISI 1040			Oxidação negra	b
1022B05	05	2	Mesa deslizante		ACO ST 52	MITAY		Oxidação negra	a
1022A06	06	2	Placa de fixação dos SLED		ALUMINIO				
1022A07	07	1	Placa Fretting superior		ACO AISI 1020			Oxidação negra	
1022A08	08	2	Porca	M12 x 1,25	ACO AISI 1020			Oxidação negra	
1022A09	09	8	Arruela - Cunha		ACO			Oxidação negra	
1022B10	10	2	Placa para atuador		ACO AISI 1020			Oxidação negra	a
1022B11	11	2	Luva para Atuador		ACO AISI 1020			Oxidação negra	a
1022B12	12	1	Suporte rolamento		ACO AISI 1040			Oxidação negra	a
1022B13	13	2	Suporte fio CAL 900		ACO AISI 1040			Oxidação negra	a
1022A14	14	2	Arruela reforçada	Ø19 x Ø8,25 x 3	ACO AISI 1020			Oxidação negra	b
	15	1	Atuador de Fadiga	25 kN		MTS	242.04	Curso = 115 mm	
	16	5	Spiral Washer Set	25 kN		MTS	601.11B-20		
	17	1	Célula de carga - Load Cell	25 kN		MTS	661.19F-04		
	18	2	Garra - Grip	25 kN		MTS	647.02B		
	19	2	Célula de carga - Load Cell	25 kN		MTS	661.19F-03		
	20	1	Atuador de Fretting	15 kN		MTS	242.03	Curso = 115 mm	
	21	5	Conector Stub (Fuso)	M12 x 1,25		MTS			
	22	2	Atuador compacto pneumático	Ø80		METAL WORK	CMPC	Curso = 25 mm	
	23	2	Célula de carga			HONEYWELL	Modelo 53 - 1000 lb		
	24	1	Rolamento de agulha	Ø28 x Ø12 x 12		SKF	PNA 12/28		
	25	24	Porca H-M16	M16	ACO				
	26	12	Arruela M16U	Ø32 x Ø16,5 x 3	ACO				
	27	4	Suporte Linear Fechado Duplo	Ø20	DURALUMINIO	MITAY	SLED 20		
	28	16	Parafuso Cho M6 x 20	M6 x 20	ACO				
	29	2	Olhal fixo	M8	ACO	HELEVAR			
	30	10	Parafuso Cho M10 x 35	M10 x 35	ACO				
	31	2	Parafuso Cho M8 x 20	M8 x 20	ACO				
	32	16	Parafuso Cho M5 x 16	M5 x 16	ACO	MITAY			
1022B33	33	2	Tirinhos	T16 x 240 mm	ACO	MITAY	T16 x 240		a
	34	12	Parafuso Cho M3 x 10	M3 x 10	Classe 12.9				a
	35	12	Parafuso Allen M3 rebavado	M3 (passo = 0,5)	ACO			Rebavado	
	36	10	Parafuso M8 x 16	M8 x 16	ACO				
1022A37	37	1	Eixo para rolamento		ACO AISI 1020			Oxidação negra	
	38	1	Anel Elástico	Ø12	ACO				
	39	2	Porca baixa M10	Altura = 6 mm	ACO				



UNB

Projeto nº: 1022B00 (1022A00)

Nomenclatura: Dispositivo de Fiação por Fretting de fios - Carga de 3000 N

Folha 2/2

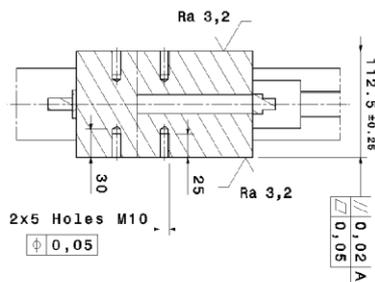
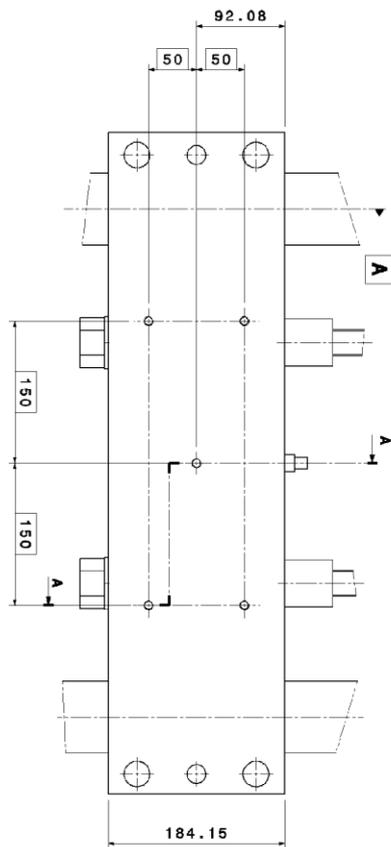
Tipo de revisão

Data

Nº Desenhos	Item	Qtd	Denominação	Dimensões	Material	Fornecedor	Referência	Observações	Ind
1022B40	40	4	Bucha		Bronze				
1022B41	41	4	Presilha		Aço				
	42	8	Parafuso CHc M8 x 25	M8 x 25	Aço				
	43	8	Parafuso H M8 x 25	M8 x 25	Aço				
	44	8	Contra Porca M8	M8	Aço				
	45								
	46								
	47								
	48								
	49								
	50								
	51								
	52								
	53								
	54								
	55								
	56								
	57								
	58								
	59								
	60								
	61								
	62								
	63								
	64								
	65								
	66								
	67								
	68								
	69								
	70								
	71								
	72								
	73								
	74								
	75								
	76								
	77								
	78								
	79								

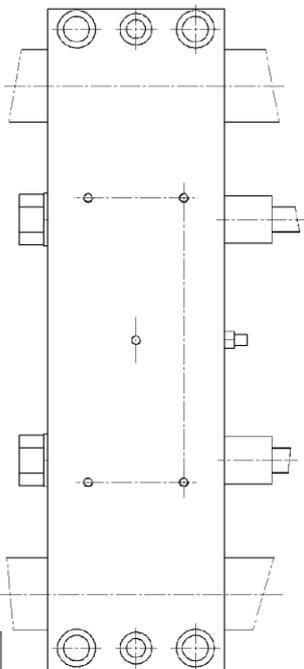
DATA	TIPO DE REVISÃO	REV.

Detalhe da trave intermediária
Posição dos furos M10
Escala: 1:3

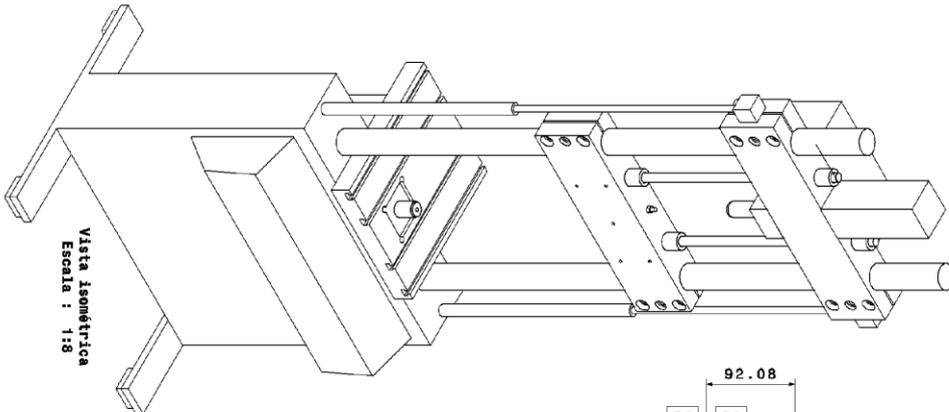


Valido para fabricação

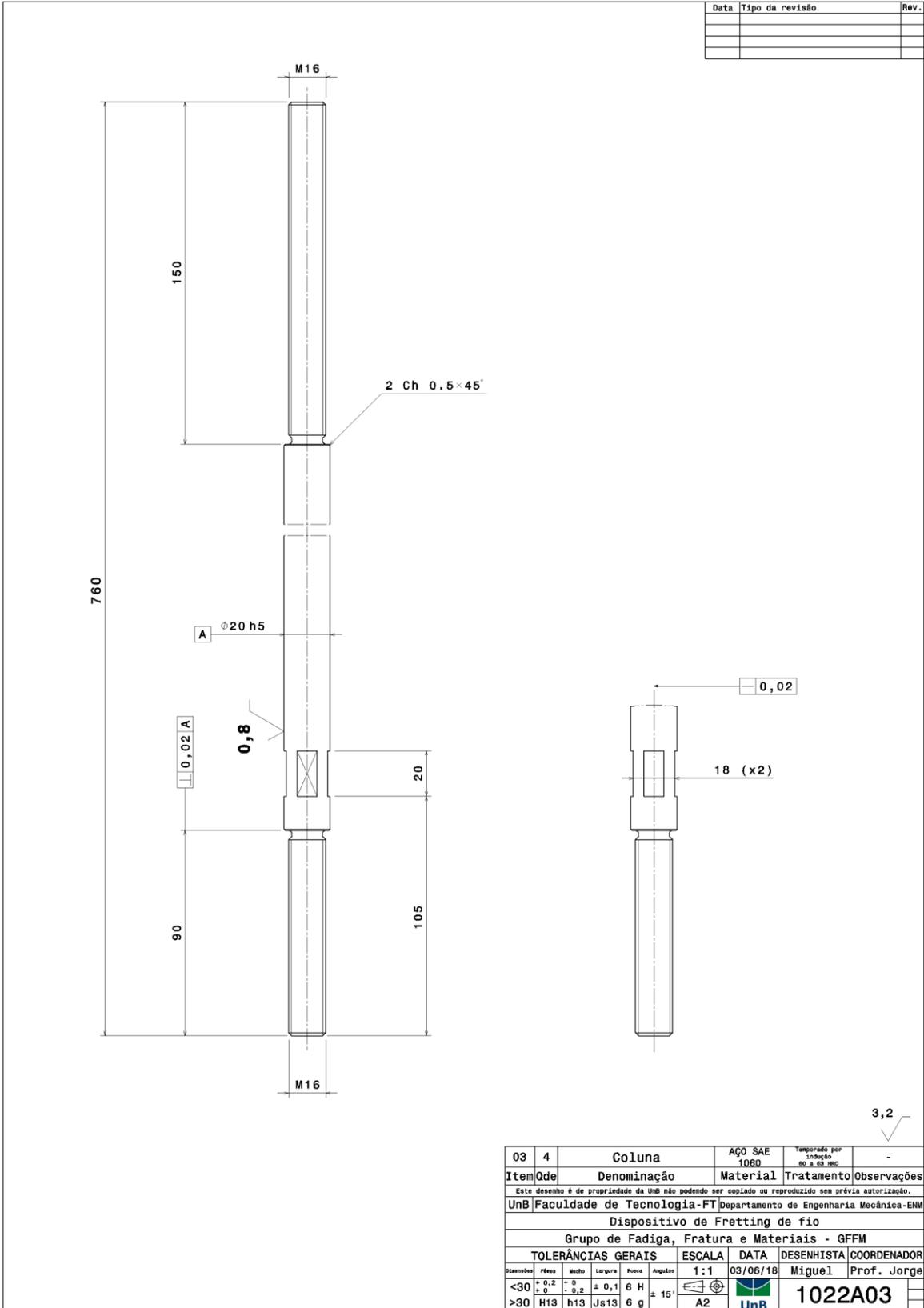
Vista oposta B
Escala: 1:3



Vista Isométrica
Escala: 1:8



01	1	Maquina de ensaios	-	100-313-411	MTS
Item Qde	Denominação	Material	Referência	Fornecedor	
Este desenho é de propriedade da UHB não podendo ser copiado ou reproduzido sem previa autorização.					
UHB Faculdade de Tecnologia-FT Departamento de Engenharia Mecânica-EM					
Dispositivo de Fretting de fio					
Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais - GFFM					
TOLERÂNCIAS GERAIS		ESCALA	DATA	DESENHISTA	COORDENADOR
<30	+0,2 -0	1:3	12/09/15	Miguel	Prof. Osme
>30	H13 Jst13	A2	UHB	1022A01	

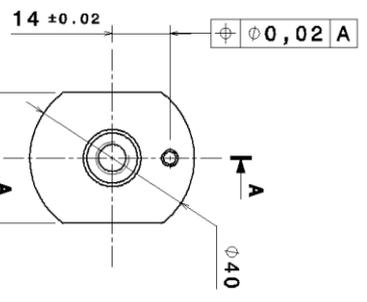
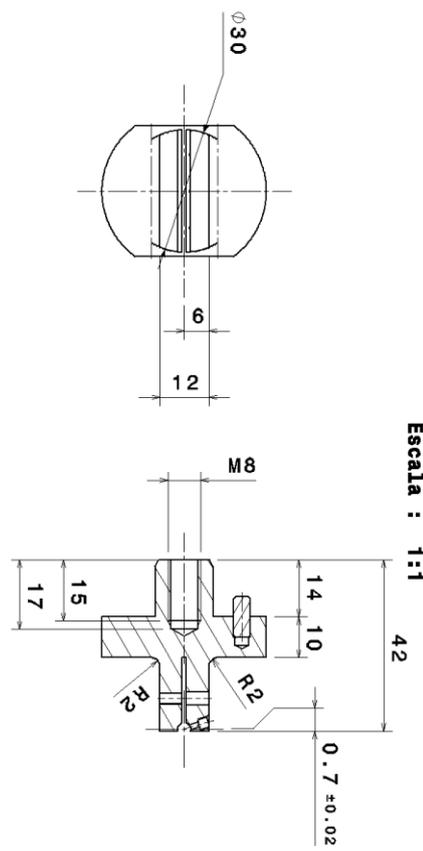


Data	Tipo da revisão	Rev.

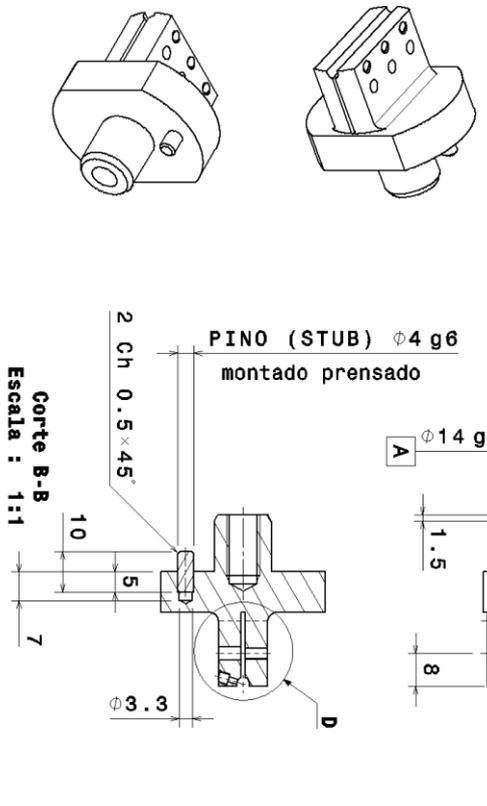
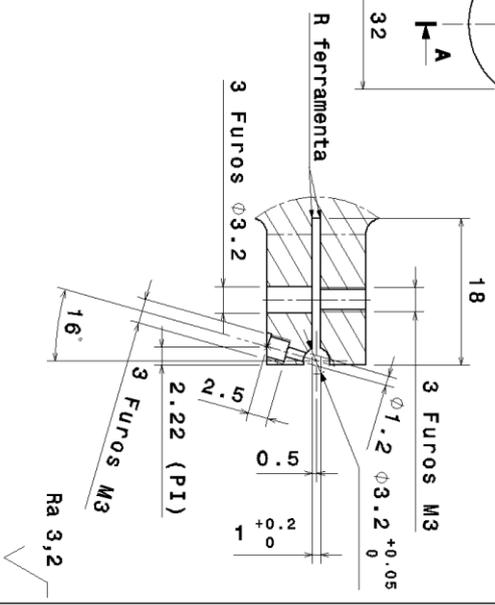
03	4	Coluna	AÇO SAE 1060	Temporada por Indicação ao SAE INC.	-
Item	Qde	Denominação	Material	Tratamento	Observações
Este desenho é de propriedade da UnB não podendo ser copiado ou reproduzido sem prévia autorização.					
UnB Faculdade de Tecnologia-FT Departamento de Engenharia Mecânica-EM					
Dispositivo de Fretting de fio					
Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais - GFFM					
TOLERÂNCIAS GERAIS			ESCALA	DATA	DESENHISTA COORDENADOR
Desenho	Faixa	Acerto	Diâmetro	Angulo	1:1
<30	0,2	0	± 0,1	6 H	03/06/18
>30	H13	h13	J613	6 g	Miguel
					Prof. Jorge
					1022A03
					UnB

3,2

Corte A-A
Escala : 1:1

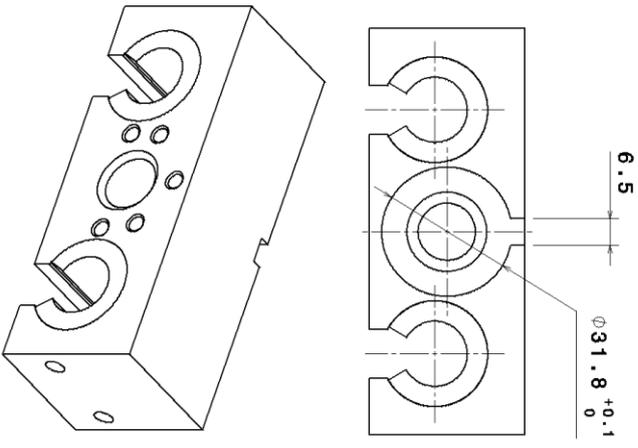
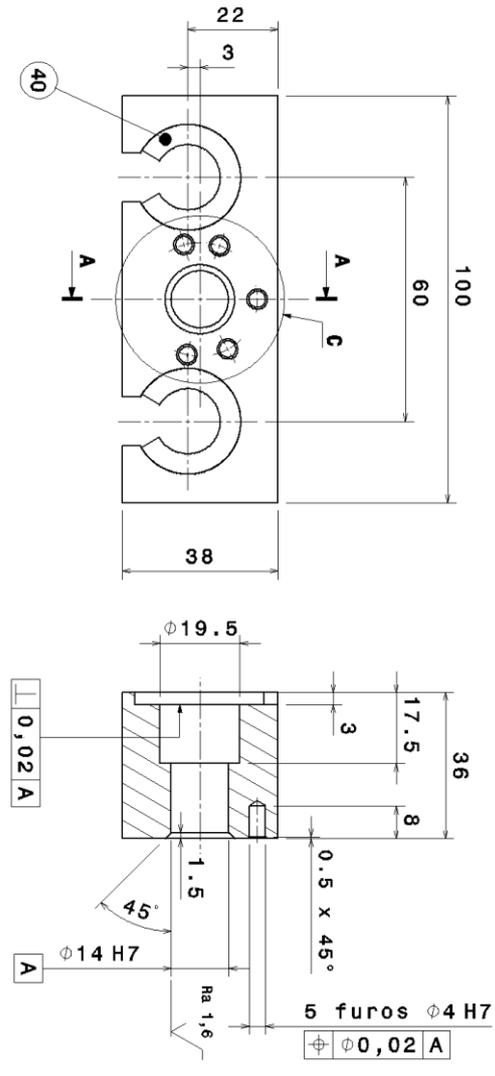


Detalhe D
Escala : 2:1

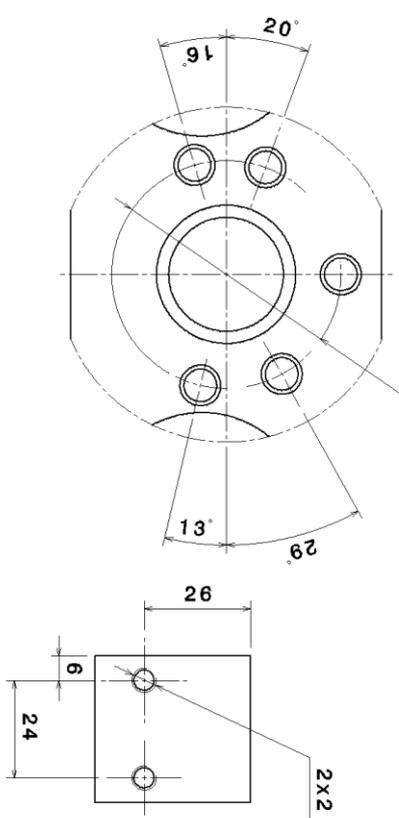


04	2	Suporte de fio IBIS	Aço AISI 1040	Oxidação negra	-																											
Item Qde	Denominação		Material	Tratamento	Observações																											
Este desenho é de propriedade da UNB não podendo ser copiado ou reproduzido sem prévia autorização.																																
UNB Faculdade de Tecnologia-FT			Departamento de Engenharia Mecânica-EMM																													
Dispositivo de fretting de fio																																
Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais - GFFM																																
TOLERÂNCIAS GERAIS			ESCALA	DATA	DESENHISTA/COORDENADOR																											
1:1			17/05/18	Miguel	Prof. Cosme																											
UNB			1022A04																													
<table border="1"> <tr> <th>Dimensões</th> <th>Faixa</th> <th>Método</th> <th>Limite</th> <th>Risco</th> <th>Angulos</th> </tr> <tr> <td><30</td> <td>± 0,2</td> <td>+ 0</td> <td>± 0,1</td> <td>6 H</td> <td>± 15'</td> </tr> <tr> <td>>30</td> <td>H13</td> <td>h13</td> <td>Js13</td> <td>6 g</td> <td>A3</td> </tr> </table>			Dimensões	Faixa	Método	Limite	Risco	Angulos	<30	± 0,2	+ 0	± 0,1	6 H	± 15'	>30	H13	h13	Js13	6 g	A3	<table border="1"> <tr> <th>Rev.</th> <th>Data</th> <th>Tipo da revisão</th> </tr> <tr> <td>a</td> <td>18/08/18</td> <td>Material e dimensões</td> </tr> <tr> <td>b</td> <td>27/08/18</td> <td>Mudança das rosca M3 para M8</td> </tr> </table>			Rev.	Data	Tipo da revisão	a	18/08/18	Material e dimensões	b	27/08/18	Mudança das rosca M3 para M8
Dimensões	Faixa	Método	Limite	Risco	Angulos																											
<30	± 0,2	+ 0	± 0,1	6 H	± 15'																											
>30	H13	h13	Js13	6 g	A3																											
Rev.	Data	Tipo da revisão																														
a	18/08/18	Material e dimensões																														
b	27/08/18	Mudança das rosca M3 para M8																														

Rev.	Rev.	Data	Tipo da revisão
a		18/08/18	Novos ângulos para furos Ø4H7
b		24/07/19	4 Furos M6 para regulagem de folga



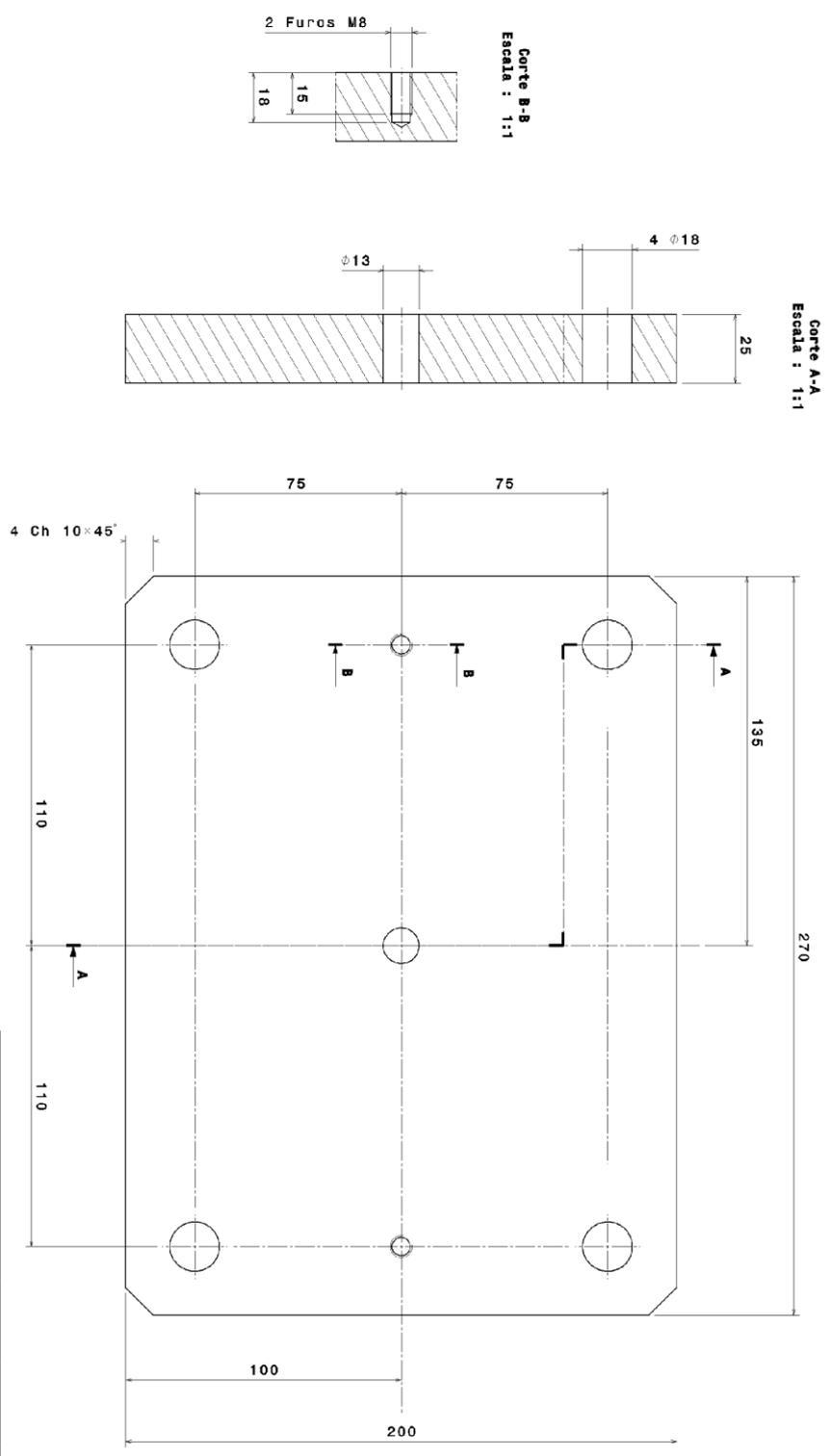
Detalhe C
Escala : 2:1



2x2 Furos M6

Item/Id	2	Mesa Deslizante	AÇO ST52	-	MITTAY
Denominação	Mesa Deslizante				
Material	AÇO ST52				
Tratamento	-				
Observações	Este desenho é de propriedade da UnB não podendo ser copiado ou reproduzido sem prévia autorização.				
UNB Faculdade de Tecnologia-FT Departamento de Engenharia Mecânica-EMM					
Dispositivo de Fadiga por Fretting de fios - Carga 3000 N					
GFFM					
TOLERÂNCIAS GERAIS	ESCALA	DATA	DESENHISTA	COORDENADOR	
Diametros	1:1	22/05/18	Miguel	Prof. Jorge	
folhas					
unho					
Langura					
Rosca					
Angulos					
<30	± 0,2	+ 0	± 0,1	6 H	± 15'
30	± 0	- 0,2	± 0,1	6 g	± 15'
>30	H13	h13	Js13	6 g	± 15'
UNB					
1022B05					
a	b				

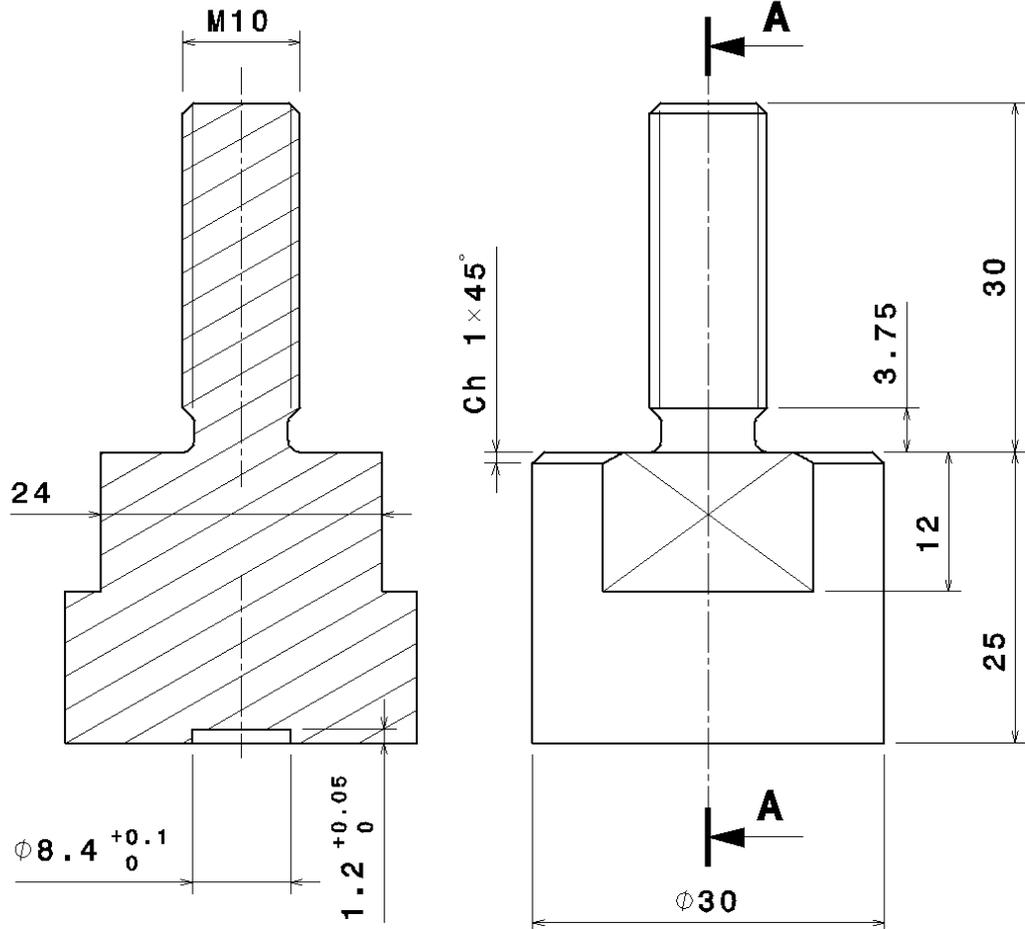
DATA	TIPO DE REVISÃO	REV.



07	1	Placa Superior Fretting	Aço AISI 1020	Indevidido negro	-
Item Ode		Denominação	Materiais	Tratamento/observações	
Este desenho é de propriedade de UNB não podendo ser cópiado ou reproduzido sem prévia autorização.					
UnB Faculdade de Tecnologia - FT Departamento de Engenharia Mecânica - EM					
Dispositivo de fretting de fio					
Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais - GFFM					
TOLERÂNCIAS GERAIS		ESCALA	DATA	DESENHISTA/COORDENADOR	
<30	± 0,2	1:1	03/09/18	Miguel	Prof. Jorge
>30	H13	h13	Jst13	6 g	A2
UNB		UNB		1022A07	

Data	Tipo da revisão	Rev.
11/06/18	Aumento da altura da peça	a

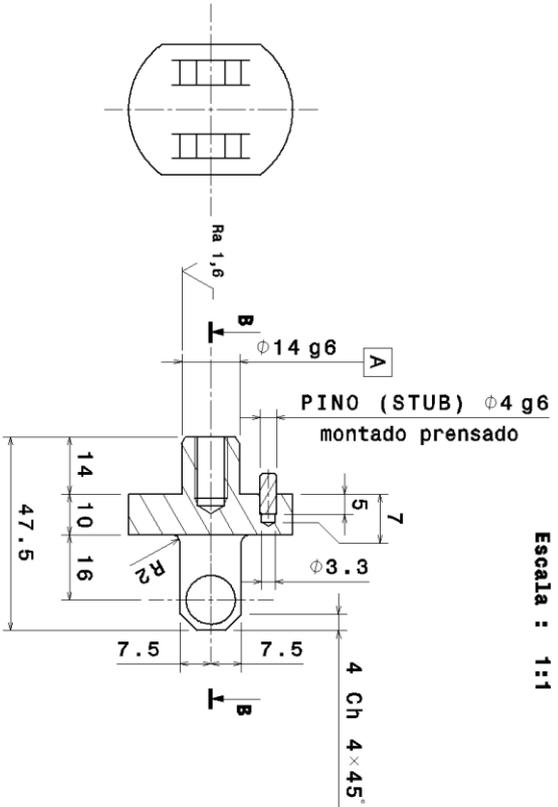
Corte A-A
Escala : 2:1



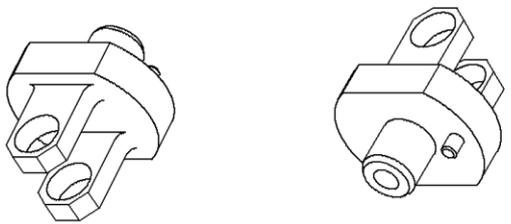
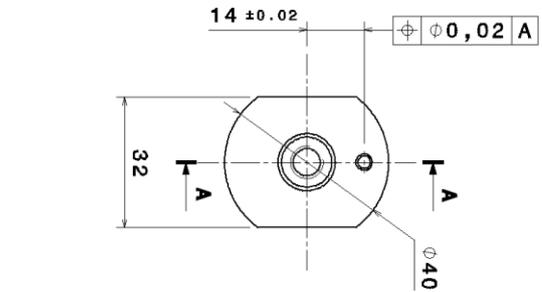
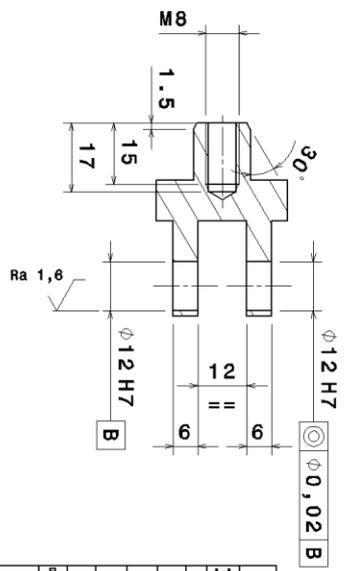
11	2	Luva para atuador	AÇO AISI 1020	Oxidação negra	-
Item	Qde	Denominação	Material	Tratamento	Observações
Este desenho é de propriedade da UnB não podendo ser copiado ou reproduzido sem prévia autorização.					
UnB		Faculdade de Tecnologia-FT	Departamento de Engenharia Mecânica-ENM		
Dispositivo de Fadiga por Fretting de fios - Carga 3000 N					
Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais - GFFM					
TOLERÂNCIAS GERAIS			ESCALA	DATA	DESENHISTA
			2:1	22/05/18	Miguel
					Prof. Jorge
Dimensões	Fêmea	Macho	Largura	Rosca	Angulos
<30	+0,2 +0	+0 -0,2	±0,1	6 H	± 15'
>30	H13	h13	Js13	6 g	
			A4	UnB	1022B11
					a

Rev.	Rev.	Data	Tipo de revisão
a		18/08/18	Novo material e posição do pino

Corte A-A
Escala : 1:1

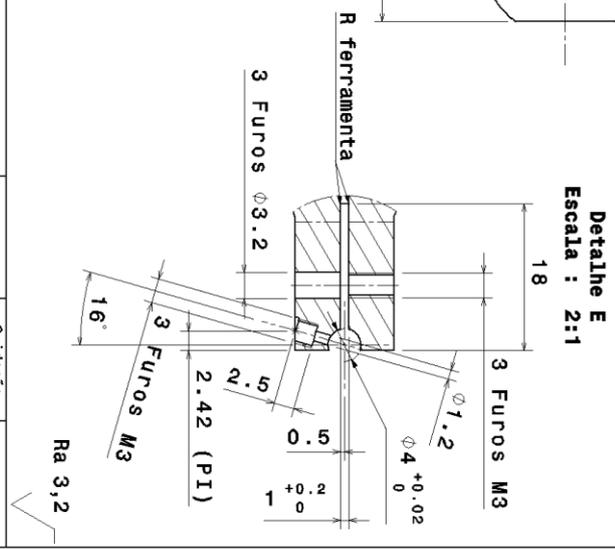
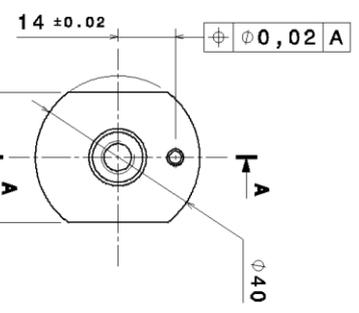
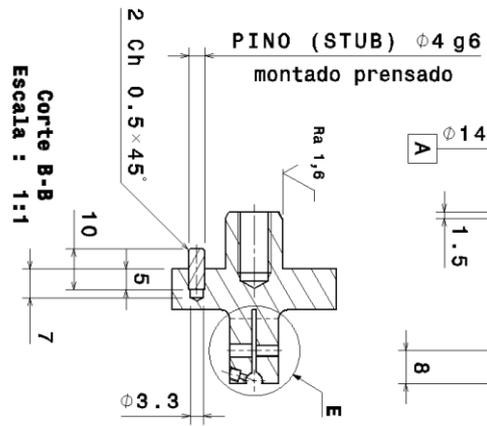
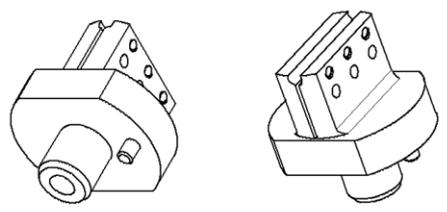
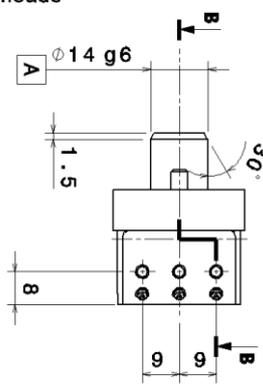
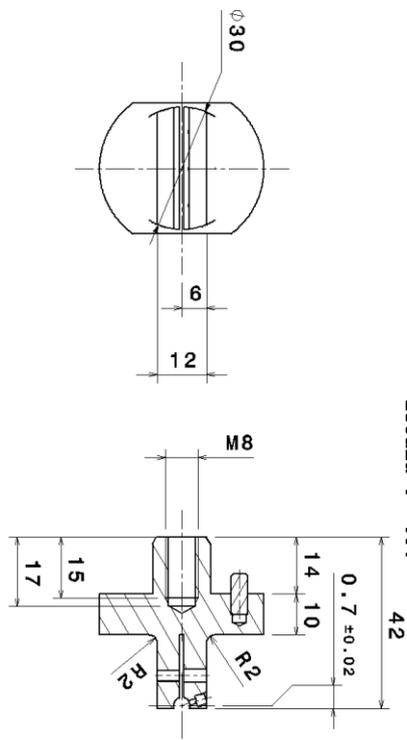


Corte B-B
Escala : 1:1



12	1	Suporte Rolamento	Aço AISI 1040	Oxidação negra	-
Item Qde		Denominação	Material	Tratamento	Observações
Este desenho é de propriedade da UnB não podendo ser copiado ou reproduzido sem prévia autorização.					
UnB		Faculdade de Tecnologia-FT	Departamento de Engenharia Mecânica-EMM		
Dispositivo de Fadiga por Fretting de fios					
GFFM					
TOLERÂNCIAS GERAIS		ESCALA	DATA	DESENHISTA COORDENADOR	
Diâmetros		1:1	23/05/18	Miguel	Prof. Cosme
<30	+0,2 -0	±0	6 H	±15'	
>30	H13	h13	Js13	6 g	
		A3	UnB	1022B12	a

Corte A-A
Escala : 1:1

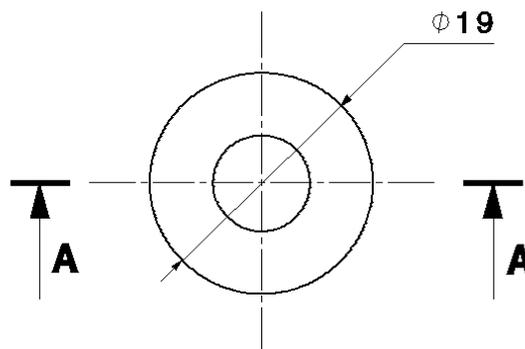
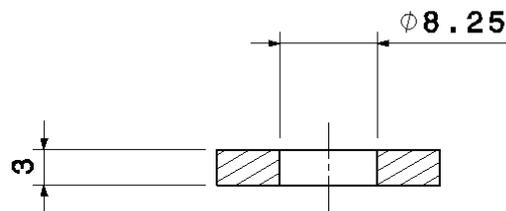


Rev.	Data	Tipo da revisão
a	18/08/18	Material e dimensões
b	28/08/18	Mudança das rosca M1 para M3

13	2	Suporte de fio CAL 900	Aço AISI 1040	Oxidação negra	-
Item Qde	Denominação	Material	Treatmento	Observações	
Este desenho é de propriedade da UNB não podendo ser copiado ou reproduzido sem prévia autorização.					
UNB Faculdade de Tecnologia-FT		Departamento de Engenharia Mecânica-EMM			
Dispositivo de fretting de fio					
Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais - GFFM					
TOLERÂNCIAS GERAIS		ESCALA	DATA	DESENHISTA	COORDENADOR
1:1		26/05/18	Miguel	Prof. Cosme	
UNB		1022B13			
		a			

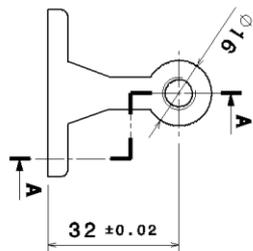
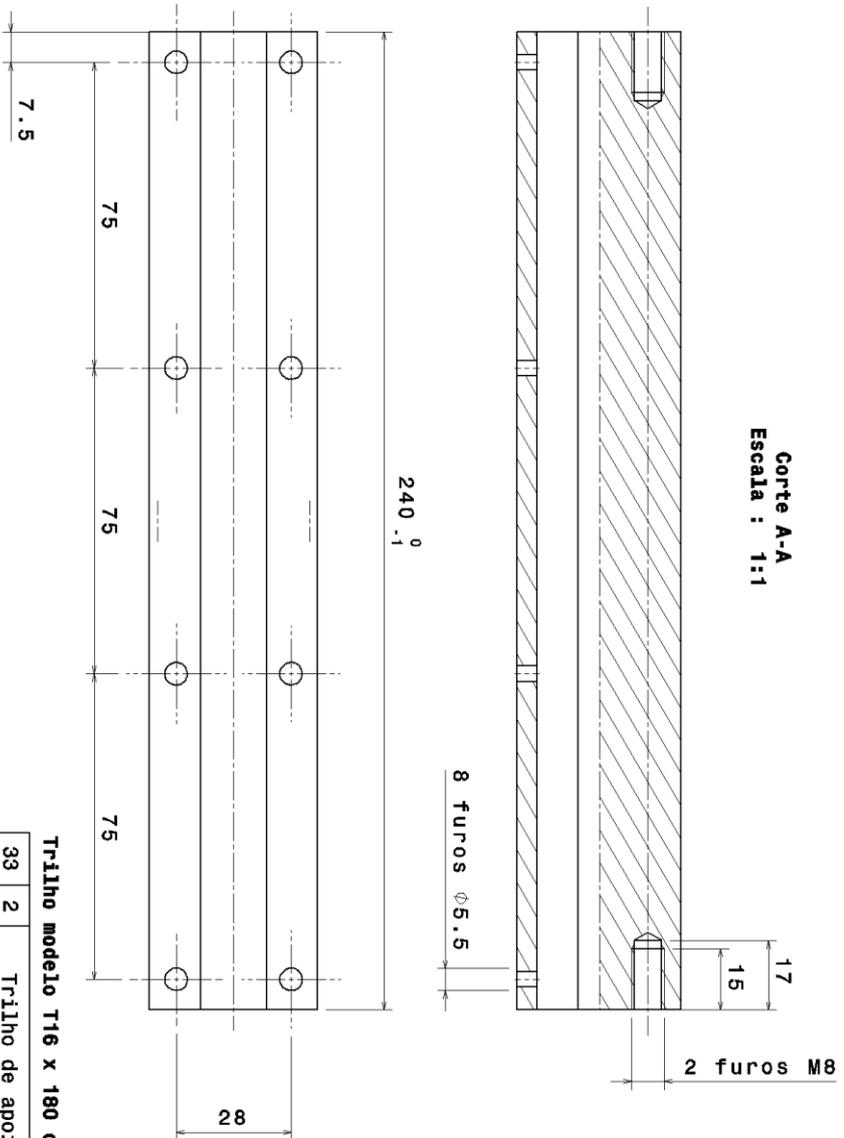
Data	Tipo da revisão	Rev.

Corte A-A
Escala : 2:1



14	2	Arruela Reforçada	AÇO AISI 1020	Oxidação negra	-
Item	Qde	Denominação	Material	Tratamento	Observações
Este desenho é de propriedade da UnB não podendo ser copiado ou reproduzido sem prévia autorização.					
UnB	Faculdade de Tecnologia-FT	Departamento de Engenharia Mecânica-ENM			
Dispositivo de Fretting de fio					
Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais - GFFM					
TOLERÂNCIAS GERAIS			ESCALA	DATA	DESENHISTA
			2:1	26/05/18	Miguel
COORDENADOR			Prof. Jorge		
Dimensões	Fôrnea	Macho	Largura	Rosca	Ângulos
<30	+ 0,2 + 0	+ 0 - 0,2	± 0,1	6 H	± 15'
>30	H13	h13	Js13	6 g	
			A4		
			1022A14		

Corte A-A
Escala : 1:1

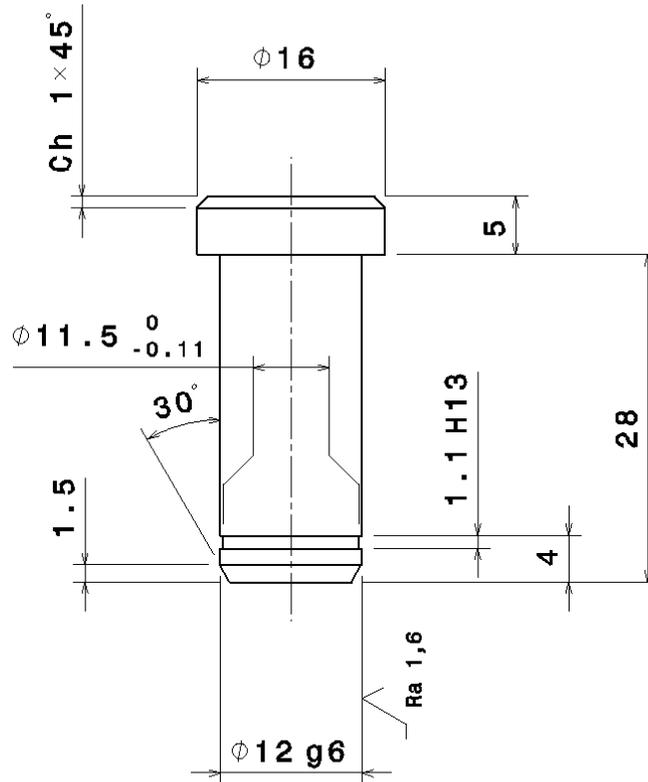


Trilho modelo T16 x 180 da MITAY

33	2	Trilho de apoio	AÇO	-	MITAY																		
Item/Code	Denominação		Material	Tratamento/Observações																			
Este desenho é de propriedade da Unb não podendo ser copiado ou reproduzido sem prévia autorização.																							
UNB Faculdade de Tecnologia-FT			Departamento de Engenharia Mecânica-EMM																				
Dispositivo de Fadiga por Fretting de fios - Carga 3000 N																							
GFFM																							
TOLERÂNCIAS GERAIS			ESCALA	DATA	DESENHISTA (COORDEENADOR)																		
<table border="1"> <tr> <th>Dimensões</th> <th>Furos</th> <th>Metido</th> <th>Longura</th> <th>Rosca</th> <th>Ângulos</th> </tr> <tr> <td><30</td> <td>+0,2 -0</td> <td>+0</td> <td>± 0,1</td> <td>6 H</td> <td>± 15'</td> </tr> <tr> <td>>30</td> <td>H13</td> <td>h13</td> <td>Js13</td> <td>6 g</td> <td></td> </tr> </table>			Dimensões	Furos	Metido	Longura	Rosca	Ângulos	<30	+0,2 -0	+0	± 0,1	6 H	± 15'	>30	H13	h13	Js13	6 g		1:1	22/05/18	Miguel
Dimensões	Furos	Metido	Longura	Rosca	Ângulos																		
<30	+0,2 -0	+0	± 0,1	6 H	± 15'																		
>30	H13	h13	Js13	6 g																			
			A3		1022B33																		
					a																		

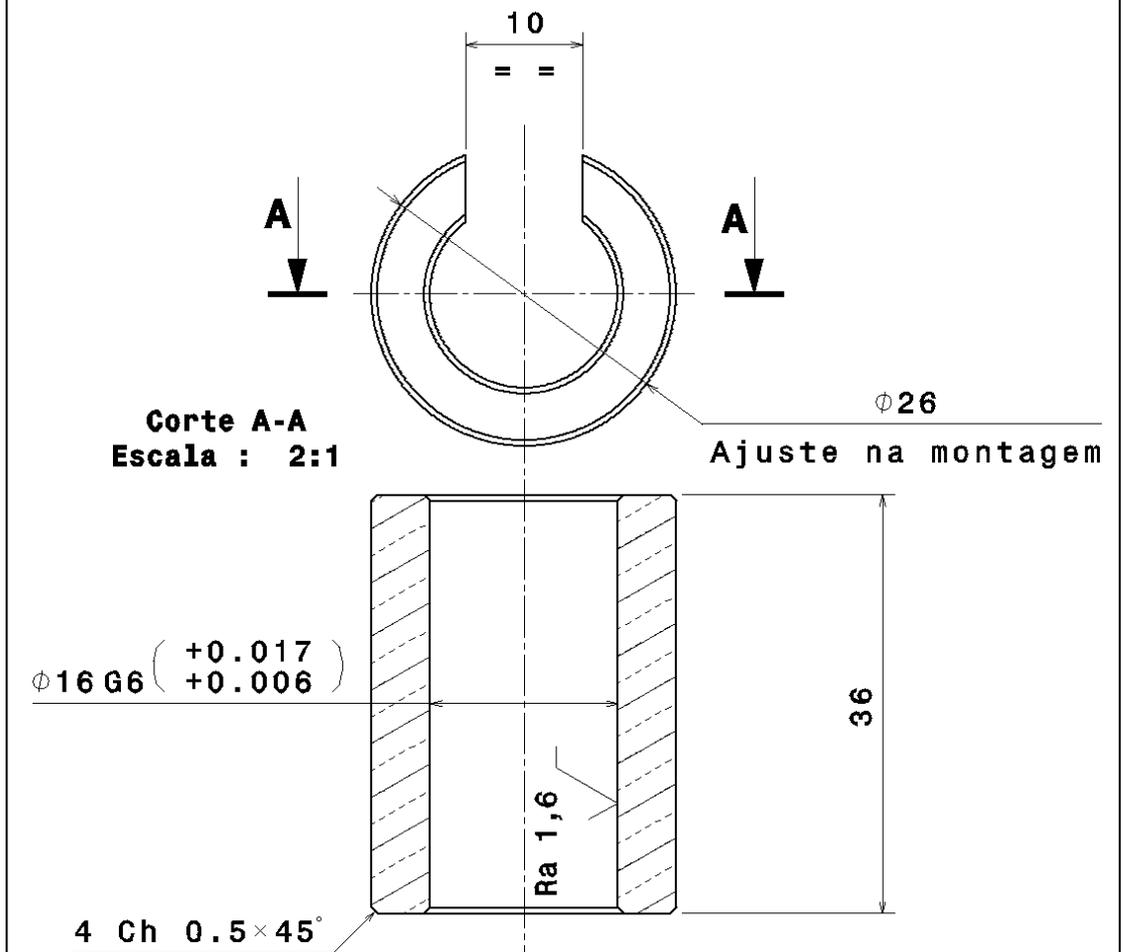
DATA	Tipo da revisão	Rev.
13/06/18	2 furos M8	a

Data	Tipo da revisão	Rev.

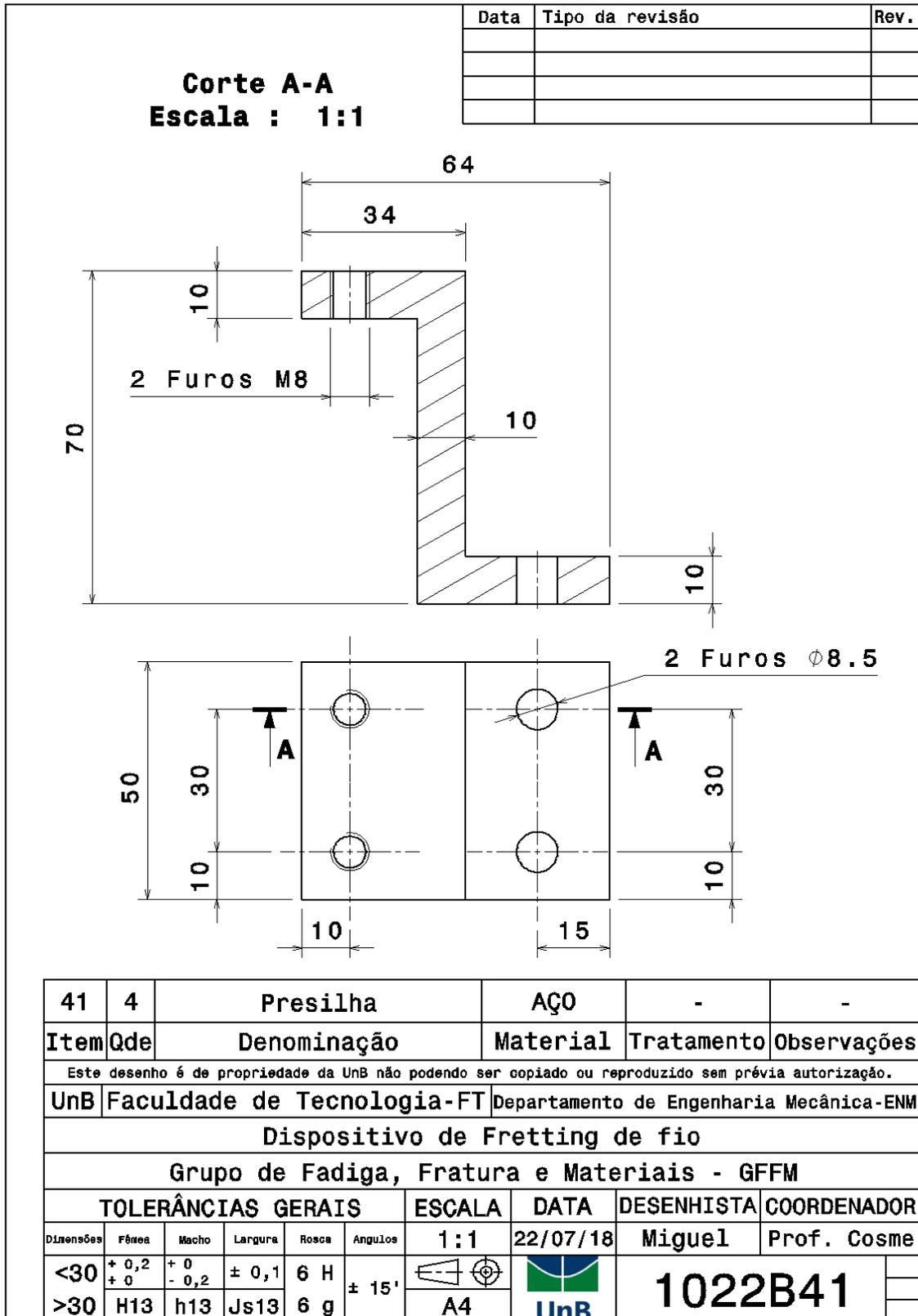


37	1	Eixo de rolamento	AÇO AISI 1020	Oxidação negra	-
Item	Qde	Denominação	Material	Tratamento	Observações
Este desenho é de propriedade da UNB não podendo ser copiado ou reproduzido sem prévia autorização.					
UnB	Faculdade de Tecnologia-FT		Departamento de Engenharia Mecânica-ENM		
Dispositivo de fadiga por Fretting de fio					
Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais - GFFM					
TOLERÂNCIAS GERAIS			ESCALA	DATA	DESENHISTA
Dimensões	Fóvea	Macho	Largura	Rosca	Ângulos
<30	+0,2 +0	+0 -0,2	±0,1	6 H	±15'
>30	H13	h13	Js13	6 g	±15'
			2:1	15/06/18	Miguel
			A4	UnB	Prof. Jorge
			1022A37		

Data	Tipo da revisão	Rev.



40	4	Bucha	BRONZE	-	-
Item	Qde	Denominação	Material	Tratamento	Observações
Este desenho é de propriedade da UnB não podendo ser copiado ou reproduzido sem prévia autorização.					
UnB		Faculdade de Tecnologia-FT	Departamento de Engenharia Mecânica-ENM		
Dispositivo de Fretting de fio					
Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais - GFFM					
TOLERÂNCIAS GERAIS			ESCALA	DATA	DESENHISTA
COORDENADOR			1:1	16/06/18	Miguel
Dimensões	Fêmea	Macho	Largura	Rosca	Ângulos
<30	+0,2 +0	+0 -0,2	± 0,1	6 H	± 15'
>30	H13	h13	Js13	6 g	
			A4		
					1022B40



- ANEXO B -

TUTORIAL PARA ENSAIO DE FADIGA POR *FRETTING*

Aviso importante antes de iniciar o ensaio:

A segurança no trabalho é coisa seria. Usar os Equipamentos de Proteção Individual (EPIs). Verificar que os botões de emergência sejam acessíveis. Sempre deixar a área de trabalho limpa e ordenada para os outros usuários. O respeito do seguinte tutorial proibirá esquecer etapas importantes para o sucesso do ensaio, mas também, garantirá a segurança do operador e da própria máquina MTS.

1. Ligar a bomba MTS.



Figura B1: Tela de controle da bomba MTS quando ligada.

2. Ligar o controlador da máquina MTS 5. O interruptor encontra-se atrás (Figura B2).



Figura B2: Interruptor do controlador MTS.

3. Ligar o controlador da máquina MTS 7.

Senha: admin

4. Abrir “*Station Manager*”.

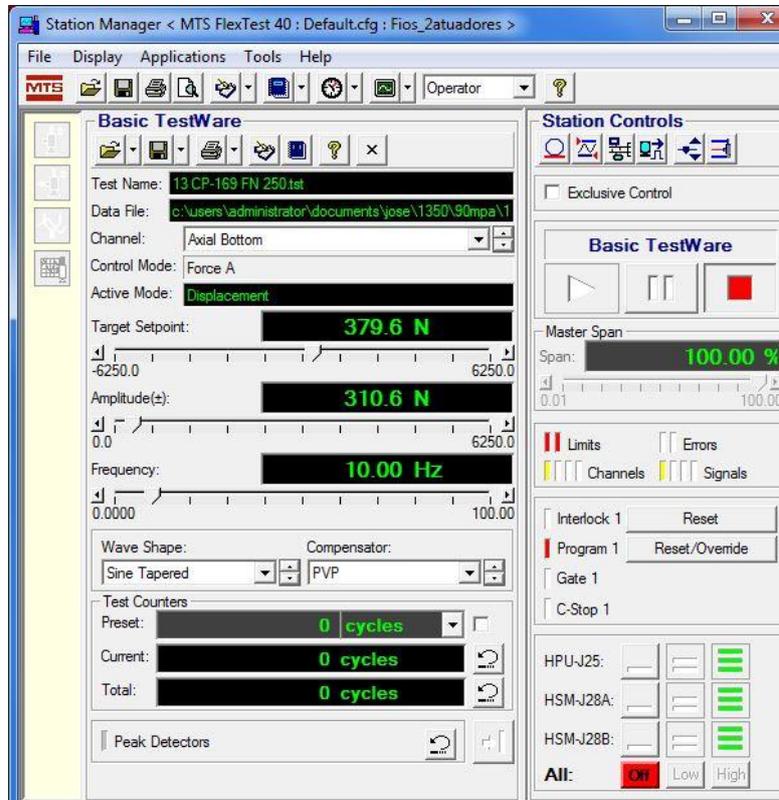


Figura B3: Janela “*Station Manager*”.

5. Definir a configuração do ensaio (Figura B4):

Escolher “*Default.cfg*”. Abrir a configuração chamada “*Fios_2atuadores.cfg*”.

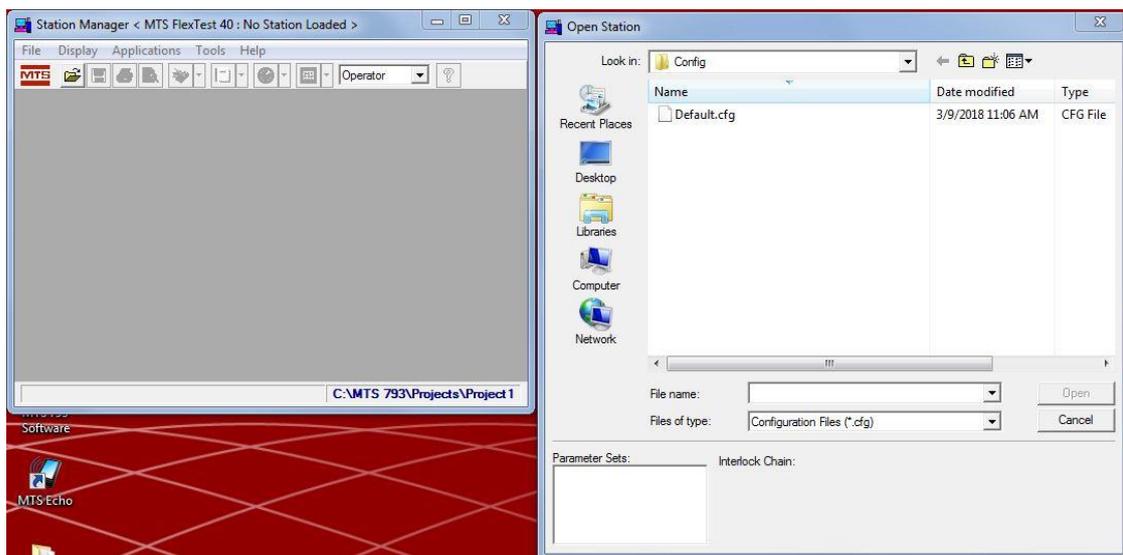


Figura B4: Definir a configuração do ensaio.

6. Ativar “Exclusive Control” (Figura B5).

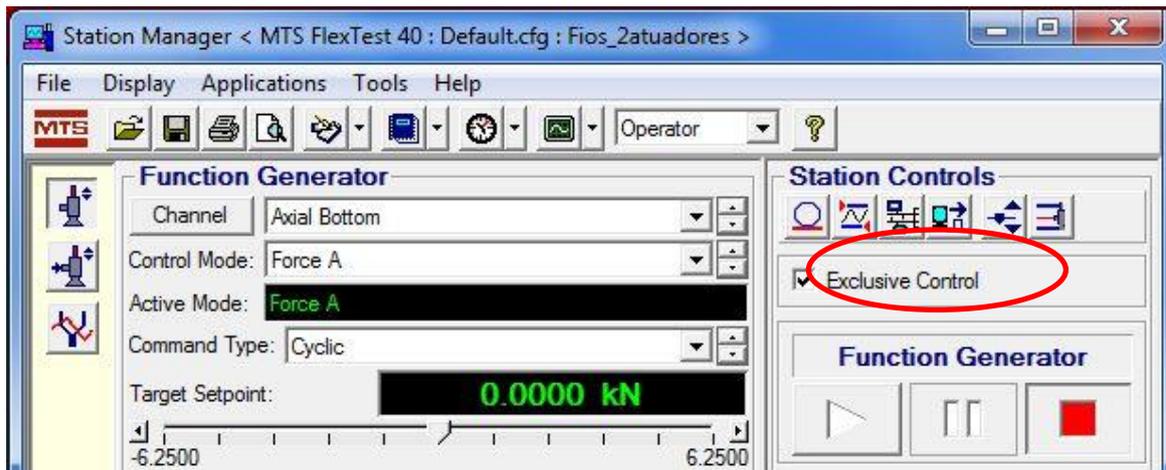


Figura B5: Janela “Station Manager”. Localização do “Exclusive Control”.

7. Iniciar a máquina MTS.

No computador da máquina MTS 5, acionar o segundo estágio de HPU-J25, esperar até que este pare de piscar e acionar o terceiro estágio de HPU-J25 (Figura B6).

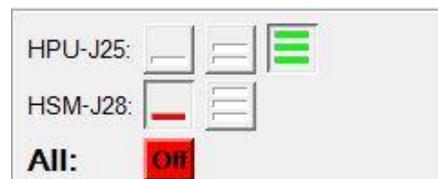


Figura B6: HPU estágio 3 ligado.

8. No computador MTS 7, acionar o segundo estágio de HSM-J28A, esperar até que este pare de piscar, acionar o terceiro estágio de HSM-J28A, acionar o segundo estágio de HSM-J28B. Neste momento já é possível operar a MTS. O último estágio deve ser acionado apenas para o ensaio (Figura B7).

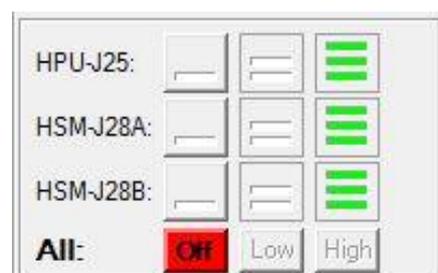


Figura B7: HPU e HSM em estágio 3.

9. Ligar o controlador de aquisição de dados.



Figura B8: Controlador de aquisição Lynx.

10. Abrir o programa da LYNX: **Lynx ATMP 2.2**

11. *On Line* → *On Line* → *OK* → *YES*

Controlador → Monitor de controlador. Aparece a janela mostrada na Figura B9.

Controlador → Janela de *displays*.

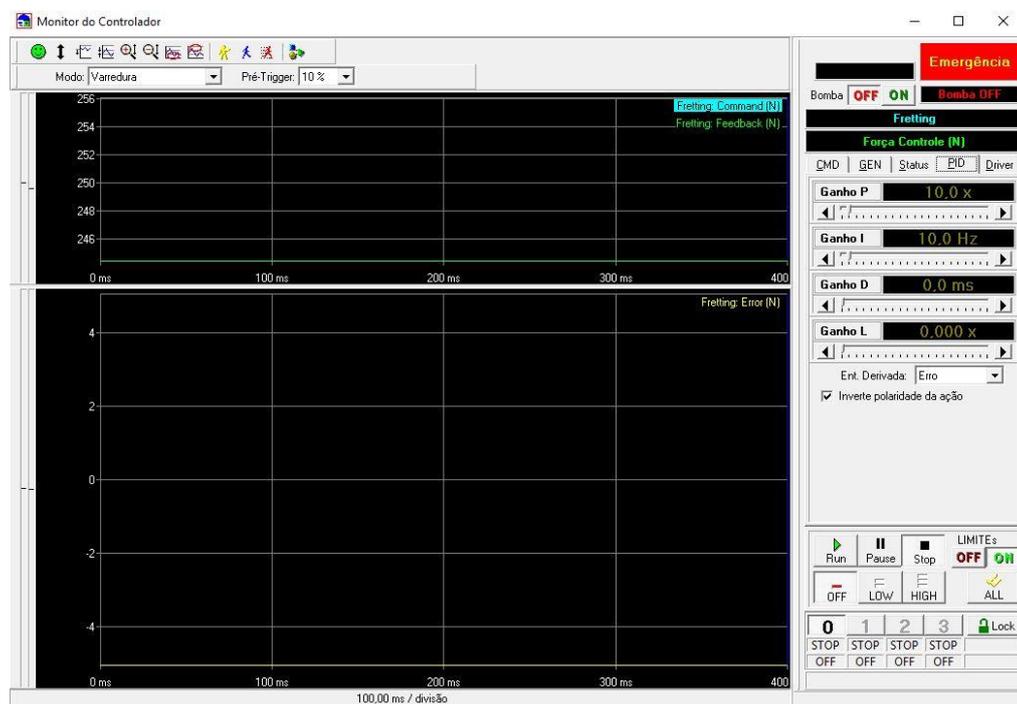


Figura B9: Programa Lynx ATMP 2.2.

Caso a configuração CMD não esteja em N (Newton), executar o passo a seguir:

Arquivo → Importar Config. Do controlador → *YES* → Abrir a configuração dentro da pasta: “Lynx ATMP 2,2” /*Backup Data*.

12. Entrar uma força negativa (exemplo: -100 N) por segurança. Deixando um valor positivo ou nulo, os atuadores avançam.

CMD → *Static*

Digitar “-100”

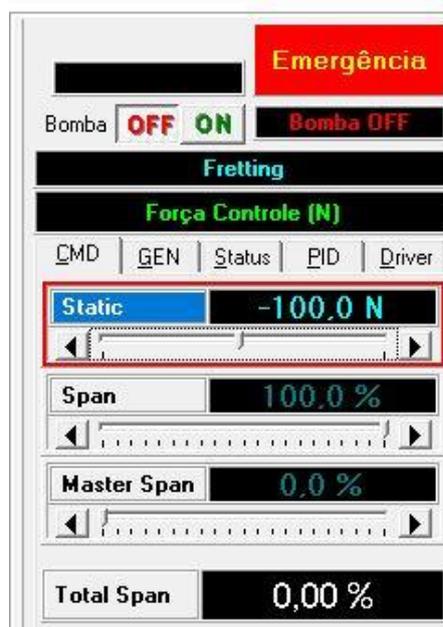


Figura B10: Janela *CMD/Static*.

13. Abrir (se não for o caso) a válvula de ar comprimido (Figura B11).

Valor da pressão: 4 a 5 bar.



Figura B11: Válvula de ar comprimido.

14. Configurar o teste. Entrar na janela “*Station Manager*”:

Applications → *Basic Testware*. Aparece a janela “*Basic Stestware*”.

Ícone “*Test Setup*”:

Na janela *Command* selecionar:

Type: Cyclic (para fadiga).

Channel 1: Axial Bottom (Figura B12). Entrar os parâmetros do ensaio.

Channel 2: Axial Top. Entrar os parâmetros do ensaio.

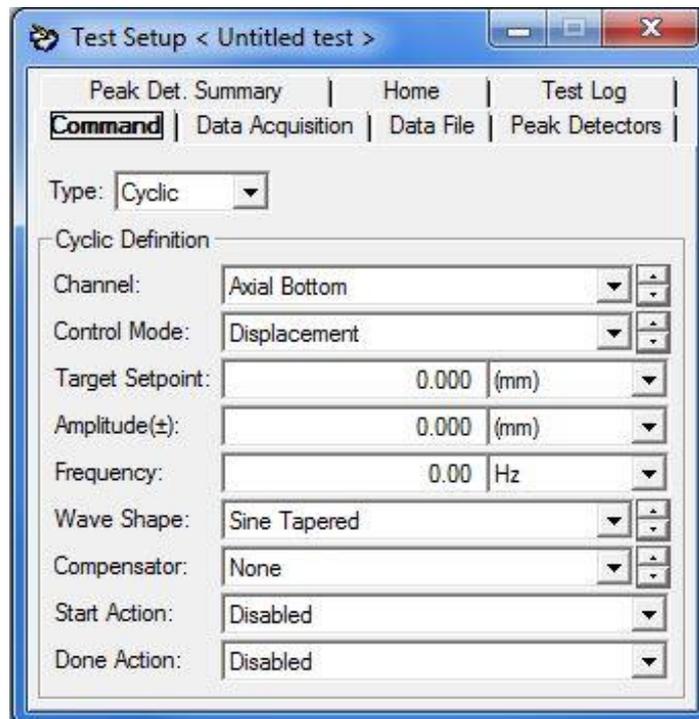


Figura B12: Janela *Test Setup*.

14.1. *Data Acquisition*: Selecionar os dados a ser salvos durante o ensaio (Figura B13).

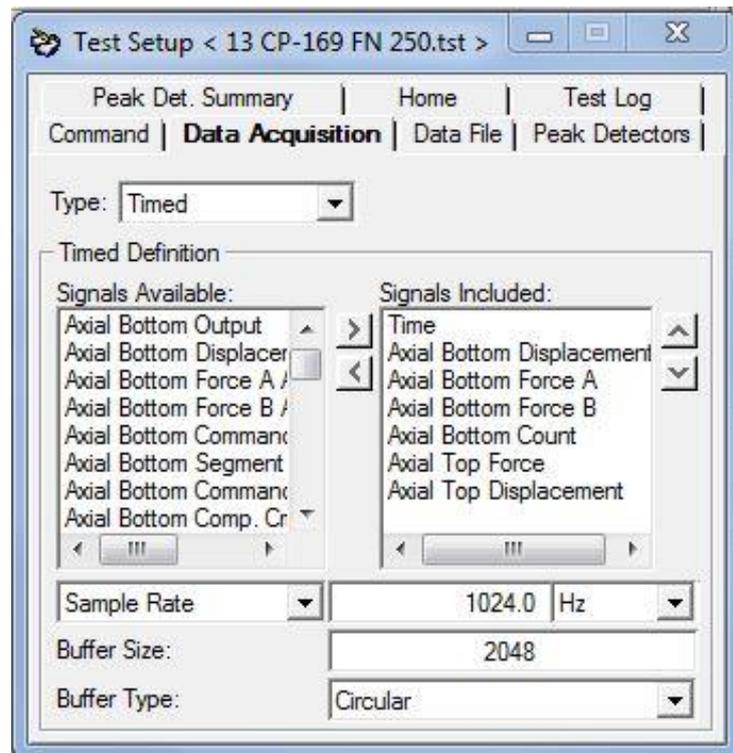


Figura B13: Janela *Data Acquisition*.

14.2. *Data File*: Escolher a pasta onde serão salvos os dados e o formato do arquivo como mostrado na Figura B14.

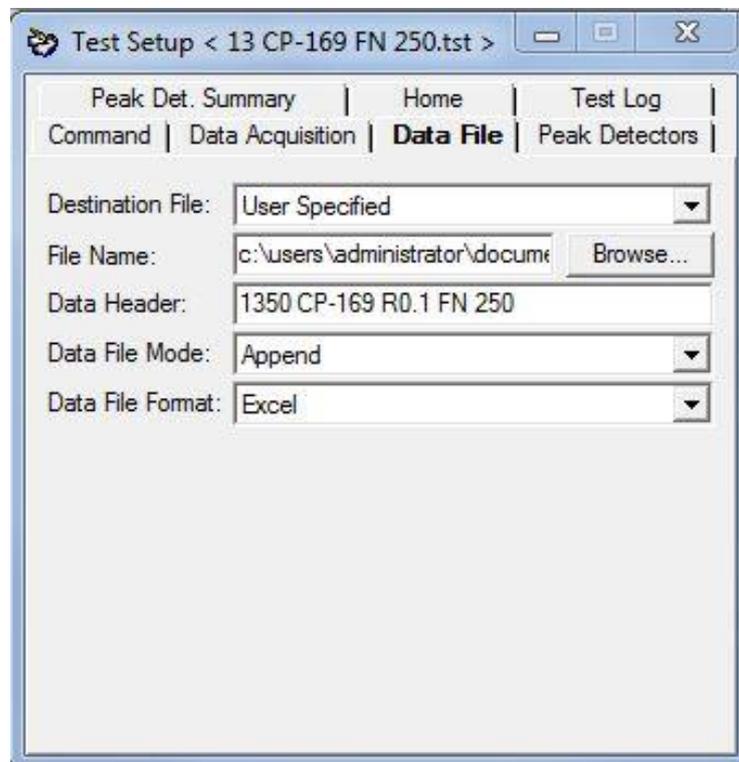


Figura B14: Janela *Data File*.

15. Colocar a(s) sapata(s):

O comprimento da sapata (fio) é de 35 mm. Na configuração do dispositivo com rolamento precisa apenas de uma sapata.

Colocar a sapata dentro do suporte sem apertar os parafusos (Figura B15).

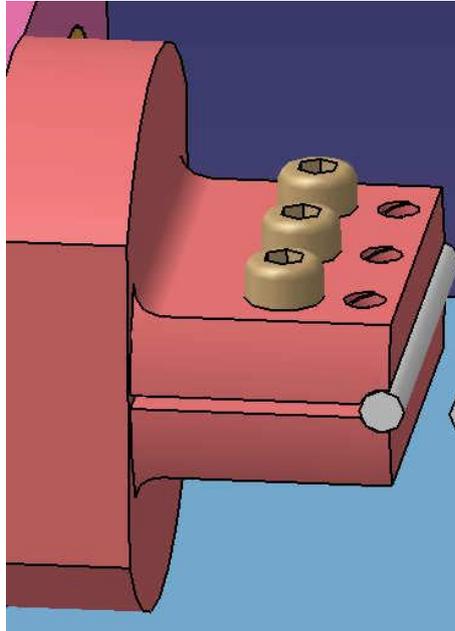


Figura B15: Imagem da sapata (fio) posicionada no suporte.

16. Testar:

Colocar uma força nos atuadores pneumáticos para apertar o fio contra o rolamento. Isso acomodará o fio dentro do suporte.

$P = 100 \text{ N}$, manter 10 a 20 s.

$P = -100 \text{ N}$ (liberar a força).

17. Apertar os parafusos da sapata.

18. Colocar o CP.

O comprimento do CP (fio) é de 220 mm.

Fazer marcas a 40 mm de cada extremidade do CP (Figura B16). Isso servirá como referencia para os mordentes da máquina MTS. Diferenciar as duas marcas para identificar qual será a parte superior e inferior do CP após o ensaio.



Figura B16: Exemplo de marcação do CP.

Fechar primeiro o mordente inferior (Figura B17).



Figura B17: Controle das garras MTS. Garra inferior fechada.

19. Verificar que a pressão nas garras não seja muito alta ($P < 3 \text{ MPa}$) para não amassar o fio com os mordentes (Figura B18).



Figura B18: Manômetro de pressão nas garras MTS.

20. Na janela “*Station Signals*” clicar em *Clear Offset* (Figura B22).

21. Posicionar o atuador superior:

Na janela “*Station Controls*”, clicar no ícone “*Manual Command*”, ativar “*Enable Manual Command*” e selecionar “*Axial Top*” (Figura B19).

Subir devagar o atuador usando as setas “*Manual Cmd*” até o valor de -42 mm.

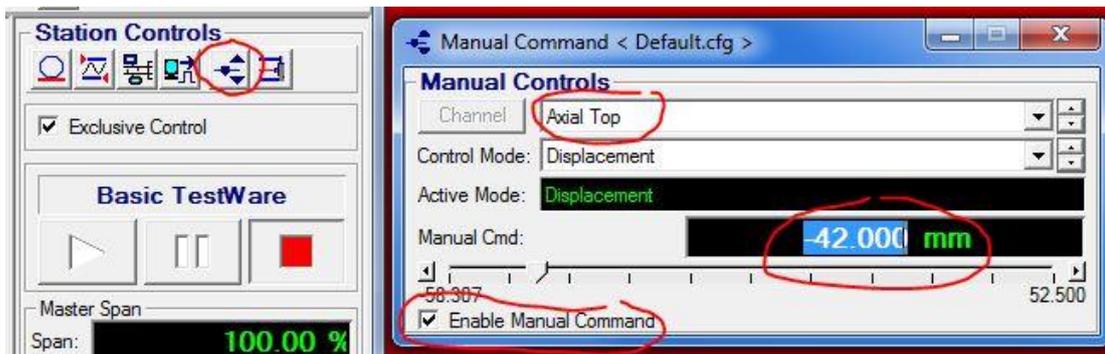


Figura B19: Configuração para subir ou descer o atuador superior.

Na mesma janela, selecionar “*Axial Bottom*” e posicionar a garra inferior para o valor de 28 mm (Figura B20).

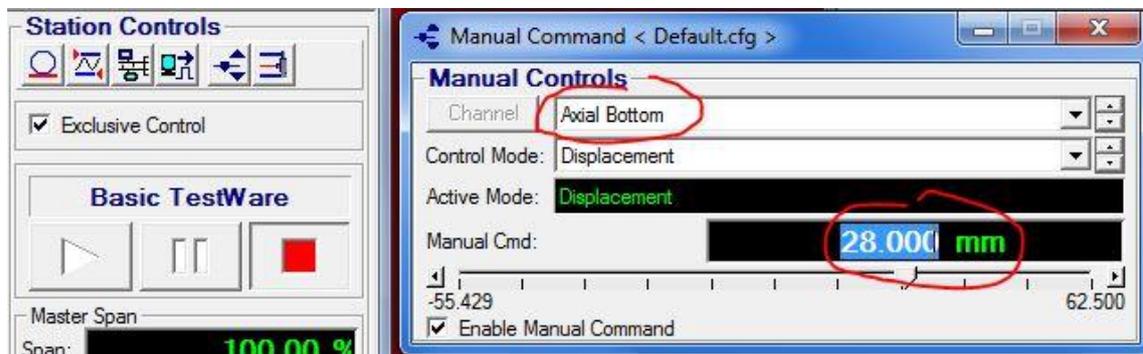


Figura B20: Configuração para subir ou descer o atuador inferior.

22. Fechar o mordente superior. Verificar as marcas do CP (Figura B21).

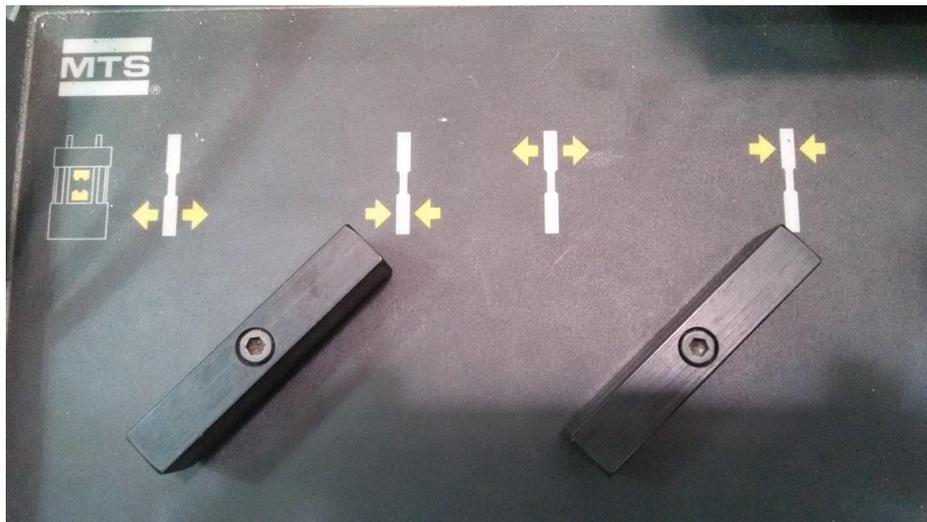


Figura B21: Controle das garras MTS. Garra superior fechada.

23. Zerar as forças MTS. “Station Signals” → Auto Offset (Figura B22).

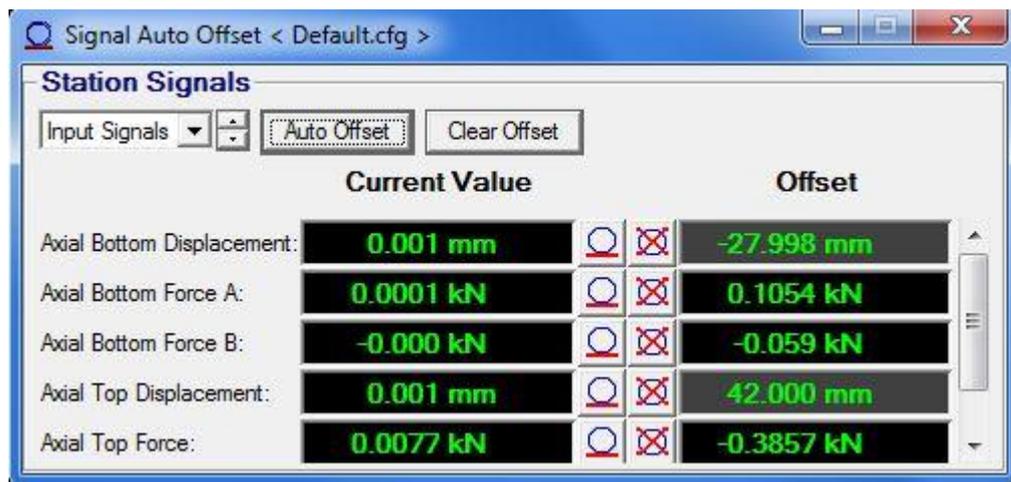


Figura B22: Janela Signal Auto Offset.

24. Aplicar a carga inicial.

Manual commands → Axial Bottom → Control Mode: Force A

$F_{Bm} = 379,6 \text{ N}$ (exemplo). Força relacionada à tensão média (σ_m) e à secção do fio ensaiado. Essa força corresponde ao valor do “Target SetPoint” (Figura B23).



Figura B23: Configuração para aplicação da carga.

25. No programa da LYNX, definir a velocidade da aplicação da força de contato:

PID → Ganho P = 10x

→ Ganho I = 10 Hz



Figura B24: Janela PID.

CMD → *Static* = 30 N

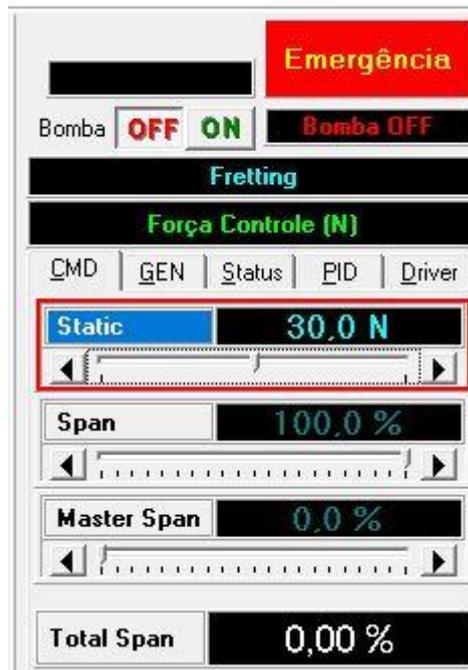


Figura B25: Janela CMD.

26. Aumentar a carga de contato progressivamente (Figura B26):

26.1. Aumentar para 60 N.

PID → Ganho P = 0,1
→ Ganho I = 0,1 Hz

26.2. Aumentar para 150 N (100 N a menos que a força desejada).

PID → Ganho P = 7x
→ Ganho I = 0,7 Hz

26.3. Aumentar para valor final, $F = 250$ N (exemplo).

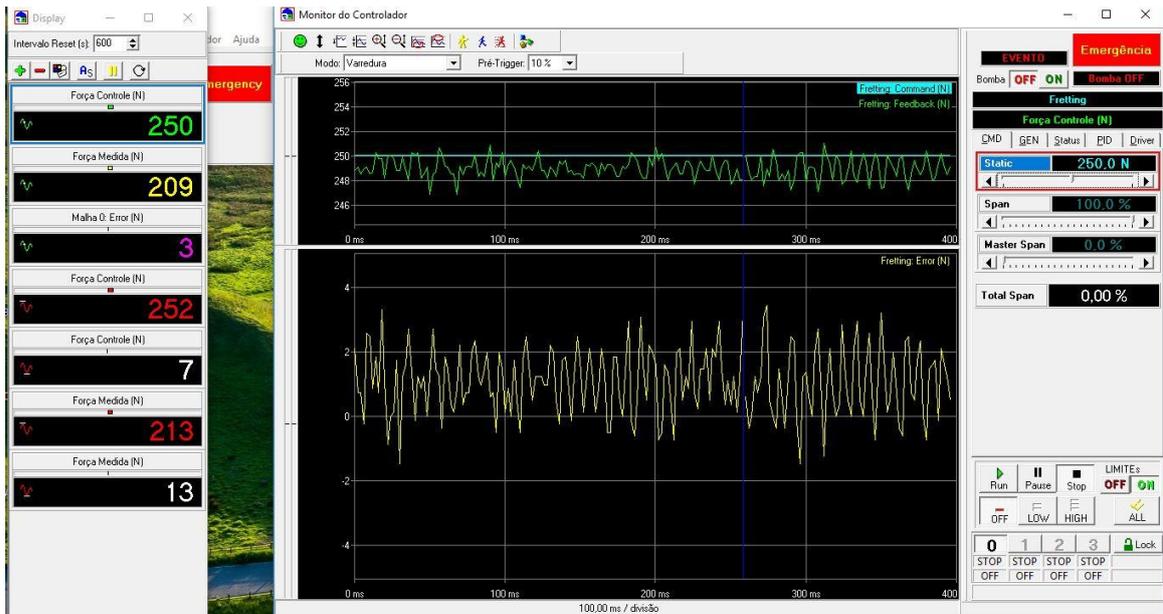


Figura B26: Janela do programa da Lynx após a configuração das cargas dos atuadores pneumáticos.

27. Apertar os parafusos das mesas deslizantes manualmente. Deixar as porcas soltas.
28. *Detectors*:

$$\text{Axial Bottom Force A} = (\text{Target Set Point} + \text{Ampl.}) + 10\% \text{ do total.}$$

	Upper Limit	Upper Action	Upper Override	Lower Limit	Lower Action	Lower Override
Axial Bottom Displacement:	2.000 mm	Program Stop Interlock	<input type="checkbox"/>	-2.000 mm	Program Stop Interlock	<input type="checkbox"/>
Axial Bottom Force A:	0.759 kN	Program Stop Interlock	<input type="checkbox"/>	0.000 kN	Program Stop Interlock	<input type="checkbox"/>
Axial Bottom Force B:	2.500 kN	Disabled	<input type="checkbox"/>	-1.000 kN	Disabled	<input type="checkbox"/>
Axial Top Displacement:	2.000 mm	Program Stop Interlock	<input type="checkbox"/>	-2.000 mm	Program Stop Interlock	<input type="checkbox"/>
Axial Top Force:	0.500 kN	Program Stop Interlock	<input type="checkbox"/>	-0.500 kN	Program Stop Interlock	<input type="checkbox"/>

Figura B27: Janela *Detectors*.

29. *Run* (Iniciar o ensaio).

Configurar a tela para acompanhar o ensaio (Figura B28).

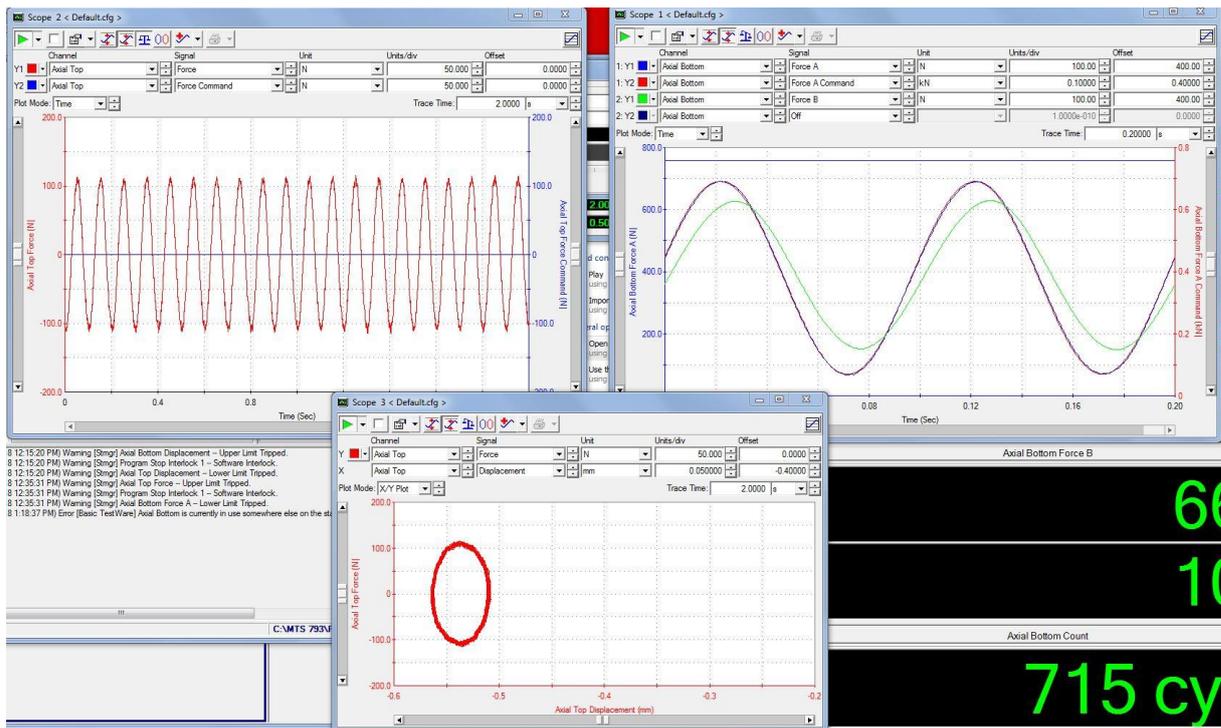


Figura B28: Exemplo de configuração de tela MTS para acompanhar o ensaio.

30. Travar os parafusos com as porcas.
31. Quando terminar o ensaio:
 - Destruar os parafusos e porcas das mesas deslizantes.
 - Liberar a carga $P = -100$ N.