



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE COMPARATIVA DO EFEITO DA
FADIGA POR FRETTING NOS FIOS DE CABOS
CONDUTORES FORMADOS PELAS LIGAS DE
ALUMÍNIO 1120 e AA 6201**

ERICK ROCHA VIEIRA

Brasília, 5 de março de 2020

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE COMPARATIVA DO EFEITO DA FADIGA POR FRETTING NOS FIOS
DE CABOS CONDUTORES FORMADOS PELAS LIGAS DE ALUMÍNIO 1120 E
AA 6201**

Erick Rocha Vieira

Dissertação submetida como requisito para obtenção
do título de mestre em Ciências Mecânicas

Banca Examinadora

Prof. Dr. Jorge Luiz de Almeida
Ferreira, ENM/UnB (Orientador)

Prof. Dr. Cosme Roberto Moreira da
Silva, ENM/UnB

Eng. Dr. Remy Kalombo Badibanga,
LabCabos/UnB

Brasília, 5 de março de 2020

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por tudo que Ele me concedeu para que eu tivesse condições de concluir esta dissertação.

Sou grato ao professor Jorge Luiz de Almeida Ferreira por toda sua paciência e dedicação ao me orientar, também expresse esses mesmos sentimentos aos demais professores do grupo GFFM como, José Alexander, Cosme Roberto, Fabio Comes, entre outros, que de alguma forma contribuíram para conclusão deste trabalho.

Gostaria de agradecer a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos (FINATEC), Transmissoras Brasileiras de Energia (TBE) juntamente com Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) pelo apoio e suporte financeiro para realização desta pesquisa.

Continuando, minha gratidão aos meus colegas de laboratório, Ian, Remy, Thiago, Pedro Henrique, Miguel, José, Ricardo, Elizete, Lucas, Gustavo, entre outros, por compartilhar as experiências diárias da pesquisa comigo. Neste sentido, também estendo meus cumprimentos aos técnicos do laboratório, Wesley, Adriano e Rafael por agirem de forma prestativa para manter tudo em ordem.

Gostaria de agradecer em especial a minha linda esposa, Lissyanne Vieira, com quem tenho vivido muito feliz nestes últimos anos. Muito obrigado por sua compreensão, pelo seu apoio, preocupação, carinho e amor, sem você seria muito mais difícil. Te amo demais!

Por último, mas não menos importante gostaria de agradecer profundamente o restante dos meus familiares e amigos, meus pais Messias e Cristiane, minha irmã Evelyn, meus sogros Waldenir e Dorilene, meu cunhado Wendelly, aos meus avós Cornélio, Terezinha, Dulce e Helena, aos meus tios, e amigos pelo apoio incondicional em qualquer momento, seja de alegria ou dificuldade. Amo todos vocês.

Erick Rocha Vieira

“Porque Deus amou o mundo de tal maneira que deu seu único filho, para que todos que Nele crer não pereçam, mas tenham a vida eterna.” João 3:16

RESUMO

Com a necessidade de aperfeiçoamento do processo de transmissão e distribuição de energia elétrica, são necessários estudos sistematizados no principal componente de uma linha de transmissão, o cabo condutor. Um dos problemas mecânicos que mais afetam a vida de um condutor é o fenômeno de fadiga por fretting. Neste contexto o objetivo desta dissertação foi analisar de forma comparativa a vida em fadiga entre os fios de liga AA 6201 T81 e AA 1120 através um programa experimental, que permitisse isolar o fenômeno de *fretting* sob condições controladas. Para alcançar tais fins, foi elaborado um programa de testes nos laboratórios de ensaios mecânicos da Universidade de Brasília. O programa baseou-se em três etapas. Na primeira houve a caracterização dos materiais através de ensaios estáticos de tração e dinâmicos de fadiga. Na segunda etapa houve os ensaios de indução de fretting sob condições controladas, tais condições foram determinadas pelo ângulo de contato de 29 ° e cargas de contato normal de 250 N, 500 N, 750 N e 1000 N. A terceira etapa foi constituída por análises microscópicas das regiões de contato entre os fios, além das superfícies de falha. Por fim, com os resultados obtidos, pôde-se verificar que a indução de fretting, gerou dois cenários distintos, o primeiro, o desgaste, e o segundo, a fadiga por fretting, essas características foram comprovadas através da observação das falhas através da microscopia. Para os fios da liga AA 6201 T81 observou fadiga por fretting nos ensaios de 750 N e 1000 N, na carga de 250 N comprovou que houve o desgaste, para a carga de 500 N, notou-se uma mescla dos tipos de falhas, o que pode indicar que para essa força existe uma região de transição. Por outro lado, todas as curvas referentes aos fios da liga AA 1120 tiveram suas falhas classificadas com fadiga por fretting. Na comparação entre as curvas que ocorreram fadiga por fretting para ambas as ligas (750 N e 1000 N), constatou-se que os fios da liga AA 6201 T81 foram mais sensíveis ao fretting, apesar de possuírem maior resistência mecânica estática e de fadiga.

Palavras Chaves: AA 1120; AA 6201 T81; Resistência à fadiga por fretting; Desgaste; Sensibilidade ao fretting.

ABSTRACT

Systematic studies are needed on the main component of a transmission line, the conductor cable, in order to improve the process of transmission and distribution of electrical. One of the mechanical problems that most affect conductor cable's life is the fretting fatigue phenomenon. In this context, the aim of this dissertation was to analyze the fatigue life between AA 6201 T81 and AA 1120 alloy wires comparatively through an experimental program, which would allow the isolation of the fretting phenomenon under controlled conditions. To achieve these goals, a program of tests was developed in the mechanical testing laboratories at the University of Brasília. The program was based on three stages. First, the materials were characterized by tensile tests and fatigue tests. Second stage, the fretting induction tests were carried out under controlled conditions. These conditions were determined by the contact angle of 29° and normal contact loads of 250 N, 500 N, 750 N and 1000 N. The third stage consisted on the microscopic analysis of the contact regions between the wires, in addition to the failure surfaces. Finally, with the results obtained, it was possible to verify that fretting induction generated two distinct scenarios, the first, wear, and the second, fretting fatigue. These characteristics were proven through the observation of failures through microscopy. For the AA 6201 T81 alloy wires, fretting fatigue was observed in the 750 N and 1000 N tests, in the 250 N load it proved that there was wear, for the 500 N load, both types of contact problems was noted, which may indicate that there is a transition region for this force. On the other hand, all the curves referring to the wires of the 1120 aluminum alloy had their faults classified as fretting fatigue. In the comparison between the curves that occurred fretting fatigue for both alloys (750 N and 1000 N), it was found that the AA 6201 T81 alloy wires were more sensitive to fretting, despite having greater static and fatigue endurance.

Key words: AA 1120; AA 6201 T81; Fretting fatigue endurance; Wear; Sensitivity to fretting.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Contextualização e justificativa.....	12
1.2	Objetivos.....	14
1.3	Descrição da estrutura do trabalho	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	FADIGA EM CABOS.....	16
2.1.1	Fadiga em cabos condutores de energia elétrica	16
2.1.2	Tipos de vibração de cabos condutores de energia elétrica	16
2.1.3	Mecanismo de falha por fadiga em cabos condutores de energia elétrica 18	
2.2	Mecânica do contato elástico.....	21
2.2.1	Introdução.....	21
2.2.2	Fadiga por fretting.....	23
3	METODOLOGIA	29
3.1	Descrição dos equipamentos e materiais.....	29
3.1.1	MTS <i>Landmark</i>	29
3.1.2	Dispositivo de ensaio de fadiga por fretting.....	30
3.1.3	Microscópios	33
3.1.4	Cabo condutor CAL 823 - MCM.....	34
3.1.5	Cabo condutor CAL 1055 - MCM.....	34
3.2	Descrição do programa experimental	34
3.2.1	Confeção dos espécimes.....	34
3.2.2	Ensaio de caracterização dos materiais.....	36
3.2.3	Ensaio de fadiga por <i>fretting</i>	37
3.2.4	Avaliação comparativa da pressão média de contato entre os fios	40
3.2.5	Comprovação da presença de <i>fretting</i> análise dos tipos de falhas	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1	Resultado dos Ensaio de caracterização dos materiais	42
4.2	Resultado dos ensaio de fadiga por <i>fretting</i>	44
4.2.1	Resposta dos fios em relação a imposição dos parâmetros de fretting	44

4.2.2	Avaliação comparativa entre os fios AA 6201 T81 e AA 1120 que sofreram fadiga por fretting.....	47
4.3	Análise das falhas e comprovação da presença de <i>fretting</i>	50
4.3.1	Comprovação da presença de fretting	50
4.3.2	Mapeamento das falhas e análise da superfície de fratura	55
5	CONCLUSÕES.....	60
5.1	Recomendações para trabalhos futuros	60
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
	APÊNDICES.....	64
	Apêndice A – Informações referentes aos ensaios de fadiga na caracterização dos materiais.....	64
	Apêndice B – Informações referentes as falhas de fadiga por fretting.....	65
	Apêndice C – Informações referentes aos testes de pressão média nos espécimes	66
	Apêndice D – Relatórios das análises de EDS	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Mapa das linhas de transmissão (ONS, 2018).....	12
Figura 1.2 - Marcas de fretting no condutor. Fonte: Elaboração própria.....	13
Figura 2.1 - Principais tipos de vibração de cabos condutores de linhas de transmissão aéreas de energia elétrica (Modificado: (EPRI, 2006))	17
Figura 2.2 - Configuração dos fios no cabo condutor e a superfície em contato dentro do grampo, representadas pelas letras A, B, C e D (BELLORIO, 2009).....	20
Figura 2.3 - Geometrias idealizadas para o problema de contato	21
Figura 2.4 - Corpos similarmente elásticos em contato	23
Figura 2.5 - Zonas de adesão e escorregamento quando há um deslizamento parcial	23
Figura 2.6 - Distribuição de tensão cisalhante (HILLS; NOWELL, 1994)	26
Figura 2.7 - Distribuição de carga tangencial ao longo do tempo (HILLS; NOWELL, 1994).....	26
Figura 2.8 - Distribuição de tensão cisalhante durante um ciclo completo(HILLS; NOWELL, 1994).....	27
Figura 2.9 - Distribuição de cisalhamento na presença de carga remota de fadiga .28	
Figura 3.1 - MTS <i>Landmark</i>	30
Figura 3.2 - (a) MTS sem modificações; (b) MTS preparada para receber o dispositivo pneumático de <i>fretting</i> (GARCIA, 2019)	31
Figura 3.3 - Desenho esquemático do dispositivo de fretting (GARCIA, 2019).....	31
Figura 3.4 - Conjunto do dispositivo de fadiga com <i>fretting</i>	32
Figura 3.5 - - Representação das forças no dispositivo de fadiga com <i>fretting</i> (Adaptado: GARCIA, 2019).....	32
Figura 3.6 – Microscópio Confocal	33
Figura 3.7 - Microscópio Eletrônico de Varredura	33
Figura 3.8 - (a) Fio antes do ensaio de estiramento; (b) Fios após o estiramento....	35
Figura 3.9 - Espécimes utilizados nos ensaios de caracterização dos materiais	36
Figura 3.10 – Espécimes utilizados nos ensaios de fadiga por <i>fretting</i>	36
Figura 3.11 - a) Aparato de fadiga por <i>fretting</i> ; b) Ampliação da região do contato; c) Vista frontal do contato	38
Figura 3.12 Área de contato	40
Figura 4.1 - Curvas Tensão-Deformação para as ligas AA 6201 T81 e AA 1120 ..	42
Figura 4.2 - Curvas de fadiga dos materiais.....	43
Figura 4.3 - Resultados de fadiga por fretting para os fios de AA 1120.....	44
Figura 4.4 - Resultados de fadiga por fretting para os fios de AA 6201 T81	45
Figura 4.5 - Falha com desgaste.....	45
Figura 4.6 - Pressão média de contato	46
Figura 4.7 - Grampo de suspensão	47
Figura 4.8 - Comparação entre as ligas AA 1120 e AA 6201 na condição de fadiga por fretting	48

Figura 4.9 – Curva de sensibilidade ao fretting	49
Figura 4.10 - a) Conductor formado pela liga AA 6201 x Conductor formado pela liga AA 1120 (VIEIRA et al., 2019)	50
Figura 4.11 – Zonas do contato entre fios.....	51
Figura 4.12 - EDS para CP de liga AA 1120, P = 1000 N.....	52
Figura 4.13 – EDS para CP de liga AA 1120, P= 750 N.....	52
Figura 4.14 – EDS para o CP de liga AA 6201 T81, P = 1000 N.....	53
Figura 4.15 – EDS para o CP de liga AA 6201 T81, P = 750 N.....	53
Figura 4.16 – EDS para o CP de liga AA6201 T81, P = 250 N.....	54
Figura 4.17 – EDS para o CP de liga AA 6201 T81, P = 500 N.....	54
Figura 4.18 - Tipos de falha, a) V; b) 45°; c) L; d) QP	55
Figura 4.19 - Percentual do tipo de falha para cada classe de ensaio de fadiga por fretting	56
Figura 4.20 – a) Superfície de fratura; b) Possíveis estrias; c) <i>Dimples</i> – CP 6201-12	57
Figura 4.21 – a) Superfície de fratura; b) Região de fronteira; c) Possíveis estrias; d) <i>Dimples</i> – CP-113.....	58
Figura 4.22 - a) Superfície de falha; b) Ampliação da região de propagação; c) <i>Dimples</i> – CP-98.....	59
Figura 4.23 - a) Superfície de falha; b) Propagação da trinca; C) Possíveis estrias; d) <i>Dimples</i> – CP 6201-34.....	59
Figura D 1 – Relatório químico da Análise EDS do CP de liga AA 1120 – P=1000N	67
Figura D 2 - Relatório químico da Análise EDS do CP de liga AA 1120 – P=750N	68
Figura D 3 - Relatório químico da Análise EDS do CP de liga AA 6201 – P=1000N	69
Figura D 4 -Relatório químico da Análise EDS do CP de liga AA 6201 – P=750N	70
Figura D 5 - Relatório químico da Análise EDS do CP de liga AA 6201 – P=250N	71
Figura D 6 - Relatório químico da Análise EDS do CP de liga AA 6201 – P=500N	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Comparação entre os tipos de vibrações dos cabos condutores de energia elétrica induzidos pelo vento (modificado: (EPRI, 2006; FURTADO et al., 2003)	19
Tabela 2.2 - Principais tipos de construção de cabos condutores (FADEL, 2010)..	20
Tabela 2.3 - Distribuição de tensão cisalhamento no descarregamento.....	27
Tabela 3.1- Características dos condutores e das ligas de alumínio (Adaptado, NEXANS, 2016).....	34
Tabela 3.2 - Parâmetros do estiramento dos fios	35
Tabela 3.3 - Dimensão dos espécimes (mm)	36
Tabela 3.4 - Parâmetros dos ensaios de fadiga e tração	37
Tabela 3.5 - Teste de força nula x deslocamento nulo	39
Tabela 3.6 - Teste para encontrar as forças de compressão P	39
Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas estática	42
Tabela A 1 - CP's utilizados nos ensaios de fadiga para caracterização dos materiais 64	
Tabela B 1 - Ensaios de fadiga por fretting para fios da liga AA 1120	65
Tabela B 2 - Ensaios de fadiga por fretting da liga AA 6201 T81.....	65
Tabela C 1 - Pressão média para diferentes forças normais.....	66

LISTA DE ABREVIACOES

AA	Liga de alumínio
ACAR	Cabo de Alumínio Reforçados com Alumínio Liga
Al	Alumínio
ASTM	American Society for Testing and Materials
CA (AAC)	Cabos de Alumínio (All Aluminum Conductor)
CAA (ACSR)	Cabos de Alumínio com Alma de Aço (Aluminum Conductor Steel Reinforced)
CAL (AAAC)	Cabos de Alumínio Liga (All Aluminum Alloy Conductor)
CIGRÉ	Conseil International des Grands Réseaux Electriques (International Council on Large Electric Systems)
CNC	Computer Numeric Control
CP's	Corpos de provas
EDS	Espectroscopia por Energia Dispersiva
EPRI	Electric Power Research Institute
GFFM	Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais
IEEE	Institute of Electrical and Electronis Engineers
LT	Linha de transmissão
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MTS	Material Test System
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
QP	Quase plana
S-N	Curva tensão-vida
SG9	Prédio localizado na Universidade de Brasília
SIN	Sistema Interligado Nacional
TW	Fios Trapezoidais
UnB	Universidade de Brasília
UPC	último ponto de contato
$\sigma - \epsilon$	Curva tensão-deformao

LISTA DE SÍMBOLOS

Latinos

A	Área da marca de contato, mm^2
a	Metade da extensão do contato, mm
$B(t)$	Carga remota de fadiga, N
c	Limites da zona de adesão, mm
D	Diâmetro, mm .
E	Módulo de elasticidade, GPa
E^*	Módulo de elasticidade equivalente, GPa
f	Coefficiente de atrito
HV	Dureza Vickers
$K_f(N)$.	Fator de redução da resistência à fadiga
K_{fM} \bar{F}	Fator de redução de resistência à fadiga da curva de fadiga da liga devido a curva de <i>fretting</i> da mesma liga
NCP	Quantidade de corpos de prova.
N_t	Quantidade de níveis de tensão.
N_f	Número de ciclos até a falha sob um mesmo nível de tensão, ciclos
P	Carga de contato normal, N
p	distribuição de tensão nas direções x e y , MPa
p_0	Máximo valor da pressão de contato, MPa
P_{rm}	Pressão média de contato, MPa
Q	Carga tangencial, N
q	Tensão de cisalhamento, MPa
q'	Tensão de perturbação, MPa
R	Razão de tensões
R	Raio equivalente de uma das superfícies do cilindro, mm
S_a	Amplitude de tensão, MPa
S_{aF}	Amplitude de tensão da curva de <i>fretting</i>
S_{aM}	Amplitude de tensão da curva de fadiga da liga
t	Tempo, segundos
Y_B	Amplitude de deslocamento por flexão do cabo condutor, mm

Gregos

ϵ	Deformação, strain.
σ_B	Tensão remota de fadiga, MPa
σ_f	Tensão na fratura, MPa
σ_{rt}	Resistência a tração, MPa
σ_y	Tensão de escoamento, MPa
π	Número Pi
ν	Módulo de Poisson

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e justificativa

Em um editorial realizado pelo Northeast Group LLC (2016) afirma que estão previstos gastos de U\$ 3,2 trilhões até 2026 em distribuição e transmissão de energia elétrica por partes das concessionárias do setor elétrico. No âmbito nacional, segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2018), o Brasil possui atualmente 141.388 km de linhas de transmissão de alta tensão variando de 230 kV a 800 kV, e está em plena expansão para alcançar 185.484 km até 2023, como mostra a Figura 1.1.



Figura 1.1 - Mapa das linhas de transmissão (ONS, 2018)

Nas linhas de transmissão, o cabo condutor é um dos elementos mais importante, cuja função é a transmissão de energia elétrica, além disso, o custo associado a aquisição do condutor pode chegar a 40 % do total de investimento da linha. Dentre os problemas

mais críticos que afetam o condutor durante seu período de operação encontra-se a ruptura dos fios provocada pelo processo de fadiga por *fretting*, que é ocasionada por vibrações eólicas (CIGRE, 2010).

Essas vibrações são provocadas devido a formação regular de vórtices em virtude da interação entre o ar e o cabo, induzindo movimentos vibratórios no plano transversal ao condutor. Entretanto, nas regiões onde se localizam ferragens tais como: os grampos de suspensão, os espaçadores, as esferas sinalizadoras, as emendas e os amortecedores, ocorre uma restrição do movimento vibratório, causando a flexão alternada do cabo condutor nessas regiões. Como resultado desse processo de flexão alternada do condutor, pode ocorrer a fadiga nos fios do cabo condutor, o que induz a falha mecânica do condutor e, conseqüentemente, causam danos significativos aos indivíduos e as comunidades afetadas pela interrupção do fornecimento de energia elétrica (CIGRE, 2007; IEEE, 2007).

Diversos autores relatam que o processo de fadiga que ocorre nos condutores é caracterizado por fenômeno conhecido do meio científico como fadiga por *fretting* (BADIBANGA, 2017; EPRI, 2006, 2009; FADEL et al., 2012 et al; KALOMBO et al., 2015, 2017).

O termo *fretting* é usado para denominar pequenos deslizamentos relativos entre superfícies de contato quando submetidas a um carregamento normal. Esse carregamento pode ser gerado por vibrações ou por um carregamento cíclico, podendo levar a nucleação de trincas, portando-se com concentradores de tensão, que na presença de uma carga remota de fadiga pode ocorrer a falha do componente. Este fenômeno é chamado de fadiga por *fretting*. Nesse sentido, as restrições ao movimento do cabo fazem com que os seus fios escorreguem entre si, e as forças de fricção aliadas a esse movimento relativo causam o *fretting* entre os fios do condutor, gerando assim marcas no condutor como é mostrado na Figura 1.2 (FADEL, 2010; HILLS; NOWELL, 1994; WITTKOWSKY et al., 2003).

Uma vez que a trinca induzida por *fretting* é formada, a mesma poderá propagar-se por fadiga levando o rompimento do fio ou, em casos mais extremos o rompimento do cabo, como o que ocorreu no Rio Paraná em 2002 (AZEVEDO et al., 2009; FADEL, 2010).

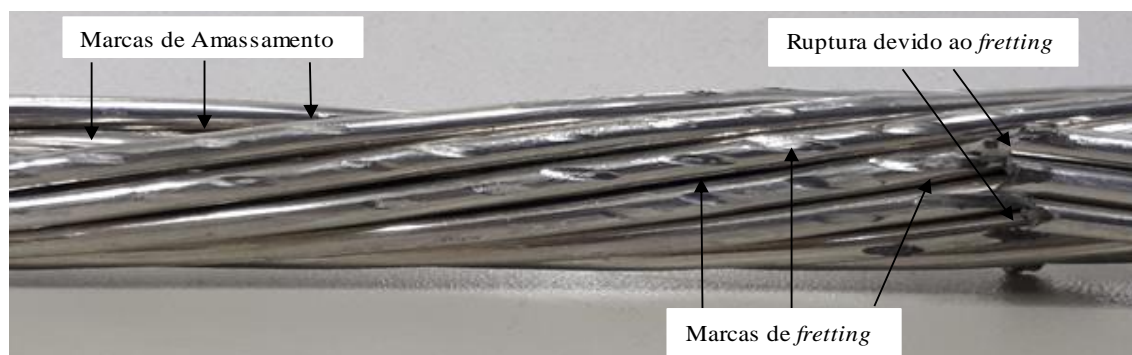


Figura 1.2 - Marcas de fretting no condutor. Fonte: Elaboração própria

A grande maioria dos cabos em operação no Brasil são do tipo CAA (Cabos com Alma de Aço) formados por alumínio 1350 H19, que possui uma boa condutibilidade elétrica (61% de um fio de cobre com o mesmo diâmetro), alta resistência à corrosão, boa conformabilidade, boa soldabilidade e boa resposta a anodização. Contudo quando esta liga

é comparada a outras como a AA 6201 T81 e AA 1120 nota-se que sua resistência mecânica estática é inferior. Devido a essa característica a alma de aço é incluída na composição do condutor, e conseqüentemente para resistir esse cabo do tipo CAA as linhas de transmissão tornam-se mais onerosas (ARAUJO, et al., 2013; NEXANS, 2013).

Os fabricantes e concessionárias do setor de transmissão de energia elétrica estão procurando formas mais econômicas para confecção dos seus produtos. Nesse sentido cabos sem a presença de alma de aço, como por exemplo, os cabos CA (Cabo de Alumínio), CAL (Cabo de Alumínio Liga), CAL 1120 (Cabo de Alumínio Liga 1120) e ACAR (Cabo de Alumínio Reforçados com Alumínio Liga) tornam-se alternativas viáveis, melhorando a relação ampacidade/peso.

O Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais (GFFM) da Universidade de Brasília, realizou comparações entre os cabos CAA e CAL em trabalhos anteriores de Araújo et al. (2013) e Kalombo et al. (2015). O primeiro condutor é constituído pela liga AA 1350 H19, com limite de resistência a tração e fadiga de 186 MPa e 48,3 MPa, respectivamente. Já o segundo pela liga AA 6201 T81 com limite de resistência a tração e fadiga de 330 MPa e 105 MPa, respectivamente. Assim, considerando que a liga AA 6201 T81 possui propriedades mecânicas superiores a Al 1350 H19, seria razoável assumir *precipitadamente* que os cabos CAL possuiriam comportamento à fadiga superior aos cabos CAA. No entanto ao observar os resultados de ensaios de fadiga, verificou-se que o condutor CAA 397,5 MCM (Al 1350 H19) possui melhor resistência a fadiga que o cabo CAL 900 MCM (liga AA 6201 T81), contrariando o que era esperado.

Os autores desses trabalhos sugeriram que essa inversão na resposta à fadiga estaria relacionada a sensibilidade das ligas estudadas ao processo de fadiga por *fretting*.

Existem muitas variáveis envolvidas no processo de falha dos cabos condutores, por exemplo: tensões resultantes do esticamento, da flexão e do contato mecânico entre fios e dos fios da camada externa com as ferragens. Tornando extremamente complexa as análises de fadiga no condutor. Neste cenário, nota-se a necessidade da realização de pesquisas sistematizadas relacionadas a transmissão de eletricidade.

1.2 Objetivos

O objetivo desta dissertação é analisar de forma comparativa a vida em fadiga entre os fios de liga AA 6201 T81 e AA 1120 H19 através um programa experimental, que permita isolar o fenômeno de *fretting* sob condições controladas. Possibilitando de tal modo a compreensão de maneira mais efetiva o efeito dos parâmetros que controlam o processo de contato entre os fios em relação ao comportamento das ligas de alumínio sob condição de fadiga por *fretting*.

1.3 Descrição da estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco seções. A primeira é formada pela introdução e objetivos, que tem por propósito a justificativa do tema escolhido, além de indicar o

objetivo geral do trabalho. A segunda seção é descrita pela revisão bibliográfica, apresentando os conceitos teóricos que embasam esta dissertação. A terceira seção é composta pela metodologia que mostra os passos necessários para comparação de vida em fadiga entre os fios de alumínio. A seção quatro apresenta os resultados, além das discussões sobre tais dados obtidos. Por fim, são apresentadas as conclusões na quinta seção, e posteriormente são colocadas as referências bibliográficas e os apêndices necessários para complementar a compreensão deste trabalho.

2.1 FADIGA EM CABOS

2.1.1 Fadiga em cabos condutores de energia elétrica

O cabo condutor é o componente fundamental das linhas aéreas de transmissão de energia elétrica, cuja a falha neste componente implica num gigantesco impacto financeiro, devido ao corte de energia elétrica nos diversos seguimentos e imensuráveis prejuízos causados pelos danos, além de considerar que o cabo condutor representa 40% do custo de investimento em capital de rede (FRONTIN, 2010). Assim, a falha deste componente representa um dos maiores problemas mecânicos nas linhas de transmissão, por isso, a resistência à fadiga do cabo condutor é um parâmetro de extrema importância tanto na fase de concepção de projeto, como na programação de manutenção preditiva e preventiva (CIGRE, 2007).

O mecanismo de falha de fadiga de cabos condutores em linhas de transmissão aéreas é causado, em sua maioria, pela amplitude de vibração devido os efeitos do vento. O condutor sob a ação do vento é induzido à elevadas tensões por movimentos oscilatórios ou vibrações resultando no fenômeno de fadiga (CIGRE, 2007).

Segundo a EPRI (2006) a vibração causada pelo vento ocorre em praticamente qualquer linha de transmissão, em qualquer momento, e em níveis moderados e baixos de vento. Esta vibração, determina o comportamento do condutor, e é dependente da velocidade do vento, ângulo de incidência do vento no cabo, a carga de esticamento, tipo e massa do cabo condutor, carga de esticamento e o tamanho do vão livre. Mesmo os cabos submetidos à ventos amenos, de baixa velocidade, se a frequência de vibração for igual a frequência natural do cabo condutor, ocasionará numa crescente absorção da energia do movimento de oscilação nos cabos e conseqüentemente um aumento na amplitude de vibração (FADEL, 2010).

A vibração no condutor pode gerar falhas localizadas em fios condutores, devido aos dispositivos instalados no condutor, como grampos de suspensão, braçadeiras, espaçadores, amortecedores entre outros dispositivos instalados, também pode gerar falha a itens associados para apoio e proteção do próprio condutor.

2.1.2 Tipos de vibração de cabos condutores de energia elétrica

Há três ocorrências distintas entre de vibrações que ocorre sobre os condutores a partir da excitação eólica, e possuem diferentes efeitos sobre os condutores e dispositivos associados aos condutores, são elas: vibração eólica, oscilação de sub-vão e galope. A figura 2.1 ilustra o comportamento do condutor em função do tipo de vibração (EPRI, 2006; HENRIQUES, 2006).

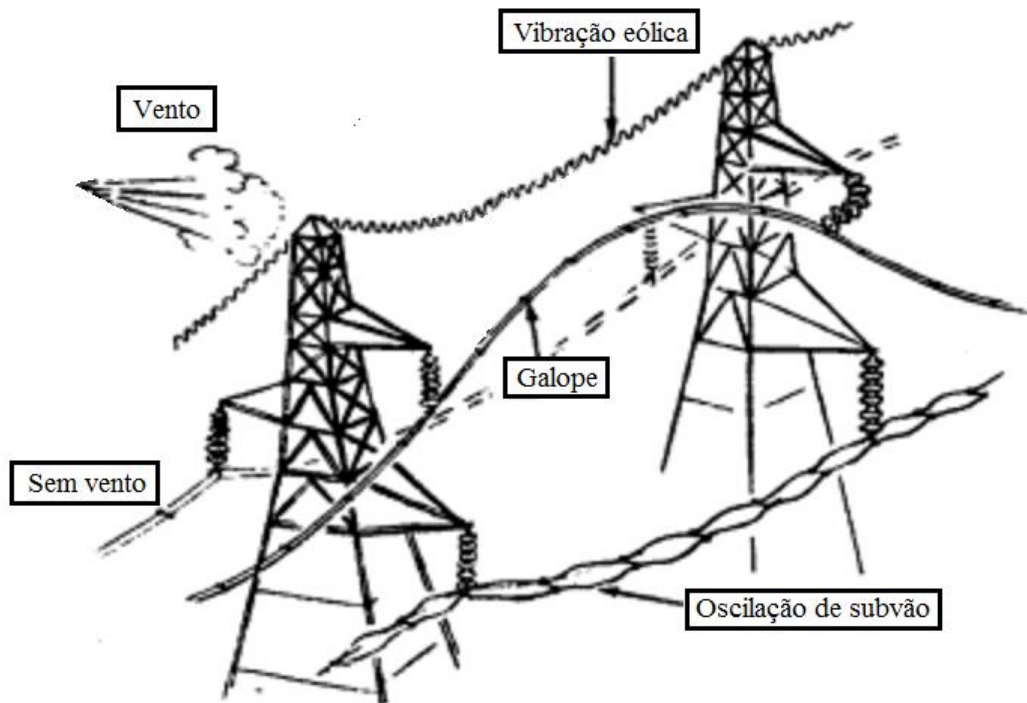


Figura 2.1 - Principais tipos de vibração de cabos condutores de linhas de transmissão aéreas de energia elétrica (Modificado: (EPRI, 2006))

2.1.2.1 Galope

Segundo Furtado et al. (2003) a vibração do tipo galope ocorre na presença de ventos fortes e laterais, normalmente entre 7 m/s a 18 m/s. Apresentando grandes amplitudes, de 5 a 300 vezes o diâmetro do condutor, cujo o movimento é primariamente vertical, e baixas frequências que variam de 0,1 a 3 Hz. Trata-se de um tipo de vibração capaz de gerar mais prejuízos em curto período causando danos, devido aos grandes esforços dinâmicos envolvidos, não só aos condutores mais se estendendo aos diversos componentes a torre de transmissão.

Uma das principais causas deste tipo de vibração é o acúmulo de gelo sobre o condutor propiciando instabilidade no perfil aerodinamicamente dos condutores, este comportamento pode ocasionar em elevadas cargas dinâmicas que consequentemente induz perigosos esforços nos condutores e na estrutura (HENRIQUES, 2006).

2.1.2.2 Oscilação de sub-vão

As oscilações de sub-vão são conhecidas também como oscilações induzidas por esteira. Elas ocorrem em linhas de transmissão que utilizam feixes de condutores dispostos paralelamente e em direção perpendicular ao fluxo de vento, com velocidade entre 4 m/s a 18 m/s e frequência variando entre 1 e 5 Hz (FURTADO et al., 2003).

Segundo Kiessling et al. (2003) esse tipo de vibração apresenta grandes amplitudes de vibração, podendo alcançar valores de até 20 vezes o diâmetro do condutor, que podem ocasionar choques mecânicos entre os condutores. Isto é, as oscilações podem ficar limitada a um único sub-vão ou a um pequeno número de sub-vão vizinhos. As oscilações

de sub-vão podem ocorrer de diversas formas, já que dependem da magnitude e da fase das forças atuando sobre o feixe de cabos (EPRI, 2006).

2.1.2.3 Vibração Eólica

A vibração eólica é caracterizada por movimentos de pequenas amplitudes, que raramente excedem o diâmetro do cabo, e elevada frequência, sendo assim de difícil detecção em inspeção visual. São causadas por ventos com velocidade entre 1 m/s e 7 m/s. Como dito anteriormente, a amplitude de oscilação deste tipo de vibração fica restrita a faixas próximas ao diâmetro do condutor e a frequência de vibração varia entre 3 Hz até 150 Hz, que dependem do tipo de cabo, carga de esticamento e local de construção da linha de transmissão (EPRI, 2006; HENRIQUES, 2006).

Essas vibrações geram flexões alternadas de pequena amplitude, mas que produzem deformações nos pontos de suspensão e ancoragem do condutor. A vibração eólica é o tipo de vibração mais frequente, no entanto, como dito anteriormente sua detecção não é fácil, a junção destas características a torna perigosa, e deve ser levada em consideração nos projetos de linhas de transmissão.

Sobre o potencial eólico do Brasil, há a predominância de ventos com velocidade média de 7,5 m/s, que corresponde a faixa de risco, por conseguinte os cabos condutores no Brasil estão propensos a apresentar o tipo de vibração eólica (AMARANTE et al., 2001). A tabela 2.1 apresenta de forma resumida as características gerais comparativas entre esses três diferentes tipos de vibração que ocorrem nas linhas de transmissão aéreas.

2.1.3 Mecanismo de falha por fadiga em cabos condutores de energia elétrica

Segundo o EPRI (2006) as falhas por fadiga dos cabos condutores são mais propensas de ocorrerem nos pontos de restrição da movimentação do cabo, como amortecedores, espaçadores e em especial nos locais de suspensão. As restrições de movimento alteram a curvatura do cabo condutor fazendo com que os fios constituintes dos cabos deslizem entre si ou em relação às estruturas de fixação. Esse movimento de micro deslizamento juntamente com as forças de fricção causam o *fretting*. Esse fenômeno, resultado do desgaste por atrito entre as superfícies, ocasiona na liberação de um pó amarronzado constituído de principalmente de partículas duras de óxido de alumínio, resultado da oxidação do alumínio, assim esse movimento age como acelerador do processo de nucleação e propagação de trincas (AZEVEDO et al., 2009).

A vulnerabilidade dos cabos ao *fretting* pode resultar na ruptura completa do cabo condutor com o aumento do carregamento da linha. Pois, tanto os fios da camada externa do condutor, por efeito do contato entre o cabo e o grampo, quanto os fios das camadas internas, em razão do deslizamento relativos entre os fios, estão sujeitas as trincas causadas pelo *fretting*. Nas inspeções de manutenção, a identificação dessas rupturas internas é trabalhosa, devido a sua localização, além de que o mesmo vento que causa a vibração eólica, responsável por essas falhas, é o mesmo que resfria os fios, mascarando o efeito térmico da fadiga.

Tabela 2.1 - Comparação entre os tipos de vibrações dos cabos condutores de energia elétrica induzidos pelo vento (modificado: (EPRI, 2006; FURTADO et al., 2003))

Características da vibração	Vibração eólica	Galope	Oscilação de sub-vão
Tipo de LT afetada	Todas	Todas	Feixe de condutores
Faixa de frequência (Hz)	3 a 150	0,1 a 3	0,15 a 10
Condições favoráveis	Vibração eólica	Galope	Oscilação de sub-vão
Tipo de vento	Laminar	Laminar	Laminar
Velocidade do vento (m/s)	1 a 7	7 a 18	4 a 18
Superfície do cabo	Desimpedida ou faixa uniforme de gelo.	Coberta por camada assimétrica de gelo	Desimpedida e seca
Condições de projeto que influenciam o movimento do condutor	Auto amortecimento dos cabos, tensão de esticamento, uso de amortecedores e armaduras	Razão da frequência natural vertical com a torção, catenária, ângulo de mergulho e condições de suporte	Distância entre espaçadores, torção do feixe, arranjo dos subcondutores, separação dos subcondutores.
Danos causados	Vibração eólica	Galope	Oscilação de sub-vão
Tempo aproximado para dano severo se desenvolver	2 meses a 20 anos ou mais	1 a 48 horas	1 mês a 8 anos ou mais
Causas diretas do dano	Falha devido à fadiga ocasionada pela tensão cíclica de flexão.	Elevadas cargas dinâmicas	Impacto dos cabos condutores, abrasão, altos níveis de desgaste nos pontos de fixação
Componentes mais afetados	Cabos condutores e para-raios	Condutores, todos os elementos de fixação, ferragens, isoladores, estrutura da torre.	Ferragens de suspensão, espaçadores, amortecedores e os cabos

Como são muitas as superfícies em contato no caso da montagem cabo e grampo associados à ocorrência de *fretting*, será necessário introduzir sobre a forma como os cabos condutores são estruturados e fixados aos grampos de suspensão.

2.1.3.1 Cabos condutores de energia elétrica e grampos de suspensão.

Os cabos condutores de energia elétrica são formados principalmente por fios ou ligas de alumínio, que podem conter fios de aço afim de agregar maior resistência ao material. Para a constituição dos cabos os fios estão dispostos torcidos de forma helicoidal, constituindo camadas concêntricas, cada camada em direção oposta em comparação a um fio central, que em conjunto com outros fios centrais compõem o condutor. A Tabela 2.2 apresenta os principais tipos de construção de cabos condutores e suas respectivas nomenclaturas.

Tabela 2.2 - Principais tipos de construção de cabos condutores (FADEL, 2010)

Nomenclatura	Descrição
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>)
ACAR	Cabos de Alumínio com Alma de Liga de Alumínio (<i>Alluminium Conductor Alloy Reinforced</i>)
TW	Fios Trapezoidais (<i>Trapezoidal Wires</i>)

Há vários tipos de grampos de suspensão, os convencionais são constituídos por material metálico resistente à corrosão e planejados para acondicionar movimentos vibratórios dos cabos condutores de pequena magnitude, além disso, sua estrutura de perfil suave garante a curvatura natural do cabo sem danificá-lo. A principal função deste dispositivo é a sustentação dos cabos nas torres de transmissão afim de reduzir a possibilidade de danos de diversas naturezas. A Figura 2.2 demonstra a configuração dos fios dentro do cabo condutor e a superfície de contato dentro do mesmo, que correspondem aos pontos de origem de trincas devido ao *fretting*, que podem ter origem em um dos diferentes pontos de contato (letras A, B, C e D).

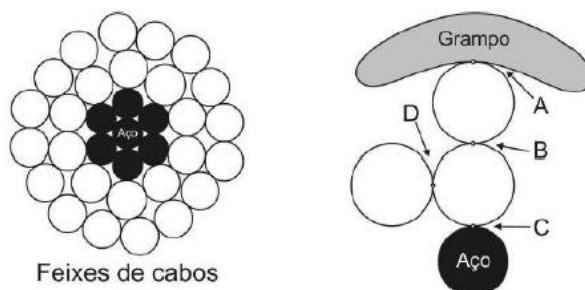


Figura 2.2 - Configuração dos fios no cabo condutor e a superfície em contato dentro do grampo, representadas pelas letras A, B, C e D (BELLORIO, 2009).

Na montagem do cabo e o grampo, as superfícies em contato do condutor são pressionadas entre si em consequência aos componentes de força que surgem pelo

entrelaçamento dos fios do cabo quando tracionadas, o aperto do cabo contra o grampo quando fixado e as forças de fricção desenvolvidas pela movimentação das superfícies submetidas à vibração eólica. Esses apertos causam marcas na superfície dos fios, chamadas de *mossas*, que atuam como concentrador de tensão e favorecem a redução da resistência do fio através do favorecimento da nucleação de trincas e a suscetível falha do componente do cabo. O tipo de material componente dos fios, a forma de construção do cabo e a carga de contato entre os componentes são fatores que determinam a forma das *mossas*.

A carga de esticamento aplicada sobre o condutor altera o perfil de contato entre os fios e o grampo, originando diversas superfícies de *fretting*, nucleação e o aumento de inúmeras trincas no mesmo fio. Essas trincas sob a ação da carga de tração facilita o avanço das trincas (BELLORIO, 2009; FADEL, 2010).

O estiramento do cabo tem ligação direta com os entalhes presentes no cabo condutor. Quanto maior for a carga de estiramento o fio de liga de alumínio sofrerá uma maior carga de esmagamento e conseqüentemente *mossas* mais profundas em sua superfície (BELLORIO, 2009).

2.2 Mecânica do contato elástico

2.2.1 Introdução

Os problemas de contato que envolvem o *fretting* geralmente apresentam grande complexidade, que em muitos casos podem ser analisados apenas por métodos computacionais. Contudo Hills e Nowell (1994) mostram como resolver analiticamente alguns casos com geometrias idealizadas onde a natureza do contato, tensão induzida ou deslocamento são bem definidas.

A natureza do contato pode ser definida entre contato completo e incompleto. O contato incompleto é aquele em que a região de contato depende da carga aplicada e além de possuir uma tangente em comum com o plano de apoio. Já o contato completo é que a extensão de seu contato com o plano de apoio não depende da carga aplicada.

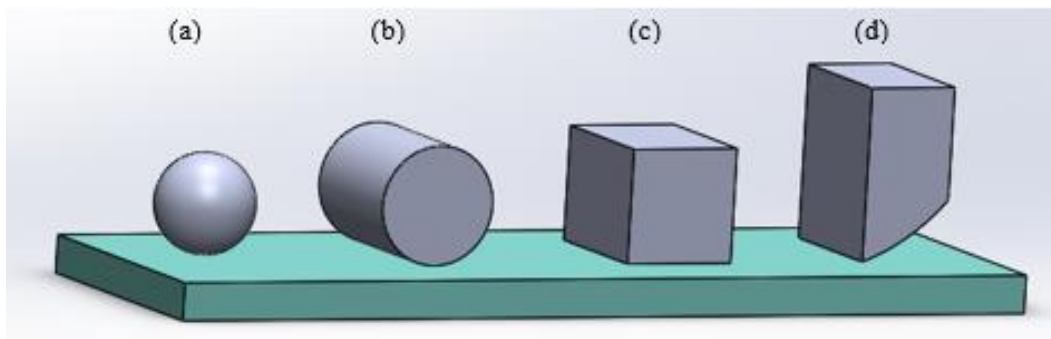


Figura 2.3 - Geometrias idealizadas para o problema de contato

Na Figura 2.3(b) o contato é feito ao longo de uma linha, e então, a medida que a carga aumenta, essa linha amplia-se para formar uma faixa estreita. Isto é um exemplo de

um contato incompleto, ou seja, sua extensão não é fixa geometricamente, mas é dependente da carga aplicada. Além disso, os corpos de contato têm uma tangente comum na borda do contato, e a inclinação das superfícies deformadas é contínua no local. Parece, portanto, fisicamente razoável, podendo ser provado que a pressão de contato também cai continuamente para zero (SACKFIELD; HILLS; NOWELL, 1993) .

A Figura 2.3(c) representa um plano rígido reto pressionado em um plano elástico. Aqui o tamanho do contato é independente da carga: diz-se, portanto, que é um contato completo. Os dois corpos não possuem uma tangente comum na borda do contato, na verdade a inclinação da superfície do meio-plano elástico não é contínuo ali, e a pressão de contato correspondente é singular. Uma pequena falha de fabricação, por exemplo, uma minúscula rebarba em uma ponta, pode influenciar grosseiramente a distribuição de pressão de contato. É possível postular contatos onde surge uma combinação dessas duas características, como a ponta em forma de D da Figura 2.3(d), em um caso como este, a impressão de contato será singular na borda abrupta, mas cai continuamente para zero na outra extremidade do contato. A extensão do contato dependerá da carga (HILLS; NOWELL, 1994).

Outra forma de classificar a natureza do contato é através do critério de conformabilidade, diz que um corpo está conformado em relação ao plano que o contém se a sua medida em contato com o plano (denominada de “ a ”) for muito menor que o seu raio “ R ” característico. Imagine que o cilindro da Figura 2.3(b) seja aplicada uma carga de pequena intensidade, teremos que $a \ll R$, ou seja, o cilindro encontra-se inconformado. Ainda para esse mesmo cilindro se aplicarmos uma força com grande intensidade sobre o plano, a região de contato a não será mais desprezível em relação a R , ou seja, para este caso o cilindro encontra-se conformado.

Após deixar claro a natureza das formas de contato é importante examinar a origem da distribuição de cisalhamento sobre o contato, além de verificar qual a influência que esse cisalhamento fornece na pressão de contato. Considerando agora dois corpos similarmente idênticos como mostrado na Figura 2.4, sendo eles elasticamente semelhantes, o deslocamento de duas partes correspondentes, uma em cada corpo, serão as mesmas, e não haverá tendência para o deslizamento relativo. Isto significa que não surgem tensões friccionais. Se agora for aplicada uma força tangencial suficiente para causar deslizamento, surgem tensões limitadas pelo coeficiente de atrito f conforme está descrita pela equação 2.1.

$$|q(x, y)| = -fp(x, y) \tag{2.1}$$

onde, q é a carga de cisalhamento e p a distribuição de força nas direções x e y .

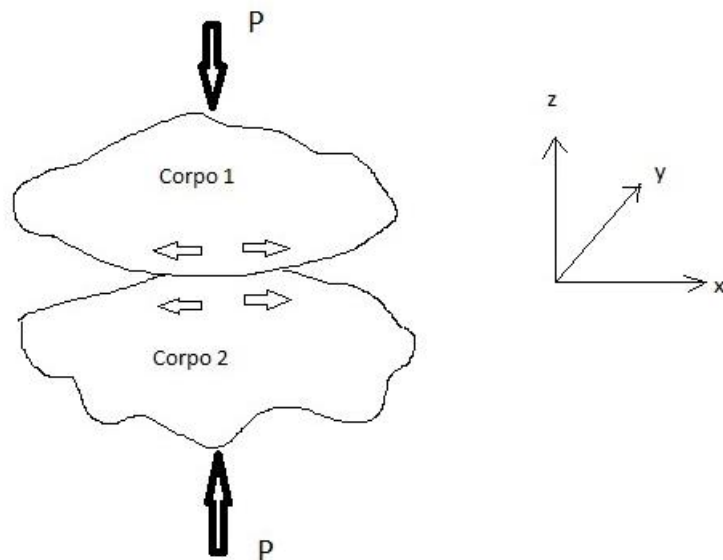


Figura 2.4 - Corpos similarmente elásticos em contato

Nos casos de fadiga por fretting geralmente respeita-se a condição de escorregamento parcial conforme a equação 2.2.

$$|Q| < fP \quad (2.2)$$

onde \$P\$ e \$Q\$ são respectivamente as forças normal e de cisalhamento por unidade de comprimento, quando se respeita a condição de escorregamento parcial a área de contato apresentará duas regiões distintas, a primeira de adesão e a segunda de escorregamento. A zona de escorregamento é governada pela equação 2.2, sendo assim, as partículas experimentam um movimento tangencial relativo limitado pelo coeficiente de atrito \$f\$. Já na zona de adesão, não ocorre este movimento entre as partículas, logo, nesta região, a tensão cisalhante deve respeitar a condição de escorregamento parcial. A Figura 2.5 ilustra essas zonas.

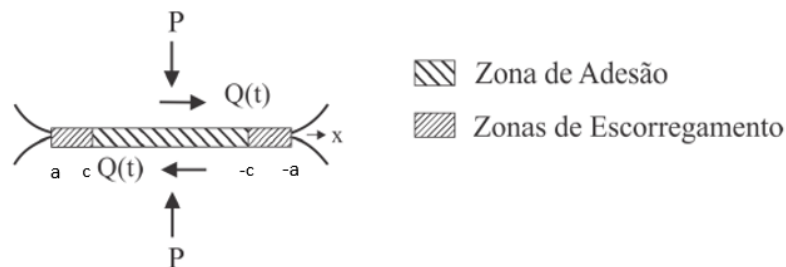


Figura 2.5 - Zonas de adesão e escorregamento quando há um deslizamento parcial

2.2.2 Fadiga por fretting

As principais teorias da mecânica do contato que foram formuladas são as de Hertz, Mindlin, Muskhelishvili e Hills & Nowell. A fadiga por fretting está intimamente ligada a essas teorias, o termo fretting é usado para denominar pequenos deslizamentos relativos

entre superfícies de contato quando submetidas a um carregamento normal. Esse carregamento pode ser gerado por vibrações ou por um carregamento cíclico, o que pode levar a nucleação de trincas, sendo que estas pode comportar-se como concentradores de tensão, que na presença de uma carga remota de fadiga pode acarreta na falha do componente, este fenômeno é descrito como fadiga por fretting (HILLS; NOWELL, 1994; WITTKOWSKY et al., 2003)

Para que haja fadiga por fretting são necessários três tipos diferentes de cargas mecânicas. A de contato normal P , a de cisalhamento Q e finalmente a de carga remota de fadiga denominada B . A seguir serão mostradas as equações que regem cada uma dessas cargas, além de apresentar quais as consequências de cada uma em relação a distribuição de pressão na região de contato.

2.2.2.1 Carga normal

Hertz (1882) conseguiu prever que devido a força normal estática entre dois cilindros gera uma distribuição de pressão elíptica. Esta distribuição de pressão aplicada sobre a direção x é mostrada na equação 2.3. Para entender as equações posteriores é importante saber que R representa o raio equivalente de uma das superfícies do cilindro e P é carregamento normal por unidade de comprimento e p_0 é o máximo valor da pressão de contato.

$$p(x) = -p_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} \quad (2.3)$$

Da condição de equilíbrio tem-se:

$$p_0 = \frac{2P}{\pi a} \quad (2.4)$$

onde, o parâmetro a é metade da extensão do contato.

$$a = \sqrt{\frac{4PR}{\pi E^*}} \quad (2.5)$$

o raio equivalente R é em função dos raios dos corpos 1 e 2, ou seja, de R_1, R_2 .

$$R = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)^{-1} \quad (2.6)$$

onde, E^* é o módulo de elasticidade equivalente, dependente do módulo de elasticidade dos dois corpos em contato. Onde ν é o módulo de Poisson.

$$E^* = \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \quad (2.7)$$

2.2.2.2 Carga tangencial

A partir da carga tangencial originam-se as tensões cisalhantes. Na fadiga por *fretting* o carregamento de cisalhamento aplicado, em geral, é menor do que o limite para o escorregamento total. E como consequência um regime de escorregamento parcial é desenvolvido em duas regiões simétricas $c \leq |x| < a$ (zona de escorregamento) zona de adesão com $|x| < c$ e como é mostrado na Figura 2.5.

A distribuição de tensão de cisalhamento $q(x)$ é modelada como uma solução do escorregamento total, deste modo pode-se escrevê-la como:

$$q(x) = fp_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} - q'(x) \quad (2.8)$$

E a perturbação $q'(x)$ é definida por:

$$q'(x) = fp_0 \frac{c}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{c}\right)^2} \quad (2.9)$$

Na região de escorregamento $q'(x) = 0$, e na zona de adesão ao se resolver a condição de equilíbrio tangencial é possível encontrar o valor da metade da zona de adesão, c , da seguinte forma:

$$\frac{c}{a} = \sqrt{1 - \left(\frac{Qmáx}{fP}\right)} \quad (2.10)$$

A Figura 2.6 mostra a distribuição da tensão de cisalhamento para uma faixa de valores de forças tangenciais e nela é possível observar a zona de adesão central, onde as tensões de cisalhamento são reduzidas devido a perturbação na solução total.

Até agora foram vistas apenas expressões desenvolvidas para a distribuição de tensão de cisalhamento quando a força tangencial está em seu valor máximo de carregamento, para analisar em outros instantes do ciclo de *fretting* é necessário observar o que ocorre no carregamento inverso (SACKFIELD; HILLS; NOWELL, 1993).

Para realizar essa análise é necessário lembrar as condições de contorno na interface do contato. Dentro da zona de escorregamento é necessário utilizar a lei de Amontons (1699) (equação 2.11). Entretanto na zona de adesão as tensões de cisalhamento devem ser menores que o valor limite de fricção (equação 2.12).

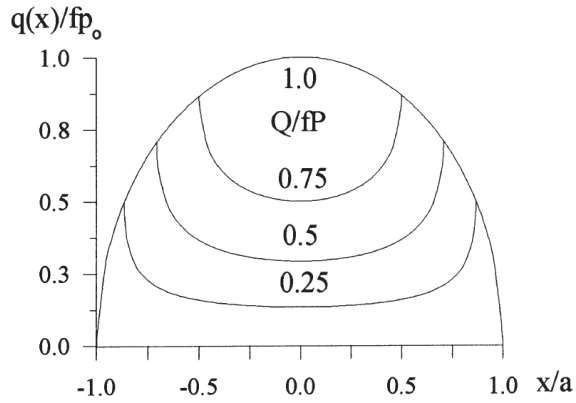


Figura 2.6 - Distribuição de tensão cisalhante (HILLS; NOWELL, 1994)

$$|q(x)| = -fp(x) \quad (2.11)$$

$$|q(x)| < -fp(x) \quad (2.12)$$

A Figura 2.7 descreve a variação da carga tangencial em relação ao tempo t . O carregamento se inicia no instante $t = 0$, e atinge a carga de cisalhamento máximo no ponto A. Contudo após este ponto, o descarregamento se inicia, causando uma violação da equação 2.13, que é válida para o carregamento.

$$\text{sgn}(q(x)) = -\text{sgn}\left(\frac{\partial g}{\partial t}\right) \quad (2.13)$$

Ao continuar o descarregamento até o ponto C é possível verificar que nessa nova zona de escorregamento ($c' \leq |x| < a$) as tensões superficiais mudam para $-fp(x)$. Por assimilação é possível deduzir que dentro da zona de adesão a tensão superficial para prever o escorregamento seja:

$$q''(x) = 2fp_0 \frac{c'}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{c'}\right)^2} \quad (2.14)$$

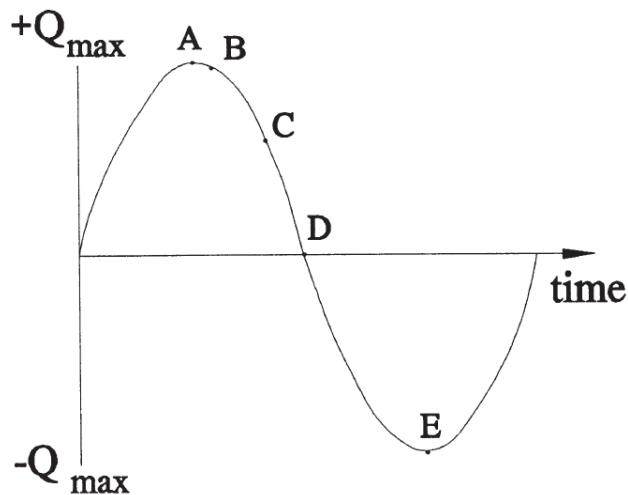


Figura 2.7 - Distribuição de carga tangencial ao longo do tempo (HILLS; NOWELL, 1994).

A Tabela 2.3 mostra a distribuição de tensões cisalhantes superficiais para cada região de descarregamento. E o tamanho da nova zona de adesão no carregamento reverso é dada pela equação 2.15.

Tabela 2.3 - Distribuição de tensão cisalhamento 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$

$$\frac{c'}{a} = \sqrt{1 - \left(\frac{Q_{m\acute{a}x} - Q}{2fP}\right)} \quad (2.15)$$

Finalmente é possível mostrar a distribuição de tensões cisalhantes na figura 2.8.

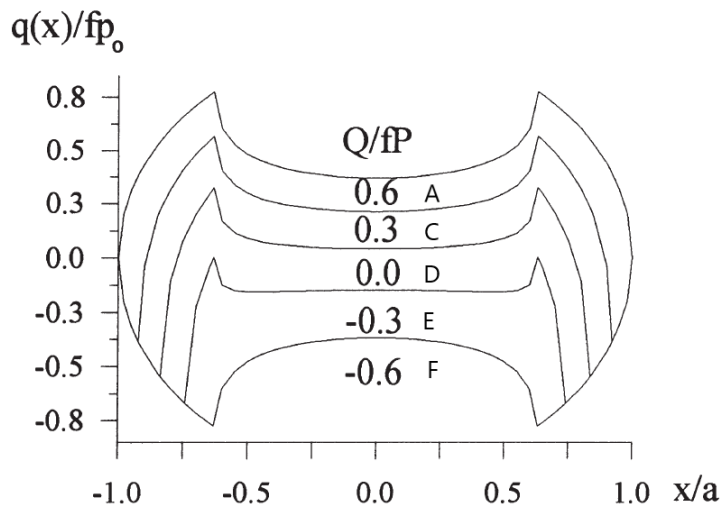


Figura 2.8 - Distribuição de tensão cisalhante durante um ciclo completo(HILLS; NOWELL, 1994).

2.2.2.3 Carga remota de fadiga

Se uma carga remota de fadiga σ_B for aplicada em fase com uma carga tangencial haverá um deslocamento da zona de adesão, representado por e e e' , onde o primeiro representa o aumento da zona de adesão após a perturbação nos pontos de máximo e mínimo de σ_B e o segundo ocorre durante o carregamento e descarregamento de σ_B . As equações 2.16 e 2.17 quantificam esse aumento da zona de adesão (SACKFIELD; HILLS; NOWELL, 1993).

$$\frac{e}{a} = \frac{\sigma_{Bmax}}{4fP} \quad (2.16)$$

$$\frac{e'}{a} = \frac{\sigma_{Bmax} - \sigma_B(t)}{8fP} \quad (2.17)$$

Essas equações são validas apenas para pequenas cargas de fadiga, para cargas maiores é necessário utilizar um método numérico usando por exemplo uma programação quadrática (HILLS; NOWELL, 1994).

A figura 2.9 representa a história das tensões cisalhantes superficiais para a combinação de carga tangencial e remota de fadiga para $\frac{\sigma_B}{p_0} = 0,5904$.

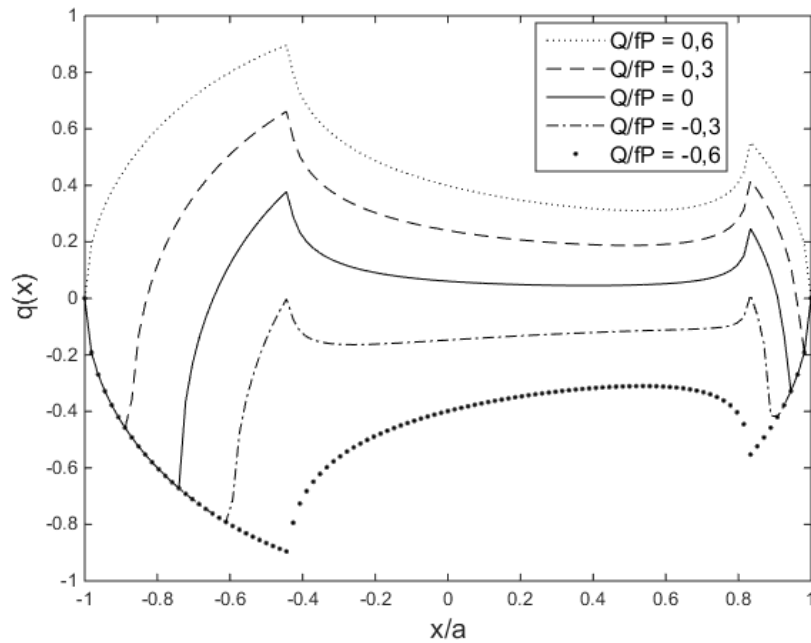


Figura 2.9 - Distribuição de cisalhamento na presença de carga remota de fadiga

3 METODOLOGIA

Para observar o efeito da fadiga por *fretting* e comparar o seu impacto nos fios de liga AA 1120 e AA 6201 T81 foi necessário a realização de um programa experimental, que em suma consistiu na análise de vida em fadiga de ambas as ligas comparando-as com sua durabilidade na presença do fenômeno isolado de *fretting* em diferentes parâmetros.

Antes de iniciar os ensaios mecânicos destrutivos, foi necessário a obtenção dos espécimes utilizados nesta dissertação. Após essa fase, houve a divisão da metodologia experimental em quatro etapas: i) ensaio de caracterização dos materiais; ii) ensaio de fadiga com a imposição de *fretting* nos fios dos condutores; iii) avaliação da pressão média de contato entre o fio e a sapata; iv) análises das falhas.

A caracterização dos materiais consistiu na obtenção das propriedades mecânicas das ligas que foram estudadas nesta pesquisa. Posteriormente a essa etapa, iniciou-se a imposição de fadiga por *fretting* nos fios dos condutores em diferentes configurações de cargas normais (P), gerando curvas de Tensão-Vida (S-N), a fim de qualificar a sensibilidade ao *fretting* nos fios dos condutores. Na etapa de avaliação da pressão média de contato pode verificar parcialmente a influência da pressão na resistência à fadiga por *fretting* para diferentes cargas normais.

Por fim, para maximizar a qualidade dos resultados, iniciou-se a quarta etapa do processo experimental, nesta fase foram realizadas análises de falha dos espécimes juntamente com análises de imagens da superfície do contato e de fratura em microscópios do tipo Confocal e Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para comprovar que houve o processo de fadiga por *fretting* nos ensaios controlados no laboratório.

3.1 Descrição dos equipamentos e materiais

3.1.1 MTS *Landmark*

A MTS *Landmark* (ver Figura 3.1) é uma máquina de ensaios servo hidráulica que permite a realização de testes monotônicos e cíclicos, possuindo célula de carga de 5 kN. Encontra-se no laboratório de Fadiga, Fratura e Materiais da Universidade de Brasília. Neste trabalho ela foi utilizada para o estiramento dos fios para obtenção dos espécimes, além dos ensaios de fadiga dos espécimes planos.



Figura 3.1 - MTS Landmark

3.1.2 Dispositivo de ensaio de fadiga por fretting

Para realização dos ensaios de fadiga por *fretting* foi necessário adaptar a MTS 370,02/318,25s com um dispositivo pneumático capaz de imprimir uma força perpendicular ao espécime posicionado na MTS. Este dispositivo (Figura 3.3) foi projetado por professores e discentes do Departamento de Engenharia Mecânica (UnB), a concepção desse dispositivo pode ser observado na dissertação de Garcia (2019). Este conjunto teve sua construção baseada no mecanismo proposto por Hills e Nowell (1994). O acoplamento a MTS 370,02/318,25s com o dispositivo de *fretting* foi possível devido a inclusão dos seguintes itens, essa modificação da MTS pode ser vista na figura 3.2:

- Travessão e uma garra para segurar os fios;
- Célula de carga para o novo travessão a fim de medir a carga remota;
- Atuador de 15 KN acoplado ao travessão superior para ligar o dispositivo pneumático de fretting além de medir as cargas tangenciais $Q(t)$;
- Estrutura metálica rígida para regular a distância entre o travessão superior e intermediário.

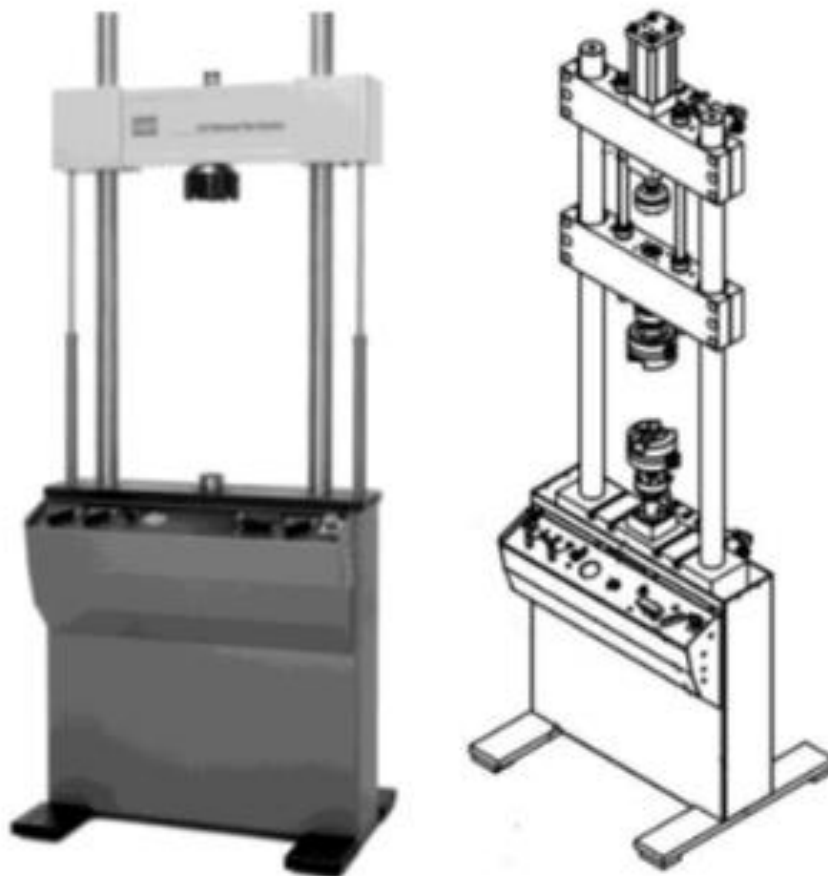


Figura 3.2 - (a) MTS sem modificações; (b) MTS preparada para receber o dispositivo pneumático de *fretting* (GARCIA, 2019)

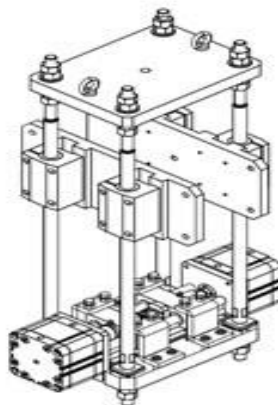


Figura 3.3 - Desenho esquemático do dispositivo de *fretting* (GARCIA, 2019)

Após o acoplamento do conjunto, o atuador inferior da MTS é responsável por aplicar uma carga remota de fadiga ($B(t)$) ao espécime, e o atuador superior controla a carga tangencial ($Q(t)$) que é uma reação ao movimento causado pela carga B , o controle dessa carga $Q(t)$ pode ser feito de duas maneiras, na primeira controlando o ensaio pelo deslocamento nulo deste atuador superior e a segunda através de uma força nula neste

mesmo atuador, em ambos os modos será possível medir a carga tangencial Q . Já a carga normal (P) é aplicada pelos atuadores dos dispositivos pneumáticos. A imagem do conjunto pode ser vista na figura 3.4, a representação das forças aplicadas pelo conjunto no fio está na Figura 3.5.

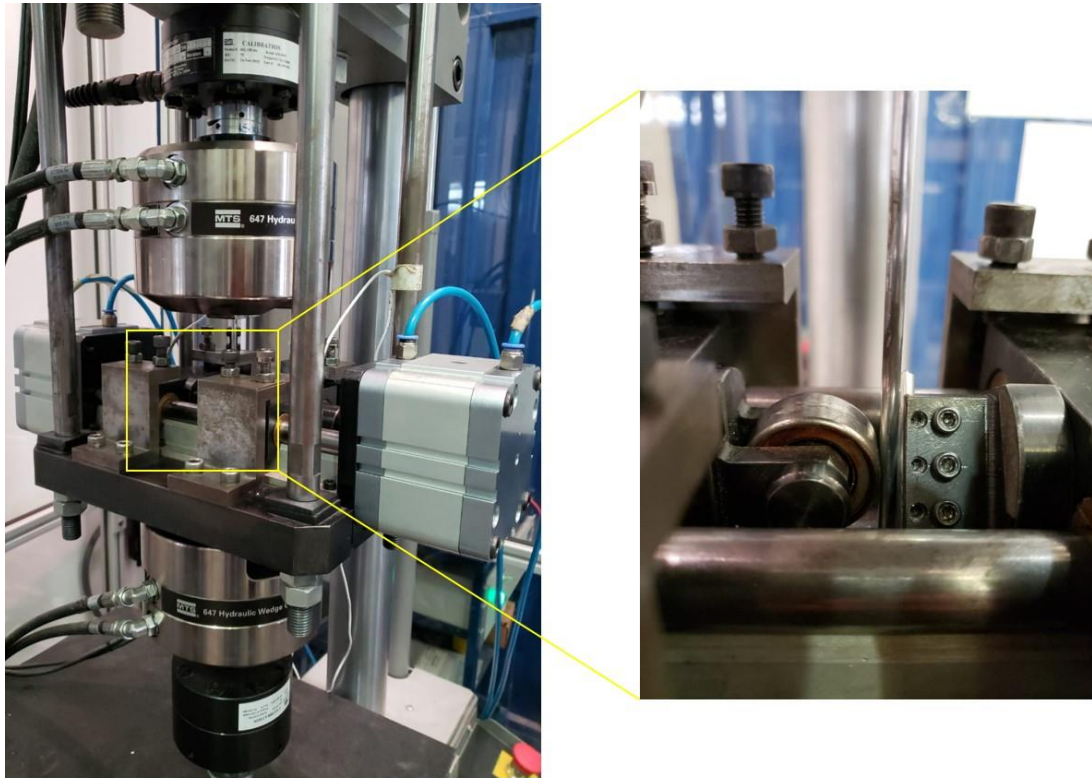


Figura 3.4 - Conjunto do dispositivo de fadiga com *fretting*

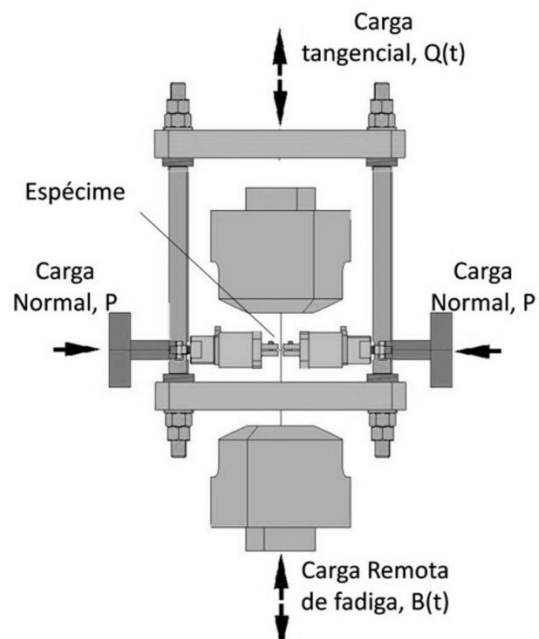


Figura 3.5 - - Representação das forças no dispositivo de fadiga com *fretting* (Adaptado: GARCIA, 2019)

3.1.3 Microscópios

O microscópio Confocal da marca Olympus (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) foi utilizado para medir características geométricas das mossa deixadas pelo contato entre o fio e a sapata, além de, imagens para verificar houve o fenômeno de *fretting* na região de contato.

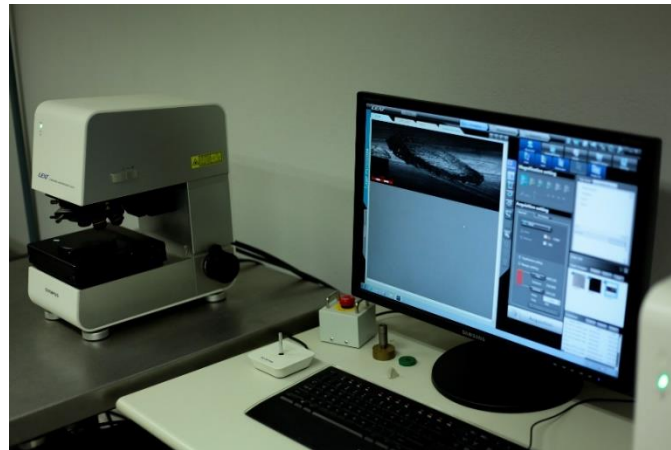


Figura 3.6 – Microscópio Confocal

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca JOEL e modelo EX-37001 (Figura 3.7), encontra-se no prédio SG9 da Universidade de Brasília, ele utiliza feixe de elétrons para iluminar os objetos inspecionados no interior de sua câmara. Neste projeto foi utilizado para verificação das marcas de fadiga na superfície de fratura após a falha dos espécimes, juntamente com a análise da composição química da região de contato durante o processo de fadiga por *fretting*.

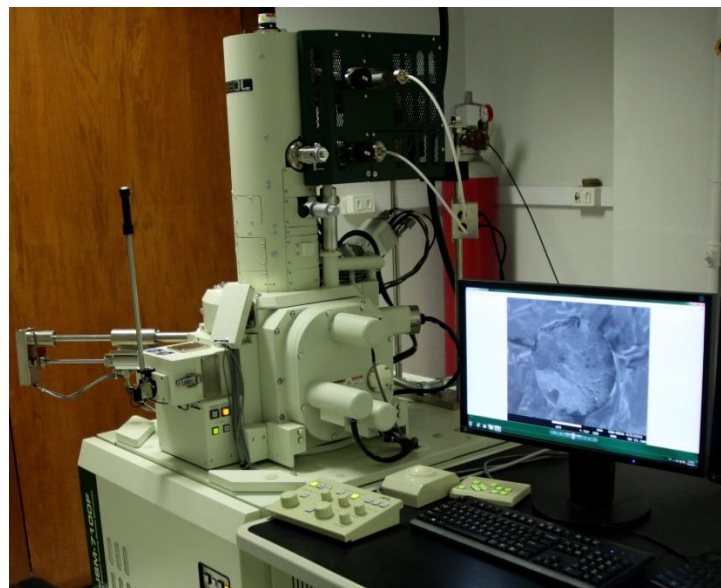


Figura 3.7 - Microscópio Eletrônico de Varredura

3.1.4 Cabo condutor CAL 823 - MCM

Este cabo é formado por 37 fios da liga AA 1120 dispostos em 4 camadas, enrolados de forma helicoidal. A liga AA 1120 pertence a série 1XXX, onde são consideradas ligas de alumínio puro, ou seja, acima de 99% de pureza. Esta liga não possui tratamento térmico e além disso caracteriza-se por elevada condutividade térmica e baixa resistência mecânica quando comparada a outras ligas de alumínio das séries 2XXX a 8XXX, porém esta liga possui boa resistência a corrosão devido a formação da camada de uma fina camada de óxido de alumínio Al_2O_3 . Este cabo foi utilizado para a confecção dos espécimes utilizados nos ensaios de caracterização da liga AA 1120 e para os ensaios de fadiga por *fretting*.

3.1.5 Cabo condutor CAL 1055 - MCM

O condutor 1055 MCM é formado por 61 fios da liga AA 6201 T81 dispostos em 4 camadas, enrolados de formas helicoidal. A liga AA 6201 T81 pertence a série 6XXX, as ligas dessa série possuem magnésio e silício como principais elementos de liga, quando esses dois elementos se combinam, formam o Mg_2Si , que confere o endurecimento a esta liga. Além dessa característica mecânica, esta liga também possui boa resistência a corrosão, abrasão e mecânica. O condutor 1055 MCM foi utilizado na obtenção dos fios, para a caraterização mecânica da liga AA 6201 T81 juntamente com os ensaios de fadiga por *fretting*. A tabela 1 apresenta as características dos condutores utilizados nesta pesquisa.

Tabela 3.1-Características dos condutores e das ligas de alumínio (Adaptado, NEXANS, 2016)

Condutores	Liga	Seção transversal (mm ²)	Nº de fios	Diâmetro dos fios (mm)	Carga de Ruptura (kN)	Condutivida de da liga (% IACS)
1055 MCM	AA 6201 T81	534	61	3,34	152,5	52
823 MCM	AA 1120	417	37	3,79	95,2	59

3.2 Descrição do programa experimental

3.2.1 Confecção dos espécimes

Foram produzidos três tipos de corpos de prova (CP's). Os dois primeiros foram utilizados na etapa de caracterização dos materiais nos ensaios de tração e de fadiga. O último tipo de espécime foi empregado nos ensaios de fadiga por *fretting*.

O primeiro passo para obter os três tipos de CP's foi desenrolar o cabo e utilizar os fios da segunda camada mais externa dos condutores. E em seguida esse fio sofreu um processo de estiramento, para perder o formato helicoidal.

Para esticar o fio foram necessários dois ensaios sucessivos do tipo monotônico axial na MTS *Landmark*. Este procedimento ocorreu posicionando os fios nos mordentes da

máquina e aplicando os parâmetros mostrados na Tabela 3.2. A figura 3.8 mostra o fio antes e após o estiramento.

Tabela 3.2 - Parâmetros do estiramento dos fios	
1º Esticamento	
Velocidade (mm/min)	Força (N)
10	0 – 150
5	150 – 500
2	500 – 1000
1	Até a ruptura
2º Esticamento	
Velocidade (mm/min)	Força (N)
1	Até a ruptura

3.2.1.1 Espécimes utilizados nos ensaios de caracterização dos materiais

Foram produzidos dois tipos de corpos de provas, um para o ensaio de tração e outro para o ensaio de fadiga, em ambos os casos foram confeccionados CP's planos que sofreram processo de usinagem em um torno CNC com a intenção de garantir as proporções estabelecidas pela norma ASTM E466-15 (2016). Para o espécime de tração houve uma alteração no comprimento da área útil para utilização do extensômetro. As dimensões para cada CP são mostradas pela figura 3.9 e tabela 3.3.

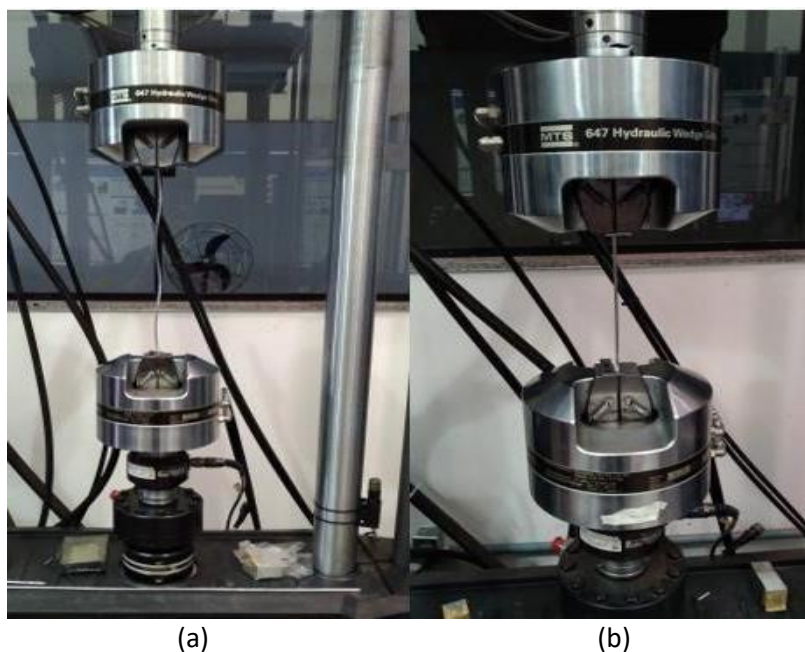


Figura 3.8 - (a) Fio antes do ensaio de estiramento; (b) Fios após o estiramento

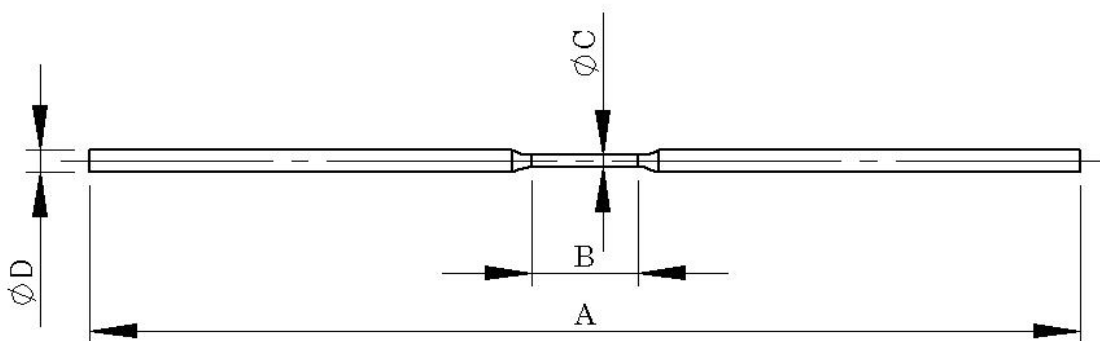


Figura 3.9 - Espécimes utilizados nos ensaios de caracterização dos materiais

Tabela 3.3 - Dimensão dos espécimes (mm)

Espécime	A	B	C	D
Tração, AA 6201 T81	140,0	35,0	1,8	3,34
Fadiga, AA 6201 T81	140,0	15,0	1,8	3,34
Tração, AA 1120	140,0	35,0	2,0	3,79
Fadiga, AA 1120	140,0	15,0	2,0	3,79

3.2.1.2 Espécimes empregados nos ensaios de fadiga por *fretting*

Os espécimes utilizados nesta etapa foram retirados de seus respectivos cabos condutores, e cortados com comprimento de 220 mm sem a necessidade de redução de seção, pois, o campo de tensões gerado pelo contato entre o fio e a sapata foi o suficiente para a ocorrência da falha na maioria dos casos. A figura 3.10 mostra esses corpos de prova.



Figura 3.10 – Espécimes utilizados nos ensaios de fadiga por *fretting*

3.2.2 Ensaios de caracterização dos materiais

Nesta etapa foram obtidas as propriedades mecânicas das ligas AA 6201 T81 e AA 1120. Para obter as propriedades mecânicas estáticas, tais como resistência a tração e módulo de elasticidade, foram realizados ensaios monotônicos axiais. Para a determinação das propriedades dinâmicas, como a resistência à fadiga, foram realizados ensaios cíclicos controlados por força utilizando a metodologia Tensão-Vida (S-N) e a norma ASTM E739-91, (2012). Os parâmetros predefinidos para os ensaios são mostrados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Parâmetros dos ensaios de fadiga e tração

Ensaio	Controle do ensaio	Frequência do atuador	Velocidade	Razão de Carregamento
Tração	Deslocamento	-	1 mm/min	-
Fadiga	Força	15 Hz	-	$R = 0,1$

A razão de tensões, $R = 0,1$ foi escolhida para impor a tensão média na condição de tração-tração, a fim de simular as condições que o cabo condutor experimenta quando está em operação. Para ambas configurações de ensaios, utilizou-se a MTS *Landmark*, com célula de carga de 5 kN.

3.2.2.1 Norma ASTM E739-91

Os ensaios de fadiga neste trabalho utilizam a metodologia Tensão-Vida (S-N), e segundo a norma E739-91 (2012) este tipo de experimento deve ter um índice de replicação de entre 33% a 50%. Sendo assim é possível definir quantos espécimes são necessários para cada corpo de prova em função de níveis de tensão e uma taxa de replicação inicial. Para definir a quantidade de corpos de prova (NCP) nos ensaios utilizou a equação 3.1. Por hipótese inicial o índice de replicação adotado para este projeto foi de 33%, e a quantidade de níveis de tensões (N_t) são 3.

$$\text{replicação} = 100 \times 1 - \frac{1 - N_t}{NCP} \quad (3.1)$$

Ao isolar o fator NCP da equação 3.1 foi possível constatar que o número mínimo de corpos de prova (CP's) necessários para adequarem-se à norma são de 9 espécimes.

3.2.3 Ensaios de fadiga por *fretting*

Os ensaios de fadiga por *fretting* foram realizados com uma máquina de ensaios servo hidráulica (MTS), com célula de carga de 5 kN, acoplado a um dispositivo pneumático de simulação de *fretting* que foi idealizado e criado por membros do GFFM. A figura 3.5 na subseção 3.1.2 mostra o desenho esquemático desse aparato necessário para realização de ensaios de fadiga por *fretting*.

Esse aparato experimental tem a função de aplicar três cargas independentes no espécime ensaiado i) A componente de carga normal P, que é aplicada com a intenção de induzir um campo de tensões de contato nas regiões de interface da sapata com o corpo de prova (contato fio-fio), ii) A carga tangencial Q(t), que induz o aparecimento de tensões cisalhantes na superfície dos corpos, e iii) A componente B(t), definida como a carga remota de fadiga, que é responsável pela evolução das trincas de fadiga geradas na região de contato.

Para promover a simulação do fenômeno de *fretting* em condições controladas, foi necessário a impressão de diferentes cargas normais, P. Essas cargas foram de: 250 N, 500 N, 750 N e 1000 N. Elas foram aplicadas no fio através de uma sapata constituída da mesma liga de alumínio. Esta sapata foi posicionada a um ângulo de 29° em relação ao corpo de prova, essa angulação foi amplamente utilizada nos ensaios de fadiga de condutores, pois

corresponde ao tipo geométrico de encordoamento dos fios na formação dos cabos, essas informações podem ser verificadas no trabalho de Badibanga (2017). Para manter o equilíbrio de forças durante o ensaio o outro atuador do dispositivo de *fretting* utiliza um rolamento para estabelecer o contato na parte posterior do fio. Este contato é exemplificado pela Figura 3.11.

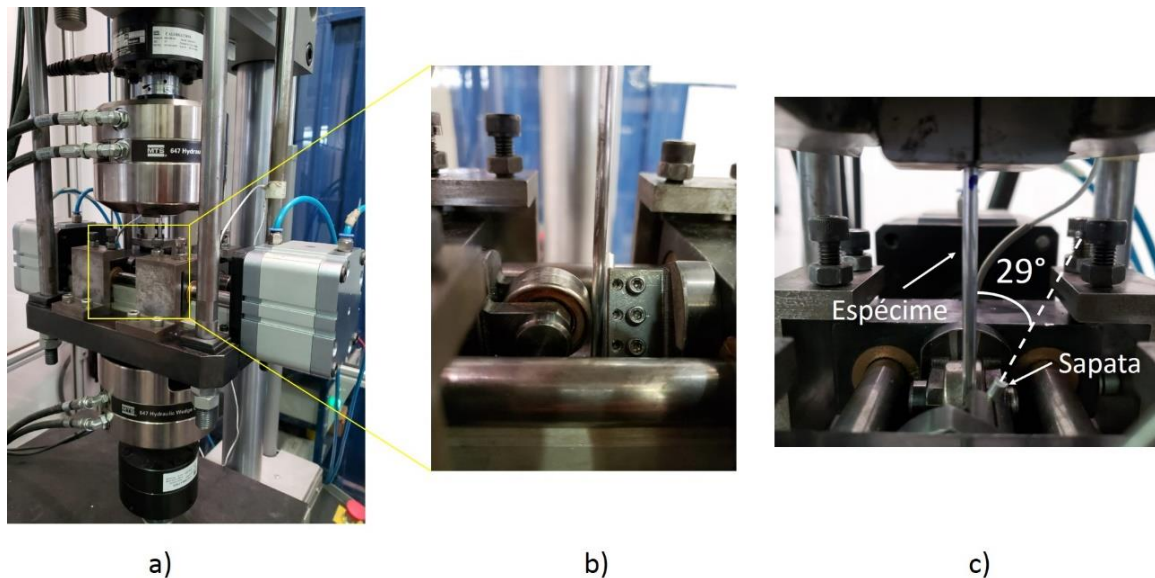


Figura 3.11 - a) Aparato de fadiga por *fretting*; b) Ampliação da região do contato; c) Vista frontal do contato

Assim como nos ensaios de fadiga na etapa de caracterização dos materiais, este também possui a presença de força média, com a razão de tensões, $R = 0,1$. Além disso, a frequência da carga remota de fadiga utilizada nesses ensaios foi de 10 Hz.

3.2.3.1 Escolha dos parâmetros de indução de *fretting*

- **Tipo do controle do ensaio**

No dispositivo utilizado para o ensaio de fadiga por *fretting* é possível controlar o ensaio de duas maneiras, a primeira, controlando através do deslocamento nulo do travessão que suporta o dispositivo de *fretting* e a outra deixando-o com o deslocamento ativado, controlando através da força nula.

Para escolher o método de controle que foi utilizado nos ensaios de *fretting*, foram realizados testes que consistiam em ensaios de fadiga por *fretting* com 15 mil ciclos nos fios de AA 1120, usando duas tensões remotas de fadiga e duas forças normais distintas no contato fio-sapata. Os resultados deste teste são mostrados na Tabela 3.5.

Ao analisar os resultados da tabela 3.5, percebeu-se que na configuração deslocamento nulo ($d=0$) as cargas de cisalhamento Q são maiores que os resultados de força nula ($F=0$), porém a variação entre as forças máximas e mínimas são menores na configuração de força nula, ou seja, a carga Q é mais constante. Assim a configuração escolhida do controle do ensaio de *fretting* foi a força nula.

Tabela 3.5 - Teste de força nula x deslocamento nulo

N=15000 ciclos				
P1 = 250 N	Q máx [N] - F=0	Q mín [N] - F=0	Q máx [N] - d=0	Q mín [N] - d=0
B1 = 92 MPa	284	-266	306	-322
B3 = 50 MPa	160	-154	194	-169
P2 = 750 N	Q máx [N] - F=0	Q mín [N] - F=0	Q máx [N] - d=0	Q mín [N] - d=0
B1 = 92 MPa	319	-318	361	-415
B3 = 50 MPa	182	-185	207	-213

- **Escolha da carga P para os ensaios de fadiga com fretting**

O parâmetro de carga normal P, é a força imprimida no corpo de prova através da sapata de alumínio, e nesta etapa foram realizados testes para escolher as cargas normais utilizadas nos ensaios de indução de fadiga por *fretting*. Estes ensaios, são de natureza destrutiva, ou seja, tem o intuito de gerar a falha em um local pré-determinado do espécime. O local desejado para a falha é na região do contato entre o fio e a sapata.

Foram realizados ensaios de fadiga por *fretting* de maneira padronizada, parafraseando o método da escada (método utilizado nos ensaios de fadiga em aço para determinar o limite de resistência à fadiga). Este método foi realizado mantendo a carga remota de fadiga constante com 92 MPa com frequência de ensaio a 10 Hz, variando a carga P de 250 N a 1000 N. O funcionamento foi da seguinte maneira: os ensaios se iniciam com a carga de 250 N, se o espécime falhar no local adequado, passa-se para o próximo nível, que é a carga de 500 N, caso não ocorra a falha volta-se para o nível anterior (exemplo, o de 250 N) e se falhar novamente passa para o próximo nível de pressão. Este método foi obtido com 6 ensaios, e está exposto na Tabela 3.6. Os pontos representados por “X” significa que a falha ocorreu na região de contato, contudo as marcas ilustradas por “O” denotam os espécimes que não falharam no contato fio-sapata.

Tabela 3.6 - Teste para encontrar as forças de compressão P

Carga remota de fadiga = 92 Mpa	Ensaio					
	1	2	3	4	5	6
Força compressiva (N)						
250	X					
500		X				
750			X		X	
1000				O		X

Ao final dos testes, decidiu-se utilizar as cargas normais compressivas P, para os ensaios de fadiga por *fretting* de 250 N, 500 N, 750 N e 1000 N.

3.2.4 Avaliação comparativa da pressão média de contato entre os fios

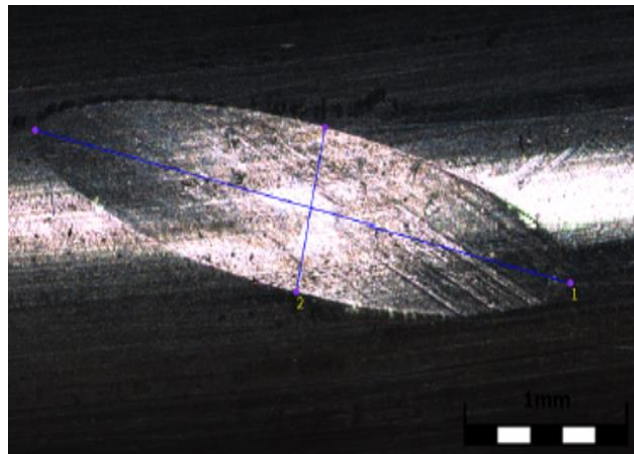
Um fator importante que pode ajudar na interpretação dos resultados dos ensaios de fadiga por *fretting* é a análise da pressão média no contato entre o fio e a sapata com o ângulo de 29°.

Esses testes foram realizados no aparato de *fretting* da seguinte forma:

- Posicionou-se o corpo de prova de 220 mm (o mesmo tipo de CP utilizado para os ensaios de *fretting*) na MTS acoplado ao aparato de *fretting*;
- Esticou-se o corpo de prova até a força média necessária para obter os 70 MPa de carga remota de fadiga;
- Aplicou-se a força normal P no corpo de prova através da sapata pelo dispositivo pneumático por 60 segundos;
- A aplicação do contato ocorreu em três regiões distintas do espécime para obter aferições mais precisas da marca de contato;
- Aferiu-se as áreas de contato impressas nos corpos de prova com o microscópio Confocal;
- Finalmente pôde-se obter a pressão média de contato através da equação 3.2.

$$P_{rm} = \frac{P}{A} \quad (3.2)$$

onde, P_{rm} é a pressão média de contato, P é a força de contato normal aplicada pela sapata, e A é a área da marca de contato. A medição da área ocorre como indicado no exemplo da figura 3.12.



Liga Al 1120

Eixo 1: 3,36 mm

Eixo 2: 0,8 mm

Figura 3.12 Área de contato

Foram utilizados 6 corpos de prova para cada liga de alumínio, AA 6201 T81 e AA 1120. As cargas normais P , foram: 95 N, 250 N, 500 N, 750 N, 1000 N, 1500 N.

As áreas obtidas para cada força normal serão apresentadas nos apêndices deste trabalho.

3.2.5 Comprovação da presença de *fretting* análise dos tipos de falhas

Nesta etapa os corpos de prova que falharam durante os ensaios de fadiga por *fretting* tiveram suas superfícies de falhas analisadas. Primeiramente foram observadas a olho nu para identificar se a quebra ocorreu em forma de “V”, “quase-plano”, “45°”, “L”. Posteriormente alguns desses CP’s foram levados ao MEV para serem observados, com objetivo de encontrar elementos de propagação de trinca e falha abrupta na superfície de falha.

Além dessa etapa, utilizou-se um procedimento experimental idealizado por Garcia (2019) com objetivo de comprovar a presença de *fretting* durante os ensaios de fadiga por *fretting* através de Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) no MEV.

Esta análise consistiu em diferenciar as regiões de adesão e escorregamento através dos elementos químicos encontrados na marca de contato. Quando há o escorregamento parcial, a área de adesão é um local que não houve contato com o ar atmosférico, portanto o elemento mais abundante é o alumínio, entretanto a área de escorregamento, existe a oxidação e conseqüentemente, o oxigênio é um elemento bem evidenciado.

Para alcançar tal fim foram ensaiados quatro corpos de prova, dois de AA 6201 T81 e dois de AA 1120 em fadiga por *fretting*. A tensão remota de fadiga utilizada em todos os ensaios foi de 70 MPa e cada CP foi ensaiado até duzentos mil ciclos com a carga P de 750 N e 1000 N. Após os ensaios, os CP’s foram levados ao MEV para análise de espectroscopia.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultado dos Ensaios de caracterização dos materiais

A figura 4.1 apresenta as curvas Tensão-Deformação para as ligas AA 6201 T81 e AA 1120, sendo representadas pelas curvas cheia e tracejada, respectivamente. Para facilitar a comparação entre as propriedades mecânicas das ligas, foi criada a tabela 4.1, nela é possível observar as propriedades estáticas para ambas as ligas. A curva $\sigma - \epsilon$ da liga Al 6201 T81 foi retirada do trabalho de Reinke (2017). Nota-se com base nos resultados apresentados na figura 4.1, que a curva tensão deformação da liga AA 6201 apresenta três regiões distintas, a elástica na região de até $\epsilon \approx 0,6\%$; escoamento de $0,6\% > \epsilon < 7\%$; e por fim a zona de estricção com $\epsilon > 7\%$. O comportamento mecânico dessa liga durante a curva tensão-deformação assemelha-se a de um material com comportamento elástico perfeitamente plástico. Para o ensaio dos fios de liga AA 1120, percebe-se que logo após o espécime alcançar o limite de resistência a tração, inicia-se a região de estricção, isso mostra, aparentemente, que essa liga não apresentou características de endurecimento devido ao aumento de deformação plástica. Esse comportamento também é observado para a liga Al 1100 (ver no capítulo 4 do Dowling (2013)), pertencente à família das ligas de alumínio puro, assim como AA 1120.

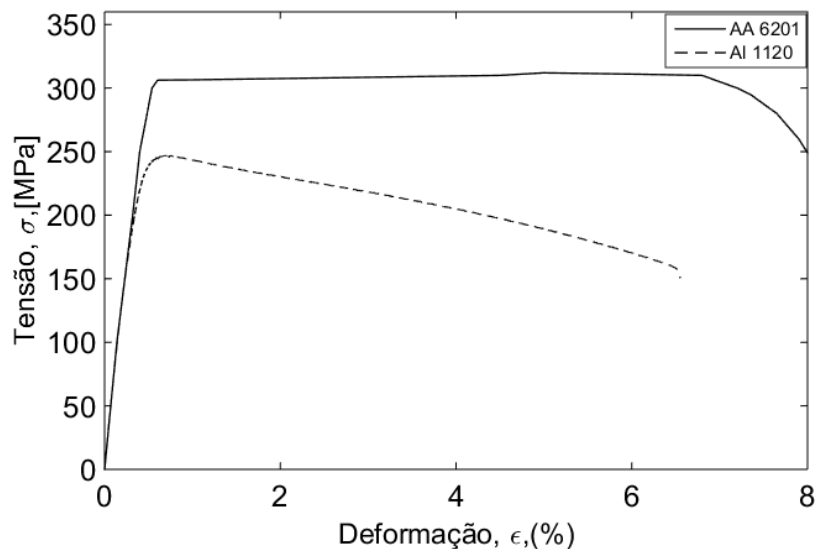


Figura 4.1 - Curvas Tensão-Deformação para as ligas AA 6201 T81 e AA 1120

Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas estática

Propriedade estática	Liga AA 6201 T81	Liga AA 1120
Módulo de Elasticidade, E	63 GPa	65 GPa
Tensão de Escoamento, σ_y 0.2%	306 MPa	245 MPa
Resistência a tração, σ_{rt}	311 MPa	248 MPa
Tensão na fratura, σ_f	249 MPa	150 MPa
Dureza Vickers, HV	90	56

Ao comparar as propriedades mecânicas estáticas, nota-se que em todos os critérios, excetuando o módulo de elasticidade que são próximos nos dois casos, a liga AA 6201 T81 possui as propriedades superiores à liga AA 1120. Mostrando-se mais tenaz, resiliente, dúctil e com maior resistência a tração e escoamento.

Para a caracterização dinâmica das ligas foi necessário o levantamento de duas curvas de fadiga S-N. A figura 4.2 apresenta os resultados obtidos. Nessa figura, os triângulos e círculos representam os pontos experimentais da liga AA 6201 T81 e AA 1120, respectivamente. Esses dados relacionam a vida do corpo de prova até a sua ruptura em escala logarítmica no eixo horizontal com sua respectiva amplitude de tensão no eixo vertical. A linha contínua representa a curva de fadiga da liga AA 6201 T81, já a linha tracejada representa a curva da liga AA 1120. Os parâmetros dessas curvas de tendência foram estimados considerando que os dados experimentais sejam representados pela função descrita na Eq. 4.1.

$$S = A N_f^b \quad (4.1)$$

onde, S é a amplitude de tensão ou a amplitude da carga remota de fadiga, A e b são constantes obtidas do ajuste de potência dos dados experimentais e N_f é o número de ciclos para falha do espécime.

Ao analisar essas curvas, observa-se que a curva da liga 6201 T81 está consideravelmente acima da curva da liga AA 1120 em toda sua extensão. Um aspecto interessante a se notar é o paralelismo entre elas, em toda sua em todo o domínio apresentado. Deste modo pode-se afirmar que na faixa de vida analisada, a liga AA 6201 possui maior resistência à fadiga em relação a liga AA 1120.

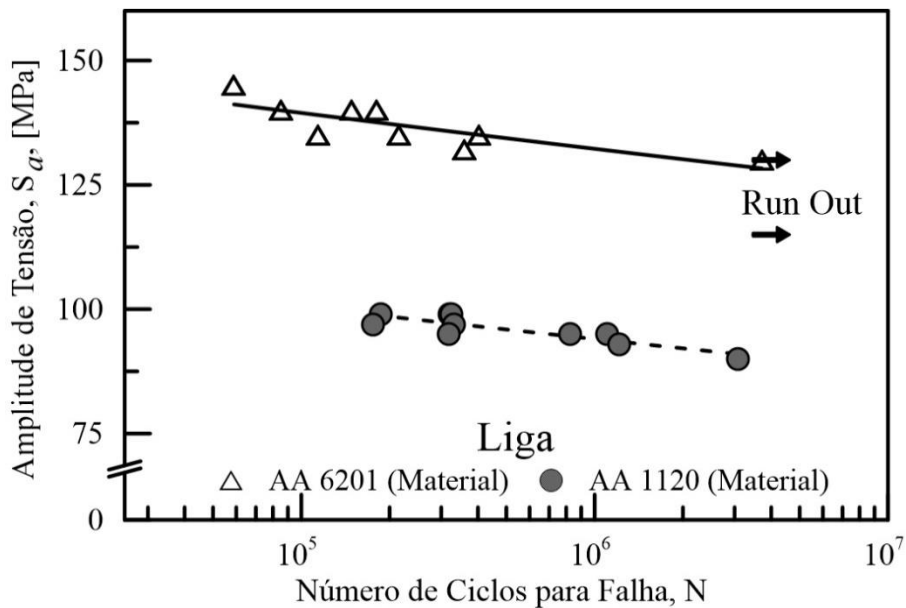


Figura 4.2 - Curvas de fadiga dos materiais

4.2 Resultado dos ensaios de fadiga por *fretting*

4.2.1 Resposta dos fios em relação a imposição dos parâmetros de *fretting*

Os resultados dos ensaios de fadiga por *fretting* das ligas AA 1120 e AA 6201 T81 são mostrados nas Figura 4.3 e 4.4 respectivamente. Essas figuras apresentam as curvas S-N com os eixos das abcissas em escala logarítmica. Os pontos experimentais ilustrados pelas cruzes, losangos, quadrados e triângulos, preenchidos, representam os testes realizados com a força normal, P, de 250 N, 500 N, 750 N e 1000 N, respectivamente para a liga AA 1120. Contudo, para a liga AA 6201 T81, os losangos, quadrados e triângulos vazios, representam as forças normais P, de 500 N, 750 N e 1000 N respectivamente.

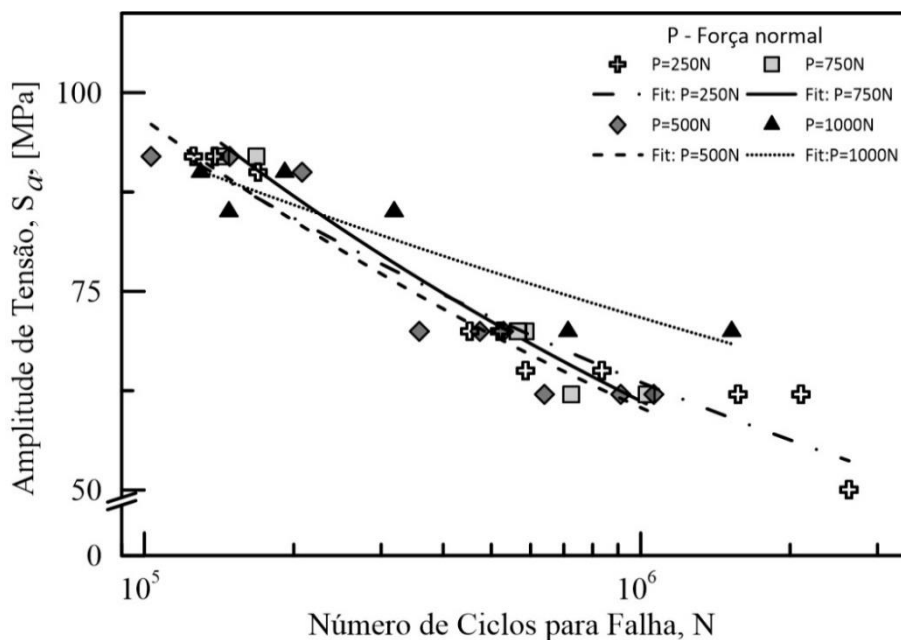


Figura 4.3 - Resultados de fadiga por *fretting* para os fios de AA 1120

Ao analisar as curvas das figuras 4.3, percebe-se que os pontos experimentais da liga AA 1120 foram válidos para a condição de fadiga por *fretting* em todas as cargas propostas como parâmetros de indução de *fretting*. Porém ao se observar a figura 4.4, que mostra os resultados dos fios da liga AA 6201 T81, nota-se que a curva referente a 250 N não está presente, juntamente com grande parte da curva de 500 N. Isso ocorreu, pois, não foi possível encontrar as condições características de falhas que indicam a fadiga por *fretting*.

Pode-se explicar tais características através das análises da superfície de falha, além das marcas geradas nas superfícies de contato. Para o fio da liga AA 6201 T81 que foi submetido a carga, P, de 250 N notou-se escorregamento total, causando o término dos ensaios em dois cenários distintos. No primeiro cenário o ensaio não teve continuidade devido a extrapolação física do deslocamento máximo permitido de 2 mm no dispositivo de ensaio. No segundo cenário as falhas ocorreram dentro do mordente da MTS, e não na região de contato entre o fio e a sapata.

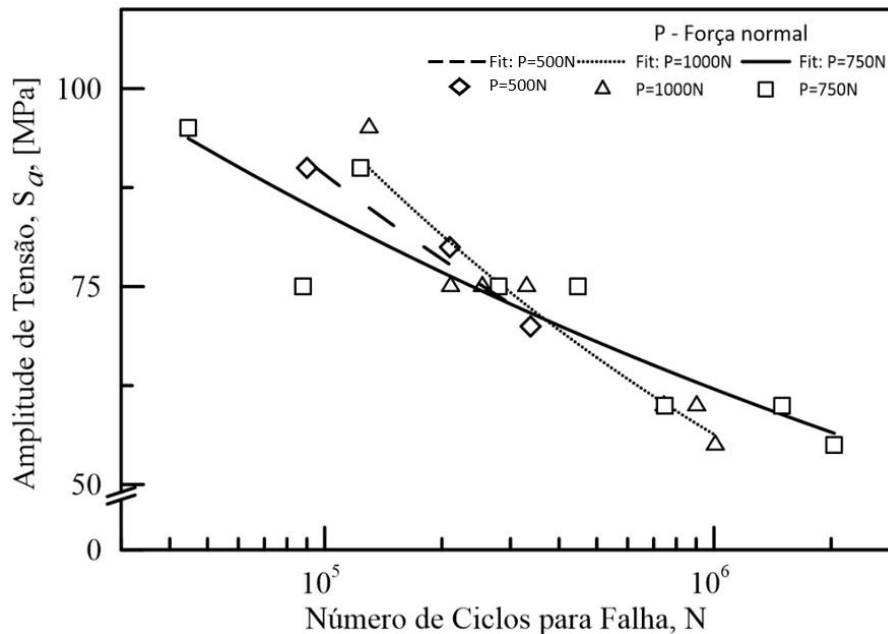


Figura 4.4 - Resultados de fadiga por fretting para os fios de AA 6201 T81

Esse fenômeno descrito anteriormente ocorre quando há o deslizamento total, contrariando a inequação 2.2. Nas ligas de alumínio, quando ocorre tal situação, observa-se a formação de alumina (Al_2O_3) em toda superfície de contato devido a interação de partículas de alumínio descoladas pelo atrito, com o oxigênio do ar atmosférico em altas temperaturas, ocasionadas pelo *fretting*. Essa mesma característica foi observada no trabalho de Garcia (2019). Com a presença de alumina, a dureza na região de contato aumenta, o que gera, o fenômeno de desgaste, indicado por Hills e Nowell (1994), que diferentemente da fadiga por *fretting*, ocasiona o lixamento das trincas e conseqüentemente não contribui para sua propagação. Quando há o desgaste a região de contato fica escura, cheia de alumina, várias marcas no ensaio de 250 N apresentaram essa característica, na figura 4.5 é possível observar uma delas. Na seção 4.3 é apresentada a análise de espectroscopia do CP apresentado na figura 4.5, nessa análise é possível ver de maneira mais clara a composição de alumina deixada na marca.



Figura 4.5 - Falha com desgaste

Voltando a atenção para a figuras 4.3, percebe-se que em quase todas as curvas os pontos experimentais estão bem próximos, com exceção da curva de 1000 N que apresenta melhor resistência a fadiga. Em aproximadamente duzentos mil ciclos é possível observar o cruzamento das curvas de 750 N e 1000 N, até esse ponto, essa última curva apresentava-

se com a menor resistência à fadiga, porém essa situação se modifica, e isso pode indicar que com o decorrer dos ciclos, o *fretting* passa a ser menos agressivo a curva de 1000 N quando comparada as demais.

Na figura 4.4, nota-se que a curva de 750 N começa com maior resistência à fadiga em relação a curva de 1000 N. Porém quando a vida se aproxima de 10^6 ciclos a curva de 1000 N fica com maior resistência à fadiga.

A ordem da resistência à fadiga para as curvas de fadiga por *fretting* de ambas as ligas podem estar relacionadas com os resultados obtidos do método explicado no item 3.2.4, na figura 4.6, essa análise já foi utilizada anteriormente na dissertação de Diaz (2018).

Nessa figura a liga AA 1120 é representada pelos círculos preenchidos, já os triângulos vazados ilustram a liga AA 6201 T81. No geral a pressão média de contato, P_{rm} , é mais alta para a liga da série 6XXX. Isso pode estar vinculado a dureza de tal liga. Os pontos máximos de pressão média de contato foram encontrados nas cargas de 500 N e 750 N para as ligas AA 1120 e AA 6201, respectivamente. No entanto, os pontos mínimos foram obtidos para a carga de 1500 N.

Entre as cargas normais utilizadas nas curvas do resultado de fadiga por *fretting* da liga AA 1120 (figura 4.3) o ponto de 1000 N é o que possui a menor pressão média de contato, isso pode ser um dos possíveis fatores que explica a razão da curva de *fretting* de 1000 N possuir a melhor resistência à fadiga. Podemos ver mais evidências dessa relação entre a pressão de contato e vida em fadiga por *fretting*, para o corpo de prova que experimentou a maior pressão média de contato, o fio o de 500 N. Nesse caso, a curva referente a tal situação apresenta-se com a menor resistência à fadiga. Para os demais casos os valores de pressão média para os pontos de 750 N e 250 N estão bem próximos, justificando a proximidade entre as curvas de *fretting* de 500 N, 750 N e 250 N na figura 4.3.

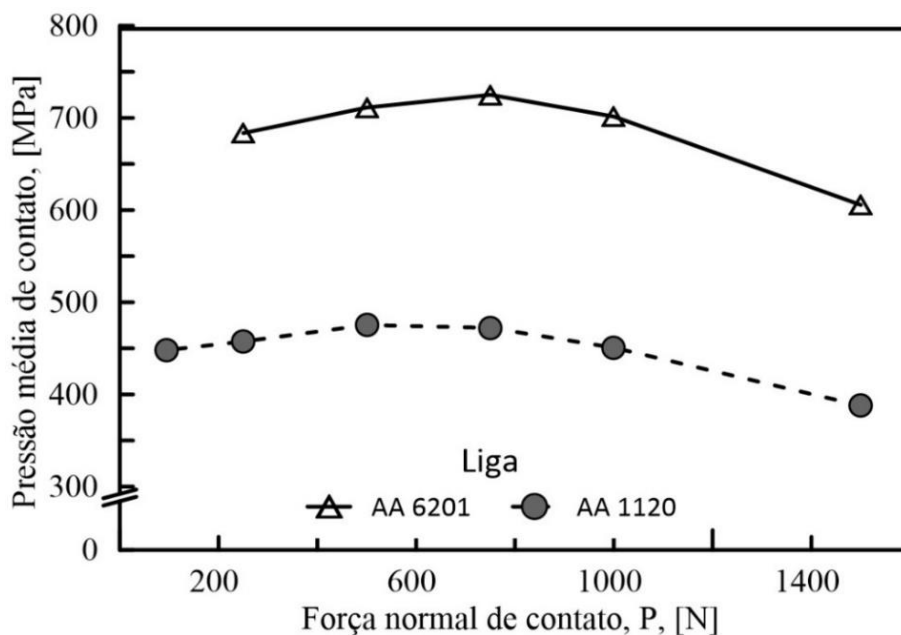


Figura 4.6 - Pressão média de contato

A mesma hipótese pode ser feita para as curvas de *fretting* da liga AA 6201 T81 (figura 4.4). Na figura 4.6 nota-se que a pressão média de contato é superior para a carga de 750 N quando comparada a carga de 1000 N, o que pode explicar em parte o fato da curva S-N de 1000 N possuir a melhor resistência a fadiga para a liga AA 6201 pelo menos até 5×10^5 ciclos.

Continuando a análise da figura 4.6, nota-se que para os fios de liga AA 6201 a *Prm* para as cargas de 250 N e 750 N são praticamente as mesmas, entretanto a falha por fadiga por *fretting* nesse caso, ocorreu somente para a carga de 750 N. Com essa informação, pode-se sugerir uma hipótese de que a força de compressão normal influencia mais na falha do que a pressão média de contato, pois, com a carga mais alta, é possível criar marcas com áreas maiores, o que aumenta as barreiras naturais do contato devido ao acoplamento, e em consequência evita-se o escorregamento total.

Pode-se criar uma analogia dessa hipótese com casos de ensaios de cabos condutores obtidos por Vieira (2019), essa pesquisa indica que a maioria das falhas de fadiga por *fretting* dos fios de um condutor ocorrerem entre 10 a 15 mm do Último Ponto de Contato (UPC) no sentido do interior do grampo de suspensão (figura 4.7). Quando essa distância aumenta para o sentido oposto é possível observar marcas de desgaste, pois, a força de contato entre os fios se dissipa, causando maiores deslizamentos entre eles devido à perda de acoplamento entre as superfícies de contato.

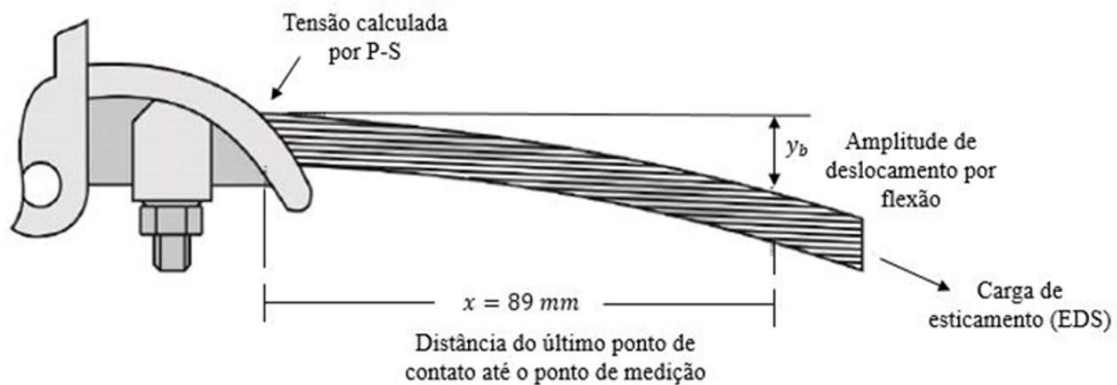


Figura 4.7 - Grampo de suspensão

4.2.2 Avaliação comparativa entre os fios AA 6201 T81 e AA 1120 que sofreram fadiga por fretting

Nessa etapa para uma análise mais aprofundada do efeito do *fretting* na vida em fadiga das ligas AA 1120 e AA 6201 T81 foi necessário o estudo comparativo entre todos os pontos experimentais que sofreram fadiga por *fretting* de tais ligas. Além dessas curvas, foram incluídas as curvas de fadiga pertencente a caracterização dos materiais, denominadas A e B, apresentadas na figura 4.2, a fim de calibrar a comparação.

Essa comparação é feita através da figura 4.8. Além dos pontos representados pelas curvas A e B, também estão incluídos os dados de *fretting* para as ligas em questão. Os pontos experimentais ilustrados por símbolos preenchidos pertencem a liga AA 1120,

entretanto, os vazios caracterizam a liga AA 6201 T81. Os símbolos triangulares e quadrados descrevem os dados que sofreram com as condições controladas de carga normal, P, de 1000 N e 750 N, respectivamente. Outro fator importante a se ressaltar: as curvas tracejadas são regressão de potência dos experimentos da liga AA 1120, e as curvas cheias da liga AA 6201.

Os índices A, B, C, D, E, e F foram adicionados a figura 4.8 para facilitar a explicação das ideias contidas nesta análise. As curvas C e D são formadas por CP's de liga AA 1120, e os índices D e F são constituídos pela liga AA 6201 T81.

Essa figura mostra que as curvas C e D apresentam resistência à fadiga superior as curvas E e F. Essa informação causou certa *inquietação*, pois, a princípio, esperava-se que os fios constituídos pela liga mais resistente à fadiga, no caso a AA 6201 T81, como foi provado nos ensaios de caracterização dos materiais, também possuísse a maior resistência à fadiga por *fretting*.

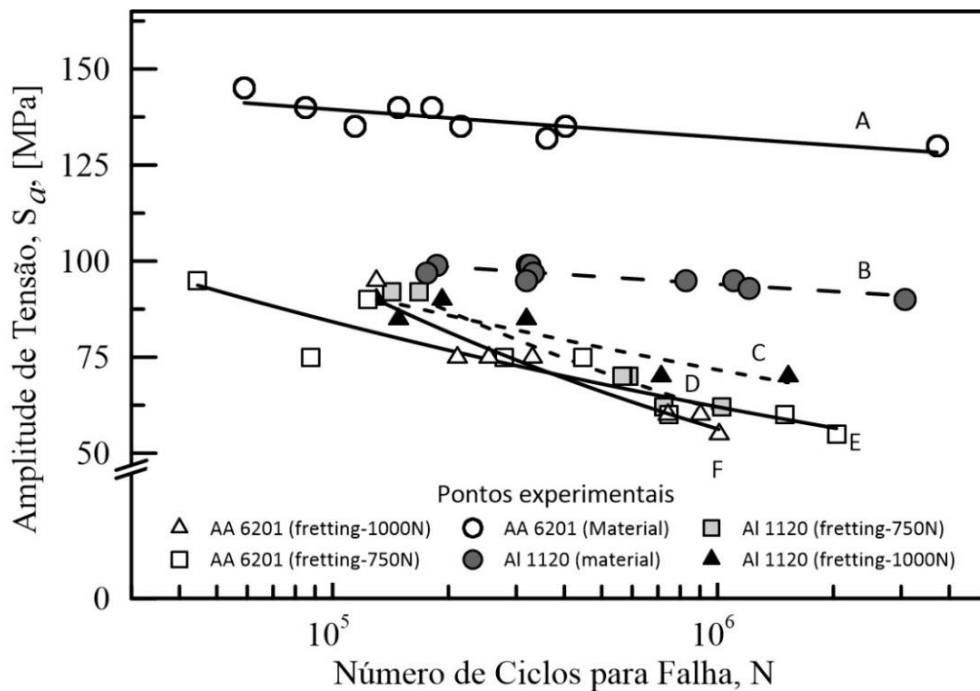


Figura 4.8 - Comparação entre as ligas AA 1120 e AA 6201 na condição de fadiga por fretting

As curvas de *fretting* na figura 4.8 estão próximas estatisticamente, o que pode causar certa dificuldade na interpretação dos dados. Para evitar tal problema foi criada uma forma de demonstrar o nível de severidade do processo de *fretting* sobre a resposta em fadiga das ligas, essa ferramenta é descrita pelo fator de redução da resistência à fadiga, $K_f(N)$. Esse conceito mostra para uma vida específica N, o quanto a amplitude da tensão aplicada no material se reduz devido ao fenômeno de *fretting*. Assim, considerando as curvas apresentadas, o fator $K_f(N)$ é expresso pela equação 4.2.

$$K_{f\overline{F}}(N) = \frac{S_{aM}}{S_{aF}} \quad (4.2)$$

onde, $K_{f\frac{M}{F}}$ representa o fator de redução de resistência à fadiga da curva de fadiga da liga devido a curva de *fretting* da mesma liga, S_{a_M} caracteriza amplitude de tensão da curva de fadiga da liga e S_{a_F} a amplitude de tensão da curva de *fretting*.

Assim, formam-se quatro fatores de redução diferentes, são eles: $K_{f\frac{A}{E}}(N)$, $K_{f\frac{A}{F}}(N)$, $K_{f\frac{B}{C}}(N)$, $K_{f\frac{B}{D}}(N)$.

Os resultados para essa análise de sensibilidade ao *fretting* são mostrados na figura 4.9. Nela percebe-se que $K_{f\frac{A}{E}}(N)$, $K_{f\frac{A}{F}}(N)$ são superiores aos demais fatores pertencentes a liga AA 1120. Assim, chega-se à conclusão de que para as condições controladas de *fretting* de carga de contato normal, P, de 750 N e 1000 N, a liga AA 6201 T81 é mais sensível ao *fretting* em relação a liga AA 1120.

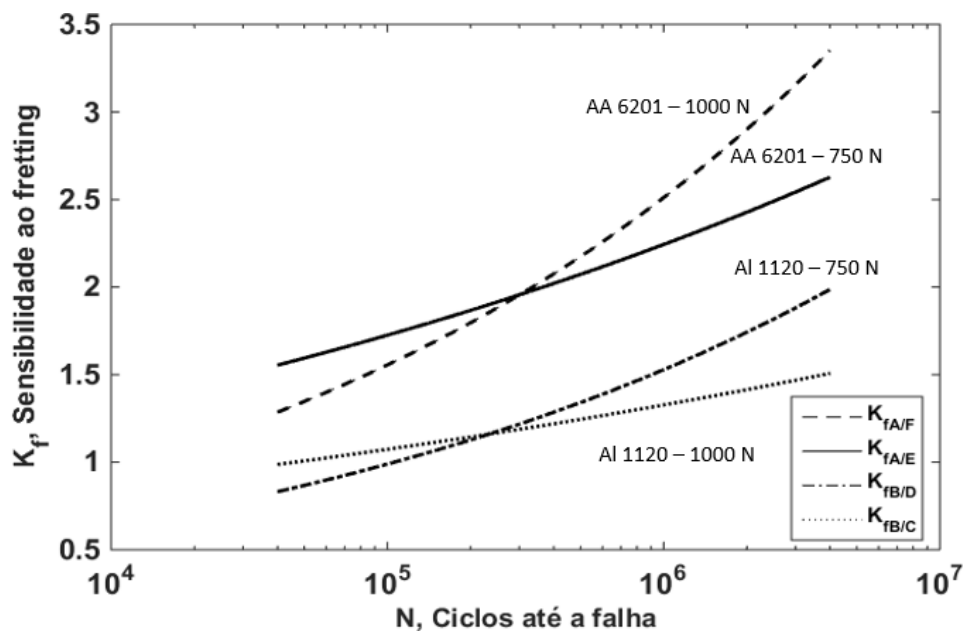


Figura 4.9 – Curva de sensibilidade ao *fretting*

Apesar de parecer controverso os resultados descritos até o momento, existem casos recentes na literatura, em que cabos condutores formados por fios de liga AA 6201 T81 mostraram-se menos resistentes à fadiga em relação aos condutores formados por fios da liga AA 1120. A figura 4.10 mostra essa situação representado no trabalho de Vieira et al. (2019).

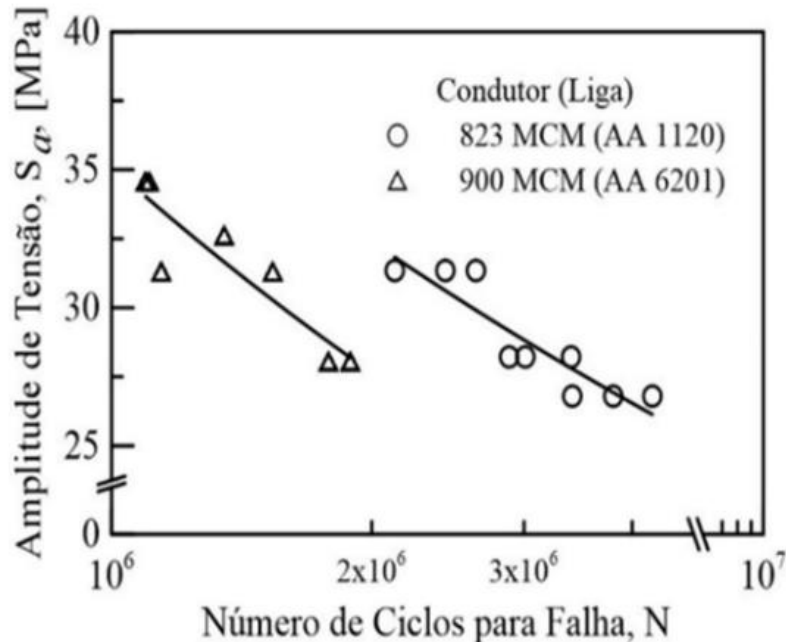


Figura 4.10 - a) Condutor formado pela liga AA 6201 x Condutor formado pela liga AA 1120 (VIEIRA et al., 2019)

Pode-se fazer associação dos resultados obtidos neste estudo com os resultados do GFFM, sugerindo que a maior sensibilidade ao *fretting* da dos fios de liga AA 6201 T81 em relação a liga AA 1120 é um dos principais fatores que levaram os condutores formados pela liga AA 6201 possuírem menor vida em fadiga quando comparado aos cabos formados por alumínio puro da série 1XXX.

As hipóteses que podem estar relacionadas com a maior sensibilidade dos fios da liga AA 6201 em relação à fadiga por *fretting*, são: propagação mais rápida das trincas, maior tenacidade a fratura, maior tensão residual, alta dureza da liga fazendo que os espécimes sintam maiores pressões médias durante o contato.

4.3 Análise das falhas e comprovação da presença de *fretting*

4.3.1 Comprovação da presença de *fretting*

Para certificação da ocorrência de fadiga por *fretting* durante os ensaios controlados, forma utilizadas imagens geradas por microscópios da região de contato entre o fio e a sapata antes da falha, segundo a metodologia 3.2.5.

Segundo Hills e Nowell (1994), duas características fundamentais estão presentes em qualquer problema de *fretting*: primeiro, que na presença de força normal o contato deve estar experimentando tensões de cisalhamento devido a força tangencial transmitida de um corpo ao outro. Em segundo lugar, deve haver algum grau de deslocamento relativo tangencial entre as superfícies de contato, de modo que o deslizamento tome espaço durante a variação cíclica da carga aplicada. Esse regime de deslizamento relativo parcial é expresso pela equação 2.2.

Quando cilindros elasticamente similares (materiais com o mesmo módulo de elasticidade) estão em contato sob regime de deslizamento parcial, formam-se duas zonas distintas entre si, uma chamada de zona de adesão, onde não há deslocamento relativo, e a outra, chamada de zona de escorregamento, onde ocorre o deslocamento entre as superfícies em contato.

Essas zonas de adesão e de escorregamento são perceptíveis através de imagens adequadas da área de contato, ao investigar a figura 4.11, percebe-se a distinção dessas duas regiões. No espaço compreendido entre os intervalos $-c$ e $+c$ é possível observar a zona de adesão, pois está mais clara, menos agredida, mostrando que não houve deslizamento relativo, porém ao olhar os intervalos entre $-a$ e $-c$ juntamente com $+c$ e $+a$, nota-se zona de escorregamento, uma área mais escura.

Essa figura foi obtida através do microscópio Confocal, porém há uma maneira mais clara de obter a distinção entre as zonas de contato, que consiste na utilização do procedimento EDS no MEV. Apesar de ambas as ligas de alumínio serem formadas por mais elementos químicos, para esta análise foram selecionados apenas o Oxigênio (O_2) e o Alumínio (Al), evidentemente.

No processo de *fretting*, as partículas de Al desprendidas do fio devido ao contato com a sapata, reagem com o O_2 da atmosfera formando o óxido de alumínio (alumina, Al_2O_3), que é rico em oxigênio. Essa característica foi observada nos trabalhos de Azevedo et al. (2009) e Reinke (2017). Quando há falha devido a fadiga por *fretting* a alumina formada fica na região mais externa do contato, esta região é chamada de zona de escorregamento, e as tensões para tal característica são relacionadas pela lei de Amontons (1699). Na outra região, descrita anteriormente, chamada zona de adesão, o Al não entra em contato com o ar atmosférico, pois nesta região não movimento relativo, e consequentemente o elemento abundante continua a ser majoritariamente o alumínio.

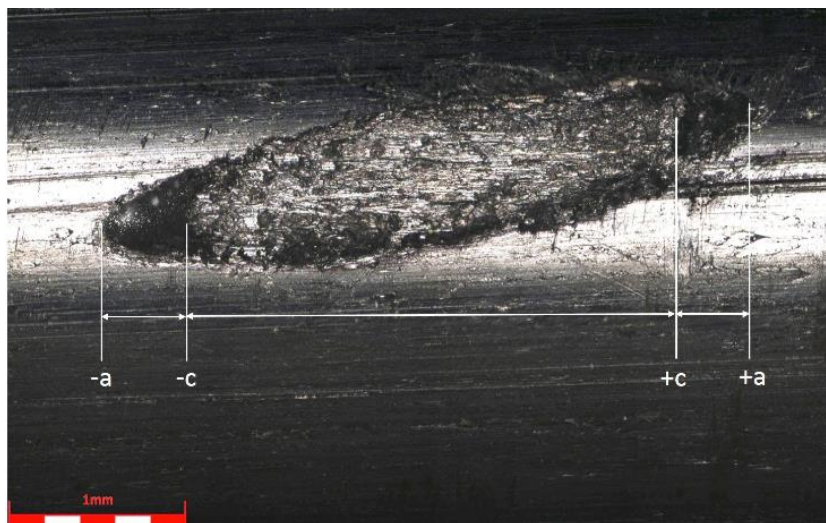


Figura 4.11 – Zonas do contato entre fios

Foram ensaiados dois corpos de prova pertencentes a liga AA 6201 e outros dois a liga AA 1120, nas cargas de contato normal de 750 N e 1000 N por duzentos mil ciclos.

Todos esses espécimes passaram pelo exame de EDS no MEV. Os resultados dos exames são mostrados nas figuras 4.12 a 4.15.

Nas figuras a seguir, a cor verde mostra a presença maciça de alumínio, por outro lado a cor azul representa o oxigênio contido na alumina. As imagens que estão posicionadas no lado esquerdo mostram o resultado da espectroscopia com suas respectivas ilustrações das regiões de contato, a imagem da direita mostra a marca real de contato que foi utilizada na realização da espectroscopia. As porcentagens de oxigênio e alumínio estão presentes no apêndice desta pesquisa.

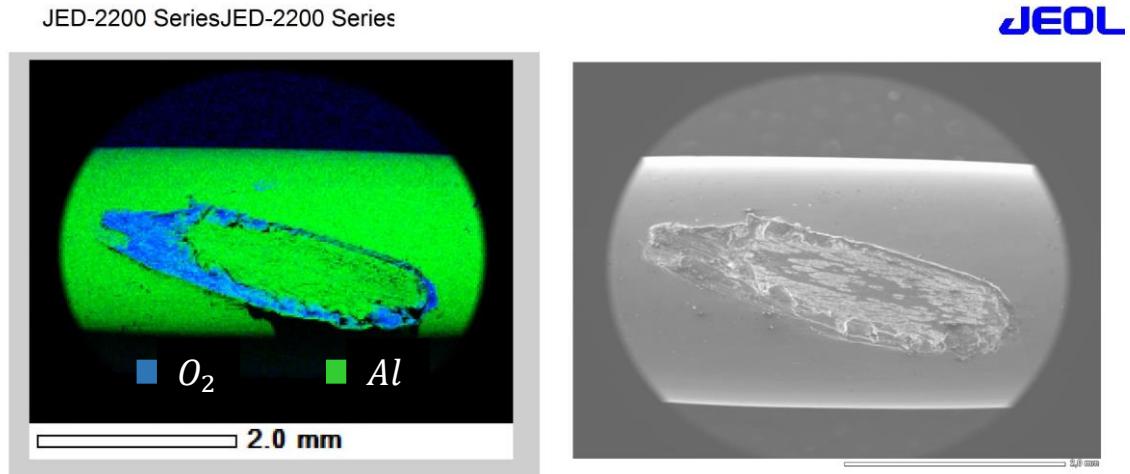


Figura 4.12 - EDS para CP de liga AA 1120, P = 1000 N

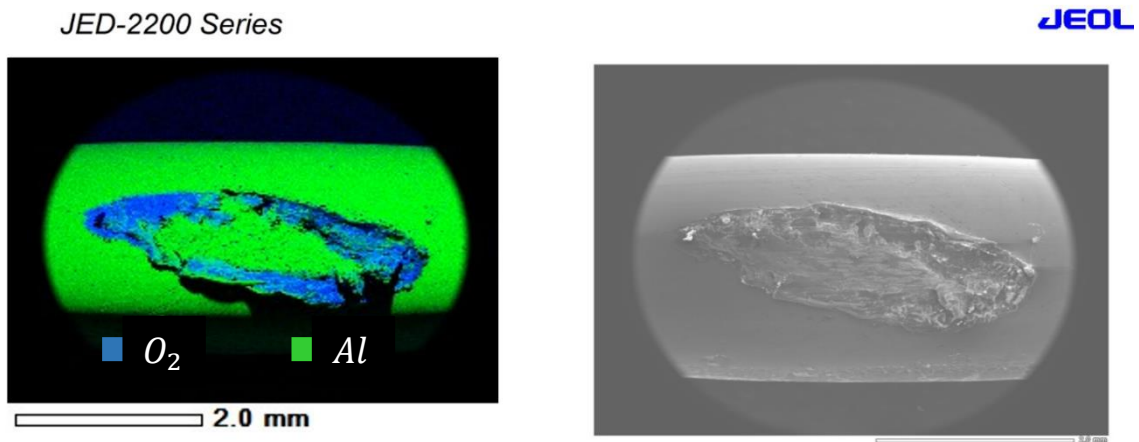


Figura 4.13 – EDS para CP de liga AA 1120, P= 750 N

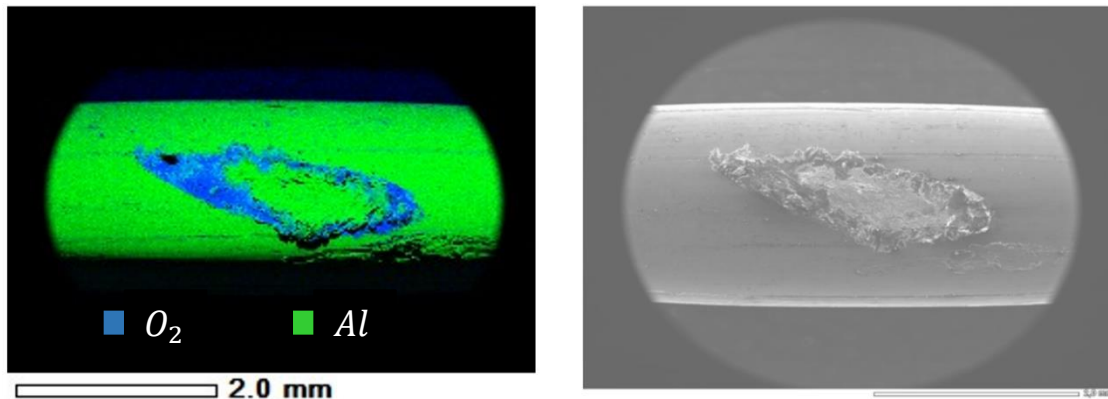


Figura 4.14 – EDS para o CP de liga AA 6201 T81, P = 1000 N

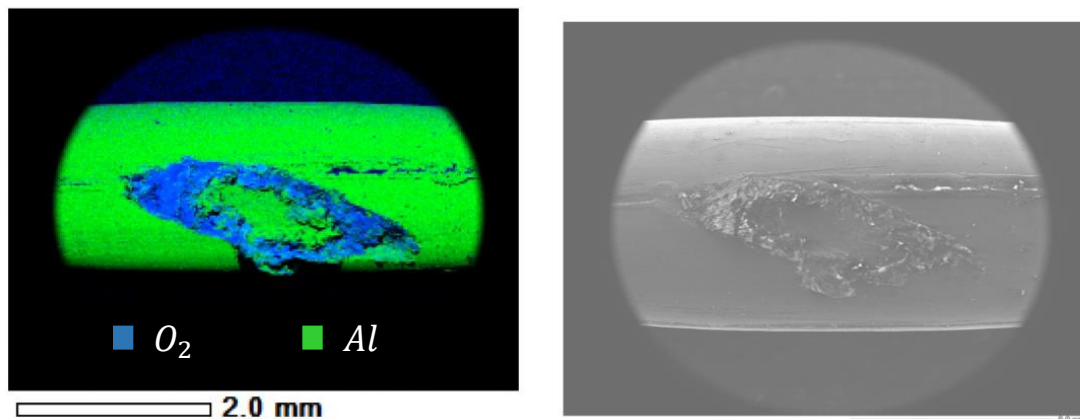


Figura 4.15 – EDS para o CP de liga AA 6201 T81, P = 750 N

Ao analisar as figuras 4.12 a 4.15, pode-se observar que em todas existem duas regiões bem definidas na marca de contato elipsoidal. No centro nota-se a cor verde devido à alta concentração de alumínio, indicando a região de adesão, nas bordas, a cor azul evidencia o oxigênio, portanto, aponta a zona de escorregamento. Com essas evidências, pode-se inferir que nos ensaios desta dissertação que tiveram a indução de *fretting*, nas forças normais de contato, P, de 750 N e 1000 N, a falha realmente aconteceu devido ao processo de fadiga por *fretting*.

A figura 4.16 mostra o resultado da análise EDS para um corpo de prova que falhou na região do mordente durante o ensaio de *fretting* com carga normal de 250 N. Nela pode-se observar que diferentemente das outras análises de EDS, não é possível identificar duas zonas distintas e separadas, nota-se que a cor azul, que representa a concentração de alumina (Al_2O_3), está presente na maior parte da marca. Segundo Azevedo et al. (2019) essas partículas podem chegar a 2000 HV, ou seja, a dureza no local de contato aumenta substancialmente, fazendo com que nessa região haja desgaste devido a grandes deslizamentos entre as superfícies, e conseqüentemente não haja falha por fadiga por

fretting, o que explica a falha do espécime na região dos mordentes durante o ensaio. Além dessas informações, pode-se notar que a sapata escorregou mais ainda sobre o fio, como mostra o lado esquerdo da marca, que está colorido por um tom azulado mais claro. Tais argumentos podem confirmar com mais altivez que fios da liga AA 6201 T81 quando submetidos a condição de fretting de 250 N existe o desgaste e não a falha de fadiga por *fretting*.

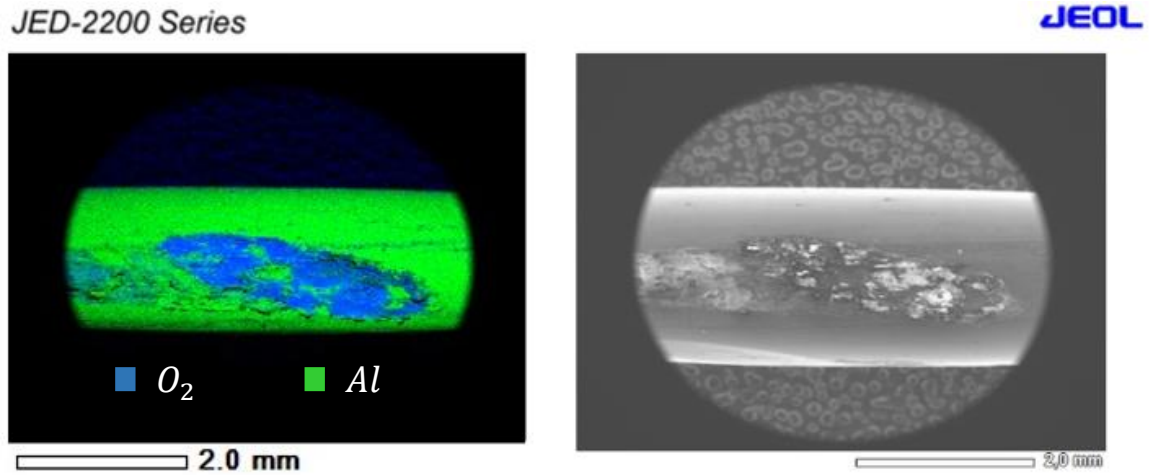


Figura 4.16 – EDS para o CP de liga AA6201 T81, P = 250 N

A figura 4.17 apresenta o teste EDS para o fio que foi submetido ao ensaio de *fretting* com carga normal de 500 N. Nessa região de contato, percebe-se grande quantidade de oxigênio em toda região da marca, portanto, pode-se fazer a mesma análise da marca de 250 N. Contudo, a discussão para a carga de 500 N precisa continuar, pois, apesar da maioria apresentarem o fenômeno de desgaste, três desses espécimes falharam devido a fadiga por *fretting*, o que é uma quantia significativa. Isso demonstra que possivelmente essa é uma região de transição. Para complementar essa análise será preciso verificar a seção 4.3.2.2, em que mostra a superfície de fratura para os ensaios em que ocorreram fadiga por *fretting*.

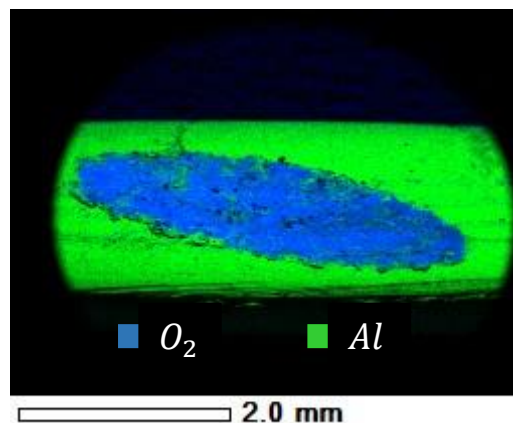


Figura 4.17 – EDS para o CP de liga AA 6201 T81, P = 500 N

4.3.2 Mapeamento das falhas e análise da superfície de fratura

4.3.2.1 Mapeamento das falhas

Antes de análise propriamente dita da superfície de fratura, é interessante verificar se há predileção para o tipo de falha dos espécimes ensaiados e classificados com falhas devido a fadiga por *fretting*. Para averiguar essa situação, catalogou-se os CP's após os ensaios em quatro categorias distintas de falhas, são elas: “V”, “45°”, “L”, “Quase Plana (QP)”. A figura 4.18 exemplifica esses tipos de falhas. Os resultados da catalogação são mostrados na figura 4.19.

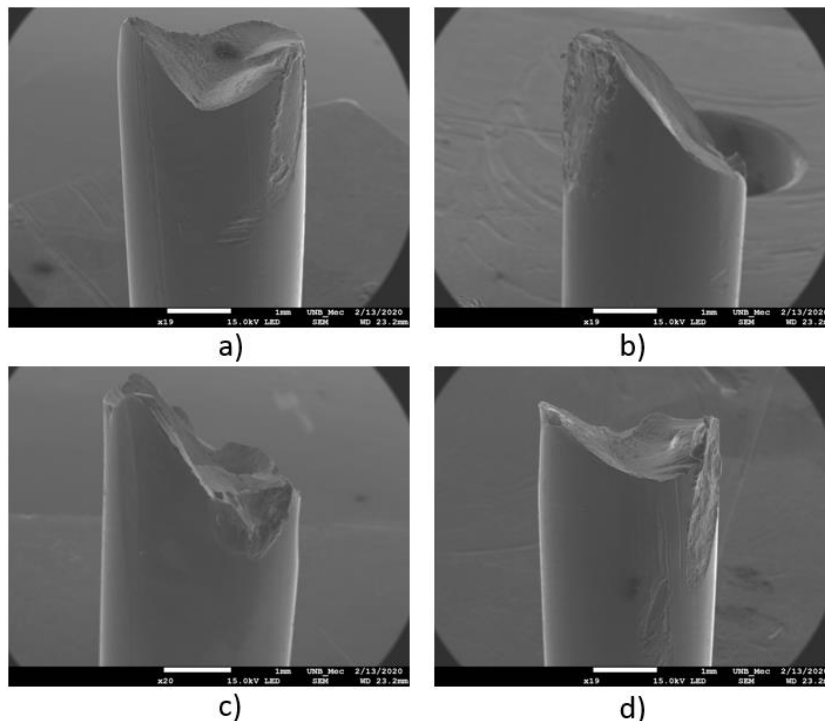


Figura 4.18 - Tipos de falha, a) V; b) 45°; c) L; d) QP

Os resultados da figura 4.19 são apresentados através de um gráfico de barras que mostra o percentual do tipo de falha para cada classe de ensaio realizado nesta pesquisa. Nele percebe-se que os espécimes da liga AA 1120 quase sempre falham em 45 °, com poucas exceções notadas nas categorias de carga normal, P, de 500 N e 250 N, onde falharam 10 % dos casos no tipo V e L, respectivamente. A liga AA 6201 T81 obteve falhas mais diversificadas e bem distribuídas, o único modo de falha que não experimentou foi o de tipo L.

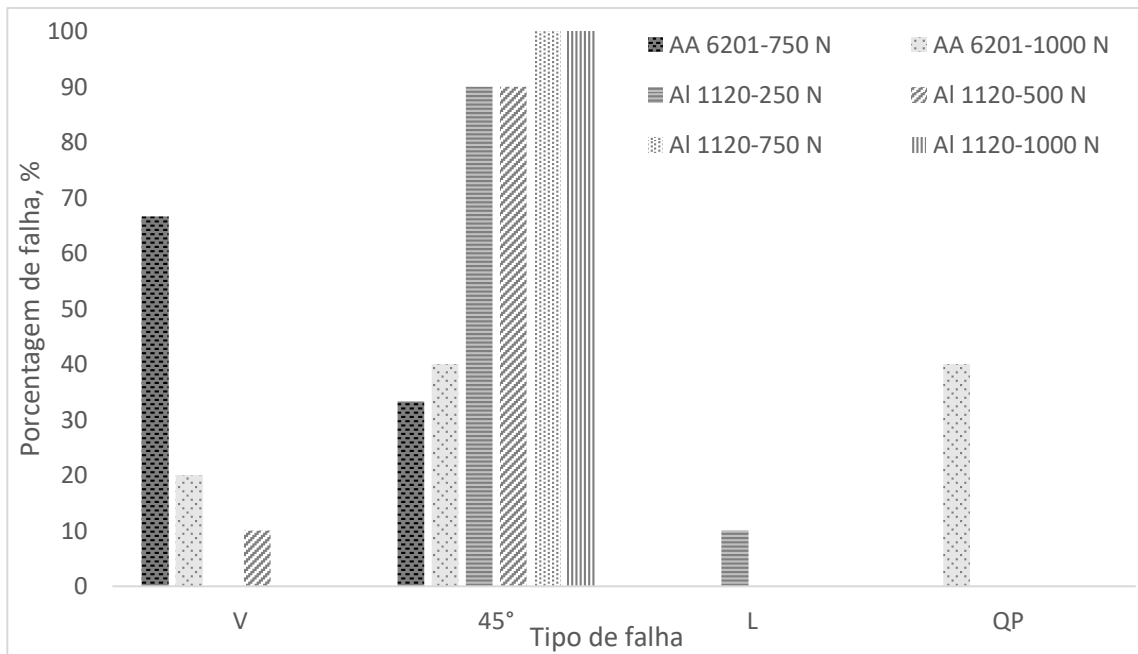


Figura 4.19 - Percentual do tipo de falha para cada classe de ensaio de fadiga por fretting

4.3.2.2 Análise da superfície de fratura

Na etapa de análise EDS foi comprovado que durante a indução de *fretting* nos ensaios com parâmetros controlados, as zonas de adesão e escorregamento compuseram as marcas de contato dos CP's ensaiados. Nesta fase as superfícies de fratura serão avaliadas a fim de verificar se essas marcas de fretting foram responsáveis pela nucleação das trincas. Para não se tornar exaustivo o processo de leitura desta pesquisa, foram selecionadas quatro superfícies de fratura para esta análise, duas pertencentes a liga AA 1120 e as outras duas a AA 6201 T81.

Todas as figuras desta etapa possuem três regiões diferentes, denominadas A, B e C, que representam, a marca de contato que iniciou a trinca, região de propagação da trinca, região de falha abrupta, respectivamente.

A figura 4.20 apresenta a superfície de falha do CP 6201-12 (relação de todos os CP's ensaiados disponíveis nos apêndices) com amplitude de tensão de fadiga de 60 MPa e com 750 N de compressão normal. Nela foi possível encontrar possíveis marcas de estrias na região B com ampliação de 17 mil vezes, indicando que naquela localização foi a zona de crescimento da trinca. A região C foi determinada por não encontrar indícios de propagação de trincas, além disso, foi possível observar *dimples*, que é um elemento bem comum nas regiões de falhas abruptas.

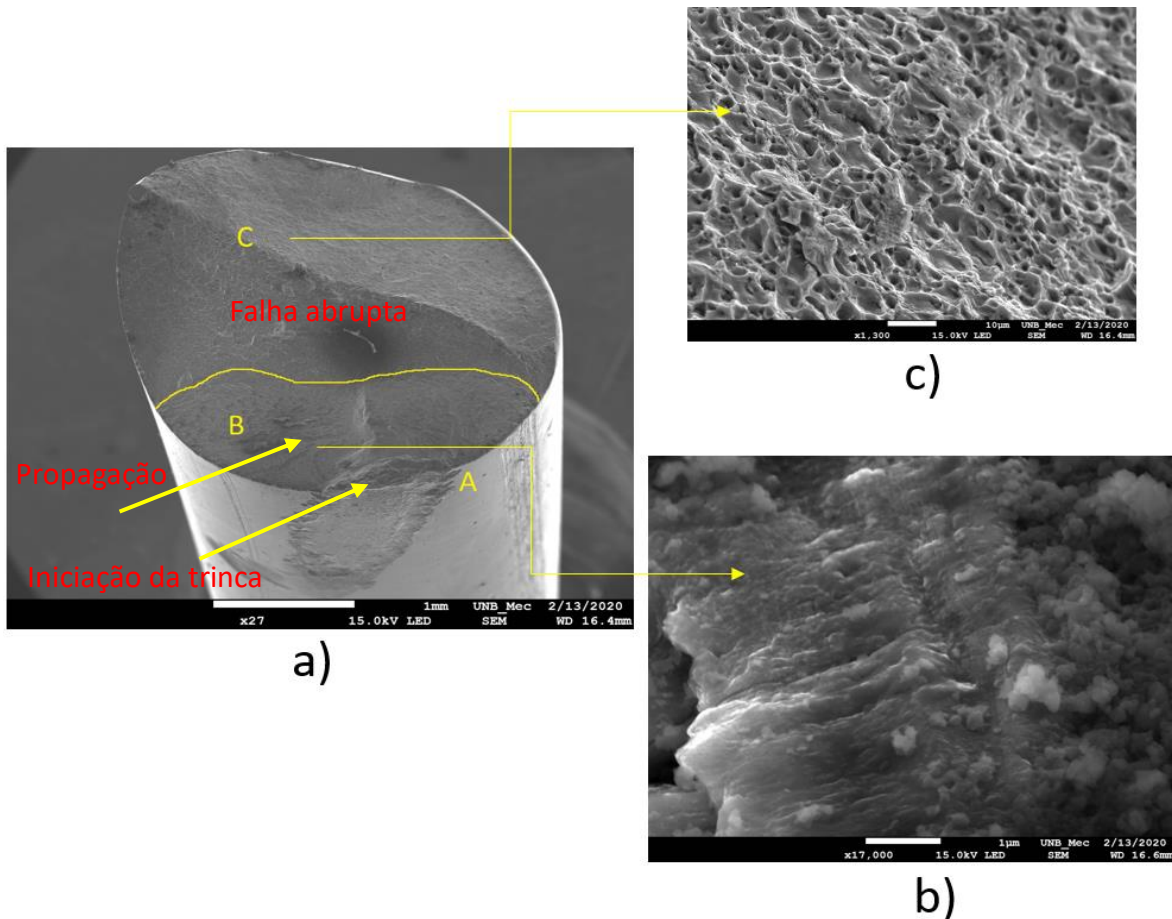


Figura 4.20 – a) Superfície de fratura; b) Possíveis estrias; c) *Dimples* – CP 6201-12

A figura 4.21 apresenta a superfície de fratura do CP-113, pertencente a liga AA 1120, que foi ensaiado com amplitude de tensão de 85 *MPa* e força normal de compressão de 1000 N. Nela observa-se uma zona de propagação B um pouco menor que a figura anterior. É possível ver a fonteira entre a região B e C na figura 4.21-b. E para comprovar tal informação, são mostradas possíveis estrias com aumento de 10 mil vezes na figura 4.21-c, e *dimples* na parte superior na figura 4.21-d.

A figura 4.22 apresenta a superfície de fratura do CP-98, da liga AA 1120, para a amplitude de tensão de 62 *MPa* e força de contato de 750 N. Nessa figura não foi possível encontrar estrias, mas foi possível determinar a região de propagação B, através da eliminação das áreas que continham *dimples* (fig. 4.22-c), além de observar marcas concêntricas na direção da iniciação da trinca em A.

A figura 4.23 apresenta a superfície de fratura do CP 6201-34, pertencente a liga AA 6202 T81, foi ensaiado na amplitude de tensão de 80 *MPa* com força normal de contato de 500 N. Nessa figura também percebeu as três regiões características de falhas devido a fadiga, na figura 4.23-b percebe-se a existência de uma superfície de propagação de trincas, a figura 4.23-c mostra a ampliação da figura anterior, com possíveis formações de estrias. A região C é ilustrada nesta figura pelos *dimples* contidos na figura 4.23-d.

Essa figura 4.23 mostra que a força de 500 N pode ser uma região de fronteira. Pois, da mesma forma que pôde encontrar a maioria dos espécimes falhando devido ao desgaste,

como dito anteriormente, também foi possível encontrar alguma minoria dos corpos de prova falhando devido a fadiga por *fretting*.

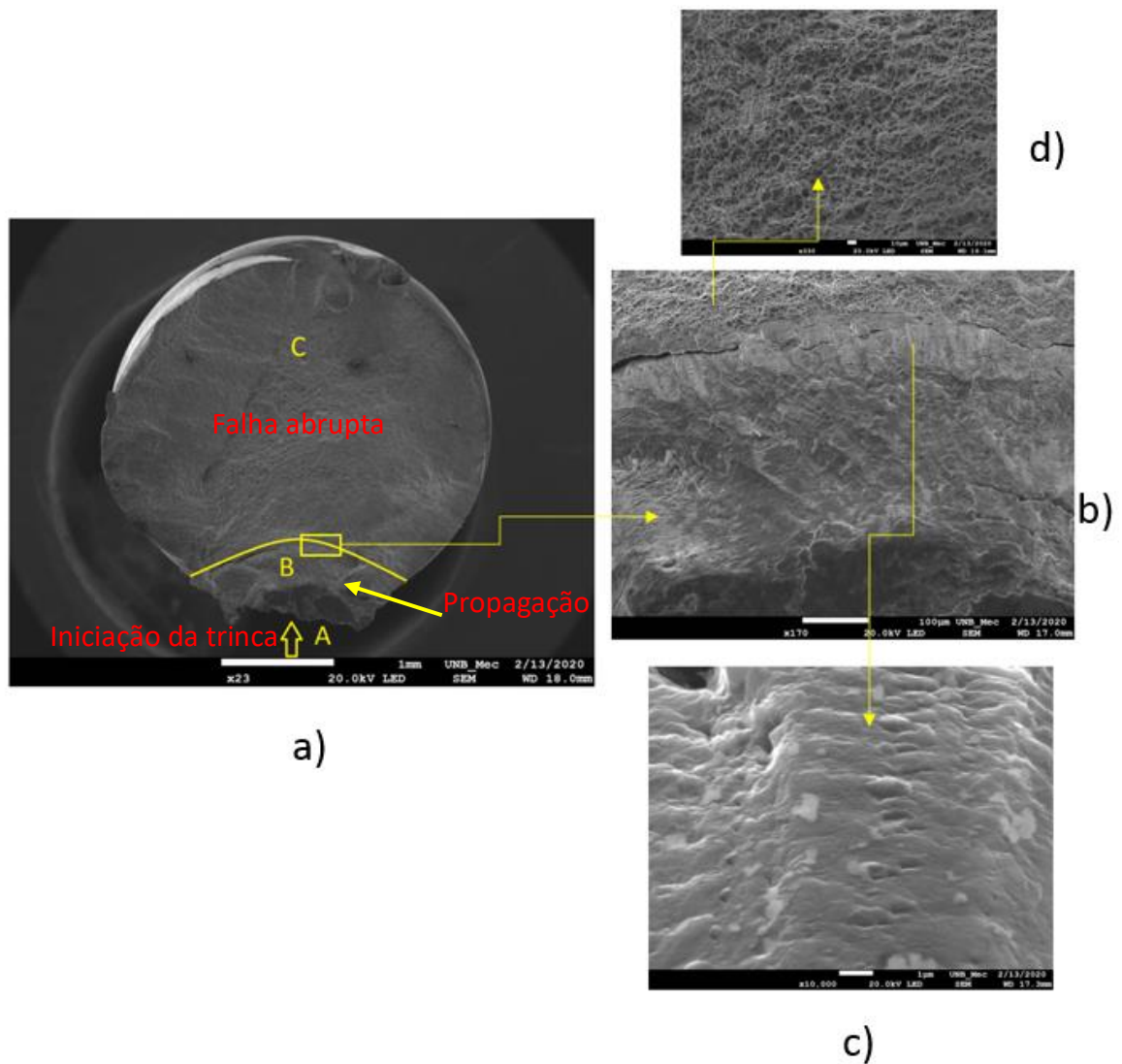


Figura 4.21 – a) Superfície de fratura; b) Região de fronteira; c) Possíveis estrias; d) *Dimples* – CP-113

O objetivo das análises das superfícies de fratura não está baseado na comparação entre as ligas, e sim na comprovação de que as falhas nos fios ocorreram devido a fadiga por *fretting*. Todos esses diagnósticos das superfícies de falha, indicaram que a trinca se iniciou devido a marca deixada pelo contato entre o fio e sapata, e se propagou por fadiga, e posteriormente sofreu com a falha.

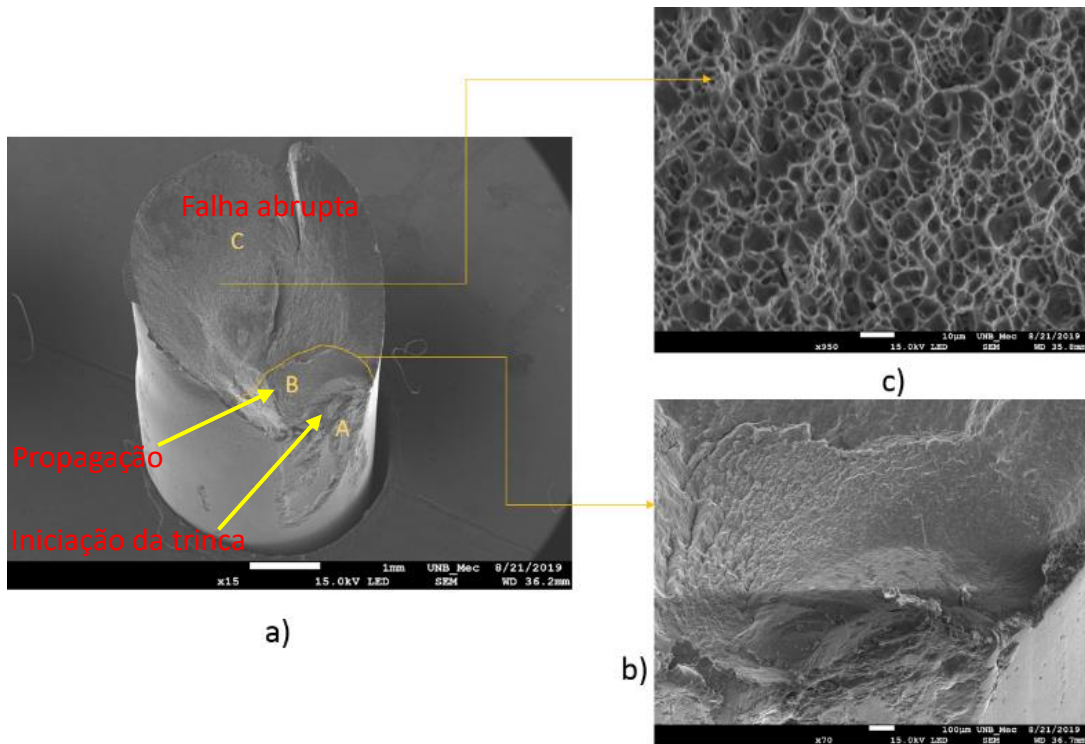


Figura 4.22 - a) Superfície de falha; b) Ampliação da região de propagação; c) *Dimples* – CP-98

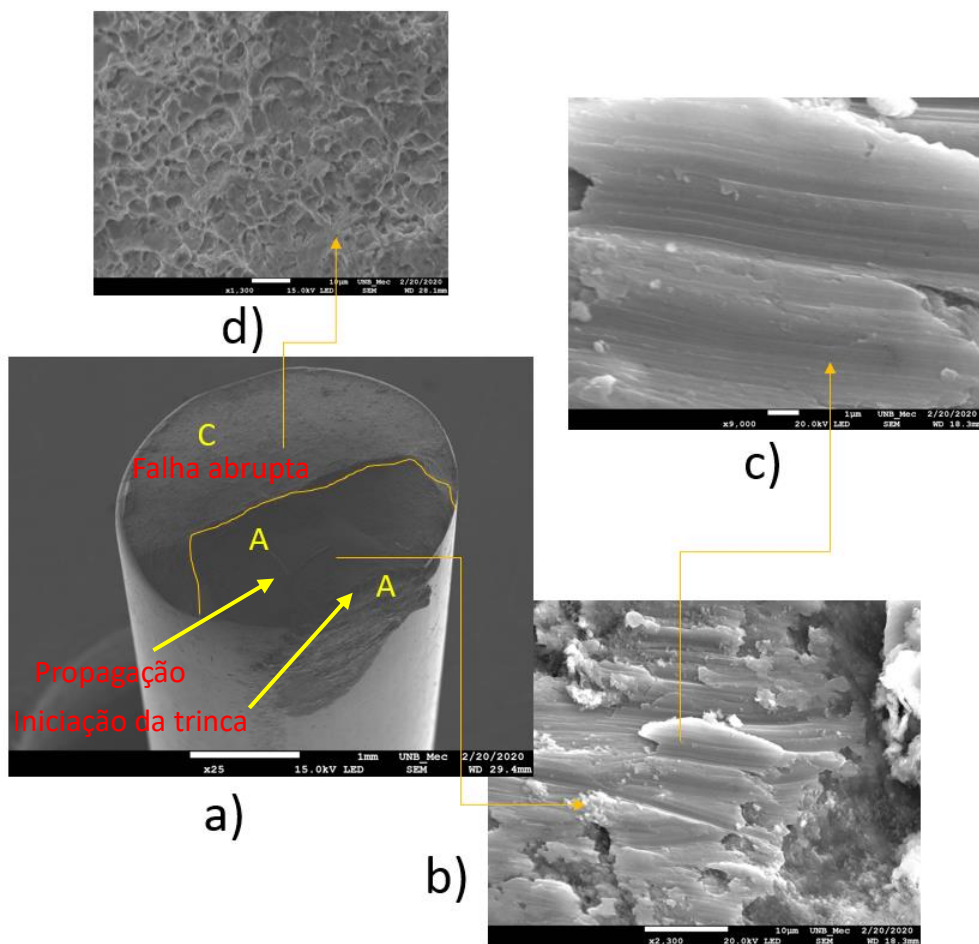


Figura 4.23 - a) Superfície de falha; b) Propagação da trinca; C) Possíveis estrias; d) *Dimples* – CP 6201-34

5 CONCLUSÕES

O principal objetivo dessa dissertação foi isolar o fenômeno de *fretting*, para verificação do efeito dos parâmetros que controlam o processo de contato entre os fios nas ligas AA 6201 T81 e AA 1120. Sendo assim, obteve-se as seguintes conclusões:

- Após o isolamento das condições de *fretting* foi possível observar dois problemas distintos relacionados ao contato, o primeiro, foi o desgaste, e o segundo, a fadiga por *fretting*;
- Para os fios da liga AA 6201 T81 observou-se os dois tipos de problemas de contato, para os ensaios com cargas normais de 750 N e 1000 N, constatou-se a fadiga por *fretting*. Para a carga de 250 N comprovou que houve o desgaste. Não foi simples a classificação para a carga de 500 N, pois para essa força observou os dois problemas relacionados ao contato, o que sugere que essa é uma região de transição;
- Para todas as curvas relacionadas aos fios da liga AA 1120 foi observado a falha devido a fadiga por *fretting*;
- Na comparação entre os fios que sofrerem fadiga por *fretting*, os fios da liga AA 6201 T81 mostraram-se mais sensíveis a de fadiga por *fretting* em relação aos fios da liga AA 1120 para as condições controladas de carga normal de 750 N e 1000 N, e ângulo de contato de 29°.
- Esse dado é interessante, pois, pode ser uma das razões capaz de explicar a maior vida operacional dos condutores formados pelos fios da liga AA 1120 em relação aos cabos formado por fios da liga AA 6201 T81, embora, essa liga possua maior resistência à fadiga, como foi comprovado na caracterização dos materiais, apresentada neste trabalho.

5.1 Recomendações para trabalhos futuros

- Ampliar a quantidade de ângulos utilizados no contato entre os fios nos ensaios controlados por *fretting*.
- Utilizar a mesma metodologia adotada neste trabalho para os fios da liga AA 1350 H19;
- Realização de um estudo numérico dos resultados obtidos nesta pesquisa;
- Realização de um estudo sistemático sobre mecânica da fratura para as liga AA 6201 T81 e AA 1120, para observar a velocidade em que as trincas se propagam em cada uma das ligas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARANTE, O. A. C.; BROWER, M.; ZACK, J.; SÁ, A.L. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Ministério de Minas Energia. 2001. 44 p.

AMONTONS, G. De la resistance cause dans les machines. **Memoires de L'Academie Royale**, v. A, p. 275–282, 1699.

ARAUJO, J. A. et al. **Avaliação comparativa da resistência à fadiga de cabos caa e cal**. XXII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. **Anais...**Brasília - DF: 2013

ASTM E466-15. Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials. **Annual Book of ASTM Standards West Conshohocken, PA**, v. 03.01, p. 1–6, 2016.

ASTM E739-91. Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (E-N) Fatigue Data. **Annual Book of ASTM Standards**, v. 91, n. Reapproved 2004, p. 1–7, 2012.

AZEVEDO, C. R. F.; HENRIQUES, A. M. D.; PULINO FILHO, A. R.; FERREIRA, J. L. A.; ARAÚJO, J. A. Fretting fatigue in overhead conductors: Rig design and failure analysis of a Grosbeak aluminium cable steel reinforced conductor. **Engineering Failure Analysis**, v. 16, n. 1, p. 136–151, 1 jan. 2009.

BADIBANGA, R. K. **Evaluation of the fatigue resistance of power line conductors functions of the H/w parameter**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, 2017.

BELLORIO, M. B. **Revisão sobre critérios de fadiga para cabos condutores de energia e uso de metodologia para estimativa de sua vida remanescente**. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas). Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, 2009.

CIGRE TF B2.11.07. **Technical Brochure 332: Fatigue Endurance Capability of Conductor / Clamp Systems - Update of Present Knowledge**. oct. 2007.

CIGRE WG B2.30. **Engineering Guidelines Relating to Fatigue Endurance Capability of Conductor/Clamp Systems**. oct. 2010.

DÍAZ, J. I. M. **Análise Numérica Do Comportamento Mecânico De Dutos Com Reparo Compósito**. 2018. xv, 110 f., il. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas). Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

DOWLING, N. E. **Mechanical Behavior of Materials**. 4th. ed. boston: Pearson Education Limited, 2013.

EPRI. **Transmission line reference book: “The Orange Book”**. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, 2006.

EPRI. **Transmission Line Reference Book: Wind Induced Conductor Motion**. Palo Alto, CA: Eetrical Power Reasearch, 2009.

FADEL, A. A. **Avaliação do Efeito de Tracionamento em Elevados Níveis de EDS Sobre a Reistência em Fadiga do Condutor IBIS (CAA 397,5 MCM)**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2010.

FADEL, A. A. et al. Effect of high mean tensile stress on the fretting fatigue life of an Ibis steel reinforced aluminium conductor. **International Journal of Fatigue**, v. 42, p. 24–34, 1 set. 2012.

FRONTIN, S. O. (COORD. . **Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas aplicadas a linhas de transmissão**. 1ª ed ed. Brasília: Goya, 2010.

FURTADO, T. A. et al. **Diagnóstico Do Estado Da Arte Em Vibração Eólica De**

Linhas Aéreas De Transmissão. **Snptee**, n. 031, p. 1–6, 2003.

GARCIA, M. A. **CONCEPÇÃO, FABRICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM DISPOSITIVO DE FADIGA POR FRETTING EM FIOS DE ALUMÍNIO DE CABOS CONDUTORES**. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade de Brasília, 2019.

HENRIQUES, A. M. D. **Bancada de ensaios mecânicos à fadiga de cabos condutores de energia**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Departamenot de Engenharia Mecânica. Universidade de Brasília, 2006.

HERTZ, H. Ueber die Berührung feste elastischer Körper. **Journal fur die Reine und Angewandte Mathematik**, v. 92, p. 156–171, 1882.

HILLS, D. A.; NOWELL, D. **Mechanics of Fretting Fatigue**. 1st ed ed. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 1994.

INSTITUTE OF ELETRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - IEEE. **Guide for aeolian vibration field measurements of overhead conductors**. IEEE Std 1368. **Anais...**New York: 2007

KALOMBO, R. B. et al. Comparative Fatigue Resistance of Overhead Conductors Made of Aluminium and Aluminium Alloy: Tests and Analysis. **Procedia Engineering**, v. 133, p. 223–232, 2015a.

KALOMBO, R. B. et al. **Comparative Fatigue Resistance of Overhead Conductors Made of Aluminium and Aluminium Alloy: Tests and Analysis**. *Procedia Engineering*. **Anais...**2015b

KALOMBO, R. B. et al. Influence of the catenary parameter (H/w) on the fatigue life of overhead conductors. **Tribology International**, v. 108, n. November 2016, p. 141–149, 2017.

KIESSLING, F. et al. **Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction**. 1st ed. Berlin: Springer, 2003.

NEXANS. **Condutores de alumínio**, 2016. Disponível em: <https://www.nexans.com.br/Brazil/2016/Folder_Condutores_de_Aluminio.pdf>

NORTHEAST GROUP LLC. **Global Electricity Transmission and Distribution Infrastructure Investment to Reach \$351bn Per Year by 2026**. Disponível em: <<https://www.prnewswire.com/news-releases/global-electricity-transmission-and-distribution-infrastructure-investment-to-reach-351bn-per-year-by-2026-300320202.html>>. Acesso em: 30 maio. 2019.

ONS, O. N. DO S. E. **Plano de Ampliações e Reforços nas Instalações de Transmissão do SIN - PAR Executivo 2019-2023**. 2018.

REINKE, G. **Influência Do Tratamento Térmico Nas Propriedades Mecânicas De Fios De Alumínio Liga Usados Em Cabos Condutores Submetidos a Ensaios De Fadiga**. Dissertação (Ceências mecânicas). Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade de Brasília, 2017.

SACKFIELD, A.; HILLS, D. A.; NOWELL, D. **Mechanics of Elastic Contacts**. 1st. ed. [s.l.] Butterworth-Heinemann, 1993.

VIEIRA, E. R. et al. **Análise Comparativa Da Resistência À Fadiga Por Fretting Entre Os Cabos Condutores 900MCM E 823 MCM CONAMET-SAM**. Conamet-SAM. **Anais...**Valdivia: CONAMET-SAM, 2019

VIEIRA, R. E. R. **AVALIAÇÃO DAS ÁREAS DE CONTATO E DOS NÍVEIS DE TENSÃO MÉDIA E ALTERNADA EM FIOS DE CABOS CONDUTORES DE ENERGIA** [s.l.] Dissertação (Ciências Mecânicas). Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade de Brasília, 2019.

WITTKOWSKY et al. An apparatus for quantitative fretting testing. **Fatigue &**

Fracture of Engineering Materials & Structures, v. 22, n. 4, p. 307–320, 2003.

APÊNDICES

Apêndice A – Informações referentes aos ensaios de fadiga na caracterização dos materiais

Tabela A 1 - CP's utilizados nos ensaios de fadiga para caracterização dos materiais

Plano - AA 6201			Plano - AA 1120		
CP	Salt (MPa)	Nf	CP	Salt (MPa)	Nf
Fad6201-3	145	58.922	Fad-11	99	186.794
Fad6201-5	140	180.902	Fad-16	99	320.419
Fad6201-10	140	85.277	Fad-17	99	325.281
Fad6201-11	140	148.511	Fad-10	97	331.364
Fad6201-12	135	215.271	Fad-14	97	175.345
Fad6201-2	135	403.994	Fad-5	95	319.530
Fad6201-9	135	114.293	Fad-6	95	1.099.962
Fad6201-15	132	3.512.633	Fad-9	95	826.848
Fad6201-6	132	359.497	Fad-15	93	1.208.588
Fad6201-13	130	3.972.401	Fad-2	90	3.074.939
Fad6201-8	130	3.718.980	-	-	-
Fad6201-4	130	Run out	-	-	-
Fad6201-1	115	Run out	-	-	-

Apêndice B – Informações referentes as falhas de fadiga por fretting

Tabela B 1 - Ensaio de fadiga por fretting para fios da liga AA 1120

P = 250 N			P = 500 N		
CP	Salt (MPa)	Nf (ciclos)	CP	Salt (MPa)	Nf (ciclos)
34	90	169.376	39	92	103.161
37	92	138.815	69	92	148.369
76	92	125.639	31	90	207.690
38	70	452.587	63	70	357.945
48	70	519.301	68	70	529.758
77	70	524.029	99	70	475.028
83	65	834.776	96	62	639.400
84	65	586.978	100	62	1.061.023
86	62	1.567.885	101	62	910.230
91	62	2.102.423	-	-	-
40	50	2.628.690	-	-	-
66	50	Run out	-	-	-
P = 750 N			P = 1000 N		
CP	Salt (MPa)	Nf (ciclos)	CP	Salt (MPa)	Nf (Ciclos)
42	92	168.080	104	90	192.062
64	92	142.697	105	90	130.014
27	70	586.933	113	85	318.154
45	70	567.147	114	85	148.247
56	70	565.932	109	70	713.849
98	62	1.026.445	103	70	1.526.574
102	62	723.510	-	-	-

Tabela B 2 - Ensaio de fadiga por fretting da liga AA 6201 T81

P = 750 N			P = 1000 N		
CP	Salt (MPa)	Nf (ciclos)	CP	Salt (MPa)	Nf (ciclos)
6201-26	90	123.733	6201-20	95	130.084
6201-7	95	44.581	6201-23	75	210.417
6201-9	75	87.847	6201-21	75	329.980
6201-11	75	447.521	6201-19	75	254.444
6201-25	75	279.736	6201-18	60	904.128
6201-12	60	748.429	6201-22	60	743.163
6201-15	60	1.497.592	6201-27	55	1.007.589
6201-13	55	2.037.425	6201-28	55	645.306
P = 500 N					
CP	Salt (MPa)	Nf (ciclos)			
6201-33	90	89.935			
6201-34	80	209.654			
6201-37	70	337.479			

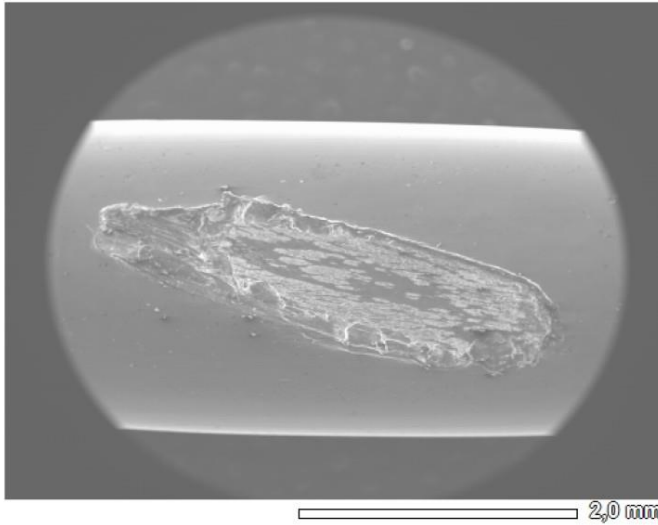
Apêndice C – Informações referentes aos testes de pressão média nos espécimes

Tabela C 1 - Pressão média para diferentes forças normais

Carga normal, P, (N)	Área (mm^2)		Diferença percentual da área entre as ligas(%)
	Liga AA 6201	Liga AA 1120	
95	-	0,21	-
250	0,37	0,55	32,73
500	0,70	1,05	33,33
750	1,03	1,59	35,22
1000	1,43	2,22	35,59
1500	2,48	3,87	35,92

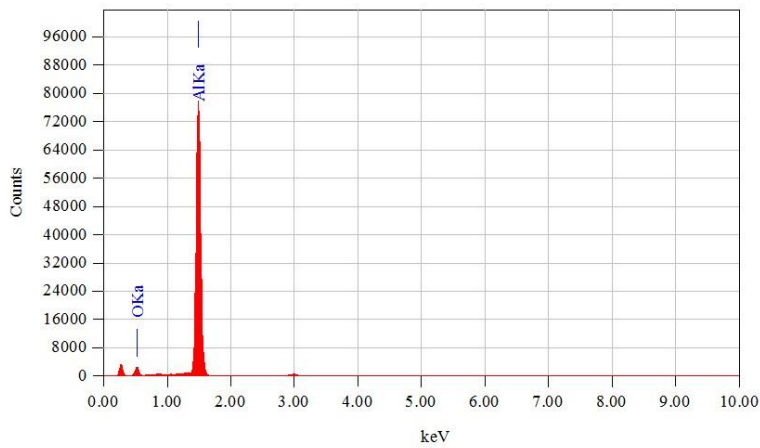
Apêndice D – Relatórios das análises de EDS

View000



Lab 1/1

Title : IMG1
 Instrument : 7100F
 Volt : 20,00 kV
 Mag. : x 25
 Date : 2020/01/29
 Pixel : 1024 x 768



Acquisition Parameter
 Instrument : 7100F
 Acc. Voltage : 20.0 kV
 Probe Current: 1.00000 nA
 PHA mode : T2
 Real Time : 55.25 sec
 Live Time : 50.00 sec
 Dead Time : 9 %
 Counting Rate: 17745 cps
 Energy Range : 0 - 20 keV

ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
 Fitting Coefficient : 0.0755

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%	Compound	Mass%	Cation	K
O	0.525	21.61	0.22	31.74				20.0231
Al	1.486	78.39	0.17	68.26				79.9769
Total		100.00		100.00				

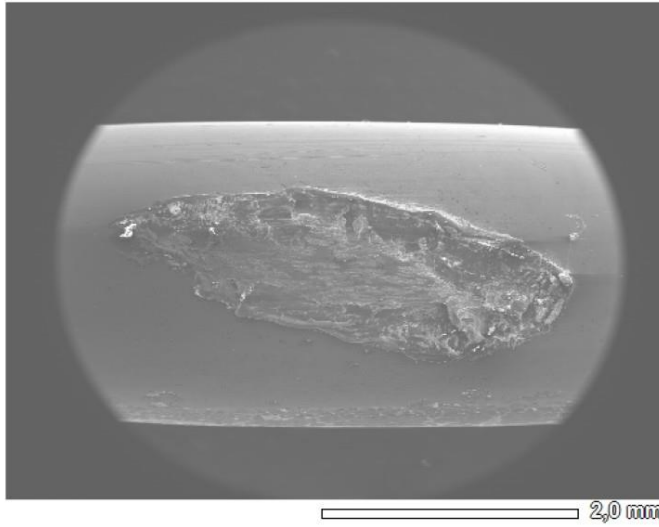
JED-2300 AnalysisStation

JEOL

Figura D 1 – Relatório químico da Análise EDS do CP de liga AA 1120 – P=1000N

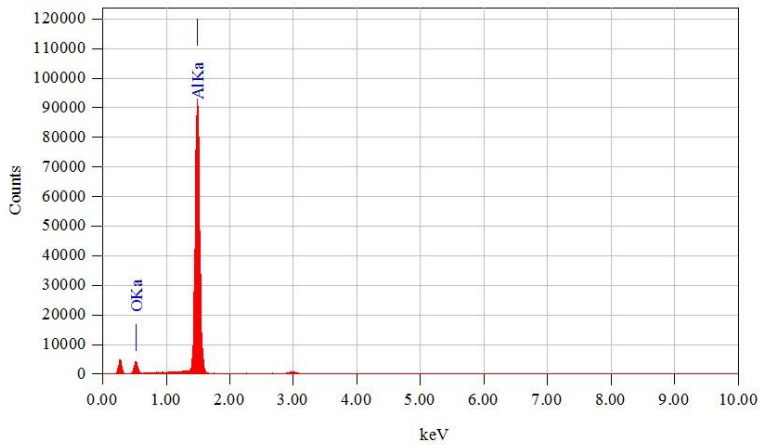
View000

Lab 1/1



Title : IMG1

Instrument : 7100F
Volt : 20,00 kV
Mag. : x 23
Date : 2020/01/29
Pixel : 1024 x 768



Acquisition Parameter
Instrument : 7100F
Acc. Voltage : 20.0 kV
Probe Current: 1.00000 nA
PHA mode : T2
Real Time : 57.21 sec
Live Time : 50.00 sec
Dead Time : 12 %
Counting Rate: 23306 cps
Energy Range : 0 - 20 keV

ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
Fitting Coefficient : 0.0896

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%	Compound	Mass%	Cation
O K	0.525	26.42	0.21	37.72			K
Al K	1.486	73.58	0.14	62.28			
Total		100.00		100.00			

25.9761
74.0239

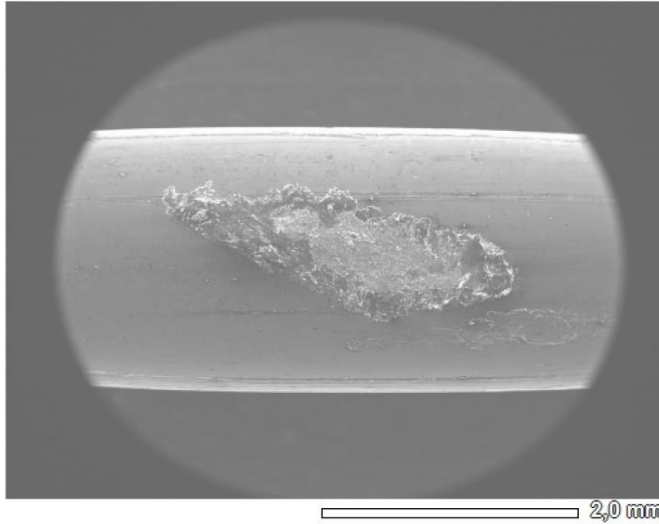
JED-2300 AnalysisStation

JEOL

Figura D 2 - Relatório químico da Análise EDS do CP de liga AA 1120 – P=750N

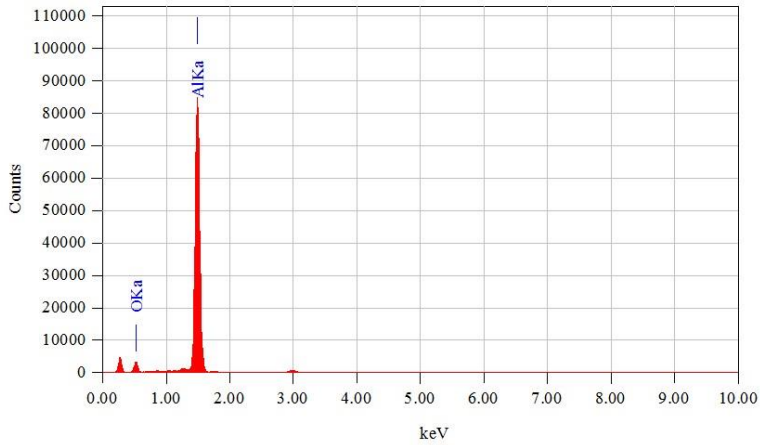
View001

Lab 1/1



Title : IMG1

Instrument : 7100F
Volt : 20,00 kV
Mag. : x 23
Date : 2020/01/29
Pixel : 1024 x 768



Acquisition Parameter
Instrument : 7100F
Acc. Voltage : 20.0 kV
Probe Current: 1.00000 nA
PHA mode : T2
Real Time : 56.49 sec
Live Time : 50.00 sec
Dead Time : 11 %
Counting Rate: 21679 cps
Energy Range : 0 - 20 keV

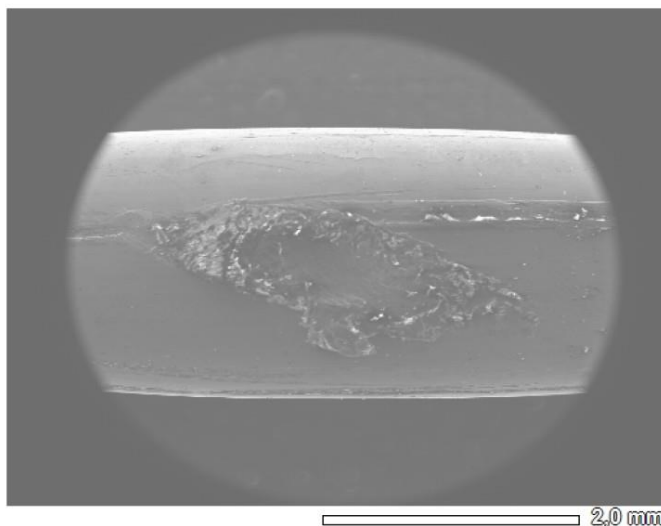
JED-2300 AnalysisStation

JEOL

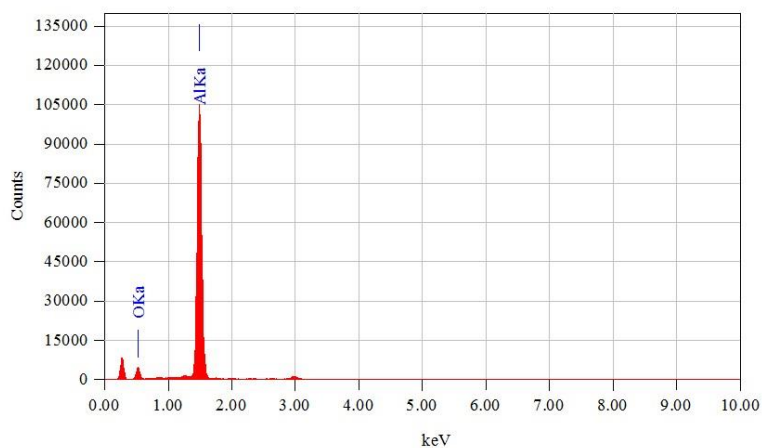
Figura D 3 - Relatório químico da Análise EDS do CP de liga AA 6201 - P=1000N

View003

Lab 1/1



Title : IMG1
 Instrument : 7100F
 Volt : 20,00 kV
 Mag. : x 23
 Date : 2020/01/29
 Pixel : 1024 x 768



Acquisition Parameter
 Instrument : 7100F
 Acc. Voltage : 20.0 kV
 Probe Current: 1.00000 nA
 PHA mode : T2
 Real Time : 59.01 sec
 Live Time : 50.00 sec
 Dead Time : 15 %
 Counting Rate: 29241 cps
 Energy Range : 0 - 20 keV

ZAF Method Standardless Quantitative Analysis

Fitting Coefficient : 0.1261

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%	Compound	Mass%	Cation	K
O K	0.525	25.83	0.20	37.00				25.2190
Al K	1.486	74.17	0.14	63.00				74.7810
Total		100.00		100.00				

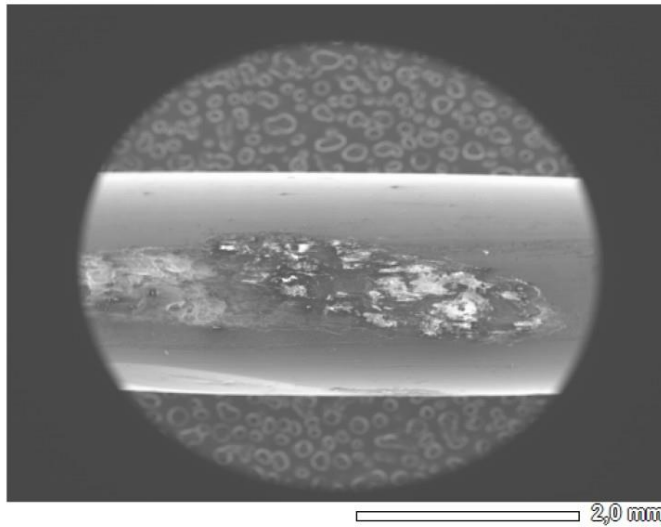
JED-2300 AnalysisStation

JEOL

Figura D 4 -Relatório químico da Análise EDS do CP de liga AA 6201 – P=750N

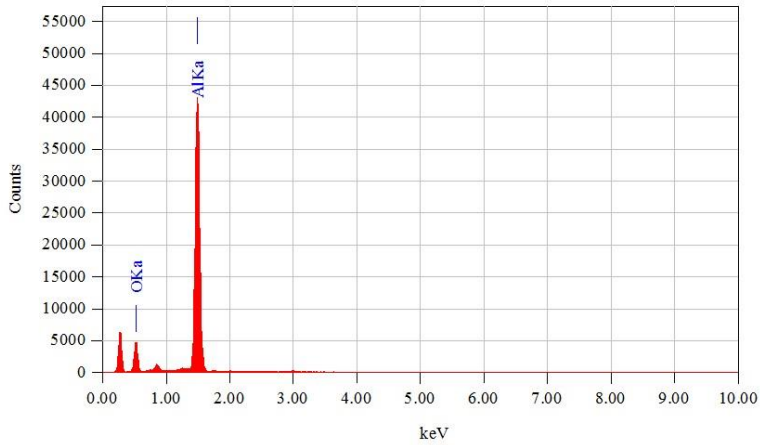
View001

Lab 1/1



Title : IMG1

Instrument : 7100F
Volt : 15,00 kV
Mag. : x 20
Date : 2020/02/20
Pixel : 1024 x 768



Acquisition Parameter
Instrument : 7100F
Acc. Voltage : 15.0 kV
Probe Current: 1.00000 nA
PHA mode : T2
Real Time : 53.58 sec
Live Time : 50.00 sec
Dead Time : 6 %
Counting Rate: 11989 cps
Energy Range : 0 - 20 keV

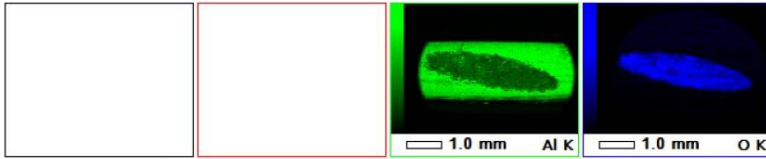
JED-2300 AnalysisStation

JEOL

Figura D 5 - Relatório químico da Análise EDS do CP de liga AA 6201 – P=250N

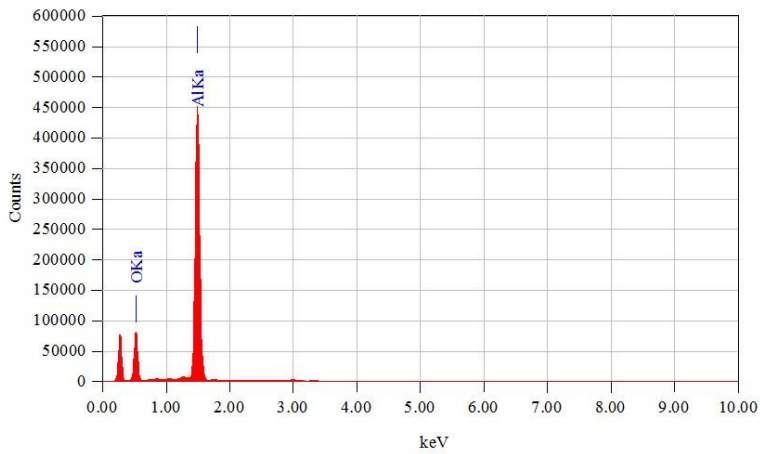
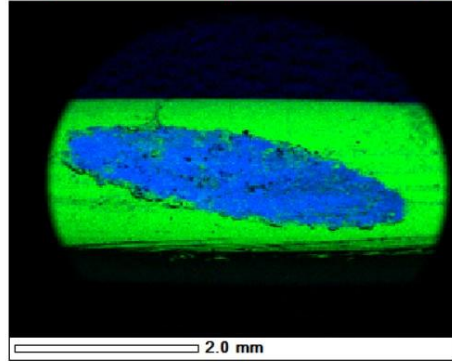
View000

Lab 1/1



Date : 20/02/2
Resolution : 256 x 1

Instrument : 7100F
Acc. Volt. : 15 kV
Magnification : x 25
Dwell Time : 0.2 mse
Sweep Count : 50



Acquisition Parameter
Instrument : 7100F
Acc. Voltage : 15.0 kV
Probe Current: 1.00000 nA
PHA mode : T2
Real Time : 491.52 sec
Live Time : 457.96 sec
Dead Time : 5 %
Counting Rate: 10353 cps
Energy Range : 0 - 20 keV

JED-2300 AnalysisStation

JEOL

Figura D 6 - Relatório químico da Análise EDS do CP de liga AA 6201 - P=500N