



PROJETO DE GRADUAÇÃO

EFEITO DA PRESENÇA DE MOSSAS NA RESISTÊNCIA À FADIGA EM FIOS DA LIGA AA6201 T81

Por,
LUCAS TEZELLI BARBOSA

Brasília, 21 de Junho de 2017

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**EFEITO DA PRESENÇA DE MOSSAS NA RESISTÊNCIA À FADIGA
EM FIOS DE LIGA AA6201 T81**

Por,
Lucas Tezelli Barbosa

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico

Banca Examinadora

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

Prof. José Alexander Araújo, UnB/ ENM

Prof. Thiago de Carvalho Rodrigues Doca, UnB/ ENM

Brasília, 21 de Junho de 2017

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pois sem Ele nada disso seria possível, então que toda honra e toda glória seja dada a Deus por mais essa conquista.

Aos meus pais Carlos e Diva, que sempre me apoiaram e se esforçaram para me ajudar nos momentos difíceis, sempre tendo uma palavra de incentivo e sempre acreditando no meu potencial.

À minha irmã Amanda, que é o meu maior exemplo de superação, força, garra e determinação.

À minha namorada Caroline que sempre acreditou em mim desde o início, para passar no vestibular, até o dia de hoje. E sempre esteve do meu lado me ajudando nas mais diversas situações, e me apoiando sempre com carinho, compreensão, amor e dedicação em tudo.

Aos professores Alex e Thiago pelas críticas construtivas e pela ajuda em todo o processo desse projeto. E ao meu orientador, Professor Jorge, que sempre esteve disposto a me ajudar em todo o momento e esteve sempre presente quando foi necessário para me orientar na execução do projeto.

À galera da “Diretoria”, que foram grandes amigos que fiz na faculdade, e que fizeram com que essa passagem pelo curso de Engenharia fosse um pouco menos doloroso.

Aos colegas de laboratório, José, Mauricio e Vitor que me ajudaram com os procedimentos experimentais, e sempre me deram apoio e compartilharam das suas experiências acadêmicas comigo.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar experimentalmente a influência da presença de mossas (deformação plástica na superfície) na vida em fadiga de fios de um cabo condutor. Assim, a proposta deste projeto é o de isolar um dos fenômenos envolvidos no processo de falha por fadiga na ligação cabo-grampo. Na montagem cabo-grampo ocorre a competição de dois fenômenos de falha distintos: 1) desgaste abrasivo do material, 2) fratura devido a presença da mossa. O segundo fenômeno, objeto de estudo desse trabalho, induz a concentração de tensão e agrava assim o processo de *fretting* pela presença do concentrador de tensão. Para isso foi desenvolvida uma metodologia experimental utilizando uma máquina de ensaio universal para realizar o procedimento de esticamento, de indução das mossas nos fios e de ensaio de fadiga dos mesmos, e posteriormente, avaliar experimentalmente o seu efeito sobre a vida/resistência do fio. As mossas serão induzidas através de um ensaio de compressão, de um fio sobre outro com uma angulação de aproximadamente 30° e sofrerá cargas de 2kN e 2,5kN no ponto de contato, induzindo assim uma deformação plástica na superfície do fio. Como a liga utilizada para realização desse projeto é a liga AA 6201 T81, que é uma liga mais dura (88HBn), as mossas geradas não são de grande escala e como a compressão é realizada a aproximadamente 30°, o formato da mossa é em elipse com uma proporção média de comprimento/ largura de 4:1. O objetivo é quantificar, de maneira experimental, a influência dessas mossas na vida em fadiga do fio, comparando com a vida em fadiga de um fio sem a presença da mossa. Para realizar essa comparação e quantificar o efeito da mossa na resistência a fadiga do fio, foi gerado uma curva S-N dos ensaios de fadiga realizados nos fios com as mossas. E comparando-se com a curva do fio sem a marca, foi observado uma considerável redução de resistência à fadiga do fio com as mossas em relação ao fio sem a mossa. É observado também um aumento dessa redução com o aumento da vida.

ABSTRACT

The objective of this work is to perform experimental testing the influence to access of indentation marks (plastic deformation on the surface) in fatigue life of a wire. Thus, the proposal of this project is to isolate one of the phenome involved in the fatigue failure process in the cable-clamp connection. In the cable-clamp assembly there is a competition of two different fault phenomena: 1) abrasive wear of the material, 2) fracture due to the presence of the jag. The second phenomenon, object of study of this work, induces the concentration of tension and thus aggravates the process of fretting by the presence of the tension concentrator. For this, an experimental method was developed using a universal testing machine that performs the stretching procedure, induction of indentations on the wires and fatigue test thereof, and subsequently, to evaluate experimentally its effect on the life/resistance of the conductor. The indentation will be induced by a compression test, from one wire to another with an angulation of approximately 30° and will suffer loads of 2kN and 2.5kN at the point of contact between the wires, thereby inducing a plastic deformation on the surface of the wire. As the alloy used to carry out this project is the AA 6201 T81 alloy, which is a tough alloy (88HBn), the generate indentation are not large scale and as the compression is performed at approximately 30° , the shape of the indentation is in ellipse with a mean length/width ratio of 4:1. The objective is to quantify, experimentally way, the influence of those indentations in th wire fatigue life, comparing with the fatigue life of a wire without indentation. The perform this comparison and quantify the effect of indentation in the resistance wire, was raised a S-N curve of fatigue test on the wires with indentation. And compared with the curve of the wire without the mark, noted a considerable reduction of fatigue resistance of the wire with the mark in relation to the without mark. Is observed an increase this reduction with increased life.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação.....	1
1.2	Objetivo.....	4
1.3	Estrutura do Trabalho.....	5
2	REVISÃO TEÓRICA - FADIGA.....	6
2.1	Definição de Fadiga	6
2.2	Estágios de falha.....	6
2.3	Conceitos Básicos	9
2.4	Critérios de Projeto.....	12
2.5	Método da Tensão-Vida	13
2.5.1	Curva Wöhler (S-N).....	13
2.5.2	Fatores que influenciam a curva S-N	15
2.5.3	Efeito da descontinuidade geométrica na resistência à fadiga	17
2.5.4	Efeito da tensão média na resistência à fadiga	21
3	FADIGA EM CABOS	24
3.1	Fadiga em Cabos Transmissão de Energia.....	24
3.2	Mecanismo de Falha por Fadiga em Cabos Condutores de Energia	25
4	METODOLOGIA	27
4.1	Critérios de seleção das amostras.....	27
4.2	Microscópio Confocal.....	29
4.3	Ensaio para estiramento dos fios.....	29
4.4	Ensaio de tração	31
4.5	Ensaio de indução das mossas.....	32
4.6	Ensaio de fadiga	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
5.1	Caracterização das Mossas.....	41
5.2	Resultados dos Ensaio de Fadiga.....	45
6	CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	49
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51
7	APÊNDICE	54
7.1	Marcas do mordente.....	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 - Regiões de fratura e desgaste (Cabo ACAR 750 mcm da Nexans, 20% eds yb 0.76 mm).	2
Figura 1-2 – Ligação típica cabo-grampo (a), vista em corte das regiões de contato (b) (FADEL, 2010).	2
Figura 1-3- Montagem esquemática cabo/grampo mostrando a posição padrão para medida da amplitude de deslocamento, Yb (ALMEIDA et al, 2013).	3
Figura 1-4 – Curvas Tensão versus Vida relacionadas a Falhas de Condutores CAA e CAL (ALMEIDA et al, 2013).	4
Figura 2-1 - Estágios da falha por fadiga (GARCIA, 2012)	7
Figura 2-2 - Bandas de deslizamento e propagação da trinca (ROSA, 2002)	7
Figura 2-3 - Estrias devido ao carregamento cíclico (NORTON, 2013)	8
Figura 2-4 - Marcas de praia em duas peças que falharam sob fadiga a) falhou sob flexão rotativa b) falhou sob torção e flexão combinadas (NORTON, 2013).	8
Figura 2-5 - Ruptura por fadiga indicando o ponto de início da trinca (ROSA, 2002)	9
Figura 2-6 - Tensões flutuantes: a) Ciclo de tensão reversa; b) Ciclo de tensão flutuante; c) Ciclo de tensão aleatória	10
Figura 2-7 - Tipos de solicitações mais usuais (ROSA, 2002)	11
Figura 2-8 - Elementos para falha em segurança (modificado ROSA, 2002)	13
Figura 2-9 - Curva Tensão - Vida (S-N), com ciclo de tensão totalmente reversa (modificado:SHIGLEY, 2008)	14
Figura 2-10 - Diagrama S-N de resistência à fadiga versus número de ciclos (NORTON,2013)	15
Figura 2-11 -Curva de resistência à fadiga contabilizando a influência dos fatores	17
Figura 2-12 - Efeito da concentração de tensão, para a liga 7074-T6 (ROSA, 2002).	18
Figura 2-13 - Curvas de sensibilidade ao entalhe para aços (NORTON, 2013)	19
Figura 2-14 - Disposição das tensões próximas ao entalhe (modificado: ROSA, 2002)	20
Figura 2-15 - Influência da a) Razão de tensão (MPa); b) tensão média (MPa) para diferentes amplitudes (GARCIA, 2012)	22
Figura 3-1 - Montagem cabo-grampo de suspensão na torre (FADEL, 2010)	24
Figura 3-2 - Montagem cabo-grampo de suspensão, com detalhamento para superfície de contato entre os fios (GOMES, 2015).	25
Figura 3-3 - Presença de mossas nos fios de cabos condutores	26
Figura 4-1 Forma construtiva do cabo (modificado: ALUBAR, 2010)	28
Figura 4-2- Lote de fios cortados e separados do cabo	29
Figura 4-3 a) Disposição do fio na máquina antes do estiramento; b) Pós estiramento	30
Figura 4-4 - Lote de fios esticados.	30
Figura 4-5 -Modo de falha da liga AA 6201 T81 após ensaio de tração	31
Figura 4-6 - Suporte para os fios para o ensaio de compressão para produção das mossas.	32
Figura 4-7 - Marcação de alinhamento dos "pratos"	33
Figura 4-8 - Disposição dos fios presos no suporte para ensaio de indução das mossas.	34
Figura 4-9 - Estágio final do ensaio de compressão para produção das mossas.	35
Figura 4-10 - Mossas realizadas após ensaio de indução.	36
Figura 4-11- Imagem aproximada das mossas.	36
Figura 4-12 - Curva Força x Deslocamento do ensaio de indução das mossas de 2kN.	36
Figura 4-13 - Curva Força x Deslocamento do ensaio de indução das mossas de 2,5kN	37
Figura 4-14 - Limitadores para manter o alinhamento do CP no ensaio.	38
Figura 4-15 - Limitador inferior no detalhe	38
Figura 5-1 - Diagrama Força x Deslocamento para a liga AA6201 T81	40
Figura 5-2 - Caracterização do CP2 com marca de 2kN.	42
Figura 5-3 - Caracterização do CP8 com marca de 2,5kN.	42
Figura 5-4 - Medição de profundidade da mossa do CP1 2kN.	43

Figura 5-5 - Medição de profundidade da massa do CP8 2,5kN.	43
Figura 5-6 - Modos de falha de acordo com o nível de tensão.....	45
Figura 5-7 - Região de falha com marca de 2,5kN.	46
Figura 5-8 - Curva S-N obtida experimentalmente.	47
Figura 7-1 - Imagens do CP 1 ao 10 da massa de 2kN	54
Figura 7-2 - Imagens do CP 11 ao 16 da massa de 2kN	55
Figura 7-3 - Imagens CP 1 ao 6 da massa de 2,5kN	56
Figura 7-4 - Imagens CP 7 ao 11 da massa de 2,5kN	56
Figura 7-5 - Marca do mordente da máquina Landmark.....	57
Figura 7-6 - Marca do mordente da máquina para ensaio de fios.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do cabo utilizado para produção dos corpos de prova (modificado: NEXANS, 2013)	27
Tabela 2 - Propriedades mecânicas básicas da liga AA6201-T81 (ALMEIDA et al, 2013).....	28
Tabela 3 - Comparativo entre os resultados de limite de resistência entre os ensaios de tração e a literatura (ALMEIDA et al, 2013).....	41
Tabela 4 - Tabela de resultados das medidas das molas de 2kN.....	44
Tabela 5 - Tabela de resultado das medidas das molas de 2,5kN.	44

LISTA DE ABREVIACÕES

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CAA (ACSR)	Condutores de Alumínio com Alma de Aço (Aluminum Conductor Steel Reinforced)
CAL (AAAC)	Condutores de Alumínio Liga (All Aluminum Alloy Conductor)
CIGRÉ	Conseil International des Grands Réseaux Electriques (International Council on Large Electric Systems)
CP's	Corpos de Prova
CRT	Carga de Ruptura à Tração
C'SBL	Conductor Safe Border Line
EDS	Every Day Stress
EPRI	Electric Power Research Institute
IACS	International Annealed Copper Standard
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LT	Linhas de Transmissão
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
P-S	Poffenberger-Swart
SIN	Sistema Interligado Nacional
UnB	Universidade de Brasília
UPC	Último Ponto de Contato
UTS	Ultimate Tension Stress

LISTA DE SÍMBOLOS

Latinos

A	Razão de amplitude.
A_o	Área do corpo de prova, m ² .
A_s	Área ocupada pelos fios de aço do condutor, m ² .
A_{al}	Área ocupada pelos fios de alumínio do condutor, m ² .
b	Expoente de Basquin
C	Coeficiente de ajuste da curva S-N
D	Coeficiente de ajuste da curva S-N
d_s	Diâmetro de um fio de aço, mm.
d_a	Diâmetro de um fio de alumínio, mm.
E	Módulo de elasticidade, MPa.
E_a	Módulo de elasticidade do fio de aço, MPa.
E_{al}	Módulo de elasticidade do fio de alumínio, MPa.
$EI_{máx}$	Máxima rigidez do cabo à flexão, kgf.
$EI_{mín}$	Mínima rigidez do cabo à flexão, kgf.
F	Força aplicada ao material
f	Frequência de esteira, Hz.
g	Constante gravitacional, m/s ² .
H	Carga de estiramento, kgf.
K	Fator de conversão da formulação de P-S, MPa/mm.
k	Constante
k_a	Fator de acabamento superficial
k_b	Fator de tamanho
k_c	Fator de carga
k_d	Fator de temperatura
k_e	Fator de confiabilidade
k_f	Fator de redução de resistência a fadiga
l_o	Comprimento inicial do fio
n_s	Número de fios de aço.
n_a	Número de fios de alumínio.
N_f	Número de ciclos até a falha sob um mesmo nível de tensão.
q	Fator de sensibilidade ao entalhe
r	Raio do entalhe
R	Razão de tensões.
Re	Número de Reynolds.

S_e	Limite de resistência à fadiga, MPa.
S_s	Tensão média atuante nos fios de aço do condutor, MPa.
S_{al}	Tensão média atuante nos fios de alumínio do condutor, MPa.
St	Número de Strouhal.
u	Velocidade do fluido, m/s.
w	Peso específico do condutor, kgf/km
x	Distância entre o ponto de medida da amplitude de deslocamento do cabo e o último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão, mm.
Y_b	Amplitude de deslocamento pico a pico, mm.

Gregos

$\Delta\sigma$	Intervalo das tensões.
ε	Deformação, strain.
π	Constante
μ	Viscosidade dinâmica do fluido
ρ	Massa específica do fluido
ρ_s	Massa específica dos fios de aço do condutor, kg/m ³ .
ρ_{al}	Massa específica dos fios de alumínio do condutor, kg/m ³ .
σ	Tensão, MPa.
σ_a	Tensão alternada ou amplitude de tensão, MPa.
σ_e	Tensão limite de escoamento, Mpa
σ'_f	Coeficiente de resistência à fadiga, Mpa
σ_m	Tensão média, MPa.
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima, MPa.
$\sigma_{m\acute{i}n}$	Tensão mínima, MPa.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O Brasil é um país com cerca de 204 milhões de habitantes, segundo estimativas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Para geração e transmissão de energia elétrica, por exemplo, o país conta com um sistema (conjunto composto por usinas, linhas de transmissão e ativos de distribuição) principal: o Sistema Interligado Nacional (SIN), que é uma imensa “rodovia elétrica” que abrange a maior parte do território brasileiro, e outros sistemas de menor porte, não-conectados aos SIN e, por isso chamados de Sistemas Isolados, que se concentram principalmente na região Amazônica. (ANEEL, 2008).

Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) em 2014 o Sistema Interligado Nacional possuía uma extensão de cerca de 125,640 mil Km.

Com toda essa grandeza e importância da transmissão de energia é significativo o estudo sobre cabos condutores de eletricidade. O cabo condutor como principal elemento de uma linha de transmissão de alta tensão, pode contribuir com até 40% do custo em investimento de capital da rede, e assim fica fácil perceber o quão importante é o estudo de falhas e uma inspeção periódica do cabo condutor (FRONTIN, 2010).

A principal causa de falhas vertente de fadiga do condutor é a presença de vibrações eólicas: Um fenômeno que provoca vibrações de alta e baixa frequência na gama de 3 a 150 Hz, para ventos de 1 a 7 m/s o que leva a fadiga do material (CIGRÉ, 2007). Tensões dinâmicas em um condutor são devidas à flexão do fio. Uma vez que todos os fios tensionados geram uma pressão sob as camadas inferiores, e essa pressão resulta em atrito entre os fios durante a vibração, em locais onde o movimento do condutor é restrito, as curvaturas são máximas e ocorre deslizamento entre os fios do cabo. Esses deslizamentos podem levar a geração de pequenas fissuras (GUÉRARD, 2011). Quando a amplitude de vibração é pequena a pressão do contato pode estabiliza-los, mas quando as amplitudes são grandes, essas fissuras vão continuar a propagar, e eventualmente, causar falha no fio. Essas falhas irão ocorrer em que tais condições são singulares (onde o movimento do condutor é restrito), principalmente em braçadeiras de suspensão. Mas também em amortecedor, ou marcador braçadeira espaçador (EPRI, 2006).

No processo de falha por fadiga dos fios que formam os cabos condutores pode ocorrer dois fenômenos de falhas distintos: 1) desgaste abrasivo do material 2) fratura devido a presença da mocha que vai induzir a concentração de tensão agravando assim o processo de *fretting* pela presença do concentrador de tensão.



Figura 1-1 - Regiões de fratura e desgaste (Cabo ACAR 750 mcm da Nexans, 20% eds yb 0.76 mm).

Na montagem cabo-grampo, uma carga de compressão é aplicada sobre o condutor para evitar que este deslize sobre o grampo, e essa carga induz nessa região o surgimento de mossas, devido ao encruamento da liga de alumínio no contato entre os fios.



(a)

(b)

Figura 1-2 – Ligação típica cabo-grampo (a), vista em corte das regiões de contato (b) (FADEL, 2010).

O fato de existirem dois fenômenos de falhas possíveis e atuarem de forma simultânea, torna o entendimento do fenômeno extremamente complexo. Posto que, dependendo da amplitude de vibração do condutor, dos níveis de aperto do grampo de suspensão, e do tipo de liga de alumínio utilizada na fabricação do condutor, um dos modos de falha pode se tornar mais relevante do que o outro.

E esses modos de falha acontecem devido as vibrações no cabo, induzidas por ventos, que fazem com que esse vibre, e ocorra movimentos entre um fio e outro no grampo de suspensão.

Além das forças dinâmicas provocadas pelo vento, o cabo também está sujeito a cargas estáticas que são cargas de estiramento do cabo. Introduzido em 1960 por “EDS Panel” dentro da comissão de estudos 06 do conselho internacional de grandes sistemas elétricos (CIGRÉ), esse relatório definia níveis de EDS (*Every Day Stress*), que é definido como a carga de tração máxima na qual um condutor pode ser submetido a uma temperatura, que ocorre durante o

período mais longo sem qualquer risco de dano devida a vibrações eólicas (CIGRÉ, 2005). Tradicionalmente a grande maioria das linhas de transmissão de alta voltagem no mundo é feita utilizando níveis de EDS entre 18 e 20% (ALMEIDA *et al*, 2013).

Diante disso, uma forma de caracterizar o processo de desgaste com relação a vida em fadiga do material é feita por meio do uso do diagrama de Wöhler (curva S-N). Esse diagrama faz a relação entre o número de ciclos necessários para que ocorra a falha completa do corpo de prova, quando esse é submetido a níveis de tensão nominal cíclicas estabelecidas. É utilizada junto com a formulação de Poffenberger-Swart, apresentada em 1965, que relaciona a tensão nominal na zona de falha, com a amplitude de deslocamento por flexão do cabo em um ponto a 3,5" (89 mm), entre o cabo e o grampo de suspensão (POFFENBERGER, 1965). Nesta formulação a intensidade do deslocamento é transformado em tensão mecânica, por meio de uma analogia da montagem cabo/grampo a uma viga engastada sob efeito de flexão

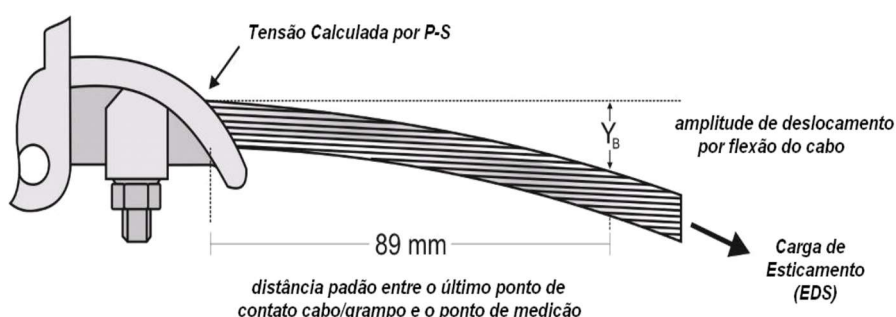


Figura 1-3- Montagem esquemática cabo/grampo mostrando a posição padrão para medida da amplitude de deslocamento, Y_B (ALMEIDA *et al*, 2013).

A liga AA 6201 pertence a série 6xxx, que são ligas que possuem magnésio e silício como principais elementos de liga, as quais se combinam e formam um elemento intermetálico Mg_2Si . Sendo a liga tratada de forma adequada, a presença do elemento intermetálico facilita na formação de precipitados finos, e uniformemente distribuídos, que acarretam no aumento da dureza do material. E essa liga possui sua condutividade elétrica na ordem de 52% IACS. Como os cabos CAL foram concebidos com o objetivo de suprir as necessidades de um condutor econômico para aplicação aérea, na qual é requestado uma maior resistência mecânica do que a obtida com o condutor CAA, a liga AA 6201 sofre ainda um tratamento de solubilização, trabalho a frio e envelhecimento artificial o que confere o tratamento T81 (ALMEIDA *et al*, 2013).

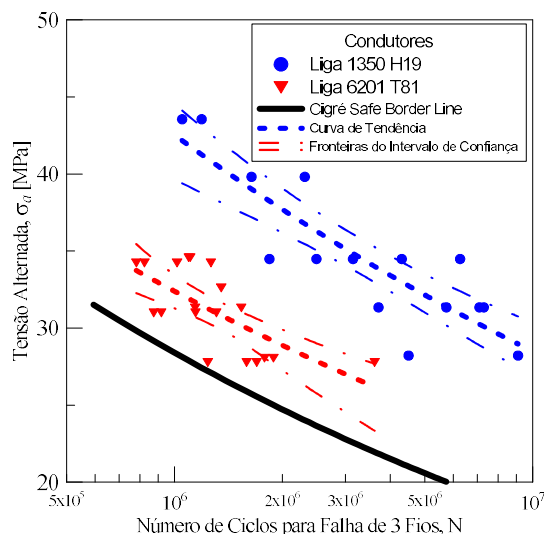


Figura 1-4 – Curvas Tensão versus Vida relacionadas a Falhas de Condutores CAA e CAL (ALMEIDA et al, 2013).

A Figura 1.4 ilustra um resultado inesperado, pois como visto o condutor CAL se examinarmos apenas para propriedades mecânicas, teria resistência a fadiga, superior aos cabos CAA, e na curva realizada no Laboratório de Ensaio de Cabos da UnB, mostra que a resistência a fadiga do condutor CAL é inferior ao CAA. Entretanto, caso dois fenômenos de falha atuem juntos, o entendimento do problema se torna complexo, com variáveis que influenciam no resultado (como a amplitude de vibração do condutor, os níveis de aperto no grampo de suspensão e o tipo de liga de alumínio utilizada no condutor).

Dessa forma, se faz necessário isolar esses fenômenos envolvidos no processo de falha da ligação cabo com grampo de suspensão, e avaliar seu efeito na vida em fadiga do material. Nesse contexto este trabalho expõe métodos experimentais na influência de defeitos de descontinuidade geométricas - moissas - na resistência a fadiga dos fios.

1.2 Objetivo

Este trabalho de natureza experimental, tem como objetivo analisar a vida à fadiga de fios de cabos condutores na presença de moissas (deformação plástica na superfície). São marcas devido ao contato fio-a-fio e no contato fio-grampo de suspensão, e esse efeito é agravado no grampo de suspensão, no qual essas marcas serão maiores e mais profundas para fios de material mais dúcteis e menores em fios de material mais “duro”, sofrendo a mesma carga de aperto no grampo de suspensão.

Para isso serão produzidos corpos de prova da liga de alumínio AA 6201 T81, liga que compõe o cabo CAL 1055 escolhido para produção dos corpos de prova. A liga AA 6201 pode apresentar também características de resistência a corrosão, e resistência mecânica superiores a outras ligas como a AA 1350 H19.

As amostras de fios dessas ligas serão retiradas de cabos condutores novos da fabricante Nexans, aplicados em transmissão de energia, para implementar a metodologia experimental. Metodologia tal, que se divide basicamente em ensaios de esticamento do fio, ensaios de indução das moissas nos fios e ensaio de fadiga nos fios com a presença das moissas. E então,

diante dos resultados obtidos experimentalmente da vida a fadiga de fios com a presença da moessa, traçar um comparativo da vida em fadiga de fios sem a presença da moessa e quantificar o quanto essa deformação plástica superficial influencia na vida em fadiga/resistência do material. As moessas que serão induzidas através de ensaio de compressão, têm formato de elipse, pois o fio será comprimido contra o outro em uma angulação de 30°. As cargas de pressão aplicadas entre os fios serão de 2000N e 2500N e seguem uma relação de comprimento/largura média de aproximadamente 4:1.

Esse trabalho almeja contribuir com o entendimento do processo de fadiga em fios de cabos condutores de energia, isolando o estudo do fenômeno envolvido no processo de falha por fadiga no contato fio a fio na ligação do cabo com o grampo de suspensão. Observando esse efeito primariamente com duas marcas de moessas específicas, e obter o efeito na liga AA6201 T81, liga utilizada na fabricação de cabos condutores. Com esse procedimento experimental intenciona-se possibilitar assim uma melhor compreensão sobre o tema de fadiga em cabos condutores de energia.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho encontra-se dividido em sete capítulos, o primeiro. O primeiro, já apresentado, realiza uma contextualização do tema, introduzindo o leitor sobre o estudo de cabos condutores de energia, a importância do estudo das falhas por fadiga nesse tipo de estrutura, também citando e especificando a liga utilizada na fabricação desses cabos e as características dessa liga. Além de conter os objetivos do presente trabalho, apresentando o que se deseja alcançar com o estudo do tema proposto.

O segundo capítulo é composto por uma revisão teórica sobre o fenômeno de fadiga, especificando como esse fenômeno ocorre, além de conceitos fundamentais sobre fadiga. Neste capítulo, também será detalhado o modo de falha estudada, que é a presença de moessas em fios, além de outros fatores que influenciam na vida em fadiga de componentes mecânicos.

O problema de fadiga em cabos condutores de energia é apresentado no capítulo três, esse capítulo aborda as principais causas de falha por fadiga em cabos condutores, além de descrever algumas metodologias para estudo da fadiga em cabos.

No quarto capítulo é descrito as metodologias utilizadas para realização do projeto experimental, explicitando passo a passo do que foi realizado em laboratório na execução de ensaios de fadiga em fios de liga de alumínio, desde o estiramento dos fios, a indução da moessa nos fios, até o ensaio de fadiga na máquina de ensaio universal.

Quinto capítulo é focado nos resultados obtidos com a realização dos ensaios experimentais realizados no Laboratório de ensaio de Materiais da Universidade de Brasília, no qual também é discutido esse resultado avaliando o que foi obtido com a realização dos ensaios.

No sexto capítulo estão contidas as conclusões e as propostas para projetos futuros envolvendo o mesmo tema. Com o objetivo de contribuir para o avanço deste estudo e obter resultados superiores.

Por fim, sétimo capítulo seguem os anexos. Arquivos e temas complementares do projeto.

2 REVISÃO TEÓRICA - FADIGA

2.1 Definição de Fadiga

Para a realização de qualquer projeto estrutural, deve-se conhecer o comportamento mecânico dos materiais, e um dos primeiros aspectos a ser levado em conta é a tensão que leva o material à falha. É possível obter essa tensão através de ensaios experimentais, como uma primeira previsão para a tensão limite de resistência, usada para materiais frágeis, e tensão limite de escoamento, para materiais dúcteis. São usadas como referência na comparação das tensões que solicitam o material. O ensaio de tração estático, que coloca o corpo de prova sob uma tensão axial até a ruptura, pode trazer informações importantes sobre o material em análise, permitindo a previsão tanto da falha estática como da falha dinâmica como é o caso da fadiga.

Em geral estruturas mecânicas são submetidas a cargas dinâmicas, o que faz o fenômeno de fadiga ser responsável por 90% das falhas em componentes de materiais metálicos (GARCIA, 2012). Mesmo em tensões abaixo da de ruptura de um determinado material, submetidos ciclicamente, podem causar danos microscópicos e estes podem acumular com o ciclo levando a outros danos macroscópicos ocasionando a falha do componente (DOWLING, 2007). Pode-se prever a vida em fadiga dessas estruturas mecânicas e verificar o comportamento do componente com a aplicação da carga dinâmica, realizando o que são chamados de ensaios de fadiga - que são ensaios extremamente importantes para projetos estruturais - e através destes são geradas curvas, conhecidas como “Curva de Whöler”.

O trabalho realizado na Alemanha por August Whöler, a partir de 1850, foi de grande importância para o estudo e a análise de falhas por fadiga. Motivado por estudos com falhas em eixos ferroviários ele desenvolveu estratégias para evitar que esses eixos falhassem por fadiga e realizou testes de falha sob flexão, torção e cargas axiais (DOWLING, 2007). Essas informações foram apresentadas num gráfico que relaciona a tensão x numero de ciclos até o colapso, que ficaram conhecidas como “Curva de Whöler” ou curva S-N. Está contido entre os principais fatores para ocorrência de falha por fadiga em materiais, a existência de tensões cíclicas e o número de ciclos de aplicação da tensão que sejam altos suficiente para ocorrência da nucleação e propagação da trinca. (GARCIA, 2012).

2.2 Estágios de falha

Sendo a fadiga um processo de redução da capacidade de carga de um componente estrutural pela ruptura lenta do material, através do avanço pequeno da trinca a cada ciclo de carregamento. E essas deformações levam a degradação do material desde a origem da trinca e a cada ciclo de carregamento, vai crescendo, até a ruptura do material (ROSA, 2002). Pode-se então dividir em três estágios distintos o início do processo de falha por fadiga, que é a nucleação das trincas, até o fim da falha, o colapso total do material.

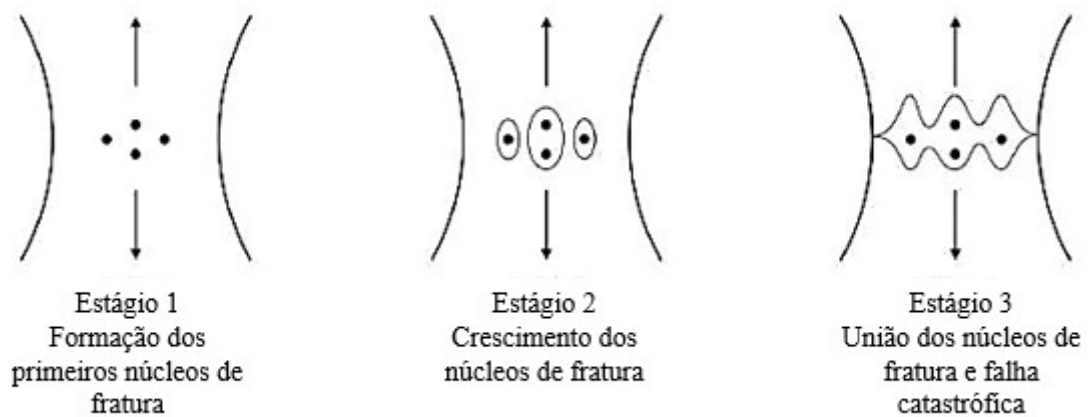


Figura 2-1 - Estágios da falha por fadiga (GARCIA, 2012)

A Figura 2-1 ilustra claramente os três estágios, com a formação de núcleos microscópicos de trincas, estágio 1, o crescimento e a propagação dessas trincas já na etapa macroscópica, estágio 2, e a união dos núcleos até a fratura do elemento, estágio 3.

Nucleação de trincas: A falha por fadiga está geralmente ligada a deformações plásticas associadas com tensões cisalhantes, essas deformações ocorrem devido ao movimento relativo de discordâncias sob a ação de tensões cisalhantes. Esses movimentos relativos formam “camadas” no qual formam reentrâncias, sendo ponto de concentração de tensão. Nesses pontos, existe uma formação de microtrincas que se formam em geral nas bordas dos concentradores de tensão e propagam-se paralelo ao plano de máxima tensão cisalhante.

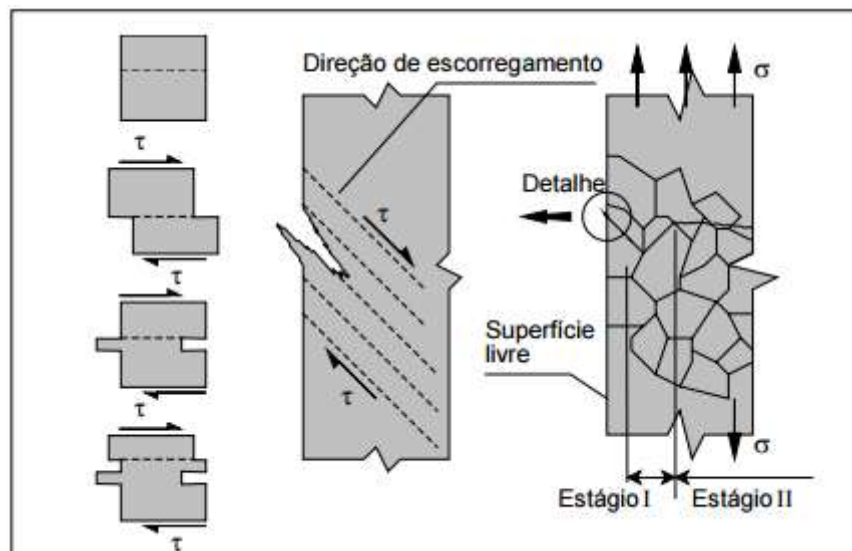


Figura 2-2 - Bandas de deslizamento e propagação da trinca (ROSA, 2002)

Assim como explicita a Figura 2-2 as microtrincas crescem na direção do escorregamento e essas seguem crescendo até um momento em que atingem um tamanho que passam a propagar de maneira perpendicular às tensões de tração que agem no elemento. No estágio I ainda corresponde ao modo microscópico de propagação (ROSA, 2002).

Propagação da trinca: Estabelecida uma trinca microscópica desenvolve-se uma zona plástica na ponta da trinca, e em cada ciclo, quando uma tensão de tração alonga, a trinca e cresce um pouco. Quando a tensão de fadiga passa para o regime de compressão ou para um valor nulo - tensão de tração suficientemente baixa - a trinca fecha, o escoamento pode cessar momentaneamente e a trinca volta a ser pontiaguda, com um comprimento maior. Assim o crescimento da trinca deve-se apenas as tensões de tração e a propagação da trinca ocorre ao longo do plano normal de tensão máxima de tração. A taxa de crescimento da trinca é muito pequena por ciclo, mas após um grande número de ciclos se torna significativo. A Figura 2-3 ilustra as *estrias* que são características microscópicas da fratura por fadiga, cada vez que a trinca é aberta por uma tensão trativa com magnitude suficiente, a ponta da trinca se deforma de maneira plástica o que faz abrir sua ponta em escala microscópica, e causa o avanço da fratura criando as chamadas *estrias* na superfície da fratura. Essas *estrias* não devem ser confundidas com as chamadas *marcas de praia* (Figura 2-4), que surgem com os ciclos de início e fim do crescimento da trinca e circundam a origem da trinca como um entalhe ou outro concentrador de tensão (NORTON, 2013) entre duas *marcas de praia* podem existir diversas *estrias*. Importante frisar que regime de propagação do segundo estágio é macroscópico.

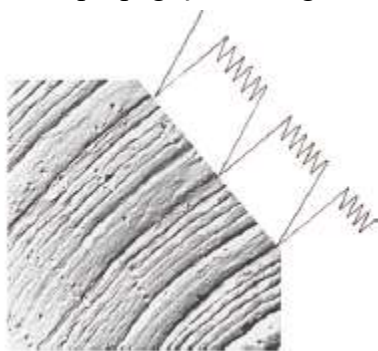


Figura 2-3 - Estrias devido ao carregamento cíclico (NORTON, 2013)

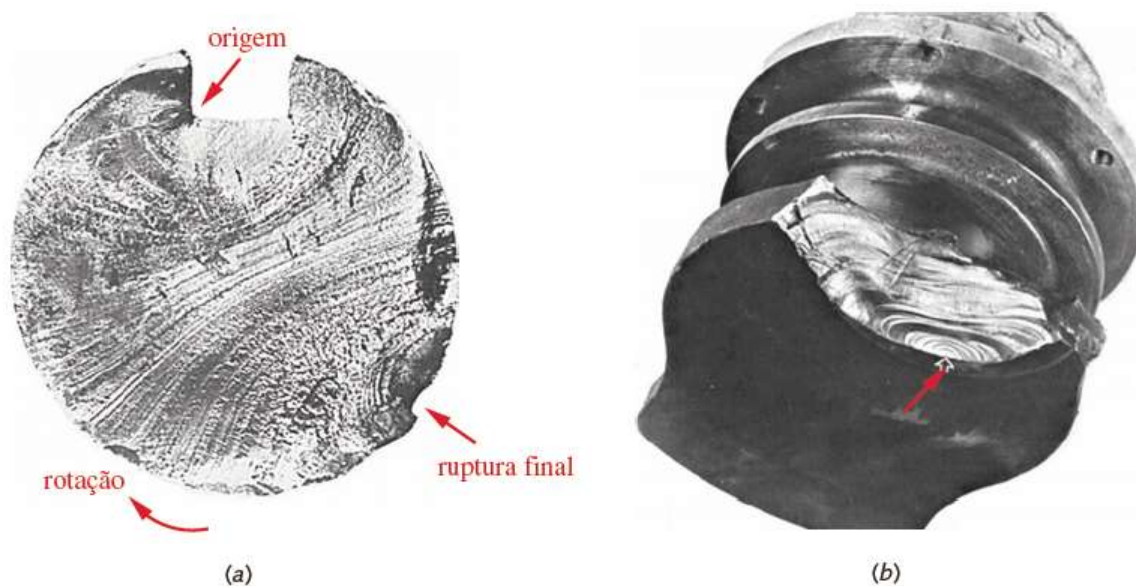


Figura 2-4 - Marcas de praia em duas peças que falharam sob fadiga a) falhou sob flexão rotativa b) falhou sob torção e flexão combinadas (NORTON, 2013).

Ruptura do material: A propagação no modo macroscópico, com uma velocidade de propagação crescente, compromete de maneira irreversível o material, levando ao colapso total, em um curto espaço de tempo. Atualmente, há o estudo da propagação de trincas microscópicas, na qual a sua formação e propagação ocorre já nos primeiros ciclos de carregamento, com o deslizamento relativo das camadas e a propagação dentro do grão. Essa propagação tem velocidade decrescente e a presença de outros defeitos ou impurezas podem parar o seu avanço e assim levar a vida infinita (ROSA, 2002).

A Figura 2-5 ilustra o aspecto macroscópico de um material que sofreu falha por fadiga, bem como o início da trinca no provável ponto de nucleação, as linhas de praia - demonstrando carregamento cíclico - e a zona de ruptura, em que a velocidade de propagação atingiu o ponto de colapso total do elemento.

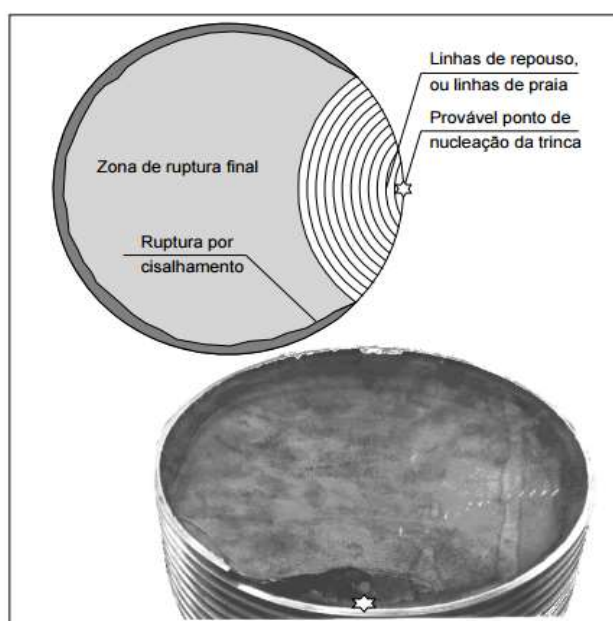


Figura 2-5 - Ruptura por fadiga indicando o ponto de início da trinca (ROSA, 2002)

2.3 Conceitos Básicos

Em diversos projetos de engenharia, muitos componentes estão submetidos a cargas cíclicas, cujo comportamento pode ser extremamente complexo e variado. Porém, em muitos casos é possível prever o modo de como o elemento se comporta na presença dessas cargas, isso devido ao fato do material sofrer uma carga que varia com o tempo. Contudo, o nível de tensão aplicado sempre está dentro de uma faixa de amplitude definida.

Segundo CALLISTER (2011), a tensão aplicada pode ser axial (tensão-compressão), flexural (flexão), ou torsional, tensão de torção no elemento. Esses três diferentes modos de falha flutuantes, podem ocorrer em um determinado tempo.

Na (Figura 2-6-a), o tipo de ensaio que corresponde ao nível de tensão cíclica, que varia senoidalmente com o tempo em torno de zero, e alterna entre máxima e mínima simétrica. Já na (Figura 2-6-b) a tensão varia ciclicamente sobre um valor de tensão média que não é zero, resultando em uma oscilação não simétrica. Devido a isso, considera-se não apenas a influência

da amplitude entre as tensões máximas e mínimas, mas também a influência da tensão média sob a resistência à fadiga. A (Figura 2-6-c) o nível de tensão varia aleatoriamente em amplitude e frequência.

Em componentes mecânicos raramente ocorre de as estruturas estarem submetidas apenas a tensões alternadas reversas, como indica (Figura 2-6 – a), mas geralmente estão sujeitas a tensões flutuantes, como o representado na (Figura 2-6 – b). Essas tensões flutuantes são caracterizadas pela tensão média, e alternada. Além de tensões máximas e mínimas também serão utilizadas para definir a influência da tensão média na resistência à fadiga. Um método de determinação dessa tensão flutuante é com a superposição de uma tensão estática com uma completamente alternada (JUVINALL, 2008).

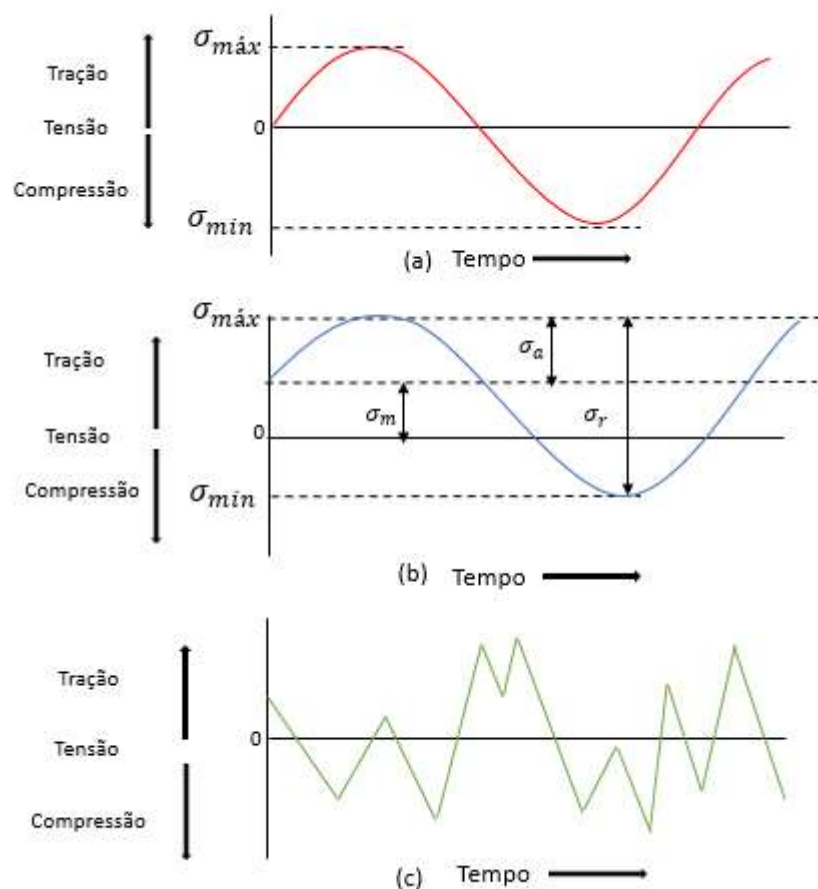


Figura 2-6 - Tensões flutuantes: a) Ciclo de tensão reversa; b) Ciclo de tensão flutuante; c) Ciclo de tensão aleatória

A tensão média σ_m é definida como: a média das tensões máximas e mínimas no ciclo, expressa por:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (1)$$

O intervalo das tensões $\Delta\sigma$ é definido como:

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (2)$$

A amplitude de variação de tensão, ou a chamada, componente alternada σ_a :

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (3)$$

E assim duas razões podem ser definidas em que R é a razão de tensão, e A é a razão de amplitude:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (4)$$

Outro aspecto na aplicação de cargas não senoidais, é simular cargas reais de serviço. Pode ser realizado fazendo a aplicação de uma carga flutuante com uma tensão média não nula. Outra forma, é a aplicação através de blocos de carregamento, na qual cada bloco submetido a níveis de carga diferentes, e cada nível com carregamento de amplitude constante. A Figura 2-7 ilustra as diversas formas de carregamento com amplitude constantes, não constantes, senoidais, trapezoidais e etc (ROSA, 2002).

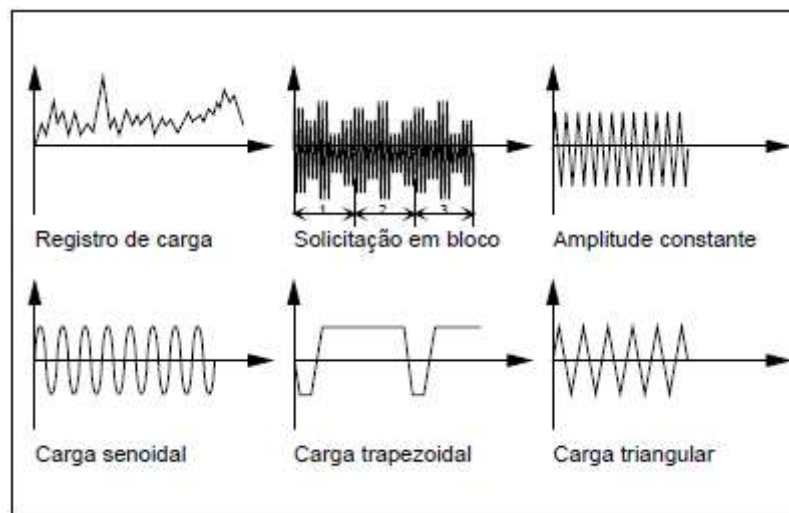


Figura 2-7 - Tipos de solicitações mais usuais (ROSA, 2002)

2.4 Critérios de Projeto

Os critérios para projetos de fadiga são largamente utilizados, todos eles são válidos, devido as condições de uso de diversos componentes mecânicos. Entre esses projetos estão destacados alguns que são utilizados em diversos projetos de engenharia, entre eles estão: O projeto para vida finita e infinita, o projeto para Fail Safe ou falha segura e projeto de tolerância ao dano. Esses projetos são aplicados em diversas áreas da engenharia, como em projeto de eixo de motores, molas de válvulas, engrenagens industriais, mancais de rolamentos, motores a jato, fuselagens e asas de avião, pontes, reservatórios e tubulações de oleodutos, para todos esses projetos se aplica um critério para projeto de fadiga, para assim garantir um projeto seguro e bem estruturado.

- **Projeto para vida finita**

Esse projeto é usado para o caso de carregamentos imprevisíveis e variantes, e essa metodologia é justificável para esses casos, pois na vida do componente mecânico a carga máxima será atingida poucas vezes, e se for projetado para vida infinita o projeto poderia sair excessivamente robusto e caro, assim, o projeto para vida finita é totalmente aceitável. No entanto, é importante que para a seleção da vida do projeto, deve-se considerar um fator de segurança que compense a grande dispersão da vida em fadiga, e de outros fatores de fogem do conhecimento do projetista. A análise do projeto pode ser feita com relação a tensão vida ($\sigma - N$), propagação de trincas já existentes ($a - \Delta k$), e deformação vida ($\epsilon - N$).

- **Projeto para vida infinita**

Antigamente usava-se o critério de tensão para vida infinita, ou seja, os projetos de elementos mecânicos eram projetados para uma segurança quanto a falha ilimitada. Na qual, a tensão limite atuante fossem abastadamente abaixo da tensão limite de fadiga. Por mais que possa ser um projeto caro, em muitos casos são necessários, como no caso de eixos motores e engrenagens industriais, além de muitos outros equipamentos que são operados em um carregamento cíclico por milhões de ciclos.

- **Projeto para falha segura (*Fail Safe*)**

O projeto para falha segura, geralmente, é o critério adotado para projetos que não toleram peso extra, devido ao fator de segurança elevado, e a solução pioneiramente adotada por engenheiros aeronáuticos, foi o critério para falha em segurança, que tem como metodologia, considerar a possibilidade de ocorrência de trincas e assim monitorar o desenvolvimento dessas trincas, para que elas não levem ao colapso, ou falha da estrutura. Alguns recursos alternativos para evitar o avanço da trinca, como bloqueadores de propagação de trinca, ou então, os utilizados em fuselagens de aviões, uniões rebitadas ou aparafusadas, ao invés de uniões soldadas que facilitam a formação e o crescimento da trinca até o colapso.

- **Projeto com tolerância à dano**

É um critério mais polido que o Fail Safe, partindo de um princípio que a estrutura possui um defeito, pode ser devido a fadiga, corrosão sob tensão, entre outros. Com fundamentos de Mecânica da fratura, os projetos são desenvolvidos de maneira que as trincas sejam detectadas pelas avaliações periódicas, e que sendo inspecionadas não levem a estrutura a falha. Esse critério geralmente é aplicado em elementos estruturais com baixa velocidade de propagação de trincas. É um critério largamente usado nos mais modernos projetos de engenharia, como em fuselagens e asa de aviões, pois é um processo exaustivamente testado e ensaiado para assegurar que nenhuma trinca fique acima da dimensão permitida, garantindo uma tolerância necessária para vida segura do elemento (ROSA, 2002). A Figura 2-8 abaixo demonstra os tipos de elementos para falha em segurança.

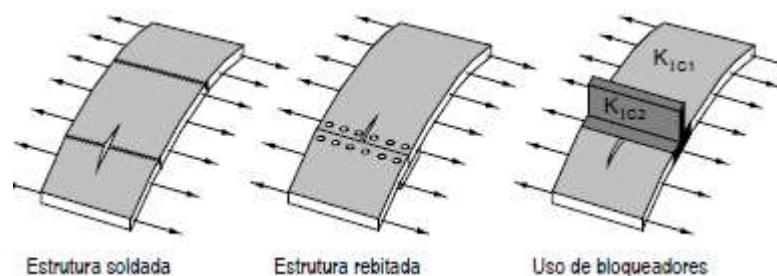


Figura 2-8 - Elementos para falha em segurança (modificado ROSA, 2002)

2.5 Método da Tensão-Vida

Para determinar a resistência de um material sob a ação de cargas de fadiga, corpos de provas são sujeitos a forças repetidas ou variáveis, com magnitudes especificadas. Os ciclos de reversão de tensões são contados até a destruição. (SHIGLEY, 2016)

2.5.1 Curva Wöhler (S-N)

Um ensaio de um determinado corpo de prova, em um certo nível de tensão até a falha, em um certo número de ciclos, N , pode ser realizado. Assim vários corpos de prova de um mesmo material são colocados a prova em diversos níveis de tensão, S , até que esses dados formem uma curva, chamada S-N, ou curva de Wöhler. Curva como ilustrado na Figura 2-9, essa curva pode nos indicar a resistência à quebra de determinado material, colocado à prova em um determinado nível de tensão, em N ciclos de tensão totalmente reversa (NORTON, 2013).

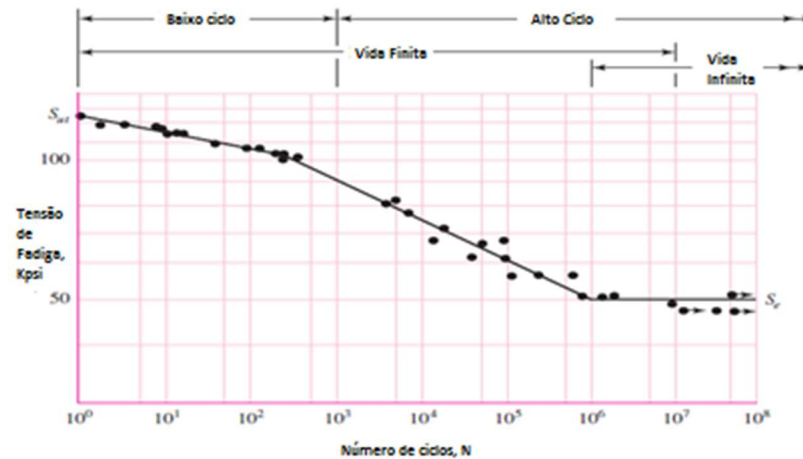


Figura 2-9 - Curva Tensão - Vida (S-N), com ciclo de tensão totalmente reversa (modificado:SHIGLEY, 2008)

Pelas características de que se dá o ensaio para obter a curva S-N, observa-se a importância de se obter corpos de provas padronizados, com condições de ensaios iguais ou bastante aproximadas, eliminando assim fatores externos que possam influenciar no ensaio. Para assim obter uma similitude dos resultados.

O número de ciclos até à falha muda rapidamente de acordo com o nível de tensão, e pode variar ao longo de várias ordens de grandeza. Sendo assim, os números de ciclos são representados na curva S-N numa escala logarítmica, como ilustra a Figura 2-9. Os dados de S-N são plotados em escalas lineares e logarítmicas, em escala linear o número de ciclos para uma vida mais curta não tem uma boa precisão. Assim a partir da equação (5) abaixo, se a curva de Wöhler estiver com uma aproximação de uma reta, em um gráfico linear-log, pode-se obter a representação matemática da curva (DOWLING, 2007).

$$\sigma_a = C + D \log N_f \quad (5)$$

Os fatores C e D são constantes de ajuste, e para dados que se aproximem de uma linha reta em log-log corresponde a:

$$\sigma_a = AN_f^B \quad (6)$$

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (7)$$

Em que σ_a é a amplitude de tensão, σ'_f é o coeficiente de resistência a fadiga do material e N_f representa o número de ciclos até ocorrer a falha, as equações (6,7), também chamadas de equação de Basquim, devido ao expoente de Basquim b, que é o expoente de resistência à fadiga do material.

As constantes:

$$A = 2^b \sigma'_f; \quad B = b \quad (8)$$

A resistência à fadiga de um material, significa especificar um valor de tensão de amplitude a partir de uma curva S-N, com uma vida de interesse particular. Termos usados para curva S-N, incluem a fadiga de alto ciclo e de baixo ciclo. A medida que se aumenta o número de ciclos, diminui linearmente a resistência à fadiga, até alcançar um ponto de 10^6 ciclos. Esse plano de resistência a fadiga existe apenas para alguns aços e algumas ligas de titânio, e é chamado de limite de resistência à fadiga (NORTON, 2013), ou seja, a partir desse ponto não importa o número de ciclos, não irá ocorrer a falha do material, importante frisar que esse plano de 10^6 ciclos só vale para alguns aços e ligas de titânio, para outros materiais permanece decaindo desse ponto como mostra a Figura 2-10 abaixo:

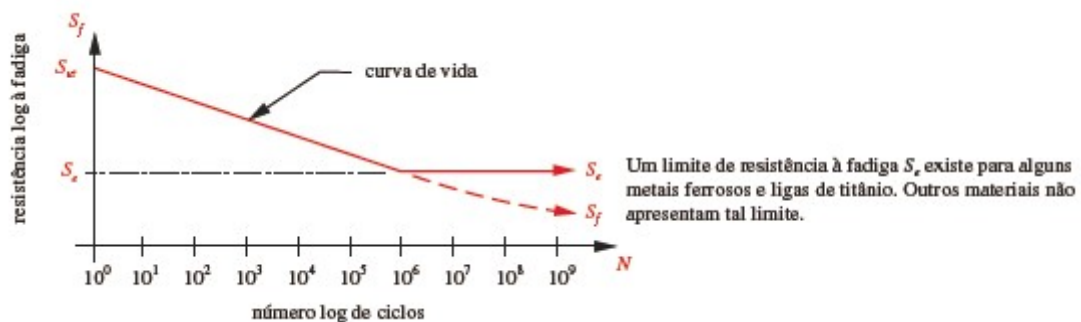


Figura 2-10 - Diagrama S-N de resistência à fadiga versus número de ciclos (NORTON,2013)

2.5.2 Fatores que influenciam a curva S-N

O limite de resistência à fadiga pode ser obtido através de ensaios experimentais, como visto na seção 2.5.1. Mas normalmente esse resultado deve ter uma correção para aplicação do projeto, já que outros fatores podem influenciar na resistência a fadiga do elemento. Portanto, é importante que o projetista mecânico conheça essas variáveis que têm influência direta na resistência à fadiga do material.

Esses fatores são necessários para correção em uma aplicação real, no qual, o limite de resistência a fadiga é obtido através de experimentos em laboratório, onde as condições são controladas, os corpos de prova são padronizados e a influência externa é minimizada. Portanto, para o projeto deve-se considerar uma correção no resultado final obtido pela curva de Wöhler, para resistência à fadiga.

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e \quad (9)$$

A equação (9), é utilizada para contabilizar cada fator que influencia no projeto para resistência à fadiga.

- **Fator de acabamento superficial k_a**

O acabamento superficial em um corpo de prova é muito diferente de um componente mecânico, pois em um corpo de prova, a superfície muitas vezes é retificada e polida, ou seja, tem um tratamento mais refinado na superfície. Já o componente mecânico muitas vezes é

apenas usinado, ou muitas vezes têm a sua superfície no estado bruto de fabricação, e estes não sofrem um tratamento de superfície por encarecer muito o projeto mecânico. Essas influências do acabamento da superfície têm grande valia para projetos com vidas elevadas, um mal acabamento de superfície pode reduzir a vida em até 10^3 vezes mais (ROSA, 2002).

- **Fator de tamanho k_b**

Como o ensaio é em um laboratório, se faz necessário que o tamanho do corpo de prova seja reduzido, ou seja, uma amostra de um material, são solicitados por tensões máximas, reduzindo as dissemelhanças que podem acontecer em todo volume do elemento mecânico. Em peças de maiores dimensões, estão sujeitas, em suas regiões centrais, a inclusões e defeitos de fabricação, comprometendo a resistência da peça. E há também o defeito aparente, que basicamente é a comparação da carga de tração com a carga de flexão na existência de deformações plásticas não computadas no cálculo.

- **Fator de carga k_c**

Em ensaios no laboratório são levados em conta apenas os tipos mais comuns de solicitação como: flexão, torção e tração. Para projetos reais de componentes mecânicos existe a superposição desses vários tipos de solicitação, em que se faz necessário a análise combinada desses efeitos.

- **Fator de temperatura k_d**

Em uma situação real, a peça projetada certamente irá trabalhar em uma temperatura distinta da temperatura de ensaio de fadiga no laboratório, logo, é necessário que se corrija para a temperatura de trabalho, segundo Rosa (2002) em um intervalo de temperatura entre 200°C e 250°C há uma pequena queda na resistência à fadiga, e valores acima desses a queda de resistência é mais acentuada.

- **Fator de confiabilidade k_e**

Observa-se que no processo de falha por fadiga, apresenta-se uma grande dispersão de resultados, portanto é importante que tenha um fator de confiabilidade que corrija esse efeito de dispersão existente.

- **Outros efeitos k_f**

Nesse fator se inclui outros efeitos tais como: tensões residuais, ambiente de trabalho, tratamentos superficiais realizados no elemento, fatores que influenciem na vida do componente mecânico quando comparado com corpos de prova (ROSA, 2002).

Esses efeitos contabilizados e corrigidos pela equação (9), representa uma nova curva S-N para levar em conta em projetos mecânicos, como ilustra a Figura 2-11 abaixo:

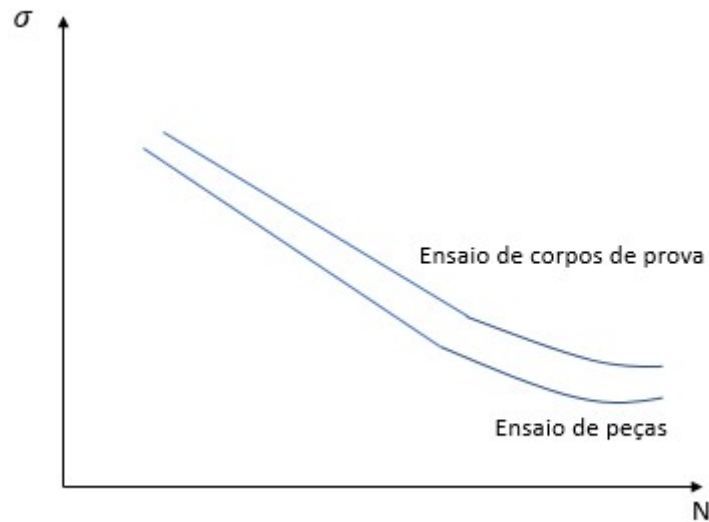


Figura 2-11 -Curva de resistência à fadiga contabilizando a influência dos fatores

2.5.3 Efeito da descontinuidade geométrica na resistência à fadiga

A presença de uma descontinuidade geométrica, ou entalhe, provoca uma distribuição não uniforme das tensões ao longo do material. A tensão em uma localidade próxima ao entalhe, é maior que a tensão média nas regiões longínquas, atuando como um amplificador de tensão. Os gradientes de tensão acentuados ocorrem na presença de um entalhe, e acarretam em gradientes de deformação também acentuados e intenso, resultando na formação de vazios que poderão se converter em trincas e levar a falha por fadiga. Outro importante fato relacionado a concentração de deformação no entalhe, é o gradiente de deformação local, que será maior que a deformação média. A nucleação de trincas é um fenômeno preferencialmente superficial, tornando importante a relação da fadiga com a influência do gradiente de tensão superficial do entalhe, pois esse gradiente tem papel fundamental na iniciação de trincas (PERES, 2008)

O fator de concentração de tensão, ou fator de entalhe, K_t , tem uma grande relevância nos resultados da resistência à fadiga, pois são a partir desses pontos de concentração de tensão que se iniciam as falhas.

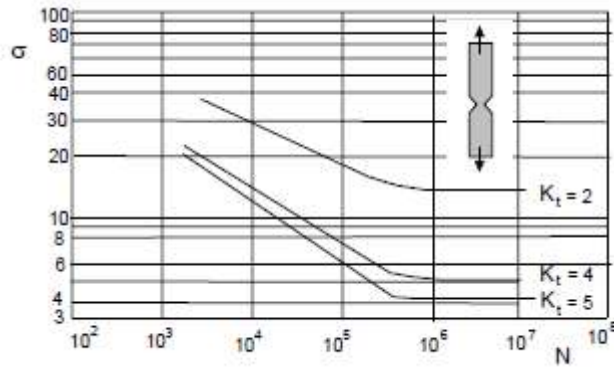


Figura 2-12 - Efeito da concentração de tensão, para a liga 7074-T6 (ROSA, 2002)

A Figura 2-12 ilustra bem a influência do aumento do K_t na resistência à fadiga, na qual um corpo de prova de geometria circular, carregado na direção axial, teve a sua vida reduzida com o aumento de K_t , para uma certa amplitude de tensão σ , havendo um aumento na concentração de tensão pela presença da descontinuidade geométrica. Outra informação que se pode tirar da Figura 2-12 é que para um dado valor de vida N , a associação entre tensões alternantes, para diversos K_t , não é constante, assim é possível obter a relação fator de concentração de tensão em fadiga, denominado K_n (ROSA, 2002).

$$k_n = \frac{\text{Resistência à fadiga sem entalhe para } N \text{ ciclos}}{\text{Resistência à fadiga com entalhe para } N \text{ ciclos}} \quad (10)$$

A alternância do fator K_n com a vida N , se dá em grande parte devido a plastificação na profundidade do entalhe, o que não permite que as tensões cheguem ao limite definido por K_t . Assim para materiais dúcteis e com pequenas descontinuidades geométricas, o fator K_t , para fadiga, torna-se conservativo pois $K_n \ll K_t$. Duas análises são realizadas para definir o efeito do entalhe na fadiga, uma utilizando a análise para vidas infinitas, trabalhando com a tensão limite de fadiga, σ_f , e análise para vidas finitas usando as curvas de tensão-vida e deformação-vida. Para análise de vida infinita o K_n se torna K_f , chamado de fator de redução de resistência à fadiga e pode ser estimado através do fator de sensibilidade ao entalhe do material definido pela equação (11) (ROSA, 2002).

$$q = \frac{(k_f - 1)}{(k_t - 1)} \quad (11)$$

Os materiais possuem diferentes sensibilidades ao entalhe, em geral quanto mais dúctil é o material, menor a sua sensibilidade ao entalhe. Logo, como a fragilidade e a ductilidade estão correlacionadas com a resistência e dureza, os metais pouco duros e com pouca resistência, tendem a ter menos sensibilidade a entalhe do que os de alta resistência e dureza, a equação (11) pode ser reescrita para obter K_f (NORTON, 2013).

$$k_f = 1 + q(k_t - 1) \quad (12)$$

O fator de sensibilidade ao entalhe q , além da dureza e da tensão limite de resistência, é função do raio da profundidade do entalhe, à medida que o raio se aproxima de zero, a sensibilidade ao entalhe também se aproxima de zero, como ilustra a Figura 2-13 abaixo.

Segundo Rosa (2002) o fator K_f é definido como um fator de redução de resistência à fadiga, o que sugere o uso para reduzir a curva $\sigma - N$ de resistência à fadiga com presença de entalhe, mas o adequado, é utilizar K_f como fator de aumento das tensões ou deformações aplicadas no elemento, devido a expectativa do desenvolvimento de tensões residuais e cargas combinadas.

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}} \quad (13)$$

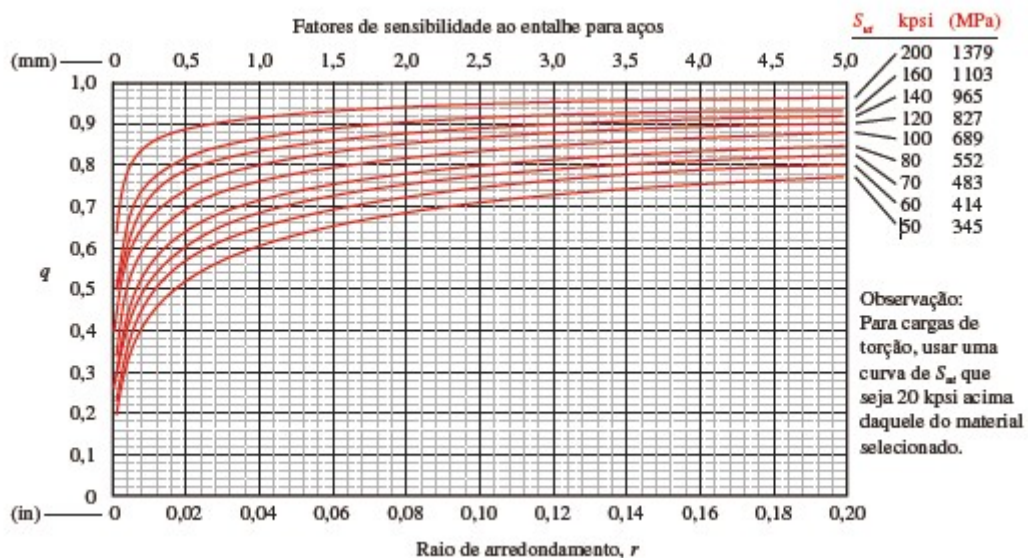


Figura 2-13 - Curvas de sensibilidade ao entalhe para aços (NORTON, 2013)

O procedimento recomendado para obter o efeito da descontinuidade geométrica, é dividir o problema em vida infinita, acima de 10^6 ciclos, e o efeito para vida finita. É importante fazer essa divisão devido as escalas de ocorrência de deformação plásticas. Na vida infinita, a deformação plástica é bastante localizada, ocorrendo em poucos grãos, e esses levarão a nucleação da trinca, e caso ocorra a propagação levará o elemento ao colapso, que neste caso o material corresponde de maneira elástica no nível macroscópico. Portanto, utiliza-se o procedimento empírico com dados de sensibilidade ao entalhe do material, e calculando K_f . Na análise de vida finita, a solicitação é maior, logo, ocorre escoamento em nível macroscópico, detectável pelo laço de histerese. O procedimento mais usual para este caso é pela regra de Neuber (ROSA, 2002).

Neuber foi o primeiro responsável pelos estudos de descontinuidades geométricas, e propôs a equação do fator de concentração de tensão em 1937, equação (12), depois Peterson

aprimorou a abordagem e desenvolveu o conceito de sensibilidade ao entalhe, equação (11). A sensibilidade ao entalhe pode ainda ser definida em termos da constante de Neuber, $\sqrt{a}$, e do raio do entalhe r (NORTON, 2013).

Segundo Rosa (2002), corpos que possuem descontinuidades geométricas, e as tensões atuantes forem menores que as tensões de limite de escoamento, é possível calcular o estado de tensão e deformação no ponto crítico, a partir da tensão nominal, com o uso do fator K_t . Mas caso a tensão no ponto de descontinuidade for maior que a tensão de escoamento, ocorre um reordenamento de tensões no local, e assim o cálculo das tensões e deformações podem ser calculados diretamente a partir do fator K_t . A Figura 2-14 ilustra a disposição de tensões para material com comportamento elástico, e com comportamento elastoplástico, para este tipo de material a tensão limite de escoamento ocorre no ponto X_2 , já no material elástico a tensão de deformação ocorre no ponto X_1 . Quando ocorre um escoamento localizado, sucede o comportamento elastoplástico e dá-se as desigualdades.

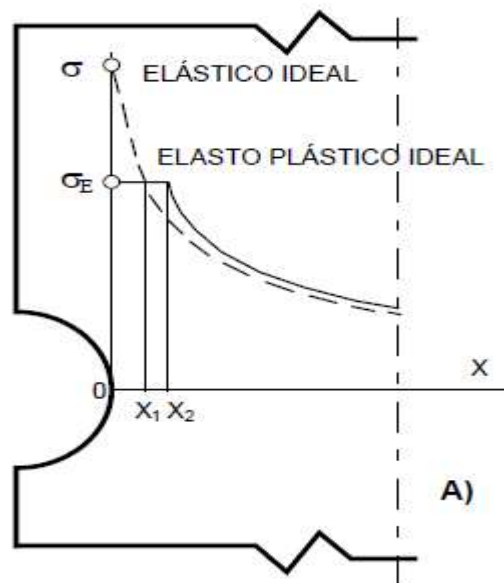


Figura 2-14 - Disposição das tensões próximas ao entalhe (modificado: ROSA, 2002)

$$\sigma \leq \sigma_0 k_t \quad (14)$$

$$\varepsilon \geq \varepsilon_0 k_t \quad (15)$$

Na qual a tensão real na peça σ , a tensão nominal σ_0 , a deformação real no ponto, dado por ε , e a deformação nominal ε_0 . Sendo assim, a tensão no ponto de concentração de tensão é menor que a predita no caso elástico, mas a deformação é maior, porém as tensões, e concentrações de deformações, não podem ser descritas diretamente a partir de K_t . Em que faz-se necessário definir dois fatores que caracterizem as tensões, e as concentrações de deformação, para o regime plástico, esses fatores são K_σ e K_ε respectivamente e estão definidos abaixo (ROSA, 2002):

$$k_{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (16)$$

$$k_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (17)$$

A correção da resistência à fadiga em função do fator K_f , é feita a partir da combinação da equação (10) com a equação (12), resultando em $\sigma_{entalhe}$ que permite avaliar a resistência à fadiga do condutor, e não será apenas função da resistência do material de fabricação do fio, mas também devido ao concentrador de tensão e a sensibilidade do material a presença desses concentradores de tensão, e $\sigma_{entalhe}$ é dado pela equação abaixo:

$$\sigma_{entalhe} = \frac{\sigma_f}{1 + q \cdot (K_t - 1)} \quad (18)$$

Outro aspecto importante é a condição de contato fio a fio, e o contato entre o cabo e os suportes. Esses efeitos são extremamente complexos de prever, o que torna muito complicado a análise do campo de tensão resultante, e também as condições de descontinuidades geométricas.

2.5.4 Efeito da tensão média na resistência à fadiga

Na maioria dos projetos de engenharia, na prática, as tensões cíclicas no ponto crítico não ocorrem de maneira totalmente reversa, ou seja, as tensões não oscilam em torno do zero, como indica a **(Erro! Fonte de referência não encontrada. – a)**. Mas as solicitações cíclicas ocorrem em torno de um valor médio não nulo, como indica a **(Erro! Fonte de referência não encontrada. – b)**. Dessa forma é importante conhecer essa tensão, e a influência dela na resistência do material à fadiga.

Uma alternativa para observar esse efeito da tensão média, é realizar vários ensaios com a aplicação de diversas tensões médias, e com diversas amplitudes de tensão para cada aplicação de tensão média. Outro procedimento que é usado para obter esse efeito da tensão média na resistência à fadiga, é selecionar diversos valores do coeficiente de tensão, equação (4), e executar o ensaio com diversos níveis de tensão para cada valor de coeficiente de tensão, formando assim várias famílias de curvas S-N cada uma correspondendo a um valor de R distinto (DOWNLING, 2007). A Figura 2-15 ilustra o efeito desses dois métodos na curva S-N.

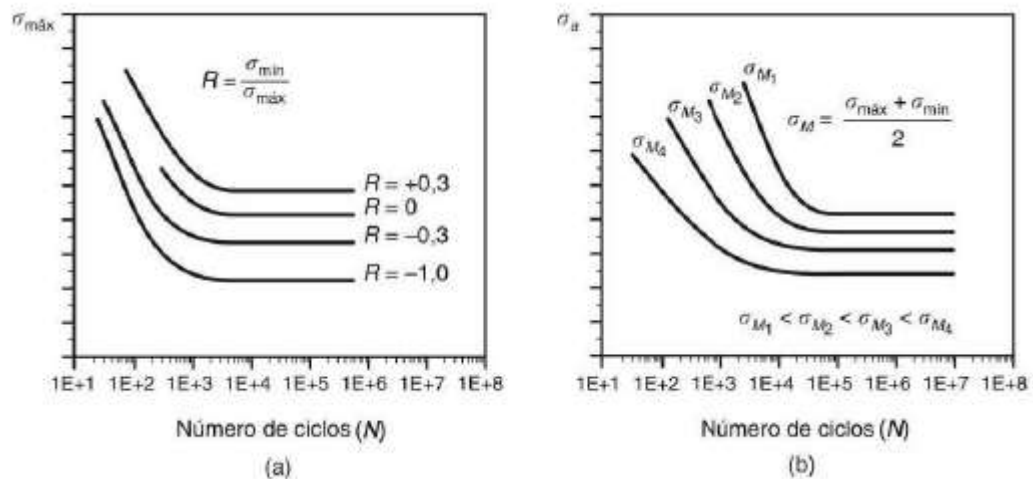


Figura 2-15 - Influência da a) Razão de tensão (MPa); b) tensão média (MPa) para diferentes amplitudes (GARCIA, 2012)

É possível observar que a medida que R se torna positivo o limite de resistência aumenta, e ao passo que a tensão média aumenta a amplitude livre de oscilação decai. Uma maneira de representar esses resultados graficamente é pelos diagramas $\sigma_a - \sigma_m$, que descrevem o aumento de σ_m e ocorre a diminuição de σ_a , nesse diagrama dois pontos são de fácil obtenção, um desses pontos para um dado número de ciclos N . A amplitude da tensão alternante que leva a falha com $\sigma_m=0$ é o ponto $(0; \sigma_n)$, e o outro ponto, é considerando um limite para a tensão média, na qual a componente alternada do carregamento é zero, considerando que a soma da tensão média com a alternada é a tensão máxima, $\sigma_m + \sigma_a = \sigma_{\max} = \sigma_r$, nesse caso $\sigma_m = \sigma_{\max}$. Mas apesar de obter dois pontos extremos no diagrama, os pontos intermediários podem se comportar de maneira diversa, dependendo das características do material entre outros fatores, assim pode-se aproximar o resultado traçando uma linha reta e ligando os pontos externos (ROSA, 2002). Para definir a curva $\sigma_a - \sigma_m$ há diversos critérios de falha entre eles estão:

Critério de Goodman: É um critério conservativo pois considera a tensão limite de fadiga do material como $\sigma_r/3$, sendo que o recomendado é $\sigma_r/2$.

Critério de Goodman modificado: A tensão alternante passa a ser o valor limite de tensão de fadiga.

Critério de Soderberg: É o mais conservador, pois restringe a tensão média a no máximo a tensão limite de escoamento, não é muito aconselhado por ser excessivamente conservador e inibir a possibilidade de formação de tensão residual que pode ser benéfica nos pontos críticos.

Critério de Gerber: É um critério com bom ajuste experimental, adota uma curva quadrática passando por σ_n e σ_r .

Esses critérios definem a linha que irá limitar a região de segurança, ou seja, região abaixo da linha de falha, e os pontos sobre as linhas serão dados como σ_a e σ_m (ROSA, 2002). Abaixo estão as equações que estabelecem essa linha.

- Soderberg

$$\frac{\sigma_A}{\sigma_n} = 1 - \frac{\sigma_M}{\sigma_e} \quad (19)$$

- Goodman modificado

$$\frac{\sigma_A}{\sigma_n} = 1 - \frac{\sigma_M}{\sigma_r} \quad (20)$$

- Gerber

$$\frac{\sigma_A}{\sigma_n} = 1 - \left(\frac{\sigma_M}{\sigma_r} \right)^2 \quad (21)$$

Em que σ_e é a tensão limite de escoamento e σ_A e σ_M são as tensões resistentes do material

3 FADIGA EM CABOS

3.1 Fadiga em Cabos Transmissão de Energia

Vibração eólica (*Aeolian Vibration*) é um dos mais importantes problemas enfrentados em cabos de transmissão de energia, pois representa a maior causa de falha por fadiga, essas vibrações ocorrem em praticamente qualquer linha de transmissão, a qualquer momento, e em níveis moderados e baixos de vento (EPRI, 2006).

A vibração no condutor, pode gerar por muitas vezes em um curto período de tempo, falhas localizadas em fios condutores, devido aos dispositivos instalados no condutor como grampos de suspensão, braçadeiras, espaçadores, amortecedores entre outros dispositivos instalados. A vibração do condutor também pode gerar falhas a itens associados ao apoio e proteção do próprio condutor, a Figura 3-1 ilustra a montagem cabo-grampo de suspensão que é um dos equipamentos que restringem o movimento do cabo.

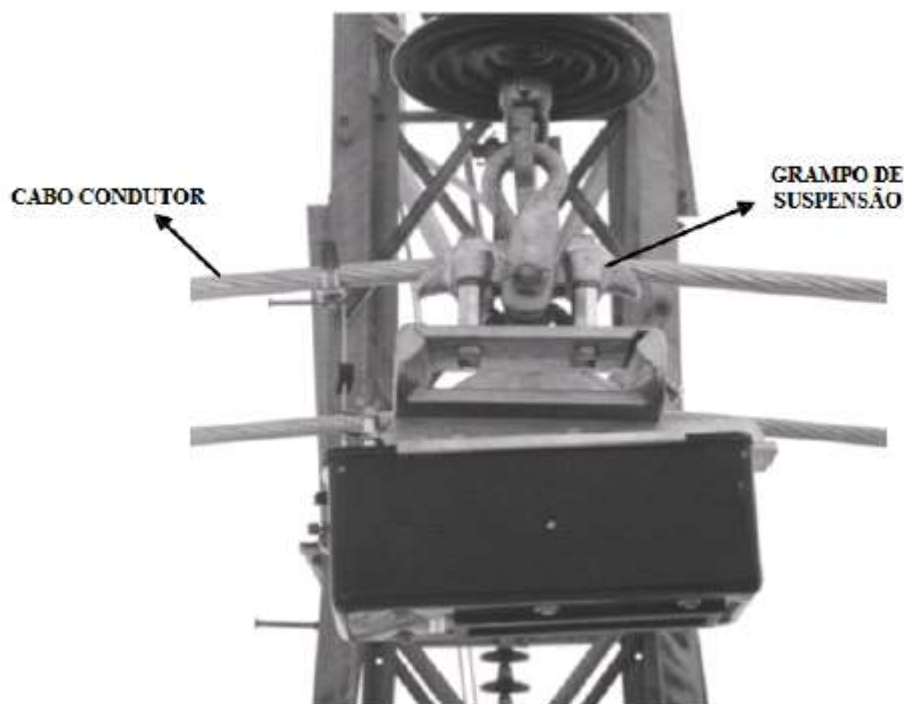


Figura 3-1 - Montagem cabo-grampo de suspensão na torre (FADEL, 2010)

Segundo FADEL (2010), mesmo com ventos amenos, se a frequência de oscilação for igual a frequência natural do condutor, haverá uma crescente absorção de energia do movimento de oscilação e devido a esse fato haverá também um aumento da amplitude de vibração. E se essa excitação não for amortecida pode chegar a níveis críticos, levando ao colapso do condutor, podendo causar grandes danos, gerando um grande impacto financeiro e prejuízos na estrutura.

Além da vibração eólica o cabo também está sujeito a dois tipos de movimentos, a oscilação de sub-vão e galope do condutor, esses tipos de movimento possuem diferentes efeitos sobre os condutores e os dispositivos, como grampos de suspensão, espaçadores entre outros presentes nas linhas de transmissão.

3.2 Mecanismo de Falha por Fadiga em Cabos Condutores de Energia

Os pontos mais propensos a ocorrência de falha por fadiga são aonde há restrição de movimento vibratório do condutor, sendo esses, grampos, espaçadores, braçadeiras entre outros. Essa restrição de movimento, faz com que os fios que constituem o cabo escorreguem entre si causando *fretting* no contato fio com fio. Nos processos de falha por fadiga dos fios constituintes dos cabos condutores ocorre dois fenômenos de falha, 1) desgaste abrasivo do material, 2) fratura devido a presença da moessa que induz a concentração de tensão, agravando assim o processo de *fretting*, pela presença do concentrador de tensão. Nesse trabalho o foco é na influência da presença de marcas de amassamento devido ao contato de fio a fio no cabo condutor.

- **Montagem cabo-grampo**

Nesse tipo de montagem ocorre o contato entre as superfícies de fio com fio, e a superfície do fio com o grampo de suspensão. Superfícies em contato no condutor, são pressionadas umas contra as outras em razão do tipo de montagem entrelaçada dos fios, ocorre uma força que imprensas um fio contra o outro, devido aperto do cabo no grampo de suspensão no processo de fixação, esses apertos causam marcas, moessas, nas superfícies dos fios, sendo um concentrador de tensão e favorecendo a diminuição da resistência do fio e favorecendo a nucleação de trincas e a provável falha do componente.

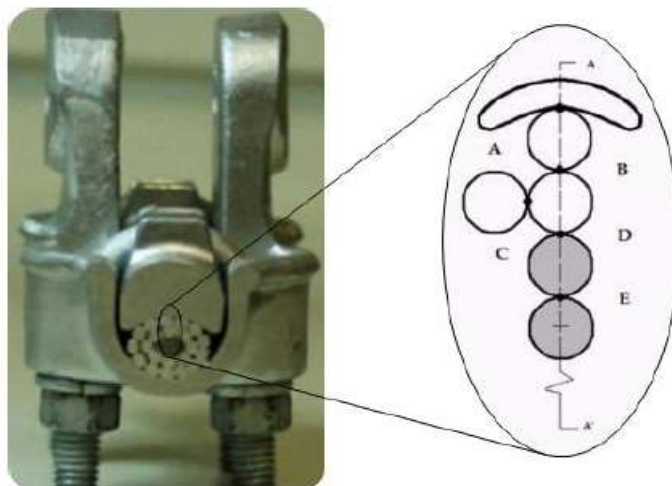


Figura 3-2 - Montagem cabo-grampo de suspensão, com detalhamento para superfície de contato entre os fios (GOMES, 2015)

Na Figura 3-3 (abaixo), mostra em detalhes a presença dessas marcas nos fios do cabo, devido ao encruamento da liga de alumínio no contato entre os fios, importante frisar que a forma dessas marcas vai depender muito do tipo de material em contato, a forma construtiva do cabo e a carga de contato entre eles.

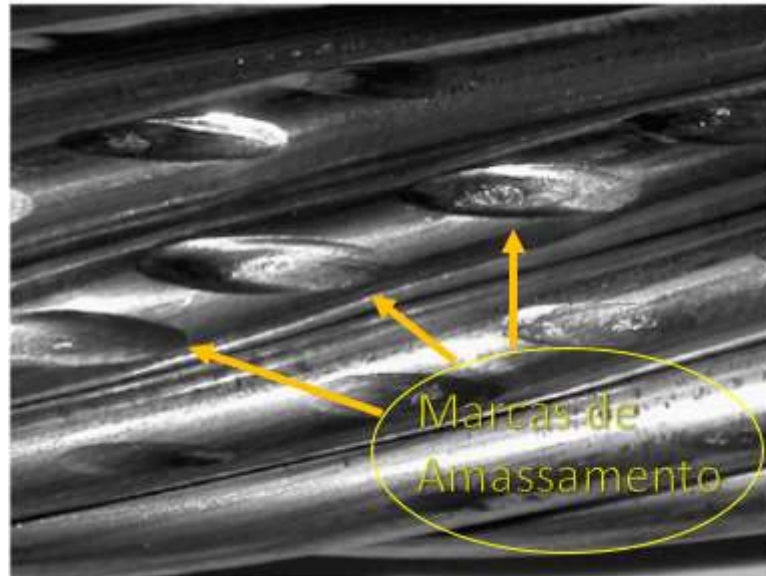


Figura 3-3 - Presença de mossas nos fios de cabos condutores
(modificado: AZEVEDO, 2009)

O que torna a análise do processo de fadiga em condutores muito complexa, é devido a presença de vibrações eólicas, esses modos de falha acabam agindo simultaneamente, fazendo com que, dependendo da variável, a carga de aperto ou vibração do condutor ou tipo de liga utilizado, um dos modos de falha pode ser mais expressivo do que outros, e por isso é interessante isolar o estudo de cada modo de falha e obter seus efeitos sobre o processo de fadiga no cabo condutor.

Outro parâmetro importante é a carga de estiramento do cabo que tem influência direta na forma das mossas no cabo. Segundo Bellorio (2009), sob maiores cargas de estiramento as cargas de contato fio a fio e fio e grampo serão diferentes, mudando o comportamento do desgaste no ponto de contato, assim o fio de liga de alumínio que sofre esmagamento gerando entalhes, serão cada vez maiores e mais profundos quanto maior for a carga de estiramento, assim as tensões irão aumentar muito com o desgaste e o concentrador de tensão, e vai evoluir de maneira não linear com a EDS.

4 METODOLOGIA

Esse capítulo aborda a metodologia experimental adotada para verificar o efeito da presença de concentradores de tensão nos fios de cabos condutores de energia. A liga analisada será a AA6201 T81 utilizada na composição dos cabos condutores. Será descrito detalhadamente os procedimentos para avaliar a influência das mossas na vida em fadiga dos fios. Analisando desde o ensaio monotônico, para o estiramento do fio após ser separado do cabo, como também o procedimento no qual é induzida a moessa (deformação plástica na superfície), e o ensaio final de fadiga. Adicionalmente, são descritos os equipamentos utilizados para realizar os ensaios.

4.1 Critérios de seleção das amostras

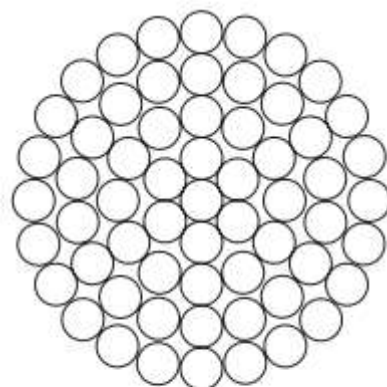
Para a fabricação dos corpos de prova foi utilizado o cabo CAL 1055 da fabricante NEXANS, obtidos no laboratório de cabos da Universidade de Brasília, desses cabos foram fabricados os corpos de prova que serão utilizados para o ensaio de fadiga.

- **Condutor de Alumínio liga (CAL 1055):** Os condutores (CAL) de alumínio liga são encordoados de maneira concêntrica e compostos de fios de alumínio liga 6201 T81. Foram desenvolvidos para aplicação onde os condutores de alumínio puro não atendiam com uma resistência mecânica aceitável para projeto, e reduzir os custos com condutores com alma de aço. O condutor CAL 1055 possui 30,06 mm de diâmetro nominal, construído com 61 fios de alumínio de 3,340 mm de diâmetro, cada fio, resultando em uma área nominal de 534,46 mm². A massa linear do condutor é 1461 kg/km e com carga de ruptura de 15549 kgf (NEXANS, 2013).

Na Tabela 1 abaixo, estão indicadas as características do cabo condutor utilizado na metodologia experimental.

Tabela 1 - Propriedades do cabo utilizado para produção dos corpos de prova (modificado: NEXANS, 2013)

Condutor	Bitola (mcm)	Área Nominal Alumínio (mm ²)	Área Nominal Aço (mm ²)	Fios Alumínio (mm)	Fios Aço (mm)	Diâmetro Nominal Cabo (mm)	Massa Linear (kg/km)	Carga Ruptura (kgf)
CAL 1055	1055,0	534,46	-	61x3,340	-	30,06	1461	15549



61
CAL 1055

Figura 4-1 Forma construtiva do cabo (modificado: ALUBAR, 2010)

Para a fabricação dos corpos de prova, desconsiderou-se a 1ª camada do cabo condutor (camada mais externa), pois nela possuíam defeitos superficiais que poderiam influenciar no resultado dos ensaios, defeitos esses que aparecem devido ao enrolamento do cabo na bobina, o transporte e etc. Logo para produção dos CP's para o CAL 1055 considerou-se a 2ª, 3ª, 4ª e 5ª camada (da camada mais externa para a camada mais interna).

A liga de alumínio AA 6201 T81, é uma liga que possui magnésio e silício como principais elementos de liga, esses elementos formam um intermetálico Mg_2Si antes de atingir o equilíbrio no “superenvelhecimento”. Apesar de não possuir grande condutividade, comparada com outras ligas como a AA 1350 H19, por exemplo, possui uma resistência mecânica, abrasiva e à corrosão superior. A liga AA6201 ainda sofre um tratamento de solubilização, trabalho a frio e envelhecimento artificial o que lhe confere a classificação T81 (ALMEIDA *et al*, 2013).

A Tabela 2 abaixo, indica as principais características dessas ligas.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas básicas da liga AA6201-T81 (ALMEIDA *et al*, 2013).

Liga de Al	Módulo de Young [GPa]	Limite de Resistência			Dureza [HBn]	Alongamento na Quebra [%]
		Tração, σ_{rt} [MPa]	Escoamento, σ_y [MPa]	Fadiga, σ_e [MPa]		
AA 6201-T81	69,0	330	310	105	88	6,0

4.2 Microscópio Confocal

As imagens geradas pelo ensaio de compressão dos fios e a análise das dimensões das mossas foram analisadas em um microscópio Confocal Olympus LEXT OST 4100. Esse microscópio possui um feixe de laser com comprimento de onda de 405 nm, e uma resolução máxima em um plano definido xy de 0,12 μm . Assim é possível gerar imagens com escala de cor, possibilitando um aumento de até 17800x e podendo gerar imagens 3D.

Importante frisar que o equipamento possui um software que possibilita medir as dimensões (largura, altura e profundidade) das marcas gerada nos fios a partir da imagem obtida, o que é de extrema relevância para o procedimento experimental.

4.3 Ensaio para estiramento dos fios

Para realização desse ensaio de indução da mossa, e posteriormente para o ensaio de fadiga, será utilizada a máquina universal de ensaios MTS, localizada no laboratório de ensaio de materiais da Universidade de Brasília no prédio SG-9.

O primeiro passo é composto na retirada de uma amostra do cabo citado na seção 4.1. A amostra obtida é da fabricante NEXANS, e é importante frisar que a obtenção das amostras foi através de cabos novos. Depois foi necessário separar e cortar os fios de cada camada do cabo e identifica-los separadamente em lotes com a identificação da liga e a camada no qual o fio compunha o cabo. Lembrando que a primeira camada, ou a camada mais externa do cabo foi desprezada, tendo em vista que os fios dessa camada não possuíam uma qualidade superficial adequada para os ensaios posteriores, por possuir algumas falhas superficiais. Tais falhas podem ser cruciais no resultado do ensaio, sendo capaz influenciar na confiança dos dados obtidos, essas pequenas falhas na camada externa ocorrem devido ao transporte e o enrolamento do cabo na bobina, causando um desgaste dos fios dessa camada.



Figura 4-2- Lote de fios cortados e separados do cabo

Depois de cortados os fios foram posicionados na máquina de ensaios universal para o seu devido estiramento e preparação da amostra. Então prende-se nos mordentes as pontas do fio, e inicia-se o ensaio monotônico para esticar as amostras. Os parâmetros utilizados no ensaio foi um deslocamento de 2 mm/min e um *interlock* para carga máxima de 2650N.



a)

b)

Figura 4-3 a) Disposição do fio na máquina antes do estiramento; b) Pós estiramento

Para a liga 6201 como dito anteriormente, a carga máxima utilizada para esticar o fio foi de 2650 N (300 MPa). Neste caso se uma carga maior for aplicada o fio pode chegar a ruptura, gerar alguns defeitos, ou mudanças nas características da liga, dessa forma influenciar diretamente nos resultados posteriores.

A Figura 4-4 ilustra o lote de fios esticados, é possível perceber que o comprimento do fio diminuiu, isso ocorre, pois, após esticar é necessário que se corte as pontas que ficam presas no mordente. No entanto é importante que no momento de cortar os fios, após separar as camadas do cabo, realiza-lo em um comprimento maior visando desprezar os pedaços deste que serão presos no mordente durante o ensaio de estiramento.



Figura 4-4 - Lote de fios esticados.

Após esse ensaio foram feitas três medidas do diâmetro dos fios estirados, com um paquímetro digital com precisão de 0,01mm.

4.4 Ensaio de tração

Depois de estirados foi possível realizar um ensaio de tração, para isso foram necessários dois CP's sem marca para então serem cortados com comprimento útil de 100 mm, medidos com paquímetro, e colocados para ensaio em tração até a ruptura.

Os CP's colocados para ensaio em tração pertenciam a 3º camada do cabo. Esse ensaio é de extrema importância pois nele podemos observar o local de ruptura. Se a ruptura ocorreu próxima ao mordente, ou se algum micro defeito, devido ao encordoamento do cabo, fez com que o CP falhasse em um ponto longínquo ao mordente. E podemos obter informações importantes, como seu limite de resistência à tração [MPa] e o limite de proporcionalidade, onde Lei de Hooke só vale até um determinado valor de tensão, e a partir desse limite a deformação deixa de ser proporcional a carga aplicada. O modo de falha AA 6201 T81 está ilustrado na Figura 4-5 abaixo:



Figura 4-5 -Modo de falha da liga AA 6201 T81 após ensaio de tração.

Para o ensaio de tração foram adotadas velocidades de estiramento de 2mm/min no qual o ensaio é finalizado quando o corpo de prova rompe totalmente.

A partir desse ensaio foi gerado uma curva força x deslocamento, e a partir dessa curva nós podemos obter o limite de resistência à tração e o limite de proporcionalidade. A partir das equações abaixo é possível encontrar os parâmetros, de tensão e deformação, que não são fiáveis para esse ensaio.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (22)$$

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (23)$$

No qual Δl é a variação do comprimento do fio e l_0 é o comprimento inicial do fio, F é a força aplicada ao material e A_0 é a área do corpo de prova. Assim, conseguimos achar os dados de tensão (equação (23)), e a deformação (equação (22)), vale ressaltar que através desse ensaio de tração se pode aferir com confiança apenas a força no escoamento e a força relacionada ao limite de resistência à tração, e através dessas medidas aproximar a tensão de escoamento e a tensão de resistência à tração.

4.5 Ensaio de indução das mossas

Visando realizar marcas semelhantes às que se formam nos fios quando estão presos no grampo de suspensão. Foi realizado um ensaio de compressão de um fio contra o outro, angulados em 30° entre si. Esses fios foram presos no suporte ilustrado na Figura 4-6, e sofreram uma compressão de 2kN e 2,5kN, gerando assim duas marcas distintas que serão avaliadas nesse projeto.

Para a realização do ensaio de indução das mossas, foi também utilizado a máquina de ensaios universal do laboratório de ensaios de materiais da Universidade de Brasília, para isso foram utilizados dois “pratos” como suporte para os fios, ilustrado na Figura 4-6 abaixo.

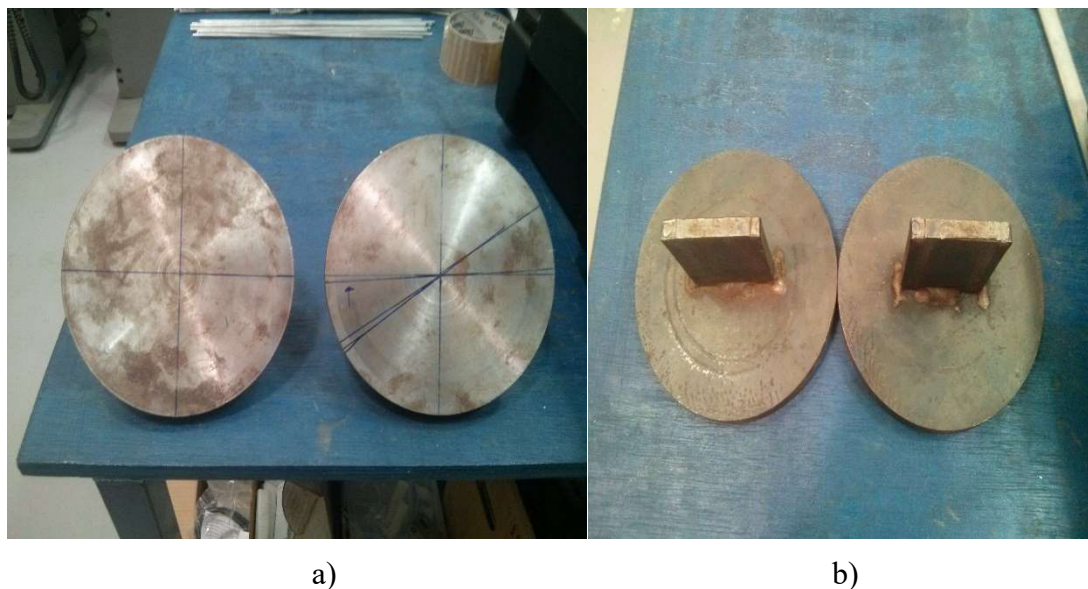


Figura 4-6 - Suporte para os fios para o ensaio de compressão para produção das mossas.

Esses suportes são presos ao mordente onde os fios serão posicionados: um no “prato” preso ao mordente superior e outro no “prato” preso no mordente inferior. É importante se atentar no o paralelismo entre as faces do suporte, que foi verificado com um nível. Os fios foram dispostos em uma angulação de 30°, como mostra a marcação na Figura 4-6 (a), como cada cabo é encordoado com uma angulação diferente, foi escolhido um ângulo de aproximadamente 30°. Esta escolha foi feita pois alguns ensaios já foram realizados com essa

angulação como o de ANICÉZIO (2016), para que a massa ficasse com o formato das marcas do contato fio a fio no grampo de suspensão.



Figura 4-7 - Marcação de alinhamento dos "pratos".

A Figura 4-7 ilustra a marcação para alinhamento dos pratos, é importante se atentar para esse fato, para que a referência coincida com a debaixo e assim o ângulo da massa seja feito de maneira correta. Pois ao prender o prato no mordente superior e o outro prato no mordente inferior, a única referência para prender os fios de maneira correta, são as marcações na Figura 4-6 (a). Após fazer o alinhamento e prender o “prato” (com a marcação de ângulo) no mordente superior, e o “prato” (com a marcação de 90°) no mordente inferior, foram presos um par de fios, um no suporte superior, seguindo a marcação do ângulo de 30°, e outro no suporte inferior, seguindo a marcação da linha reta transversal ao prato, e a disposição dos fios ficaram conforme a Figura 4-8 abaixo:



Figura 4-8 - Disposição dos fios presos no suporte para ensaio de indução das mossas.

Após essa etapa, o atuador (que no caso dessa máquina fica na parte superior) com muito cuidado é posicionado, descendo de maneira gradativa, até os dois fios se tocarem em um ponto. Então o ensaio foi programado para descer a uma taxa de 0.5 mm/min, e para aplicar uma força de 2000 N e 2500 N, ou seja, o atuador vai descendo a uma taxa de 0.5 mm/min e à medida que ele desce vai encontrando uma resistência e aumentando gradativamente a força para manter a taxa de deslocamento, e então quando atinge as cargas de compressão de 2000 N e 2500 N. O ensaio para e então pode-se observar as mossas realizadas nos fios.

Foi definido na metodologia que se usaria cargas constantes para manter mossas uniformes. Portanto o estudo será realizado com mossas induzidas por cargas de 2 kN e 2,5 kN na liga AA6201 T81.

Como no grampo de suspensão o torque de aperto de 50 N.m é aplicado no cabo. Então foi definido estudar com mossas realizadas com carga de 2 kN e 2,5 kN e assim verificar o quanto cada mocha influência na vida em fadiga do fio, essa carga foi definida levando em conta o trabalho de GASPERAZZO & ITO (2016), que mostra que uma marca aproximada ao que se vê em um cabo no grampo de suspensão é de 2400N, e que a marca mais significativa na liga 6201 T81 é de 2000N então foi escolhido as cargas de 2000N e 2500N, estando dentro da faixa de estudo para esse caso.



Figura 4-9 - Estágio final do ensaio de compressão para produção das mossas.

As mossas geradas, aparentemente, não são tão diferentes a “olho nú”, é possível ver que a mossa gerada por 2,5 kN, como o esperado, é maior que a mossa gerada por pressão de 2 kN mas a diferença não é tão grande a “olho nú”. Portanto foram realizadas medidas dos comprimentos da mossa, além de uma melhor caracterização da superfície da mossa, no Microscópio Confocal para poder quantificar a diferença das dimensões entre essas mossas, esses dados serão tratados no próximo capítulo. Na Figura 4-10 abaixo podemos observar essas mossas gerada no fio, como a liga AA6201 T81 é uma liga mais dura, mesmo aplicando uma carga consideravelmente alta como 2,5 kN, as mossas são bem sucintas e pequenas devido a dureza da liga.

Na Figura 4-11 é possível observar a fotografia aproximada das mossas, ficando assim mais perceptível visualizar, o tamanho e a diferença de dimensão das mossas geradas com as diferentes cargas aplicadas.

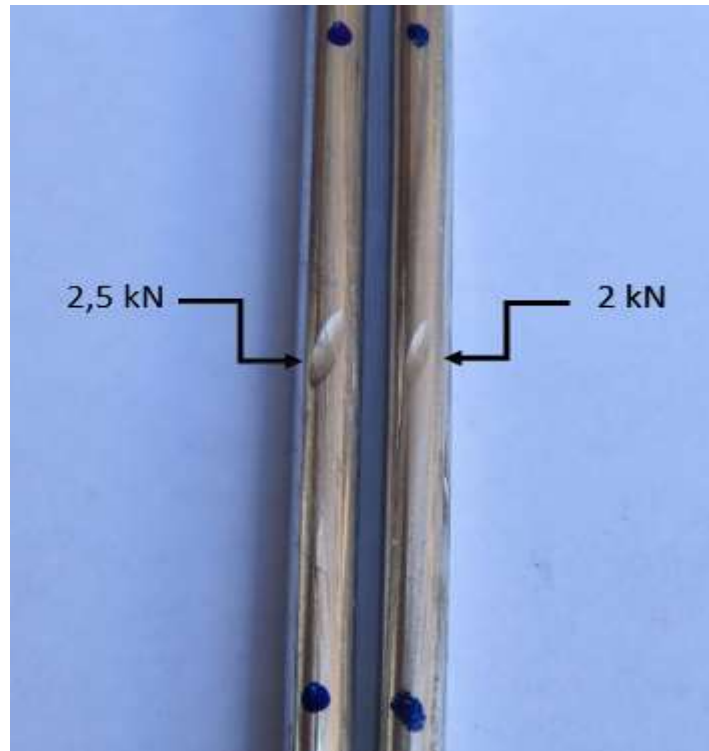


Figura 4-10 - Mossas realizadas após ensaio de indução.

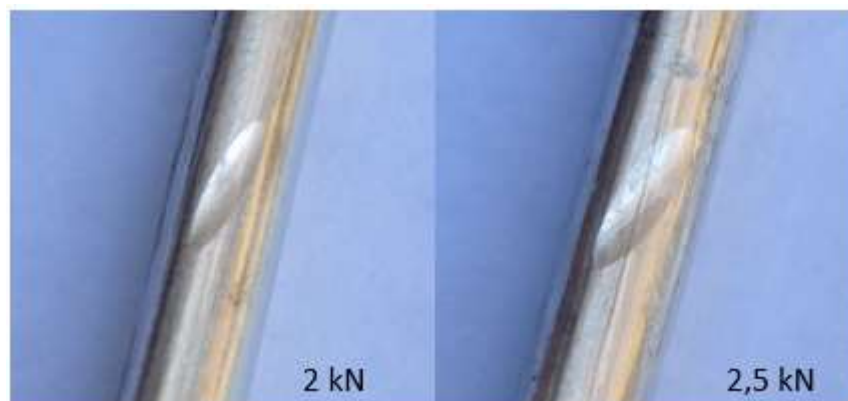


Figura 4-11- Imagem aproximada das mossas.

As curvas geradas no ensaio de compressão dos fios estão ilustradas abaixo:

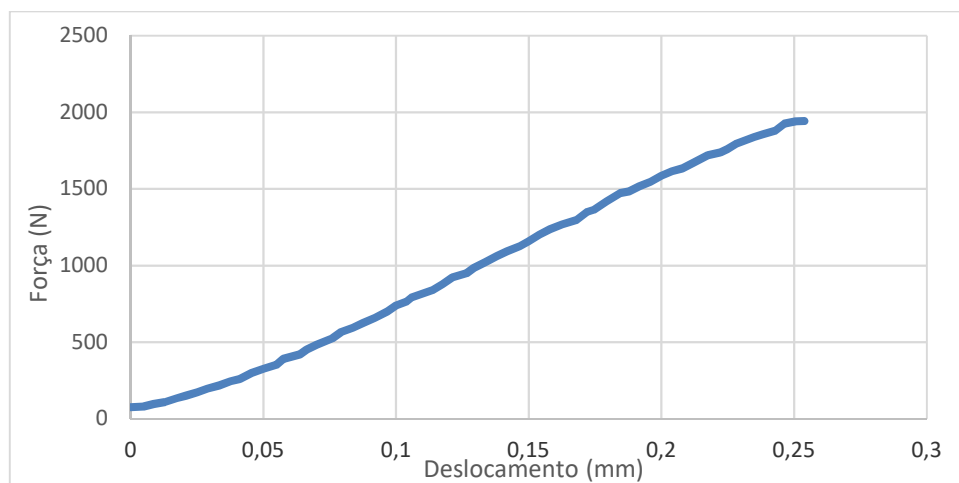


Figura 4-12 - Curva Força x Deslocamento do ensaio de indução das mossas de 2kN.

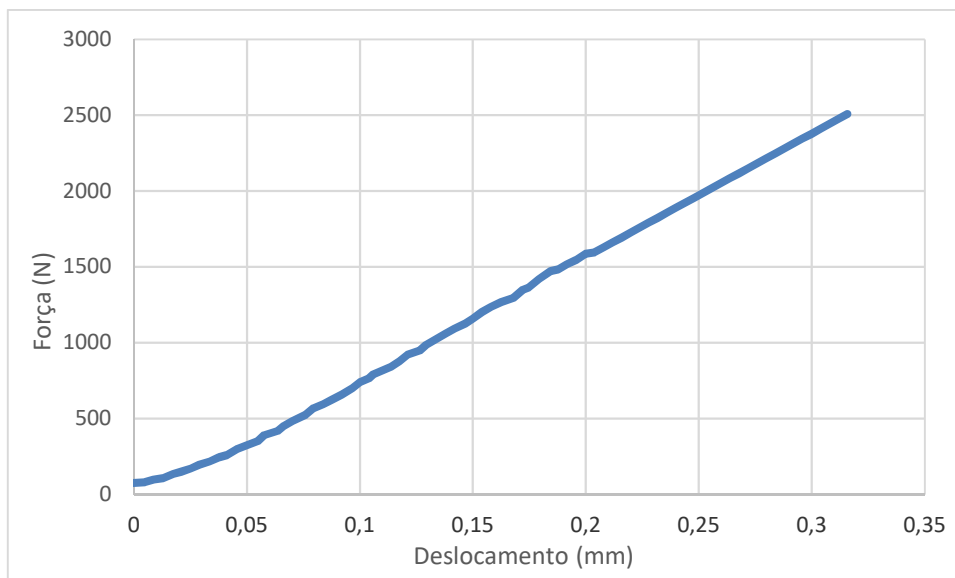


Figura 4-13 - Curva Força x Deslocamento do ensaio de indução das molas de 2,5kN

4.6 Ensaio de fadiga

Depois de realizada as essas etapas, foi então realizado o ensaio de fadiga nos fios com a marca da mossa gerada por uma carga de compressão de 2 e 2,5 kN. Primeiramente, foram fabricados 20 corpos de prova para 2 kN e 20 corpos de prova para 2,5 kN. Logo, como não se sabe o comportamento desses fios com a presença das marcas, foi necessário realizar ensaios exploratórios para que se defina o nível de tensão, a frequência de ensaio, e também a carga de aperto do mordente adequados. São quesitos muito importantes para a realização, desses ensaios, pois como a marca gerada pela compressão no ponto de contato dos dois fios é muito sucinta, e como o corpo de prova não é usinado prevendo uma redução de seção, a quebra ocorre muitas vezes no mordente, indicando que a mossa não teve influência na vida à fadiga. Por isso foram utilizados vários ensaios exploratórios para conseguir obter os melhores parâmetros para o ensaio, e assim obter o número de ciclos que esses fios resistem à presença da mossa (deformação plástica superficial).

Os parâmetros para o ensaio foram de 2 MPa de pressão nos mordentes, evitando assim que o fio escorregue, a frequência da máquina utilizada foi entre 10 a 15 Hz.

A máquina utilizada não era específica para ensaio em fios. Logo, para fazer o alinhamento do corpo de prova foi utilizado dois limitadores em “L”, para que o corpo de prova ficasse alinhado como mostra a Figura 4-14 e Figura 4-15 abaixo:

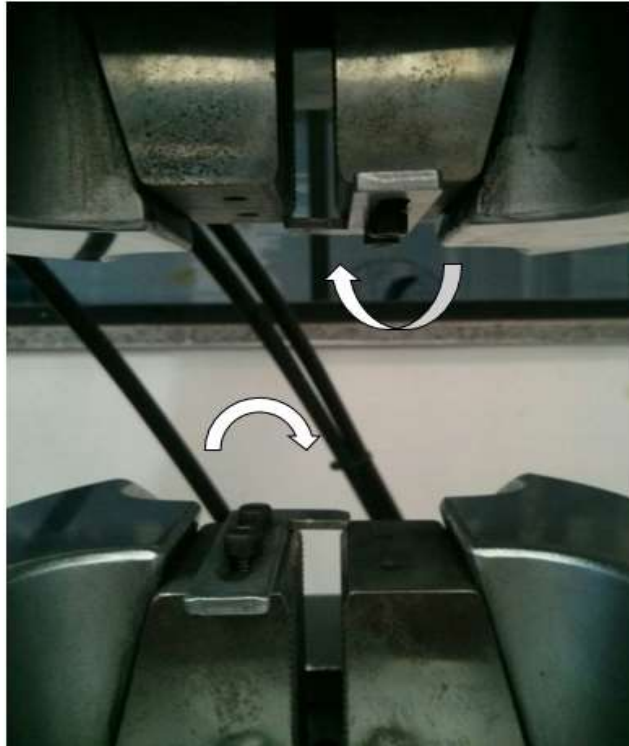


Figura 4-14 - Limitadores para manter o alinhamento do CP no ensaio.



Figura 4-15 - Limitador inferior no detalhe

Os ensaios foram realizados em $R = -1$, primeiramente foi colocado uma tensão de 180 MPa, a partir da mesma carga utilizada para ensaio de fadiga em fios sem marca pelo doutorando da Universidade de Brasília Jesús Mauricio González Martínez.

Sendo o diâmetro do fio igual a 3,34 mm, pode-se obter a área do fio a partir da equação (23), que é igual a 8,76 mm² e assim obter a força de 1577 N, fazendo-se a maior carga aplicada no fio em tração e compressão. E então, a partir dessa primeira carga com a quebra do fio na marca foi-se abaixando o nível de carga e obtendo a curva em fadiga do fio com as respectivas massas de 2 e 2,5 kN.

Importante frisar que tomados os devidos cuidados no experimento contra a flambagem, primeiro foi realizado o cálculo de flambagem utilizando Euler, e a carga de flambagem para o fio foi de 10,4kN, tensão de (1187MPa). Como Euler não é a forma mais adequada de cálculo para flambagem e alumínio, como o obtido em Euler foi muito superior a carga aplicada, e como não há referência de como calcular flambagem para a liga 6201, esta foi verificada através do gráfico que a própria máquina de ensaios gera. E a partir dele podemos conferir que não houve flambagem durante o ensaio.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste Capítulo será abordado os resultados obtidos através dos ensaios de tração, e dos ensaios de fadiga realizados com os corpos de prova da liga AA6201 T81 com a marca da mocha gerada através do ensaio de indução da mesma, já mostrado no capítulo anterior. Além disso, também será apresentado as dimensões das mochas, para que assim possamos ter uma maior noção do tamanho do defeito, não só abordando em carga de compressão, mas em área e profundidade das mochas estudadas.

Primeiramente foi realizado um ensaio de tração em um fio sem marca, para quantificar se algum micro defeito influenciava na diminuição da resistência do fio. Esse ensaio é importante pois o cabo utilizado para produzir os CP's, apesar de ser novo, o transporte, o enrolamento do cabo na bobina e o encordoamento do cabo já geram pequenos defeitos superficiais no fio, e pode vir a gerar alguma redução na resistência do mesmo. Portanto, foi gerado um gráfico de Força x Deslocamento, e assim obter alguns dados importantes para a pesquisa.

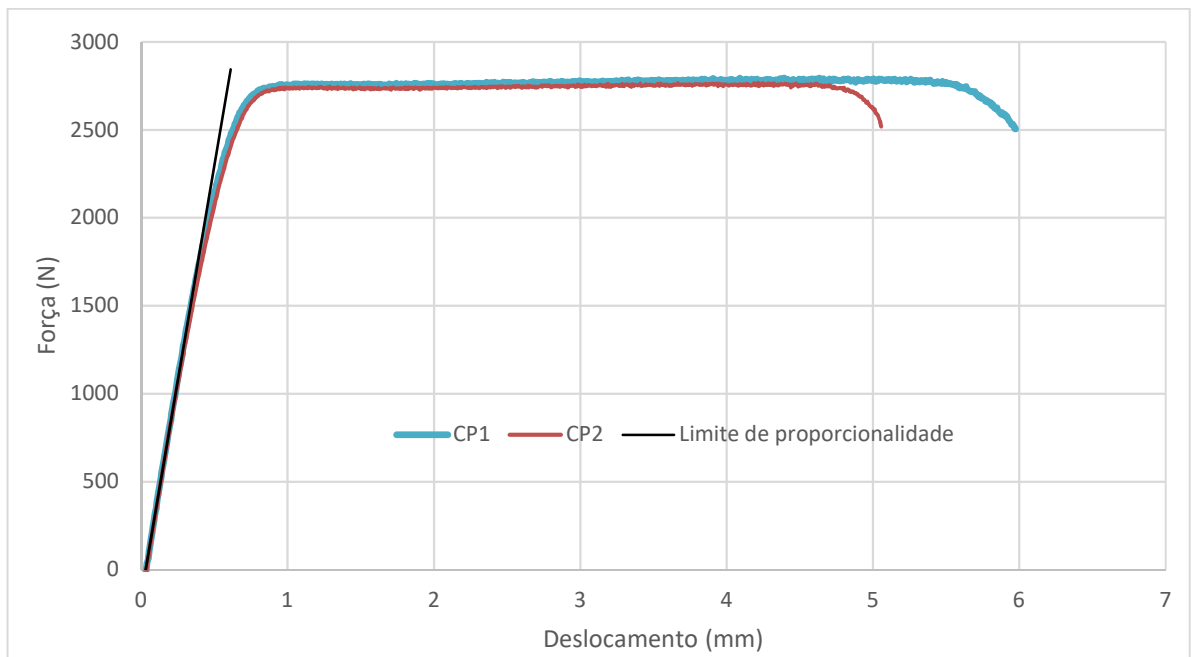


Figura 5-1 - Diagrama Força x Deslocamento para a liga AA6201 T81

A partir dos gráficos obteve-se os seguintes resultados apresentados na Tabela 3 (abaixo), que nos apresenta o limite de resistência a tração da liga, dado pela literatura, e o limite de resistência a tração, do ensaio de tração realizado no laboratório de ensaio de materiais da Universidade de Brasília.

Tabela 3 - Comparativo entre os resultados de limite de resistência entre os ensaios de tração e a literatura (ALMEIDA et al, 2013).

Ligas	Limite de Resistência (Literatura)	Limite de Resistência (Ensaio de Tração)			
	Tração [MPa]	CP	Tração [MPa]	CP	Tensão de proporcionalidade [MPa]
AA 6201 T81	330	1	319	1	236
		2	316	2	236

Pode-se observar que comparado com a literatura a tensão de resistência a tração da liga AA 6201 T81 teve uma redução em média de 3,7%. E a tensão limite de proporcionalidade, comparado com a tensão limite de escoamento da liga AA 6201 T81, é menor como esperado, considerando que a tensão limite de escoamento para essa liga é de 310 MPa (MATWEB, 2017). Como esse resultado depende muito da temperatura, anisotropia do material, condição de ensaio, e condição superficial do material, esses fatores podem ter influenciado nessa redução.

5.1 Caracterização das Mossas

As mossas avaliadas nesse projeto foram induzidas com uma carga de 2kN e 2,5kN, e uma angulação de aproximadamente 30° entre os fios. Essa angulação faz com que no ponto de contato, as marcas geradas sejam no formato de elipse, assim como acontece no cabo quando submetido a carga de pressão no grampo de suspensão.

Antes de cada ensaio foi realizado a caracterização das mossas no Microscópio Confocal, para obter as dimensões de cada mossa (profundidade, comprimento e largura). É importante realizar essa caracterização para obter um maior conhecimento da mossa estudada, e como esse projeto é um estudo exploratório, são dados importantes para realização de projetos posteriores.

Então a caracterização de cada mossa obtida é mostrada nas Figura 5-2 e Figura 5-3 abaixo.

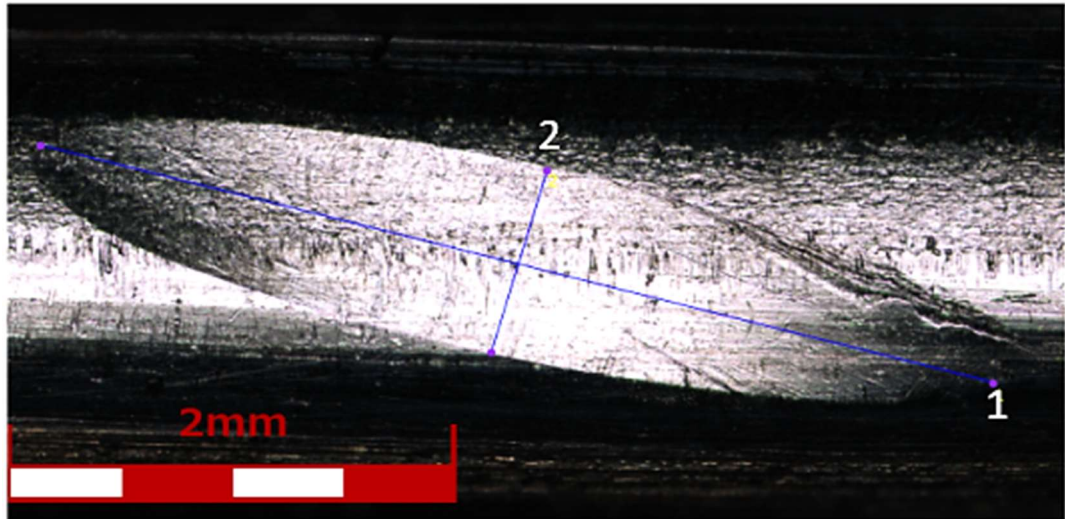


Figura 5-2 - Caracterização do CP2 com marca de 2kN.

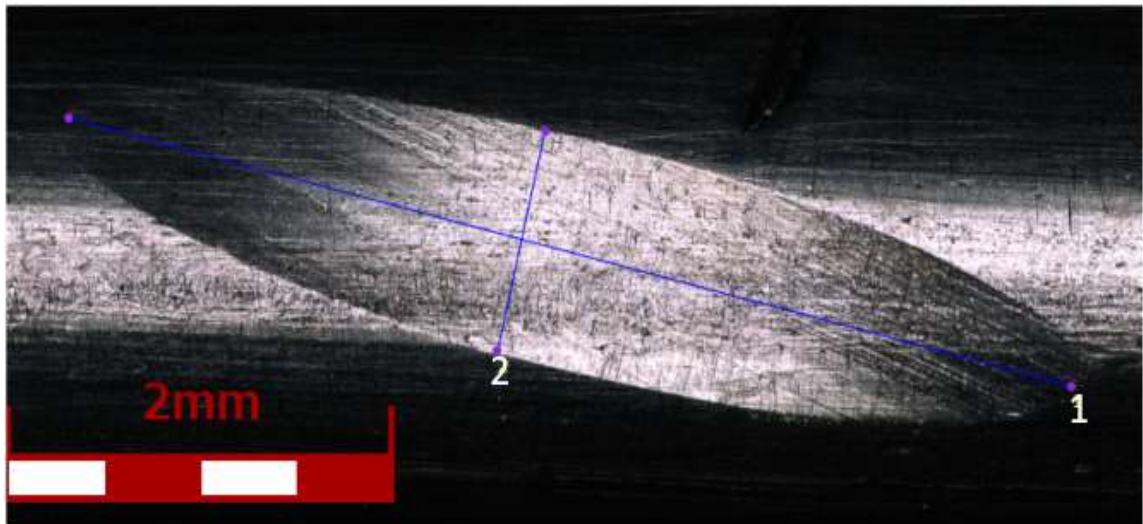


Figura 5-3 - Caracterização do CP8 com marca de 2,5kN.

É importante frisar que todas as imagens foram geradas com uma ampliação de 10x, as demais imagens dos outros CP's se encontram em anexo neste documento.

Como podemos observar na Figura 5-2 e Figura 5-3 as marcações de 1 e 2 são as referências das marcações para comprimento e largura dos CP's, com 2 e 2,5kN.

As profundidades também foram obtidas através do microscópio, medição realizada através da ferramenta *Geometric* do software que controla o microscópio.

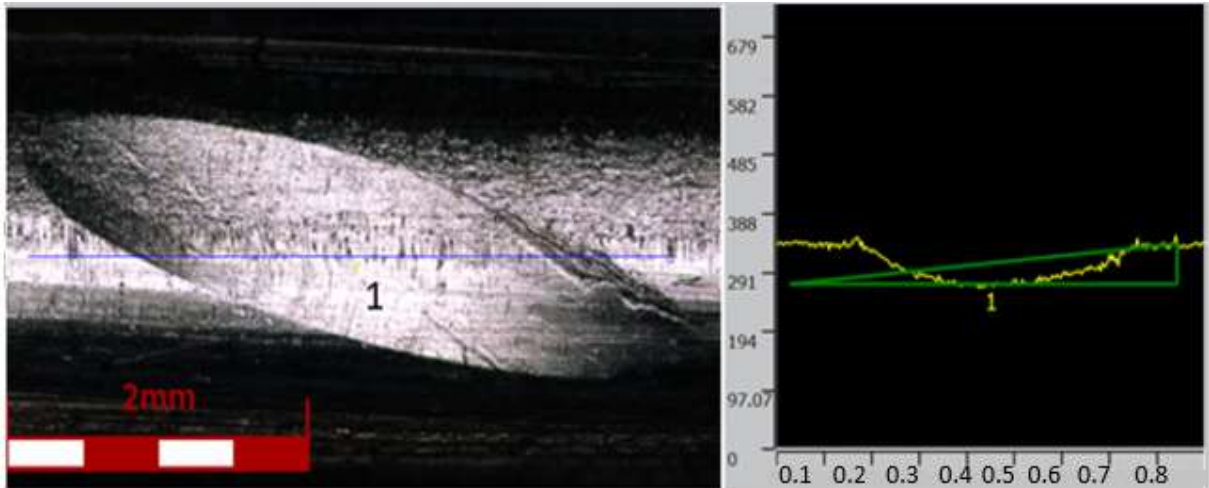


Figura 5-4 - Medição de profundidade da mossa do CP1 2kN.

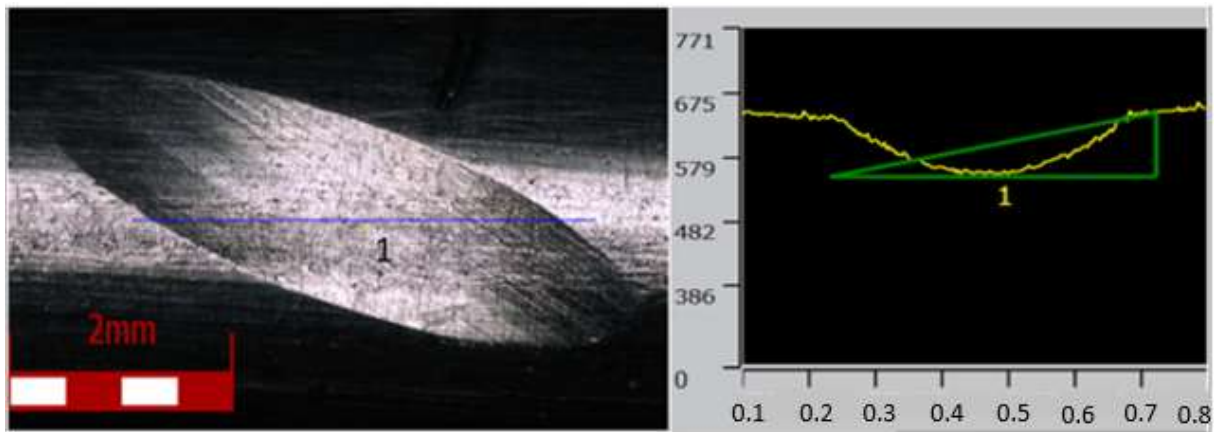


Figura 5-5 - Medição de profundidade da mossa do CP8 2,5kN.

Na Figura 5-4 e Figura 5-5 foi realizada a medição da profundidade da mossa. Sendo feitas através da varredura da mossa, e na seção mais profunda (geralmente no meio da mossas), obtém-se a maior profundidade – como visto na imagem representada por um triângulo retângulo – No qual através dele obtemos o cateto que é a maior profundidade obtida da mossas. Os resultados obtidos da caracterização das mossas são dados na Tabela 4 e

Tabela 5 abaixo tomando como referência as marcações da Figura 5-2 e Figura 5-3 de 1 para comprimento e 2 para largura da marca.

Tabela 4 - Tabela de resultados das medidas das massas de 2kN.

CP	Comprimento (1) (μm)	Largura (2) (μm)	Altura ou profundidade (h) (μm)
1	4261	983	61,6
2	4406	896	66,5
3	4342	989	87,1
4	4233	977	56,7
5	4296	988	56,1
6	4237	1005	64,5
7	4126	1002	74,2
8	4203	988	69,0
9	4192	990	72,8
10	4226	1007	67,1
11	4295	991	67,1
12	4169	994	70,0
13	4184	964	63,9
14	3979	994	75,4
15	4068	980	67,3
16	4330	976	61,6
Média	4215,41	978,69	67,57
Desvio Padrão	123,21	31,17	7,62
C.V (%)	2,9	3,2	11,2

Tabela 5 - Tabela de resultado das medidas das massas de 2,5kN.

CP	Comprimento (1) (μm)	Largura (2) (μm)	Altura ou profundidade (h) (μm)
1	4876	1153	102,0
2	4786	1204	106,6
3	5139	1135	118,8
4	5089	1141	102,0
5	5176	1113	111,8
6	4844	1175	107,2
7	5233	1150	110,9
8	5337	1058	97,1
9	4923	1180	124,6
10	4828	1262	107,3
11	5106	1158	112,3
Média	5030,61	1157,3	109,15
Desvio Padrão	186,41	51,63	7,82
C.V (%)	3,7	4,4	7,2

Podemos observar pela Tabela 4 e

Tabela 5 que tanto para a marca de 2kN, quanto para a marca de 2,5kN o comprimento/largura segue um padrão médio de proporção de 4:1, ou seja, o comprimento é aproximadamente 4 vezes maior que a largura para os dois tipos de mossas. Nota-se também que há alguns CP's com algumas variações de comprimento e largura. Essas variações eram previstas, pois no ponto de contato de alguns CP's a liga deve ter aumentado a resistência devido ao seu encruamento no esticamento. O próprio erro da máquina durante o ensaio de indução das mossas, e o erro do operador na posição do corpo de prova no suporte também pode ter contribuído para essas variações. Contudo, as variações estão dentro do previsto e ainda seguem a proporção média de 4:1 de comprimento/largura.

5.2 Resultados dos Ensaio de Fadiga

Os ensaios em fadiga foram os últimos ensaios realizados para a conclusão do objetivo do trabalho, que é gerar uma curva S-N e observar os efeitos das mossas induzidas com uma carga de 2kN e 2,5kN. Foram realizados ensaios exploratórios para verificar o comportamento da liga com a marca, esses ensaios são importantes para o ajuste dos “parâmetros de ensaio”, como a pressão nos mordentes, a carga aplicada e a frequência de ensaio. Para todos os ensaios realizados em fadiga, os parâmetros que deram um melhor retorno de resultados – onde mais vezes o ensaio quebrou na marca – foram: pressão nos mordentes igual a 2 MPa, e uma frequência de 10 a 15Hz. É importante o conhecimento desses parâmetros para que os ensaios sejam uniformes, todos submetidos a mesma condição.

Na Figura 5-6 baixo podemos ver o modo de falha por fadiga da liga AA 6201 T81 com as marcas.

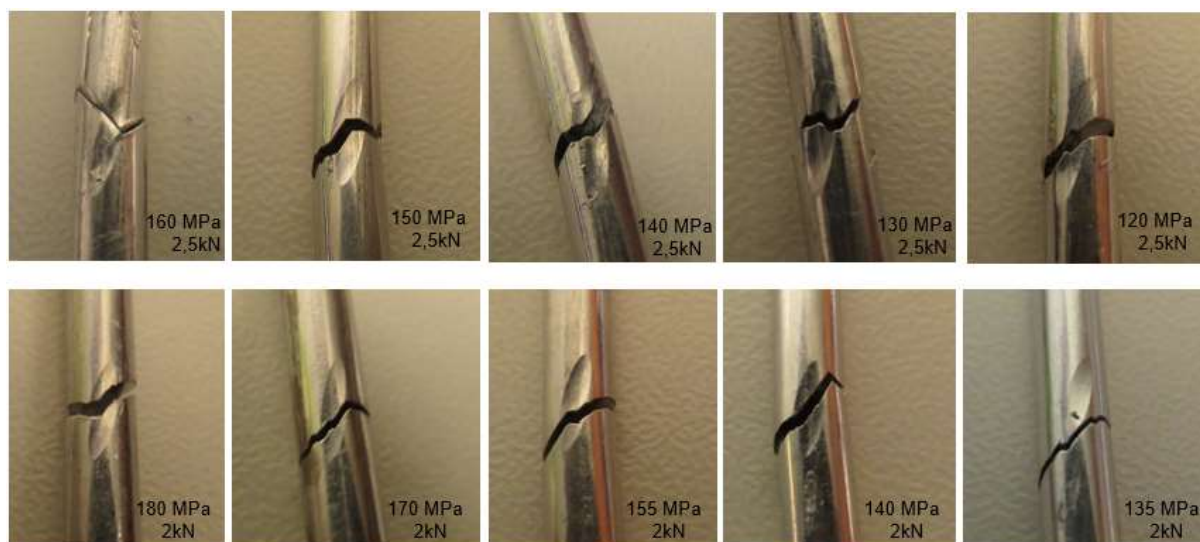


Figura 5-6 - Modos de falha de acordo com o nível de tensão

Na Figura 5-6, os modos de falha de acordo com a tensão aplicada e podemos verificar que há uma diferença de modo de quebra em relação ao nível de tensão aplicado. Esta diferença pode ser devido ao início rápido e propagação rápida da trinca em níveis de tensões maiores o

que faz ter uma quebra menos angulada comparada com uma tensão menos que a quebra é mais próxima dos 45°

A foto da região de falha foi obtida através de uma máquina fotográfica modelo Canon PowerShot SX60 HS Distância Focal 247.0 (T) mm (equivalente – filme de 35mm: 21 – 1365mm), utilizando o sistema macro a Figura 5-7 ilustra a região de falha por fadiga da liga AA6201 T81 com marca de 2,5kN.

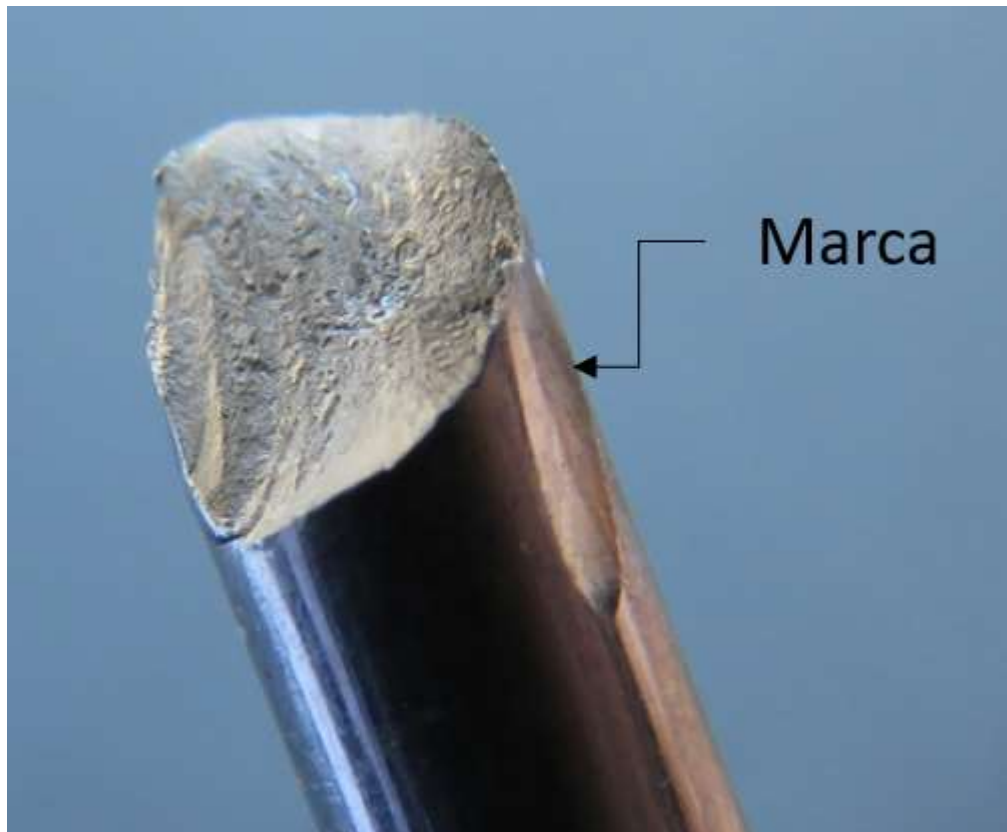


Figura 5-7 - Região de falha com marca de 2,5kN.

Uma das grandes preocupações desse projeto era justamente a quebra se realizar na marca, como eram defeitos superficiais e pequenos e como o corpo de prova não tinha redução de seção, muitas vezes a quebra acontecia no mordente indicando que a concentração de tensão no mordente ou próximo dele, acabava sendo maior do que a própria marca realizada no meio do corpo de prova. Diante disso, se fez necessário a realização de vários ensaios exploratórios. Depois de realizar os ensaios com os CP's com marca de 2kN e 2,5kN, foi possível gerar uma curva em fadiga com os resultados de tensão e número de ciclos obtidos.

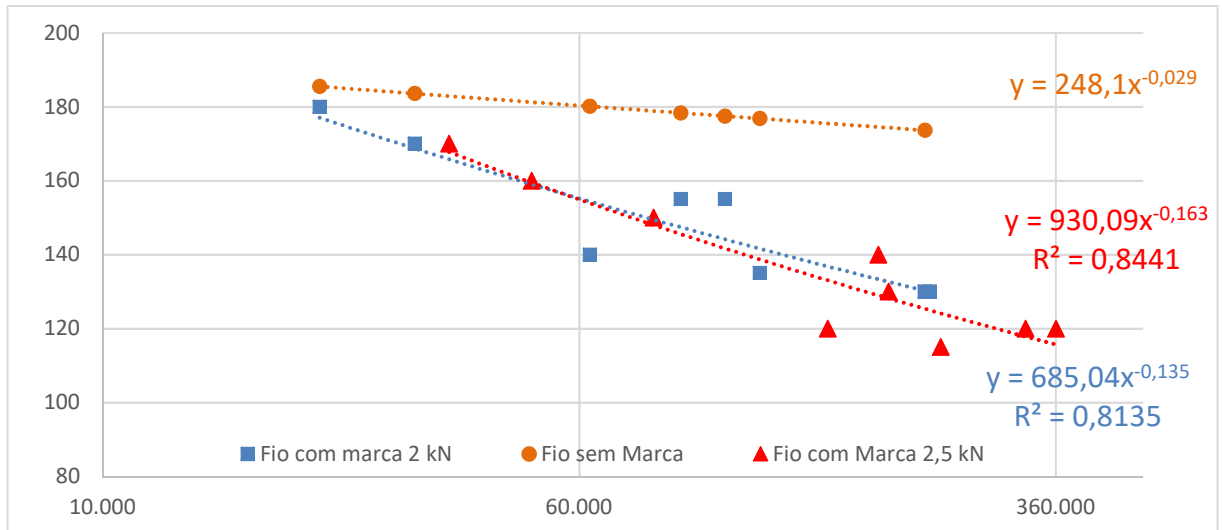


Figura 5-8 - Curva S-N obtida experimentalmente.

A Figura 5-8 ilustra a curva S-N obtida experimentalmente através dos ensaios em fadiga realizados com a liga AA 6201 T81 induzida com mossa de 2 kN e 2,5 kN. Os dados da função de resistência à fadiga de $R = -1$ para a liga estudada, sem a presença de mossa, foram cedidos pelo doutorando da Universidade de Brasília Jesús Mauricio González Martínez, realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos desta mesma universidade, as constantes para essa função obtidas foram $A = 248,1$ e $b = -0,029$.

Pode-se verificar que houve uma considerável redução de resistência à fadiga dos fios com marca em relação aos fios sem marca, observa-se também que essa redução é cada vez maior quanto mais aumenta o número de ciclos.

Houve uma dificuldade durante o processo experimental pois em tensões de 120 MPa ou inferiores, para a marca de 2kN, os corpos de prova não quebravam na marca apenas no mordente. Foram realizados 3 ensaios para essa tensão, e 2 para tensão de 110 MPa e todos eles quebraram no mordente, o que indica que para vidas maiores de $2,8 \cdot 10^5$ ciclos a concentração de tensão é mais evidente no mordente ou próximo dele, do que na marca induzida. Já para os corpos de prova com a marca de 2,5kN com tensões de 110 MPa ou inferiores, também não era possível obter resultados com quebra na marca. Para tensões iguais a 110 MPa ou inferiores a quebra ocorria no mordente, indicando que a concentração de tensão era maior no mordente ou próximo dele, do que na marca para ciclos maiores que $3,5 \cdot 10^5$. Para esses corpos de prova, foram realizados 4 ensaios com 110 MPa e todos quebraram no mordente.

Para os fios com marca de 2,5kN, foi possível obter resultados com uma tensão de 120 MPa, ou seja, foram realizados ensaios aplicando essa tensão e a quebra ocorreu na marca da mossa, o que não aconteceu com a marca de 2kN.

Pode-se observar também através da Figura 5-8 que os fios com marca de 2kN, e os fios com a marca de 2,5kN não tiveram diferença considerável de redução de resistência à fadiga nesse intervalo de vida obtido. Observa-se também que a linha vermelha tende a “descer” mais a medida que a vida aumenta, mas isso só poderia ser comprovado, caso fosse possível obter quebras na marca com números de ciclos maiores.

Portanto foi possível obter a curva S-N acima através de ensaios experimentais, e a função de resistência a fadiga para o fio com marca de 2 kN foi $A = 685,04$ e $b = -0,135$ e o fio com marca de 2,5 kN foi $A = 930,09$ e $b = -0,163$.

Importante frisar que a máquina utilizada para esses ensaios não é a ideal para ensaios em fios. A marca do mordente no fio da máquina utilizada no procedimento experimental, é bem maior que a marca do mordente no fio da máquina própria para ensaios em fios, com a mesma pressão aplicada. Conforme é possível observar no apêndice 7.1, a diferença dessas marcas é considerável, o que pode ter influenciado no momento de obter vidas maiores.

E utilizando uma pressão menor na máquina Landmark, onde a marca era maior, o fio escorregava na ponta do mordente, fazendo com que aumentasse a concentração de tensão, e influenciando ainda mais o fio a quebrar no mordente.

6 CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como objetivo verificar experimentalmente a influência da presença de moissas na vida à fadiga de fios de liga de alumínio AA 6201 T81. Essas moissas foram induzidas em um ensaio de compressão com uma carga de pressão no ponto de contato dos fios de 2kN e 2,5kN com uma angulação entre eles de aproximadamente 30°. A metodologia utilizada nesse trabalho foi puramente experimental, e foi dividida em ensaios de: 1) esticamento dos fios (após desencordado do cabo); 2) ensaio de tração para verificar se algum micro defeito influenciou na resistência do fio; 3) ensaio de indução das moissas e ensaio de fadiga.

No ensaio de tração, após o esticamento do fio, foi verificado que comparado a literatura, houve uma redução média de 3,7% da resistência a tração, considerado uma redução baixa. Esse resultado depende muito da temperatura, condição do ensaio, anisotropia do material entre outros aspectos, e durante o experimento verifica-se se o fio encontra-se em condição ideal para o prosseguimento da metodologia experimental. Os micro defeitos devido ao encordoamento do fio e o bobinamento do cabo não influenciou de maneira considerável na resistência do fio, e como esperado a ruptura para uma liga mais dura como a AA 6201 T81 se deu a 45°.

O ensaio de indução das moissas nos fios esticados foi realizado visando apenas duas cargas de compressão no ponto de contato entre os fios e uma angulação de 30° aproximadamente. Foi então caracterizada as moissas no microscópio CONFOCAL sendo possível observar a marca da moissa no formato de elipse e que mantinha uma relação média de comprimento/largura de aproximadamente 4:1. Essa relação foi observada tanto para as marcas induzidas por uma carga de 2kN quanto para as marcas induzidas por uma carga de 2,5kN. E também foi possível observar que as dimensões dessas marcas eram pequenas e bem superficiais. Sendo que para as marcas de 2kN foi verificado uma profundidade média de 67 μm e para as marcas de 2,5kN foi verificado uma profundidade média de 109 μm .

Por fim foi gerado a curva S-N através dos resultados obtidos pelo ensaio em fadiga dos fios com as devidas marcas, podendo assim verificar de maneira experimental a influência dessas moissas na resistência à fadiga do fio. Foi possível observar uma considerável redução de resistência à fadiga do fio sem marca comparando com os fios com marca. Também concluiu-se que para vidas maiores que $2,8 \cdot 10^5$ para fios com marca de 2kN, e para vidas maiores que $3,5 \cdot 10^5$ para fios com marca de 2,5kN, não foi possível obter resultados favoráveis, ou seja, ensaios onde a quebra ocorria na marca. Para essas vidas a quebra ocorria no mordente indicando que a concentração de tensão no mesmo era mais considerável que a moissa induzida no corpo de prova. Por fim observou-se que para esse intervalo de vida a redução de resistência a fadiga entre os fios com marca de 2kN e 2,5kN não eram relevantes.

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se:

- Verificar a influência da presença de moissa em outras ligas que compõem cabos condutores como a liga AA 1350 H19
- Utilizar o dispositivo de ensaio de fadiga por *fretting*, localizado no Prédio SG-9 no laboratório de ensaio de materiais, para induzir as moissas e realizar os ensaios em fadiga
- Caracterizar marcas já realizadas devido a carga de aperto no grampo de suspensão e tentar reproduzir em corpos de provas novos e verificar a influência.

- Realizar os ensaios em fadiga em uma máquina específica para ensaio em fios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA. J. L., et al. **Avaliação comparativa da resistência a fadiga de cabos CAA e CAL**, Grupo de estudos de linhas de transmissão – Seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica. Outubro, 2013.

ALUBAR. **Condutores elétricos de alumínio**. Brasil: 2010. 64 p.

ALVES. J.F; SOUZA. I.J.L.N. **Fadiga de cabos condutores de alumínio liga (CAL-900) para diferentes níveis de h/w**. Julho, 2016.

ANEEL. **Atlas de energia elétrica no Brasil** ed – Brasília, 2008. 236p

ANICÉZIO, T.M.F. **Desenvolvimento de Metodologia para Redução de Custos na Estimativa de Vida à Fadiga de Cabos Condutores de Energia - Relatório Parcial de Atividades: Desenvolvimento do Dispositivo de Fretting para Realização de Ensaio em Fios de Cabos Condutores**. Agosto, 2016.

AZEVEDO, C. R. F., et al. **Fretting fatigue in overhead conductors: rig design and failure analysis of a Grosbeak aluminium cable steel reinforced conductor**. ELSEVIER: Engineering failure analysis 2009; 9: 136-151.

BELLORIO, M. B. **Fadiga para cabos condutores de energia e uso de metodologia para estimativa de sua vida remanescente**. 2009. 102p. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF

CALLISTER, Jr., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 705 p.

CIGRÉ TF B2. 11.04. **Overhead conductor safe design tension with respect to aeolian vibration**, June 2005.

CIGRÉ TF B2. 11.07 **Fatigue Endurance Capability of Conductor/ Clamp Systems Update of Present Knowledge**, July 2007.

CIGRE TF 22.11.04, **Safe design tension with respect to aeolian vibrations: single unprotected conductors**, Electra No.186, Out. 1999.

DOWLING N. E. **Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue**. 3 ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2007. 936 p.

EPRI. **EPRI Transmission Line Reference Book: Wind-Induced Conductor Motion**. Palo Alto, CA: 2006. 1012317.

FADEL, A. A. **Avaliação do efeito de tracionamento em elevados níveis de EDS sobre a resistência em fadiga do condutor IBIS (CAA 397,5 MCM).** 2010. 185 p. Tese de Doutorado em Ciências Mecânicas - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

FRONTIN, S. O., et al. **Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas aplicadas a linhas de transmissão.** 1 ed. Brasília: Goya, 2010. 368 p.

FUCHS, R. D., et al. **Projetos mecânicos de linhas aéreas de transmissão.** 2 ed. Edgard Blucher Ltda, 1992.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais.** 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 365 p.

GASPERAZZO, M. R & ITO, T. T T. **Desenvolvimento de um dispositivo de ensaio de fadiga por fretting em fios.** Junho, 2016

GOMES, F.B. **Análise comparativa de aparelhos para medição de vibração em cabos condutores de energia e cálculo da vida remanescente em cabos.** Novembro, 2015.

GUÉRARD, S. **Power line conductors, a contribution to the analysis of their dynamic behaviour.** Université de Liège, july 2011. 255p.

HENRIQUES, A. M. D. **Bancada de ensaios mecânicos à fadiga de cabos condutores de energia.** 2006. 182p. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

IEEE. **Standardization of conductor vibration measurements.** IEEE PAS, 1966; vol. 85 No. 1, Trans. 31 TP65-156.

JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Fundamentos do projeto de componentes de máquinas.** 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 500 p.

KALOMBO, R. B., et al. **Relação H/w: estudo crítico e planejamento de ensaios para avaliar a validade do parâmetro como critério de projeto contra fadiga eólica.** In: CITENEL, Bahia, 2015. 1-9.

MATWEB. Material Property Data: **liga de alumínio AA 6201 T81** (<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=e032f5f4165f4901b823b3b6b0e64b74&ckck=1>). Acesso 13 de Abril de 2017

MURÇA, L.B. **Estudo experimental do efeito da sequência de carregamento sobre a resistência à fadiga de cabos condutores.** 2011. 117p. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF

NEXANS. **Alumínio: Condutores Nus**. Brasil: 2013. 60 p.

NORTON, R.L. **Projeto de máquinas**: uma abordagem integrada. 4 ed. Porto Alegre : Bookman, 2013. 1055 p.

PERES, L.O.R. **Efeito de concentração de tensão na vida em fadiga de aço utilizado em spindle de laminador de chapas grossas – Análise experimental e modelamento via MEF.REDEMAT – UFOP**, Janeiro, 2008. 166 p.

POFFENBERGER, J. C.; SWART, R. L. **Differential displacement and dynamic conductor strain**. IEEE Transactions Paper, 1965; PAS-84: 281-289.

ROSA, E. **Análise de resistência mecânica – mecânica da fratura e fadiga**.UFSC, 2002. 407 p.

SHIGLEY, J. E.; BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley**. 8 ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. 1084 p.

SHIGLEY, J. E.; BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley**. 10 ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. 1073 p.

WATANABE. L. **Análise da vida à fadiga de cabos condutores de energia submetidos a carregamentos aleatórios**. 2014. 237 p. Tese de Doutorado em Ciências Mecânicas, Universidade de Brasília, Brasília, DF

7 APÊNDICE

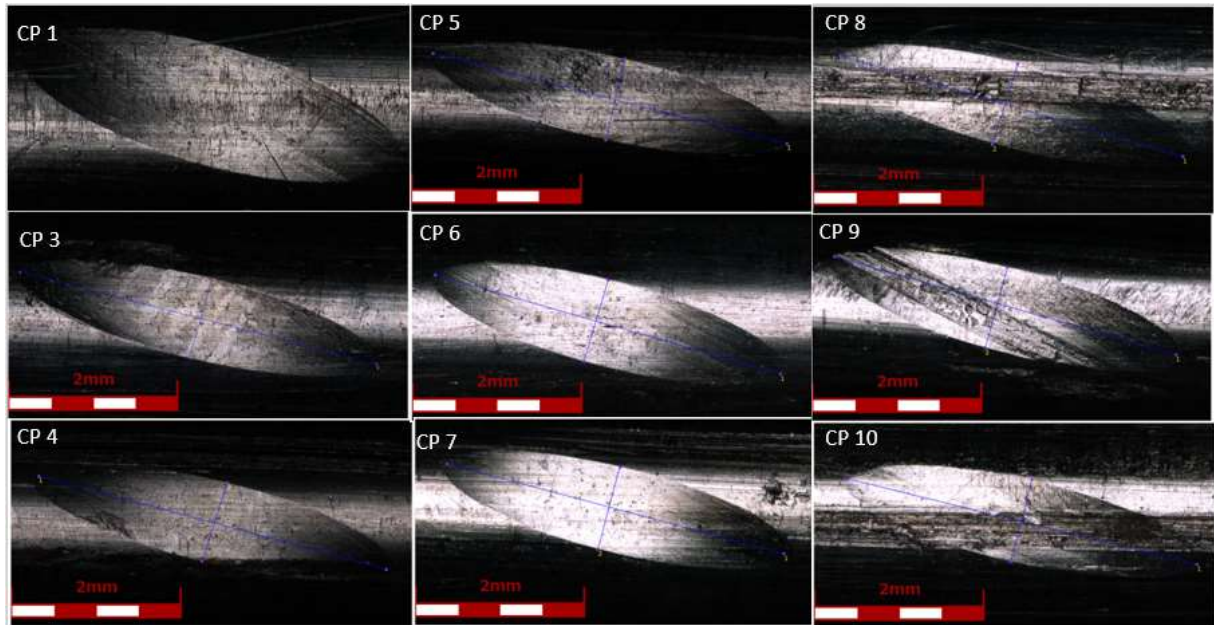


Figura 7-1 - Imagens do CP 1 ao 10 da massa de 2kN

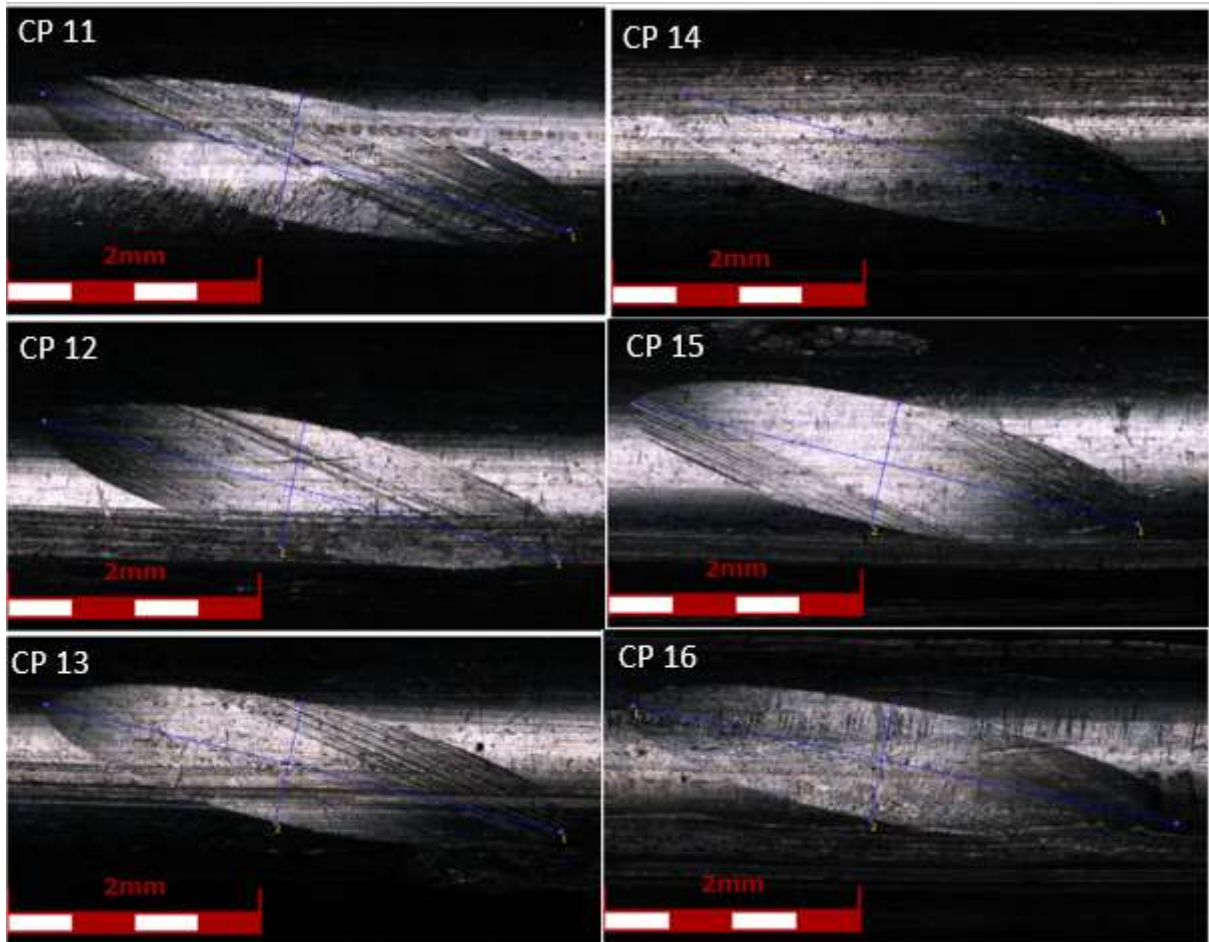


Figura 7-2 - Imagens do CP 11 ao 16 da massa de 2kN

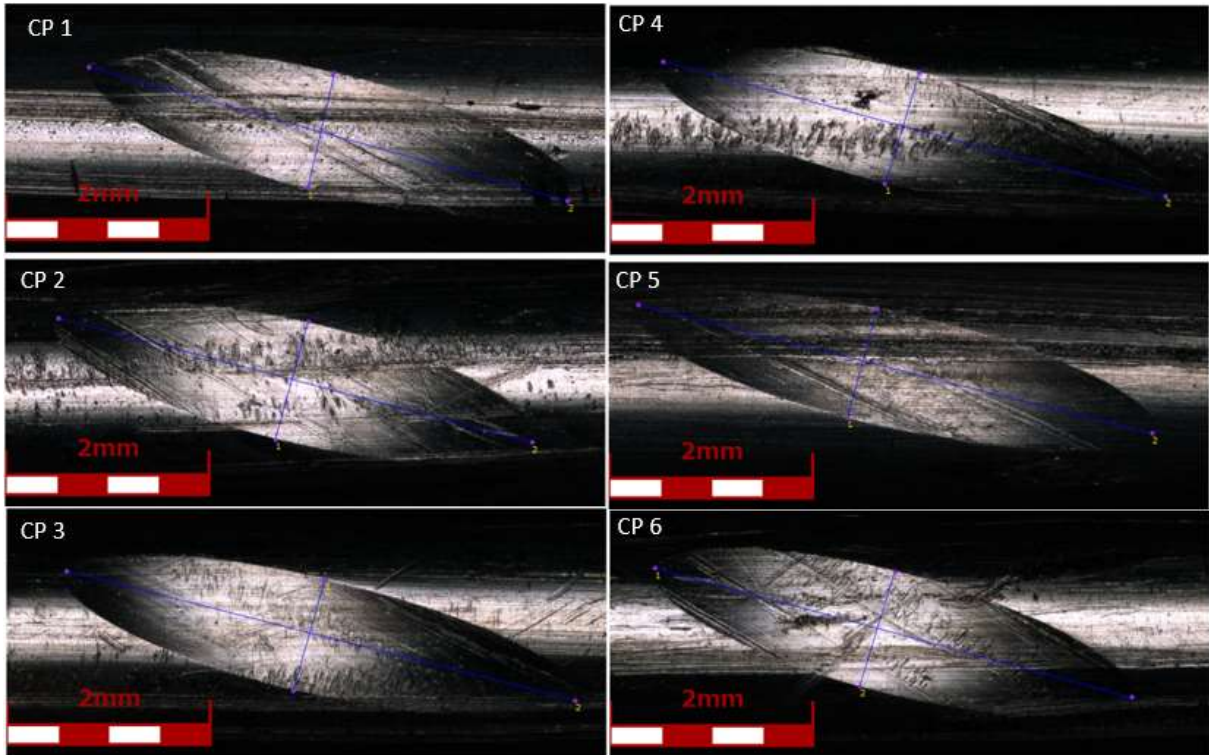


Figura 7-3 - Imagens CP 1 ao 6 da mossa de 2,5kN

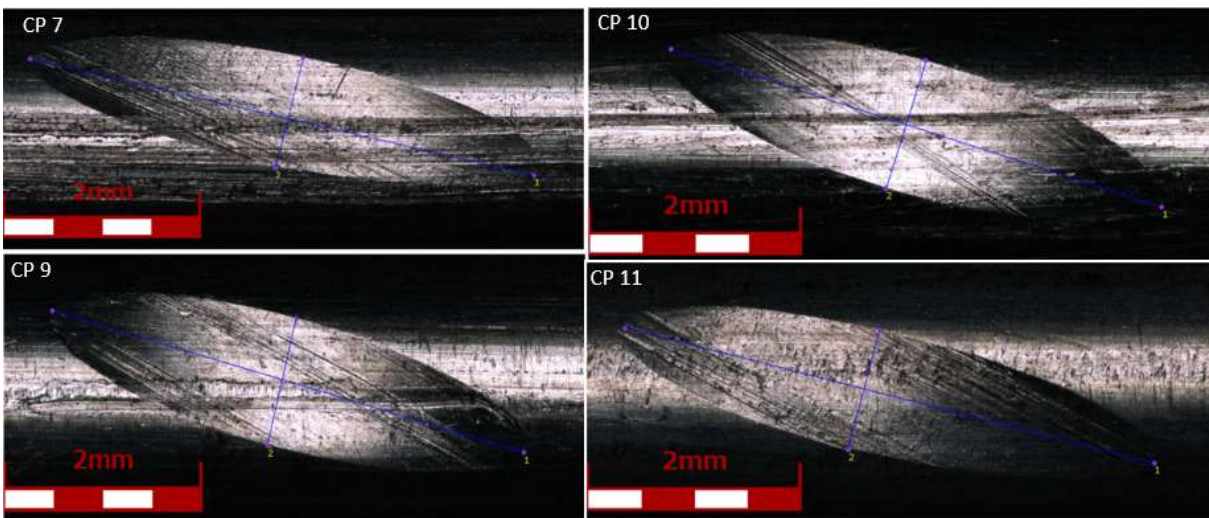


Figura 7-4 - Imagens CP 7 ao 11 da mossa de 2,5kN

7.1 Marcas do mordente

Abaixo podemos observar nas imagens tiradas no microscópio Confocal. As marcas geradas pelo mordente da máquina de ensaio universal Landmark, que não é uma máquina específica para ensaio em fios, mas que pode ser usada para esse fim. E da máquina própria para ensaio em fios, nas imagens abaixo os dois fios foram submetidos a mesma pressão no mordente de 2 MPa, as imagens geradas tem um aumento de 10x, e os dados da caracterização são:

1 (μm)	1241,64
2 (μm)	907,25
Profundidade (μm)	368,63

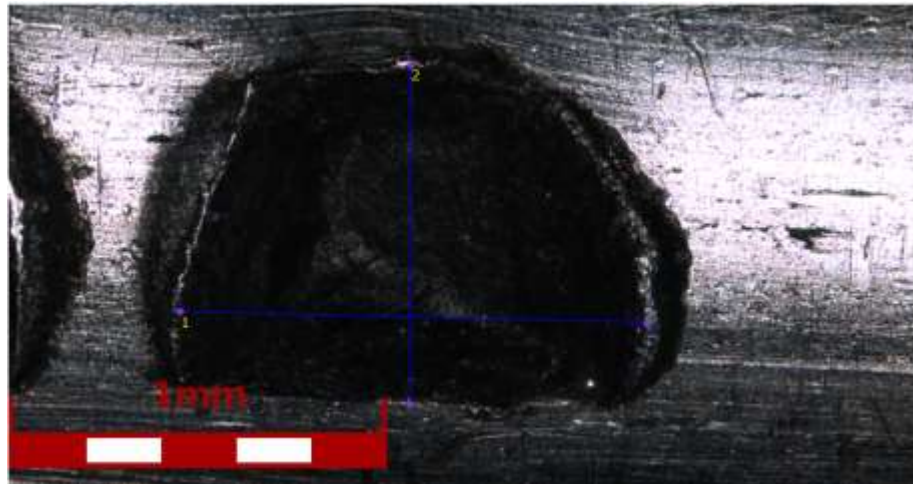


Figura 7-5 - Marca do mordente da máquina Landmark.

1 (μm)	552,8
2 (μm)	493,53
Profundidade (μm)	174,25

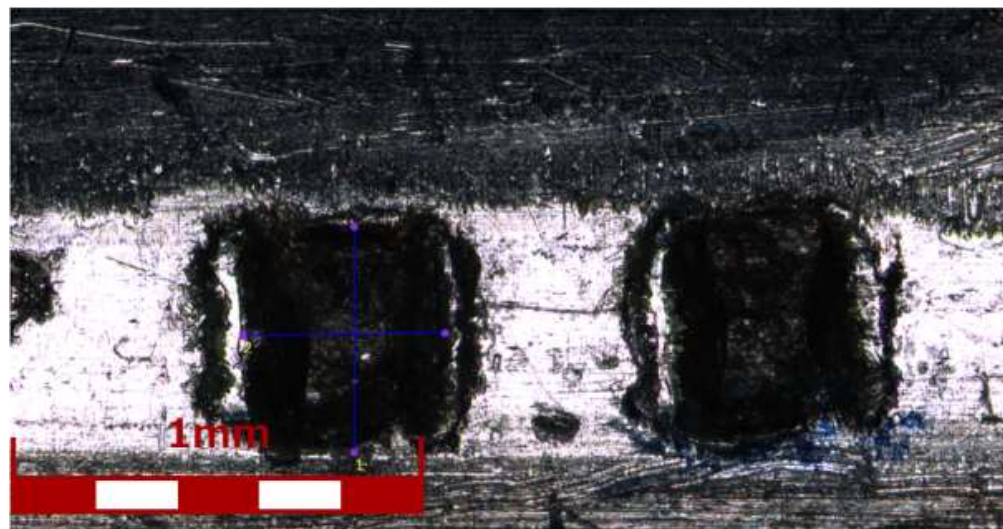


Figura 7-6 - Marca do mordente da máquina para ensaio de fios.