



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA VIDA
EM FADIGA DE CABOS CONDUTORES DE ENERGIA EM
ALUMÍNIO LIGA (CAL) 6201-T81**

RICARDO LENON DA SILVA RODRIGUES

**MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Brasília, janeiro de 2021.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

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

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA VIDA
EM FADIGA DE CABOS CONDUTORES DE ENERGIA EM
ALUMÍNIO LIGA (CAL) 6201-T81**

RICARDO LENON DA SILVA RODRIGUES

ORIENTADOR: PROF. DR. COSME ROBERTO MOREIRA DA SILVA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

BRASÍLIA/DF: JANEIRO – 2021

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

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA VIDA
EM FADIGA DE CABOS CONDUTORES DE ENERGIA EM
ALUMÍNIO LIGA (CAL) 6201 - T81**

RICARDO LENON DA SILVA RODRIGUES

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

APROVADA POR:

**Prof. Dr. Cosme Roberto, PhD (ENM-UnB)
(Orientador)**

(Examinador Interno)

(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, JANEIRO DE 2021

FICHA CATALOGRÁFICA

RODRIGUES, RICARDO LENON DA SILVA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA VIDA EM FADIGA DE CABOS CONDUTORES DE ENERGIA EM ALUMÍNIO LIGA (CAL) 6201. [Distrito Federal] 2021. xviii, 79 p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2021).

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

Departamento de Engenharia Mecânica.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RODRIGUES, R. L. S. (2021). Análise da influência da temperatura na vida em fadiga de cabos condutores de energia em alumínio liga (CAL) 6201-T81. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 90 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Ricardo Lenon da Silva Rodrigues

TÍTULO: Análise da influência da temperatura na vida em fadiga de cabos condutores de energia em alumínio liga (CAL) 6201-T81. [Distrito Federal] 2021.

GRAU: Mestre

ANO: 2021

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

Ricardo Lenon da Silva Rodrigues

Brasília - DF- Brasil

Correio Eletrônico: ricardo_enm@unb.br

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por ser o meu sustento em todos os momentos, à minha esposa Mariana por me apoiar durante todas as etapas me dando força e conforto nos momentos necessários, à minha mãe Lídia por ser meu maior referencial na busca pelo conhecimento, por me direcionar e auxiliar nesta pesquisa, ao meu pai que sempre é um amigo incentivador dos meus objetivos, ao meu irmão Rodrigo que é parceiro em todas as etapas e maior responsável por minhas risadas na vida, à minha prima Vitória e sobretudo à minha avó Maria Helena que venceu todas as batalhas necessárias para possibilitar que nossa família alcançasse nossos sonhos em nossas vidas.

Aos colegas de laboratório Remy, Thiago e Pedro que foram os responsáveis em me ensinar todas as etapas práticas e me auxiliaram na realização desta pesquisa. Aos Prof. Dr. José Alexander e Prof. Dr. Cosme Roberto meu agradecimento pela confiança e pela honra do convite para integrar sua equipe de pesquisa e por toda a orientação no curso deste trabalho.

Aos amigos, Wesley, Marcão e Xavier, colegas de trabalho do Laboratório de Processos de Fabricação, no Bloco SG-9 do ENM-UnB pelo suporte técnico e apoio irrestrito na fabricação de dispositivos necessários à condução dos experimentos.

À Transmissora Brasileira de Energia- TBE pelo patrocínio e custeio de todos os materiais necessários que sem o quais a realização desta pesquisa não seria possível.

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, ao meu irmão Rodrigo,
à minha esposa Mariana,
à minha prima Vitória e à minha avó Helena.*

*“Quando morremos, nada pode ser levado conosco,
com a exceção das sementes lançadas por nosso trabalho
e do nosso conhecimento.”*

Dalai Lama

*“Combati o bom combate, acabei a carreira, guardei a fé.
Desde agora, a coroa da justiça me está guardada,
a qual o Senhor, justo juiz, me dará naquele Dia;
e não somente a mim, mas também a todos os que amarem a sua vinda.”*

1ª Timóteo 4:7-8

RESUMO

O presente trabalho tem natureza experimental e apresenta a análise da influência da temperatura na vida em fadiga de cabos condutores de energia elétrica CAL 900 MCM da liga 6201-T81.

A energia elétrica é elemento fundamental na vida do ser humano e estudos apontam para um crescimento considerável de demanda nos próximos anos. Desta forma, é necessário avaliar como é possível fornecer mais energia elétrica à sociedade. O condutor é o responsável pela transmissão desta energia e quando está em operação aquece devido a fatores climáticos e ao efeito Joule ocorrido pela corrente que passa pelo mesmo. Vários estudos têm sido realizados para investigar possibilidades de aumentar a vida útil das redes elétricas e a capacidade de transmissão das redes já existentes, todavia a influência da temperatura na vida em fadiga do condutor não tem sido um fator amplamente discutido nos trabalhos publicados. Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar a influência da temperatura de operação do condutor na vida em fadiga.

A pesquisa consiste em obter curvas de Wöhler em temperaturas controladas, a saber, 75°C e 150°C e comparar com a curva em temperatura ambiente (20°C) presente na literatura (KALOMBO, 2017). Neste trabalho é realizada também a análise microscópica e macroscópica para observar o comportamento das falhas e as possíveis causas e ensaios de dureza em amostras submetidas a envelhecimento artificial e em amostras retiradas diretamente da bobina para verificar alterações decorrentes da temperatura nas propriedades mecânicas do material. Para realizar os ensaios de fadiga isotérmica desenvolvemos uma cúpula térmica com sistema de controle por software de alto desempenho que simula aquecimento no condutor decorrente da passagem de corrente elétrica. Este dispositivo possui aquecimento eficiente, preciso, seguro e estável que o credenciam para ensaios de fadiga nos condutores conforme os ensaios que comprovam tais características.

O resultado das curvas obtidas permite concluir que a temperatura de 75°C não afeta a vida em fadiga dos cabos condutores CAL 900 MCM da liga 6201, sendo os resultados similares aos obtidos em ensaios a 20°C enquanto a curva de Wöhler a 150°C apresenta vidas maiores em até 90% quando comparado com as vidas previstas pela curva S-N em temperatura ambiente. Na análise das propriedades mecânicas constatam-se valores de dureza maiores em 13 HV e nas amostras que foram envelhecidas artificialmente pelos ensaios a 150°C durante quarenta e duas horas. Nas amostras submetidas a 75°C não houveram alterações substanciais.

Através das análises de falhas percebe-se que mesmo com as temperaturas controladas foi observada características de falha por fadiga nas superfícies fraturadas, apresentando três regiões características com a zona de início da trinca próxima a marcas de fretting, zona de propagação com presença de marcas de praia e zona de ruptura final com rugosidade e dimples equiaxiais em maior quantidade, indicando possível predominância do carregamento por tração.

ABSTRACT

The present work presents the experimental and analysis of the temperature influence on the fatigue of the overhead conductor AAAC 900 MCM made of alloy 6201-T81 used on power line transmission.

Electricity is a fundamental element for human lives and the studies related point to a considerable energy demand growth in the coming years. Therefore, it is necessary to evaluate the possibility of providing more electrical energy to societies. A conductor is one of the main components for energy transmission also during its operation, it heats up due to climatic factors. A top of that, the heat is due to the Joule effect that occurs by the current passing through the conductor. Several studies have been conducted to investigate the possibilities of increasing the fatigue life of electrical networks and the transmission capacity of existing networks, however a widely experimental discussion of the temperature influence on the conductor fatigue life could not be found in the literature. Thus, the objective of this work is to evaluate the influence of the operating temperature on the conductor fatigue lives.

The aim of this study is to generate the Wöhler graphs at the controlled temperatures of 75°C and 150°C, thereafter the comparisons was made with the graph at room temperature (20°C) from the published thesis (KALOMBO, 2017). The data at 20°C presented unsatisfactory fatigue lives thus the verification was made whether the presence of temperature has an influence on the fatigue life of the overhead conductor or not. In this research work, the microscopic and macroscopic analysis were also performed in order to observe the behavior of failures and their possible causes. Finally, the artificial aging was performed on aluminium samples and hardness tests were realized in the samples that were taken directly from the conductor on the drum in order to verify the change of the material mechanical properties due to the temperature. To perform the isothermal fatigue tests on the conductor, the thermal box was designed with a control system using a high-performance software to simulate the heat resulting from the passage of an electric current. This device has been tested and accredited by means of the tests to prove its efficient, accurate, safe and stable heat during the conductor fatigue tests.

The S-N graphs generated allowed to conclude that the temperature of 75°C did not have a sufficient impact on the fatigue life of the AAAC 900 MCM conductor made of aluminium 6201-T81 alloy. Meanwhile, the temperature of 150°C presented an increase in fatigue live of 90% than those presented by the same conductor at room temperature. The analysis done on mechanical properties revealed an higher hardness values equal to 13 HV in the samples that were artificially aged at 150°C with a duration of forty-two hours. On the other hand, the samples subjected to artificial aging of 75°C do not present a change in

hardness compare to the ones from the overhead conductor drum. The increase in fatigue life proves that the heat treatment was inefficient in the production process of this overhead conductor since it had not reached the β phase with fine precipitates and consistent matrix.

Concerning the failure analyses, it was observed that the presence of controlled temperatures maintained the standard behavior of a fatigue failure. Three characteristic regions presenting the standard behavior of a fatigue failure were observed: the crack initiation near the fretting mark, propagation region with a presence of beach marks and final rupture region with roughness surface. The microscopic analysis of final rupture region showed the presence of equiaxial dimples indicating that the final rupture was due to the traction loading. The positions with the highest incidence of fracture in the conductor were presented to facilitate the preventive and corrective maintenance of the transmission lines.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTO DO DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	1
1.2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	2
1.3. OBJETIVOS DO TRABALHO.....	3
1.4. JUSTIFICATIVA.....	4
1.5. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA DO TRABALHO.....	5
2. ESTADO DA ARTE E REVISÃO TEÓRICA	6
2.1. ESTADO DA ARTE.....	6
2.2. REVISÃO TEÓRICA	8
2.2.1. Alumínio.....	9
2.1.1.1. Ligas de alumínio	10
2.1.1.2. Ligas de alumínio 6201	11
2.1.1.3. Trefilação	11
2.1.1.4. Tratamento térmico	12
2.1.1.5. Solubilização e têmpera.....	12
2.1.1.6. Envelhecimento natural e artificial	13
2.2.2. Cabos condutores.....	15
2.2.2.1 Tipos de cabos condutores.....	15
2.2.3. FADIGA.....	16

2.2.3.1. Método S-N de previsão da vida em fadiga	17
2.2.3.2. Amplitude de tensão	17
2.2.3.3. Fadiga em cabos condutores.....	18
2.2.3.3.1. Fadiga por Fretting	18
2.2.3.3.2. Poffenberger-Swart.....	19
2.2.3.4. Fadiga em alta temperatura.....	20
2.2.4. Temperatura de projeto.....	21
2.2.5. Princípio do balanço térmico	22
2.2.6. Dispositivos eletrônicos.....	24
2.2.6.1. Controlador de Temperatura.....	24
2.2.6.2. Sistema de controle proporcional, integral e derivativo (PID)	24
2.2.6.2.1. Ação proporcional	25
2.2.6.2.2. Ação Integral	25
2.2.6.2.3. Ação Derivativa.....	26
2.2.6.3. Comutador eletromecânico.....	27
2.2,6,4. Termopar	27
2.2.6.5. Resistência elétrica	27
2.2.6.6. Tipos de aquecimento.....	28
2.2.7. Dureza.....	28
2.2.8. Análise da falha	29
2.2.8.1. Seleção, identificação e limpeza das superfícies	30

2.2.8.2. Análise macroscópica.....	30
2.2.8.3 Análise microscópica.....	30
2.2.8.4. Microscópio ótico.....	30
2.2.8.5. Microscópio eletrônico de varredura (MEV)	31
3. METODOLOGIA	33
3.1. CÚPULA PARA AQUECIMENTO DE CABOS CONDUTORES	33
3.1.1. Processo de fabricação.....	33
3.1.2. Sistema de controle e monitoramento do dispositivo.....	35
3.1.2.1. Controlador de temperatura.....	36
3.1.2.2. Comutador eletromecânico.....	37
3.1.2.3. Termopar	37
3.1.2.4. Resistência elétrica	38
3.1.3. Tipo de aquecimento	38
3.1.4. Ensaio de credenciamento do dispositivo	39
3.1.4.1. Ensaio de estabilização da temperatura no dispositivo	39
3.1.4.2. Ensaio de exatidão e precisão do dispositivo.....	40
3.1.4.3. Termografia do dispositivo.....	40
3.2. ENSAIOS DE FADIGA EM TEMPERATURAS CONTROLADAS.....	41
3.2.1. Apresentação geral da bancada de ensaios de cabos condutores.....	41
3.2.2. Preparação da bancada para ensaio de fadiga em alta temperatura.....	43
3.2.2.1. Montagem do cabo na bancada	43

3.2.2.2. Tracionamento do cabo e acomodação	43
3.2.2.3. Fixação do grampo de suspensão	44
3.2.2.4. Motagem dos sensores.....	45
3.2.2.5. Extensometria	46
3.2.2.6. Montagem da cúpula de aquecimento e estabilização da temperatura.....	47
3.2.3. Ensaio dinâmico para avaliação de Poffenberger-Swart	48
3.3. TRATAMENTO TÉRMICO.....	49
3.4. ENSAIOS DE DUREZA	50
3.4.1 Ensaio de microdureza Vickers	51
3.5. ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES DAS FALHAS.....	52
3.5.1. Análise de falha macroscópica	52
3.5.2. Análise de falha microscópica.....	54
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CREDENCIAMENTO DO DISPOSITIVO	55
4.1.1. Ensaio de estabilização da temperatura no dispositivo	55
4.1.1.1. Estabilização a 75°C	55
4.1.1.2. Estabilização a 150°C	56
4.1.2. Ensaio de exatidão e precisão do dispositivo	56
4.1.3. Termografia do dispositivo.....	57
4.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FADIGA EM TEMPERATURAS CONTROLADAS	59

4.2.1. Ensaio de fadiga em temperatura ambiente.....	59
4.2.2. Ensaio de fadiga em temperatura de 75°C.....	60
4.2.3. Ensaio de fadiga em temperatura de 150°C.....	60
4.2.4. Curva S-N em diferentes temperaturas.....	61
4.3. ENSAIOS DE DUREZA	63
4.4. ANÁLISE DE FALHAS	64
4.4.1. Análise macroscópica das falhas	64
4.4.1.1. Análise de falhas relativa à posição da quebra	64
4.4.1.2. Análise de falhas relativa à camada.....	64
4.4.1.3. Análise de falhas relativa ao tipo.....	65
4.4.2. Análise microscópica das falhas.....	66
4.4.2.1. Regiões da fratura.....	67
4.4.2.1.1. Início da trinca	67
4.4.2.1.2. Zona de propagação da trinca.....	68
4.4.2.1.3. Zona de ruptura final	70
5. CONCLUSÕES	72
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
APÊNDICES	81
ANEXOS	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Fluxograma de etapas práticas.	4
Figura 2.2 – Aplicações do alumínio.....	9
Figura 2.3 – Ligas de alumínio.....	10
Figura 2.4 – Processo de trefilação.....	11
Figura 2.5 – Representação das etapas do endurecimento por precipitação	12
Figura 2.6 – Evolução da dureza e microestrutura em ligas de alumínio termicamente tratáveis.	14
Figura 2.7 – Curvas de envelhecimento em várias temperaturas das ligas da série 6XXX	14
Figura 2.8. – Desenho esquemático de um cabo condutor mostrando as camadas concêntricas	15
Figura 2.9. – Representação da fratura por fadiga.....	16
Figura 2.10. – Ciclos de fadiga de amplitude constante.....	18
Figura 2.11. – Desenho esquemático do problema de contato entre dois cilindros	19
Figura 2.12. – Esquema da montagem cabo-grampo	19
Figura 2.13. – Flecha máxima aceitável em linha de transmissão.	21
Figura 2.14. – Princípio do balanço térmico.	23
Figura 2.15. – Cálculo da ampacidade	23
Figura 2.16 – Sistema de controle com ações PID.....	24
Figura 2.17 – Gráfico da ação proporcional.....	25
Figura 2.18 – Gráfico da ação integral	26
Figura 2.19 – Gráfico da ação derivativa	26

Figura 2.20 – Ensaio de dureza	29
Figura 2.21 – Microscópio ótico	31
Figura 2.22 – Microscópio eletrônico de varredura	31
Figura 2.23 – Formato das microcavidades em modos distintos de carregamento	32
Figura 2.24 – Superfície com zonas de nucleação, propagação e trinca	32
Figura 3.1 – Cúpula térmica	33
Figura 3.2 – Sistemas de retenção e inspeção visual	34
Figura 3.3 – Sistemas de segurança.....	35
Figura 3.4 – Circuito eletrônico de controle e monitoramento da cúpula	36
Figura 3.5 – Controlador CN-N1030	36
Figura 3.6 – Módulo comutador eletromecânico 5VDC e 10A	37
Figura 3.7 – Termopar de contato tipo J.....	37
Figura 3.8 – Resistência elétrica tipo U.....	38
Figura 3.9 – Aquecimento por convecção natural no dispositivo	38
Figura 3.10 – Ensaio do dispositivo a 150°C.....	39
Figura 3.11 – Termógrafo utilizado no dispositivo	40
Figura 3.12 – Bancada de ensaios de fadiga.....	41
Figura 3.13 – Módulo aquisitor de sinais ADS 1800 – Lynx.....	41
Figura 3.14 – Controlador LDS Laser Usb	42
Figura 3.15 – Excitador eletromagnético	42
Figura 3.16 – Tracionamento	43

Figura 3.17 – Célula de carga e grampo de ancoragem	44
Figura 3.18 – Grampo de suspensão	44
Figura 3.19 – Montagem do grampo de suspensão	45
Figura 3.20 – Desenho esquemático ilustrando a forma de medição do ângulo de rotação.....	46
Figura 3.21 – Extensômetros devidamente colados na região do UPC.....	47
Figura 3.22 – Cúpula devidamente posicionada na bancada de ensaios de fadiga	47
Figura 3.23 – Gráfico de temperatura versus módulo de elasticidade para o alumínio	48
Figura 3.24 – Durômetro	51
Figura 3.25 – Pontos de medição da dureza na amostra.....	51
Figura 3.26 – Exemplos de medições realizadas.....	52
Figura 3.27 – Tipos de falhas registradas nas amostras	53
Figura 4.1 – Curva de estabilidade do dispositivo a 75°C.....	55
Figura 4.2 – Curva de estabilidade do dispositivo a 150°C	56
Figura 4.3 – Gráfico de exatidão e precisão em 75°C	56
Figura 4.4 – Gráfico de exatidão e precisão em 150°C	57
Figura 4.5 – Vista termográfica lateral do dispositivo	57
Figura 4.6 – Medição da temperatura no ponto 89.....	58
Figura 4.7 – Medição na região superior do condutor oposta ao UPC.....	58
Figura 4.8 – Medição na região inferior do condutor.....	59
Figura 4.9 – Curva S-N do cabo CAL 900 em temperatura ambiente	60
Figura 4.10 – Curva S-N do cabo CAL 900 em temperatura de 75°C.....	60

Figura 4.11 – Curva S-N do cabo CAL 900 em temperatura de 150°C	61
Figura 4.12 – Curva S-N do cabo CAL 900 em temperaturas diversas	61
Figura 4.13 – Diferença entre as vidas em fadiga a 75°C e 150°C em relação à vida em 20°C.	62
Figura 4.14 – Gráfico Dureza versus Tempo de tratamento térmico a 75°C	63
Figura 4.15 – Gráfico dureza versus tempo de tratamento térmico a 150°C.....	63
Figura 4.16 – Distância média de ruptura dos fios a partir do grampo de suspensão	64
Figura 4.17 – Número de quebras internas e externas.....	65
Figura 4.18 – Tipos de quebras	65
Figura 4.19: (a) Topo de superfície fraturada em ensaio a 75°C, (b) Zonas de propagação da trinca em superfície fraturada em ensaio a 75°C e (c) Dimples em superfície fraturada em ensaio a 75°C	66
Figura 4.20: (a) Topo de superfície fraturada em ensaio a 150°C, (b) Zonas de propagação da trinca em superfície fraturada em ensaio a 150°C e (c) Dimples em superfície fraturada em ensaio a 150°C	66
Figura 4.21 – Zonas características de falhas por carregamentos cíclicos	67
Figura 4.22 – Amostras com indicação do início da trinca	68
Figura 4.23 – Marcas de praia indicando a zona II presente na amostra.....	72
Figura 4.24 – : Dimples equiaxiais em fraturas ensaiadas a (a) 75°C e (b) 150°C decorrentes de uma fratura característica de carregamento de tração.....	73
Figura 4.25 – Empescoçamento e marca de fretting	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Índice de crescimento de demanda da energia elétrica.....	1
Tabela 1.2 – Características de LTs de 230kV na região Centro-Oeste.....	3
Tabela 2.1 – Tipos de ligas.....	10
Tabela 2.2 – Elementos presentes em ligas de alumínio 6201.....	11
Tabela 2.3 – Tipos de termopares.....	27
Tabela 3.1 – Amplitudes de tensão e respectivos Y_B	49
Tabela 3.2 – Tratamento térmico aplicado nas amostras	50

LISTA DE ABREVIações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACAR	Cabos de Alumínio com Alma de Liga de Alumínio
ANEEL	Agência Nacional de Energia elétrica
ASTM	American Society for Testing and Materials
CA	Cabos de Alumínio
CAA	Cabos de Alumínio com Alma de Aço
CAL	Cabos de Alumínio Liga
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CIGRE	Conseil International des Grands Reseaux Electriques (International Council on Large Electric Systems)
EDS	Every Day Stress ou Carga diária média de tracionamento à qual o cabo é submetido ao longo da vida em serviço. É um percentual da Tensão limite de ruptura à tração do condutor.
EPE	Empresa de pesquisa energética
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
ERE	Extensômetro de resistência elétrica
FEM	Força eletromecânica
HV	Vickers Hardness, Escala de dureza Vickers

IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)</i>
LabCabos	Laboratório de integridade estrutural de cabos condutores de Energia
LT	Linha de Transmissão
MCM	Mil Circular Mil
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
P-S	Poffenberger-Swart
S-N	<i>Stress-Number of cycles (Tensão – Números de ciclos)</i>
SSS	Solução Super Saturada
TBE	Transmissora Brasileira de Energia
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UnB	Universidade de Brasília
UPC	Último Ponto de Contato

LISTA DE SÍMBOLOS

Latinos

a	Ângulo de rotação
d	Diâmetro, [mm]
d_a	Diâmetro do fio de alumínio, [mm].
d_s	Diâmetro do fio de aço, [mm]
E	Módulo de elasticidade, [GPa]
E_a	Módulo de elasticidade do alumínio, [GPa]
EDS	Every Day Stress, [%]
f	Frequência de aplicação da carga em ciclos por segundo, [Hz]
I	Momento de inércia, [kg·m ²]
I_{min}	Momento de inércia mínimo
K	Constante da fórmula de <i>Poffenberger-Swart</i>
k_d	Coefficiente derivativo

k_i	Coefficiente integrativo
k_p	Coefficiente proporcional
N	Número de ciclos, [ciclos]
n_a	Número de fio de alumínio
n_s	Número de fio de aço
P_c	Perda de calor pela incidência do vento, [Joules]
P_j	Perda de calor pela incidência do ampacidade, [Joules]
P_r	Perda de calor pela incidência da radiação, [Joules]
P_s	Perda de calor pela incidência do sol, [Joules]
R	Razão de tensão
t	Tempo
T	Tração no cabo condutor, [N]
Y_B	Amplitude de deslocamento pico a pico

Gregos

ε	Deformação, [μ strain]
σ_a	Tensão alternada, [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 CONTEXTO DO DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

A energia elétrica é elemento fundamental para a vida no século XXI sendo primordial desde as tarefas mais básicas como iluminação e funcionamento de eletrodomésticos até as mais complexas como funcionamento de equipamentos industriais e meios de transporte sofisticados. Dentro deste contexto, o cabo condutor de energia é um dos principais responsáveis pela eficiência do fornecimento de energia elétrica em linhas de transmissões (LTs). Portanto, estudos referentes à vida útil deste componente têm se tornado mais frequentes pela alta relevância do assunto. A tabela 1.1. retirada da nota técnica 001/2017 emitida pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) aponta para um crescimento considerável (aproximadamente 3,5%/ano) no período de 2016-2026 (DEA 001/17, 2017).

Tabela 1.1: Índice de crescimento de demanda da energia elétrica. (DEA 001/17, 2017).

Ano	Residência	Industria	Comércio	Outros	Total
2016	132.611	163.758	88.165	74.98	459.515
2017	136.018	165.268	90.083	77.24	468.617
2018	140.681	168.706	93.192	79.98	482.563
2019	145.773	172.514	96.758	82.98	498.030
2020	151.704	177.362	100.801	86.42	516.290
2021	158.008	185.916	105.045	90.10	529.071
2022	164.613	195.531	109.485	93.93	563.560
2023	171.529	201.372	114.181	97.98	585.062
2024	178.778	207.087	119.147	102.26	607.273
2025	186.262	212.836	124.337	106.71	630.153
2026	193.990	218.829	129.758	111.35	653.935

Com estes dados percebemos a necessidade de investigar possibilidades de aumentar a vida útil das redes elétricas e a capacidade de transmissão das redes já existentes para atender a demanda pelo fornecimento e energia de forma contínua.

O condutor de alumínio Liga (CAL) 6201-T81 consiste em boa escolha para transmissão de energia pelas características do material, e por isso, tem-se observada alta tendência de utilização deste condutor em novos projetos de linhas de transmissão de energia

elétrica pelas vantagens que oferece como boa relação resistência *versus* peso, baixas perdas elétricas e alta resistência à tração e à corrosão (KALOMBO, 2017). Estas características, a princípio, tornam a construção de uma LT mais otimizada, barata e confiável. Mas, apesar das características favoráveis desta liga, foram constatadas falhas prematuras (menores que 5 anos) em LTs instaladas no Centro-Oeste (KALOMBO, 2017) gerando uma série de dúvidas em relação à confiabilidade desta liga, uma vez que produções da CIGRE afirmam que a vida útil média satisfatória deve ser de aproximadamente 30 anos (CIGRE WG04, 1985).

Em pesquisas conduzidas pela equipe do Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia da Universidade de Brasília (LabCabos-UnB) foi provado que as falhas prematuras ocorridas nestas linhas foram ocasionadas por fatores que ainda não estão relatados na literatura técnico/científica (ARAÚJO, 2012)

Nota-se, portanto, a necessidade de estudos capazes de realizar melhor previsão das ocorrências das falhas para que haja medidas preventivas que gerem maior confiabilidade e minimizem os prejuízos causados quando ocorrem os blecautes.

1.2 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Ensaio de fadiga publicados (KALOMBO, 2017) realizados em temperatura ambiente (20°C) apresentaram falhas prematuras, mas as linhas operam com o condutor em temperaturas elevadas, o que pode influenciar no comportamento mecânico da liga 6201-T81. A temperatura no condutor depende da corrente elétrica que está sendo transmitida (ampacidade), da radiação solar, da perda por convecção e por radiação (CIGRE WG22.12, 2002). A norma regulamentadora 5422/1985, que define o cálculo da ampacidade em linhas aéreas de transmissão de energia entre 38kV e 800kV, afirma que a temperatura máxima no cabo condutor em LTs deve variar entre 60°C e 90°C dependendo da região para manter o nível adequado de segurança e proporcionar o máximo fluxo de corrente elétrica conforme exemplo descrito na tabela 1.2 retirada de um projeto de construção de linhas de transmissão situadas na região Centro-Oeste (EBTE-LT-004-PB, 2008). Todavia, observa-se na prática que esta temperatura de projeto pré-estabelecida pela norma é bastante conservadora já que os dados utilizados simulam a pior condição de operação que não é vista na prática levando a compreender que as LTs poderiam transmitir mais energia. No entanto, a norma supracitada é omissa quanto ao comportamento do condutor aquecido em relação à sua vida em fadiga.

Tabela 1.2: Características de LTs 230 kV na região Centro-Oeste (EBTE-LT-004-PB, 2008).

Temperatura do condutor [°C]	Corrente [A]
64	689
65	707
66	724
75	859
76	873
77	886

A fadiga causada pelo movimento de flexão alternada do condutor devido à incidência do vento é uma das causas da falha do fornecimento de energia elétrica, pois, mecanicamente, os cabos não suportam a frequência de vibrações e acabam por se romperem nos pontos mais críticos (FADEL, 2010).

Frequentemente a falha dos condutores ocorre nesta região de desgaste no interior do grampo de suspensão próximo ao último ponto de contato entre o cabo e o grampo onde a inspeção visual da ocorrência da falha é de difícil verificação. A previsão da vida útil do condutor é baseada, visto que em muitos casos não é viável a inspeção visual ou aplicação de sensores, nas curvas de Wöhler ou S-N que possibilitam prever a vida em fadiga do condutor para averiguar a necessidade de manutenção das LTs e evitar que falhas catastróficas ocorram (IEEE STANDARD 563, 1978). Essas curvas são obtidas em ambiente laboratorial através de ensaios de fadiga com a simulação das condições aproximadas às reais de operação do cabo na LT obtendo um gráfico da amplitude de tensão presente no ponto mais crítico em relação ao número de ciclos.

A vida em fadiga do cabo condutor depende de vários fatores como a carga de esticamento, a velocidade do vento, a angulação do vento e a temperatura do condutor. Existem diversas pesquisas que avaliam os primeiros fatores descritos enquanto poucos estudos avaliam com exatidão a influência da temperatura do condutor em relação à sua vida em fadiga.

1.3. OBJETIVOS DO TRABALHO

O presente trabalho é de natureza experimental e visa apresentar contribuição sobre o fator temperatura como influenciador na vida útil do cabo condutor de energia da liga 6201 e determinar qual o nível de influência do mesmo.

Tem por objetivo geral analisar a influência da temperatura na vida em fadiga do CAL 6201. E o objetivo específico deste trabalho é realizar ensaios de fadiga em cabo condutor de energia CAL 6201 em temperaturas controladas (75°C e 150°C), levantar a curva de durabilidade (Curva de *Wöhler* ou S-N) e comparar com a curva publicada (KALOMBO,2017) em temperatura ambiente (20°C) para o mesmo condutor, analisar propriedades mecânicas das amostras ensaiadas através de ensaios de dureza e analisar as amostras fraturadas apontando se há influência da temperatura na microestrutura do material e no comportamento da vida em fadiga. A pesquisa seguirá as seguintes etapas práticas:

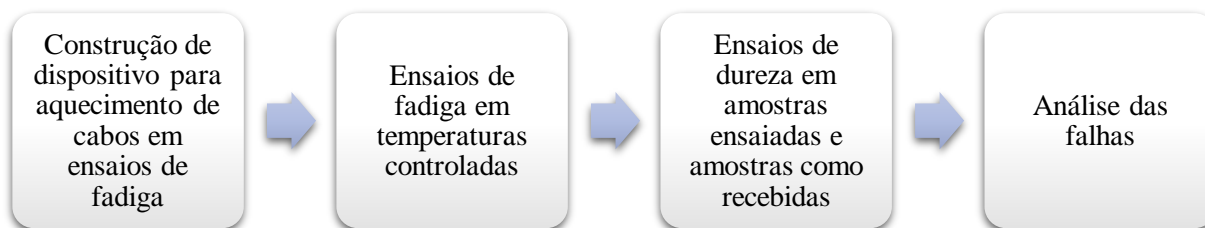


Figura 1.1: Fluxograma de etapas práticas

Este estudo busca antecipar problemas relativos à influência da temperatura na vida em fadiga para permitir que novas linhas sejam projetadas com menor custo e/ou maior segurança e que os fornecedores possam melhorar seu processo de fabricação para obter máximo desempenho deste componente fundamental no processo de transmissão de energia.

1.4 JUSTIFICATIVA

Verifica-se na literatura que pesquisadores debruçaram seus esforços em compreender a influência da temperatura em materiais submetidos à fadiga. Os estudos, porém, são majoritariamente encontrados na área automobilística em ensaios de materiais usados para confeccionar pistões e outras peças que presenciam a temperatura nas proximidades dos motores elétricos, uma vez que a maioria dos componentes móveis dos motores automotivos estão sob os efeitos combinados de fadiga e temperatura. Em relação à cabos condutores, verifica-se incidência de pesquisas que correlacionam a temperatura como fator determinante em relação à fluência, mas há ausência de relatos que avaliam a temperatura como fator influenciador na vida em fadiga destes elementos. Nota-se neste contexto que, apesar da evolução de pesquisas apresentadas nesta revisão bibliográfica relativa ao assunto deste trabalho, os avanços que tratam da influência da temperatura no cabo condutor ainda são embrionários justificando assim a necessidade deste estudo.

1.5 DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta pesquisa está dividida em cinco seções. A primeira seção é a Introdução contendo a apresentação do problema, os objetivos da dissertação, a revisão bibliográfica para compreensão da relevância deste estudo e a justificativa. A segunda seção é a revisão teórica com os conceitos fundamentais utilizados nesta pesquisa. A terceira seção apresenta a metodologia utilizada e os procedimentos experimentais para obtenção das curvas S-N dos ensaios de fadiga em alta temperatura e análise das falhas. Na quarta seção temos os resultados e discussões do dispositivo de aquecimento de cabos condutores, dos ensaios de fadiga em temperaturas controladas, dos ensaios de dureza e das análises das falhas. Por fim, na quinta seção apresenta as conclusões alcançadas e sugestões de trabalhos futuros para alcance de maiores resultados.

2. ESTADO DA ARTE E REVISÃO TEÓRICA

2.1. ESTADO DA ARTE

Esta seção visa contextualizar o tema proposto, delimitar o presente trabalho para definição dos pontos que ainda não estão relatados na literatura e compreender a contribuição científica que o mesmo pode proporcionar. Neste momento, será abordada a revisão bibliográfica para avaliação da vida de cabos condutores e analisar os relatos que apreciam a temperatura como influenciador direto no evento da falha dos condutores.

Os cabos condutores de energia são os principais responsáveis pela transmissão de energia elétrica e, desde o século passado despertam interesse das pesquisas. Em 1926, Varney apresentou em seus trabalhos os primeiros casos de cabos danificados em linhas de transmissão (VARNEY, 1926). Esses danos presenciados até então, não eram investigados por falta de critérios de avaliação do comportamento em fadiga dos condutores utilizados. Com a incidência das falhas, tornaram-se necessários ensaios afim de obter características do comportamento dos cabos quando submetidos à fadiga.

Em 1965 surge uma importante contribuição para os estudos de linhas de transmissão quando Poffenberger e Swart apresentam em seus estudos a relação matemática entre amplitude de flexão e tensão de flexão na camada externa do cabo condutor no último ponto de contato (UPC) entre o cabo condutor e o grampo de suspensão (POFFENBERGER, SWART, 1965).

Em 1973, o IEEE normalizou o critério baseado na equação de Poffenberger-Swart como padrão para a avaliação de fadiga em cabos condutores baseado na máxima tensão permitida em cabos condutores (IEEE STANDARD 563, 1978). A partir deste critério, diversas pesquisas foram surgindo afim de simular as condições reais em ensaios de laboratórios através de modelos experimentais e numéricos que possam prever a vida útil de um cabo instalado em uma linha de transmissão.

Em 1981, Ramey e Silva realizaram os primeiros ensaios capazes de reproduzir o efeito da fadiga sofrido pelos cabos em linhas de transmissão em ambientes laboratoriais e contribuíram com a linha de pesquisa concluindo que a redução de amplitude gera aumento na vida útil dos cabos condutores levando em consideração o critério de vinte e cinco por cento dos fios rompidos (RAMEY, TOWNSEND, 1981).

Pesquisas focadas em prever a vida em fadiga dos condutores surgiram e estudos voltados a fatores como cargas de esticamento, ligas de alumínio, tipos de cabos condutores,

velocidade, angulação do vento e temperatura cresceram substancialmente. Focando atenção ao fator temperatura como influenciador da vida útil do condutor houveram diversas publicações nos anos seguintes.

Foi montado um grupo de trabalho na International Committee on Large High Voltage Electric Systems (CIGRE) com o intuito de resolver o problema de prever as deformações plásticas dos cabos por consequência da temperatura no cabo. O relatório do grupo foi publicado na revista *Electra* ainda em 1981 com avaliação completa de todos os fatores que atuam no fenômeno da fluência, desde os processos metalúrgicos, processos de fabricação dos fios de alumínio, processos de construção dos cabos, efeitos de acomodação geométrica dos fios de alumínio sobre a alma de aço, efeitos da temperatura, efeitos da tensão mecânica, efeitos do clima, efeitos da corrente elétrica sendo transportada e outros.

A associação brasileira de normas técnicas (ABNT) normalizou através da NBR 7303 os métodos de ensaios de fluência em Condutores Elétricos de alumínio em 1982. Menezes Júnior publicou na revista *Mundo Elétrico* a *Monitoração da Temperatura Superficial de Condutores Aéreos* em dezembro de 1987 apontando para a importância deste dado em relação à vida deste condutor. Posteriormente, em 1990 Cavalcanti realiza medições do Coeficiente de Dilatação Térmica de Condutores de Alumínio com Alma de Aço e faz avaliação da Fluência de Condutores, no Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL). Em 1997 Osvaldo Herek constrói uma bancada de ensaios mecânicos automatizados de cabos condutores de alta tensão submetidos a altas temperaturas no Laboratório Central de Pesquisa e Desenvolvimento no Centro Politécnico da UFPR em Curitiba para realizar ensaios de fluência a altas temperaturas. Apesar do desenvolvimento de publicações contemplando a temperatura em cabos, a maioria trata a respeito da fluência nos condutores, que representa a influência da temperatura em relação ao tempo, enquanto há carência de publicações que apresentam a influência da temperatura na vida em fadiga do condutor.

Em 2005 a CIGRE emite a norma técnica WG 22.12: TB 207 normatizando as instruções para o cálculo da ampacidade (capacidade de transmissão de corrente elétrica) e por consequência para a escolha do cabo e que mantenham a segurança da linha de transmissão (LT) com base no princípio do balanço térmico do condutor. Essa norma aponta os elementos influenciadores na temperatura do cabo como aquecimento por efeito Joule, radiação solar, perdas por convecção e por radiação (CIGRE WG 22-12, 2002). Em 2012 o Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) apresenta a norma 738-2012 também baseada no balanço térmico assim como a norma CIGRE, mas com algumas

diferenças que tornam os critérios ainda mais conservadores em relação à anterior. Em âmbito brasileiro a fim de obter uma padronização a ANEEL optou por escolher a metodologia proposta pelo CIGRE, editando a Nota Técnica N° 038/2005-SRT/ANEEL, de 14/11/2005.

Em 2009 Farhad B. Bahaideen investiga o comportamento em fadiga da liga de alumínio 2024-T4 e observa que a resistência à fadiga neste elemento de liga em temperatura elevada é reduzida por um fator de 1,2 - 1,4 em comparação com a resistência à fadiga em temperatura ambiente. Em 2013 Carlos Alberto Cimini Júnior apresenta uma correlação entre o modelo teórico de Morgan e temperaturas experimentais em um condutor com alma de aço tendo em conta a progressiva ruptura dos fios de alumínio da primeira camada. O experimento consistiu em energizar o condutor com uma corrente elétrica de 325A, cortar fio a fio da camada em alumínio e realizar medições das temperaturas presentes no processo e tem como resultado que o modelo superestimou as temperaturas em cerca de 20% em temperaturas elevadas o que se compreende que a literatura apresenta um conservadorismo excessivo em relação à temperatura presente no cabo.

Com o foco em materiais utilizados nas construções de automóveis usando abordagem analítica baseada na análise de elementos finitos para prever a vida em fadiga, em 2016 Hussain, Abdullah e Nuawi publicam estudo a respeito do efeito da temperatura no comportamento de vida em fadiga da liga de alumínio AA6061 sob condições de carga constante. Foram levantadas curvas de tensão-vida (S-N) em diferentes níveis de temperatura elevada (50, 100, 150, 200, 250 e 300 °C). Os resultados para a vida em fadiga à temperatura ambiente e à temperatura elevada foram comparados e verificou-se uma diminuição de até 99% nos ciclos de vida em fadiga para casos extremos (300°C). Com o mesmo propósito, em 2017 Garb publica pesquisa sobre o Efeito da temperatura elevada (150°C) na resistência à fadiga de ligas de alumínio fundidas AlSi8Cu3-T5 e AlSi8Cu3-T6. Os corpos de prova são extraídos das cabeças de cilindros e dos cárteres de automóveis. Os ensaios demonstram que a resistência à fadiga do AlSi8Cu3 T5 (cabeça do cilindro) e do AlSi8Cu3 T6 (cárter) diminuiu significativamente a 150 ° C em 25% e 7% respectivamente.

2.2. REVISÃO TEÓRICA

Esta seção é composta de conceitos fundamentais para entendimento da pesquisa realizada. É apresentada uma revisão teórica a respeito de cabos condutores de energia, tratamentos térmicos, fadiga, dispositivos eletrônicos, ensaios de dureza e análise de falha.

O objetivo específico desta seção é situar o leitor para melhor compreensão dos procedimentos realizados e da metodologia utilizada neste trabalho, dando ênfase ao cabo condutor da liga 6201, no tratamento térmico T81, nos métodos experimentais do ensaio de fadiga em alta temperatura e por fim na análise de falhas através de microscopia eletrônica.

2.2.1. Alumínio

O alumínio possui características favoráveis para utilização em cabos condutores de energia pois é o elemento metálico mais abundante da crosta terrestre (8,13%) e de forma geral, é o 3º elemento mais abundante, logo após o Silício (27%) e o Oxigênio (47%). Isso o torna economicamente viável e também possui baixa relação do seu peso em relação à resistência, é resistente à corrosão, apresenta alta ductibilidade e possui boa condutividade elétrica.

O processo de extração e produção do alumínio é composto pela fase de tratamento químico do minério extraindo a alumina (Al_2O_3) da bauxita e posteriormente, passa por redução eletrolítica da alumina (eletrólise a $1000^\circ C$) transformando a alumina no alumínio.

As principais aplicações do alumínio apresentadas na figura 2.2 mostra que, em sua maioria, o alumínio é usado em embalagens e transportes, mas sua utilização vem sendo cada vez mais frequente (10,2%) em fabricação de cabos condutores de energia.

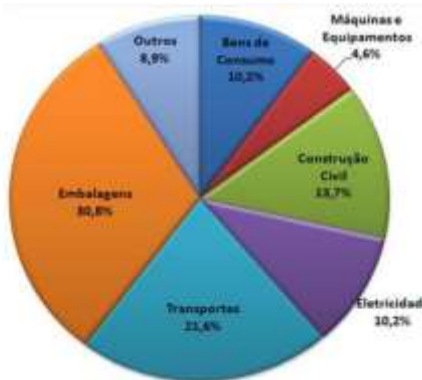


Figura 2.2: Aplicações do alumínio

O alumínio tornou-se ótima opção para as linhas de transmissão, mas sua aplicação possui algumas desvantagens, a saber: baixa dureza, baixa resistência à tração e alta condutividade térmica quando comparado com os demais tipos de metais. Essas desvantagens levaram pesquisadores a analisarem formas para aprimorar o material adicionando outros elementos capazes de suprir essas carências e garantir melhor comportamento, surgindo assim as ligas de alumínio.

2.2.1.1. Ligas de alumínio

As ligas de alumínio são materiais compostos por alumínio e alguma impureza inserida formando um novo material com características diferentes do alumínio puro como mostrado na figura 2.3. Essas impurezas são adicionadas propositalmente para melhorar alguma propriedade específica do material. Essas impurezas podem ser: zinco, magnésio, cobre, manganês ou silício. Pode estar presente mais de uma impureza satisfazendo as características desejadas.

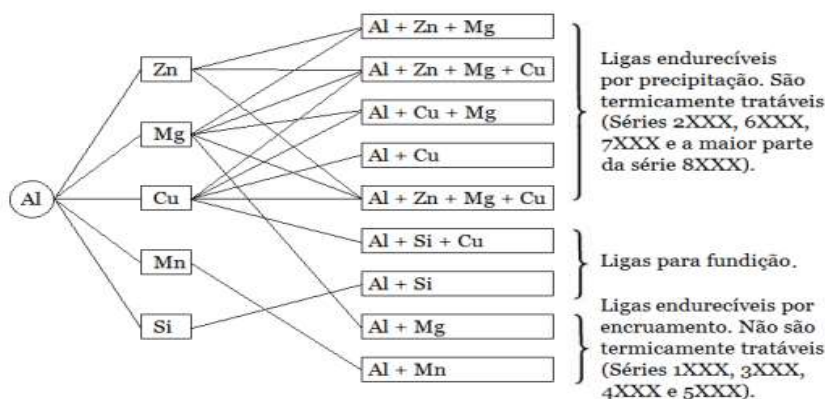


Figura 2.3: Ligas de alumínio termicamente tratáveis, ligas fundidas e ligas endurecíveis por encruamento. (REINKE, 2017).

A tabela 2.1 mostra que as ligas de alumínio são divididas em tratáveis e não tratáveis. As ligas tratáveis são aquelas que podem ter suas características modificadas por tratamentos térmicos e são indicadas por quatro dígitos conforme a (ALUMINUM ASSOCIATION, 2015) sendo o primeiro, o indicador do grupo que a liga está inserida, o segundo representa a quantidade de impurezas na liga original e os dois últimos dígitos são arbitrários indicando o número específico da liga fabricada.

Tabela 2.1: Tipos de ligas

LIGAS FORJADAS		LIGAS FUNDIDAS	
Série da liga	Elemento majoritário da liga	Série da Liga	Elemento majoritário da liga
1XXX	Mais de 99% de alumínio	1XX.X	Mais de 99% de alumínio
2XXX	Cobre	2XX.X	Cobre
3XXX	Manganês	3XX.X	Silício mais cobre e/ou magnésio
4XXX	Silício	4XX.X	Silício
5XXX	Magnésio	5XX.X	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício	6XX.X	Liga não utilizada
7XXX	Zinco	7XX.X	Zinco
8XXX	Outros elementos	8XX.X	Estanho
9XXX	Liga não utilizada	9XX.X	Outros elementos

2.2.1.2. Liga de alumínio 6201

A liga de alumínio 6201 é composta majoritariamente de alumínio, silício e magnésio como a tabela 2.2 mostra podendo conter elementos minoritários como ferro, cobre, manganês ou outros de acordo com a tabela abaixo.

Tabela 2.2: Elementos presentes em ligas de alumínio 6201.

Elemento	Quantidade (%)
Si	0,5-0,9
Mg	0,6-0,9
Fe	0,5(Max)
Cu	0,10 (Max)
Mn	0,03 (Max)
Cr	0,10 (Max)
Al	Restante

O condutor fabricado com a liga 6201 possui propriedades favoráveis à transmissão de energia elétrica e com a inclusão do silício e magnésio no alumínio aumenta sua resistência à corrosão e, por isso, sua utilização tem sido uma forte tendência nas novas linhas de transmissão.

Além da inclusão dos elementos de liga, o condutor passa por tratamento mecânico de conformação através de trefilação para melhorar mais as propriedades do material e posteriormente a um tratamento térmico de endurecimento por precipitação.

2.2.1.3. Trefilação

Inicialmente a liga passa por tratamento mecânico de conformação para que o material obtenha o formato de fios que, enrolados helicoidalmente, constituem o cabo condutor como na figura 2.7. O processo de trefilação consiste em reduzir a seção transversal de uma barra do material em fios através de um canal convergente. O material passa por uma matriz com o diâmetro final desejado que o conforma resultando no formato desejado. Este processo contribui para o aumento da resistência mecânica da liga.

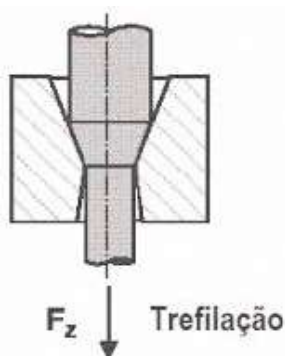


Figura 2.4: processo de trefilação

2.2.1.4. Tratamento térmico

Após a trefilação, o material passa por tratamento térmico que é um processo de aquecimento e/ou resfriamento realizado no material capaz de alterar suas propriedades mecânicas, estrutura metalúrgica ou o estado de tensão residual. Este tipo de processo pode ser realizado apenas em ligas que endurecem através da solubilização e envelhecimento (2XXX, 6XXX, 7XXX e algumas ligas da 8XXX). Os tratamentos térmicos são indicados por uma letra e números que indicam o tipo de tratamento realizado. As letras indicam o estado metalúrgico da liga e podem ser: F - como fabricado, O - recozido, H - encruado, W - solubilizado e T - tratado termicamente.

O foco deste trabalho é o condutor CAL 6201 e será explanado especificamente sobre o tratamento realizado no mesmo, que é o T81. Este tratamento, explicado na figura 2.4, consiste na combinação do processo de endurecimento por precipitação e do tratamento mecânico de trefilação. O endurecimento por precipitação consiste em três etapas sendo a solubilização do material, a têmpera e o envelhecimento que pode ser natural ou artificial.

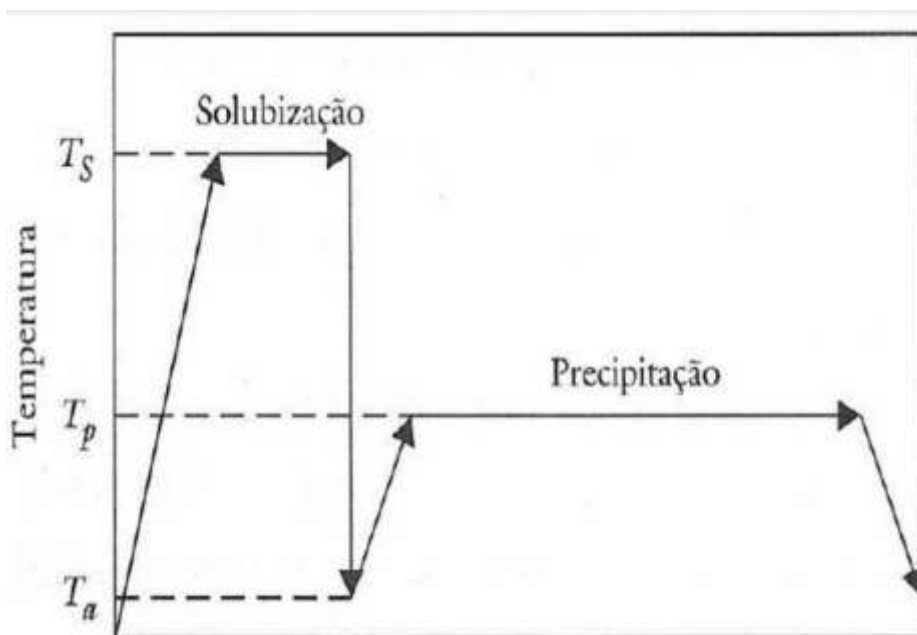


Figura 2.5: Representação das etapas do endurecimento por precipitação (MARTINS, 2008).

2.2.1.5. Solubilização e têmpera

A solubilização consiste no aquecimento do material a uma temperatura acima da linha solvus do diagrama de fases fazendo com que as fases secundárias se dissolvam na estrutura cristalina do alumínio e entrem em solução sólida. Com o material solubilizado é o momento da aplicação da têmpera. Este procedimento consiste em resfriar o material

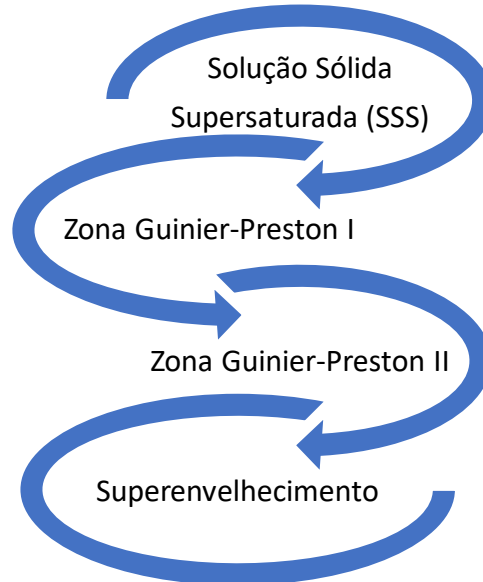
garantindo que a solução sólida mantenha os mesmos elementos mesmo em temperatura ambiente. Dessa maneira o magnésio e silício são retidos em solução e produzem precipitados finos distribuídos na matriz do alumínio produzindo maior resistência mecânica, tenacidade e dureza no material.

Após realizado o processo de solubilização e têmpera, o material tem o silício e o magnésio dissolvidos na matriz do alumínio e encontra-se em solução sólida supersaturada (SSS) em temperatura ambiente indo para o processo de envelhecimento que pode ser natural quando é submetido a temperatura ambiente, ou artificial quando submetido à temperatura mais elevada para formação de precipitados endurecedores.

2.2.1.6. Envelhecimento natural e artificial

O envelhecimento do material consiste no período onde são gerados precipitados mais finos na matriz do alumínio impedindo propagação das discordâncias, obrigando-as a contornar ou romper as partículas de precipitados de Magnésio e Silício. Esse processo torna a liga mais resistente e dura, pois, restringe o movimento das discordâncias.

O envelhecimento passa por quatro fases. São elas:



A liga 6201 recebe o envelhecimento artificial. Conforme é apresentado na figura 2.5, o processo de endurecimento consiste em levar a solução sólida supersaturada (SSS) até zona de Guinier-Preston II (β'') onde os precipitados constituídos de Mg-Si encontrados são finos e com tamanho de até 450 nanômetros dentro da matriz do alumínio alcançando máxima resistência mecânica. Quando os precipitados se tornam maiores que 450 nanômetros são

considerados fora da zona de Guinier-Preston e atingem superenvelhecimento (β) onde os precipitados se tornam grosseiros e menos distribuídos na matriz do alumínio e por consequência, não restringem o movimento das discordâncias causando diminuição na dureza do material.

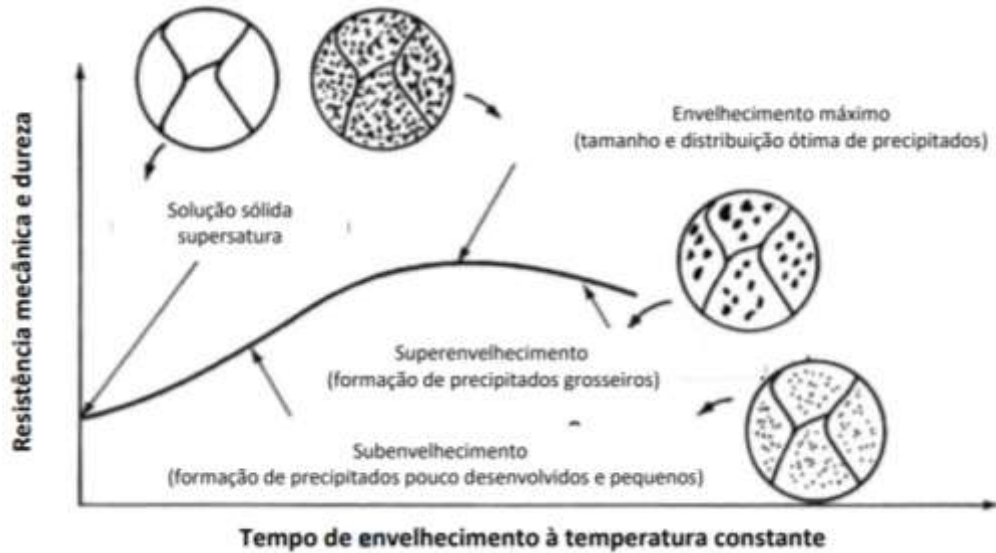


Figura 2.6: Evolução da dureza em ligas de alumínio termicamente tratáveis (MAIA, 2012).

A temperatura é o elemento mais importante do envelhecimento pois determina em quanto tempo será necessário para o material atingir o pico máximo de dureza. Em publicação (MARTINS, 2008) foi levantada a curva de envelhecimento para várias temperaturas da série 6XXX apontando na figura 2.6 que quanto maior a temperatura mais rápido será atingido o pico de resistência mecânica, mas este pico será menor em relação a envelhecimento com maior tempo em temperaturas menores.

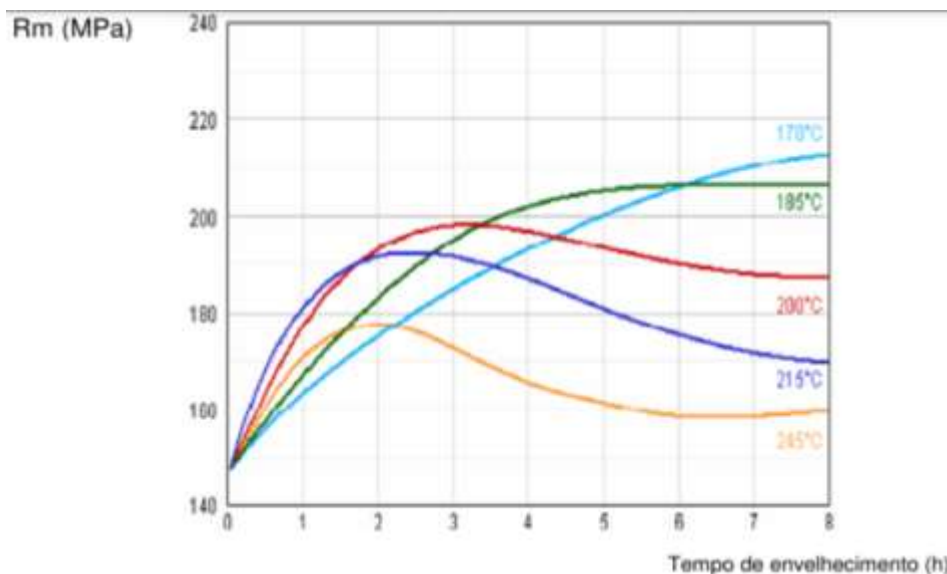


Figura 2.7: Curvas de envelhecimento em várias temperaturas das ligas da série 6XXX (MARTINS, 2008).

2.2.2. CABOS CONDUTORES

Os cabos condutores de energia são os elementos principais de uma linha de transmissão pois são os responsáveis em transportar a carga elétrica e suportar as adversidades climáticas garantindo a durabilidade e segurança do sistema. Por esta razão, são necessários estudos aprofundados para melhor escolha do condutor condizente com a região. Com o desenvolvimento de estudos foram construídos vários tipos de cabos com diferentes materiais, geometrias e processos de fabricação para atender às especificidades de cada região do mundo. Surge assim, inúmeros estudos que estimam a vida útil do condutor sob condições de fadiga eólica visando garantir o transporte e a segurança das linhas de transmissão e análises das fraturas para melhor determinação das causas da ruptura.

2.2.2.1. Tipos de cabos condutores

Os cabos condutores utilizados em linhas de transmissão atualmente são compostos de fios enrolados concêntricamente ao centro sendo que cada camada incluída seja enrolada no sentido inverso à camada anterior garantindo melhor compactação e menor desgaste no contato fio a fio como mostra a figura 2.1.



Figura 2.8: Desenho esquemático de um cabo condutor mostrando as camadas concêntricas.

Os principais tipos de cabos encontrados nas linhas de transmissão atualmente são: o cabo condutor de Alumínio Puro (CA), o cabo condutor de alumínio com alma de aço (CAA), o cabo condutor de alumínio liga (CAL) e o condutor de alumínio reforçado com liga de alumínio (ACAR).

2.2.3.FADIGA

Fadiga é um processo de alteração estrutural permanente, progressivo e localizado, que ocorre num material sujeito a condições que produzem, num ponto ou em vários pontos, tensões ou deformações dinâmicas, capazes de culminar em trincas ou numa fratura completa após um número suficiente de variações de carga conforme a (ASTM STP E1823, 2013) A fadiga pode ser compreendida como esforços cíclicos que podem gerar danos quando aplicados em um material. Desta definição, percebe-se a necessidade de estudos que possibilitem conhecimento quanto à resistência que um material possui em opor-se aos danos que podem ser provocados pela fadiga.

O termo vida em fadiga representa o período em que o material suporta o efeito do carregamento cíclico até que ocorra a falha catastrófica. Portanto, por conta deste carregamento cíclico há o surgimento de uma trinca no material que se torna uma discordância microscópica e cresce até que supera o limite da resistência à fadiga do material e ocasiona a ruptura final. A nucleação de uma trinca pode ocorrer devido a defeitos presentes no material ou por pontos concentradores de tensão provocados pela geometria do elemento analisado. Segundo (GARCIA, 2000) a trinca em fadiga avança de maneira progressiva e cíclica, e a cada novo ciclo de tensão (abertura/fechamento), deixa na macroestrutura da superfície da fratura, marcas características que podem ser observadas ao microscópio eletrônico, chamadas de marcas de praia. Essas marcas de praia são semicírculos que surgem a partir da origem da trinca facilitando a identificação do início da fratura. As marcas de praia estão presentes na zona de propagação da trinca indicando a direção que a discordância percorre até atingir o ponto da ruptura final. Este é o momento em que o limite de tenacidade à fratura é superado e a seção transversal remanescente não resiste à carga e o material se rompe completamente. Na figura abaixo têm-se a representação da superfície fraturada pelo processo de fadiga.

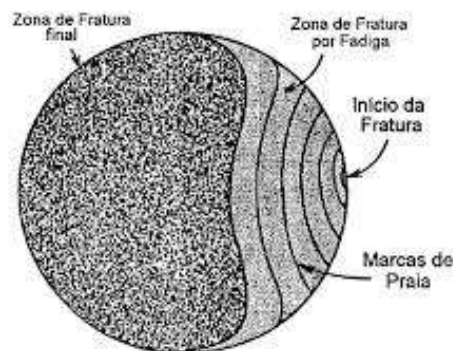


Figura 2.9 – Representação da fratura por fadiga (REED-HILL, 1982).

2.2.3.1. Método S-N de previsão da vida em fadiga

Em 1850 August Wohler desenvolve a primeira metodologia para estudar o comportamento dos materiais metálicos submetidos à fadiga. Foram realizados ensaios relacionando a tensão e a quantidade de ciclos até que ocorresse a falha em corpos de prova padronizados. Com esta metodologia foram plotados gráficos de tensão versus números de ciclos que ficaram conhecidos como a Curva de Wöhler ou a Curva S-N. Ainda hoje esta metodologia é amplamente utilizada para determinação da vida em fadiga de materiais. Os pontos do diagrama S-N são obtidos no ensaio de fadiga onde a amplitude de tensão alternada (S) se mantém constante durante o ensaio até que a falha ocorra em determinado número de ciclos (N). A curva S-N básica é obtida quando a tensão média é zero, isto é, a tensão mínima é compressiva com $|\sigma_{min}| = |\sigma_{max}|$, a razão de carregamento é $R = -1$ (FADEL, 2010).

São escolhidos três níveis de tensão sendo um nível mais alto, um nível intermediário e um nível inferior. São realizados ensaios nestes níveis e adquiridas as quantidades de ciclos suportados em cada nível. Em seguida, é plotado um gráfico com o número de ciclos na abscissa e os níveis de tensão na ordenada geralmente em escala logarítmica. O número de ciclos até a falha por fadiga do material em dado nível de tensão σ_a é dado por:

$$\sigma_a = a_n^b \quad (2.1)$$

2.2.3.2. Amplitude de tensão

A fadiga ocorre quando o material está submetido a uma tensão que varia com o tempo, portanto, o efeito acontece com base nos ciclos de carregamentos que o componente é submetido. Os ciclos de carregamento podem ser: ciclos com amplitude de tensão constante ou variáveis. Os ciclos de carregamentos com amplitude de tensão constante são geralmente representados por uma onda senoidal respeitando a equação 2.2:

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a \text{sen}(2\pi t f) \quad (2.2)$$

O símbolo σ_a representa a amplitude de tensão que é a média aritmética da diferença entre a tensão máxima, σ_{max} e a tensão mínima, σ_{min} ou a diferença entre σ_{max} e a tensão média, σ_m , de acordo com a equação 2.4. A tensão média (σ_m) é o valor médio da tensão aplicada no ciclo conforme a equação 2.5:

$$\sigma_a = \sigma_{max} - \sigma_m = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (2.4)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (2.5)$$

Quando é um ciclo alternado de tensões, os valores absolutos da tensão máxima e mínima são iguais, portanto, tem-se que $R = -1$, e no repetido ou flutuante, $R = 0$ como mostrado na figura 2.9.

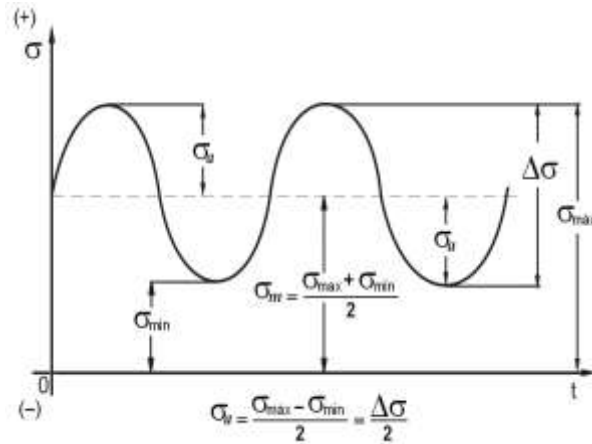


Figura 2.10: Ciclos de fadiga de amplitude constante.

2.2.3.3. Fadiga em cabos condutores

O cabo instalado em linhas de transmissão aéreas está constantemente submetido a vibrações induzidas pela passagem do vento no condutor. A velocidade, o ângulo, a massa, o tipo de cabo, tamanho do vão e a carga de esticamento são fatores que influenciam essa vibração. Essas vibrações produzem carregamentos cíclicos que, combinados com o processo de fretting, geram trincas nos materiais, crescimento dessas discordâncias que levam à ruptura. Esse efeito é conhecido como fadiga em cabos condutores. A falha ocorre geralmente nos pontos da LT que restringem o movimento do cabo como grampos de fixação e ancoragem, amortecedores, entre outros (CIGRE SC22 WG04, 1985).

2.2.3.3.1. Fadiga por fretting

Fadiga por fretting é decorrente do contato entre duas superfícies em contato desgastando e gerando as zonas de iniciação de trincas levando a reduções da resistência à carregamentos cíclicos ilustrado na figura 2.10.

O processo de fretting em cabos condutores ocorre a partir do deslizamento entre fios ou entre fios e grampos que retiram a camada do filme de óxido presente na superfície do cabo do alumínio. Inicialmente as regiões de fricção tendem a se aderir, mas com o movimento entre os fios provocam acúmulo de alumina e inicia o desgaste do material até que são geradas micro trincas que se propagam e podem gerar a falha completa do componente.

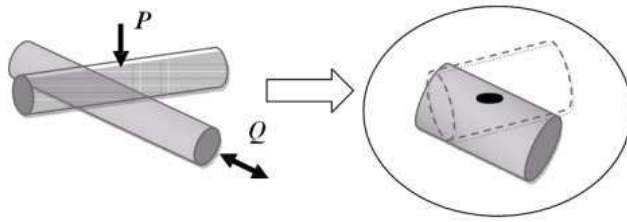


Figura 2.11: Desenho esquemático do problema de contato entre dois cilindros (MURÇA, 2011).

2.2.3.3.2. Poffenberger-Swart

Para calcular a tensão nominal do cabo é utilizado o modelo proposto por (POFFENBERGER SWART, 1965) que consiste em estabelecer relação entre o deslocamento e a amplitude de tensão. Este modelo considera a região do cabo no ponto de restrição de movimentos (Figura 2.11). O nível de tensão nominal em um fio da camada mais externa do cabo é obtido pela correlação com uma amplitude de deslocamento vertical pico a pico (Y_B), do condutor com relação ao grampo de suspensão.

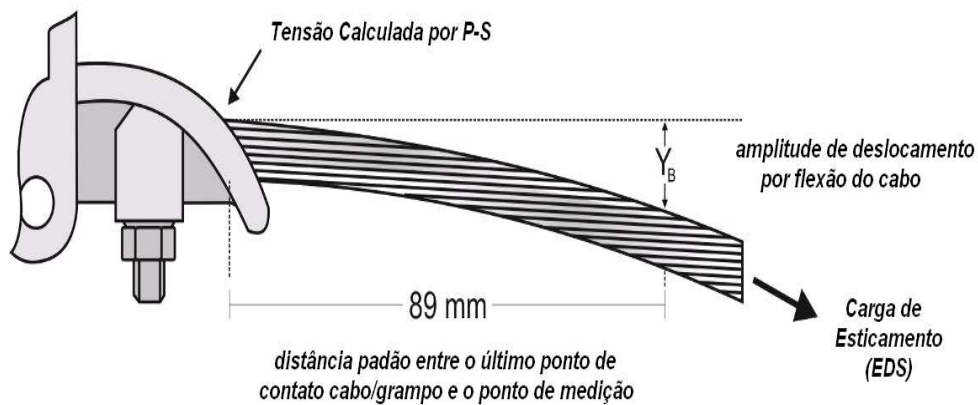


Figura 2.12: Esquema da montagem cabo-grampo (WATANABE, 2014).

O Y_B é medido a 89 mm do último ponto de contato (UPC) entre o grampo e o condutor. O valor da tensão de flexão pode ser obtido através da equação apresentada a seguir:

$$\sigma_a = KY_B \quad (2.7)$$

onde σ_a é a faixa de tensão dinâmica, Y_B é a amplitude de deslocamento e o K [N/mm^3] é obtido pela equação 2.8:

$$K = \frac{E_a d p^2}{4(e^{-px} - 1 + px)} \quad (2.8)$$

onde E_a [MPa] e d [mm], o módulo de elasticidade e o diâmetro dos fios de alumínio da camada externa do cabo, respectivamente; x é a distância ao longo do cabo entre o UPC e o ponto de medição, padronizado como 89 mm. O valor de p é igual a:

$$p = \sqrt{\frac{T}{EI}} \quad (2.9)$$

onde T [N] é a carga de esticamento para a temperatura média durante a medição, EI [N.mm²] é a rigidez à flexão do cabo, cujo valor mínimo é dado pela equação 2.10:

$$EI_{min} = n_a E_a \frac{\pi d_a^4}{64} + n_s E_s \frac{\pi d_s^4}{64} \quad (2.10)$$

na qual n_a , E_a , d_a são respectivamente, o número, diâmetro individual e o módulo de elasticidade dos fios de alumínio, e n_s , E_s , d_s são respectivamente, o número de fios, o módulo de elasticidade dos fios de aço e diâmetro individual. Desta forma, a fórmula de *Poffenberger-Swart* é a melhor aproximação para os níveis de tensão na camada mais externa do cabo.

2.2.3.4. Fadiga em alta temperatura

A resistência à fadiga dos metais é a característica que possuem em suportarem carregamentos cíclicos durante um determinado período de tempo. Todavia, o ambiente que este metal está submetido é relevante para a sua vida em fadiga pois fatores como corrosão, fretting e temperatura podem ser severos nos materiais (OLIVEIRA, 2001).

Em diversos sistemas da engenharia estão presentes temperaturas elevadas como em motores, turbinas e cabos condutores, portanto, trata-se de fadiga em altas temperaturas. Neste cenário, existe uma preocupação crescente com o fator temperatura de operação dos materiais porque está diretamente relacionado com uma maior eficiência termodinâmica.

O comportamento em fadiga em metais e as previsões de vida são mais complexos em altas temperaturas do que em temperatura ambiente porque podem envolver uma interação complexa com processos termicamente ativados e dependentes do tempo como oxidação, fluência e aspectos metalúrgicos. Em alguns materiais a presença de elevada temperatura interfere positivamente enquanto em outros materiais seu resultado é negativo. Metais e aços trabalhados a frio, quando submetidos a pequenas amplitudes de deformação em alta temperatura, sofrem um amolecimento cíclico enquanto materiais recozidos, algumas ligas de alumínio e aços temperados, quando submetidos a carregamento cíclico em alta temperatura são alterados com endurecimento por deformação dinâmica.

A fadiga em altas temperaturas é classificada em três categorias: fadiga térmica, fadiga isotérmica e fadiga termomecânica. A fadiga térmica representa a imposição de ciclos térmicos a um corpo-de-prova, ou seja, variação de temperatura em um material estático. A fadiga isotérmica consiste em aplicar ciclos de tensão ou deformação no corpo-de-prova mantendo a temperatura constante. Quando ocorrem variações simultâneas de deformação e temperatura chama-se fadiga termomecânica.

Geralmente a resistência à fadiga decresce com o aumento da temperatura. As exceções são os materiais que apresentam endurecimento por deformação cíclica, que é acompanhado por uma queda na ductilidade.

Outro fator que interfere no comportamento em fadiga dos metais é o tamanho do grão. Os materiais com grãos finos tendem a ter maior resistência à fadiga, enquanto que grãos grosseiros resultam em maior resistência à fluência. Dessa forma, em temperaturas moderadas, grãos finos resultam em maior resistência quando a fadiga é o processo dominante, enquanto que grãos grosseiros são mais desejáveis a temperaturas de operação muito altas, onde a fluência é o processo dominante.

2.2.4. TEMPERATURA DE PROJETO

Na figura 2.12 é apresentada a temperatura aceitável no condutor é definida na fase de projeto da LT com base na máxima distância entre o condutor e o solo que mantenha a segurança do sistema conforme a norma 5422/1985 (ABNT NBR 5422, 1985).

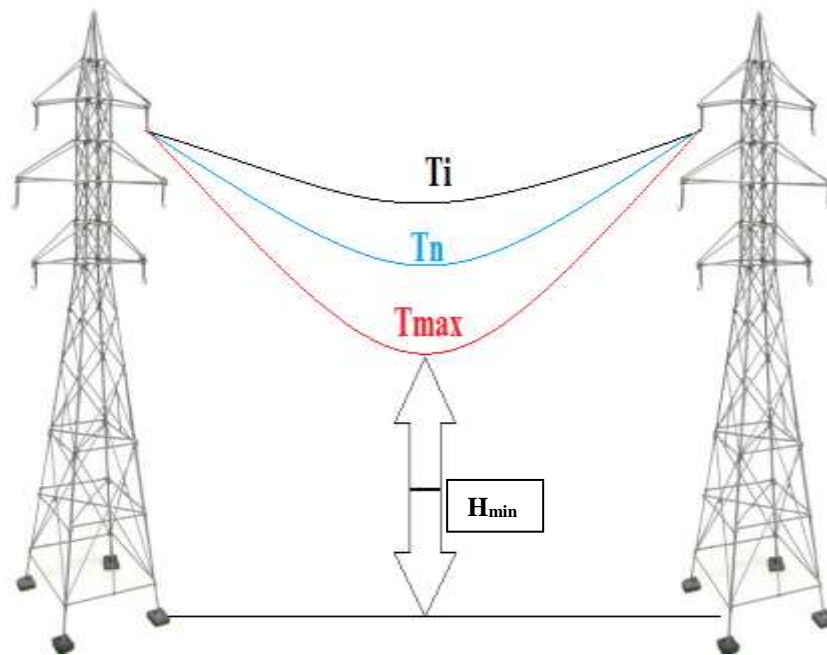


Figura 2.13: Flecha máxima aceitável em linha de transmissão.

A temperatura inicial (T_i) é a temperatura no condutor sem passagem da corrente elétrica, a temperatura de longa duração (T_n) é a temperatura aceitável no condutor com passagem de corrente elétrica de longas durações e a temperatura máxima (T_{max}) representa a temperatura aceitável em curta duração (picos e horários de maior demanda) no condutor para que permaneça a distância mínima tolerável (H_{min}) entre o condutor e o solo.

A temperatura de projeto é definida considerando a dilatação do condutor em relação à temperatura, a distância entre torres subsequentes e fatores climáticos com base na flecha máxima que o mesmo pode apresentar. Esses fatores climáticos são dados estatísticos fornecidos por empresas meteorológicas e geralmente apresentam alto nível de conservadorismo e imprecisão por estarem vinculados à fatores de difícil verificação o que acarreta em subutilização da linha de transmissão.

2.2.5. PRINCÍPIO DO BALANÇO TÉRMICO

Definida a temperatura de projeto, calcula-se a máxima ampacidade da linha por meio do princípio do balanço térmico (figura 2.13) redigido pela norma (CIGRE WG 22-12, 2002). Esta metodologia de cálculo formulada pelo princípio do balanço térmico possui alto nível de conservadorismo já que utiliza fatores climáticos difíceis de serem previstos como incidência do vento sobre o cabo e radiação solar. Por esta razão, as linhas de transmissão são subutilizadas e poderiam transmitir mais corrente elétrica. Atualmente as concessionárias de energia elétrica brasileira utilizam dados meteorológicos (imprecisos) pontuais aplicados a esta norma para estimar a ampacidade de cabos. Utilizam para os cálculos a situação no ponto climático mais crítico da linha o que torna a determinação da ampacidade muito conservadora.

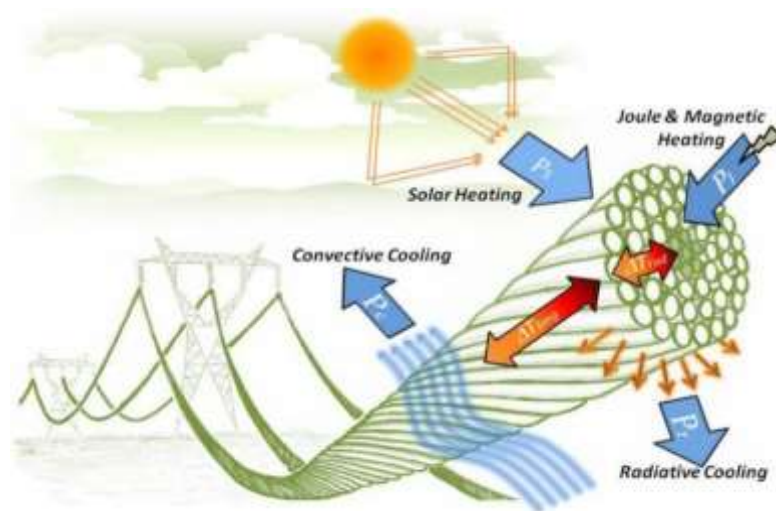


Figura 2.14: Princípio do balanço térmico. (CIGRE WG B2-42 601, 2014).

Neste sentido, são calculados os fatores que afetam a temperatura do cabo para que se mantenham em equilíbrio, ou seja, não superem a temperatura de projeto pré-estabelecida. O calor gerado pela corrente que atravessa o condutor e o aquece por meio do efeito Joule (P_j) e da incidência do sol (P_s) devem se equilibrar com as perdas de calor por meio de radiação (P_r) e pela incidência do vento sobre o cabo (P_c) conforme a equação 1.1:

$$P_j + P_s = P_c + P_r \quad (1.1)$$

Estatisticamente são definidos os valores da radiação solar que aquece o condutor, da incidência do vento que provoca resfriamento e da perda por irradiação enquanto através da fórmula da ampacidade (figura 2.14) calcula-se então a corrente elétrica que o condutor pode transportar mantendo a LT em níveis de segurança adequados.

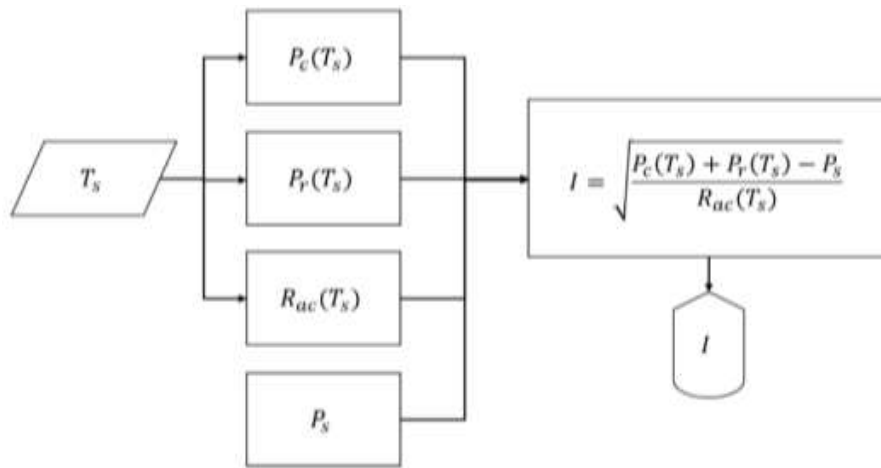


Figura 2.15: Cálculo da ampacidade (CIGRE WG B2-42 601, 2014).

Analisando o processo para definição da ampacidade da linha de transmissão, verifica-se que é definida primeiramente a temperatura de projeto com base no critério da máxima flecha (fluência), em seguida, através de um cálculo impreciso e conservador, chega-se ao valor da corrente elétrica permitida no condutor. Mas diante deste processo, observa-se que em nenhum momento o critério da influência que a temperatura pode realizar na vida em fadiga do cabo condutor é levado em consideração pois a preocupação está apenas em atender os requisitos da norma.

Neste cenário surge a motivação de realizar esta pesquisa que avalia a influência da temperatura na vida em fadiga do condutor de energia para determinar se o aumento da ampacidade e, por consequência, da temperatura no condutor é um fator positivo ou negativo em termos de comportamento mecânico da linha de transmissão.

2.2.6. DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS

2.2.6.1. Controlador de temperatura

O controlador de temperatura é um instrumento que proporciona o controle de temperatura em uma região estabelecida. O mesmo recebe pulsos através de seus pinos de entrada que determinam a alimentação ou não da saída conectada a um dispositivo, tal como uma resistência elétrica produzindo calor necessário para atingir a temperatura solicitada.

2.2.6.2. Sistema de controle proporcional, integral e derivativo (PID)

O sistema de controle proporcional, integral e derivativo (PID) é um algoritmo de controle de alto desempenho capaz de proporcionar a melhor resposta com precisão e exatidão no menor espaço de tempo possível em sistemas de malha fechada. Este atua diretamente na diferença entre o comando solicitado e o valor real. Seu funcionamento consiste em enviar pulsos proporcionais, integrais ou derivativos para que a saída do sistema alcance de forma mais rápida, estável e precisa a resposta desejada.

A combinação destas ações de controle forma o controlador conhecido na indústria como PID apresentada na figura 2.15.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + \frac{K_d de(t)}{dt} \quad (2.11)$$

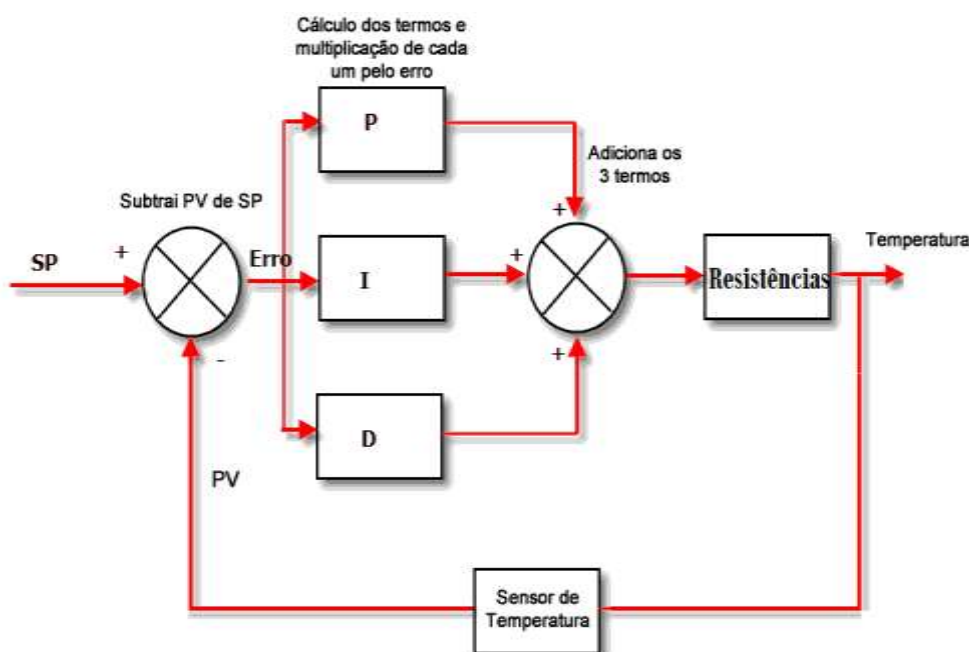


Figura 2.16: Sistema de controle com ações PID (BEQUETTE, 2006).

2.2.6.2.1. Ação proporcional

A ação proporcional opera na variável de controle proporcionalmente ao erro, ou seja, quanto mais distante do sinal desejado, mais potência fornece ao sistema e quando se aproxima do valor solicitado, diminui-se proporcionalmente o fornecimento da potência minimizando altos picos de temperatura.

Esta ação incrementa uma constante de proporcionalidade ao erro (figura 2.16) de forma que permite alcançar mais rapidamente o sinal desejado.

$$P_{saída} = K_p e(t) \quad (2.12)$$

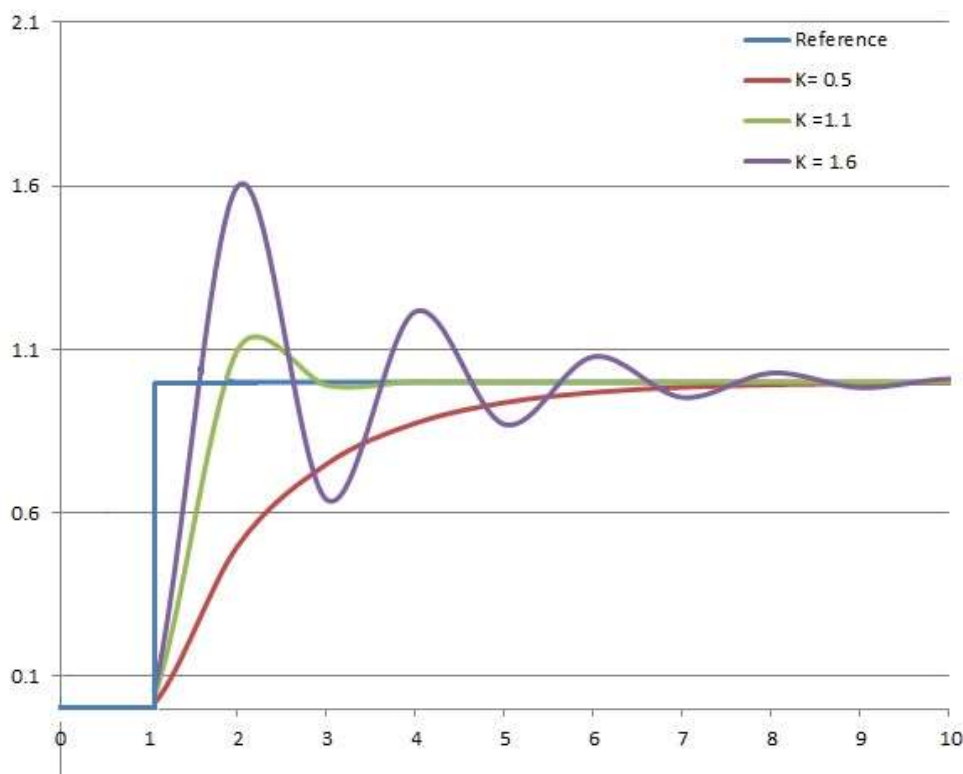


Figura 2.17: Gráfico da ação proporcional (BEQUETTE, 2006).

2.6.2.2.2 Ação integral

A ação integral (figura 2.17) intervém na variável de controle com base no tempo em que o erro acontece, ou seja, minimiza o tempo de estabilização do sistema incrementando ou decrementando pulsos de potências que forneçam a temperatura solicitada no menor tempo possível.

$$I_{saída} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.13)$$

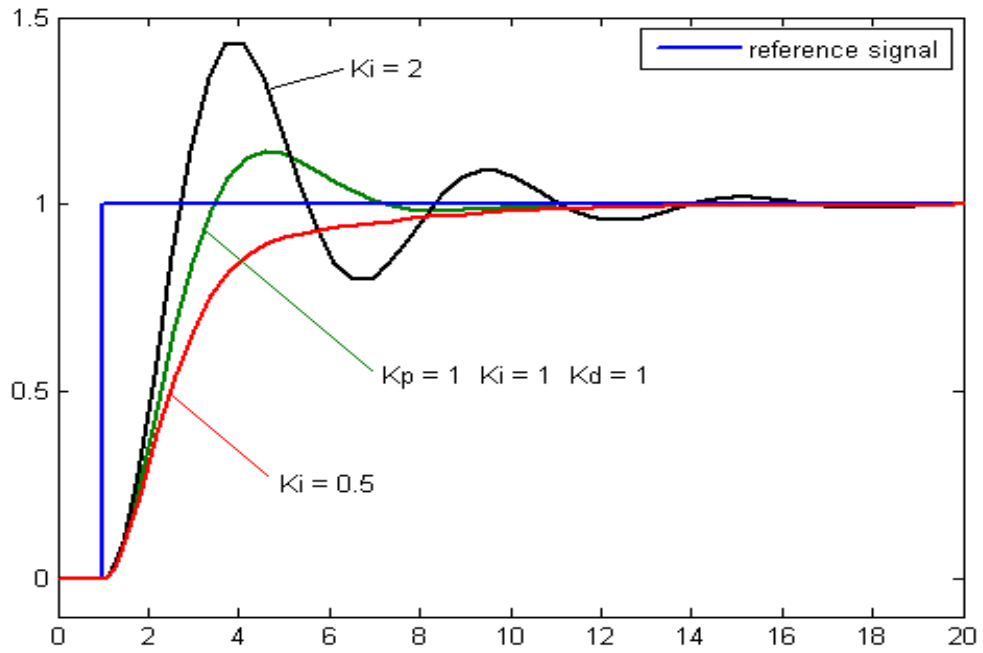


Figura 2.18: Gráfico da ação integral (BEQUETTE, 2006).

2.2.6.2.3. Ação derivativa

Ação derivativa (figura 2.18) ajusta a variável de controle para obter a menor taxa de variação possível do erro, portanto, é responsável pela exatidão do sistema garantindo que a temperatura selecionada seja a temperatura real do sistema.

$$D_{saída} = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.14)$$

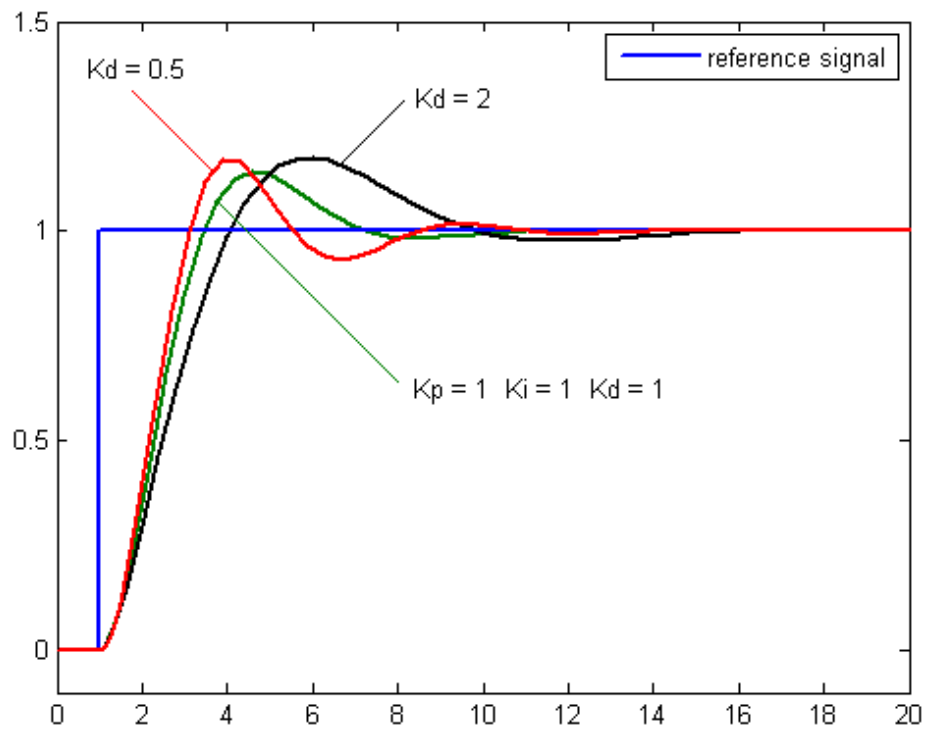


Figura 2.19: Gráfico da ação derivativa (BEQUETTE, 2006).

2.2.6.3 Comutador Eletromecânico

O comutador eletromecânico é um dispositivo que tem a capacidade de ativar ou desativar circuito com base na corrente elétrica presente na entrada. Possui uma bobina interna que permite ou proíbe a passagem de corrente elétrica para o circuito.

2.2.6.4 Termopar

Termopar é um sensor responsável pela captação de sinais elétricos que realizam a aferição da temperatura. É constituído de dois metais distintos, unidos por suas extremidades. Devido à gama de modelos e especificações técnicas, é realizada avaliação das características para averiguar qual é o tipo adequado de termopar para a aplicação (tabela 2.3). Um termopar é constituído de dois metais distintos que unidos por sua extremidade formam um circuito fechado. O termopar desta maneira gera uma Força Eletromotriz (FEM), que quando conectada a um instrumento de leitura, consegue ler a temperatura do processo destes termopares. Existem diversos tipos de termopares que se diferem principalmente pela sua composição e escala.

Tabela 2.3: Tipos de termopares

TIPO	COMPOSIÇÃO	ESCALA	APLICAÇÃO
T	Cobre (+) ou Cobre-Níquel (-)	-200 a 370°C	atmosferas oxidantes, redutoras, inertes e no vácuo e para medições de temperaturas abaixo de zero
J	Ferro/Cobre (+) Cobre-Níquel (-)	-40 a 760°C	Utilizados em atmosferas oxidantes, redutoras, inertes e no vácuo. Apresenta baixo custo.
E	Níquel-Cromo/Cobre (+) Cobre-Níquel (-)	-200 a 870°C	Próprios para atmosferas oxidantes e inertes. Adequado para uso em temperaturas abaixo de zero.
K	Níquel-Cromo (+) Níquel-Alumínio (-)	-200 a 1260°C	Recomendável para atmosferas oxidantes ou inertes. Seu uso no vácuo é por curto período de tempo.
S	Platina-10% Ródio (+) Platina (-)	0 a 1600°C	Recomendáveis em atmosferas oxidantes ou inertes. Apresenta boa precisão em temperaturas elevadas.
R			
B	Platina-30% Ródio (+) Platina-6% (+)/(-)	600 a 1700°C	Não devem ser usados abaixo de zero grau, no vácuo, em atmosferas redutoras ou atmosferas com vapores metálicos. Mais adequado para altas temperaturas que os tipos S/R.
N	Níquel-Cromo-Silício (+) Níquel-Silício (-)	-200 a 1260°C	Excelente resistência à oxidação até 1200°C, curva f.e.m.x Temp., similar ao tipo K, porém, possui menor potência termoelétrica e apresenta maior estabilidade e menor drift tempo.

2.2.6.5 Resistência Elétrica

Resistência elétrica é a capacidade que um material tem de se opor à passagem da corrente elétrica quando há uma diferença de potencial aplicada no circuito. O cálculo da resistência elétrica é realizado através da primeira Lei de Ohm e sua unidade de medida é ohms.

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.15)$$

Sendo: R: Resistência elétrica
V: É a diferença de potencial entre as extremidades do resistor;
I: É a corrente elétrica que atravessa o resistor.

Esta resistência elétrica, quando percorrida por uma corrente elétrica, se aquece produzindo calor. Este efeito é chamado de Efeito Joule e representa o resultado dos choques dos elétrons contra os átomos do condutor. Este efeito caracteriza a transformação da energia elétrica em energia térmica e sua fórmula expressa a relação entre o calor gerado e a corrente que percorre um condutor em determinado tempo sendo expressada por:

$$Q = I^2 \times R \times t \quad (2.16)$$

Onde: Q: Representa o calor produzido pela corrente;
I: Representa a corrente elétrica;
R: É a resistência elétrica que o condutor possui.
t: O intervalo de tempo que o condutor está submetido à corrente elétrica.

2.2.6.6 Tipos de Aquecimento

Os tipos de transferência de calor são por convecção, condução e irradiação. A convecção ocorre em fluidos formando correntes convectivas que transmitem o calor até que todo o fluido entre em equilíbrio térmico. O aquecimento por convecção pode ser natural que consiste no aquecimento da resistência metálica que aquece o ar nesta região provocando uma movimentação natural do fluido e artificial onde há algum componente que direcione o fluido para alcançar mais rapidamente o equilíbrio térmico. O modo de transferência por condução é mediante contato entre superfície de dois ou mais corpos em diferentes temperaturas enquanto o modo de transferência por irradiação é a transferência de calor através de ondas eletromagnéticas.

2.2.7 DUREZA

Dureza é a propriedade mecânica que quantifica a resistência à penetração de um material em outro. Assim, os ensaios de dureza consistem em imprimir uma pequena marca na superfície do material com uma ponta de penetração e medir esta marca para determinar qual nível de dureza possui o material como mostrado na figura 2.19.

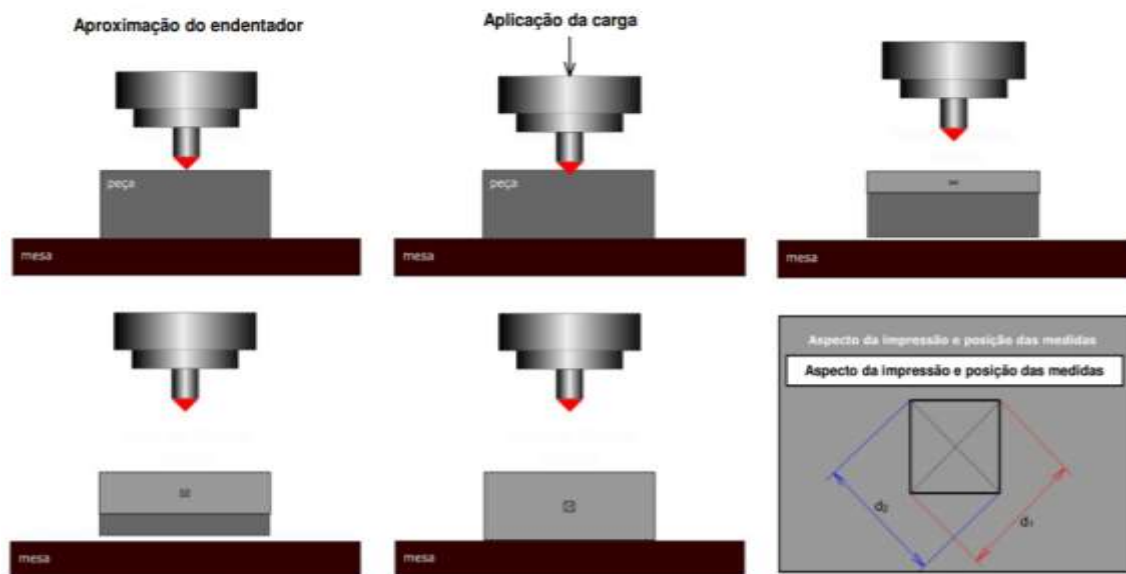


Figura 2.20: Ensaio de dureza (FERREIRA, 2011).

O ensaio de dureza não é destrutivo uma vez que marca uma pequena parcela da peça e não inviabiliza seu uso posterior.

2.2.8 ANÁLISE DA FALHA

A análise de falhas é um processo que se aplica a amostras fraturadas para compreensão aprofundada da causa que provocou aquele tipo de falha. O objetivo da realização desta análise é definir as causas e estabelecer novas ações que possibilitem a resolução do problema, ou ao menos a redução de fatores que contribuam para a fratura obtendo maior durabilidade de componentes envolvidos em um sistema.

A fratura é a completa separação do material em duas partes quando a trinca cresce até se tornar instável e alcançar o rompimento total. Para que isso não ocorra novamente a superfície fraturada passa por investigação e análise através de minucioso processo estabelecido em ASM, volume 11 de 2002 (ASM Vol 11, 2002) que consiste em:

- Selecionar e identificar as amostras,
- Realizar a limpeza e preservar as características da amostra,
- Realizar verificação macroscópica,
- Realizar verificação microscópica,
- Analisar as tensões envolvidas para determinação do modo de fratura.

2.2.8.1 Seleção, identificação e limpeza de superfícies

É importante preservar a superfície fraturada para precisão na identificação da causa, portanto, é necessário cuidado para não perder informações que podem ser importantes no processo. Assim, a amostra deve ser identificada com as informações e características como tipo de material, carga em que o material esteve submetido, entre outros.

Selecionada a amostra, deve ser isolada das demais presente para ser levada à análise e às vezes é necessária a limpeza para melhor visualização na análise macroscópica e microscópica, mas é importante cautela na limpeza não sendo permitido uso de agentes químicos que possam alterar as condições da superfície fraturada para evitar equívoco nas determinações da causa.

2.2.8.2. Análise macroscópica

A verificação macroscópica é a fase inicial do processo de identificação da causa da fratura, sendo feita a olho nu, lupa ou utilizando microscópios com aumentos de até 100 vezes. Nesta verificação são coletadas informações fundamentais como o formato e tamanho da fratura, concentradores de tensão, trincas na peça e direção do crescimento da trinca apontando o início e término da trinca.

Este tipo de análise traz observações fundamentais também sobre o tipo de material que foi fraturado apresentando as características que condizem com fraturas frágeis ou dúcteis e modo da falha com base na carga aplicada.

2.2.8.3. Análise microscópica

A análise microscópica consiste em uma abordagem mais profunda da fratura com investigação de causas mais específicas e geralmente é realizada através de microscópios com maior capacidade de aumento e alta resolução como os microscópios óticos e eletrônicos de varredura.

2.2.8.4. Microscópio ótico

O microscópio ótico possui um aumento máximo de duas mil vezes pois a partir daí, a imagem perde em resolução dificultando a visualização de detalhes importantes. Este tipo de microscopia utiliza uma fonte de iluminação visível ou invisível com radiação de comprimento de onda menor que a luz para melhor resolução que, quando direcionada à amostra, permite a verificação da superfície fraturada (figura 2.20).



Figura 2.21: Microscópio óptico (ASPDEN, 2015).

2.2.8.5. Microscópio eletrônico de varredura (MEV)

O microscópio eletrônico de varredura (figura 2.21) possui maior profundidade de campo e ampliação em relação ao microscópio óptico e possibilita análise mais abrangente como espectroscopia de energia dispersiva e detecção do tipo de carregamento aplicado ao componente. Com seu feixe de elétrons movendo-se em um padrão x-y através do material, obtém-se sinais que apresentam informações da composição e estrutura.



Figura 2.22: Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV.

O uso do MEV permite grandes aumentos da superfície de fratura que revelem características dos dimples presentes facilitando a verificação do tipo de carregamento (figura 2.22). O modo I representa carregamento predominantemente de tração e as microcavidades, chamadas de dimples, possuem formato equiaxial enquanto os modos II e III apresentam dimples alongados e elípticos que mostram carregamento cisalhante no modo II ou de rasgamento no modo III.

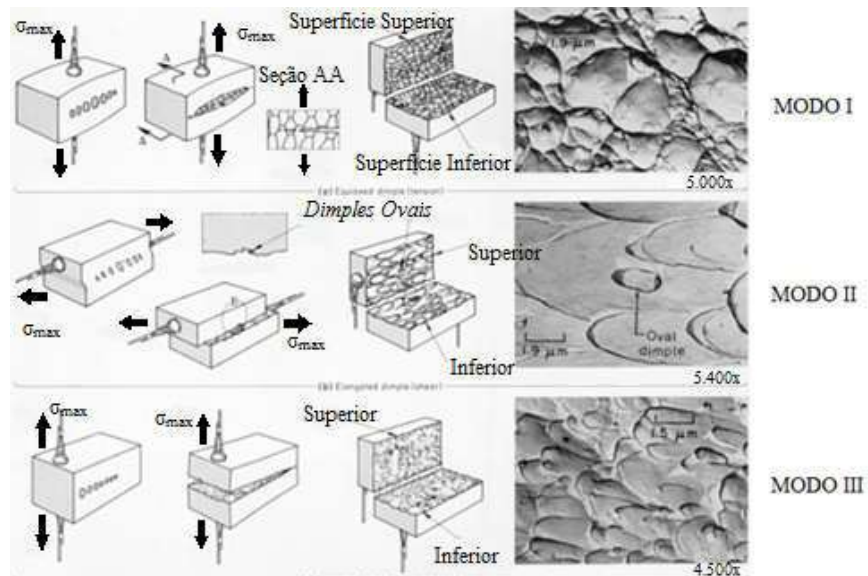


Figura 2.23: Formato das microcavidades em modos distintos de carregamento (ASM Vol 11, 2002).

A análise com o MEV revela informações a respeito do tipo de fratura. Fraturas dúcteis são caracterizadas por passarem por deformações plásticas significativas com alto gasto de energia e a superfície torna-se rugosa e fosca. Já as fraturas frágeis possuem baixo gasto de energia e pouca deformação plástica com a superfície geralmente brilhosa.

As imagens capturadas neste equipamento também nos permitem caracterizar a propagação da trinca até a fratura indicando as zonas específicas do processo apresentada na figura 2.23. No caso de carregamento cíclicos é possível verificar o início da fratura pela presença das marcas de praia indicando o ponto inicial da trinca. As marcas de praia são resultados da oscilação da carga e/ou da oxidação da superfície.

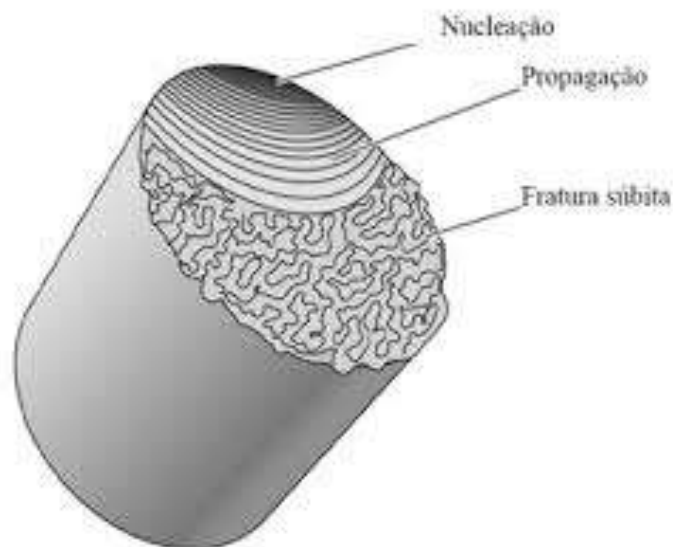


Figura 2:23: Superfície com zonas de nucleação, propagação e fratura (PEREIRA, 2016).

3. METODOLOGIA

Esta seção tem por escopo apresentar os materiais, dispositivos, equipamentos utilizados no ensaio de fadiga em altas temperaturas, o processo da fabricação da cúpula desenvolvida e os métodos utilizados nos ensaios. Especificadamente, são descritos: a cúpula térmica para aquecimento de cabos condutores, os ensaios de credenciamento da cúpula, a bancada de ensaios de fadiga e os métodos para realização dos ensaios de fadiga em alta temperatura, o tratamento térmico, os ensaios de dureza e as análises de falhas.

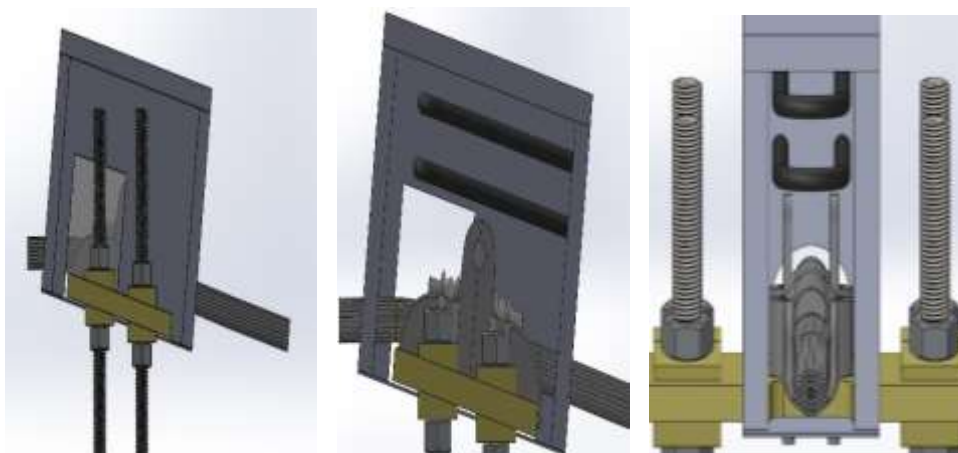
3.1 CÚPULA PARA AQUECIMENTO DE CABOS CONDUTORES

3.1.1 Processo de fabricação

Para realização dos ensaios de fadiga em alta temperatura foi necessário o desenvolvimento de um dispositivo capaz de aquecer a região crítica onde ocorre o processo de fadiga do condutor por se tratar da localização onde são detectados maiores pontos de tensão.

Foi projetada a cúpula adequando-a para posicionar no castelo de fixação do grampo de suspensão. Cálculos foram realizados para definir o melhor dimensionamento e os materiais a serem utilizados para que alcançasse maior eficiência e menor custo como mostrado na figura 3.1.

Foi desenvolvido estudo para construção de um dispositivo que garantisse segurança para o usuário, precisão e exatidão no controle da temperatura, baixa dispersão de calor e alta eficiência energética.



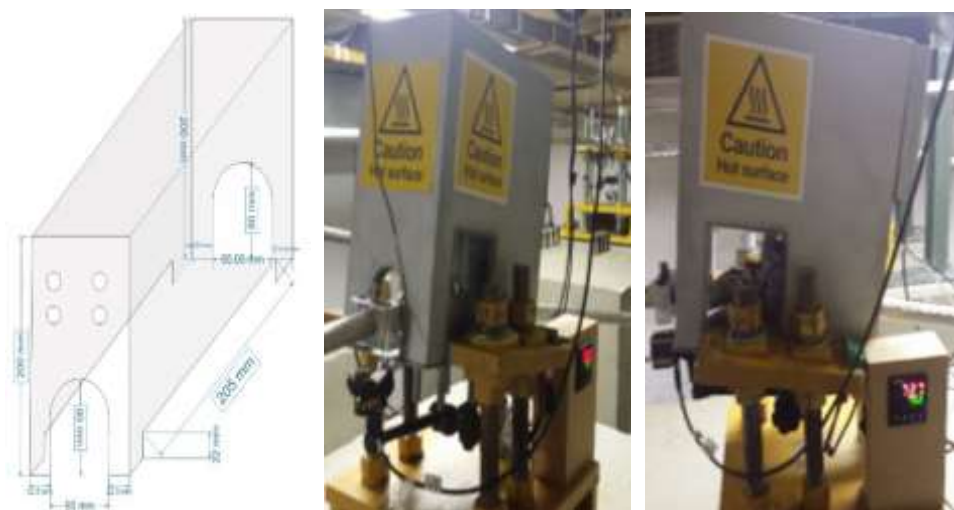


Figura 3.1: Cúpula térmica. (a) Desenho da vista lateral, (b) Desenho das resistências internas, (c) Desenho da vista frontal interna, (d) Dimensionamento da cúpula, (e) Vista frontal da cúpula e (f) Vista lateral da cúpula.

A cúpula foi construída com paredes duplas de aço 1020 separadas por uma manta de lã de vidro (figura 3.2a) responsável por reter o calor na região interna do dispositivo uma vez que possui elevado desempenho térmico e propriedade de incombustibilidade. Foi inserido um visor em vidro borossilicato temperado 100mm x 100mm e 10mm de espessura (figura 3.2b) que suporta temperaturas até 300°C que permite inspeção visual do grampo de suspensão e do cabo condutor na região crítica do sistema, facilitando a detecção de quebras.



Figura 3.2: Sistema de retenção e inspeção visual. (a) Manta de lã de vidro e (b) Visor para inspeção do sistema.

Para a segurança do usuário, o dispositivo foi construído com disjuntor elétrico de proteção de 10 amperes (figura 3.3b), comunicação visual de segurança (figura 3.3a) e proteção de acesso à fiação e aos conectores da resistência elétrica (figura 3.3c) proporcionando proteção a choques elétricos.



Figura 3.3: Sistemas de segurança. (a) Comunicação visual de segurança, (b) disjuntor elétrico, (c) proteção da fiação e dos conectores.

3.1.2 Sistema de controle e monitoramento do dispositivo

Para realizar o controle da temperatura na cúpula térmica foi desenvolvido um sistema de controle e monitoramento capaz de proporcionar eficiência e segurança para o dispositivo. Desta forma, foi elaborado circuito eletrônico com um controlador PID, um comutador eletromecânico, duas resistências elétricas e um termopar. O princípio de funcionamento consiste em um circuito de malha fechada onde o termopar é fixado nas proximidades do UPC monitorando a temperatura. Essa informação é lida pelo controlador que por sua vez compara a temperatura monitorada com a temperatura selecionada. Em caso de temperatura inferior à solicitada, o controlador aciona o comutador eletromecânico que permite a passagem da corrente até às duas resistências aquecendo o conjunto. Aproximando-se da temperatura desejada o controlador vai diminuindo a corrente elétrica nas resistências até que atinja o que foi solicitado pelo usuário, tendo responsabilidade de mantê-la constante durante todo o período dos ensaios mecânicos.

Foi levado em consideração a importância de construir um sistema com baixo consumo e alto fator de desempenho, o que justifica a escolha pela associação das resistências elétricas em paralelo, reduzindo pela metade a demanda da corrente elétrica conforme a Lei de Ohm. Foi utilizado um relé que fornece a corrente elétrica apenas quando solicitado e um controlador PID que proporciona menor tempo do sistema submetido à potência máxima tendo rápida estabilidade na temperatura desejada.

A escolha dos componentes eletrônicos e da forma de montagem do circuito (figura 3.4) possibilitou obter controle e monitoramento preciso, veloz, seguro, econômico e eficiente.

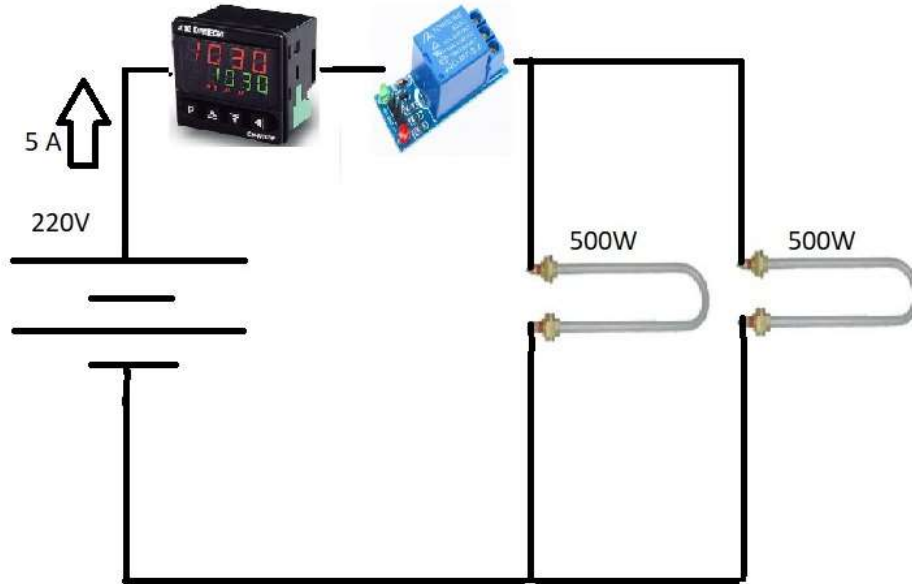


Figura 3.4: Circuito eletrônico de controle e monitoramento da cúpula.

3.1.2.1 Controlador de temperatura

O modelo CN-N1030 da fabricante Ômega (figura 3.5) é um controlador de temperatura com ação Proporcional, Integral e Derivativa (PID) de alto desempenho para rápida resposta e estabilização do sistema. Possui uma entrada analógica para termopares e duas saídas disponíveis para a resistência elétrica e alarme de emergência. Possui também duas opções de alimentação elétrica sendo 100 a 240 Vca/Vcc ou 12 a 24 Vcc/24 Vca.



Figura 3.5: Controlador CN-N1030.

Este componente possui técnicas de controle por meio de ações proporcionais, integrativas e derivativas gerando, quando programado corretamente, sinais de erros praticamente nulos.

3.1.2.2 Comutador Eletromecânico

Foi escolhido um relé com tensão de operação da bobina de 5 Volts em corrente contínua (VDC), capacidade nominal de 10 Ampères e tensão máxima de 250 Volts em corrente alternada (VAC) com dimensionamento de 19x15x15mm (figura 3.6) para ativar as resistências e permitir o aquecimento da cúpula.



Figura 3.6: Módulo Comutador eletromecânico 5VDC e 10A.

3.1.2.3 Termopar

O termopar escolhido para o projeto é do tipo J apresentado na figura 3.7. O modelo de termopar de contato foi utilizado por possibilitar melhor controle da temperatura no último ponto de contato entre cabo e grampo de suspensão sendo construído com revestimento protetor autoadesivo de fácil instalação, tempo de resposta de 0,3 segundos e conectores isolados de 1 m (40") ou 2 m (80") codificados por cor e com isolamento em PFA.



Figura 3.7: Termopar de contato tipo J.

3.1.2.4 Resistência Elétrica

Realizando os cálculos do calor gerado e da resistência elétrica foi verificado que a resistência mais adequada para o aquecimento na região crítica foi a resistência elétrica tubular em aço Inox AISI 304 com flange de latão, rosca de 1" BSP com alimentação de 220V, comprimento de 20 centímetros e potência de 500 W conforme a figura 3.8.

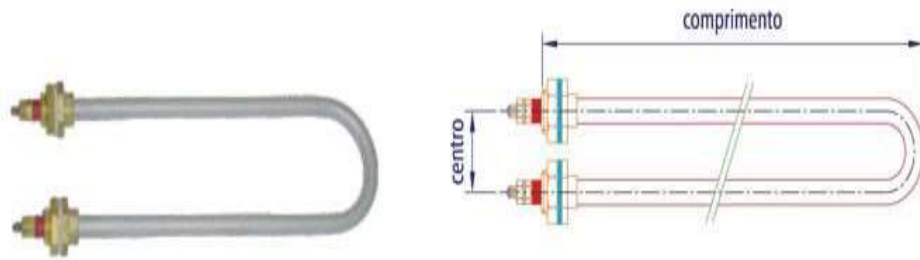


Figura 3.8: Resistência elétrica tipo U.

3.1.3. Tipo de Aquecimento

O modo de transferência de calor utilizado no dispositivo construído é o aquecimento por convecção natural (figura 3.9) que consiste no aquecimento da resistência metálica que aquece o ar nesta região provocando uma movimentação natural deste fluido até que toda a região interna da cúpula seja aquecida uniformemente garantindo melhor precisão e estabilidade da temperatura no último ponto de contato onde encontra-se o sensor termopar. Neste modelo de transporte de calor não é necessária qualquer fonte externa como bombas ou ventiladores, mas apenas com a troca de calor entre a resistência e o ar gera o movimento do fluido uniformizando a temperatura no dispositivo.

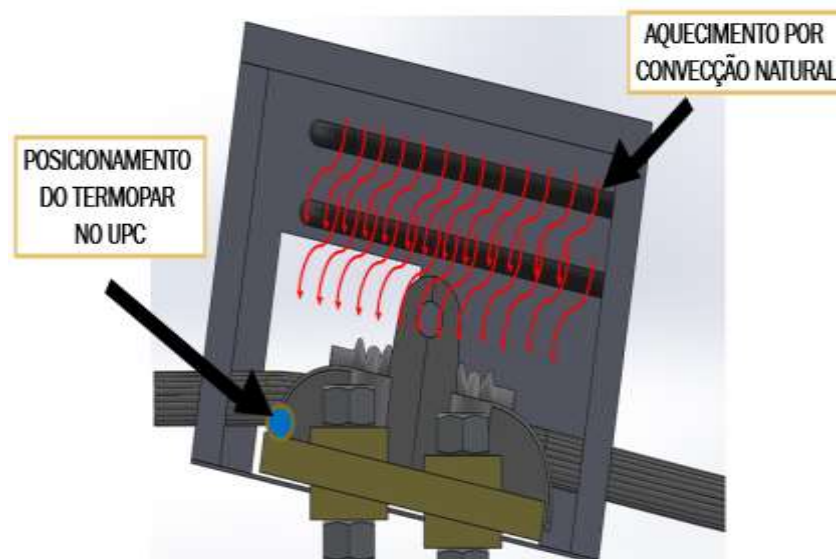


Figura 3.9: Aquecimento por convecção natural no dispositivo.

3.1.4. Ensaios de credenciamento do dispositivo

Uma vez que o sistema de controle e monitoramento do dispositivo foi definido, partiu-se para etapa de credenciamento do mesmo, realizando ensaios de exatidão e precisão, tempo de estabilização e termografia do dispositivo que garantisse o funcionamento adequado para realização de ensaios de fadiga.

3.1.4.1. Ensaios de estabilização da temperatura no dispositivo

As condições do primeiro ensaio de estabilização foram: temperatura desejada (Set Point-SP) de 75°C, temperatura do ambiente (laboratório) de 20°C com o termopar da cúpula e dos dois termohigrômetros posicionados na região inferior do cabo condutor próximos ao último ponto de contato (UPC). Foi realizada análise experimental para definições dos parâmetros do controlador PID. O coeficiente proporcional (P) foi estabelecido em 1.3, o coeficiente integral (I) em 0,07 e o coeficiente derivativo em 25. As condições do segundo ensaio de estabilidade foram: temperatura desejada (Set Point-SP) de 150°C, temperatura do ambiente (laboratório) de 20°C com o termopar da cúpula e dos dois termohigrômetros posicionados na região inferior do cabo condutor próximos ao último ponto de contato (UPC). Foi realizada análise experimental para definições dos parâmetros do controlador PID. O coeficiente proporcional (P) foi estabelecido em 1.2, o coeficiente integral (I) em 0,09 e o coeficiente derivativo em 20.

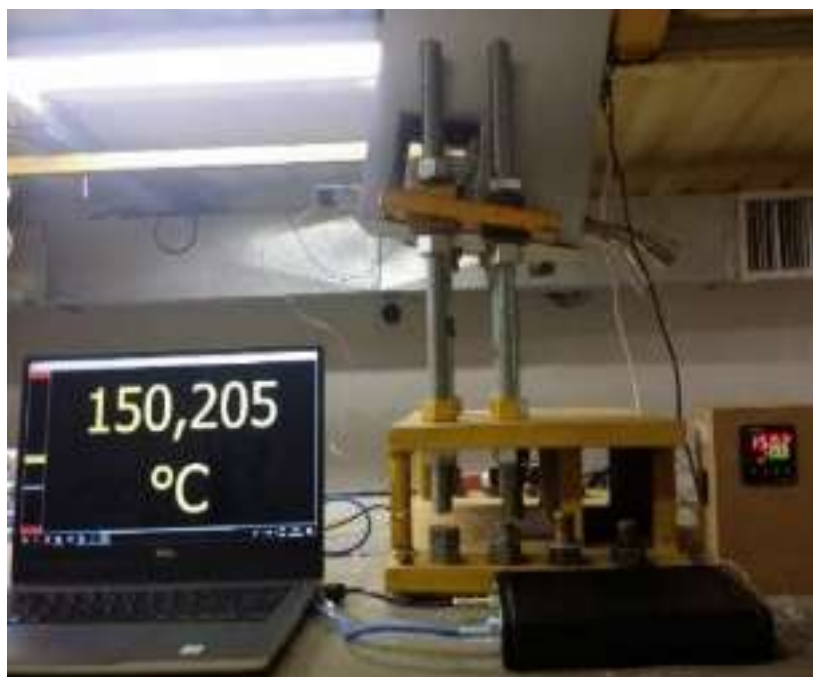


Figura 3.10. Ensaio do dispositivo a 150°C.

3.1.4.2. Ensaios de exatidão e precisão do dispositivo

Após a escolha correta dos instrumentos atuadores e medidores a serem utilizados, a cúpula foi fabricada e instrumentalizada para início da análise do funcionamento do dispositivo através de ensaios térmicos para comprovação da eficiência, tempo de resposta e precisão do equipamento. O ensaio consistiu em instalar a cúpula na bancada de ensaios do laboratório com o termopar e dois termohigrômetros calibrados posicionados próximos ao último ponto de contato entre a amostra do cabo condutor e o grampo de suspensão, e monitorar o funcionamento desta até alcançar a temperatura de 75°C e 150°C. Foram realizadas aferições da temperatura a cada cinco minutos e comparada com os dois termohigrômetros para verificação da exatidão da aferição.

3.1.4.3. Termografia do dispositivo

Além dos ensaios de estabilidade, foi realizada a termografia do dispositivo em 150°C para verificação dos pontos de concentração do calor emitido pelas resistências para validar o dispositivo com base na segurança e exatidão do equipamento. Foi utilizado um termógrafo da marca Fluke Corporation, modelo Ti-10 com precisão de $\pm 5^{\circ}\text{C}$ e faixa de operação de -20 a 250°C (-4 a 482°F) mostrado na figura 3.11. A temperatura do ambiente laboratorial permaneceu constante em 20°C contribuindo para o resfriamento ao longo do cabo fazendo com que apenas na região da cúpula se encontrem altas temperaturas.



Figura 3.11: Termógrafo utilizado nos ensaios do dispositivo.

Foram capturadas imagens termográficas do dispositivo para avaliar a dispersão do calor nas estruturas envolvidas no processo. Verificou-se a temperatura na estrutura da bancada (castelo), no ponto 89, na região oposta e na região inferior do UPC.

3.2 ENSAIOS DE FADIGA EM TEMPERATURAS CONTROLADAS

3.2.1 Apresentação geral da bancada de ensaios de cabos condutores

Os ensaios de fadiga em alta temperatura foram realizados na bancada do Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia (LabCabos) da Universidade de Brasília.

A bancada de ensaios apresentada na figura 3.12 possui 46,8 m sendo dividida em vão ativo e passivo. O vão ativo é a parcela da bancada que se inicia no grampo de suspensão até a roldana do bloco fixo 3, onde a amostra estará submetida à vibração e pode variar entre 31 e 41m de comprimento dependendo do posicionamento do bloco móvel. O vão passivo é a parcela da bancada responsável pelo fixação do cabo através de grampos de ancoragem conectados a talha de alavanca que contribui para o tracionamento da amostra a ser ensaiada. O cabo é montado sobre a roldana e o grampo de suspensão que devem estar alinhados para perfeito funcionamento do ensaio (HENRIQUES, 2006).

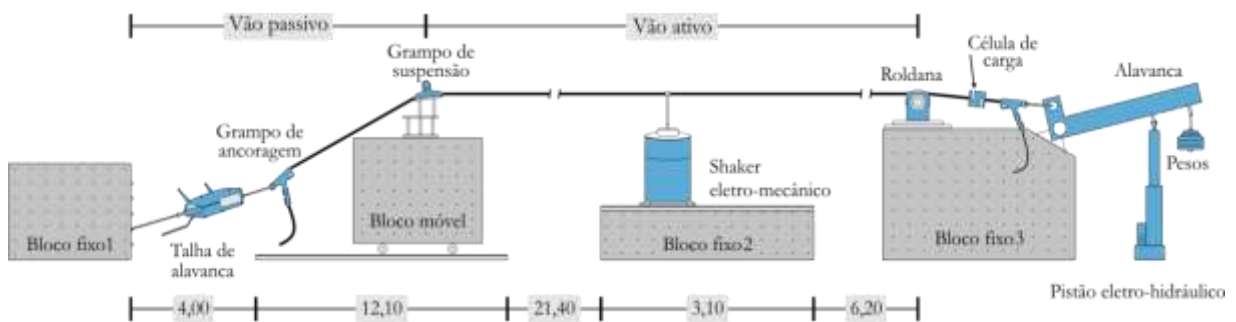


Figura 3.12: Bancada de ensaios de fadiga. (FADEL, 2010).

Para aquisição dos sinais dos extensômetros e dos lasers, é utilizado um módulo de aquisição de oito canais da figura 3.13 com Frequência de amostragem máxima de 24.000 ou 96.000 amostras/s por canal., conversor A/D de 24 bits de resolução por canal e comunicação padrão via rede Fast Ethernet de 100 Mbit/s para captar informações de controle e monitoramento durante os ensaios e transmitir ao microcomputador que possui software instalado que permite analisar os dados gerados pelos sistemas de instrumentação do ensaio e obter os resultados desejados. Por meio deste aquisitor de dados obtemos os sinais dos extensômetros, da temperatura e dos sensores de deslocamento.



Figura 3.13: Módulo aquisitor de sinais ADS 1800 - Lynx.

Para controlar o ensaio é utilizado o controlador de vibração LDS Laser Usb LAS-200 com oito canais de leitura que capturam os dados de acelerômetros que são posicionados a 89 milímetros do último de ponto de contato entre o grampo e o cabo (conhecido como Ponto 89) e acima do Shaker respectivamente. Através do software de controle LDS SW BUNCLE 1 PREMIER (SCO-101), o LDS comanda o excitador eletromagnético para manter estáveis as condições de ensaios previstas. A Figura 3.14 apresenta uma foto desse equipamento.

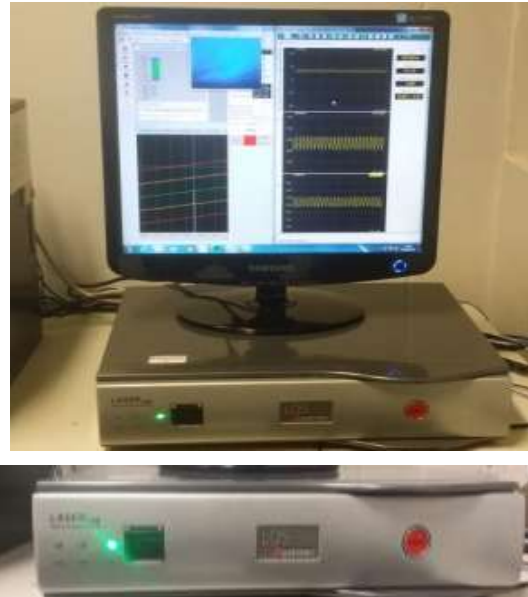


Figura 3.14: Controlador LDS Laser Usb.

No bloco fixo 2 da bancada encontra-se instalado o dispositivo de excitação eletromagnético (shaker) Data Physics modelo V400LT ilustrado na figura 3.15 capaz de simular a excitação eólica no cabo que ocorre em LTs provocando a fadiga conforme explicado na seção anterior. O limite de força senoidal do shaker é de 4,6 kN e de força randômica de 1,38 kN, deslocamento máximo de 25,4 mm pico-pico e faixa de frequência DC-3kHz. Na Figura 3.15 é apresentado o excitador utilizado nos ensaios



Figura 3.15: Excitador eletromagnético.

3.2.2 Preparação da bancada para ensaio de fadiga em alta temperatura

Para realizar os ensaios de fadiga em cabos condutores em alta temperatura foi necessária a preparação da bancada de ensaios. Esta preparação consistiu em seis etapas que serão descritas neste tópico.

3.2.2.1 Montagem do cabo na bancada

A montagem do cabo na bancada consiste em colocar a bobina nos cavaletes posicionados na extremidade do laboratório e esticar o cabo no vão ativo com auxílio de polias posicionadas ao longo do laboratório que sustentam o cabo antes do procedimento de esticamento.

3.2.2.2 Tracionamento do cabo e acomodação

Para realizar o tracionamento da amostra são montados grampos de ancoragem (figura 3.16b) conectados à talha de alavanca (figura 3.16a) em uma extremidade à alavanca de pesos (figura 3.16c) no outro extremo, responsáveis pelo tracionamento da amostra.



Figura 3.16: Tracionamento: (a) Talha de alavanca, (b) grampo de ancoragem e (c) alavanca de pesos.

Primeiramente deve-se elevar o braço de alavanca na posição a 90° em relação ao bloco fixo e esticar o cabo até 90% da carga desejada com o uso da talha de alavanca que se encontra no vão passivo. Com 90% da carga tracionada são posicionados pesos no braço de alavanca e folga-se a talha até que alcance o tracionamento ideal.

Uma célula de carga (figura 3.17) é fixada entre o grampo de ancoragem e a alavanca de pesos para controlar se o tracionamento desejado está sendo aplicado durante todo o ensaio. Esta carga é indicada em display numérico para monitoramento.



Figura 3.17: Célula de carga e grampo de ancoragem.

Inicialmente é realizado tracionamento com 10% a mais da carga de esticamento desejada para que o cabo possa se esticar completamente uma vez que estava enrolado na bobina. Aguarda-se então o tempo de acomodação do condutor que é cerca de oito horas para então reduzir a carga até o tracionamento ideal de ensaio.

3.2.2.3 Fixação do grampo de suspensão

O grampo de suspensão monoarticulado é peça responsável por fixar o cabo nas torres das linhas de transmissão. É composto por duas partes principais, o corpo e a tampa, fabricados em liga de alumínio de elevada resistência mecânica, não magnética e muito resistente à corrosão, de elementos ferrosos de aço carbono, zincado por imersão à quente. Na Figura 3.18 é apresentada a geometria e materiais do grampo monoarticulado.

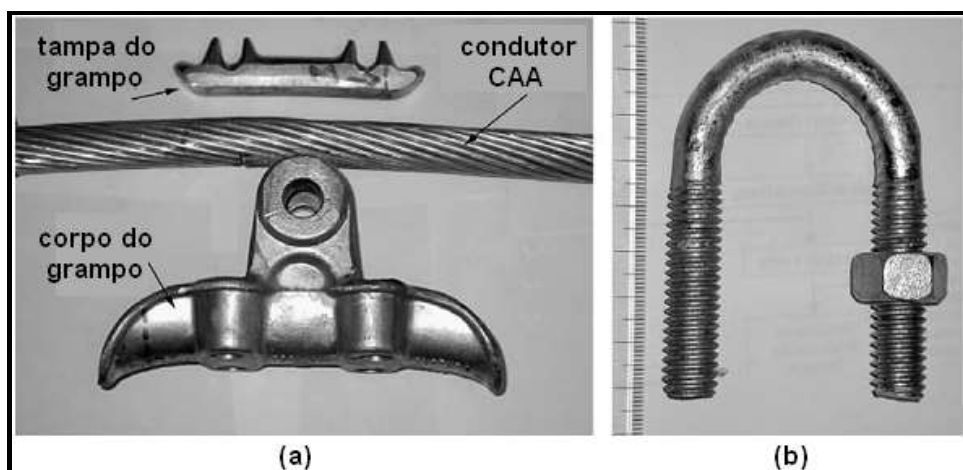


Figura 3.18: Grampo de suspensão. (a) Conjunto: cabo condutor/grampo de suspensão monoarticulado e (b) Parafuso tipo U do grampo de suspensão (FADEL, 2010).

O grampo de suspensão é fixado no bloco móvel como mostrado na figura 3.19, que é capaz de reproduzir o mesmo ângulo de saída do condutor utilizado em LTs que é tipicamente de 10° com o objetivo de ter resultados mais fidedignos à realidade.

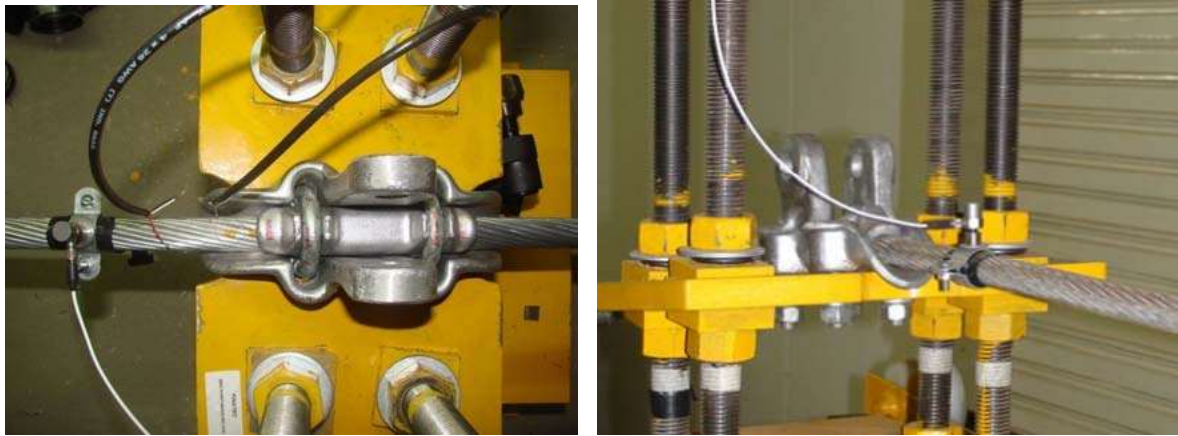


Figura 3.19: Montagem do grampo de suspensão (a) vista superior e (b) frontal. (FADEL, 2010).

Após montar o grampo na bancada é necessário aperto dos parafusos de fixação do cabo no grampo afim de evitar escorregamento do cabo. A carga de aperto definida para uso adequado foi de 50 N.m de acordo com pesquisa anterior (FADEL, 2010).

3.2.2.4 Montagem dos sensores

Com o grampo monoarticulado devidamente fixado garantindo o não escorregamento do condutor, parte-se para a montagem dos sensores presentes no ensaio. São montados dois acelerômetros sendo posicionados em cima do vibrador eletromecânico para controlar a sua vibração e no ponto a 89 milímetros do UPC entre o condutor e o grampo (ponto 89). O acelerômetro do ponto 89 é responsável por realizar a vibração constante do cabo garantindo o mesmo nível de tensão no UPC durante todo o ensaio conforme a Lei de Poffenberger-Swart.

Durante o ensaio, a rotação do condutor é monitorada com o intuito de verificar as quebras de fios. O dispositivo de detecção de quebras consiste em duas barras metálicas fixadas ao cabo e posicionadas no nó mais próximo do grampo de suspensão. Este dispositivo identifica quebras no cabo através do movimento de rotação pois quando um fio do cabo se rompe, há uma redistribuição da carga suportada entre os fios remanescentes gerando uma rotação em relação ao seu eixo longitudinal mantendo o sistema equilibrado. Quando um fio quebra, o cabo se movimento gerando um ângulo de rotação (α) obtido na equação:

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{\left(\frac{l_1 - l_2}{2} \right)}{100} \right] \quad (3.1)$$

Dois sensores a laser são posicionados nas extremidades das hastes do dispositivo medindo a distância entre a barra e o laser. Quando há rotação, a distância entre o laser e a haste muda detectando então a quebra de algum fio do cabo conforme ilustração 3.20.

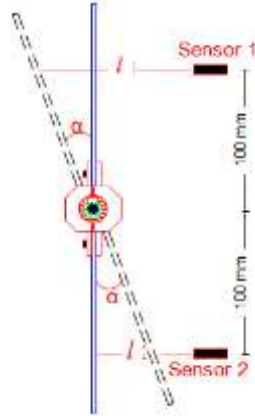


Figura 3.20: Desenho esquemático ilustrando a forma de medição do ângulo de rotação. (FADEL, 2010).

3.2.2.5 Extensometria

A extensometria tem como objetivo medir a deformação para identificar a tensão presente na região do UPC através da Lei de Hooke garantindo que o ensaio será realizado nas condições corretas.

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (3.2)$$

onde E é o módulo de elasticidade (Módulo de Young) do fio de alumínio no qual o extensômetro é colado.

Dessa forma, três extensômetros de resistência elétrica (ERE) são colados no ponto diametralmente oposto ao UPC entre o cabo e grampo sendo um no fio do topo e os outros nos fios posicionados à esquerda e direita do mesmo mostrado na figura 3.21. Estes extensômetros são conectados a uma ponte de Wheatstone e calibrados via *software* para realizarem as medições nos ensaios.

O procedimento de colagem destes sensores é realizado nas seguintes etapas: preparo da superfície, limpeza da superfície, posicionamento dos extensômetros, colagem e fixação dos fios ao aquisitor de dados. Inicialmente a superfície é lixada eliminando impurezas e aumentando a rugosidade para melhor aderência. Em seguida, é feita a limpeza da região com álcool isopropílico e cotonetes até que esteja livre de impurezas para receber os sensores. Para realizar a colagem, o sensor é primeiramente fixado em pedaço de fita adesiva, a cola é aplicada na superfície do cabo e espalhada com um cotonete para então fixar o extensômetro no cabo. O sensor é pressionado com força moderada para total fixação e as pontas são conectadas no aquisitor de dados para realizar as medições



Figura 3.21: Extensômetros devidamente colados na região do UPC.

3.2.2.6 Montagem da cúpula de aquecimento e estabilização da temperatura

O último procedimento de preparação da bancada de ensaios de fadiga é posicionar a cúpula térmica acima do grampo de suspensão, no castelo da bancada de ensaios, para aquecer a região crítica do cabo em temperatura controlada como mostrado na figura 3.22. O dispositivo foi fabricado com o encaixe preciso à bancada de ensaios minimizando as perdas de calor obtendo a maior eficiência energética possível. O aquecimento é realizado somente nesta região já que não há necessidade de aquecimento completo do cabo e apenas da região onde ocorrem as quebras.

Liga-se então a cúpula, seleciona a temperatura desejada através do controlador e aguarda-se o tempo de estabilização na temperatura de acordo com o ensaio previamente realizado. Após a estabilização da temperatura na região crítica, realiza-se a conferência da carga de esticamento e o aperto do grampo com taquímetro verificando se permanece em 50N.m ou se a temperatura modificou o torque aplicado, e se necessário, é feita a correção.



Figura 3.22: Cúpula devidamente posicionada na bancada de ensaios de fadiga.

3.2.3 Ensaios dinâmicos para avaliação de Poffenberger-Swart

Concluída a preparação da bancada de ensaios de fadiga em alta temperatura são realizados ensaios dinâmicos para avaliar se a tensão presente no ponto crítico (UPC) corresponde à tensão calculada através da equação 2.7. Com a cúpula aquecida na temperatura desejada, realiza-se a varredura das frequências do sistema e encontra-se a frequência de ressonância do sistema. Implementa-se esta frequência no software e inicia-se o ensaio de fadiga.

Com o condutor vibrando nas condições de ensaios de fadiga são realizadas três gravações de trinta segundos dos dados dos extensômetros e calcula-se a média da tensão presente neste período. Então é feita a comparação com a tensão de P-S calculada e se os resultados obtidos estiverem satisfatórios é garantida a condição correta para prosseguir com os ensaios de fadiga.

Este procedimento é realizado antes de todos os ensaios de fadiga em todos os níveis de tensões pois é pré-requisito para certificar que a tensão nominal presente na zona de falha utilizada na geração da curva S-N corresponde à calculada.

Sabe-se conforme a fórmula de Poffenberger-Swart que a tensão presente no último ponto de contato é proporcional ao módulo de elasticidade do material. Este módulo de elasticidade do material varia em função da temperatura, mas de acordo com a literatura (CALLISTER, 2007) e com os ensaios realizados, sabe-se que as temperaturas de operação desta pesquisa (75°C e 150°C) não são suficientes para variar significativamente o Módulo de Young possibilitando que a lei de P-S seja válida nos ensaios realizados.

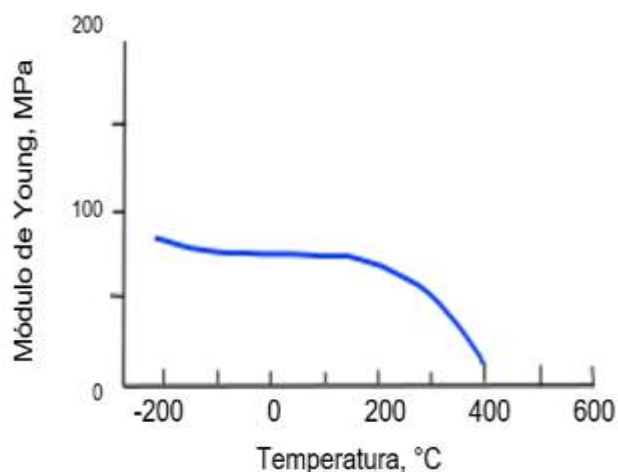


Figura 3.23: Gráfico de Temperatura em relação ao Módulo de Elasticidade para o alumínio. (CALLISTER, 2007 adaptado).

Garantidas as condições adequadas os ensaios de fadiga em alta temperatura são realizados. São executados três ensaios para cada nível de tensão em temperaturas de 75°C e 150°C com carga de esticamento de 20% da tensão média diária (Every Day Stress) e amplitudes de deslocamento pico a pico Y_B apresentados na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Amplitudes de tensão e respectivos Y_B .

Carga de Esticamento H (20% da EDS)	Tensão σ_{P-S} [MPa]	Ampl. Desloc. 89mm, Y_B [mm]
2628 kgf	23,7	0,68
	28,22	0,81
	31,35	0,90

Embora atualmente a CIGRE defina como critério de parada de ensaios de fadiga em condutores a ruptura do primeiro fio, neste trabalho foi utilizado o critério de parada de ruptura de quatro fios conforme estabelecido pela norma anterior de 1985 da CIGRE. Este critério foi utilizado no presente trabalho para facilitar a comparação da vida em fadiga do condutor em temperaturas controladas com a vida do condutor em temperatura ambiente publicada em (KALOMOBO, 2017) que utilizava o critério de parada com quatro fios rompidos.

3.3 TRATAMENTO TÉRMICO

A temperatura influencia significativamente nas propriedades mecânicas dos materiais. A liga de alumínio que compõe o cabo é da série 6XXX, que são ligas termicamente tratáveis, por isso, ao passarem pelo ensaio de fadiga em alta temperatura tiveram suas propriedades mecânicas alteradas.

O ensaio de fadiga mais longo realizado na liga 6201-T81 foi de aproximadamente 2.096.692 ciclos a uma frequência de ressonância de 20,5Hz resultante num período de cerca de 28 horas e 24 minutos. Em determinados períodos, o ensaio se interrompe devido a variações da temperatura do laboratório, mudança da frequência do sistema ou falhas de comunicação. Estes casos geralmente acontecem quando não há possibilidade de intervenção, como nas madrugadas ou finais de semana, mas a cúpula continua aquecendo a região da falha. Portanto, considerando estes momentos, pode-se afirmar que o cabo fica aquecido 42 horas a 150°C em média no ensaio de fadiga o que pode ter produzido consideráveis alterações na dureza do material.

Para quantificar as alterações sofridas na dureza do material com este aquecimento foi realizado tratamento térmico em quatorze amostras de liga 6201 retiradas diretamente da bobina simulando o período que os cabos ficaram submetidos à temperatura nos ensaios de fadiga. Uma amostra foi retirada e não passou pelo tratamento térmico representando a amostra como recebida (CR). Todas as amostras foram cortadas na máquina de corte

metalográfica com discos abrasivos refrigerados com frequência para evitar deformações devido ao aquecimento e rotações relativamente baixas na medida de aproximadamente 5 milímetros.

O tratamento apresentado na tabela 3.2 constituiu em levar as amostras ao forno Naberthern com controlador P310 a 150°C e retirar uma amostra a cada 3 horas totalizando 42 horas de tratamento na última amostra. O tratamento térmico foi realizado em três dias colocando e retirando amostras no intervalo de três horas conforme a tabela abaixo.

Tabela 3.2: Tratamento térmico aplicado nas amostras.
I= Inserir a amostra no forno. R= retirar amostra do forno.

TRATAMENTO TÉRMICO CAL 900	DIA 1					DIA 2				DIA 3	
	Horário do dia em horas.	8h	11h	14h	17h	20h	8h	11h	14h	17h	8h
Amostra 1 (3h)		I	R								
Amostra 2 (6h)		I		R							
Amostra 3 (9h)		I			R						
Amostra 4 (12h)		I				R					
Amostra 5 (15h)					I		R				
Amostra 6 (18h)				I			R				
Amostra 7 (21h)			I				R				
Amostra 8 (24h)		I					R				
Amostra 9 (27h)		I						R			
Amostra 10 (30h)		I							R		
Amostra 11 (33h)		I								R	
Amostra 12 (36h)						I					R
Amostra 13 (39h)					I						R
Amostra 14 (42h)				I							R

3.4 ENSAIOS DE DUREZA Após os tratamentos térmicos, são preparadas as amostras para realização dos ensaios de dureza. A preparação consiste em embutir, lixar e polir a amostra para que a superfície fique sem impurezas ou marcas que influenciem no ensaio de dureza.

O método utilizado para medição da dureza do material foi o método Vickers que possibilita medir qualquer valor de dureza, desde o material mais duro até os mais moles. Este método utiliza um durômetro apresentado na figura 3.24 consiste em endentar o material utilizando um endentador de diamante na forma de uma pirâmide reta de base quadrada e ângulo de 136° entre as faces opostas com carga de 1 a 100 kgf no período de 10 a 15 segundos. No caso da microdureza as cargas são menores, alcançando até 1 kgf no máximo.

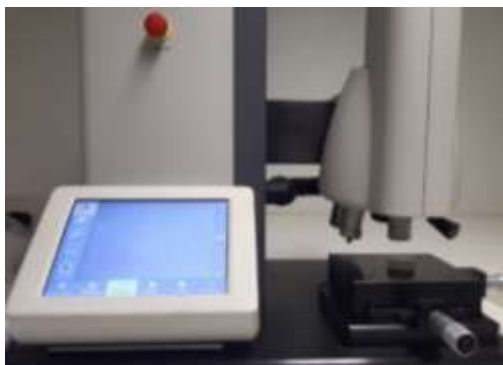


Figura 3.24: Durômetro.

A dureza Vickers é obtida dividindo a carga (em kgf) pela área da endentação. As impressões causadas pelo endentador são medidas e a dureza é calculada:

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{2 \times F \times \sin 136^\circ / 2}{dm^2} \approx 1,8544 \times \frac{F}{dm^2} \quad (3.3)$$

Sendo,

$$dm = \frac{dh + dv}{2} \quad (3.4)$$

Realizados os tratamentos térmicos nas amostras, foram executados ensaios para verificação da microdureza Vickers nas amostras utilizando o durômetro com o endentador de diamante de base quadrada e carga de 1kgf.

3.4.1 Ensaio de microdureza Vickers

Foram realizadas 15 medições apresentadas na figura 3.28 em cada amostra sendo 3 medições em 5 posições mostradas na figura 3.27 (Med1, Med2, Med3, Med4 e Med5) divididas entre a borda e o centro da amostra.

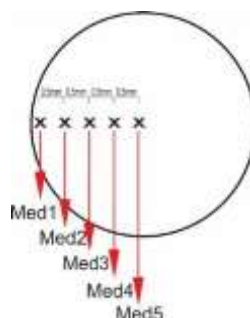


Figura 3.25. Pontos de medição da dureza na amostra.

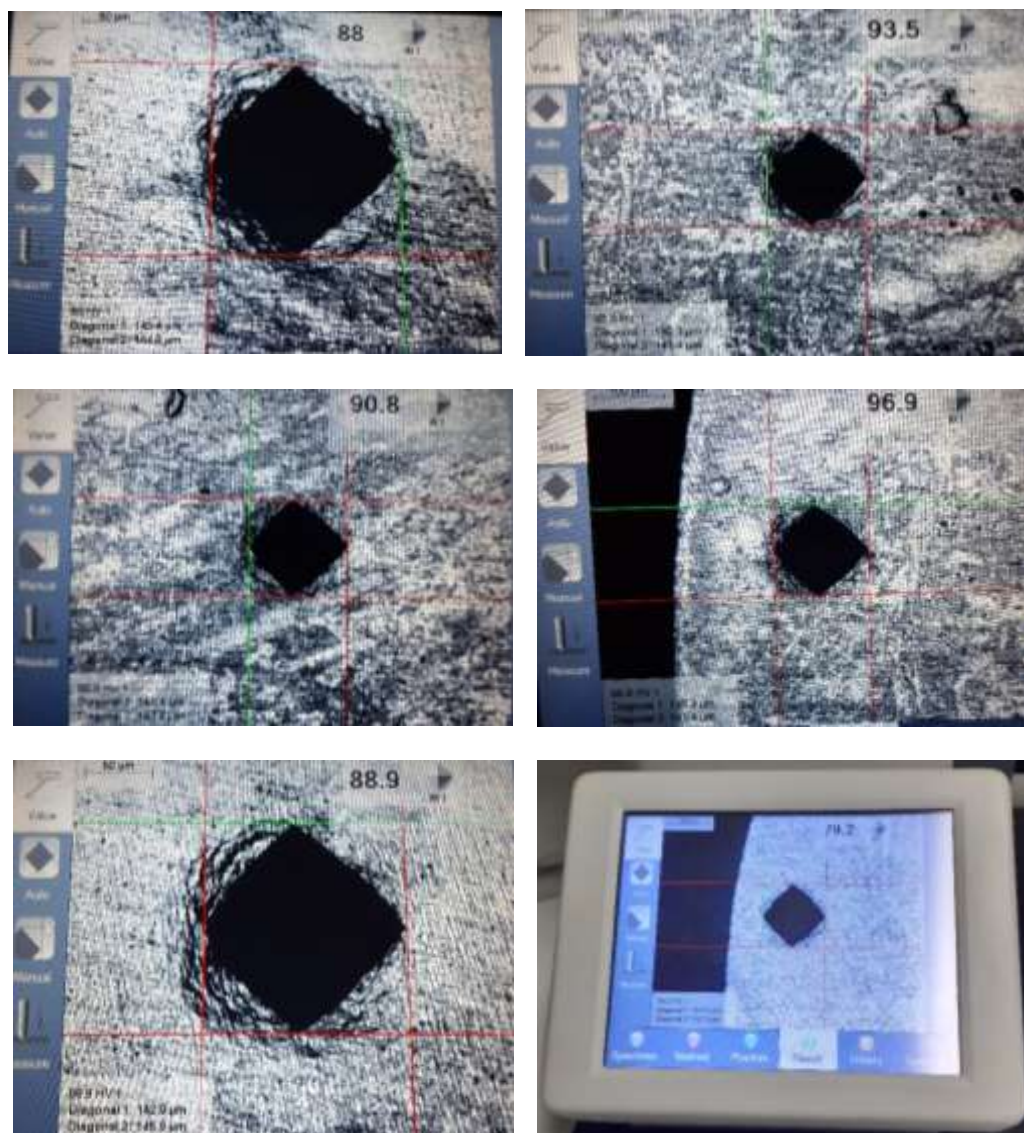


Figura 3.26: Exemplos de medições realizadas

3.5 ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES DAS FALHAS Após a realização dos ensaios de fadiga, as amostras foram submetidas à análise das falhas. As análises foram subdivididas em macroscópicas (olho nu) e microscópicas (MEV).

3.5.1 Análise de falha macroscópica

A análise macroscópica permite melhor averiguação nas linhas de transmissão para produzir metodologias de manutenção corretiva e/ou preventiva mais eficientes por obter o conhecimento do maior ponto de incidência das falhas.

As análises de falhas foram divididas em três grupos:

- Em relação à posição (distância) em que ocorreu a falha no fio a partir da boca do grampo de suspensão.
- Em relação à camada do cabo. Para este caso, a falha foi caracterizada como interna ou externa.
- O tipo da falha (V, L, QP ou 45°).

A análise em relação à posição consistiu em medir a distância da falha até a boca do grampo de suspensão para todos os cabos CAL 900 testados em diferentes temperaturas (20°C, 75°C e 150°C) e tensões de flexão. A posição da quebra em relação ao grampo também foi observada, quando a quebra ocorreu em algum fio da parte superior do cabo em relação ao grampo de suspensão, esta foi indicada com T (Topo). Caso a quebra tenha ocorrido na parte inferior do cabo, foi indicada como B (Base).

As análises em relação à camada consistiram em verificar em qual camada se encontravam os fios que romperam durante o ensaio e compreender qual camada possui maior incidência de quebras. As camadas foram nomeadas em externa (E) ou interna (I) ao cabo condutor.

A análise do tipo de falha consiste em verificar qual formato da fratura ocorrida e contabilizar qual tipo de quebra é mais predominante nos ensaios. Os tipos de quebras foram divididos em quatro grupos sendo quase plana, a 45°, em L ou em V conforme figura 3.29.

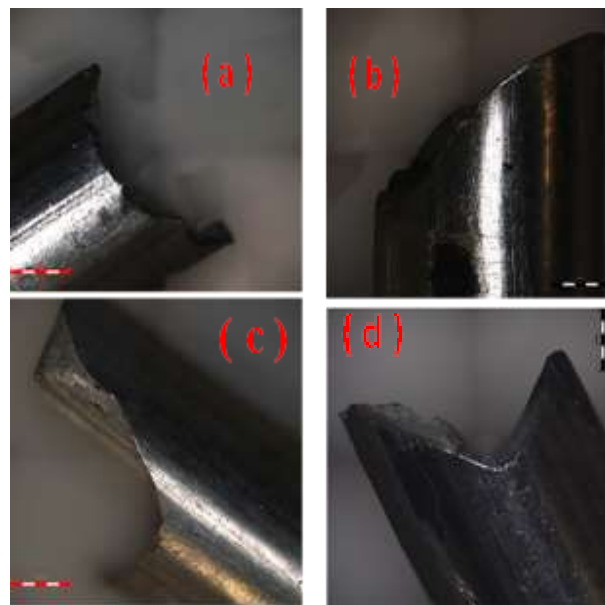


Figura 3.27: Tipos de falhas registradas nas amostras (a) quase plano, (b) falha a 45°, (c) falha em L e (d) falha em V (KALOMBO, 2017).

3.5.2 Análise de falha microscópica

Após as análises macroscópicas, foram realizadas as análises microscópicas das superfícies dos fios fraturados com uso do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para verificação das características das fraturas ocorridas.

Foi selecionada uma amostra de cada ensaio realizado com níveis de deslocamento (Y_B) de 0,69, 0,81 e 0,9 mm em temperaturas de 75°C e 150°C totalizando 6 amostras. Foram obtidas imagens fractográficas para verificação das marcas presentes nas superfícies fraturadas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios e das análises descritos no capítulo anterior. Especificadamente, a seção apresentará os resultados dos ensaios de credenciamento do dispositivo desenvolvido, dos ensaios de fadiga em temperaturas controladas (75°C e 150°C), dos ensaios de dureza e das análises de falhas macroscópicas e microscópicas realizadas.

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CREDENCIAMENTO DO DISPOSITIVO

Após a fabricação do dispositivo foi necessário efetuar ensaios que credenciassem o uso do mesmo. Foram realizados ensaios de estabilização da temperatura, precisão e exatidão, e termografia do dispositivo. Nestes ensaios verificou-se a confiabilidade, estabilidade, precisão e exatidão do dispositivo.

4.1.1. Ensaios de estabilização da temperatura no dispositivo

Os ensaios de estabilização foram realizados em 75°C e 150°C e o tempo de acomodação foi verificado para cada um utilizando o critério que a estabilidade da temperatura é alcançada quando o valor oscila dentro da margem de tolerância de $\pm 1,5^\circ\text{C}$ conforme previsto para ensaios termodinâmicos (ABNT NBR 16292-201, 1985).

4.1.1.1. Estabilização a 75°C

Os resultados do ensaio em 75°C foram satisfatórios apresentando um tempo de estabilização de trinta minutos com tolerância de $\pm 1,5^\circ\text{C}$. Na figura 4.1 é gerado o gráfico de tempo *versus* temperatura para melhor visualização.

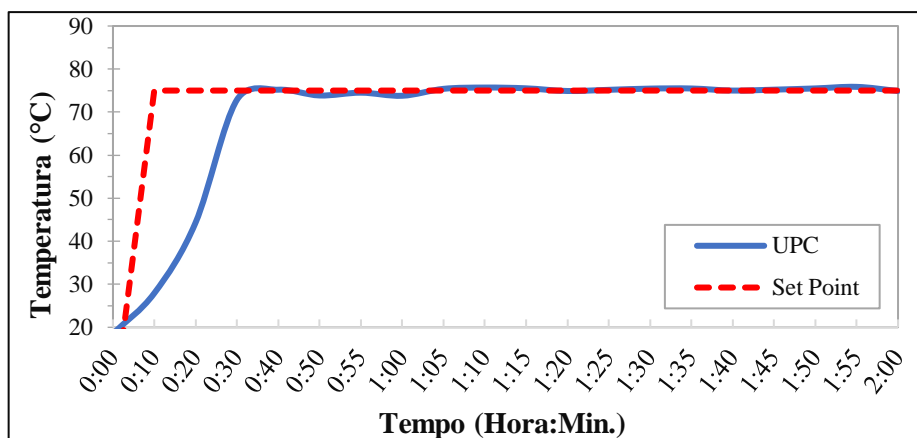


Figura 4.1: Curva de estabilidade do dispositivo a 75°C.

4.1.1.2. Estabilização a 150°C

Os resultados do ensaio em 150°C foram satisfatórios apresentando um tempo de estabilização de uma hora com tolerância de $\pm 1,5^\circ\text{C}$. Na figura 4.2 é gerado o gráfico de tempo *versus* temperatura para melhor visualização.

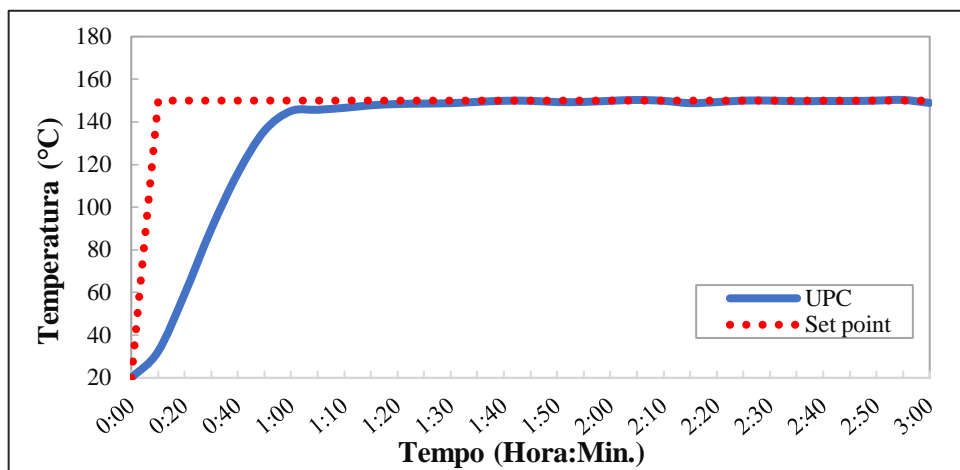


Figura 4.2: Curva de estabilidade do dispositivo a 150°C.

4.1.2. Ensaios de exatidão e precisão do dispositivo

Os ensaios de exatidão e precisão foram realizados em 75°C e 150°C com dois termohigrômetros calibrados no ponto do termopar do dispositivo como indicado em (ABNT NBR 5725-1, 2018). A máxima variação de temperatura entre o termopar e os termohigrômetros foi de 1,5°C apresentada nas figuras 4.3 e 4.4 demonstrando que o dispositivo possui exatidão e precisão em suas aferições.

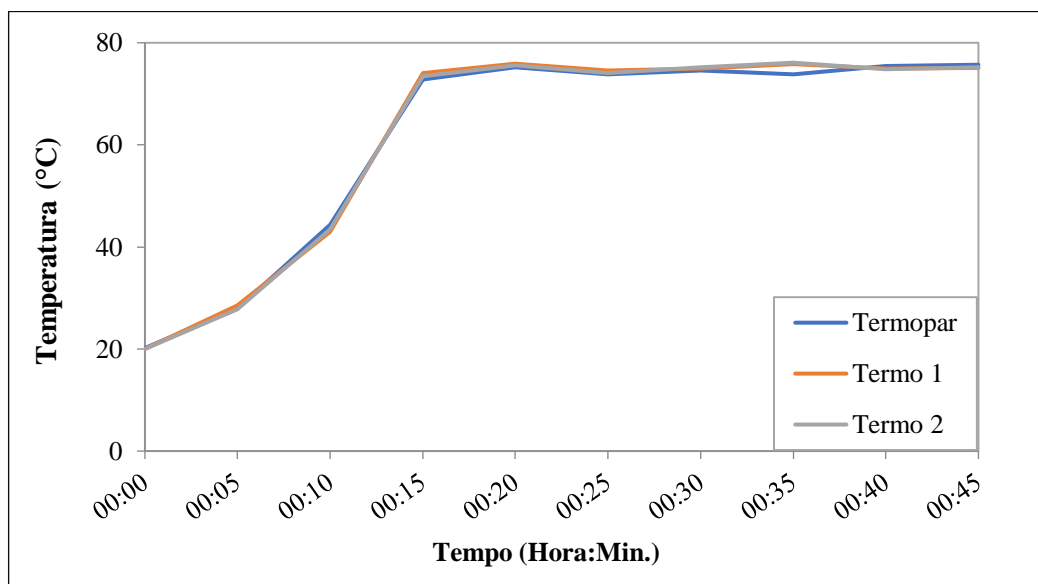


Figura 4.3: Gráfico de exatidão e precisão em 75°C.

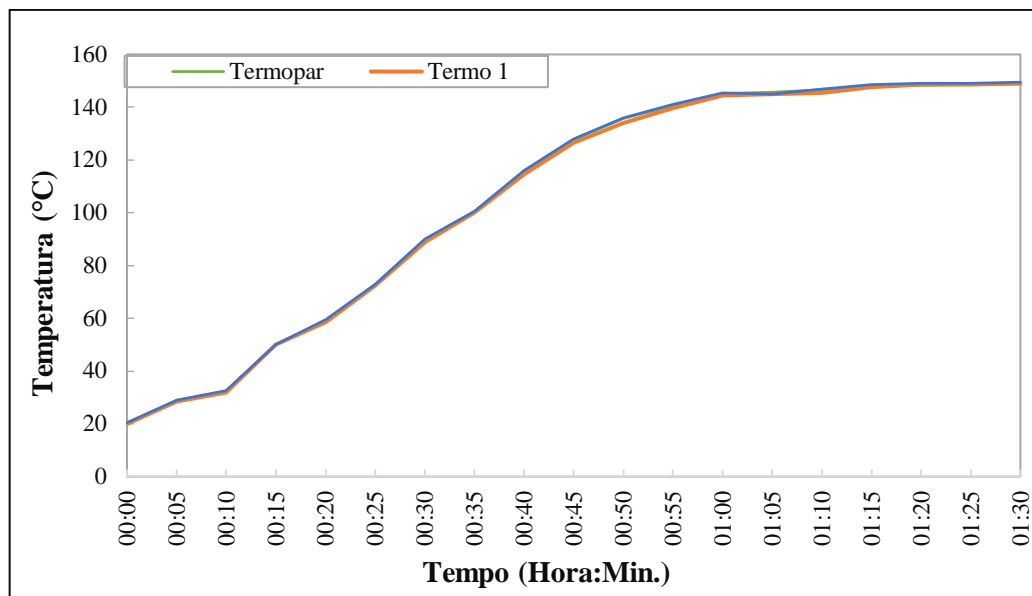


Figura 4.4: Gráfico de exatidão e precisão em 150°C.

4.1.3. Termografia do dispositivo

Foram capturadas imagens termográficas do dispositivo para avaliar a dispersão do calor nas estruturas envolvidas no processo que são apresentadas na figura 4.5. Verificou-se que esta dispersão para a estrutura da bancada (castelo) e para o cabo condutor é mínima, satisfazendo desta forma, os critérios de segurança do equipamento e a confiabilidade dos ensaios, uma vez que os demais aparatos não são submetidos a altas temperaturas. A temperatura medida na estrutura externa foi de aproximadamente 84°C.

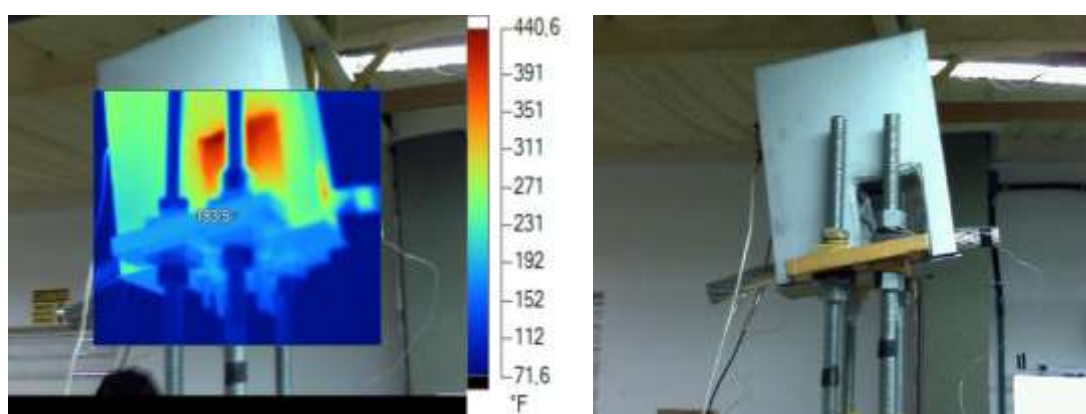


Figura 4.5: Vista termográfica lateral do dispositivo.

Os acelerômetros e lasers utilizados no ensaio ficam posicionados a oitenta e nove milímetros (Ponto 89) do UPC entre o cabo e grampo e por isso foi verificada a temperatura neste ponto para analisar se o comportamento destes instrumentos de medição seria

influenciado com a presença do dispositivo de aquecimento. O acelerômetro pode ser utilizado em 180°C e o sensor de deslocamento a laser, com faixas de medição de 16 a 120 mm e resolução de 2 a 100 μm , em 100°C sem que o seu funcionamento seja afetado segundo seus respectivos manuais.

A figura 4.6 mostra que no ponto 89 foi verificada a temperatura de aproximadamente 106°C (222,8°F) atestando assim que a presença do dispositivo de aquecimento é compatível com a utilização dos dispositivos de medições.

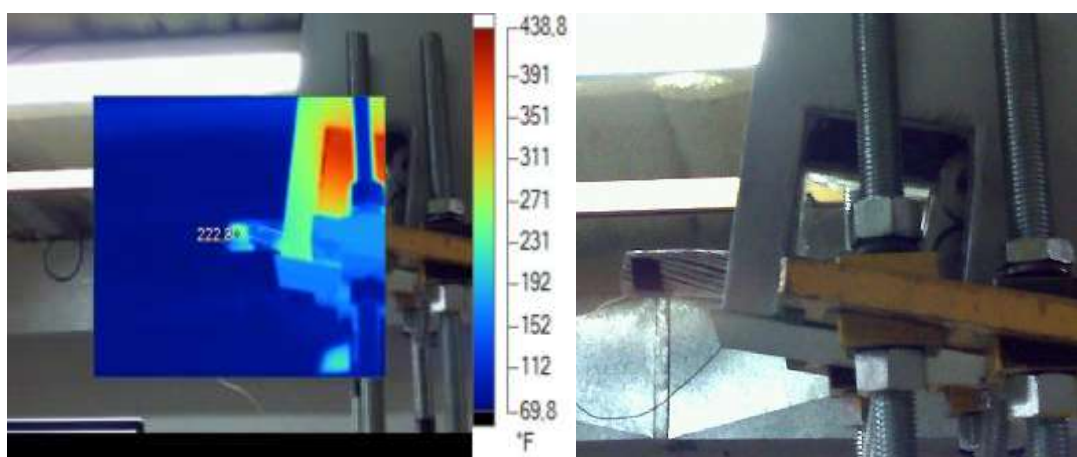


Figura 4.6: Medição da temperatura no ponto 89.

Garantidas as condições de segurança e eficiência do dispositivo em relação aos demais elementos do sistema, foram feitas imagens para averiguação da temperatura solicitada no UPC. A figura 4.7 e 4.8 mostram que foi verificada temperatura de aproximadamente 154°C (308,6°F) na região superior do cabo condutor no ponto diametralmente oposto ao UPC e 150°C (302,6°F) na região inferior do cabo nas proximidades do ponto crítico.

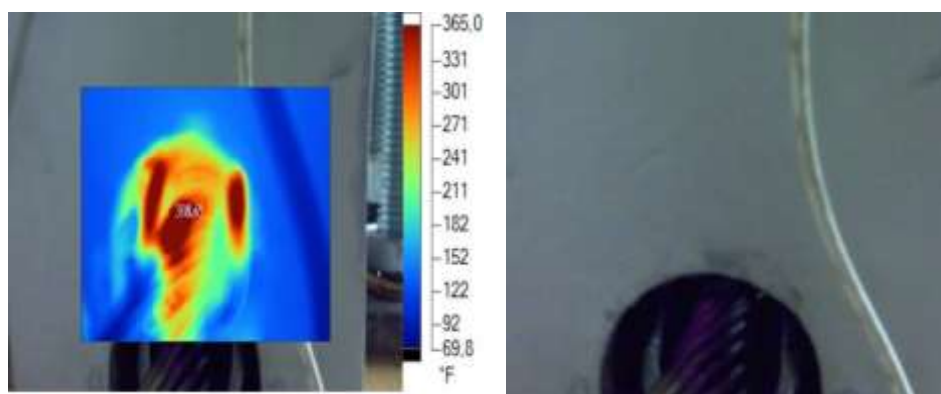


Figura 4.7: Medição na região superior do condutor oposta ao UPC.

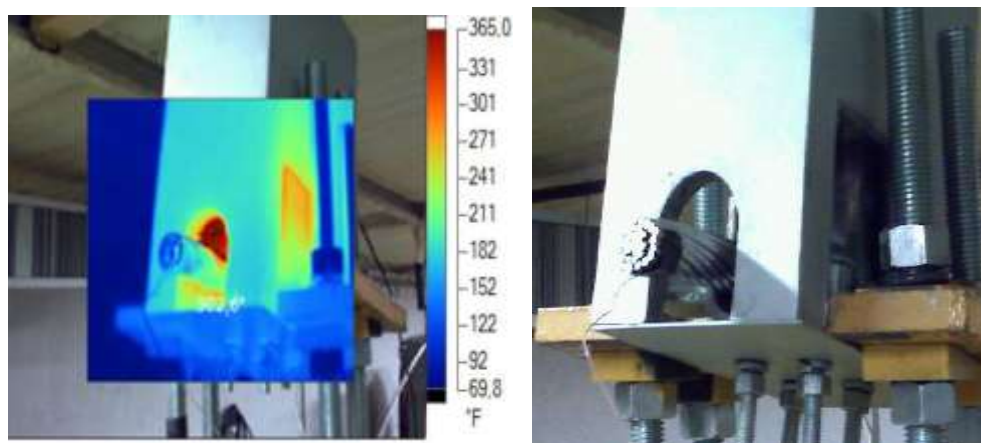


Figura 4.8: Medição na região inferior do condutor no UPC.

Essas medições nos garantem que o dispositivo fabricado aquece uniformemente o cabo quando comparamos a região superior e inferior do condutor. O aquecimento ocorre de forma segura, pois não foram encontradas dispersões elevadas de calor e o dispositivo é eficiente quando verificamos que a temperatura solicitada de fato é a mesma encontrada no UPC. Esta termografia foi executada conforme as orientações da (ABNT NBR 19292-201, 1985).

4.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FADIGA EM TEMPERATURAS CONTROLADAS

Esta seção apresenta os resultados obtidos nos ensaios de fadiga em temperaturas controladas em 75°C e 150°C. A apresentação e análise dos resultados consistiram em compilar os dados do ensaio, construir as curvas S-N dos ensaios de fadiga realizados e comparar com a curva S-N do ensaio de fadiga em temperatura ambiente publicado anteriormente (KALOMBO, 2017).

Foram realizados dezoito ensaios, sendo nove em temperatura controlada de 75°C e nove em temperatura de 150°C em faixas de frequências obtidas nos ensaios de varredura de frequências de ressonância do sistema variando entre 18 e 22 Hz.

4.2.1. Ensaio de fadiga em temperatura ambiente

Na figura 4.9 temos a curva S-N em temperatura ambiente que foi utilizada para efeito de comparação com os ensaios realizados nesta pesquisa. Esta curva é encontrada em pesquisa anteriormente realizada (KALOMBO, 2017).

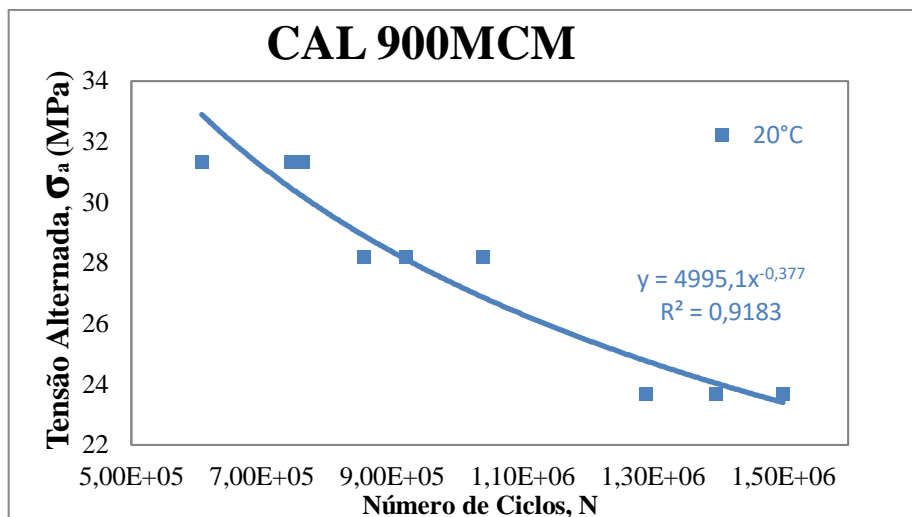


Figura 4.9: Curva S-N do cabo CAL 900 em temperatura ambiente (KALOMBO, 2017).

4.2.2. Ensaio de fadiga em temperatura de 75°C

Os primeiros ensaios executados nesta pesquisa foram em temperatura controlada de 75°C no UPC. Foram realizados nove ensaios sendo três ensaios para cada nível de amplitude de tensão e construída a curva S-N (figura 4.10) do condutor submetido à temperatura de 75°C.

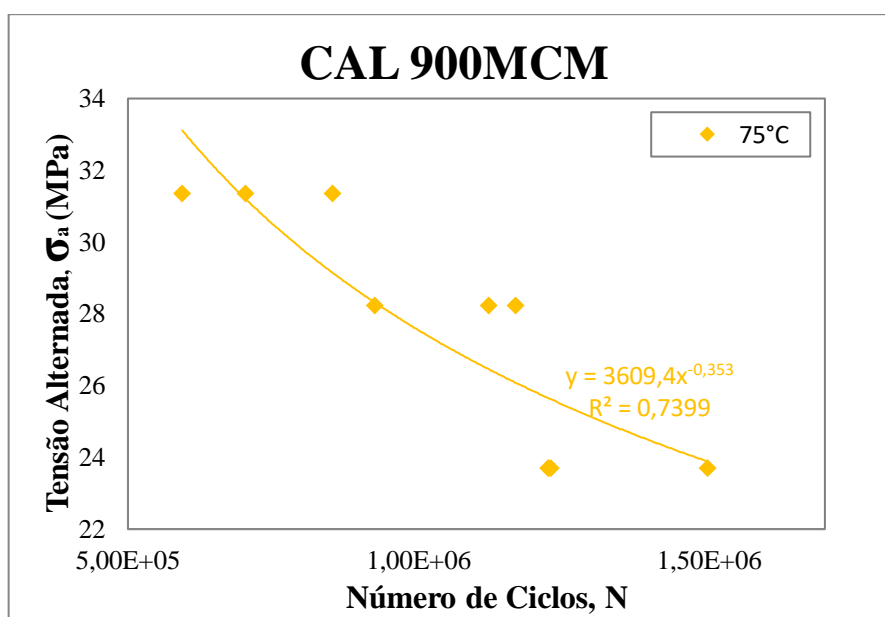


Figura 4.10: Curva S-N do cabo CAL 900 em temperatura de 75°C.

4.2.3. Ensaio de fadiga em temperatura de 150°C

Da mesma forma, foram realizados os ensaios em temperatura controlada de 150°C, adquiridos os dados e a curva S-N (figura 4.11) foi construída.

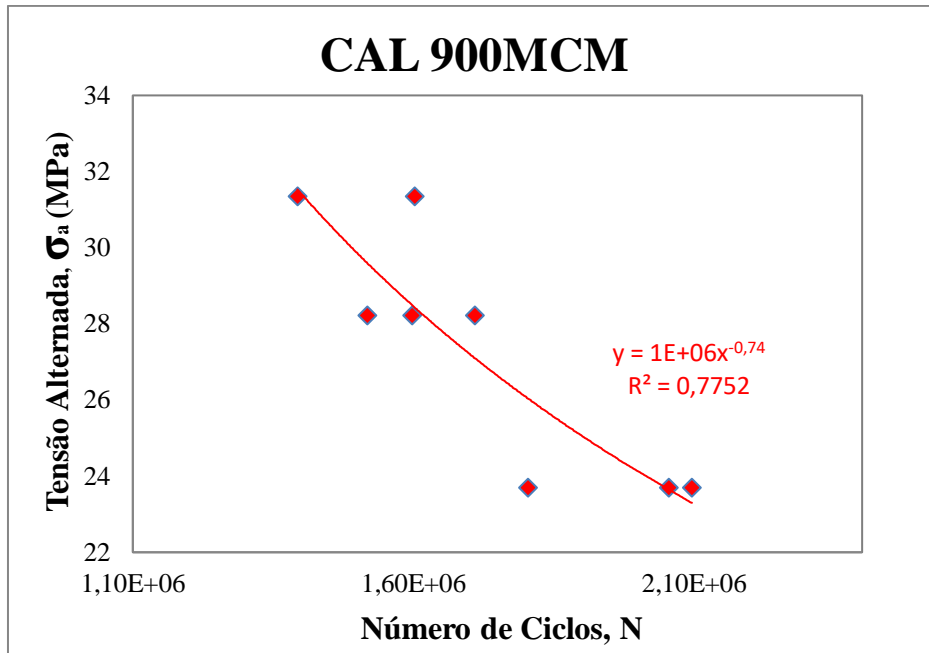


Figura 4.11: Curva S-N do cabo CAL 900 em temperatura de 150°C.

4.2.4. Curva S-N em diferentes temperaturas

Os dados foram compilados na curva Tensão em relação ao Número de ciclos (S-N) dos ensaios em temperatura ambiente, 75°C e 150°C conforme ilustrado na figura 4.12 para melhor visualização da vida em fadiga e conclusões a respeito da influência da temperatura.

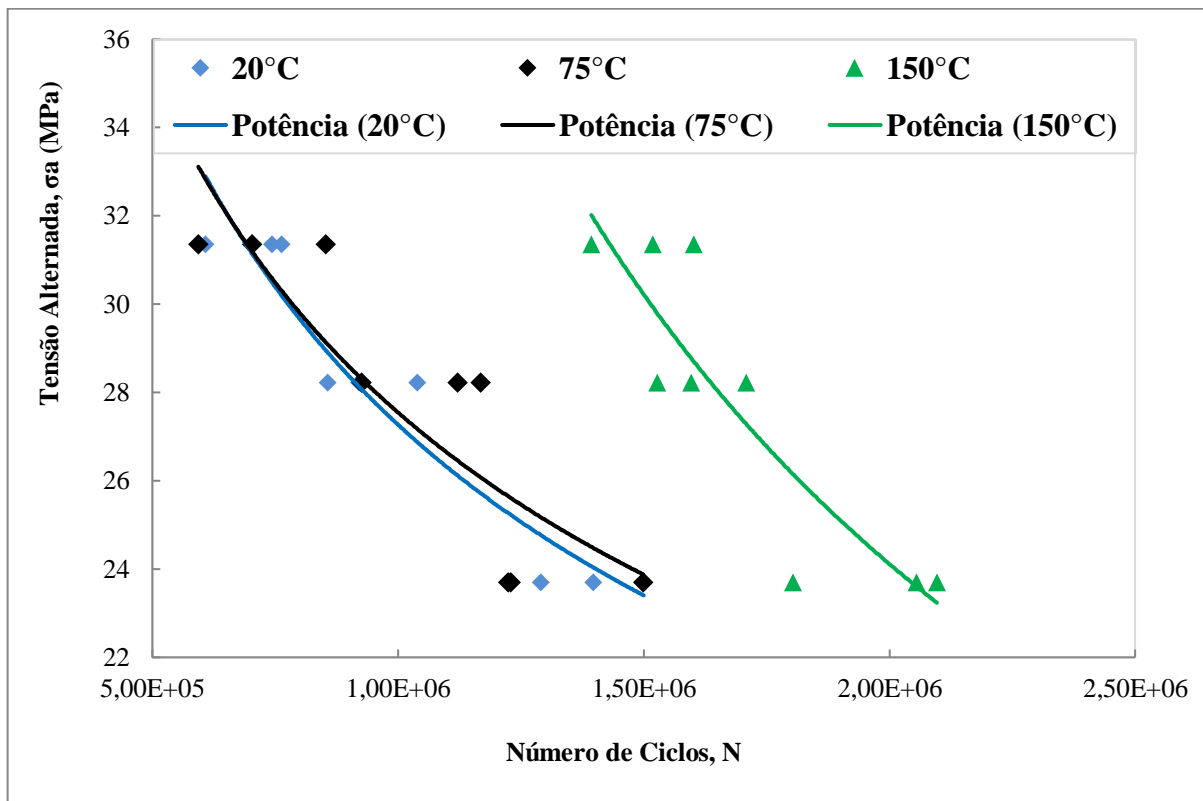


Figura 4.12: Curvas S-N do cabo CAL 900 em temperaturas de 20°C, 75°C e 150°C.

Com base nos resultados apresentados na Figura 4.12, é possível observar que as curvas S-N dos condutores testados a temperatura ambiente (20°C) e 75°C apresentam resultados similares. Pode ser observado também que há diferença da vida em fadiga a 75°C e 150°C comparado à vida em fadiga a 20°C nas diferentes tensões de flexão usadas durante o experimento. O maior erro para a vida em fadiga a 75°C é igual a 5% na tensão de flexão de 23,70 MPa. A similaridade das curvas S-N para o condutor ensaiado a 20°C e 75°C também foi comprovada ao fazer o teste estático de Chow (CHOW, 1960).

Os resultados obtidos para o ensaio de fadiga a 75°C corroboram com os resultados encontrados por pesquisadores Costa et al. (COSTA, 2020).

Já o condutor ensaiado a 150°C apresenta vida em fadiga superior ao testado a 20°C. A maior diferença encontrada é de 90% na tensão de flexão de 31,35 MPa. Esta diferença corresponde quase ao dobro da vida em fadiga do condutor testado a 20°C.

Esse comportamento contradiz os resultados encontrados na literatura para ensaios de fadiga em amostras de alumínio que indicam que o material é menos resistente à fadiga com o aumento da temperatura (FARHAD, 2009). No entanto, este não é o caso deste condutor, pois sua vida em fadiga aumentou proporcionalmente à temperatura.

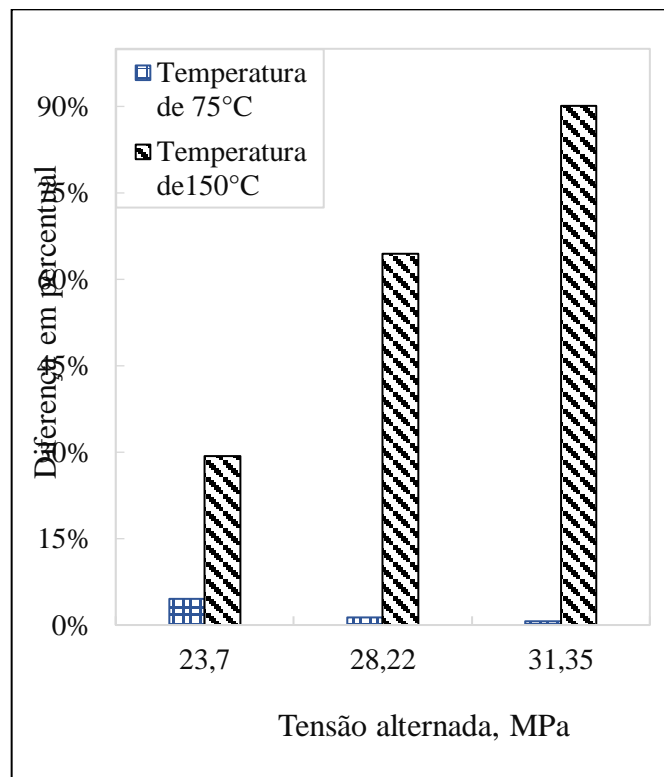


Figura 4.13: Diferença entre as vidas em fadiga a 75°C e 150°C em relação à vida em 20°C.

4.3. ENSAIOS DE DUREZA

O ensaio de fadiga mais longo realizado na liga 6201-T81 foi de aproximadamente 2.096.692 ciclos a uma frequência de ressonância de 20,54Hz que resulta num período de cerca de 31 horas e 30 minutos. Considerando os momentos que o ensaio ficou parado, mas a cúpula continuou aquecendo, pode-se inferir que o material ficou aquecido cerca de 42 horas a 150°C sofrendo endurecimento devido a geração de precipitados mais finos e maior resistência das às discordâncias no material levando a um aumento considerável da dureza. Por esta razão, foi realizado tratamento térmico de 42 horas e medições das durezas nas amostras de três em três horas para compreender o progresso da dureza em relação ao tempo nas temperaturas de 75°C e 150°C. Os gráficos foram gerados e percebe-se que na temperatura de 75°C (figura 4.14) a alteração é mínima em relação à temperatura ambiente enquanto para 150°C (figura 4.15), houve aumento de 13HV aproximadamente neste período.

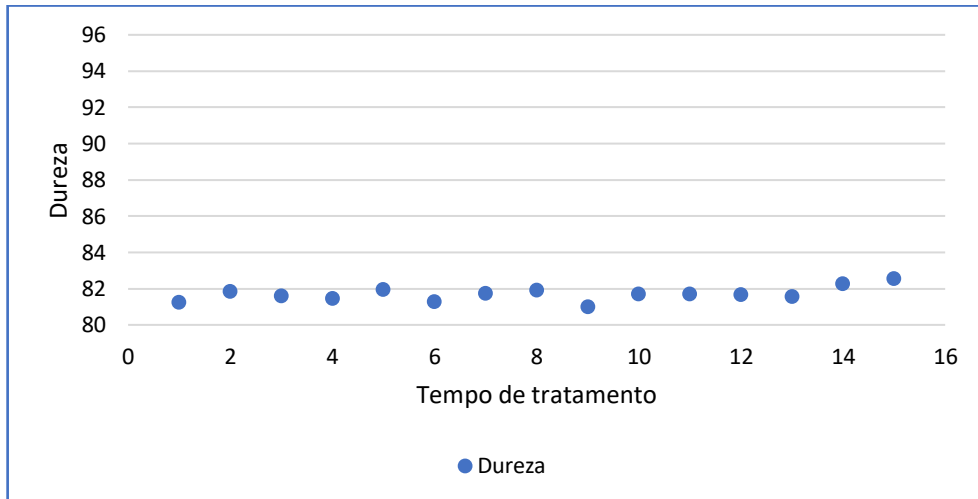


Figura 4.14: Gráfico Dureza versus Tempo de tratamento térmico a 75°C

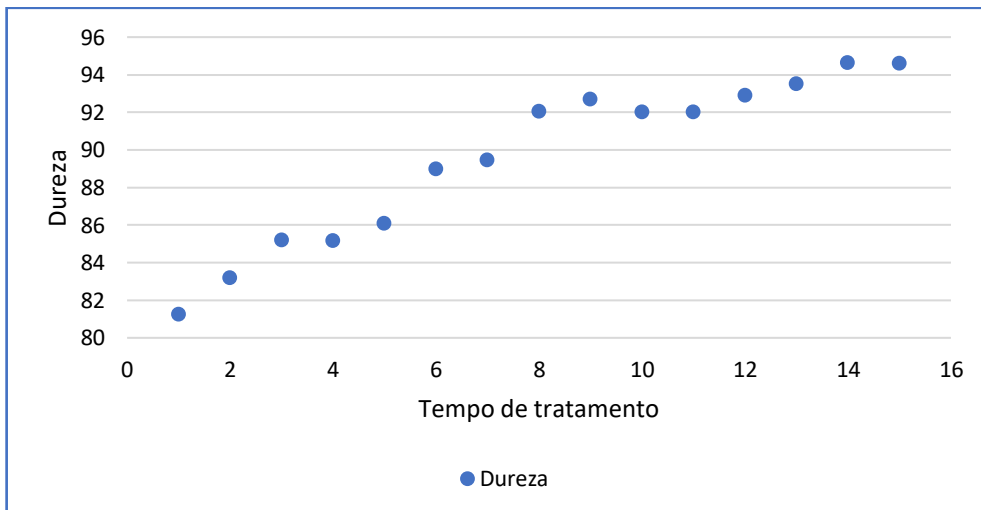


Figura 4.15: Gráfico Dureza versus Tempo de tratamento térmico a 150°C

4.4. ANÁLISE DE FALHAS

Nesta seção serão apresentados os resultados das análises de falhas macroscópicas e microscópicas explicadas no capítulo anterior.

4.4.1. Análise macroscópica das falhas

Os resultados a seguir representam as análises macroscópicas das falhas de amostras fraturadas em fadiga em temperatura ambiente e temperaturas controladas (75°C e 150°C). Os resultados mostram a análise em relação à posição (topo ou base) em que ocorreu a falha no fio, à camada do cabo (interna ou externa) e relação ao tipo da falha (V, L, QP ou 45°).

4.4.1.1. Análise de falhas relativa à posição da quebra

As amostras apresentaram uma maior distribuição de quebras no topo como mostra a figura 4.16. Foram registradas 108 falhas no total sendo 93 falhas no topo e apenas 15 posicionadas na base.

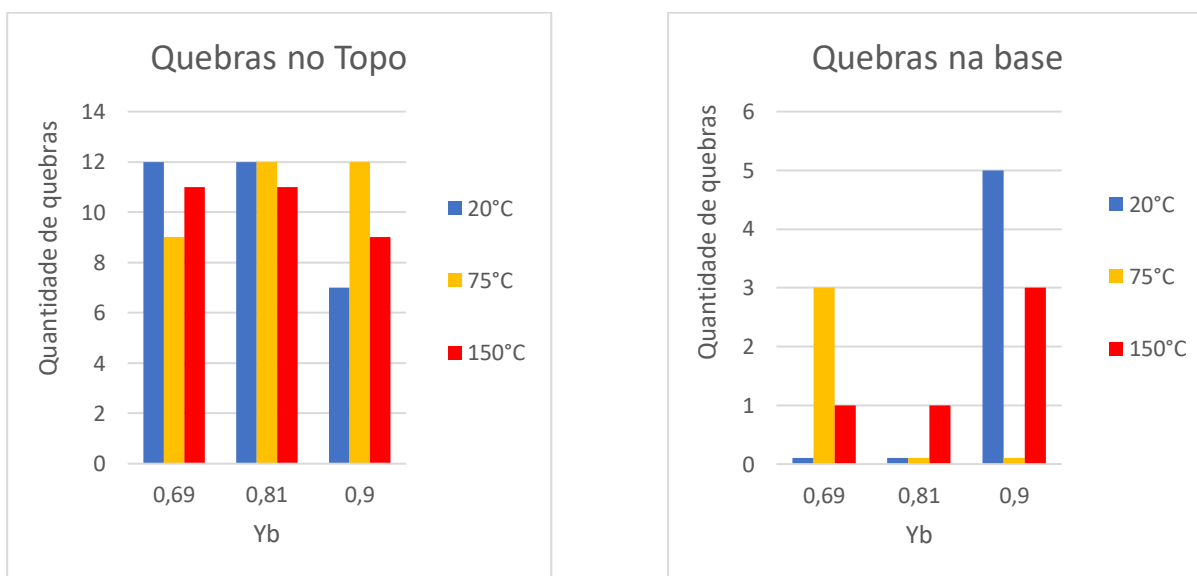


Figura 4.16: Distância média de ruptura dos fios a partir da boca do grampo de suspensão.

4.4.1.2. Análise de falhas relativa à camada

A distribuição das falhas relativas à camada para o cabo CAL 900 foi analisada. A tabela abaixo mostra a ocorrência de falhas por camada para diferentes amostras de CAL 900 testadas a diferentes tensões de flexão. Nota-se que a maioria das quebras nos fios ocorreu na camada externa.

A quantidade e a distribuição de quebras por camadas foram computadas para todas as amostras ensaiadas. O gráfico mostrado na figura 4.17 o número de fios quebrados e a distribuição por camada do CAL 900 MCM para as diferentes temperaturas utilizadas nos ensaios (20°C, 75°C e 150°C).

Foram contabilizadas 108 quebras nos 27 ensaios, sendo 89 das falhas externas (82%) e apenas 19 internas (18%) considerando até a 4ª quebra o que comprova a alta incidência de quebras na camada externa em relação à interna mesmo em diversas temperaturas.

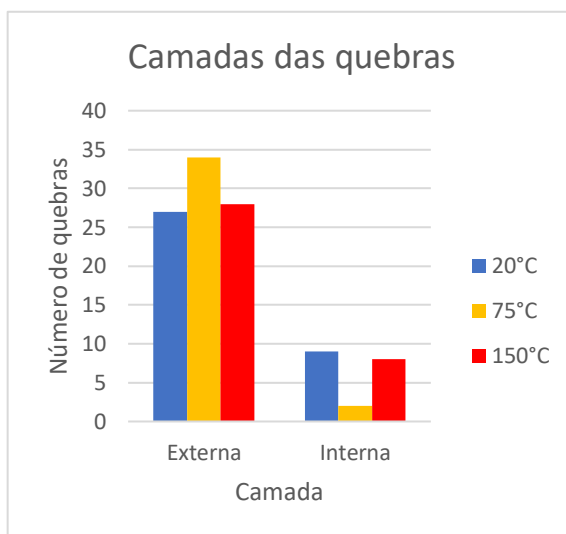


Figura 4.17: Número de quebras internas e externas.

4.4.1.3. Análise de falhas relativa ao tipo

A figura abaixo representa a ocorrência da quantidade e a distribuição do tipo de falha para diferentes valores de temperatura utilizados no teste.

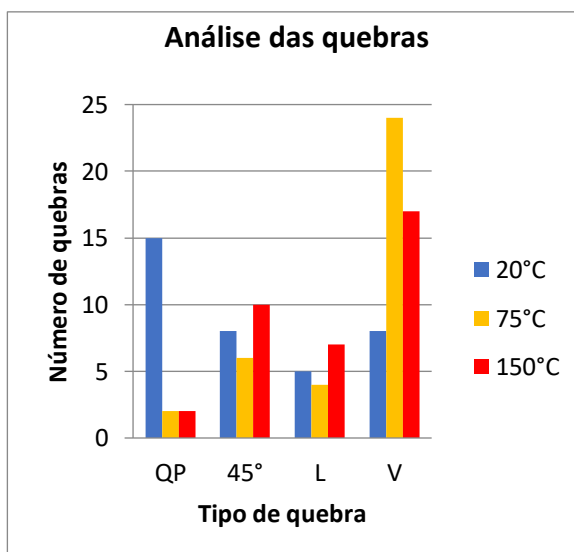


Figura 4.18: Tipos de quebras.

O perfil das falhas foi observado e as quebras classificadas em quatro grupos: quase plano (QP), inclinado a 45° (45°), em “L” (L) e em “V” (V).

4.4.2. Análise microscópica das falhas

Foram obtidas imagens através do MEV e analisadas quanto às marcas presentes nas superfícies fraturadas. Foram detectadas as regiões características das fraturas, o comportamento de fratura dúctil e estrutura de fratura ocorrida majoritariamente por carregamento de tração. O resultado mostra-se coerente com o observado em superfícies de fratura de cabos condutores de energia ensaiados sob condições de fadiga.

Analisando as imagens fractográficas das fraturas dos ensaios realizados a 75°C e 150°C não se verificam diferenças significativas fazendo a comparação entre as da figura 4.19 e da figura 4.20.

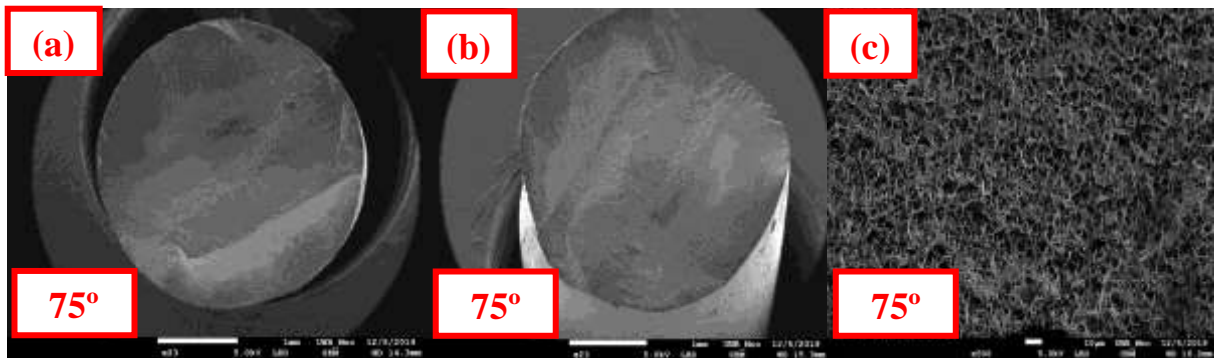


Figura 4.19: (a) Topo de superfície fraturada em ensaio a 75°C, (b) Zonas de propagação da trinca em superfície fraturada em ensaio a 75°C e (c) Dimples em superfície fraturada em ensaio a 75°C

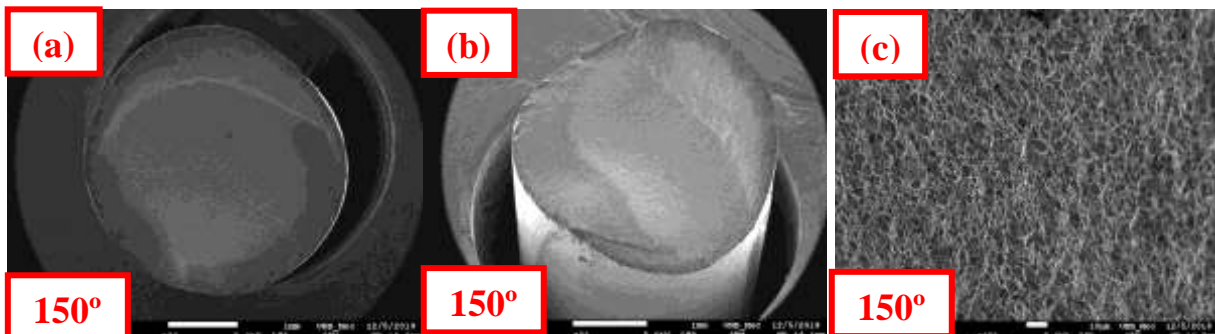


Figura 4.20: (a) Topo de superfície fraturada em ensaio a 150°C, (b) Zonas de propagação da trinca em superfície fraturada em ensaio a 150°C e (c) Dimples em superfície fraturada em ensaio a 150°C

4.4.2.1. Regiões da fratura

Falhas por fadiga apresentam comportamento característico separados em três zonas, sendo elas: de iniciação da trinca (Zona I), de propagação (Zona II) e de ruptura (Zona III) que são observadas nas superfícies fraturadas conforme a figura 4.21.

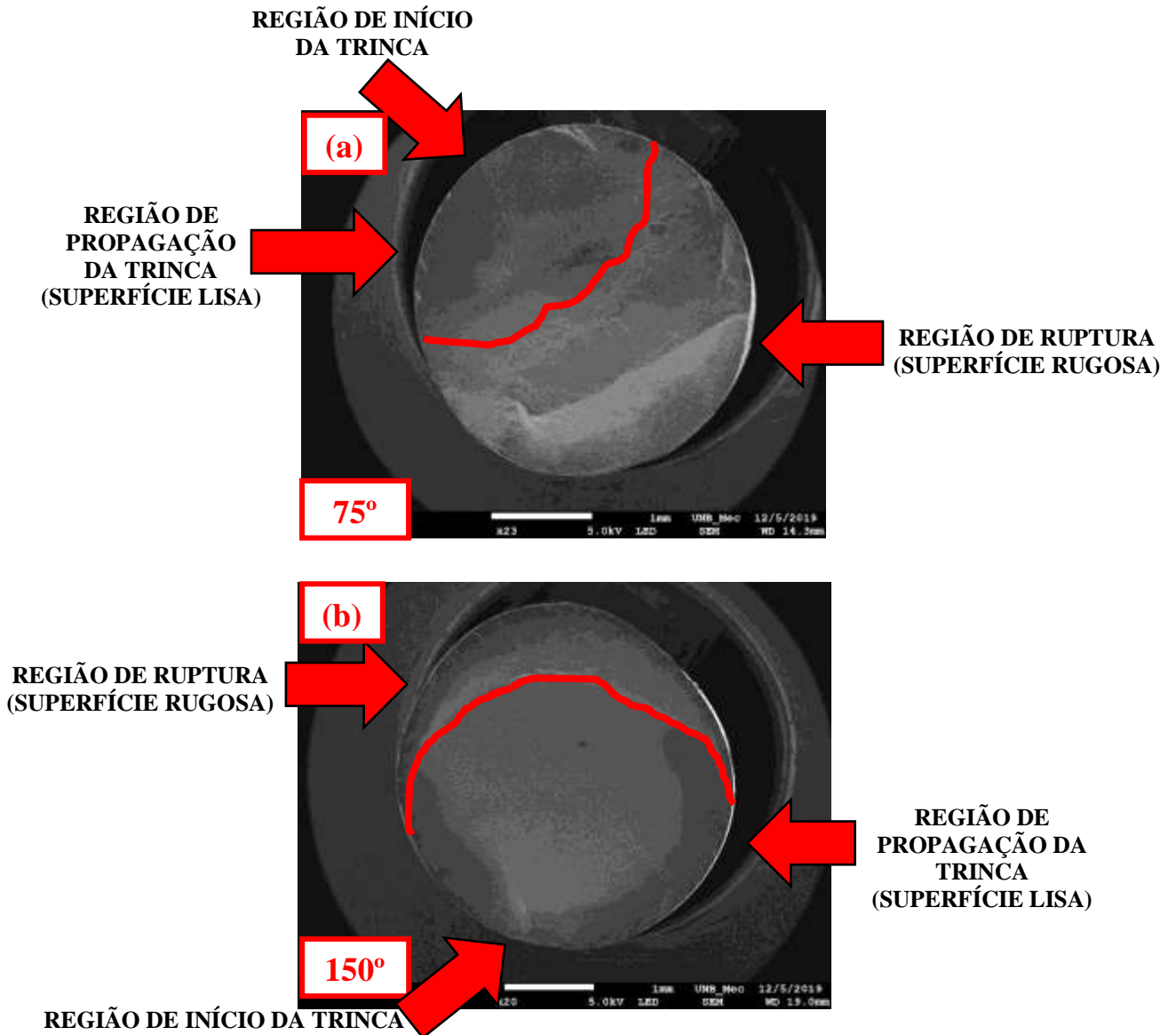


Figura 4.21: Zonas características de falhas por carregamentos cíclicos em amostras ensaiadas a (a) 75°C e (b) 150°C.

4.4.2.1.1. Início da trinca

Na figura 4.20 observam-se regiões indicativas de início da falha, coerentes com marcas de desgaste por fretting na região de contato entre os fios componentes do cabo ou entre os fios e o grampo de suspensão.

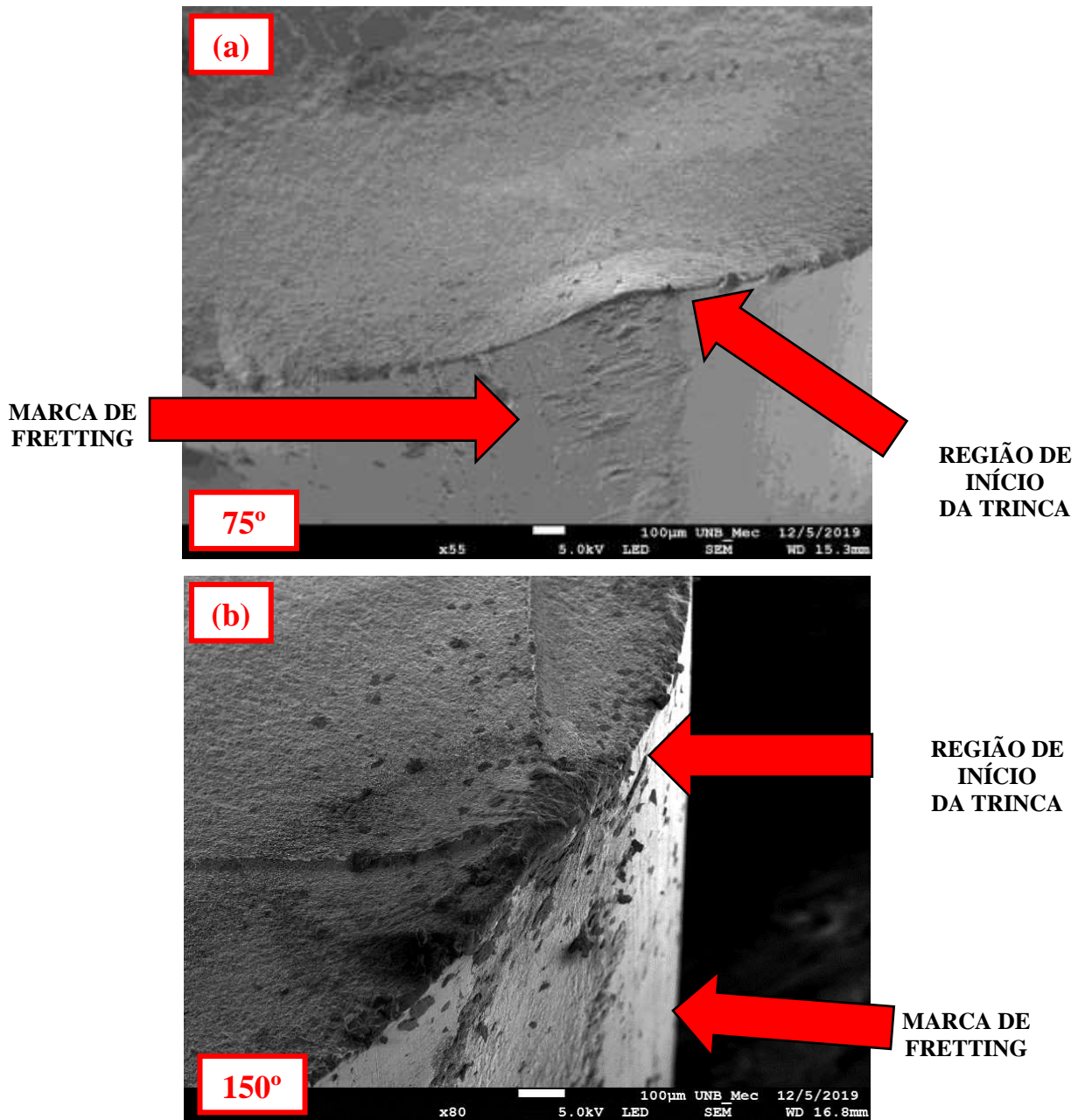


Figura 4.22: Amostras com indicação do início da trinca em amostras ensaiadas a (a) 75°C e (b) 150°C.

4.4.2.1.2. Zona de propagação da trinca

Uma vez que há uma trinca no material, esta tende a se propagar pela região denominada zona de propagação. Nesta região encontram-se características específicas como superfícies lisas, marcas de praia e estrias mostradas na figura 4.21. As marcas de praia são detalhes circulares que aparecem tendo como centro, o ponto inicial da trinca que podem ser visíveis em toda esta região. Marcas de estrias são linhas situadas entre as marcas de praia e

possuem maior dificuldade de visualização, e devido a este fator, não foram detectadas nas imagens captadas.

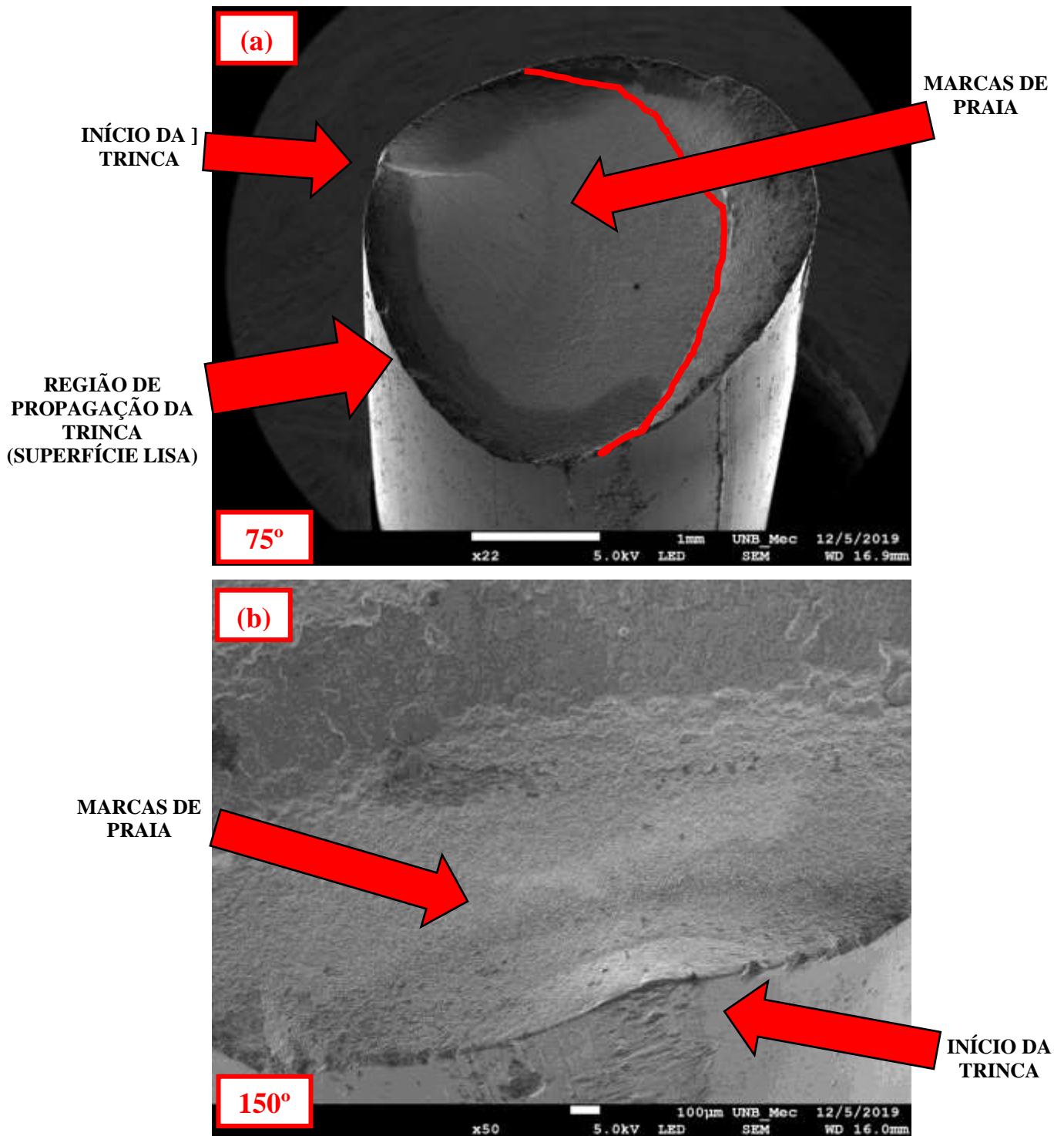


Figura 4.23: Marcas de praia indicando a zona II presente na amostra ensaiada (a) a 75°C e (b) 150°C.

4.4.2.1.3. Zona de ruptura final

A zona de ruptura final ou catastrófica é caracterizada pela superfície rugosa e pela presença de microcavidades conhecidas como *dimples*. Estas são marcas resultantes de fraturas dúcteis que dependem do modo de carregamento. Como sabe-se que no caso de cabos condutores existem vários tipos de carregamentos em direções diferentes, não é possível obter precisão no formato dos dimples. Mas foram verificadas nas imagens que a maioria dos dimples possuía formato predominantemente equiaxial constatando que o modo de carregamento mais significativo é o carregamento em tração que ocasiona a fratura.

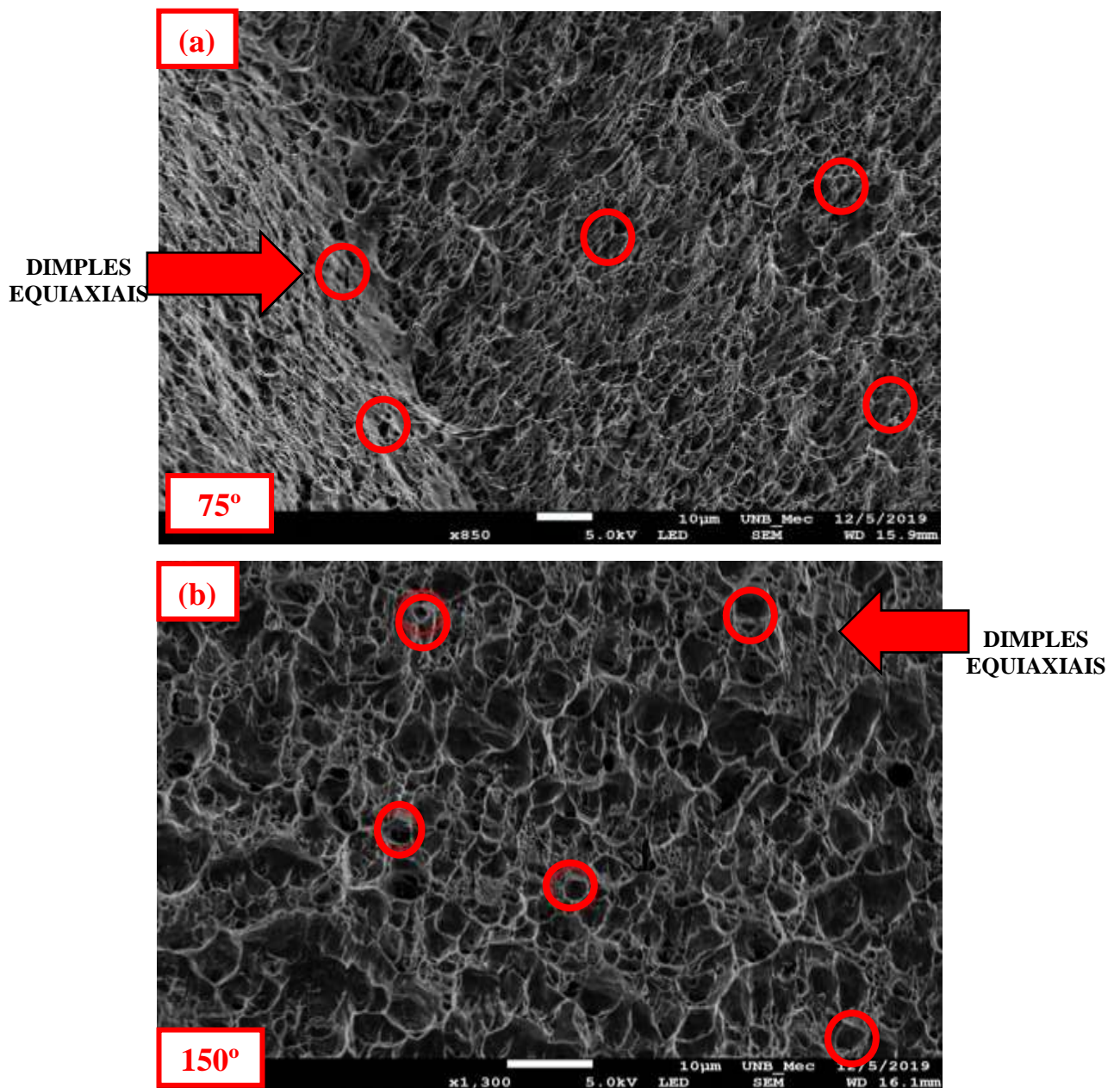


Figura 4.22: Dimples equiaxiais em fraturas ensaiadas a (a) 75°C e (b) 150°C decorrentes de uma fratura característica de carregamento de tração.

Outra característica bastante perceptível nas imagens microscópicas apresentadas na figura 4.23 é o empescoçamento nas fraturas que é a deformação plástica que o material apresenta antes de fraturar-se completamente. Este comportamento é característico de fraturas dúcteis.

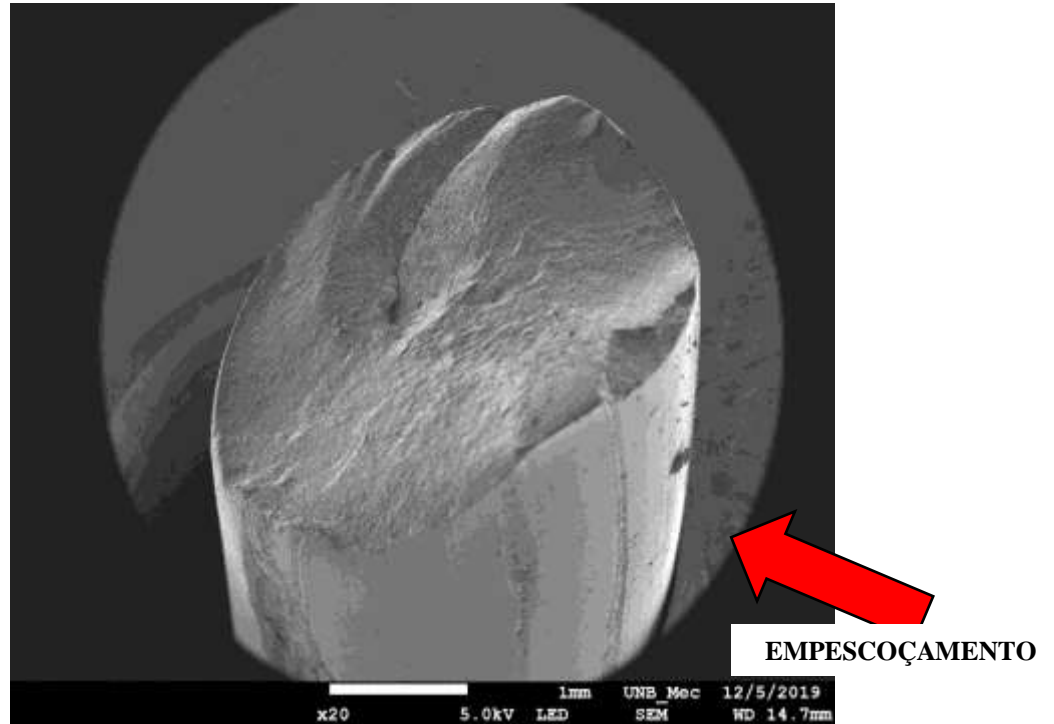


Figura 4.25: Empescoçamento ocasionado pela fratura dúctil.

5. CONCLUSÕES

Esta pesquisa apresentou o desenvolvimento do dispositivo de aquecimento de cabos condutores, os ensaios de fadiga em temperaturas controladas, o tratamento térmico em amostras para medição da dureza em relação ao tempo, os ensaios de dureza e a análise das falhas dos condutores. Portanto serão apresentadas nesta seção as conclusões obtidas em cada etapa desenvolvida.

O dispositivo desenvolvido está apto para ser utilizado em ensaios de fadiga em temperaturas controladas pois teve seu comportamento dentro das expectativas. As características do dispositivo de exatidão, precisão, baixo tempo de estabilidade e baixa dispersão de calor nos demais componentes garantem segurança e credibilidade permitindo que ensaios de fadigas em temperaturas controladas sejam realizados a partir deste dispositivo no Laboratório de Fadiga e Integridade de Cabos Condutores de Energia – LabCabos. A termografia realizada comprova que o aquecimento da cúpula ocorre uniformemente no cabo, uma vez que a temperatura aferida na posição inferior é equivalente àquela aferida em outras regiões da superfície do cabo e que não dispersão do calor gerado para outros componentes.

Amostras retiradas do cabo CAL 900 da liga 6201 da forma que foi recebido no laboratório apresentaram valor médio de dureza de 81 HV, similares aos observados em amostras deste cabo após ensaio a 75 graus celsius. Já as ensaiadas a 150 graus celsius apresentaram dureza próxima a 90 HV.

Nos ensaios de fadiga isotérmica a 75°C, concluiu-se que não há influência significativa da temperatura de ensaio na vida em fadiga deste condutor. Foram constatadas diferenças de vida de no máximo cinco por cento em relação ao ensaio em temperatura ambiente. Sabe-se que em linhas de transmissão, com o aumento da temperatura devido à ampacidade e às condições climáticas, o cabo não termoresistente pode operar no intervalo de 60 a 90°C. Os cabos termoresistentes pode ser usados em temperaturas de até 210 °C. A dureza do material também não foi significativamente afetada pelo aquecimento nesta temperatura dentro do intervalo de quarenta e duas horas.

Nos ensaios de fadiga isotérmica a 150°C verificou-se que esta temperatura afetou o comportamento em fadiga do condutor indicando um aumento de 600.000 ciclos de vida em relação ao ensaio realizado em temperatura ambiente e apresentou uma dureza superior em

13HV no período de quarenta e duas horas de ensaio, obtendo a curva S-N acima da curva de segurança da CIGRE quando submetido à níveis de tensão elevados.

A temperatura de 150°C durante os ensaios de fadiga promoveu um envelhecimento artificial no material gerando endurecimento por precipitação e, com base neste aumento de dureza, infere-se provável modificação dos precipitados presentes na liga da zona de Guinier-Preston I para a zona de Guinier-Preston II (fase β'') tornando-os mais finos, menores e distribuídos de forma mais homogênea na matriz. Para demonstração mais efetiva em relação às zonas de Guinier-Preston, faz-se necessário o uso de microscópio eletrônico de transmissão (MET) visando obtenção de imagens com maiores aumentos que permitam observar os precipitados formados em virtude deste envelhecimento.

O cabo ensaiado, devido ao envelhecimento da liga provocado pela temperatura de ensaio, apresentou aumento considerável em suas propriedades mecânicas devido ao bloqueio do deslizamento das discordâncias durante as deformações e por consequência, maior vida em fadiga pois as microtrincas tiveram maior dificuldade de propagação pelo material.

Conclui-se ainda que o tratamento térmico efetuado no processo de fabricação do cabo não atingiu o ponto de máxima dureza nem resistência à fadiga adequada. Neste caso, para este cabo com tratamento térmico insuficiente na fabricação, um eventual aquecimento em serviço em temperaturas em torno de 150 °C poderá promover aumento na dureza e na vida em fadiga, caso esse aquecimento ocorra por tempo suficiente para promover o envelhecimento não produzido na fabricação.

Sabe-se que existem outros elementos limitadores ao aumento de ampacidade nas LTs como fluência, a distância entre o solo e condutor e aquecimento nas partes que compõe o sistema que devem ser respeitados. Estes elementos não foram levados em consideração se atendo apenas ao escopo do trabalho de avaliar a influência da temperatura na vida em fadiga do condutor.

Em comparação com os mesmos dados gerados em ensaios de fadiga em temperatura ambiente (KALOMBO, 2017) é notório que a temperatura de até 150°C na superfície do condutor não afeta o posicionamento e tipo das falhas nos ensaios. Foi observado que o número de incidência das falhas no topo é muito superior em relação à base (93 quebras no

topo e 15 na base) e, portanto, que o contato entre os fios e a tampa do grampo neste condutor é mais prejudicial que o contato entre os fios e a base do grampo. Sugere-se, então desenvolvimento de uma tampa do grampo mais adequada para minimizar este efeito de rigidez opondo-se à vibração do condutor. Verifica-se também que as quebras externas são predominantes nos ensaios de fadiga (82%) enquanto as quebras internas ocorrem com menor frequência (18%) e os formatos das quebras são aleatórios dependendo da região que a trinca se inicia e se propaga. Não é possível definir um padrão do tipo das quebras pois acontecem quebras quase planas, em 45°, em V ou em L.

Para melhor compreensão das causas das falhas e das diferenças de vidas apresentadas nos ensaios de fadiga foi proposta análise microscópica detalhada realizada com o uso do MEV nas superfícies fraturadas. Constataram-se características de carregamento cíclico observando-se as zonas de iniciação, propagação da trinca e ruptura final. O início da trinca é verificado próximo a posição de contato entre os fios e o grampo ou entre fio e fio, possivelmente pelo mecanismo de *fretting*. Na zona de propagação identificou-se a presença de marcas de praia indicando o crescimento da trinca por fadiga. A nível de resolução do microscópio usado não foram encontradas estrias de fadiga nas superfícies examinadas. Nas zonas de ruptura final observam-se regiões rugosas com a presença de dimples, em sua maioria equiaxiais, indicando que o principal carregamento presente é de tração. Existem também, em menor quantidade, dimples de outros formatos devido à complexidade dos carregamentos. Esses resultados indicam o aspecto dúctil da fratura final, similar à observada nas superfícies de falha das amostras ensaiadas na temperatura ambiente e a 75 °C.

Este trabalho procurou replicar, da forma mais aproximada viável, as condições que os cabos condutores operam em LTs, simulando fatores que afetam a vida em fadiga, a saber: a carga de esticamento, níveis de vibrações eólicas e temperatura permitindo melhor avaliação do seu comportamento.

PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho elucida a necessidade de mais análises nesta linha de pesquisa da influência da temperatura em cabos condutores. Desta forma, para pesquisas futuras, são propostas:

- Análise, por meio da microscopia eletrônica de transmissão (MET), nas amostras de fios da liga 6201 para visualização dos precipitados compostos por Mg₂Si

e averiguação mais detalhadas relativa à dureza do material e do tratamento térmico aplicado no mesmo;

- Ensaios de fadiga térmica em cabos com outras composições para verificar possíveis alterações na vida em fadiga e propriedades mecânicas;
- Ensaios em diversos níveis de temperatura afim de determinar máxima ampacidade em cabos condutores.

6. REFERÊNCIAS

ABNT NBR 5725-1:2018 - Exatidão e precisão dos métodos e dos resultados de medição, 2018.

ABNT, NBR-16292;201, Ensaio termodinâmicos e termografia, 1985.

ALUMINUM ASSOCIATION. “International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys” Registration Record Series, Teal Sheets, 2015.

ARAÚJO, J.A.; Ferreira, J.L.A.; Alencar, R.F.M. Avaliação crítica da ocorrência de rupturas por fadiga nos condutores das LTs 230 kV Brasnorte-Juba e Brasnorte-Juína circuitos 1 e 2. Universidade de Brasília, Relatório Técnico, Nov., 2012.

ASM. “Metals Handbook: Failure Analysis and Prevention” Vol.11. Ohio, USA: ASM International, 2002.

ASPDEN, Reuben S.; Gemmell, Nathan R.; Morris, Peter A.; Tasca, Daniel S.; Mertens, Lena; Tanner, Michael G.; Kirkwood, Robert A.; Ruggeri, Alessandro; Tosi, Alberto, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, Norma NBR-5422, Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica: Procedimento, 1985.

ASTM STP E1823. “Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing Definitions of Terms Relating to Fatigue”, Annual Book of Standards, ASTM, Philadelphia, 2013.

AZEVEDO, C. R. F. et al. “Fretting Fatigue in Overhead Conductors: Rig Design and Failure Analysis of a Grosbeak Aluminium Cable Steel Reinforced Conductor” Engineering Failure Analysis, 2009.

BARBER, K. W., Callaghan, K. J. “Improved overhead line conductors using Aluminium alloy 1120” IEEE Transactions on Power Delivery, January, 1995.

BEQUETTE, B. Wayne (2006). *Process Control: Modeling, Design, and Simulation*. Prentice Hall PTR

CALLISTER Jr. W. D. “Materials Science and Engineering: An introduction”. 7th Edition. John Wiley & Sons, Inc., 2007.

CHOW, G.C, Tests of equality between sets of coefficients in two linear regressions, *Econometrica*, Vol. 23, No 3, pp. 591-605, 1960.

CIGRE SC22, WG04. “Guide for Endurance Tests of Conductors Inside Clamps”. *Electra*, 1985.

CIGRE WG 22.12: TB 207: “Thermal Behaviour of Overhead Conductors” Paris, 2002.

CIGRE, WG B2.30. “Engineering Guidelines Relating to Fatigue Endurance Capability of Conductor/Clamp Systems” October 2008.

CIGRE, WG B2-42 601 - guide for thermal rating calculations of overhead lines, 2014.

COSTA, E. R., ARAÚJO, J. A., VELOSO L. A., SILVA C. R. M., FERREIRA J. L. A., Development of controlled heating for fatigue test in overhead conductors at high temperature, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 42, 2020.

DOWLING, N. E.; CALHOUN, C. A.; ARCARI, A. “Mean Stress Effects in Stress-life Fatigue and the Walker Equation. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*”. 2009.

EBTE–LT–004–PB; Empresa Brasileira de Transmissão de Energia -EBTE, Condutor e para-raios, projeto Básico de Linhas de transmissão 230 kV PARECIS – MAGGI, JUÍNA – MAGGI – JUBA e NOVA MUTUM – SORRISO– SINOP. 2008.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. NOTA TÉCNICA DEA 001/17 - Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2017-2026), Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2017.

EPRI. “Transmission line reference book: Wind induced Conductor motion”. Palo Alto, CA, 2006.

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), Tese de Doutorado em Ciências Mecânicas, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, 2010.

FALCÃO, C. A. J. Estudo do comportamento da fadiga de baixo ciclo em altas temperaturas do aço inoxidável AISI 420. Escola de Engenharia de São Carlos, 2002.

FARHAD, B., AHMED, M.S., KHALEED, H.M.T., ZAIDI, M.R., ZAINAL, A.A., ZAHURIN, S., NUR, A.B., , Fatigue Behaviour of aluminium alloy at elevated temperature, 2009.

FERREIRA, M.F.S. Ensaios de dureza Rockwel, Vickers, Brinell e Microdureza, ensaios de Tração e ensaio Jominy. Relatório 1 de Laboratório de Materiais de Construção Mecânica. Belo Horizonte. 2011.

FONSECA, B. Q. A.; CIMINI Jr, C. A. Análise de Vida Útil de Cabos Condutores de Linhas Aéreas de Transmissão. Uberlândia, MG, 2003.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. Ensaios dos Materiais, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, 2000.

HENRIQUES, A. M. Bancada de Ensaios Mecânicos à Fadiga de Cabos Condutores de Energia. Tese (Doutorado). Brasília, DF, 2006.

HUSSAIN, F, ABDULLAH, S, NUAWI, M.Z, , Journal of mechanical Engineeirn and Sciences, Vol. 10 (3), 1968.

IEEE. “Guide for Aeolian Vibration Field Measurements of Overhead Conductors”. 2007.

IEEE. STANDARD 1368. “Guide for Aeolian Vibration Field Measurement of Overhead Conductors”. 2006.

IEEE. STANDARD 563. “Guide on Conductor Self-Damping Measurements”. 1978.

KALOMBO, R.B.; ARAÚJO, J.A.; FERREIRA, J.L.A.; SILVA, C.R.M.; ALENCAR, R., CAPRA, A.R. "Assessment of the fatigue failure of an All Aluminium Alloy Cable (AAAC) for a 230 kV transmission line in the Center-West of Brazil, Engineering Failure Analysis". 2017.

MAIA, A. M. P. Efeitos dos Ciclos de Solubilização e Envelhecimento no Comportamento da Liga de Alumínio 6101. Porto, PT, 2012.

MALVINO, A. P. "Principios de Electrónica". Vol. 1., 6ª Ed. McGraw Hill, 1987.

MARTINS, M. M. M. Estudo do Comportamento das Ligas de Alumínio 6061 e 6082. 2008.

MURÇA, L. B. Estudo Experimental do Efeito da Sequência de Carregamento Sobre a Resistência à Fadiga de Cabos Condutores. Brasília, 2011.

OLIVEIRA, A. C. C. Propriedades mecânicas de fadiga de baixo ciclo à temperatura de 300°C do aço inoxidável austenítico do sistema Fe-Cr-Mn-N. Escola de Engenharia de São Carlos, 2001.

PAUL, A. T.; GENE, M. "Physics for Scientists and Engineers. W. H. Freeman and Company". New York, 2004.

PEREIRA, C. A.; LUCATO, M. Correlação entre tensões de fadiga de corpos com superfícies polidas e corpos com rugosidade. EEM/CEUN-IMT. 2016.

PINA, F. J. Previsão de vida em fadiga isotérmica e termomecânica e ferro fundido vermicular. Escola de Engenharia de São Carlos, 2019.

POFFENBERGER, J.C.; SWART, R. L. "Differential Displacement and Dynamic Conductor Strain". IEEE Transactions Paper, Vol PAS 84, 1965.

RAMEY, G. E.; TOWNSEND, J. S. " Effects of clamps on fatigue of ACSR conductors". ASCE J. of the Energy Div., May, 1981.

REED-HILL, Robert E. Princípios de Metalurgia Física. 2ªed. Rio de Janeiro. Guanabara Dois, 1982.

REINKE, G. Influência do tratamento térmico nas propriedades mecânicas de fios de alumínio liga usados em cabos condutores submetidos a ensaios de fadiga. Universidade de Brasília. 2017.

SILVEIRA, R. C. Cálculo de ampacidade para linhas aéreas de transmissão: um comparativo entre as normas IEEE 738-2012 e CIGRE WG 22.11: TB 207. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017

VARNEY, T. "Notes on the vibration of transmission line conductors". 1926.

WATANABE, L. Análise da vida à fadiga de cabos condutores de energia submetidos a carregamentos aleatórios. Universidade de Brasília, Brasília. 2014.

APÊNDICES

APENDICE 1

Preparo de amostras para realização de ensaios de dureza Vickers

Embutimento

O embutimento serve para facilitar o manuseio das amostras e garantir que não se movimentem durante o ensaio prejudicando a medição. Este processo consiste em imergir a amostra em material adequado tornando-a peça única.

Foi utilizado o embutimento a frio com resina sintética de polimerização rápida e catalizador formando assim, um líquido viscoso. Este, foi despejado em um molde plástico onde a amostra estava posicionada. Com tempo de endurecimento de cerca de uma hora a amostra estava pronta para ser lixada.



Figura 1.1. Amostras embutidas

Lixamento

O lixamento tem por objetivo eliminar as marcas presentes na amostra e tornar a superfície ideal para o polimento. Foi utilizada a técnica de lixamento manual que consiste em lixar a amostra sequencialmente com lixas de granulometria cada vez menor, mudando-se de direção em 90° a cada troca de lixa até sumirem os traços deixados pela lixa anterior.

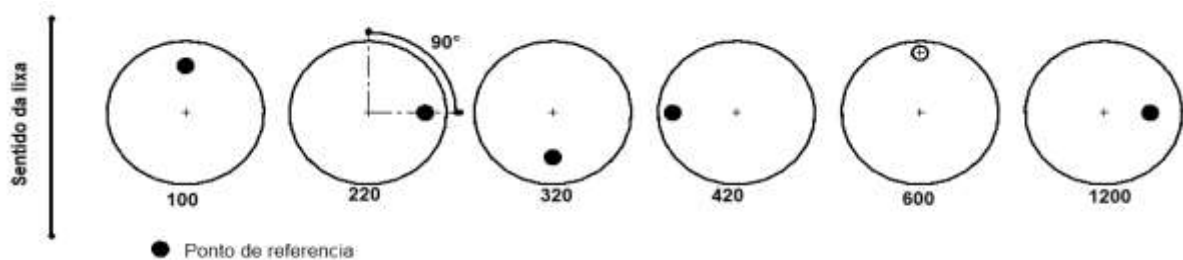


Figura 1.2: Técnica de lixamento

As lixas utilizadas sequencialmente foram 100, 220, 320, 400, 600, 800 e 1200 para se conseguir o lixamento mais eficaz. A pressão e a velocidade aplicadas foram moderadas para evitar deformações plásticas na superfície da amostra.

Após realizar o processo de lixamento completo, confere-se através do microscópio se a superfície está livre de marcas e apta para realização do polimento.

Polimento

Após a amostra estar livre de marcas, inicia-se o polimento. O polimento é realizado através de processo mecânico onde coloca-se o pano de polimento na politriz, aplica-se o agente polidor, no caso alumina, e manualmente a amostra é posicionada sobre o disco. Realizado o polimento da amostra, verifica-se com microscopia se a superfície está pronta para realização do ensaio de dureza do material.

APÊNDICE 2

Tabelas de dados de ensaios.

Nesta seção são apresentadas tabelas de dados dos ensaios realizados a 75°C, 150°C e completa dos dados dos ensaios, mapeamento da posição das falhas por camada e topografia encontrada nas falhas das amostras avaliadas.

Tabela 2.1:Ensaio de fadiga em temperatura de 75°C.

Ensaio	Tensão	Yb	Número de ciclos (N)				
			1ª quebra	2ª quebra	3ª quebra	4ª quebra	Média
H=2681,82 kgf (20% EDS)	(MPa)	(mm)					
1	23,7	0,68	6,70E+05	8,56E+06	1,12E+06	1,23E+06	1,32E+06
2	23,7	0,68	1,04E+06	1,15E+06	1,41E+06	1,50E+06	
3	23,7	0,68	5,19E+05	8,16E+05	8,90E+05	1,22E+06	
1	28,22	0,81	5,55E+05	6,65E+05	7,39E+05	1,17E+06	1,07E+06
2	28,22	0,81	5,67E+05	6,41E+05	6,41E+05	9,26E+05	
3	28,22	0,81	4,45E+05	5,19E+05	5,56E+05	1,12E+06	
1	31,35	0,9	5,67E+05	6,41E+05	6,41E+05	7,03E+05	7,16E+05
2	31,35	0,9	4,40E+05	6,23E+05	6,23E+05	8,53E+05	
3	31,35	0,9	4,45E+05	4,82E+05	5,94E+05	5,94E+05	

Tabela 2.2:Ensaio de fadiga em temperatura de 150°C

Ensaio	Tensão	Yb	Número de ciclos (N)				
			1ª quebra	2ª quebra	3ª quebra	4ª quebra	Média
H=2681,82 kgf (20% EDS)	(MPa)	(mm)					
1	23,7	0,68	1,15E+06	1,67E+06	1,78E+06	2,06E+06	1,99E+06
2	23,7	0,68	1,26E+06	1,37E+06	1,63E+06	2,30E+06	
3	23,7	0,68	1,18E+06	1,33E+06	1,44E+06	1,80E+06	
1	28,22	0,81	7,75E+05	8,12E+05	1,33E+06	1,33E+06	1,54E+06
2	28,22	0,81	1,34E+06	1,56E+06	1,60E+06	1,60E+06	
3	28,22	0,81	1,19E+06	1,30E+06	1,41E+06	1,71E+06	
1	31,35	0,9	1,41E+06	1,44E+06	1,48E+06	1,52E+06	1,50E+06
2	31,35	0,9	1,07E+06	1,22E+06	1,70E+06	1,70E+06	
3	31,35	0,9	1,03E+06	1,15E+06	1,22E+06	1,29E+06	

Tabela 2.3:Ensaio de fadiga em todas as temperaturas ensaiadas.

Ensaio	Temperatura	Tensão	Yb	Número de ciclos (N)				
		(MPa)	(mm)	1ª quebra	2ª quebra	3ª quebra	4ª quebra	Média
1	20°C	23,7	0,68	1,03E+06	1,12E+06	1,18E+06	1,50E+06	1,40E+06
2	20°C	23,7	0,68	8,87E+05	1,06E+06	1,06E+06	1,40E+06	
3	20°C	23,7	0,68	6,88E+05	7,78E+05	1,11E+06	1,29E+06	
2	75°C	23,7	0,68	6,70E+05	8,56E+06	1,12E+06	1,23E+06	1,32E+06
3	75°C	23,7	0,68	1,04E+06	1,15E+06	1,41E+06	1,50E+06	
4	75°C	23,7	0,68	5,19E+05	8,16E+05	8,90E+05	1,22E+06	
1	150°C	23,7	0,68	1,15E+06	1,67E+06	1,78E+06	2,06E+06	1,99E+06
2	150°C	23,7	0,68	1,26E+06	1,37E+06	1,63E+06	2,10E+06	
3	150°C	23,7	0,68	1,18E+06	1,33E+06	1,44E+06	1,80E+06	
1	20°C	28,22	0,81	5,46E+05	6,82E+05	1,06E+06	1,04E+06	9,39E+05
2	20°C	28,22	0,81	4,00E+05	4,40E+05	6,00E+05	9,21E+05	
3	20°C	28,22	0,81	5,40E+05	6,35E+05	7,30E+05	8,57E+05	
1	75°C	28,22	0,81	5,55E+05	6,65E+05	7,39E+05	1,17E+06	1,07E+06
2	75°C	28,22	0,81	4,45E+05	5,19E+05	5,56E+05	9,26E+05	
3	75°C	28,22	0,81	5,67E+05	6,41E+05	6,41E+05	1,12E+06	
1	150°C	28,22	0,81	7,75E+05	8,12E+05	1,33E+06	1,53E+06	1,61E+06
2	150°C	28,22	0,81	1,34E+06	1,56E+06	1,60E+06	1,60E+06	
3	150°C	28,22	0,81	1,19E+06	1,30E+06	1,41E+06	1,71E+06	
1	20°C	31,35	0,9	4,34E+05	4,63E+05	6,93E+02	7,44E+05	7,05E+05
2	20°C	31,35	0,9	2,93E+05	5,68E+04	6,45E+05	7,63E+05	
3	20°C	31,35	0,9	5,47E+05	5,77E+03	6,00E+05	6,08E+05	
1	75°C	31,35	0,9	4,08E+05	4,82E+05	5,93E+05	7,03E+05	7,16E+05
2	75°C	31,35	0,9	4,40E+05	6,23E+05	6,23E+05	8,53E+05	
3	75°C	31,35	0,9	4,45E+05	4,82E+05	5,94E+05	5,94E+05	
1	150°C	31,35	0,9	1,41E+06	1,44E+06	1,48E+06	1,52E+06	1,50E+06
2	150°C	31,35	0,9	1,07E+06	1,22E+06	1,70E+06	1,60E+06	
3	150°C	31,35	0,9	1,03E+06	1,15E+06	1,22E+06	1,39E+06	

Tabela 2.4: Mapeamento da posição das falhas par camada (E: Externa I: Interna) do cabo CAL 900.

<i>H</i>	Temperatura	<i>Y_b</i>	Ensaio	Camada de ocorrência da falha			
(mm)	(°C)	(mm)		1ª Quebra	2ª Quebra	3ª Quebra	4ª Quebra
2144	20	0,68	1	E	E	E	I
			2	E	E	E	I
			3	E	E	I	I
		0,81	1	E	E	E	I
			2	E	E	I	I
			3	E	E	E	I
		0,90	1	E	E	E	E
			2	E	E	E	E
			3	E	E	E	I
	75	0,68	1	E	E	E	E
			2	E	E	E	E
			3	E	E	E	E
		0,81	1	E	E	E	E
			2	E	E	E	E
			3	E	E	E	E
		0,90	1	E	E	E	E
			2	E	E	I	I
			3	E	E	E	E
	150	0,68	1	E	E	E	I
			2	E	E	I	I
			3	E	E	E	E
		0,81	1	E	E	E	E
			2	E	E	E	E
			3	E	E	E	I
0,90		1	E	E	I	I	
		2	E	E	E	I	
		3	E	E	E	I	

Tabela 2.5 Topografia encontrada nas falhas das amostras avaliadas (CAL 900).

H (mm)	T (°C)	Y _b (mm)	Ensaio	Tipos das falhas			
				1ª Quebra	2ª Quebra	3ª Quebra	4ª Quebra
2681,82	0	0,68	1	L	QP	V	V
			2	L	QP	45°	45°
			3	QP	QP	45°	V
		0,81	1	45°	45°	L	QP
			2	L	45°	QP	QP
			3	L	QP	V	QP
		0,90	1	45°	QP	V	V
			2	QP	45°	QP	QP
			3	QP	QP	V	V
	5	0,68	1	V	V	45°	QP
			2	V	V	V	V
			3	V	V	V	V
		0,81	1	L	V	V	V
			2	L	V	QP	V
			3	L	45°	L	V
		0,90	1	45°	V	45°	V
			2	V	V	45°	45°
			3	V	V	V	V
	50	0,68	1	L	V	V	V
			2	45°	L	QP	V
			3	V	V	L	45°
		0,81	1	45°	45°	V	45°
			2	V	45°	45°	L
			3	V	V	V	V
		0,90	1	V	L	V	QP
			2	L	V	45°	45°
			3	L	V	V	45°

ANEXOS

ANEXO 1 -Certificado de calibração dos termohigrômetros utilizados

CAL-TERMO-HIGRÔMETROS CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 11497/20	 BIOLOG ENGENHARIA BIOMÉDICA
--	--

DATA DA CALIBRAÇÃO: 12/03/2020

DATA DA EMISSÃO DO CERTIFICADO: 12/03/2020

1. CLIENTE:

QI MED - Engenharia Hospitalar Ltda - ME, ST SCIA Quadra 15 Conjunto 2 - Guarã - CEP - 71.250-010 - Brasília - DF.

2. LOCAL DA CALIBRAÇÃO:

Instalações da Biolog Engenharia Biomédica Ltda, SHCGN CLR Quadra 716 Bloco A Loja 47 - CEP 70.770-531 - Asa Norte - Brasília-DF.

3. CONDIÇÕES AMBIENTAIS:

Temperatura: 20,9°C, Umidade: 65,9%. Termo-higrômetro marca Minipa, modelo MTH-1362, Nº de Série: T000500001452M, calibrado pela INSTEMAQ. Certificado de Calibração Nº 16815/19C, de 14/08/2019, válido até 13/08/2020.

4. CARACTERÍSTICAS DA UNIDADE SOB TESTE:

- Nome: Termo-higrômetro Digital
- Modelo: MT-242
- Nº de Série: 511Q30R
- Nº de Patrimônio: S/Nº
- Marca/Fabricante: Minipa do Brasil Ltda

5. ITENS TESTADOS:

TEMPERATURA AMBIENTE e HUMIDADE RELATIVA DO AR AMBIENTE.

6. PROCEDIMENTO DE TESTE UTILIZADO:

PGQ-15.1_PCE - TERMO-HIGRÔMETROS_Manual de Boas Práticas_Biolog_2019

7. MÉTODO UTILIZADO:

Comparação com a média do Padrão, em 6(seis) medidas sucessivas, após estabilização de 20 minutos para a coleta da primeira medidas e 20 minutos de intervalo para as demais, temperatura ambiente controlada por ar condicionado ajustado para 20°C, medida através do sensor NTC interno tanto no padrão como no equipamento sob teste, conforme a tabela dos resultados e incertezas de medição abaixo, de acordo com o protocolo de testes e calibrações pré-estabelecidos pela Biolog Engenharia Biomédica Ltda.

8. PADRÕES UTILIZADOS:

Termo-higrômetro marca Minipa, modelo MTH-1362, Nº de Série: T000500001452M, calibrado pela INSTEMAQ. Certificado de Calibração Nº 16815/19C, de 14/08/2019, válido até 13/08/2020.

9. INCERTEZAS DE MEDIÇÃO:

As Incertezas Expandidas de Medição (U) relatadas nas tabelas anexas dos resultados das medidas, são declaradas como as incertezas de medição padrão, multiplicadas pelo fator de abrangência K, que(para uma distribuição t com respectivo valor de V_{eff} - graus de liberdade efetivos), corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza de medição padrão foi determinada de acordo com a publicação E/A-4/02 - Expressão da Incerteza de Medição na Calibração(Versão Brasileira - Fev/2010)

10. DECLARAÇÃO DE CONFORMIDADE: Não aplicável.

11. TESTADO POR: Deusimar Rocha Rabelo

11.1 FUNÇÃO: Gerente Técnico

12. CÁLCULOS E CERTIFICADO: Deusimar Rocha Rabelo

12.1. FUNÇÃO: Gerente Técnico

BIOLOG ENGENHARIA BIOMÉDICA LTDA, CNPJ: 00.673.426/0001-06, CND/DF: 07.309.594/001-05, SHCGN CLR Quadra 716 Bloco A Loja 47 - CEP: 70.770-531 - Asa Norte - Brasília - DF, Fone: (61) 3248-6496 ; (61)9556-5261 ; Fax: (61) 3248-4256, www.biolog.com.br, contato@biolog.com.br

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Nº 11497/20



13. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO:

13.1 – TEMPERATURA - em °C								
Tipo	Padrão	Leituras		Média	Desvio	Veff	K	U
TEMPERATURA AMBIENTE	20,9	L1	20,7	20,0	0,20	15,12	2,18	0,42
		L2	20,5					
		L3	20,2					
		L4	19,8					
		L5	19,5					
		L6	19,5					

13.2 – HUMIDADE RELATIVA DO AR – em %								
Tipo	Padrão	Leituras		Média	Desvio	Veff	K	U
HUMIDADE RELATIVA DO AR AMBIENTE	65,9	L1	67,0	68,5	0,61	111,76	2,02	1,95
		L2	67,0					
		L3	68,0					
		L4	67,0					
		L5	67,0					
		L6	75,0					

Notas:

- ✓ Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.
- ✓ Este documento não pode ser reproduzido parcialmente sem prévia autorização da Biolog Engenharia Biomédica Ltda.



Eng^o. Luiz Alberto Pinedo
 CREA-DF 2202D
 Responsável Técnico