



**TESE DE DOUTORADO**

**UTILIZAÇÃO DE REDES NEURAIS  
ARTIFICIAIS PARA AVALIAR O EFEITO DA  
TENSÃO MÉDIA NA FADIGA DO CABO CAL  
1055 MCM**

Por

**Miélle Silva Pestana**

**Brasília, 18 de Dezembro de 2017**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Faculdade de Tecnologia

Departamento de Engenharia Mecânica

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

**UTILIZAÇÃO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS  
PARA AVALIAR O EFEITO DA TENSÃO MÉDIA NA  
FADIGA DO CABO CAL 1055 MCM**

**Miélle Silva Pestana**

**Orientador: Prof. Ph.D. José Alexander Araújo**

**Coorientador: Prof. Dr. Raimundo Carlos Silverio *Freire Júnior***

**TESE DE DOUTORADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS**

**Brasília-DF, 18 de Dezembro de 2017**

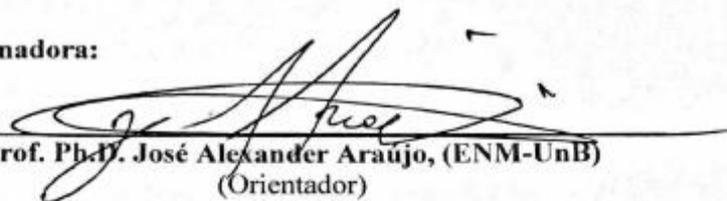
**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

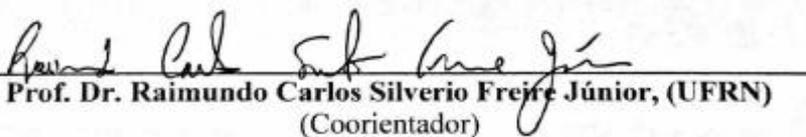
**UTILIZAÇÃO DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS PARA AVALIAR O  
EFEITO DA TENSÃO MÉDIA NA FADIGA DO CABO CAL 1055 MCM**

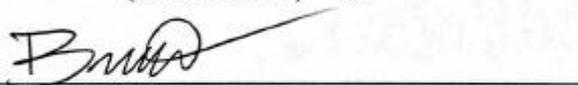
**MIÉLLE SILVA PESTANA**

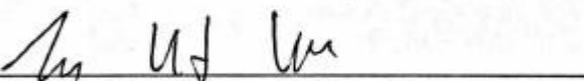
**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTORA EM  
CIÊNCIAS MECÂNICAS.**

**Banca Examinadora:**

  
Prof. Ph.D. José Alexander Araújo, (ENM-UnB)  
(Orientador)

  
Prof. Dr. Raimundo Carlos Silverio Freire Júnior, (UFRN)  
(Coorientador)

  
Prof. Dr. Bruno da Cunha Diniz, (UFBA)  
(Examinador Externo)

  
Prof. Dr. Luis Augusto Veloso, (UnB)  
(Examinador Externo ao programa)

  
Prof. Dr. Jorge Luiz Almeida Ferreira, (ENM-UnB)  
(Examinador Interno)

**Brasília-DF, 18 de Dezembro de 2017.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

MIÉLLE SILVA PESTANA

Utilização de redes neurais artificiais para avaliar o efeito da tensão média na fadiga do cabo CAL 1055 MCM (Distrito Federal) 2017.

xvii, 174 p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Doutora, Ciências Mecânicas, 2017)

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia

Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Cabos Condutores

2. Fadiga

3. Tensão Média

4. Redes Neurais Artificiais

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

### REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA:

PESTANA, M.S (2017) Utilização de redes neurais artificiais para avaliar o efeito da tensão média na fadiga do cabo CAL 1055 MCM. Tese de Doutorado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM DT- 44/2017, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 174 p.

### CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Miélle Silva Pestana

TÍTULO: Utilização de redes neurais artificiais para avaliar o efeito da tensão média na fadiga do cabo CAL 1055 MCM.

GRAU: Doutora

ANO: 2017

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito da autora.

---

Miélle Silva Pestana  
millepestana@gmail.com

***“No início tudo assusta, mas no final tudo vai dar certo, você vai conseguir.”***

Maria Luiza Pestana (*in memoriam*)

*Dedico este trabalho à minha mãe  
Deuseny e ao meu pai de criação João  
Simplicio.*

## **AGRADECIMENTOS**

*Agradeço a Deus, cujo nome é Jeová, por me dar equilíbrio, perseverança e determinação para conseguir chegar até o final.*

*A minha mãezinha Deuseny e ao meu pai de criação João que sempre acreditaram em mim, me encorajaram diariamente a jamais desistir dos meus objetivos. Ao meu pai Luís e as minhas irmãs Mírian e Priscila pelo carinho e incentivo. Meu muito obrigado as minhas tias Gisele e Jarimária pelo apoio e carinho. Agradeço também ao meu namorado Marcelo pelo amor e compreensão nestes últimos dias de luta para finalizar a minha tese.*

*Aos colegas e amigos que compõem a equipe do laboratório de cabos da UnB: Remy, Thiago, Pedro e Renato, pelo exemplo, disposição de me ajudar e contribuírem para que nosso ambiente de trabalho, sempre fosse sinônimo de união e muita alegria. Muito obrigada por tudo que cada um de vocês fizeram por mim, minha gratidão será eterna.*

*Ao meu amigo, Guilherme, pelas muitas vezes que pacientemente ouviu meus lamentos e contribuiu muito para meu crescimento no “mundo da engenharia”, sempre teve uma palavra de incentivo. A minha amiga Angélica, sempre muito querida e carinhosa.*

*Ao professor Alex pelo seu exemplo como profissional proativo, determinado e honesto. Muito obrigada pela oportunidade de integrar no projeto Eletronorte e pelas muitas críticas construtivas, sempre serei grata ao senhor. Ao professor Jorge, pela empatia e generosidade, sempre mostrou prontidão em tirar minhas inúmeras dúvidas sobre fadiga, exemplo de professor. Ao professor Freire Júnior, pela disposição e presteza em me ajudar em qualquer dia e hora a aumentar meu conhecimento em redes neurais artificiais, com a mesma boa vontade e carisma. Muito obrigada a todos os professores do departamento de engenharia mecânica que contribuíram para meu crescimento e formação. Agradeço também a todos os funcionários do SG9, desde os técnicos até os porteiros que sempre me respeitaram e me trataram com muito carinho.*

*A minha tia Maria Luiza (in memoriam) e aos meus primos Mariana e Gabriel que bondosamente me acolheram de uma forma tão hospitaleira e com tanto amor que me senti em casa durante estes seis anos de batalha como estudante. Muito obrigada de coração, amo vocês!*

*A Eletronorte S/A e Intesa pelo apoio financeiro concedido para o desenvolvimento desta pesquisa. E aos membros da banca de avaliação, professores Alex Araújo, Freire Júnior, Jorge Ferreira, Luis Veloso e Bruno Diniz, desde já os agradeço pela disposição e pelas críticas construtivas ao meu trabalho.*

## PREFÁCIO

Esta tese de doutorado apresentada pela autora foi realizada no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília. Supervisionado pelo professor Dr. José Alexander Araújo.

Alguns trabalhos listados abaixo foram publicados ou estão sendo submetidos:

- ✓ R.B. Kalombo, **M.S. Pestana**, J.L.A. Ferreira, C.R.M. da Silva, J.A. Araújo. **Influence of the catenary parameter (H/w) on the fatigue life of overhead conductors**, Tribology International, pp. 141-149, (2017) (publicado).
- ✓ **M.S. Pestana**, R.B. Kalombo, J.A. Araújo, R.C.S. Freire Júnior, J.L.A. Ferreira, C.R.M. da Silva. **Use of artificial neural network to assess the effect of mean stress on fatigue in the Ibis conductor cable**, Fatigue & Fracture of Engineering Material & Structures, (2017) (Submetido).
- ✓ **M.S. Pestana**, R.B. Kalombo, J.A. Araújo, R.C.S. Freire Júnior, J.L.A. Ferreira, C.R.M. da Silva. **Use of artificial neural network to assess the effect of mean stress on fatigue in the AAAC 1055 MCM conductor cable**, International Journal of Fatigue, (2017) (a submeter).
- ✓ **M.S. Pestana**, R.B. Kalombo, J.A. Araújo, J.L.A. Ferreira, T.B. Miranda, C.R.M. da Silva, R.E.R. Vieira, P.H.C. Rocha, R.C.S. Freire Júnior, M.C. Araújo. **Utilização de Redes Neurais Artificiais para Avaliar o Efeito da Tensão Média na Fadiga do Cabo Condutor CAL 1055 MCM**. CITENEL (2017) (publicado).
- ✓ R.E.R. Vieira, R.B. Kalombo, P.H.C. Rocha, T.B. Miranda, **M.S. Pestana**, J.A. Araújo, J.L.A. Ferreira, C.R.M. da Silva. **Efeito do Parâmetro H/w na Deformação/Tensão Dinâmica Atuante em um Cabo Tipo CA**. CITENEL (2017) (publicado).
- ✓ R.B. Kalombo, R.E.R. Vieira, P.H.C. Rocha, T.B. Miranda, **M.S. Pestana**, J.A. Araújo, J.L.A. Ferreira, C.R.M. da Silva. **Comportamento em Fadiga de Cabos Condutores CA e CAL Utilizando o Critério de Projeto H/w**. CITENEL (2017) (publicado).
- ✓ **M.S. Pestana**, R.B. Kalombo, J.A. Araújo, J.L.A. Ferreira, T.B. Miranda, C.R.M. da Silva, R.E.R. Vieira, P.H.C. Rocha. **Análise do efeito da tensão média sobre a resistência à fadiga do cabo condutor cal 1055 MCM**, Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM, (2016) (publicado).

## RESUMO

Linhas de transmissão de energia têm sido construídas utilizando diversos níveis de carga de pré-esticamento. Para estimar a vida remanescente destas linhas, a **CIGRE** propôs uma metodologia de cálculo que requer não apenas a medição dos níveis reais de vibração do cabo, mas também sua curva Wöhler ou **S-N** extraída em laboratório sob o mesmo nível de tensão média aplicada no ensaio. No entanto, como estes ensaios são longos e requerem o uso de laboratórios sofisticados, o desenvolvimento de um modelo técnico capaz de estimar a curva **S-N** do cabo condutor para determinado nível de tensão média é extremamente desejável. Neste sentido, este trabalho consiste na utilização de um modelo de inteligência artificial conhecido como Redes Neurais Artificiais (**RNA**) para modelar o efeito da tensão média de tração sobre a resistência em fadiga do cabo condutor CAL 1055 MCM. Para isso, foram levantadas as curvas de Wöhler ou **S-N** de determinada montagem cabo/grampo de suspensão. Foram realizados 27 ensaios de fadiga submetidos a cargas de esticamento referentes à carga média diária de tração, conhecida como **EDS** (*Every Day Stress*) de 17%; 20% e 25,6% da carga de ruptura (**RTS**) do condutor. Os ensaios foram conduzidos de acordo com as recomendações da CIGRE (1985), EPRI (1979) e IEEE (1978), em uma bancada de 46 m de comprimento. As curvas **S-N** obtidas podem ser utilizadas para construir diagramas de vida constante. No entanto, para isso seria necessário à execução de um grande número de ensaios experimentais, o que encareceria a análise. Assim, uma forma de diminuir custos envolvidos em procedimentos experimentais é utilizar a **RNA** na construção destes diagramas. Em uma primeira análise deste trabalho, foram utilizados dados disponíveis na literatura para o condutor Ibis (cabo de alumínio com alma de aço) obtidos por Fadel *et al.*, (2012), para fazer uma avaliação preliminar da eficiência da **RNA**. Em uma segunda investigação, conforme objetivo principal deste trabalho, utilizou-se os dados experimentais do condutor CAL 1055 MCM (cabo liga alumínio) para construir diagramas de vida constante ( $10^5$ ,  $10^6$ ,  $10^7$  ciclos). A partir dos resultados alcançados para ambos os condutores, percebeu-se que a **RNA** treinada com poucas curvas **S-N** produziram resultados bastante satisfatórios.

**Palavras-chave:** Cabo condutor, Fadiga, Tensão média, Redes Neurais Artificiais.

## ABSTRACT

Power transmission lines have been constructed using several levels of stretching loads. To estimate the remaining life of these lines, CIGRÉ proposed a calculation methodology that requires the measurement of actual vibration levels of the conductor and its Wöhler or S-N curve, drawn in the laboratory for equal mean stress levels. As these tests are long and require the use of sophisticated laboratories, the development of a technical model capable of estimating the S-N curve of the conductor cable for a given level of mean stress is extremely desirable. In this sense, this work consists in the use of an artificial intelligence model, called Artificial Neural Networks (ANN), to model the effect of the mean stress on the fatigue resistance of the conductor cable AAAC 1055 MCM. 27 fatigue tests were carried out for different Every Day Stress levels: 17%, 20% and 25% of the conductor rate tensile strength (RTS). The tests were set up in the laboratory on a 46 m span according to CIGRÉ (1985), EPRI (1979) and IEEE (1978) recommendations. The S-N curves obtained in the laboratory can be used to construct the constant life diagrams. Although, it is necessary to have a large number of expensive tests in order to realize a reliable fatigue strength analysis. One possible solution to minimize the high costs of experimental tests is the use of ANN on the construction of constant life diagrams. On the first stage of this work, experimental data of the conductor Ibis (obtained by Fadel et al., 2012) were used for preliminaries analysis of ANN efficiency. In a second investigation, according to the main objective of this work, experimental data of the conductor AAAC 1055 MCM (aluminum alloy cable) was used to construct constant life diagrams (105, 106, 107 cycles). From the results obtained for both conductors, it was noticed that trained ANN with few S-N curves produced quite satisfactory results.

**Key-words:** overhead conductor, fatigue, mean stress, ANN.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO, OJETIVOS, CONTRIBUIÇÕES E ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>1</b>
1.1	INTRODUÇÃO.....	1
1.2	OBJETIVO.....	3
1.2.1	<i>Objetivos Específicos .....</i>	<i>3</i>
1.3	ESTADO DA ARTE.....	4
1.3.1	<i>Fadiga de cabos .....</i>	<i>4</i>
1.3.2	<i>Redes Neurais.....</i>	<i>9</i>
1.4	CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS, TECNOLÓGICAS E CARÁTER INOVADOR .....	13
1.4.1	<i>Contribuições científicas.....</i>	<i>13</i>
1.4.2	<i>Contribuições Tecnológicas e caráter inovador .....</i>	<i>14</i>
<b>2</b>	<b>EFEITO DA TENSÃO MÉDIA E FADIGA EM CABOS CONDUTORES.....</b>	<b>16</b>
2.1	EFEITO DA TENSÃO MÉDIA.....	16
2.2	FADIGA EM CABOS CONDUTORES.....	20
2.2.1	<i>Tipos de Vibrações em Cabos Condutores.....</i>	<i>21</i>
2.2.2	<i>O mecanismo de Falha por Fadiga em Condutores Aéreos.....</i>	<i>23</i>
2.2.3	<i>Esforços Dinâmicos em Cabos Condutores .....</i>	<i>25</i>
2.2.4	<i>Equação de Poffenberger-Swart (P-S).....</i>	<i>26</i>
2.2.5	<i>Metodologias de Estimativa de Vida em Fadiga para Linhas de Transmissão.....</i>	<i>28</i>
<b>3</b>	<b>REDES NEURAIS ARTIFICIAIS.....</b>	<b>32</b>
3.1	DEFINIÇÃO .....	32
3.2	NEURÔNIO ARTIFICIAL .....	35
3.3	ARQUITETURA DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS .....	38
3.3.1.	REDES PERCEPTRON DE MÚLTIPLAS CAMADAS .....	39
3.4	TREINAMENTO DE UMA REDE NEURAL .....	41
3.4.1	<i>Treinamento Supervisionado.....</i>	<i>42</i>
3.5	GENERALIZAÇÃO .....	46
3.6	APLICAÇÕES DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS .....	49
3.7	PROCEDIMENTO PARA CRIAÇÃO DA RNA PARA MODELAR O COMPORTAMENTO À FADIGA DE CABOS CONDUTORES .....	50
<b>4</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>56</b>
4.1	DESCRIÇÃO DA BANCADA DE ENSAIOS DE CABOS CONDUTORES .....	56
4.2.	MATERIAIS .....	58
4.2.1.	<i>Cabo Condutor.....</i>	<i>58</i>
4.2.2.	<i>Grampo de Suspensão.....</i>	<i>60</i>
4.2.3.	<i>Grampo de Ancoragem .....</i>	<i>61</i>
4.2.4.	<i>Extensômetros .....</i>	<i>62</i>
4.2.5.	<i>Mecanismo Excitador (Shaker) e Acelerômetro.....</i>	<i>62</i>
4.2.6.	<i>Dispositivo de Detecção de Quebras de Fios.....</i>	<i>63</i>
4.2.7.	<i>Sistema de Aquisição de Dados e Controle das Bancadas.....</i>	<i>64</i>
4.3.	ENSAIOS DE FADIGA: LEVANTAMENTO DA CURVA S-N.....	66
4.3.1.	<i>Metodologia e Planejamento dos Ensaios.....</i>	<i>67</i>
4.3.2.	<i>Procedimento Experimental.....</i>	<i>68</i>

4.4.	ENSAIOS DINÂMICOS: VALIDAÇÃO DA EQUAÇÃO DE POFFENBERGER-SWART .....	76
4.4.1.	<i>Procedimento Experimental</i> .....	77
4.5.	ENSAIO ESTÁTICO: OBTENÇÃO DA TENSÃO MÉDIA ATRAVÉS DA VARIAÇÃO DA EDS .....	80
4.5.1.	<i>Procedimento Experimental</i> .....	81
4.5.2.	<i>Execução do Ensaio</i> .....	85
<b>5</b>	<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>86</b>
5.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O CABO CAL 1055 MCM .....	86
5.1.1	<i>Resultados dos Ensaios de Fadiga</i> .....	86
5.1.2	<i>Resultados para Carregamento Dinâmico</i> .....	91
5.1.3	<i>Resultados para Carregamento Estático</i> .....	99
5.2	ANÁLISE DAS FALHAS .....	106
5.2.1	<i>Mapeamento da Posição e Ocorrência das Falhas</i> .....	109
5.2.2	<i>Análise Microscópica das Superfícies das Falhas</i> .....	117
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISE DO COMPORTAMENTO À FADIGA DE CABOS CONDUTORES POR MEIO DE REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS .....</b>	<b>121</b>
6.1	CABO CONDUTOR IBIS .....	121
6.2	CABO CONDUTOR CAL 1055 MCM .....	126
<b>7</b>	<b>AVALIAÇÃO DOS MODELOS DE ESTIMATIVA DO EFEITO DA TENSÃO MÉDIA: GERBER, GOODMAN E SWT .....</b>	<b>132</b>
7.1	PROCEDIMENTO PARA APLICAÇÃO DOS MODELOS DE GERBER, GOODMAN E SWT EM CABOS CONDUTORES .....	132
7.1.1	<i>Resultados dos modelos de fadiga de Gerber, Goodman e SWT para o cabo CAL 1055 MCM.</i>	133
7.1.2	<i>Comparando os modelos de Gerber, Goodman e SWT com RNA</i> .....	135
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>140</b>
8.1	CONCLUSÕES .....	140
8.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	142
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>143</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Estados atingidos por uma falha em uma linha de transmissão (ONS, 2014). .....	1
Figura 2.1. Gráfico comparativo dos modelos de Gerber, Goodman e SWT.....	18
Figura 2.2. Acessórios utilizados em cabos condutores de energia: A) Grampo de suspensão; B) Amortecedor e C) Espaçador. ( <i>Preformed Line Products</i> , 2013).....	20
Figura 2.3. Representação Esteira de Von Kármán (Bernitsas, 2009). ....	21
Figura 2.4. Tipos de vibrações nos condutores (modificado: EPRI, 2010).....	22
Figura 2.5. (A) Vista isométrica do cabo CAL 1055 MCM e (B) Regiões de contato entre os fios do condutor e o grampo de suspensão. ....	23
Figura 2.6. Óxido de alumínio acumulado na superfície do grampo. ....	24
Figura 2.7. Análise microscópica em um cabo tipo CAL: (A) iniciação da trinca, (B) estrias (marcas de praia) e (C) fratura frágil (ruptura brusca) ( <i>Kalombo et. al</i> , 2017)...	24
Figura 2.8. Limite de tensão admissível no condutor (Dinâmico x Estático) ( <i>Rosa et al.</i> , 1974- modificada).....	25
Figura 2.9. Esquema de montagem cabo-grampo de suspensão (Rocha, 2016). ....	27
Figura 2.10. . (A) Vibrógrafo modelo Pavica; (B) Esquema de montagem do equipamento na linha (Gomes, 2015).....	30
Figura 2.11. Curva Safe Border Line e outras curvas compiladas pela CIGRÉ (CIGRÉ, 1979 - modificado). ....	31
Figura 3.1 Exemplo de neurônio biológico (Lent, 2010). ....	32
Figura 3.2. Esquema ilustrativo comparando neurônio biológico (A) com o artificial (B).....	35
Figura 3.3. Representações gráficas, funções de ativação: (A) degrau, (B) bipolar e (c) rampa simétrica.....	37
Figura 3.4. Representações gráficas, funções de ativação: (A) Sigmoidal (logística), (B) tangente hiperbólica e (c) linear. ....	37
Figura 3.5. Modelo de uma arquitetura neural. ....	39
Figura 3.6. Arquitetura Neural de uma Rede Perceptron de Múltiplas Camadas. ....	40
Figura 3.7. Diagrama da aprendizagem supervisionada (modificado de Coelho, 2008).43	
Figura 3.8. Fase ( <i>forward</i> ) do processo de treinamento de uma MLP de “R” camadas.44	
Figura 3.9. Função $\sin(x)\cos(2x)$ : (A) Treinamento interrompido muito cedo (underfitting); (B) Treinamento excessivo (overfitting) e (C) Treinamento com procedimento de validação cruzada (Prechelt, 1997-1998).....	48

Figura 3.10. Regra da parada antecipada baseada na validação cruzada (Freire Júnior, 2005).....	49
Figura 3.11. Diagrama esquemático demonstrando o processo de aprendizado de uma rede neural, onde (A) é o método de treinamento da RNA e (B) é o modelo obtido pelo treinamento da RNA (Freire Júnior <i>et al.</i> , 2005).....	52
Figura 3.12. Planejamento da implementação da RNA.....	53
Figura 3.13. (A) Método de treinamento da RNA. (B) Modelo obtido pelo treinamento da RNA. ....	54
Figura 4.1 Desenho esquemático 2d e 3d da montagem da bancada de ensaios (Rocha, 2016).....	56
Figura 4.2. (A) Blocos móveis de concreto maciço; (B) Vista lateral do grampo de suspensão; (C) Roldana localizada no bloco fixo.....	57
Figura 4.3. (A) Grampo de ancoragem conectado a célula de carga CSR-5000 <i>Kgf</i> ; (B) Indicadores (visores digitais) (C) Talha de alavanca (tífor) e (D) Braço de alavanca. ..	58
Figura 4.4. (A) Vista frontal; (B) Vista isométrica do CAL 1055 MCM e (C) Deformação longitudinal ( $\epsilon$ ) do fio do condutor.....	59
Figura 4.5. (A) Grampo monoarticulado fornecido pela Forjasul e (B) Partes que compõe um grampo de suspensão. ....	60
Figura 4.6. (A) Montagem cabo/grampo de ancoragem/ célula de carga; (B) Grampo de ancoragem conectado a talha de alavanca (tífor).....	61
Figura 4.7. Extensômetro PA-13-120BA-350L (Excel Sensores). ....	62
Figura 4.8. (A) Excitador eletromecânico (Shaker); (B) Dispositivo de alinhamento do cabo com shaker (mesa) e acelerômetro.....	63
Figura 4.9. (A) Régua de detecção de quebras de fios e (B) Simulação do movimento de rotação da régua.....	64
Figura 4.10. (A) Aqdados Bancada A; (B) Aqdados bancada B e (C) Aqdados bancada C. ....	65
Figura 4.11. (A) Controlador (B)Esquema de funcionamento do sistema de controle e monitoramento de ensaios. ....	65
Figura 4.12. Sala de Controle do laboratório de cabos da Universidade de Brasília. ....	66
Figura 4.13. Bobina do condutor CAL 1055 MCM. ....	69
Figura 4.14. (A) Condutor retirado da bobina e (B) Cabo estendido apoiado nas polias ao longo do vão. ....	69
Figura 4.15 - Grampo de suspensão posicionado.....	70
Figura 4.16. Grampos de ancoragem conectados à: (A) célula de carga e ao (B) tífor..	70
Figura 4.17. (A) Aplicação de pré-carga usando tífor e (B) Braço de alavanca. ....	71

Figura 4.18. Fixação do grampo de suspensão e aplicação do torque nas porcas. ....	71
Figura 4.19. Extensômetros colados nos três fios mais altos e opostos ao UPC.....	71
Figura 4.20. Fixação da braçadeira com acelerômetro no ponto 89 mm. ....	72
Figura 4.21. (A) Linha de detecção de quebra externa e (B) Laser para contagem do número de ciclos. ....	72
Figura 4.22. Dispositivo de alinhamento do <i>shaker</i> e abraçadeira com acelerômetro. ...	73
Figura 4.23. Posição do sistema de detecção de quebra. ....	73
Figura 4.24. Corte da amostra. ....	74
Figura 4.25. (A) Retirada da amostra do cabo e (B) amostra do ensaio com os fios rompidos. ....	74
Figura 4.26. Medida da distância da falha (DF), da boca do grampo até a quebra. ....	75
Figura 4.27. Exemplo do procedimento para (A) retirada dos fios por camada do cabo e (B) Enumeração das quebras. ....	75
Figura 4.28. Gráfico da rotação do cabo, indica momento das quebras.....	76
Figura 4.29. Posição do último ponto de contato e fios do topo. ....	77
Figura 4.30. Processo de lixamento da superfície do fio.....	78
Figura 4.31. A) Álcool Isopropílico; B) Limpeza da superfície com álcool e cotonete. 78	
Figura 4.32. (A) Fixação do extensômetro na fita adesiva; (B) Aplicação de cola na superfície; (C) Colagem do extensômetro e (D) Três extensômetros colados. ....	79
Figura 4.33. (A) Fios dos extensômetros inseridos no conector sindal e (B) Conexão extensômetros no ADS 2000.....	79
Figura 4.34. Gráfico da varredura das frequências de ressonância do sistema. ....	80
Figura 4.35. Fotos do bloco fixo com a talha de alavanca e o grampo de ancoragem. ...	81
Figura 4.36. (A) Bloco fixo e braço de alavanca, (B) Célula de carga e (C) visor digital para controle da carga de esticamento aplicada ao ensaio.....	82
Figura 4.37. Localização para colagem dos extensômetros. ....	83
Figura 4.38. Verificação da resistência dos extensômetros.....	83
Figura 4.39. (A) Superfície dos fios sendo lixadas e (B) Fios após a limpeza com álcool isopropílico.....	83
Figura 4.40. (A) Ilustração das camadas frontais do cabo CAL 1055 MCM; (B) Colagem dos extensômetros e (C) Extensômetros colados nos 24 fios das camadas externas no condutor.....	84
Figura 4.41. Soldagem dos fios dos extensômetros no cabo de extensão com ADS. ....	84
Figura 5.1. Resultados para as sextas quebras em número de ciclos para cada nível de amplitudes de tensões:28,22; 31,35 e 34,49 MPa.....	88
Figura 5.2. Curvas S-N para os ensaios realizados. ....	89

Figura 5.3. Redução em termos percentuais do número de ciclos para cada curva S-N.90	
Figura 5.4. Curva obtida dos ensaios com o cabo CAL 1055 e Curva CSBL (CIGRE). 90	
Figura 5.5. Tensão experimental e de P-S por amplitude de deslocamento Y <sub>B</sub> (EDS 17% de RTS). .....	92
Figura 5.6. Erro médio entre os resultados da tensão teórica com a tensão experimental para deslocamento (EDS de 17% de RTS). .....	92
Figura 5.7. Tensão P-S por Tensão Experimental para resultados com EDS de 17% de RTS. ....	93
Figura 5.8. Tensão experimental e de P-S por amplitude de deslocamento Y <sub>B</sub> (EDS 20% de RTS). .....	94
Figura 5.9. Erro médio entre os resultados da tensão teórica com a tensão experimental para cada deslocamento Y <sub>B</sub> (EDS de 20% de RTS). .....	95
Figura 5.10. Tensão P-S por Tensão Experimental para resultados com EDS de 20% de RTS. ....	95
Figura 5.11. Tensão experimental e de P-S por amplitude de deslocamento Y <sub>B</sub> (EDS 25,6% de RTS). .....	96
Figura 5.12. Erro médio entre os resultados da tensão teórica com a tensão experimental para cada deslocamento Y <sub>B</sub> (EDS de 25,6% de RTS). .....	97
Figura 5.13. Tensão P-S por Tensão Experimental para resultados com EDS de 25,6% de RTS. ....	97
Figura 5.14. Tensões para EDS de 17%, 20% e 25,6% comparadas com a reta de correlação perfeita. ....	98
Figura 5.15. Erros percentuais médios para cada EDS aplicada nos ensaios. ....	99
Figura 5.16. Gráficos dos ensaios experimentais (crescente) para níveis de EDS de 10%, 15%, 17%, 20% e 25,6% de RTS. ....	101
Figura 5.17. Gráficos dos ensaios experimentais (decrecente) para níveis de EDS de 20%, 17%, 15% e 10% de RTS. ....	102
Figura 5.18. Gráficos dos ensaios experimentais (crescente) para níveis de EDS de 10%, 15%, 17%, 20% e 25,6% de RTS. ....	103
Figura 5.19. Gráficos dos ensaios experimentais (decrecente) para níveis de EDS de 20%, 17%, 15% e 10% de RTS. ....	104
Figura 5.20. Gráficos dos valores das tensões médias na etapa crescente e decrescente com as tensões médias teóricas para níveis de EDS de: 10%, 15%, 17%, 20% e 25,6% de RTS. ....	105
Figura 5.21. Erros médios entre os resultados teóricos e experimentais das deformações e tensões médias, nas etapas crescente e decrescente. ....	106

Figura 5.22. Fios rompidos devido o desgaste fio-grampo na camada externa da amostra. ....	107
Figura 5.23. Representação esquemática do processo de falha por fadiga: Iniciação da trinca, (A) área de propagação da trinca (marcas de praia) e (B) área da ruptura final (Rocha, 2016 (modificado))......	108
Figura 5.24. Percentual das camadas onde ocorreram as falhas para EDS de 17%. ....	113
Figura 5.25. Percentual das camadas onde ocorreram as falhas para EDS de 20%. ....	113
Figura 5.26. Percentual das camadas onde ocorreram as falhas para EDS de 25,6%. .	113
Figura 5.27. Localização do topo e da base da montagem cabo/grampo: (A) Vista Isométrica e (B) Imagem rotacionada. ....	114
Figura 5.28. Localização das quebras para 17% de RTS. ....	114
Figura 5.29. Localização das quebras para 20% de RTS. ....	115
Figura 5.30. Localização das quebras para 25,6% de RTS. ....	115
Figura 5.31. (A) Medição da falha a partir da boca do grampo e (B) Localização da distância das falhas na camada externa do ensaio 2 com deslocamento $Y_B$ de 0,97 mm para EDS de 20%. ....	116
Figura 5.32. Distância média das falhas por camada para EDS de 17% de RTS.....	116
Figura 5.33. Distância média das falhas por camada para EDS de 20% de RTS.....	117
Figura 5.34. Distância média das falhas por camada para EDS de 25,6% de RTS.....	117
Figura 5.35. Microscopia realizada em um dos fios rompidos do ensaio 2 com EDS de 17% de RTS e $Y_B$ de 1,02 mm.....	118
Figura 5.36. Microscopia em um dos fios do ensaio 1 com EDS de 20% de RTS e $Y_B$ de 0,97 mm. ....	119
Figura 5.37. Microscopia em um dos fios do ensaio 2 com EDS de 25,6% de RTS e $Y_B$ de 0,81mm.....	120
Figura 5.38. Microscopia em um dos fios do ensaio 3 com EDS de 25,6% de RTS e $Y_B$ de 0,99 mm.....	120
Figura 6.1. (a) Vista frontal do cabo Ibis e (b) vista isométrica do cabo Ibis. ....	121
Figura 6.2. Diagrama de vida constante ( $\sigma_a \times \sigma_m$ ) para o cabo Ibis obtido a partir de RNA.....	123
Figura 6.3. Dados Experimentais e Curvas S-N obtidas com os dois conjuntos de treinamento, com tensões médias de 49 e 74 MPa. ....	125
Figura 6.4. Arquitetura neural com suas entradas e saídas normalizadas. ....	127
Figura 6.5. Diagramas de vida constante para o condutor CAL 1055 MCM.....	128
Figura 6.6. Dados experimentais e curvas S-N obtidas através do treinamento da RNA, com tensões médias de 48, 57 e 73 MPa. ....	129

Figura 6.7. Curvas de EMQ obtidas durante treinamento de um RNA COM 18 neurônios ocultos com $EMQ_{MIN}$ de 0,00034 em 3.453 épocas. ....	130
Figura 6.8. Curvas de EMQ obtidas durante treinamento de um RNA COM 14 neurônios ocultos com $EMQ_{MIN}$ de 0,00015 em 8.652 épocas. ....	130
Figura 7.1. Diagrama de vida constante obtido através do modelo de Gerber.....	134
Figura 7.2. Diagrama de vida constante obtido através do modelo de Goodman. ....	134
Figura 7.3. Diagrama de vida constante obtido através do modelo de SWT. ....	135
Figura 7.4. Diagrama amplitude de tensão versus tensão média e curvas características dos modelos de Gerber, Goodman, SWT e RNA para vida de $10^5$ ciclos.....	136
Figura 7.5. Diagrama amplitude de tensão versus tensão média e curvas características dos modelos de Gerber, Goodman, SWT e RNA para vida de $10^6$ ciclos.....	136
Figura 7.6. Diagrama amplitude de tensão versus tensão média e curvas características dos modelos de Gerber, Goodman, SWT e RNA para vida de $10^7$ ciclos.....	137
Figura 7.7. Gráficos dos EMQ normalizado entre amplitude de tensão experimental ( $S_{a\_exp}$ ) e amplitude de tensão dos modelos ( $S_{a\_mod}$ ) de Gerber, Goodman, SWT e RNA. ....	138
Figura 7.8. Gráficos dos EMQ sem normalizar entre amplitude de tensão experimental ( $S_{a\_exp}$ ) e amplitude de tensão dos modelos ( $S_{a\_mod}$ ) de Gerber, Goodman, SWT e RNA. ....	138

## LISTA DE TABELA

Tabela 1.1. Resumo de Incidência de dano em linhas mundiais por EDS aplicada (Zetterholm, 1960).....	4
Tabela 2.1. Principais tipos de cabos condutores aéreos. ....	23
Tabela 3.1. Relação das principais áreas da engenharia que utilizaram as RNAs. ....	50
Tabela 4.1. Características estruturais e dimensionais do condutor. ....	59
Tabela 4.2. Especificações técnicas do grampo de ancoragem. ....	62
Tabela 4.3. Parâmetros utilizados nos 27 ensaios do cabo CAL 1055 MCM. ....	68
Tabela 4.4. Parâmetros Ensaio Dinâmico CAL 1055 MCM. ....	77
Tabela 4.5. Carga de esticamento em <i>Kgf</i> para cada EDS aplicada no cabo.....	82
Tabela 5.1. Relação dos Ensaio Realizados. ....	87
Tabela 5.2. Cálculos teóricos da tensão média e deformações do cabo CAL 1055 MCM. ....	100
Tabela 5.3. Distribuições das falhas nos fios das amostras ensaiadas com EDS de 17%. ....	110
Tabela 5.4. Distribuições das falhas nos fios das amostras ensaiadas com EDS de 20%. ....	111
Tabela 5.5. Distribuições das falhas nos fios das amostras ensaiadas com EDS de 25,6%. ....	112
Tabela 6.1. Características dimensionais e estruturais do condutor Ibis. ....	121
Tabela 6.2. Dados Experimentais usados na obtenção das curvas S-N.....	122
Tabela 6.3. Valores das constantes A, B , c e da tensão última à tração do condutor Ibis. ....	123
Tabela 6.4. Valores das constantes A, B , c e da tensão última à tração do condutor CAL 1055. ....	126

## LISTA DE ABREVIACÕES

ACAR	Condutores de Alumínio Reforçados com Alumínio Liga ( <i>Aluminum Conductor Aluminum Alloy Reinforced</i> )
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CA (AAC)	Condutores de Alumínio ( <i>All Aluminum Conductor</i> )
CAA (ACSR)	Condutores de Alumínio com Alma de Aço ( <i>Aluminum Conductor Steel Reinforced</i> )
CAL (AAAC)	Condutores de Alumínio Liga ( <i>All Aluminum Alloy Conductor</i> )
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CIGRE	<i>Conseil International des Grands Réseaux Electriques (International Council on Large Electric Systems)</i>
EDS	<i>Every Day Stress</i>
EMQ	Erro Médio Quadrático
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
ERE	Extensômetro de Resistência Elétrica
IACS	<i>International Annealed Copper Standard</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LT	Linha de Transmissão
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MLP	Perceptron de Múltiplas Camadas ( <i>Multilayer Perceptron</i> )
NBR	Norma Brasileira Registrada no INMETRO
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
P-S	Poffenberger-Swart
RNA	Redes Neurais Artificiais
S-N	S é a tensão nominal e N é o número de ciclos
UnB	Universidade de Brasília
UPC	Último Ponto de Contato entre o cabo e o grampo de suspensão
NBR	Norma Brasileira Registrada no INMETRO
ERE	Extensômetro de Resistência Elétrica
RTS	Carga de Ruptura

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_a$	Área ocupada pelos fios de aço do condutor, m <sup>2</sup> .
$A_{al}$	Área ocupada pelos fios de alumínio do condutor, m <sup>2</sup> .
$d$	Diâmetro de um fio da camada mais externa do condutor, mm.
$d_a$	Diâmetro de um fio de aço, mm.
$d_{al}$	Diâmetro de um fio de alumínio, mm.
$d_c$	Diâmetro do condutor, m.
$E$	Módulo de elasticidade, MPa.
$E_a$	Módulo de elasticidade do fio de aço, MPa.
$E_{al}$	Módulo de elasticidade do fio de alumínio, MPa.
$EI_{máx}$	Máxima rigidez do cabo à flexão, kgf.
$EI_{mín}$	Mínima rigidez do cabo à flexão, kgf.
$f$	Frequência de carregamento, Hz.
$f_n$	Frequência natural, Hz.
$f_s$	Frequência de desprendimento de vórtices, Hz.
$g$	Constante gravitacional, m/s <sup>2</sup> .
$H$	Carga de esticamento, kgf.
$K$	Fator de conversão da formulação de P-S, MPa/mm.
$L$	Comprimento do vão, m.
$N$	Número de ciclos.
$n$	Fator de projeto.
$n$	Modo natural de vibração.
$n_a$	Número de fios de aço.
$n_{al}$	Número de fios de alumínio.
$n_i$	Número de ciclos aplicado a um componente.
$N_{i,f}$	Número de ciclos até a falha sob um mesmo nível de tensão.
$U$	Velocidade do vento, m/s.
$V$	Vida.
$w$	Peso específico do condutor, kgf/km
$x$	Distância entre o ponto de medida da amplitude de deslocamento do cabo e o último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão, mm.

$Y_B$  Amplitude de deslocamento pico a pico, mm.

### Gregos

$\varepsilon$	Deformação, $\mu strain$ .
$\nu$	Viscosidade cinemática do fluido, $m^2/s$ .
$\pi$	Constante
$\rho_s$	Massa específica dos fios de aço do condutor, $kg/m^3$ .
$\rho_a$	Massa específica dos fios de alumínio do condutor, $kg/m^3$ .
$\sigma$	Tensão, MPa.
$\sigma_a$	Tensão alternada ou amplitude de tensão, MPa.
$\sigma'_f$	Coefficiente de resistência à fadiga, MPa
$\sigma_{med}$	Tensão média, MPa.
$\sigma_{máx}$	Tensão máxima, MPa.
$\sigma_{mín}$	Tensão mínima, MPa.
$\sigma_r$	Variação de tensão, MPa.
$\sigma_{ult}$	Tensão última, MPa.
$\sigma_{ultC}$	Limite de resistência à compressão, MPa.
$\sigma_{ultT}$	Limite de resistência à tração, MPa.
$\sigma_{max}^*$	Tensão máxima crítica, MPa.
$\sigma_{min}^*$	Tensão mínima crítica, MPa.

# CAPÍTULO 1

## 1 INTRODUÇÃO, OJETIVOS, CONTRIBUIÇÕES E ESTADO DA ARTE

### 1.1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o consumo de energia elétrica tem crescido de forma significativa, e isto veio seguido de um importante crescimento econômico para o país (EPE, 2015). Assim, busca-se cada vez mais, assegurar a continuidade do fornecimento de energia. Tendo em vista que o cabo condutor é o componente mais importante da linha de transmissão de energia, envolvendo um investimento de até 40% dos custos na construção de uma rede (Frontin, 2010), torna-se evidente que supervisionar estas linhas é muito importante, pois quando ocorre uma falha inesperada por fadiga nos cabos condutores, os custos envolvidos são muito elevados.

Quando acontecem falhas em linhas de transmissão os prejuízos são exorbitantes para o país. A título de exemplo, em 2001, mais de 60 milhões de habitantes das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil ficaram sem energia elétrica devido a falhas por fadiga na linha de transmissão que atravessava o Rio Paraná, no estado de São Paulo. As consequências desse *blackout* foram catastróficas, com rombo estimado em mais de 100 milhões de reais, além da perda de vidas e da credibilidade dos investidores estrangeiros (Frontin, 2010). Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em 2014, uma falha em uma linha de energia que liga o Norte ao Sudeste do país provocou falta de luz em onze estados (Fig.1.1). Nesse sentido, existe a necessidade de compreender o mecanismo que controla a ocorrência de falhas causadas por fadiga provocadas por vibração eólica no cabo condutor, pois isso possibilita o desenvolvimento de novas metodologias de projeto, tornando a instalação e a manutenção de linhas de transmissão mais confiáveis e economicamente viáveis.



Figura 1.1. Estados atingidos por uma falha em uma linha de transmissão (ONS, 2014).

Além dos esforços dinâmicos provocados pela ação do vento, o condutor também é submetido a carregamentos estáticos, devido à carga de tração aplicada na montagem da linha de transmissão. Assim, a tensão média presente nos condutores é um dos fatores que também influenciam na resistência à fadiga, uma vez que a carga de esticamento aumenta a pressão de contato entre os fios e, em consequência, intensifica a severidade do *fretting* presente no processo de fadiga. Portanto, a tensão média de tração sobreposta a uma tensão alternada, reduz de forma significativa a resistência à fadiga do cabo (Fadel *et al.*, 2012).

Para melhor observar o efeito causado pela tensão média, foram desenvolvidos diagramas correlacionando tensão média, alternada e vida à fadiga. Vários modelos de diagramas e curvas foram propostos e utilizados, dentre esses pode-se citar: Gerber (1874), Goodman (1899) e Smith/Watson/Topper (SWT) (1970).

A partir de ensaios de fadiga realizados com cabos condutores de energia, obtêm-se as curvas **S-N** (amplitude de tensão nominal *versus* número de ciclos), e estas são usadas para construir os diagramas de fadiga de vida constante. No entanto, para construir esses diagramas é preciso um número considerável de curvas **S-N**, isto é, um número maior de ensaios experimentais tem que ser realizado (Shigley *et al.*, 2005). Para que isso seja possível com cabos condutores, é necessário um aparato experimental sofisticado, que envolve uma grande quantidade de tempo e recursos para execução desses ensaios.

Uma solução alternativa seria fazer previsões preliminares da provável vida à fadiga do cabo com uma quantidade mínima de ensaios. Na literatura especializada, encontram-se vários modelos matemáticos utilizados para estimar a vida dos materiais através de Diagramas de Falha (Shigley *et al.*, 2005). Em tempos recentes iniciou-se a utilização de Redes Neurais Artificiais (**RNA**) para modelagem da Previsão de Falha, através da arquitetura conhecida como Rede Perceptron de Múltiplas Camadas (Haykin, 1999). Na literatura existem alguns trabalhos sobre o assunto, utilizando em especial, materiais compósitos, como Freire Júnior *et al.* (2005), Vassilopoulos *et al.* (2007), Belísio (2012), Uygur *et al.* (2014), Brooks & Tucker, (2015), Diniz (2017), dentre outros. Assim, utilizar **RNA** para fazer previsões da vida à fadiga de cabos condutores de energia com uma quantidade mínima de ensaios experimentais e com razoável confiança é interessante, pois isso habilitaria o projetista a fazer estimativa da resistência à fadiga desses cabos submetidos a diferentes tensões médias, antes de

investir mais tempo e dinheiro necessários para uma análise mais aprofundada com grande número de ensaios experimentais.

## 1.2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é propor o uso de Redes Neurais Artificiais (**RNA**) para modelar o efeito da tensão média de tração sobre a resistência em fadiga de cabos condutores. Em uma primeira análise foi utilizado dados experimentais em fadiga para o condutor Ibis disponíveis na literatura para um treinamento preliminar da rede neural e uma avaliação inicial. Por fim, foram utilizados dados obtidos em laboratório com o condutor CAL 1055 MCM para treinar a **RNA** e fazer previsões da vida em fadiga do cabo para diferentes cargas de esticamento. Além disso, estes resultados com **RNA** foram comparados com outros modelos de fadiga: Gerber, Goodman e Smith, Watson e Topper (SWT).

### 1.2.1 Objetivos Específicos

Listam-se abaixo outros objetivos mais específicos associados à elaboração deste trabalho:

- Levantamento de três curvas de durabilidade (Curva de Wöhler ou S-N) da montagem do cabo CAL 1055 MCM ao grampo de suspensão mono-articulado, para três diferentes níveis de carga de esticamento, correspondentes a 17%, 20% e 25,6% da carga de ruptura do condutor (*Every Day Stress*, EDS). Esses níveis de **EDS** provocam tensões médias nos fios de alumínio de 49, 57 e 73 *MPa*, respectivamente;
- Avaliar experimentalmente a formulação de Poffenberger-Swart, modelo utilizado que correlaciona à severidade das vibrações eólicas em condutores à sua durabilidade, através do “ensaio dinâmico”;
- Obter a tensão média dos fios por meio do “ensaio estático”, quantificando experimentalmente a tensão média do cabo CAL 1055 MCM com diferentes cargas de esticamento aplicadas ao mesmo;
- Em uma primeira análise desta pesquisa, a fim de verificar a eficácia do funcionamento da **RNA**, utilizou-se dados disponíveis do condutor Ibis de Fadel *et al.*, (2012), para fazer uma avaliação preliminar da eficiência da **RNA**. Treinando a rede neural com duas curvas **S-N** para tensões

médias de 49 e 74 *MPa*, construindo diagramas de vida constante ( $10^5$ ,  $10^6$ ,  $10^7$ ,  $10^8$  ciclos) ;

- Por fim, em uma análise mais aprofundada utilizou-se as três curvas **S-N** obtidas para o cabo CAL 1055 MCM com tensões médias de 48, 57 e 73 *MPa* para treinar uma arquitetura conhecida como Rede Perceptron Múltiplas Camadas na construção de diagramas de vida constante ( $10^5$ ,  $10^6$ ,  $10^7$  ciclos). Estes resultados com a **RNA** foram então, comparados com outros modelos de fadiga uniaxial de Goodman, Gerber e **SWT**.

### 1.3 ESTADO DA ARTE

#### 1.3.1 Fadiga de cabos

O fenômeno da fadiga em cabos condutores provocado pela ação dos ventos teve como precursores Stockbrige (1925), Varney (1926) e Nefzger (1933) (*Apud* Ramamurti, 2000). No entanto, somente a partir da década de 50, o interesse pelo tema cresceu significativamente. Em 1953 criou-se o subcomitê SC6 da CIGRÉ (*Conseil International de Grands Réseaux Electriques*) com intuito de averiguar as causas de falhas provocadas pelas vibrações eólicas em linhas de transmissão de energia. Ressalta-se que neste mesmo subcomitê, foi elaborada uma tabela com diversos tipos de condutores, onde determinou-se valores de carga de esticamento afim de que os mesmos pudessem operar com segurança (Tab. 1.1). Assim, definiram-se parâmetros para projetos como a **EDS** (*Every Day Stress*), que é o valor percentual da carga de ruptura à tração do condutor. Estipulou-se então, a maior carga de tração onde o condutor pode operar em uma determinada temperatura média anual sem que haja riscos devido às vibrações eólicas causadas pelo vento.

**Tabela 1.1. Resumo de Incidência de dano em linhas mundiais por EDS aplicada (Zetterholm, 1960).**

Vida em Serviço (anos)	% de Linhas Danificadas	
	EDS < 18%	EDS ≥ 18%
≤ 5	5	25
> 5 ≤ 10	21	35
> 10 ≤ 20	45	78
< 20	59	92

Embora o parâmetro **EDS** seja muito utilizado há mais de quarenta anos em projeto de linhas de transmissão de energia, nota-se que, conforme apresentado na Tabela 1.1, um grande número de condutores apresentaram falhas mesmo dentro das

especificações limite recomendadas (CIGRÉ, 2005). Dentre as linhas que estiveram em serviço sofreram danos entre 10 e 20 anos, 45% com **EDS** menor que 18% e 78% com **EDS** superior a 18%. No entanto, Rosa *et al.*, (1974) enfatizou a importância da **EDS** no projeto de cabos condutores, pois a tensão dinâmica relacionada ao processo de fadiga aumenta-se com a tensão de esticamento. Ou seja, quanto mais esticado o condutor mais elevadas serão as amplitudes de vibrações apresentadas no mesmo. Além disso, é importante ressaltar que, a tração de esticamento deve garantir uma distância segura entre o cabo e o solo. Logo, a definição da **EDS** para os projetistas de linhas de transmissão é muito importante, portanto, é fundamental determinar-se valores de **EDS** “ótimos” onde o condutor pode operar em segurança.

Em 1965, Poffenberger e Swart (P-S) formularam uma equação empírica-analítica aplicando a teoria elástica e princípios da mecânica, correlacionando a deformação dinâmica na vizinhança do ponto mais solicitado do condutor à amplitude de flexão medida nas proximidades do grampo de suspensão. Neste trabalho, os autores assumem que o cabo nas proximidades do grampo de suspensão atua como se fosse uma viga de Euler ligeiramente encurvada por pequeno deslocamento vertical. Ressalta-se que a equação desenvolvida por eles considera um condutor rigidamente fixado a um grampo de suspensão convencional de metal, sem armadura envolta no mesmo.

Com base na equação de P-S, a IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*), em 1966, verificou a necessidade de estudar os efeitos das vibrações eólicas nos cabos e padronizar um método para avaliar a severidade destas vibrações, então, propuseram esta metodologia de P-S para projetos de linhas de transmissão. E até hoje, esta metodologia associada ao levantamento de curvas **S-N** é a mais utilizada em projetos (Fadel, 2010).

Através de ensaios experimentais, Frickle e Rawlins, em 1968, fizeram um estudo sobre a influência do desgaste por abrasão (*fretting*) na vida útil de cabos condutores. Os autores enfatizaram que o desgaste por *fretting* é um processo que acelera a falha, pois a iniciação das trincas sempre ocorria nas marcas de micro deslizamentos provocadas pelo contato de fios com fios ou de fios com ferragens. Tanto Moecks, (1970) como Dulhunty (1971), avaliaram as marcas de *fretting* através de metalografia e imagens dos fios rompidos e constataram a iniciação da trinca nesses pontos.

Com intuito de avaliar o quanto as vibrações eólicas nos condutores intensificam as falhas por fadiga, a IEEE (1978) sugeriu valores percentuais em que as amplitudes de

flexão não podiam ultrapassar os limites de fadiga do material. E ainda neste mesmo ano, Claren (1978), introduziu um conceito sobre o parâmetro  $H/w$ , onde  $H$  é a carga de tração horizontal e  $w$  é o peso por unidade de comprimento, com objetivo de determinar a tensão de esticamento dos condutores, esse novo critério é abordado claramente por Barret e Motlis (2001) e Kalombo *et al.*, (2016).

A EPRI (1979) desenvolveu uma metodologia para calcular a severidade das vibrações causadas pelo vento nos condutores, onde foi determinado valores de amplitudes de flexão e tensões máximas, nas quais os condutores poderiam ser submetidos mantendo-se íntegros pelo critério de fadiga.

Um estudo realizado pela CIGRE (1979), constatou graficamente que metais submetidos ao processo de *fretting* tiveram sua resistência à fadiga reduzida significativamente em relação às condições sem *fretting*, recomendou-se, portanto, um método para aperfeiçoar a determinação da vida em cabos condutores, que considera um acúmulo de dano linear, conhecido como Regra de Miner. Nesta mesma linha de pesquisa, a CIGRÈ (1985) afirmou que nas regiões onde há contato do condutor com ferragens (grampo de suspensão, esferas sinalizadoras, amortecedores) é onde as tensões são máximas, com a presença do *fretting* ocorrem então, as rupturas dos fios. Vale destacar também, o trabalho de Preston *et al.*, (1986), onde os autores verificaram que nas regiões onde há restrições de movimento do condutor são consideradas críticas e consequentemente o processo do *fretting* é mais intenso.

Em 1981, Ramey & Silva, desenvolveram um aparato experimental com objetivo de simular o carregamento cíclico devido a forças eólicas sofridas nos condutores no campo. Através destes ensaios, avaliaram a vida em fadiga de condutores tipo CAA (Cabo de Alumínio com alma de aço). Iniciaram os testes com amplitudes de vibrações mais altas e foram reduzindo gradativamente à medida que observavam a ruptura de dois ou três fios do cabo. Constataram que diminuindo a amplitude de vibração é possível amenizar os danos por fadiga nos fios, sugeriram então, o uso de amortecedores com intuito de atenuar as vibrações eólicas no condutor.

A fim de obter curvas **S-N** para cabos CAA tipo *Drake* (fios de alumínio liga 1350-H19 e fios de aço com cobertura de zinco), Ramey *et al.*, 1986, simularam em laboratório vibrações eólicas, utilizando um excitador eletromagnético conectado a montagem cabo/grampo de suspensão. Após a ruptura de cinco fios o teste era interrompido, realizaram quarenta experimentos e levantaram as curvas **S-N**. Concluíram que as dispersões dos resultados aumentaram à medida que reduziram os

níveis de tensão alternada do condutor. Neste mesmo ano, Preston *et al.*, estudaram o efeito da geometria do grampo de suspensão no processo de fadiga de cabos condutores, para isso, executaram ensaios de fadiga em cabos tipo CAA com diferentes grampos de suspensão com três raios longitudinais. Os resultados demonstraram que quanto maior o raio de curvatura do grampo de suspensão maior era a resistência à fadiga do condutor. Além disso, notaram que rompiam-se fios nas regiões onde o desgaste por *fretting* era mais severo, excepcionalmente nos últimos pontos de contato entre o condutor e o grampo de suspensão, tanto na parte superior como inferior do mesmo.

A partir da década de 90, alguns trabalhos foram desenvolvidos e contribuíram significativamente para pesquisas atuais, pode-se citar, estudos como o de Hardy e Brunelle. (1991), a fim de analisar e dimensionar as vibrações eólicas nos condutores, utilizaram o vibrógrafo PAVICA, verificando a probabilidade de falha quando adotados o método da CIGRÉ, concluíram que tal metodologia é conservativa. Ainda, em 1994, Hardy e Dyke, chegaram a importantes conclusões sobre a intensidade das vibrações eólicas, dentre estas, pode-se destacar: que a frequência e a amplitude da vibração são independentes e que altos níveis de **EDS** aumentam as vibrações do condutor.

Na tentativa de simular as condições de campo as quais os condutores estão submetidos, pesquisadores passaram a realizar testes em laboratórios, como Gopalan (1993), excitou cabos condutores perto de suas frequências naturais, através de atração e repulsão eletromagnética de dois outros cabos paralelos a estes. Embora o autor desprezasse os efeitos da umidade, temperatura e direção variável do vento presentes no laboratório, os ensaios realizados indicaram quais variáveis deveriam ser controladas no processo de fadiga em cabos. Outro trabalho relevante envolvendo experimento é o de Zhou *et al.* (1995), realizaram testes de fadiga em fios dos condutores, para isso foi necessário desenvolver um aparato experimental para ensaios de fadiga por *fretting*, os resultados apontaram para duas zonas de contato, uma de adesão sem desgaste e outra de escorregamento com perda de material, onde iniciava-se as trincas.

Em 2002, Azevedo & Cescon, verificaram que no processo de desgaste devido ao *fretting* nota-se a presença de um pó de cor marrom, formado por partículas duras e abrasivas, na região de montagem cabo/grampo de suspensão. E estas partículas por sua vez, em contato com o ar oxidam e ganham uma cor escura, formando o óxido de alumínio  $Al_2O_3$ . Destacaram que este pó entre os fios do condutor acelera o processo de fadiga, contribuindo para a ruptura dos mesmos.

Boniardi *et al.* (2008), fizeram um estudo investigativo das falhas ocorridas em um condutor liga alumínio 6101, de uma linha de transmissão localizada na Argélia que caiu com apenas seis meses de operação. Em todas as amostras recolhidas verificaram-se marcas de fretting nos fios, associadas a uma presença intensa de  $Al_2O_3$  (óxido de alumínio). Os autores constataram que as falhas ocorreram devido à fadiga por *fretting*, causadas pelas vibrações eólicas no condutor.

Estudos avançados de fadiga por *fretting* em cabos condutores foram realizados por pesquisadores na Universidade de Brasília. Pode-se destacar o estudo realizado por Henriques (2006), construiu-se uma bancada de ensaios de fadiga por *fretting*, através destes testes com o cabo condutor Grosbeak submetido à **EDS** de 20% de **RTS**, levantou-se à curva **S-N**. Observou-se que a curva obtida ficou significativamente acima da curva limite de segurança da CIGRÉ (CSBL).

Azevedo *et al.* (2008), apresentaram o projeto da construção e operação da bancada de ensaios de fadiga por *fretting* de cabos condutores de energia do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília. Através desta bancada é possível realizar ensaios de fadiga controlando a amplitude de deslocamento no ponto de medição, localizado a 89 *mm* distante do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão, utilizando a formulação de Poffenberger-Swart. Os autores constataram que é importante fazer a seleção correta dos materiais os quais fabricam-se os parafusos e as porcas do grampo de suspensão, bem como o processo de acabamento dos mesmos, com intuito de manter constante a carga de aperto do grampo de suspensão, contribuindo para o bom andamento dos ensaios de fadiga por *fretting* nos condutores. Ressaltaram ainda, a necessidade de ter informações a respeito dos componentes do sistema de grampeamento, para garantir a reprodutividade dos ensaios de fadiga.

Ao tratar dos efeitos da carga de esticamento dos condutores, a CIGRÉ (2008), concluiu no relatório que até aquele presente momento, não existia nenhuma evidência clara de que há uma relação direta da **EDS** com a resistência à fadiga dos condutores. No entanto, Fadel *et al.* (2012), apresentaram resultados experimentais da influência da tensão de esticamento na vida em fadiga do cabo Ibis (CAA 397,5 MCM), foram levantadas duas curvas **S-N** com **EDS** de 20% e 30% de **RTS**. Constatou-se que o aumento da carga de tracionamento do condutor para **EDS** de 30% reduziu em até 50% a vida em fadiga do condutor em relação a **EDS** de 20%.

Em tempos mais recentes, Lévesque *et al.*, (2015), apresentaram resultados de ensaios de fadiga realizados em dois tipos de cabo ACSR, os testes foram realizados em uma bancada com 5,83 metros de comprimento, com diferentes valores de amplitudes de tensões , amplitudes de deslocamento e frequências. Mediram as amplitudes de deslocamento no anti-nó e em cinco locais diferentes próximos ao grampo rígido. Os resultados mostraram que há uma grande variação da rigidez a flexão nos pontos próximos ao grampo rígido, onde há restrição de movimento do condutor. É importante salientar que o objetivo do estudo experimental foi obter dados para desenvolvimento de um modelo numérico que inclui a rigidez à flexão de um condutor.

### 1.3.2 Redes Neurais

Ao longo da história, várias informações e trabalhos foram desenvolvidos contribuindo para o estado da arte das redes neurais artificiais. É possível observar a seguir o surgimento desta técnica computacional e as várias áreas que já utilizaram esse tipo de ferramenta na solução de problemas diversos relacionados à engenharia.

Em 1943, Warren McCulloch e Walter Pitts realizaram o primeiro trabalho utilizando um modelo matemático que baseava seu funcionamento nos neurônios do cérebro, onde apresentaram os resultados obtidos no artigo clássico denominado “*A logical calculus of the ideas imanente in nervous activity*” (McCulloch e Pitts, 1943). A ênfase do trabalho era apresentar a capacidade computacional deste modelo e não se preocuparam a priori às técnicas de aprendizado, através do mesmo, os autores desenvolveram teoremas importantes que contribuiriam com estudos que futuramente seriam apresentados sobre as **RNAs**. Assim, em 1949, Donald Hebb (*apud in* Fausett, 1994) desenvolveu a teoria de aprendizagem, ressaltando a importância de modificar os pesos de entrada dos neurônios para se obter melhores resultados, esta teoria ficou conhecida como a regra de Hebb.

Em 1951, Minsky (*apud* Golden, 1996), criou o primeiro neuro computador denominado Snark, com a capacidade de aprendizado, pelo qual os pesos eram ajustados automaticamente. Mas somente em 1958, é que Frank Rosenblatt, criou o modelo de rede neural artificial chamado Perceptron, com a capacidade de classificar padrões. Rosenblatt demonstrou que se acrescentasse os pesos sinápticos ajustáveis as redes neurais de Warren McCulloch e Pitts, a **RNA** poderia ser treinadas para classificar padrões em classes linearmente separáveis (Haykin, 1999).

Em 1967, Cowan (*apud* Golden, 1996), utilizou pela primeira vez, uma função de ativação logística (sigmoide) como disparo suave para um neurônio. No entanto, em 1969, Minsky e Papert, descobriram que o perceptron não analisava problemas não-linearmente separáveis, isso teve um impacto negativo para o modelo de Rosenblatt .

Na década de 70 e 80, houveram grandes avanços nos estudos de redes neurais. Como por exemplo, trabalhos desenvolvidos por Werbos, (1974) (*apud* Golden, 1996), onde o autor criou o algoritmo de aprendizado conhecido como Retropropagação (Backpropagation), se baseia na retropropagação de erros para realizar os ajustes de pesos nas camadas intermediárias, o sucesso deste algoritmo proporcionou o desenvolvimento de muitas pesquisas em redes neurais. No ano de 1986, Rumelhart *et al.*, desenvolveram o primeiro algoritmo de treinamento retropropagação utilizando redes com múltiplas camadas, que proporcionou um avanço muito importante na pesquisa sobre **RNA**, com a aplicação nas áreas de conhecimento como as neurociências, psicologia, matemática, física e engenharia. Ressalta-se que, a engenharia é considerada um dos campos de estudo mais promissores de aplicação de **RNA** (Haykin, 1994) (*apud* Braga, 2000, p.4).

Em tempos recentes, foram muitos trabalhos desenvolvidos enfatizando o uso **RNA** em diversas áreas da engenharia e ciências dos materiais. No setor automotivo e aeroespacial, **RNA** foi usada para auxiliar o mapeamento de processos que envolvem estimativas de variáveis de controle e parâmetros de projeto. Como trabalho de Cho *et al.* (2006), que recomendaram o uso de **RNA**, nos esquemas de modelagem e estratégias de controle para veículos aéreos não tripulados. Na acústica, foram realizados estudos que utilizaram redes neurais para determinar a propagação do som em um ambiente, aplicado em projetos de salas de cinema ou ambientes sensíveis aos barulhos externos (Too *et al.*, 2007).

Na área de engenharia dos materiais, tiveram também alguns trabalhos muito interessantes. Como por exemplo, Freire Júnior *et al.* (2005), aplicaram **RNA**, utilizando a arquitetura conhecida como Rede Perceptron Múltiplas Camadas (Haykin, 1999), na construção de diagramas de vida constante, treinando a **RNA** com três curvas **S-N** foi possível prever o comportamento à fadiga de um plástico reforçado com fibra de vidro. Neste mesmo trabalho, os autores destacaram os motivos pelos quais se pode modelar o comportamento à fadiga de um material através de redes neurais:

- Existência de uma base de dados relacionada ao material;

- Não existe ou não se conhece uma solução precisa para o problema, porém existem aproximações matemáticas;
- Os dados experimentais obtidos são incompletos e com alta dispersão.

Ainda Freire Júnior *et al.* (2007), demonstraram a aplicabilidade de **RNA** na construção de diagramas de vida constante de fadiga. Utilizaram uma Rede Perceptron Multicamadas com algoritmo de retropropagação, treinando a rede com três curvas **S-N** produziram resultados satisfatórios, no entanto, aumentando-se o número de curvas para seis, os resultados melhoraram de forma significativa.

Vassilopoulos *et al.* (2007), utilizaram redes neurais artificiais para fazerem previsão da resistência à fadiga de materiais compósitos (laminados multidirecionais), para o treinamento utilizaram dados experimentais disponíveis na literatura, usando 50% dos dados foi suficiente para levantamento de diagramas de vidas constantes. O objetivo foi utilizar estes diagramas para desenvolvimento de projetos, no entanto, os autores destacaram que uma das dificuldades ao utilizar **RNA** neste caso específico, foi fazer previsões utilizando valores diferentes dos usados no conjunto de treinamento.

Assadi *et al.*, (2010), usaram **RNA** com múltiplas camadas e com algoritmo de treinamento de retropropagação para prever falha por fadiga em compósitos de fibra reforçada, os resultados obtidos do comportamento prévio deste tipo de material foi utilizada para desenvolver novos materiais com melhor resistência à fadiga. Os autores constataram que ao utilizar alguns resultados experimentais de determinadas configurações de materiais compósitos para o treinamento da rede, foi possível prever o comportamento à fadiga de materiais compósitos diferentes dos utilizados como entrada para a **RNA**. Em 2011, os mesmos autores fizeram um estudo similar, porém, levaram em consideração o efeito da tensão média e usaram diferentes arquiteturas de **RNA**, e os resultados mostraram que a rede pode fazer previsões de vida à fadiga de diferentes tipos de materiais compósitos com diferentes valores de razão de carregamento. Permitindo um vasto banco de dados com o comportamento à fadiga de diversos tipos de materiais, sendo que o erro médio quadrático encontrado pela rede variou de 6,1% a 40%. A utilização de uma camada oculta variando de 6 a 12 neurônios foi a arquitetura que produziu a melhor previsão de vida à fadiga, comparando os resultados obtidos com dados fornecidos pela literatura.

Pujol & Pinto (2011), utilizaram **RNA** para fazer a previsão de vida à fadiga do aço SAE 8620, construíram uma distribuição de probabilidade, e compararam os resultados obtidos com a distribuição estatística padrão encontrada na literatura. Ambos

os modelos foram ajustados aos dados experimentais, em seguida, foi realizado um teste de Kolmogorov-Smirnov para verificar a qualidade dos ajustes de ambas as distribuições. Assim, o modelo empregando **RNA** mostrou-se mais eficaz do que o modelo padrão comumente utilizado.

As redes neurais artificiais é uma ferramenta eficaz para previsão do comportamento à fadiga de compósitos, no entanto, a maioria das previsões são feitas utilizando apenas um tipo de material compósito submetido a diferentes razões de carregamentos. No entanto, Bessa *et al.* (2011), fizeram um estudo usando uma **RNA** fazendo previsões de vida à fadiga para diferentes tipos de materiais compósitos reforçados com fibra, com diferentes razões de carregamento, com o objetivo de obter um banco de dados extenso de materiais inteligentes que podem ter diversas aplicações na engenharia. Os resultados encontrados pelos autores demonstraram estar condizentes com os da literatura.

Em Belísio (2012), analisou o comportamento probabilístico à fadiga de materiais compósitos, associando a equação de probabilidade de Weibull às equações comumente utilizadas no modelamento da curva **S-N**, que são as equações exponenciais e da lei de potência e suas respectivas generalizações. Em seguida, o autor utilizou os resultados obtidos pela equação que melhor representou as curvas **S-N** de probabilidade e treinou uma **RNA** a 5% de falha. Concluiu-se que, a lei da potência generalizada de probabilidade representa melhor o comportamento probabilístico à fadiga de compósitos.

Encontra-se ainda na literatura, estudos como o de Uygur *et al.* (2014), onde os autores estimaram a vida à fadiga para vários compósitos com matriz metálica utilizando **RNA**, os resultados obtidos através do treinamento de uma **RNA** mostraram-se condizentes com as previsões de vida encontradas através de ensaios experimentais que não foram utilizados para o treinamento da rede neural. Deste modo, os autores constataram que a **RNA** pode ser utilizada para prever os ciclos de falha para compósitos com matriz de metal, em vez de fazer ensaios experimentais.

Brooks & Tucker, (2015), utilizaram **RNA** para prever as características de nano fibras, que são produzidas com várias combinações de polímeros e solventes, este estudo foi realizado utilizando dados experimentais de algumas propriedades de polímeros e solventes, para então utilizá-los para o treinamento de uma rede Perceptron de Múltiplas Camadas. Os resultados encontrados garantiram a eficácia da **RNA**, onde 80% das previsões mostraram-se corretas.

Em um estudo recente, Diniz, (2017), desenvolveu um algoritmo para analisar o comportamento probabilístico à fadiga de compósitos laminados. Com apenas três valores de razão de fadiga (3R) como dados de entrada foi possível gerar diagramas de vida constante para diferentes valores de probabilidade de falha, utilizando três ferramentas: redes neurais artificiais ou **RNA** modular, distribuição de Weibull e a Lei da Potência generalizada. Dentre as conclusões obtidas é que através da metodologia adotada foi possível fazer uma análise para qualquer valor de probabilidade de falha desejado e a **RNA** modular proporcionou a obtenção das curvas com uma metodologia simplificada, produzindo parâmetros de Weibull para todo o material.

Nota-se que é possível encontrar na literatura diversos trabalhos utilizando **RNA** para estimar o comportamento à fadiga de alguns materiais, em especial, compósitos. No entanto, ressalta-se que *não encontra-se nenhum trabalho onde relaciona-se redes neurais artificiais a resistência à fadiga de cabos condutores de energia*. Assim, o objetivo deste trabalho é modelar o efeito da carga de pré-esticamento na vida à fadiga de cabos condutores de energia, utilizando-se uma técnica que requeira uma quantidade mínima de ensaios experimentais e confiabilidade. Pois isto é de fundamental importância para empresas nacionais de transmissão de energia elétrica, possibilitando ao setor de manutenção das transmissoras fazer previsões da vida contra à fadiga eólica desses cabos quando submetidos a diferentes níveis de tensões médias, sem haver a necessidade de um grande dispêndio de tempo e recursos financeiros para a execução de um vasto programa de ensaios experimentais.

## **1.4 CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS, TECNOLÓGICAS E CARÁTER INOVADOR**

Abaixo são listadas as principais contribuições desta tese no estado da arte de fadiga de cabos condutores:

### **1.4.1 Contribuições científicas**

- Avaliação do efeito da tensão média de tração do condutor CAL 1055 MCM após levantamento de três curvas **S-N** para **EDS** de 17%, 20% e 25,6% de **RTS**.

- Desenvolvimento, treinamento e validação de uma **RNA** com arquitetura Perceptron de Múltiplas camadas para modelar o comportamento à fadiga de cabos condutores de energia.

- Desenvolvimento através da **RNA** de diagramas de vida constante para os condutores Ibis (alumínio com alma de aço) e para CAL 1055 MCM (liga alumínio 6201).

- Comparação dos modelos de **RNA**, Gerber, Goodman e **SWT** para avaliar qual modelo melhor descreve o comportamento a fadiga do condutor CAL 1055 MCM.

#### **1.4.2 Contribuições Tecnológicas e caráter inovador**

- Compreender a influência do aumento da carga de esticamento (tensão média) na vida dos condutores. Sabe-se que o conhecimento dos efeitos mecânicos do aumento da carga de serviço (**EDS**) é de grande interesse para o setor elétrico, tanto na construção de novas linhas como também na recapacitação de linhas em serviço (Eletronorte, 2009);

- Avaliar o comportamento à fadiga de um cabo constituído inteiramente de liga de alumínio 6201. Empresas de energia elétrica têm utilizado cabos de alumínio liga submetidos a níveis de carga de esticamento superiores a usual. Isso de fato, pode levar a uma economia de milhões de reais, uma vez que neste caso seria necessário uma quantidade menor de torres, ou até mesmo torres mais baixas, além de menores comprimentos de cabos (Eletronorte, 2009). Ressalta-se ainda, que inovações neste âmbito podem levar a redução de tarifas para o consumidor final. No entanto, um estudo minucioso desse tipo de condutor é fundamental, porque a aplicação de uma maior carga de esticamento pode resultar em danos precoces por fadiga.

- Para avaliar a vida remanescente das linhas de transmissão de energia, a CIGRÉ recomendou uma metodologia de cálculo que além de medir os níveis de vibração do cabo também é necessário levantar curvas **S-N** obtidas através de ensaios em laboratórios. Entretanto, para a realização desses testes é preciso muito tempo e um aparato experimental rebuscado. Assim, a construção de um modelo técnico adequado para prever a curva **S-N** do condutor para certo nível de tensão média é muito almejado. Redes Neurais Artificiais pode ser uma importante ferramenta para este fim. Conforme observado na extensa revisão do estado da arte que foi apresentada, há na literatura importantes trabalhos utilizando **RNA** para estimar o comportamento à fadiga de alguns materiais, em especial, compósitos. No entanto, esta promissora ferramenta *ainda não foi utilizada para fazer previsões da vida à fadiga de cabos condutores de energia*. Assim, o caráter inovador deste trabalho consiste *principalmente no uso da RNA para extrapolar o comportamento à fadiga do condutor CAL 1055 MCM para diferentes*

*valores de tensões médias, utilizando para isso, uma quantidade mínima de ensaios experimentais. Este estudo é de fundamental importância para empresas nacionais do setor de transmissão de energia elétrica, pois, possibilita ao setor de manutenção das transmissoras fazer previsões da vida contra à fadiga eólica desses cabos quando submetidos a diferentes níveis de tensões médias, sem haver a necessidade de um grande dispêndio de tempo e recursos financeiros para a execução de um vasto programa de ensaios experimentais.*

*As curvas S-N produzidas em três diferentes níveis de EDS para o cabo CAL 1055 MCM e a validação do uso da formulação de Poffenberger-Swart também são inéditas. Além disso, é feito o mapeamento e caracterização das falhas para este condutor que também tem caráter inovador.*

## CAPÍTULO 2

### 2 EFEITO DA TENSÃO MÉDIA E FADIGA EM CABOS CONDUTORES

#### 2.1 EFEITO DA TENSÃO MÉDIA

A presença de tensão média de tração influencia de forma expressiva no processo de fadiga. A sua junção com uma componente alternada acelera a falha de um elemento mecânico, este comportamento é diferente quando o mesmo é submetido a um carregamento puramente alternado (Norton, 2005). A tensão média de tração pode influenciar na propagação da trinca, quando a mesma é positiva a tendência é acelerar o processo de fadiga, ao contrário das negativas que retardam este processo (Murça, 2011). Assim, no presente trabalho, a avaliação do efeito da tensão média em cabos condutores, tem grande relevância, já que estes componentes operam sob ação de cargas de esticamento, que pode influenciar significativamente o contato do condutor com as ferragens de suporte e entre fios, isso pode alterar a severidade do *fretting* presente no processo de fadiga.

Através de diagramas de vida constante, representam-se os efeitos da tensão média. Onde diferentes combinações de amplitudes de tensão e tensões médias estabelecem regiões onde um componente poderia atuar sem falhar por fadiga após um determinado número de ciclos de carregamento (Dowling, 2008).

Desde o final do século XIX, os efeitos da tensão média na vida em fadiga dos materiais têm sido objeto de estudos. Em 1874, Gerber desenvolveu os primeiros estudos para estabelecer o efeito da tensão média no limite de fadiga dos materiais. Pode-se citar ainda, Goodman, (1899), propôs utilizar a teoria dinâmica para determinar a carga máxima admissível em uma estrutura. Segundo esta teoria, uma peça de um determinado material após aplicação de cargas repetidas, pode romper, se a tensão dinâmica equivalente exceder a resistência estática do material (Shigley *et al.*, 2005). Estas relações são apresentadas nas equações (2.1) e (2.2).

Relação de Gerber, mais utilizada para materiais dúcteis:

$$\sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{\left[1 - \left(\frac{\sigma_{med}}{\sigma_u}\right)^2\right]} \quad (2.1)$$

Relação de Goodman, normalmente utilizada para materiais frágeis:

$$\sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \frac{\sigma_{med}}{\sigma_u}\right)} \quad (2.2)$$

Onde,  $\sigma_{med}$  é a tensão média,  $\sigma_{ar}$  é o limite resistência à fadiga para  $\sigma_{med} = 0$ . E o limite de resistência para  $\sigma_{med} \neq 0$  é dado por  $\sigma_a$ ,  $\sigma_u$  é a resistência à tração.

Segundo Dowling (2004), os métodos de Gerber e Goodman apresentam resultados questionáveis para alguns materiais, como por exemplo, para liga de alumínio. O autor utilizou diferentes tipos de aços e algumas ligas de alumínio para avaliar qual modelo estudado melhor se ajustaria aos resultados experimentais. Concluiu-se que o modelo Smith, Watson e Topper (SWT), 1970, é uma equação bem apropriada para vários tipos de materiais, principalmente para ligas de alumínio. Ressaltou-se que esse método possui a vantagem de ser simples, devido à ausência de variáveis relativas a propriedades dos materiais, conforme apresentado na Eq. (2.3).

$$\sigma_{ar} = \sqrt{\sigma_{max}\sigma_a} \quad (2.3)$$

Ainda em um estudo comparativo destes modelos, Dowling *et al.* (2008), verificou que o método de Goodman é impreciso para alguns tipos de materiais como aço e liga de titânio. No entanto, o modelo de Morrow (1969) é eficiente para aço, mas altamente duvidoso para ligas de alumínio. O autor ressaltou que o modelo **SWT** é eficiente para liga de alumínio, além de apresentar simplicidade na sua formulação.

Os pesquisadores mencionados nesta seção apresentaram curvas padrão, onde é possível fazer correções dos efeitos da tensão média não nula sobre a vida em fadiga. Através destas curvas com tensão média nula pode-se extrapolar o comportamento do componente mecânico. A Figura 2.1 apresenta graficamente os métodos de Gerber, Goodman e SWT.

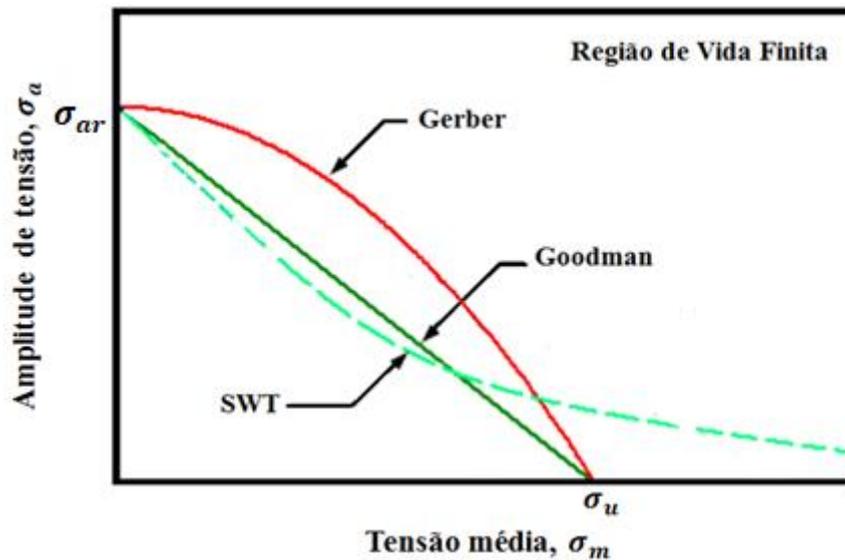


Figura 2.1. Gráfico comparativo dos modelos de Gerber, Goodman e SWT.

Existem alguns trabalhos mais recentes desenvolvidos com objetivo de avaliar o efeito da tensão média de tração nos materiais. Dentre estes pode-se citar, Niestony & Böhm (2013), nos quais os autores propuseram um novo modelo numérico que corrige o efeito da tensão média através dos números de ciclos até as falhas de alguns materiais que foram ensaiados em laboratórios, obtidos da literatura. Os resultados encontrados utilizando estes novos modelos são comparados com modelos clássicos de Gerber, Goodman e **SWT**. Os autores concluíram que os modelos numéricos propostos por eles apresentaram dispersões menores do que os modelos comumente usados. Porém, a limitação existente nesta nova proposta é a necessidade de mais de duas curvas **S-N** para obter resultados mais confiáveis.

Bader & Kadum (2014), estimaram a vida em fadiga de um corpo de prova cilíndrico fabricado com ligas de aço com diferentes quantidades de carbono através de ensaios realizados em uma máquina de teste de fadiga, aplicando cargas cíclicas totalmente reversas, com tensão média nula. Utilizaram o método dos elementos finitos para verificar a influência da tensão média na resistência à fadiga baseados nos modelos de Goodman, Soderberg e Gerber. Assim, observaram que os modelos de Goodman e Soderberg representaram melhor os dados experimentais. E a medida que acrescentou carbono no aço a dispersão dos resultados foram maiores.

Em 2015, Kamaya & Kawakubo analisaram a influência da tensão média na vida à fadiga de um aço inoxidável tipo 316, corpos de prova foram submetidos a testes com vários graus de pré-deformações. Os resultados experimentais mostraram que a resistência à fadiga foi praticamente à mesma independente da amplitude de tensão

aplicada com o mesmo nível de deformação. À medida que aumentou-se o valor da tensão média a vida em fadiga diminuiu expressivamente.

Em um trabalho numérico recente com materiais compósitos, Flore e Wegener, (2016), desenvolveram um modelo com uma nova abordagem fenomenológica para avaliar o efeito da tensão média na vida em fadiga de plásticos reforçados com fibra de vidro, através do método dos mínimos quadrados. Os autores verificaram que é possível prever com precisão o comportamento a fadiga de diferentes empilhamentos de fibras unidirecionais e laminados multidirecionais utilizando para isso apenas uma curva **S-N**, reduzindo assim os esforços e recursos necessários para realizar ensaios experimentais.

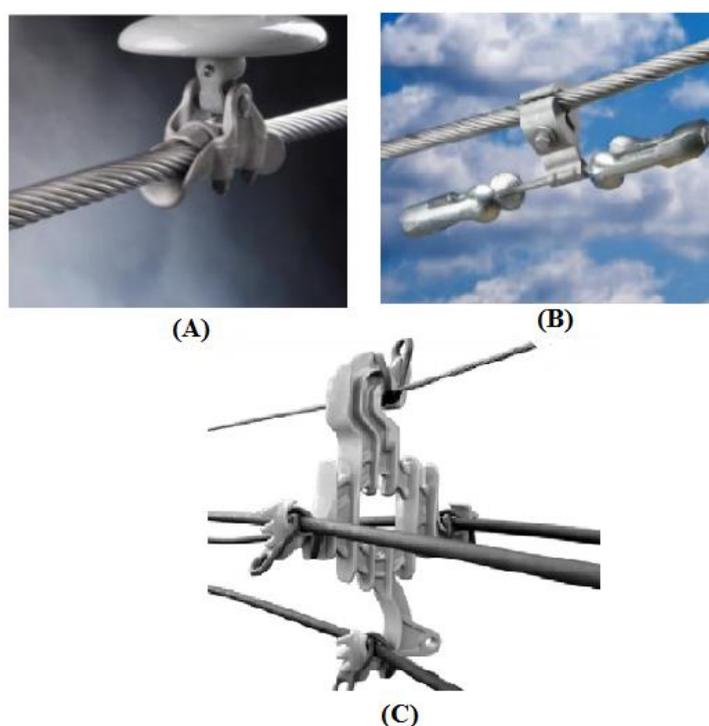
A fim de verificar o efeito da tensão média na resistência à fadiga de um cabo condutor, Pestana *et al.*, (2016), avaliaram quais modelos acima descritos representam melhor os resultados dos ensaios de fadiga para o cabo CAL 1055 MCM. Utilizando duas curvas **S-N** com tensões médias de 49 e 57 *MPa*, construíram-se diagramas de vida constante, encontrando combinações de tensões médias e amplitudes de tensões definindo regiões onde o condutor pode operar com segurança. Além disso, após avaliar a aderência dos modelos de estimativa do efeito da tensão média com os dados experimentais, verificou-se que o modelo de Smith-Watson-Topper foi o que melhor se ajustou a curva de tendência que representa a equação de Basquin.

Ainda em meses recentes o *Purdue Polytechnic Institute, Purdue University*, (2017), desenvolveram um novo modelo para avaliar o efeito da tensão média de tração e compressão na fadiga de ferro fundido, dois tipos de aço e duas ligas de alumínio, utilizando um extenso conjunto de dados obtidos da literatura. O objetivo foi comparar o novo modelo com os de Morrow e Smith-Watson-Topper (**SWT**). Concluíram que tanto o modelo proposto como o de **SWT** produziram resultados semelhantes e bastante satisfatórios. Porém, o modelo de Morrow não produziu bons resultados, sendo estes muito conservadores para todos os materiais avaliados.

Neste sentido, torna-se claro que uma boa escolha de uma equação de vida constante para descrever o efeito da tensão média sobre a resistência à fadiga de um cabo condutor também dependerá se o modelo se ajusta de forma adequado aos dados experimentais.

## 2.2 FADIGA EM CABOS CONDUTORES

O principal motivo de falhas em cabos condutores é a fadiga em flexão cíclica causada devido às vibrações provocadas pelo vento. As falhas por fadiga do condutor ocorrem nos pontos onde há restrição de movimento do mesmo, como por exemplo, nos grampos de suspensão, amortecedores e espaçadores (CIGRE, 1985) (Fig. 2.2). Na contenção do movimento do condutor, há um pequeno escorregamento entre os fios aliado as forças de fricção provocando o *fretting*, tanto no contato fio com fio, como nos fios com os acessórios de montagem. Uma vez que forma-se a trinca induzida pelo *fretting*, a propagação da mesma pode levar ao rompimento do fio.



**Figura 2.2. Acessórios utilizados em cabos condutores de energia: A) Grampo de suspensão; B) Amortecedor e C) Espaçador. (Preformed Line Products, 2013).**

Neste sentido, supervisionar as linhas de transmissão de energia é uma atividade necessária, porém, arriscada e envolve custos elevados. Entretanto, a falha inesperada por fadiga pode causar prejuízos financeiros elevados e uma imagem no cenário mundial negativa para o país (Fragelli & Araújo, 2010). Portanto, estudar o mecanismo que controla incidências de falhas ocasionadas por fadiga em cabos condutores é fundamental para aumentar a confiança no sistema de transmissão de energia e reduzir custos associados a falhas repentinas.

No entanto, no desenvolvimento de projetos de linhas de transmissão de energia é desafiador prever o comportamento vibratório do condutor, uma vez que isso influencia diretamente na vida em fadiga do mesmo. E conseqüentemente, limita alguns parâmetros de projeto, como, por exemplo, a carga de esticamento do condutor (EPRI, 1979). Deste modo, pesquisas com objetivo de definir um limite superior quanto à carga de tração do condutor que garanta uma vida em serviço com um período de tempo significativo é de fundamental importância para as empresas transmissoras de energia.

### 2.2.1 Tipos de Vibrações em Cabos Condutores

O cruzamento de corrente de ar com o cabo provocam vibrações no mesmo. Devido à contínua passagem de ar pelo condutor, ele se desloca de maneira alternada para cima e para baixo, em um processo repetitivo, formando-se então, as esteiras de vórtices conhecidas como esteiras de Von Kármán (Fig. 2.3).



Figura 2.3. Representação Esteira de Von Kármán (Bernitsas, 2009).

Abaixo são descritas três tipos de excitações eólicas as quais os condutores estão sujeitos (Fuchs *et al.*, 1992) (Fig.2.4):

- 1) Vibração eólica simples – É a que ocorre com mais frequência no Brasil, caracterizada por pequenas amplitudes de oscilação, onde encontra-se ventos de baixa ou moderada velocidade, de 0,8 a 8  $m/s$ , ocorrem em relevos planos ou levemente ondulados, produzindo flexões alternadas com frequência que podem chegar a 150  $Hz$ . Atingindo amplitude de flexão pico a pico de 0,01 a 1 vez o diâmetro do cabo.
- 2) Oscilação de sub-vão ou induzida por esteira – ocorre em linhas paralelas, devido a ventos laterais de velocidade moderada ou forte, de 4 a 8  $m/s$ , na faixa de frequência baixa de 0,2 a 10  $Hz$ . Pode atingir amplitudes até 20 vezes o diâmetro do condutor.

- 3) O galope – causado por fortes ventos de 7 a 18  $m/s$ , com frequências baixas de 0,1 a 3  $Hz$ . E com amplitudes de flexão muito altas atingindo até 300 vezes o diâmetro do condutor.

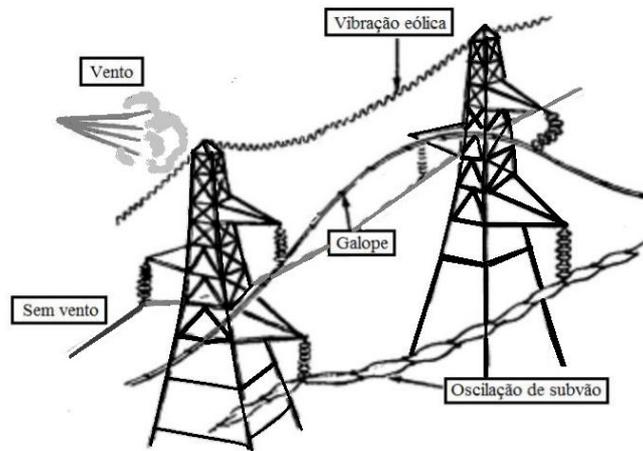


Figura 2.4. Tipos de vibrações nos condutores (modificado: EPRI, 2010).

Para ocorrer vibrações de galope é necessária a presença de massas concentradas nas linhas de transmissão, como no Brasil não existe acúmulo de gelo nas linhas, a vibração de galope raramente ocorre. Da mesma forma, são as vibrações de sub-vão, devido ao regime de vento brasileiro, são poucos comuns. No entanto, a vibração do tipo eólica simples são as que mais ocorrem no território nacional, vale enfatizar que no Brasil, existem grandes vãos nas linhas de transmissão, devido à necessidade das travessias de rios, onde o fluxo de ar é mais intenso (CEPEL, 2012).

É importante destacar, que a carga de esticamento, **EDS** (*Every Day Stress*), interfere de forma intensiva no comportamento oscilatório do condutor (CIGRE, 2005). Ou seja, quanto maior a tensão de esticamento maior será a amplitude de vibração, isso porque o auto amortecimento do condutor é inversamente proporcional a **EDS** (Rosa, 1974). Logo, o condutor submetido a uma maior carga de tração aumenta o número de ciclos de vibração, e conseqüentemente, tem sua vida reduzida quando comparado a um cabo com uma **EDS** menor. No entanto, é digno de nota que a **EDS** do condutor também é um parâmetro importante nos projetos de linha de transmissão, ao tratar-se da altura do vão livre, que deve garantir uma distância segura entre o cabo e o solo, respeitando a altura mínima para passagens de embarcações.

## 2.2.2 O mecanismo de Falha por Fadiga em Condutores Aéreos

A combinação de carregamentos cíclicos devido à ação do vento com o processo de *fretting* tem como consequência o surgimento e o crescimento de trincas nos fios do condutor. As falhas iniciam-se normalmente nas regiões de contato na parte interna dos grampos de suspensão.

No entanto, para melhor compreensão deste processo de falha é necessário conhecer a priori como são constituídos os cabos condutores (Tab. 2.1). Eles são formados por várias camadas de fios posicionadas concentricamente em relação a um fio central, e cada camada possui fios em formatos helicoidais, onde o sentido de rotação dos mesmos é alternado entre as camadas, é possível visualizar esta configuração na Figura 2.5(A). É possível observar na Figura 2.5(B) as regiões de contato na parte interna do grampo, tanto entre os fios, como dos fios com o grampo de suspensão.

Tabela 2.1. Principais tipos de cabos condutores aéreos.

Tipo de Condutor	Descrição
CA (AAC)	Cabo de Alumínio ( <i>All Aluminium Conductor</i> ).
CAA (ACSR)	Cabo de Alumínio com Alma de Aço ( <i>Aluminium Conductor Steel Reinforced</i> ).
CAL (AAAC)	Cabo de Alumínio Liga ( <i>All Aluminium Alloy Conductor</i> ).
CALA (ACAR)	Cabo de Alumínio com Alma de Liga de Alumínio ( <i>Aluminium Conductor Alloy Reinforced</i> ).

É importante salientar que o cabo utilizado para o desenvolvimento desta pesquisa é do tipo CAL (Cabo de Alumínio Liga 6201).

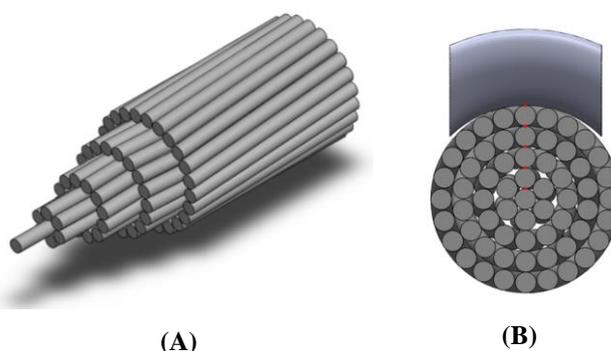


Figura 2.5. (A) Vista isométrica do cabo CAL 1055 MCM e (B) Regiões de contato entre os fios do condutor e o grampo de suspensão.

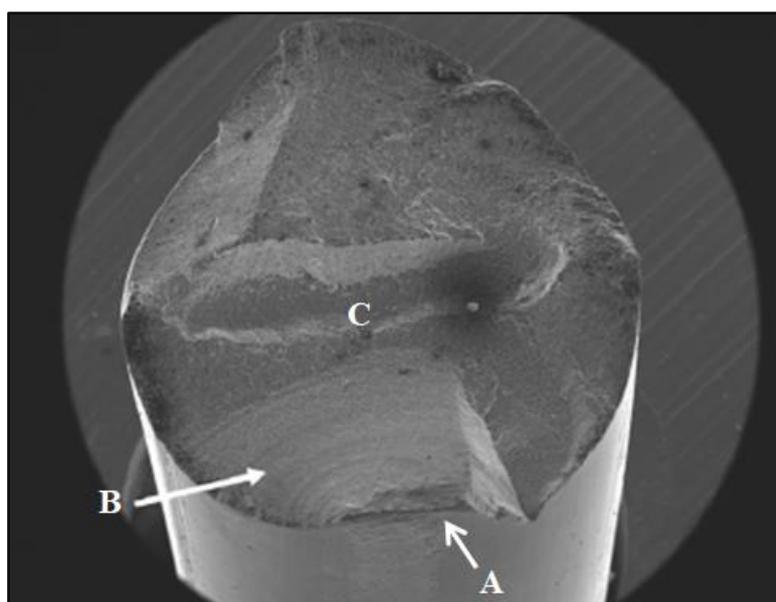
Como já mencionado, quando o condutor é sujeito a vibrações eólicas, nas regiões onde há restrição de movimento, os fios escorregam entre si ou em relação às

estruturas onde o condutor é fixado, isso provoca micro deslizamentos que causam o *fretting*. E em consequência do desgaste por atrito causado por esse fenômeno, gera-se um pó que em contato com o ar, oxida, ficando com uma tonalidade escura, este é conhecido como óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (Fig.2.6). E, como possui dureza maior que a dos fios, em contato com os mesmos, acelera o processo de nucleação e propagação das trincas (Azevedo, 2008).



**Figura 2.6. Óxido de alumínio acumulado na superfície do grampo.**

Devido à carga de esticamento a qual o cabo está submetido, o contato entre os fios e destes com o grampo de suspensão pode ser intensificado, tendo como resultado, zonas de *fretting* e nucleação. A Figura 2.7 apresenta uma imagem microscópica realizada no MEV (microscópio eletrônico varredura) na Universidade de Brasília, de uma falha de um condutor tipo CAL. É possível observar que a falha inicia-se a partir de uma marca de *fretting* na superfície do fio. E as marcas de praia indicam a direção de crescimento da falha até a ruptura súbita do fio, devido à carga de tração do condutor. O capítulo 5 (seção 5.2) deste trabalho aborda com mais detalhes como é feita a análise de falha em cabos condutores e alguns resultados obtidos com o cabo CAL 1055 MCM.



**Figura 2.7. Análise microscópica em um cabo tipo CAL: (A) iniciação da trinca, (B) estrias (marcas de praia) e (C) fratura frágil (ruptura brusca) (Kalombo *et. al*, 2017).**

Assim, após a análise do mecanismo de falha e a dimensão do problema nos condutores, é importante conhecer as metodologias empregadas na determinação das tensões mecânicas, os critérios de projeto e manutenção das linhas de transmissão de energia.

### 2.2.3 Esforços Dinâmicos em Cabos Condutores

A principal razão das falhas das estruturas presentes em uma linha de transmissão ocorre devido às vibrações eólicas causadas pelo vento. E o componente mais afetado pela ação do vento é o cabo condutor. Segundo Rosa *et al.* (1974) *apud* Fuchs (1992), existe uma relação entre os esforços estáticos e dinâmicos dos cabos condutores. Assim, quando se aumentam os esforços estáticos (cargas de esticamento) do cabo é necessário reduzir os esforços dinâmicos (vibrações) para garantir um valor limite de tensão sob o qual é possível que a estrutura opere em uma zona de trabalho segura em relação a fadiga (Fig.2.8).

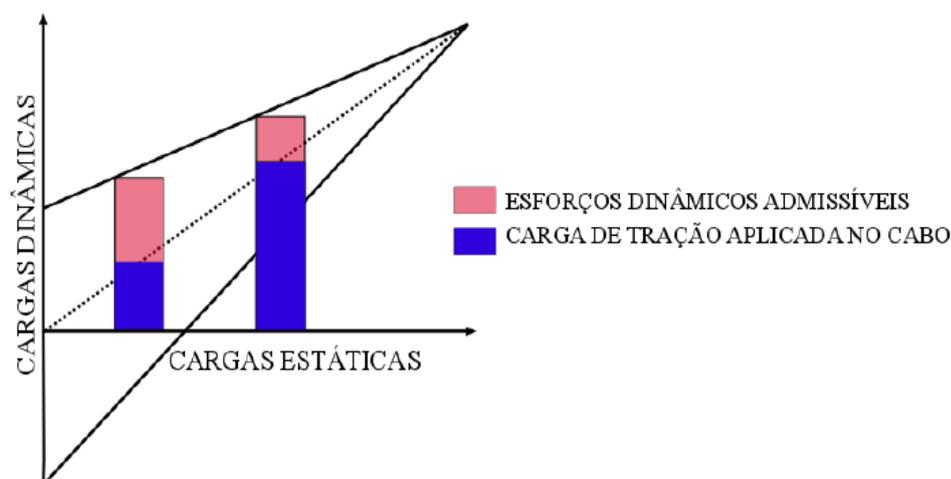


Figura 2.8. Limite de tensão admissível no condutor (Dinâmico x Estático) (Rosa *et al.*, 1974-modificada).

Neste sentido, é importante determinar os esforços dinâmicos do condutor para estabelecer uma zona de trabalho onde o cabo pode operar em segurança. Uma das maneiras de calcular indiretamente a tensão atuante em uma dada localização de um componente mecânico consiste em utilizar a Lei de Hooke (Eq.2.4). Para isso, pode-se obter a deformação elástica lida por um extensômetro (*strain-gages*) e multiplica-la pelo módulo de elasticidade do material.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.4)$$

Onde,  $\sigma$  é a tensão,  $E$  é o módulo de elasticidade (Módulo de Young) e  $\epsilon$  é a deformação elástica.

É importante salientar que, o método utilizando extensômetros para determinar indiretamente a tensão em um dado ponto da estrutura não é possível ser adotado nos cabos condutores quando estes estão instalados nas linhas de transmissão de energia. Pois, nestas condições, os mesmos estão energizados, além de encontrar-se em locais de difícil acesso. Assim, como alternativa, determina-se a tensão nominal dos fios da camada externa do cabo. Para isso, utiliza-se a metodologia de mediação de vibrações estabelecida pelo IEEE (1966). Onde, correlacionam-se a amplitude de deslocamento em um ponto específico do condutor com a respectiva amplitude de tensão, utilizando-se para isso, a Fórmula de Poffenberger-Swart (**P-S**) (1965). Esta formulação permite estabelecer limites de segurança, garantindo a integridade das linhas de transmissão por períodos de tempos significativos.

No entanto, ressalta-se que o mecanismo de falha por fadiga nos condutores envolve diversos fenômenos que atuam em conjunto, tornando esta avaliação complexa. Logo, é esperado que houvesse uma discrepância nas análises de tensões devido às vibrações do condutor. Porém, segundo o IEEE, (2007), o cálculo teórico proposto por **P-S** e os resultados obtidos através de ensaios em laboratórios mostraram-se condizentes para uma amostragem significativa de ensaios. E também, Fadel (2010), apresentou resultados teóricos encontrados usando **P-S**, que tiveram boas aproximações com os dados experimentais através de extensometrias realizadas com o condutor Ibis (CAA 397,5 MCM). Neste sentido, essas tensões nominais obtidas através de **P-S** mostram-se adequadas para construção de curvas **S-N**. No presente trabalho, nas seções 4.4 e 5.1.2 também é feita esta avaliação com o cabo CAL 1055 MCM.

#### **2.2.4 Equação de Poffenberger-Swart (P-S)**

A fadiga nos cabos condutores acontece onde há restrição de movimento do mesmo (EPRI, 2010). Em virtude disso, o grampo de suspensão torna-se um dispositivo crítico para o condutor, pois na montagem cabo/grampo de suspensão ocorre uma severa restrição de movimento ao cabo na direção vertical.

Neste sentido, foi proposto o modelo teórico experimental de **P-S**, que considera a região próxima ao ponto de restrição de movimento do cabo como uma viga de Euler. A tensão nominal em um fio da camada mais externa do condutor é calculada com base

na amplitude de deslocamento vertical pico a pico do condutor ( $Y_B$ ), medido a 89 mm (3,5") do último ponto de contato (UPC) entre o cabo e o grampo de suspensão (Fig.2.9).

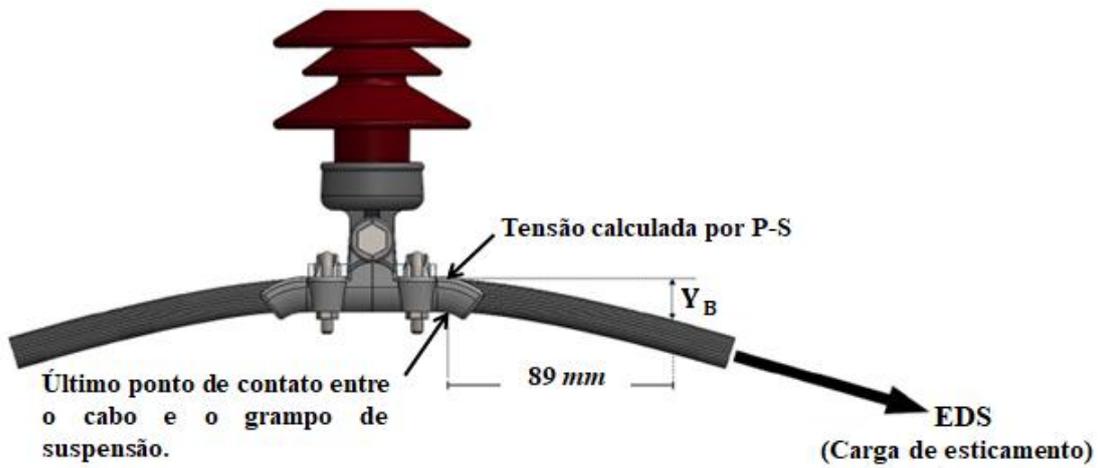


Figura 2.9. Esquema de montagem cabo-grampo de suspensão (Rocha, 2016).

O valor da amplitude de tensão máxima de flexão é calculado pela equação (2.5).

$$\sigma_a = K \cdot Y_B \quad (2.5)$$

Onde,  $\sigma_a$  é a faixa de tensão dinâmica (zero a pico),  $Y_B$  corresponde a amplitude de deslocamento (pico-pico), medida num ponto a 89 mm do UPC. O valor de K é calculado a partir da equação (2.6).

$$K = \frac{E_a \cdot d \cdot p^2}{4(e^{-px} - 1 + px)} \quad (2.6)$$

Em que  $E_a$  e  $d$  são o módulo de elasticidade e diâmetro dos fios da camada mais externa do condutor, respectivamente. E  $x$  representa a distância entre o UPC e o ponto de medição de  $Y_B$  (89 mm). E a rigidez da montagem  $p$  pode ser obtida a partir da equação (2.7).

$$p = \sqrt{\frac{H}{EI}} \quad (2.7)$$

Onde,  $H$  é a carga de esticamento do cabo na temperatura média durante a aquisição dos dados e  $EI$  é a rigidez à flexão do condutor, cujo valor mínimo pode ser obtido pela seguinte equação (2.8):

$$EI_{\min} = n_a E_a \frac{\pi d_a^4}{64} + n_s E_s \frac{\pi d_s^4}{64} \quad (2.8)$$

Onde,  $n_a$ ,  $E_a$  e  $d_a$  representam respectivamente, a quantidade, o módulo de elasticidade e diâmetro (individual) dos fios de alumínio e  $n_s$ ,  $E_s$  e  $d_s$  representam respectivamente, a quantidade, o módulo de elasticidade e diâmetro (individual) dos fios de aço. Vale destacar, que como o cabo CAL 1055 MCM, utilizado para elaboração deste trabalho, é constituído em sua totalidade de fios de liga alumínio, desconsidera-se a segunda parte da equação (2.8), que é utilizada somente quando o cabo possui o núcleo (alma) de aço.

É interessante notabilizar que a utilização da equação (2.8) na equação de **P-S**, teve como objetivo favorecer o fator de segurança no projeto de linha de transmissão. Haja vista que, a variação da rigidez a flexão do cabo em função do comportamento dinâmico não é levada em consideração. Pois, para pequenos níveis de amplitude de flexão, os fios têm comportamento similar ao de uma barra rígida, correspondendo à máxima rigidez a flexão. Em contrapartida, quando a amplitude de flexão aumenta, os fios tendem a deslizar entre si, logo, a rigidez a flexão se aproxima do  $EI_{\min}$ , tornando o cabo mais vulnerável a falhar por fadiga (Azevedo, 2008).

### **2.2.5 Metodologias de Estimativa de Vida em Fadiga para Linhas de Transmissão**

Embora não seja possível representar analiticamente de forma adequada os diversos fenômenos que atuam em conjunto nos cabos condutores. Foram desenvolvidas metodologias para projetos de linhas de transmissão, com objetivo de analisar a durabilidade destes condutores e garantir uma vida útil considerável para os mesmos.

Estas metodologias propostas consideram dois princípios:

- Quantificar a intensidade de vibração;

- Adotar parâmetros de medida de resistência à fadiga de cabos condutores.

Diferentes medidas padrões são sugeridas para quantificar a intensidade de vibração dos cabos, dentre elas pode-se destacar:

- 1) **Abordagem do IEEE: Limite de deformação (IEEE, 1966):** O Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrônica (IEEE) adotou critério baseado em **P-S** em união com o método padrão de amplitude de flexão. O intuito é avaliar a durabilidade do condutor em função da máxima deformação sofrida quando o mesmo é sujeito a vibrações.
- 2) **Limites de resistência EPRI: (Rawlins et al., 1979):** O *Orange Book* do Instituto de Pesquisa em Energia Elétrica (EPRI) também baseado na formulação de **P-S**, é utilizado por muitas empresas do setor elétrico, são adotados valores de limites de amplitude de tensão e máxima amplitude de vibração os quais o condutor poderia ser submetido sem que houvesse falhas por fadiga.
- 3) **Método CIGRE WG 22-04:** O método adotado pelo *Conseil International des Grands Réseaux Électriques* (CIGRÉ), propõe quantificar o dano sofrido pelo condutor durante sua vida útil através de dois conjuntos de informações:
  - Dados extraídos do campo usados para avaliar o dano sofrido pelo cabo devido à vibração;
  - Curvas **S-N** dos condutores, obtidas em laboratório.

Para obter o dano sofrido pela linha é utilizado um equipamento conhecido como vibrógrafo, que mede os níveis de amplitude de vibração (pico a pico) no ponto 89 mm e as respectivas frequências durante alguns meses (Fig.2.10). Após extrair os dados necessários é então utilizada a regra de Miner para quantificar a vida já consumida do condutor durante o período de registro e então extrapola-se a vida consumida ao longo dos anos e estima-se o tempo remanescente de utilidade do condutor. Para maiores informações sobre este método utilizando o vibrógrafo pode-se consultar o trabalho de Gomes, (2015).

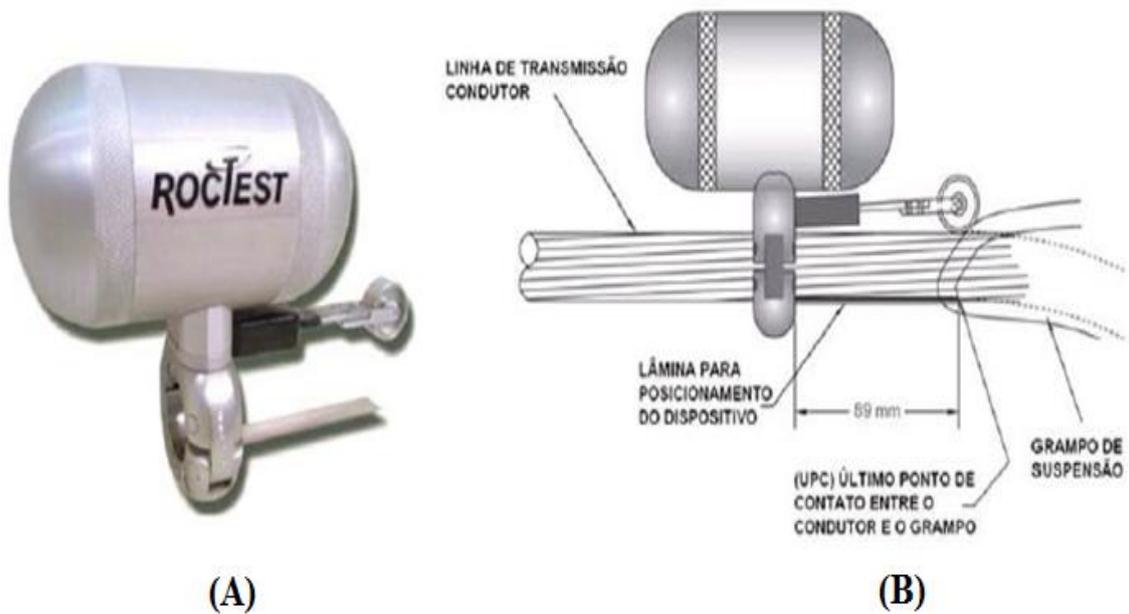


Figura 2.10. . (A) Vibrógrafo modelo Pavica; (B) Esquema de montagem do equipamento na linha (Gomes, 2015).

Outro conjunto de informações adotado pela CIGRÉ é através da curva **S-N** que pode ser obtida por meio de ensaios de fadiga em montagens cabo/grampo de suspensão, correspondentes às condições encontradas nas linhas de transmissão, ensaios estes abordados no capítulo 4 do presente trabalho. Outro meio também utilizado é a *CIGRÉ Safe Border Line (CSBL)*.

A CIGRE (1985) propôs uma metodologia utilizando a abordagem do dano acumulativo, foi definida a partir de uma curva proposta pelo Comitê de Estudos de Linhas Aéreas (SC 22), intitulada *Cigre's Safe Border Line (CSBL)*. Esta curva foi encontrada através da compilação de vários resultados de ensaios de fadiga, realizados em diversos laboratórios do mundo, utilizando: **EDS** de 18% de **RTS**, cabos de alumínio e de ligas de alumínio. Assim, construiu-se a **CSBL** abaixo dos resultados destes ensaios compilados, porém, esta curva de segurança é bastante conservadora. A Figura 2.11 apresenta a **CSBL**, assim como as outras curvas levantadas pela CIGRÉ.

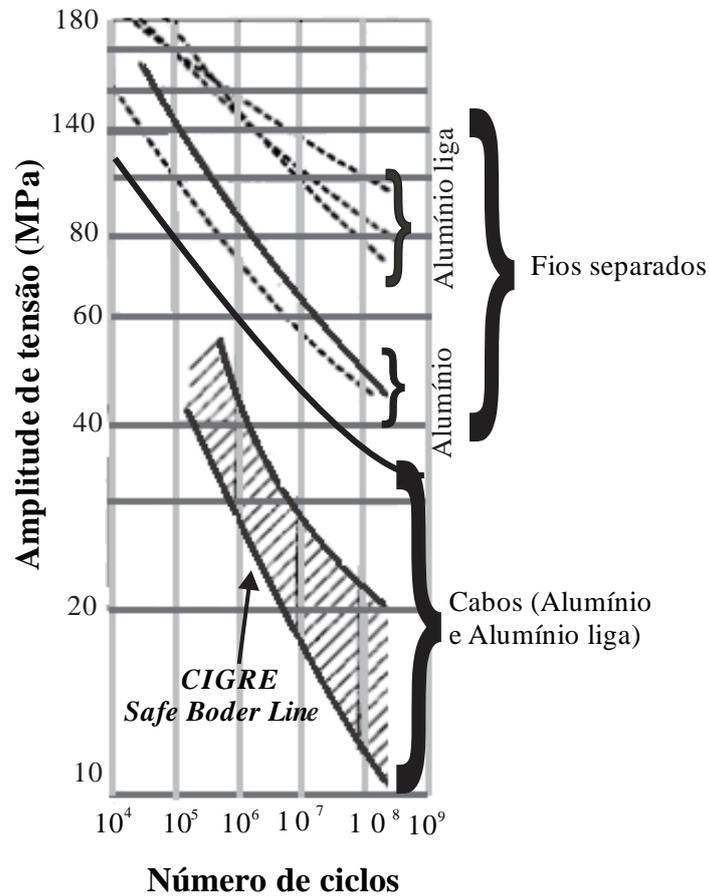


Figura 2.11. Curva Safe Border Line e outras curvas compiladas pela CIGRÉ (CIGRÉ, 1979 - modificado).

A curva **CSBL** pode ser representada pela equação 2.9.

$$\sigma_a = AN^b \quad (2.9)$$

Onde  $\sigma_a$  é a tensão dinâmica em *MPa*,  $N$  é a vida em ciclos e  $A$  e  $b$  são constantes obtidas através da Tabela 2.2, que apresenta os valores diferenciados dessas constantes utilizadas para cabos com uma ou mais camadas de fios de alumínio. Assim, para o cabo utilizado nesta pesquisa a **CSBL** é dada pela expressão:

$$\sigma_a = 450N^{-0,2} \quad (2.10)$$

Tabela 2.2. Constantes da Curva Limite de Segurança (CSBL).

Nº de camadas de fios de alumínio do cabo condutor	$N < 2.10^7$		$N > 2.10^7$	
	$A$	$b$	$A$	$b$
1	730	-0,2	430	-0,168
>1	450	-0,2	263	-0,168

# CAPÍTULO 3

## 3 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Neste capítulo é feita uma revisão teórica sobre Redes Neurais Artificiais (RNA), dando destaque à arquitetura utilizada para desenvolvimento deste trabalho, a Rede Perceptron de Múltiplas Camadas. Além disso, é apresentado o principal algoritmo de treinamento usado, o de Retropropagação.

### 3.1 DEFINIÇÃO

Uma rede neural artificial é um sistema paralelo distribuído, formado por unidades de processamento que executam funções matemáticas, são inspiradas em como se organiza e funciona o cérebro humano, capazes de aprender através de exemplos e generalizar a informação aprendida (Haykin, 1999).

O cérebro humano é constituído de aproximadamente 100 bilhões de neurônios que controla todas as funções do corpo humano. Os neurônios são ligados uns aos outros, através de sinapses, são responsáveis em transmitir os estímulos (Lent, 2010). As principais partes que compõe um neurônio natural são:

- Dendritos, que têm como função receber os estímulos vindos de outros neurônios;
- Corpo da célula, conhecido como soma, o seu objetivo é processar as informações recebidas dos dendritos;
- Axônio, responsável em transmitir estímulos para as células interligadas. A

Figura 3.1 mostra a representação biológica de um neurônio natural.

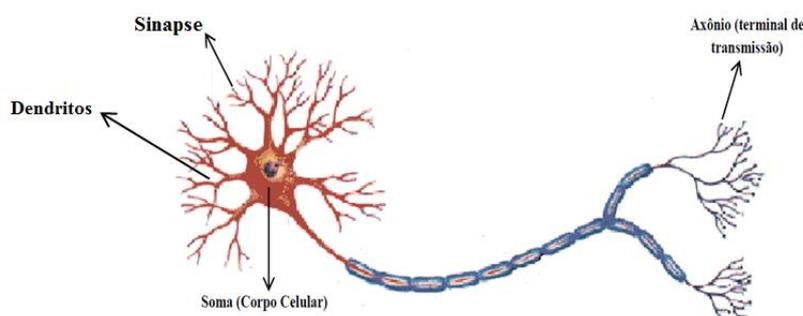


Figura 3.1 Exemplo de neurônio biológico (Lent, 2010).

As redes neurais artificiais possuem várias características em comum com o sistema nervoso (Castro & Zuben, 2001):

- 1) Através dos *neurônios* é feito o processo de informações;
- 2) Os neurônios encontram-se conectados entre si, formando então, *redes neurais*;
- 3) Os sinais entre neurônios são transmitidos através de conexões ou sinapses (*peso*);
- 4) O conhecimento é adquirido do ambiente por meio de um processo de *aprendizagem* ou ajuste dos pesos das conexões de acordo com os estímulos recebidos do ambiente. Ou seja, através do processo de aprendizagem é possível identificar o conjunto de *pesos ideais* para que a rede se comporte como desejado.

Sintetizando, uma **RNA** é similar ao cérebro em dois fatores em especial: o conhecimento é obtido pela rede a partir de um processo de aprendizagem. As forças de conexão entre neurônios (pesos sinápticos) são utilizados para armazenar o conhecimento adquirido (Haykin, 2001).

Silva *et al.*, 2010, descrevem as principais características de uma rede neural:

1. Adaptação por experiência: a rede se ajusta aos parâmetros internos, como pesos sinápticos, por meio de uma contínua apresentação de medidas relacionadas ao comportamento do processo.
2. Capacidade de aprendizado: através do método de treinamento a rede extrai a relação existente entre as diversas variáveis que compõe a aplicação.
3. Habilidade de generalização: depois do seu treinamento, a rede tem a capacidade de generalizar o conhecimento adquirido, possibilitando estimar soluções, até mesmo desconhecidas.
4. Facilidade de prototipagem: a implementação da maioria das arquiteturas neurais pode ser facilmente construída, dependendo da especificidade da aplicação, prototipada em hardware ou em software, pois, após o processo de treinamento, os seus resultados são normalmente obtidos por algumas operações matemáticas elementares.

Segundo Silva *et al.* (2010) as redes neurais artificiais podem ser empregadas em diversos problemas relacionados a engenharia e ciências, abaixo estão relacionados algumas áreas de aplicabilidade:

1. Sistemas de previsão: através da **RNA** é possível fazer estimativa de valores futuros de um processo, utilizando-se para isso diferentes medidas prévias observadas em

seu domínio. Entre as aplicações pode-se destacar a previsão de séries temporais, previsões de mercados financeiros entre outros.

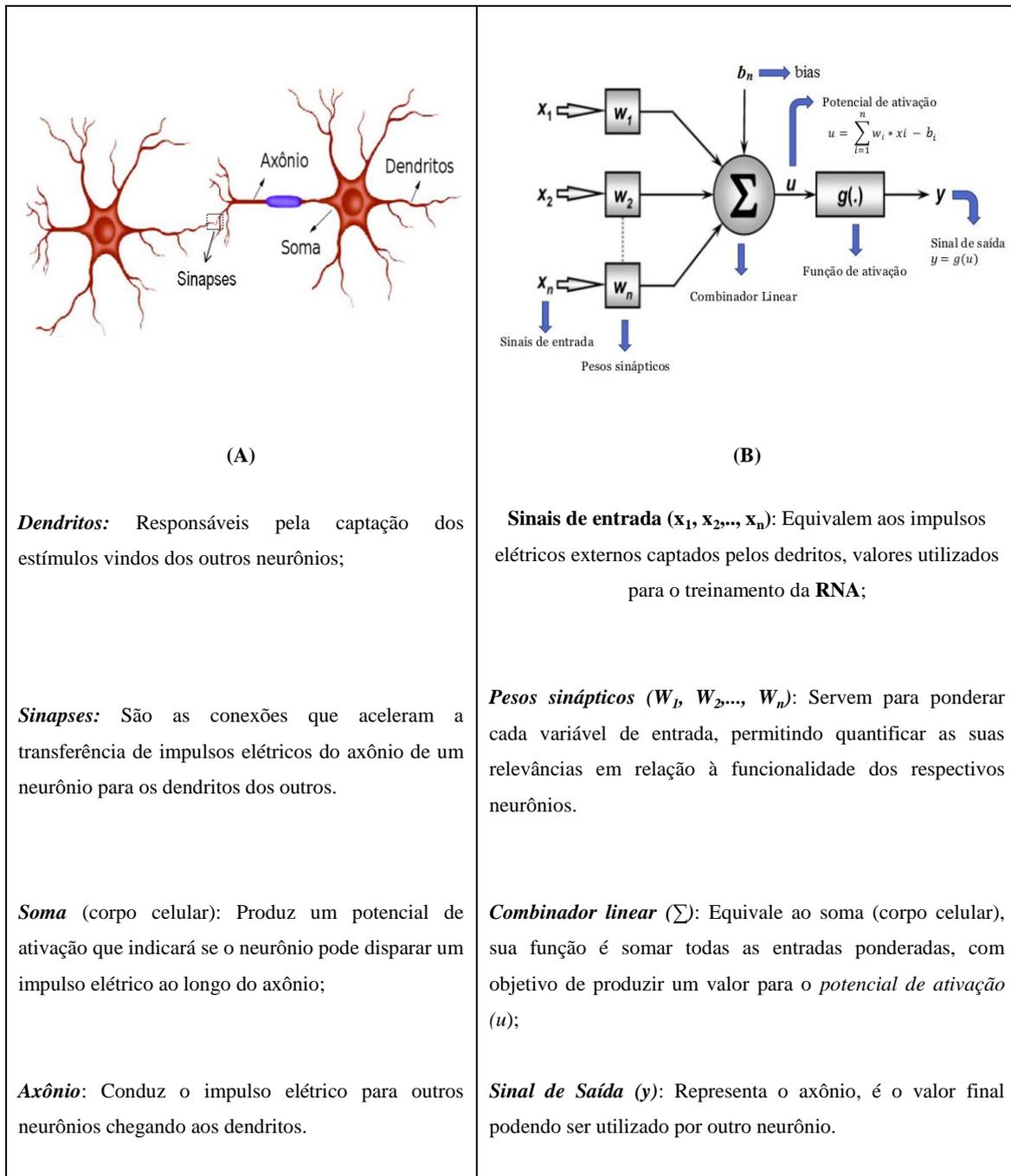
2. Otimização de sistemas: objetivo é minimizar ou maximizar uma função custo obedecendo também eventuais restrições que são impostas para o correto mapeamento do problema. Destacando-se problemas de otimização restrita, programação dinâmica e otimização combinatorial.
3. Controle de processos: utilizado para identificar ações de controle que permitam o alcance dos requisitos de qualidade, eficiência e segurança do processo. Dentre estes: robótica, aeronaves, elevadores, eletrodomésticos, satélites entre outros.
4. Reconhecimento facial e de caracteres: objetivo é identificar através de dados previamente disponíveis, tais como reconstrução de um rosto visto apenas parcialmente. É muito utilizado em problemas de segurança (Lima & Barreto, 2011).
5. Diagnósticos Médicos: No treinamento da **RNA**, é apresentado a rede uma série de diagnósticos de pacientes, com diferentes características, sintomas, os resultados de seus testes e os diagnósticos médicos para cada doença. Logo, quando apresentarem dados de um novo paciente, com seus sintomas, a rede fornecerá um diagnóstico para os novos casos, possibilitando um diagnóstico inicial ao médico. Ressalta-se que o objetivo é implementar uma ferramenta de auxílio ao médico, e não substituí-lo.

Através da habilidade que a **RNA** tem de “aprender” a partir de regras pré-estabelecidas é possível melhorar o seu comportamento. Logo, a ideia principal do treinamento de uma rede neural é a mudança gradual dos seus pesos sinápticos. Utilizando-se para isso, a regra de aprendizado, responsável em determinar a forma como esses pesos serão ajustados. Assim, é necessário apresentar à rede um conjunto de dados para o seu treinamento, quando há uma exposição completa de todos os dados tem-se uma época de aprendizado (Freire Jr. *et al.*, 2007).

As **RNAs** são aplicadas em vários setores das ciências dos materiais, pois possuem a característica de não linearidade. Mesmo não possuindo um modelo físico ou empírico apropriado para solucionar o problema, utilizando-se apenas dados experimentais é possível obter um mapeamento de entrada e saída, funcionando por sua vez, como aproximadores de funções não-lineares. Deste modo, é possível obter resultados satisfatórios através de uma **RNA** bem treinada onde não existe solução conhecida do problema, podendo até mesmo extrapolar para resultados ainda não conhecidos experimentalmente (Cechin & Stertz, 2003).

### 3.2 NEURÔNIO ARTIFICIAL

O neurônio artificial é uma estrutura lógico-matemática que reproduz a forma, o comportamento e as funções de um neurônio biológico. A Figura 3.2 apresenta um paralelo entre o neurônio biológico e o artificial (Haykin, 1994).



**Figura 3.2. Esquema ilustrativo comparando neurônio biológico (A) com o artificial (B).**

É possível observar na Figura 3.2B que na camada de entrada existe o termo bias ( $b_n$ ), que é um peso especial (mais um peso da rede) que aumenta os graus de liberdade, sua função é aumentar ou diminuir a influência dos valores das entradas. Ou seja, o *bias*

possibilita uma melhor adaptação da rede neural ao conhecimento fornecido para ela, isto é, facilitando o aprendizado (Lopes *et al.*, 2014).

A Figura 3.2B pode ser expressa matematicamente de acordo com as equações 3.1 e 3.2.

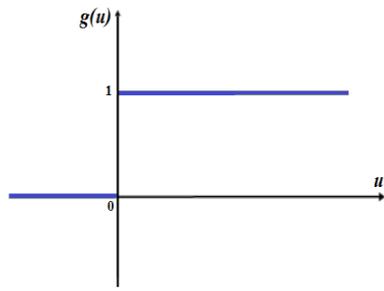
$$u_n = \sum_{m=0}^M W_{nm} x_m - b_n \quad (3.1)$$

$$y_n = g(u_n) \quad (3.2)$$

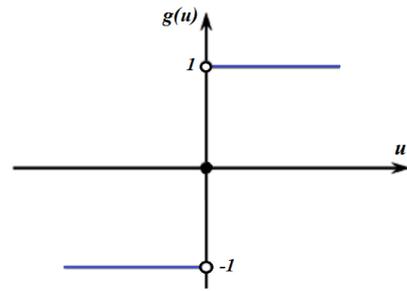
Onde,  $u_n$  é o potencial de ativação, resultado da diferença do valor entre o *combinador linear* e o *bias*.  $g(.)$  é a função de ativação do neurônio e  $y_n$  representa o valor final obtido pelo n-ésimo neurônio da rede. A *função de ativação* determina a forma e intensidade das mudanças que os valores transmitidos de um neurônio para outro vão sofrer. Seu objetivo é limitar a saída do neurônio dentro de um intervalo de valores finitos entre 0 e 1 ou entre -1 e 1.

Existem diferentes tipos de funções de ativação, segundo Altran *et al.* (2005), para uma RNA eficiente é necessário que estas funções sejam diferenciáveis e não-lineares. Pois, a não linearidade proporcionará que as saídas da rede não sejam linearmente dependentes das suas entradas. As funções de ativação podem ser:

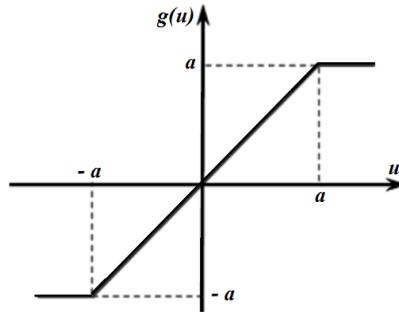
- 1) *Parcialmente diferenciáveis*, estas possuem pontos cujas derivadas de primeira ordem não existem, as três principais funções desse grupo são: função degrau, degrau bipolar e rampa simétrica (Fig.3.3).
- 2) *Totalmente diferenciáveis*, são as funções que possuem derivadas de 1ª ordem e estas são conhecidas em todos os pontos de seu domínio de definição. As três principais são sigmoideal (logística), tangente hiperbólica e linear (Fig.3.4).



(A)

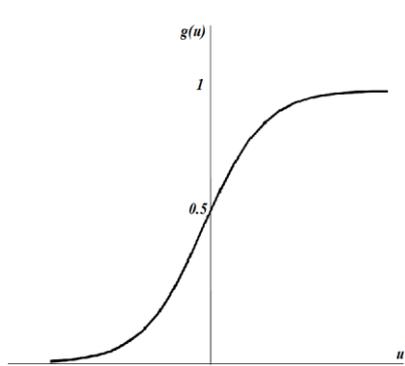


(B)

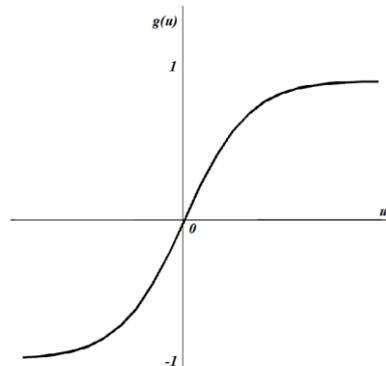


(C)

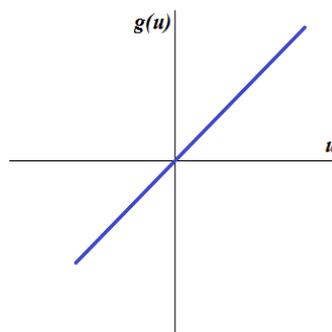
Figura 3.3. Representações gráficas, funções de ativação: (A) degrau, (B) bipolar e (c) rampa simétrica.



(A)



(B)



(C)

Figura 3.4. Representações gráficas, funções de ativação: (A) Sigmoidal (logística), (B) tangente hiperbólica e (c) linear.

Para a maioria das aplicações de **RNAs** na engenharia é utilizada função de ativação totalmente diferenciável em todo o seu domínio de definição. Logo, a transição dos pesos no processo de treinamento da rede será mais suave (Lopes *et al.*, 2014).

Ressalta-se que, as funções de ativação utilizadas para este trabalho é a sigmóide, nas camadas intermediárias, representada pela Equação 3.3. Nas camadas de saída da rede é utilizada a função de ativação linear.

$$g(u) = \frac{1}{1 + e^{-\beta \cdot u}} \quad (3.3)$$

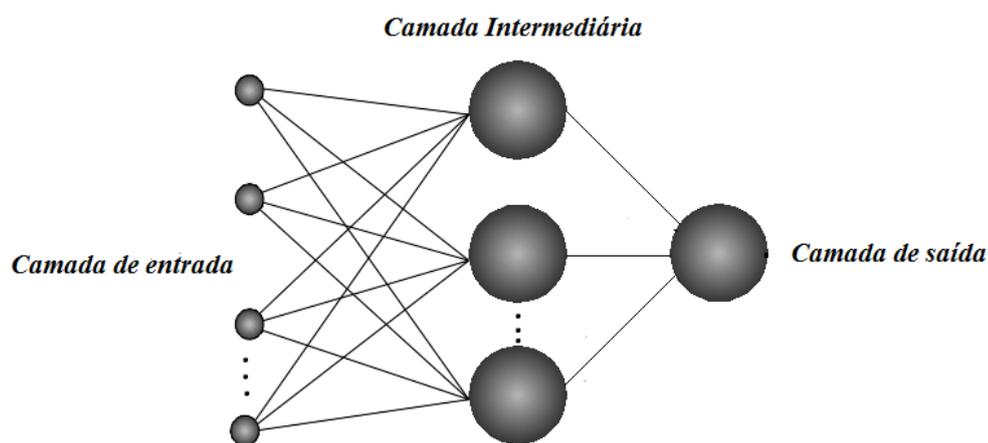
Onde,  $\beta$  é uma constante real associada ao nível de inclinação da função sigmóide frente ao seu ponto de inflexão. E  $u$  é o potencial de ativação apresentado na Equação 3.1.

É importante enfatizar que existem outros tipos de neurônios que não serão discutidos neste trabalho, que também são muito utilizados na literatura especializada, aplicados nas redes conhecidas com Função de Base Radial (Ronco *et al.*, 1995; Al-Assaf *et al.*, 2002; Lopes *et al.*, 2014).

### 3.3 ARQUITETURA DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

A maneira como os neurônios estão organizados e a direção das conexões sinápticas é conhecida como arquitetura da rede neural. Os neurônios artificiais são conectados de modo a gerar sinapses e conseqüentemente redes neurais artificiais. Em uma rede neural artificial existem basicamente três camadas (Silva *et al.*, 2010) (Fig. 3.5):

1. *Camada de entrada* – São os dados ou sinais que alimentam a rede. Estas entradas ou amostras são normalizadas com objetivo de melhorar o desempenho computacional durante o treinamento da rede;
2. *Intermediária ou oculta* – Onde ocorre o treinamento da rede ou ajuste dos pesos sinápticos entre as camadas;
3. *Camada de saída* – Responsável pela produção e apresentação dos resultados finais.



**Figura 3.5. Modelo de uma arquitetura neural.**

No entanto, salienta-se que nem todas **RNAs** possuem camadas intermediárias. O determinante para escolha da arquitetura a ser utilizada é o problema a ser solucionado, pois, existem diversos tipos de arquiteturas de rede que são aplicadas a vários casos encontrados na literatura especializada. No entanto, para este trabalho, é utilizada a arquitetura conhecida como Redes Perceptron de Múltiplas Camadas.

### **3.3.1. Redes Perceptron de Múltiplas Camadas**

A rede *Perceptron de Múltiplas Camadas* (*Multilayer Perceptron* - **MLP**) é um dos modelos de **RNA** mais utilizados, possui diversas aplicações, como, por exemplo, aproximação universal de funções, classificação de padrões, otimização de sistema, robótica e controle de processos. A rede Perceptron foi criada por Rumelhart, Hinton e Williams, em 1986, se tornou popular após a publicação do livro *Parallel Distributed Processing* (Rumelhart *et al.*, 1986). Logo, existe a Perceptron simples, que só possui uma camada intermediária, e a **MLP** que possuem várias camadas ocultas, e nestas camadas é onde ocorre o processo de ajuste dos pesos. Assim, o aumento do número de camadas ocultas pode melhorar o desempenho da **RNA** (Haykin, 2001).

Para o presente trabalho, as Redes Perceptron de Múltiplas Camadas são empregadas com objetivo de aproximar funções e encontrar soluções de qualidade. Na Figura 3.6 é apresentado um modelo geral de uma Rede Perceptron, observa-se uma camada de entrada, uma camada de saída e uma ou mais camadas ocultas. À medida que aumenta-se o número de camadas intermediárias a dificuldade para o treinamento

também será intensificada, porém, espera-se um resultado mais acurado (Akira, *et al.*, 1999).

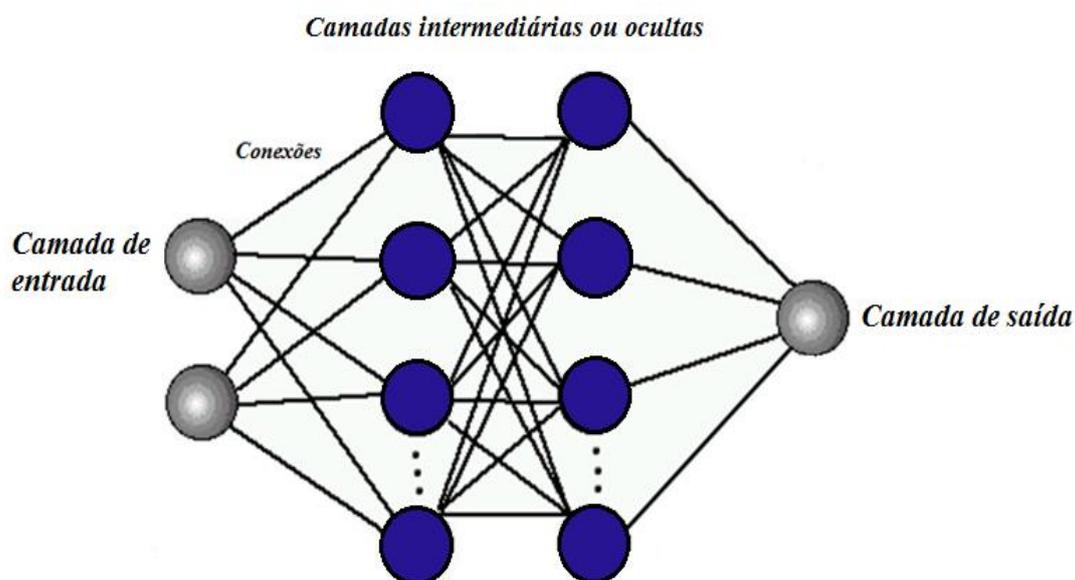


Figura 3.6. Arquitetura Neural de uma Rede Perceptron de Múltiplas Camadas.

A Figura 3.6 ilustra o princípio de funcionamento da **MLP**, onde cada uma das entradas da rede é propagada em direção à camada de saída da rede. Assim, as saídas dos neurônios da primeira camada oculta serão as entradas dos neurônios da segunda camada oculta. Logo, as saídas dos neurônios da segunda camada oculta serão as entradas dos neurônios da camada de saída da **MLP** e finalmente, os neurônios da camada de saída produzirão a resposta da rede.

A escolha da rede perceptron de múltiplas camadas, deve-se ao fato de que esse tipo de rede tem sido aplicada com sucesso para a resolução de vários problemas encontrados na engenharia, devido as características que esse tipo de rede possui, como, por exemplo, resolver problemas não linearmente separáveis e sua habilidade de aprender sobre um problema através do treinamento e generalizar para casos não apresentados à rede (Castro e Zuben, 2001).

No entanto, a rede perceptron possui a desvantagem de funcionar como uma “caixa preta”, a resposta da rede é uma função ponderada dos vetores, sem uma explicação para os resultados obtidos. Devido a sua não-linearidade e alta conectividade entre neurônios, a análise teórica de como a rede funciona na sua parte interna torna-se complexa. (González & Formoso, 2000). Porém, existe uma ótica favorável em relação a esta característica de uma **RNA**, o que de fato importa é que a rede apresente um bom desempenho e resultados satisfatórios independente da sua metodologia. E de fato, como já apresentado neste trabalho, existem relevantes bibliografias que mostram que

utilizar redes neurais para modelar funções complexas apresentam resultados positivos tanto quanto utilizando técnicas matemáticas tradicionais. Entretanto, uma **RNA** pode ser usada com pouco conhecimento sobre as funções que serão modeladas (Benite, 2003).

Para os modelos de neurônios que são usados para redes perceptron de múltiplas camadas, é utilizada como função de ativação da rede, a função sigmóide, conforme a equação 3.3. Utilizar esta função de ativação é muito apropriado para esse tipo de rede, já que a mesma tem como características principais, suavidade, além de possuir propriedades assintóticas. Assim, utilizando a função de ativação sigmoideal é possível obter as suas derivadas, que são fundamentais no desenvolvimento do algoritmo de treinamento. Ou seja, encontrando-se a primeira derivada das funções de ativação e por sua vez, determinando-se o gradiente local para cada neurônio das camadas intermediárias, o número de cálculos e o tempo de processamento serão reduzidos durante o treinamento da rede.

### **3.4 TREINAMENTO DE UMA REDE NEURAL**

A característica principal de uma **RNA** é sua capacidade de aprender a partir do ambiente ou das amostras apresentadas a ela. Sendo que, a ideia principal durante o treinamento é aplicar passos necessários para induzir a rede a ajustar de forma interativa os pesos sinápticos. A organização sistemática de como a rede é treinada recebe o nome de algoritmo de aprendizagem (Haykin, 1999).

Dentre os objetivos deste treinamento é que a rede consiga generalizar soluções, isto é, seja capaz de produzir uma saída próxima da pretendida, a partir de quaisquer entradas (amostras) inseridas na mesma. É por esse motivo, que o total de amostras utilizadas para o treinamento da rede são divididas em dois subconjuntos: o de treinamento e o de validação. Onde, o subconjunto de treinamento normalmente possui de 60 a 90% das amostras do conjunto total. E o subconjunto de validação possui de 10 a 40% do conjunto total de amostras. Assim, através do processo de validação da rede é possível determinar se a mesma é capaz de generalizar soluções (Silva *et al.*, 2010).

Existem diferentes algoritmos de aprendizagem que são utilizados para treinamento de uma rede neural, a escolha do algoritmo depende do problema a ser solucionado, dentre estes destacam-se: Treinamento *supervisionado* (abordado no item 3.4.1 e utilizado para este trabalho), o *semi-supervisionado*, onde a rede aprende através de informações imprecisas sobre o comportamento que deseja-se encontrar, é um

método por tentativa e erro, onde o programador decide se a resposta da rede é aceitável ou não. E o treinamento *não supervisionado*, no qual não existem informações da saída desejada para comparar com a saída real e conseqüentemente modificar os pesos sinápticos até obter o peso ideal para rede. Neste caso, a rede procura otimizar os parâmetros dados para ela utilizando critérios internos pré-estabelecidos (Haykin, 2001).

Vale ressaltar, que o treinamento mais usado é o supervisionado, mas para utilizar o mesmo é necessário fornecer a rede tanto os dados de entradas como as saídas desejadas. Quando os valores do conjunto de entrada são apresentados para rede de forma *completa*, obtêm-se uma *época* de aprendizado (Mendel *et al.*, 1970 apud Haykin, 2002). Logo, no algoritmo de treinamento haverá uma variável “*época*”, responsável por contabilizar quantas vezes será necessário apresentar *todas* as amostras no processo de ajuste dos pesos até determinar o *peso ideal* para rede.

### 3.4.1 Treinamento Supervisionado

O trabalho pioneiro sobre a estratégia para o treinamento supervisionado foi proposto por Donald Hebb, em 1949 (Hebb, 1949 apud Silva, *et al.*, 2010). O treinamento supervisionado é o mais utilizado em treinamentos de **RNA**. A rede é alimentada por dados de entrada e saídas desejadas, que supervisionam a rede neural. Logo, o objetivo é que as respostas obtidas pela rede se aproximem o máximo possível dos dados apresentados a ela, e para isso é necessário o ajuste dos pesos sinápticos (Haykin, 2001).

Este tipo de treinamento pode ser ilustrado da seguinte forma: É como se existisse um “professor” ensinando para a rede qual é a resposta correta para cada amostra apresentada na camada de entrada. E para isso, é necessário que os pesos sinápticos (**w**) sejam modificados gradativamente através de comparações, entre a resposta real que a rede produziu e a resposta esperada. Assim, o treinamento é finalizado quando a saída da rede (**z**) tiver valores aproximados das respostas desejadas (**d**), cabe ao programador determinar qual erro máximo aceitável entre a resposta obtida pela rede e os valores esperados como saída da mesma (Fig.3.7).

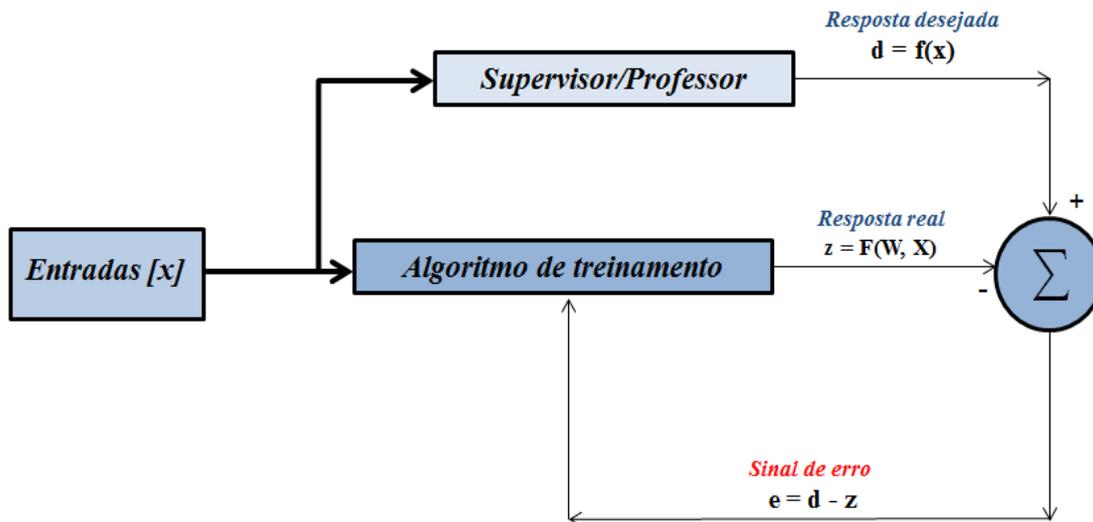


Figura 3.7. Diagrama da aprendizagem supervisionada (modificado de Coelho, 2008).

O algoritmo neste tipo de treinamento procura minimizar o erro médio quadrático entre a saída ( $z$ ) da RNA e a resposta desejada ( $d$ ) de acordo com a equação 3.4, é por esse motivo que este algoritmo também é conhecido como aprendizagem por correção de erros. Logo, é necessário apresentar para a RNA um conjunto de treinamento e uma quantidade suficiente de iterações para que o treinamento seja eficiente no processo de aproximação de funções (Freire Jr. *et al.*, 2007).

$$EMQ = \frac{1}{2 \cdot Q} \cdot \sum_{1}^Q \sum_{i=1}^m (d_i - z_i)^2, \quad (3.4)$$

Onde  $Q$  representa o tamanho do conjunto de dados,  $m$  o número de neurônios de saída (para este estudo  $m=1$ ),  $d_i$  e  $z_i$  são as respostas desejadas e a resposta atual do neurônio de saída, respectivamente.

Com intuito de obter uma RNA que seja capaz de aproximar de forma apropriada de uma função, foram criados vários algoritmos, onde a escolha vai depender do tipo de aplicação estudada. No entanto, para o treinamento de uma rede neural é necessário escolher um algoritmo adequado, para este trabalho foi escolhido o algoritmo de Retropropagação (Back-Propagation) que é abordado na seção 3.4.1.1, a escolha deste algoritmo deve-se ao fato de que ele apresenta rapidez de aprendizado e boa generalização. Porém, existem outros algoritmos também destacados na literatura

especializada, como RPROP (Riedmiller *et al.*, 1993), o QuikProp (Fahlman *et al.*, 1988).

### 3.4.1.1 Algoritmo de Retropropagação do Erro (Back-Propagation)

Para treinar as redes MLP utiliza-se o algoritmo de Retropropagação (Backpropagation) também é conhecido como regra Delta generalizada. Este algoritmo consiste em duas fases: “propagação adiante” (*forward*) e “propagação reversa” (*backward*).

A fase “Propagação adiante” (*forward*) consiste em propagar os sinais de entrada  $[x_1, x_2, \dots, x_n]$  camada por camada até a saída da rede, sem alterar os pesos sinápticos e os *Bias*. Ressalta-se que, inicialmente os pesos sinápticos são escolhidos aleatoriamente, são valores pequenos entre 0 e 1, pois valores muito grandes podem gerar saturação dos neurônios e muito pequenos aumentará o custo computacional, pois o processo de aprendizagem será mais lento (Fig. 3.8).

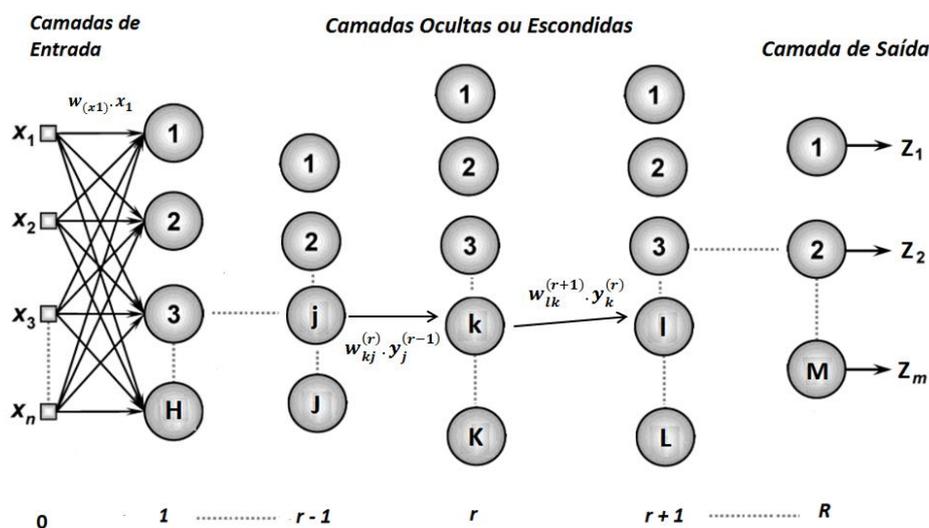


Figura 3.8. Fase (*forward*) do processo de treinamento de uma MLP de “ $R$ ” camadas.

Observando a Figura 3.8 é possível representar as equações envolvidas no processo de treinamento da rede neural.

$$u_m^{(r)}(i) = \sum_{n=0}^{n_2} w_{kj}^r(i) y_j^{r-1}(i) \quad (3.5)$$

$$y_n^{(r)} = g_n(u_m(i)) \quad (3.6)$$

Onde,  $\mathbf{x}(i)$  são os i-ésimo sinal (vetor) entrada aplicado à camada de entrada da rede.  $\mathbf{u}(i)$  são os i-ésimos combinadores lineares e o  $\mathbf{y}_j^{r-1}(i)$  representa o sinal funcional ou de saída da camada anterior a  $\mathbf{r}$ ,  $\mathbf{y}_k^r$  representa a saída do j-ésimo neurônio da camada  $\mathbf{r}$  e  $g(\cdot)$  é a função de ativação sigmóide da rede adotada para o presente trabalho (Equação 3.3). Existem algumas vantagens de escolher esta função de ativação, dentre elas:

- Transição dos pesos será mais suave;
- É preciso calcular a primeira derivada da função de ativação, logo, para que ela exista, a função precisa ser continuamente diferenciável.

Como já mencionado, para o treinamento supervisionado é necessário apresentar para a rede o vetor  $\mathbf{d}_m(i)$ , que são os valores ou saídas que deseja-se que a rede apresente no final do processo de treinamento. Ou seja, para cada valor de entrada haverá uma resposta desejada correspondente. Assim, no final da fase (*forward*) é calculado o sinal do erro  $\mathbf{e}_m(i)$  entre a saída da rede  $\mathbf{z}_m(i)$  e a resposta desejada  $\mathbf{d}_m(i)$  conforme equação (3.7).

$$\mathbf{e}_m = \mathbf{d}_m(i) - \mathbf{z}_m(i) \quad (3.7)$$

E, de acordo com os valores dos erros encontrados, entra-se na fase de “propagação reversa” (*backward*). Onde os pesos sinápticos serão modificados, para isso é necessário seguir um conjunto de regras que envolvem determinar a derivada da função de ativação não-linear de cada neurônio, pois encontrar o vetor gradiente é fundamental para o processo de ajuste dos pesos sinápticos. Assim, a aprendizagem do algoritmo de retropropagação baseia-se na correção de erro quadrático pelo método do Gradiente (Silva *et al.*, 2010). O cálculo dos gradientes locais da rede  $\delta$  é feito conforme a equação 3.8.

$$\delta_m^r(i) = \begin{cases} e_m^R(i) \cdot g'_m(u_m^R(i)) & \text{(gradiente local) neurônio } m \text{ na camada de saída } R \\ g'_m(u_m^r(i)) \cdot \sum_n \delta_n^{r+1}(i) \cdot w_{nk}^{r+1}(i) & \text{neurônio } k \text{ na camada intermediária } r \end{cases} \quad (3.8)$$

Onde,  $g'_m(\cdot)$  é a derivada da função de ativação sigmóide do k-ésimo neurônio da camada  $\mathbf{r}$  (Equação 3.9).

$$g'(u) = \beta \cdot g(u)[1 - g(u)] \quad (3.9)$$

Após determinar os gradientes locais é possível então iniciar o processo de modificações dos pesos sinápticos através da Equação (3.10).

$$w_{kj}^r(i+1) = w_{kj}^r(i) + \alpha \cdot [w_{kj}^r(i) - w_{kj}^r(i-1)] + \eta \cdot \delta_m^r(i) \cdot y_j^{r-1}(i) \quad (3.10)$$

Onde,  $\alpha$  é a constante de momento e  $\eta$  é a taxa de aprendizagem. Para estas constantes geralmente adota-se valores no intervalo entre 0 e 1. A escolha destes valores é feita pelo programador, dependendo do valor escolhido o processo de treinamento conduzirá mais rápido rumo à convergência ou estabilização no processo de modificações dos pesos sinápticos (Silva *et al.*, 2010).

Vale ressaltar, que nesta fase do treinamento o processo de modificações dos pesos sinápticos através da correção de erros é repetido até que a diferença entre os erros das interações sejam próximos de zero, ou com erro aceitável pré-determinado pelo programador. Essas atualizações dos pesos sinápticos podem ser feita de forma sequencial, depois de apresentar para rede cada exemplo do conjunto de treinamento ou esse ajuste de pesos é feito por lote, após a apresentação de cada época de treinamento. No entanto, quando busca-se menor custo computacional no processo de treinamento geralmente utiliza-se a modificação sequencial dos pesos sinápticos (Freire Júnior, 2005)

Para evitar problemas de mínimos locais e memorização dos resultados “over-fitting” é importante apresentar a rede sempre um novo exemplo totalmente diferente do anterior com objetivo de aumentar o erro de treinamento. Pois, se a rede corrigir perfeitamente os erros antes de inserir novos dados de entrada, ela perderá a capacidade de generalizar resultados, e conseqüentemente a solução não será satisfatória para todo o conjunto de treinamento apresentado a **RNA** (Haykin, 2002).

### 3.5 GENERALIZAÇÃO

No treinamento de uma **RNA** espera-se obter uma rede com a melhor capacidade de generalização possível, isto é, com maior habilidade de responder corretamente a dados que não foram utilizados no processo de treinamento (Haykin, 2002). Neste sentido, durante o treinamento, a **RNA** deve conseguir retirar características do ambiente analisado e anexá-las a sua estrutura interna.

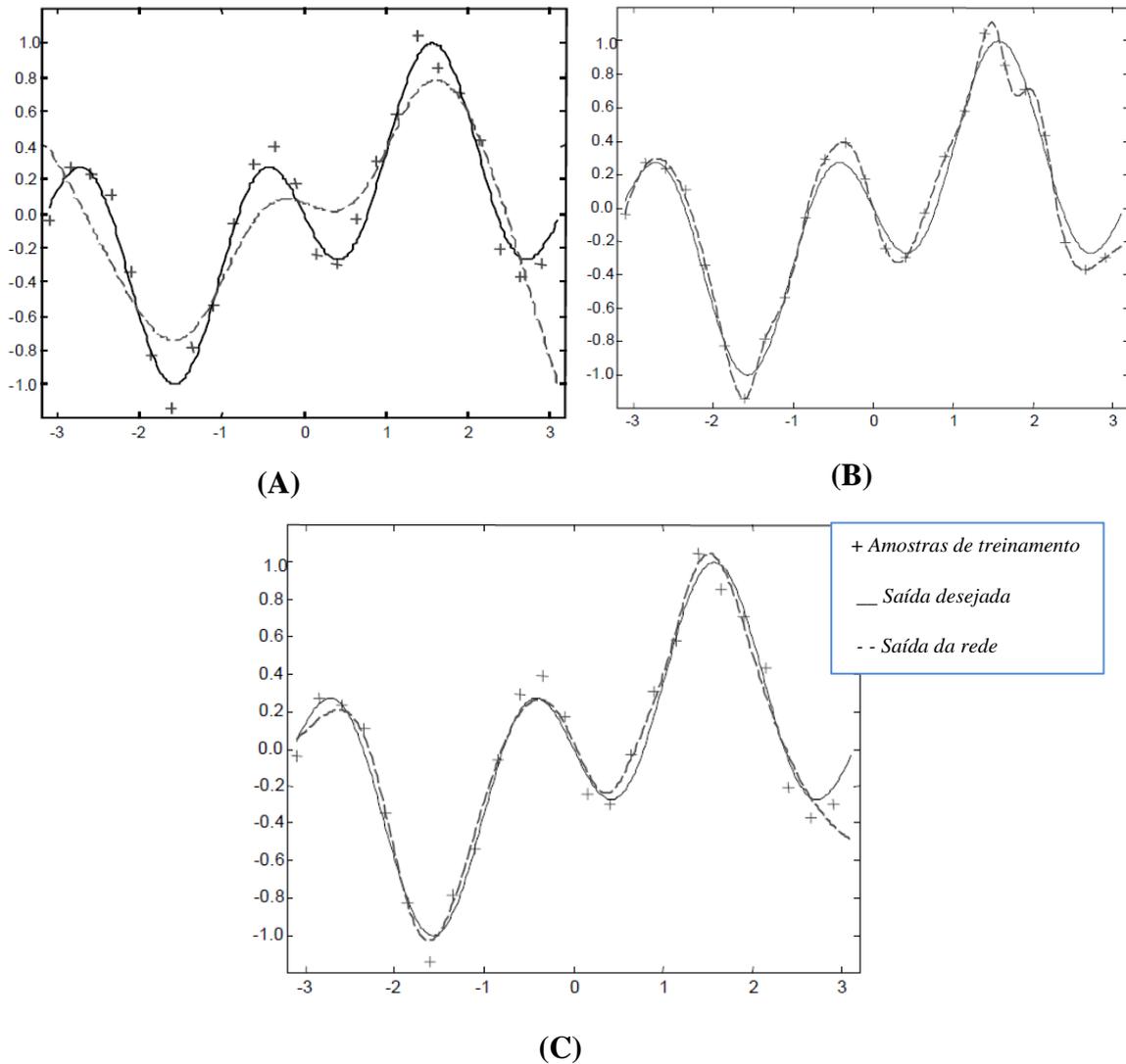
Algumas arquiteturas convencionais, como a **MLP**, estão sujeitas a sofrerem *overtraining*, que é um sobre-treinamento, quando a rede aparentemente está melhorando os seus resultados, a cada iteração o erro diminui. No entanto, em algum ponto deste processo a capacidade de responder a um novo conjunto de dados piora, ou seja, a rede simplesmente memoriza o conjunto de dados de treinamento (Prechelt, 1997). Assim, alguns fatores são fundamentais para a rede obter uma boa capacidade de generalização e evitar um treinamento excessivo:

- Escolher adequadamente uma arquitetura;
- O conjunto de treinamento deve representar bem a função analisada;
- Algoritmo de treinamento apropriado;
- Pré-determinar o número de iterações ou valor de **EMQ** pertinente como critério de parada durante o treinamento.

Para evitar o problema de ocorrer um treinamento insuficiente ou excessivo, utiliza-se uma regra de parada através de uma técnica conhecida como validação cruzada, que é utilizada para detectar quando a rede está treinada de maneira exagerada e interromper o treinamento antes que isso ocorra, esta técnica é feita da seguinte maneira:

- Divide-se o conjunto de dados em *treinamento* e *validação*;
- Treina-se somente com o conjunto de treinamento e em seguida avalia-se o erro do conjunto de validação a cada  $k$  iterações (épocas);
- Interrompe-se o treinamento quando o erro pré-determinado é alcançado, ou seja, escolhe-se como ponto de parada o menor valor obtido pelo **EMQ** do conjunto de validação. E, em seguida, utiliza-se o peso obtido como resultado do treinamento.

Na Figura 3.9, observa-se três tipos de comportamentos resultantes da aproximação de funções realizadas pelas redes **MLP**. Nota-se exemplos de treinamentos interrompidos muito cedo (*underfitting*), outro excessivo (*overfitting*) e um com procedimento de validação cruzada, onde determinou-se um ponto ótimo para interromper o treinamento.



**Figura 3.9. Função  $\text{sen}(x)\cos(2x)$ : (A) Treinamento interrompido muito cedo (underfitting); (B) Treinamento excessivo (overfitting) e (C) Treinamento com procedimento de validação cruzada (Prechelt, 1997-1998).**

No processo de treinamento da **RNA**, é importante utilizar um subconjunto para validação da rede, verificando a eficiência dos resultados obtidos após o treinamento. Porém, vale enfatizar, que a utilização de um conjunto de validação nem sempre é empregada, principalmente quando o número de amostras de treinamento é pequeno. No entanto, quando se têm dados suficientes para realizar a validação da rede, Haykin, (1994) e Prechelt, (1997), sugerem que o conjunto seja dividido com 70% dos dados para treinamento 30% para validação.

Assim, o treinamento deve ser finalizado quando a rede apresentar uma boa capacidade de generalização e quando o **EMQ** for menor que o erro admissível. Portanto, o objetivo é determinar um ponto ótimo de parada, onde o erro é o menor possível e a capacidade de generalização máxima (Fig. 3.10).

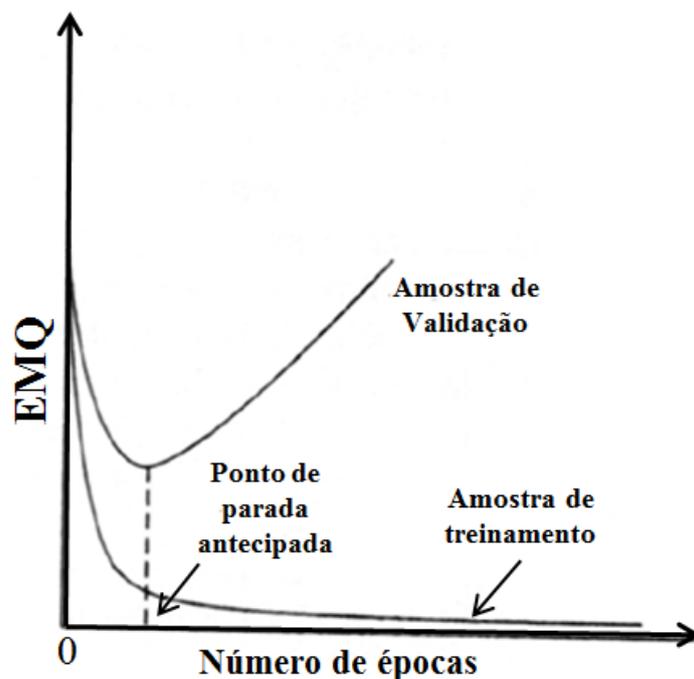


Figura 3.10. Regra da parada antecipada baseada na validação cruzada (Freire Júnior, 2005).

### 3.6 APLICAÇÕES DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Existem inúmeras aplicações de redes neurais, como por exemplo, reconhecimento ótico de caracteres, análise de pesquisa de mercado, controle de processos industriais, aplicações climáticas, identificação de fraude de cartão de crédito, diagnósticos médicos, análise de imagens e voz (Tatibana e Kaetsu, 2017).

Além das aplicações mencionadas, as **RNs** tem sido aplicadas em vários setores das engenharias, em virtude das suas características de não linearidade e sua grande capacidade de obter um mapeamento de entrada-saída usando para isso, apenas dados experimentais, sem a necessidade de conhecer o problema físico envolvido no processo. É possível observar estas diversas aplicações nos trabalhos de Zhang *et al.* (2003); Lin *et al.*, (2003); Choi *et al.*, (2003); Genel, (2004); Jalham, (2003); Freire Júnior *et al.*, (2005). Pode-se mencionar outros, como Silva *et al.*, (2010).

Através de uma rede neural bem treinada mesmo não conhecendo um modelo físico ou empírico para solucionar o problema, é possível obter resultados satisfatórios. E até mesmo, generalizar e extrapolar para resultados ainda desconhecidos experimentalmente (Belísio, 2012).

Bhadeshia (1999, *apud* Freire Júnior, 2005), apresentou as diversas áreas da engenharia mecânica que utilizaram **RNs** na solução de vários problemas, pode-se

observar isto resumidamente na Tabela 3.1. Observa-se nesta tabela que as redes neurais artificiais são utilizadas em quatro grandes áreas dos materiais: metais, polímeros, cerâmicos e compósitos.

**Tabela 3.1. Relação das principais áreas da engenharia que utilizaram as RNAs.**

<b>Áreas da Engenharia</b>	<b>Temas Analisados</b>
<b>Soldagem</b>	Resistência ao impacto, dureza, microestrutura, composição química, resistência à tração, trincas à quente.
<b>Aços de Alta Resistência</b>	Resistência à tração, dureza.
<b>Fadiga em Metais</b>	Previsão de vida, propagação do dano, resistência residual.
<b>Diagramas TTT</b>	Curvas de transformação micro estrutural.
<b>Processamento de Aços</b>	Curvas de tratamento térmico, propriedades mecânicas.
<b>Materiais Poliméricos</b>	Propriedades mecânicas e tribológicas, temperatura de transformação amorfo semi-cristalino.
<b>Cerâmicas</b>	Tamanhos de partículas, propriedades tribológicas.
<b>Compósitos</b>	Previsão de falha, fadiga, propriedades mecânicas, tribológicas e acústicas, otimização do processo de cura.

Neste sentido, nota-se que existe uma vasta aplicação de **RNAs** em diferentes áreas da engenharia. No entanto, ressalta-se que na literatura não encontra-se nenhum trabalho onde utilizou-se **RNAs** para estudo do comportamento mecânico de cabos condutores de energia.

### **3.7 PROCEDIMENTO PARA CRIAÇÃO DA RNA PARA MODELAR O COMPORTAMENTO À FADIGA DE CABOS CONDUTORES**

Como já mencionado anteriormente, para construção de diagramas de vida constante é necessário à execução de ensaios longos que requerem o uso de um grande aparato experimental que envolve custos elevados. Logo, é muito interessante principalmente para as empresas transmissoras de energia o desenvolvimento de um modelo técnico, como de **RNA**, capaz de estimar a curva **S-N** de um cabo condutor para um determinado nível de tensão média. Entretanto, para a análise do comportamento à fadiga de um componente é necessária uma representação matemática eficiente. Para isso, três variáveis devem ser consideradas: número de ciclos (**N**), tensão média ( $\sigma_{med}$ ) e amplitude de tensão ( $\sigma_a$ ).

No presente trabalho, criou-se um modelo matemático utilizando a Rede Perceptron de Múltiplas Camadas. O treinamento da **RNA** foi feito através do Algoritmo Back Propagation ou Retropropagação, com a arquitetura com dois neurônios de entrada (tensão média e número de ciclos) e um neurônio de saída (amplitude de tensão), com objetivo de obter a função apresentada na equação 3.11 (Freire Júnior, 2005).

$$\sigma_a = f(\sigma_{med}, N) \quad (3.11)$$

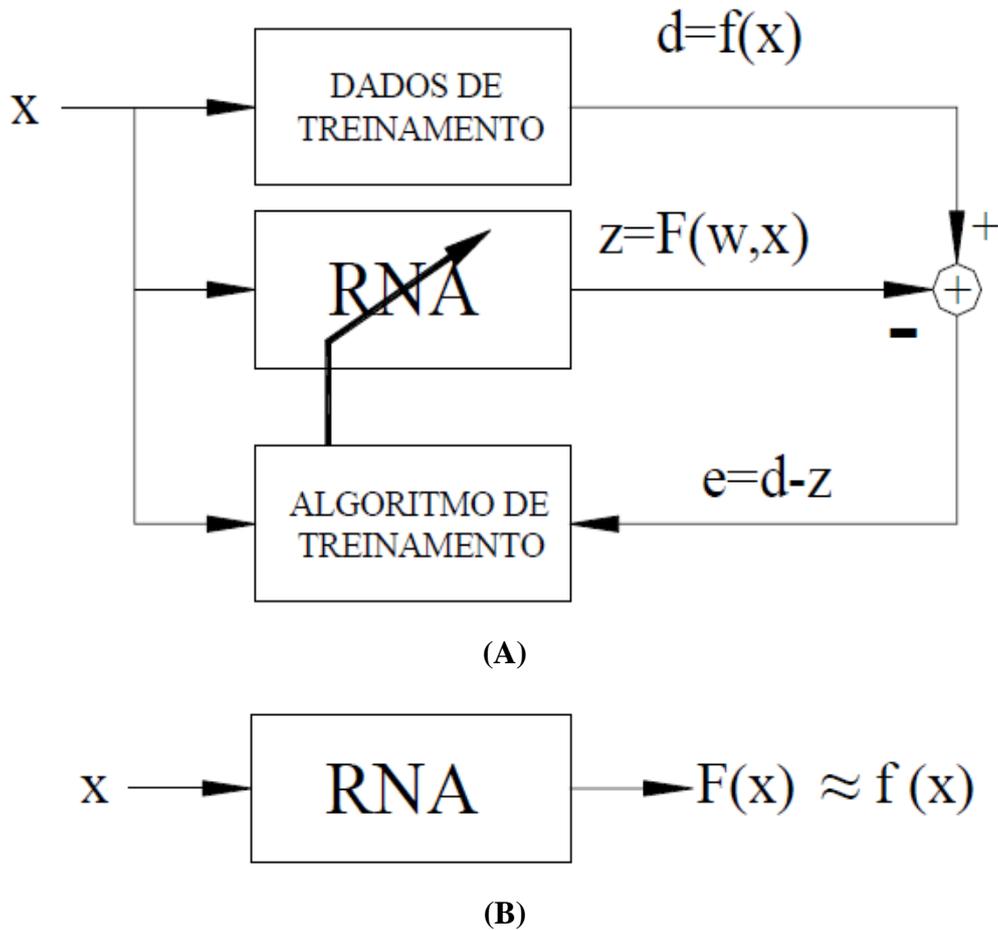
Onde  $\sigma_a$  é a amplitude de tensão,  $\sigma_{med}$  é a tensão média e  $N$  é o número de ciclos.

Neste trabalho, foi utilizado como função de ativação da rede um modelo totalmente diferenciável, conhecida como função sigmoideal (Eq. 3.3). Conforme mencionado na seção 3.2, este tipo de função tem a vantagem de possuir derivadas de primeira ordem que são conhecidas em todos os pontos do domínio. Determinando as suas derivadas a partir dos valores obtidos pela própria função, diminui o número de cálculos, e conseqüentemente reduzirá o tempo de processamento durante o treinamento (Lopes, *et al.*, 2014).

Na seção 3.4.1 foi destacado uma propriedade fundamental em uma rede neural é a sua habilidade de “aprender” a partir de regras pré-estabelecidas e melhorar o seu desempenho através dessa aprendizagem. Logo, a ideia principal do treinamento de uma rede neural é a modificação gradual dos seus pesos sinápticos, seguindo uma regra de aprendizado que determina a forma como esses pesos serão alterados. E para isso, é utilizado um conjunto de dados de treinamento (Mendel *et al.*, 1970 apud Haykin, 2002).

Assim, é usado no presente trabalho, o treinamento supervisionado, onde um conjunto de dados de entrada e saída predeterminados será usado, para supervisão da rede neural. Deste modo, espera-se que a rede seja capaz de responder de maneira aproximada ao conjunto de dados apresentado a ela. Além disso, deseja-se que a rede possa generalizar, ou seja, que ela tenha a capacidade de apresentar resultados semelhantes aos dados não apresentados durante o treinamento. Na Figura 3.11 observa-se um diagrama esquemático de treinamento supervisionado desenvolvido neste trabalho. É possível perceber na figura, que durante o treinamento, a matriz pesos sinápticos  $w$  é uma variável que é modificada através do algoritmo de treinamento. As

modificações dos valores dos pesos  $w$  são feitas com objetivo de diminuir o erro existente entre os valores desejados ( $d$ ) e os valores de saída ( $z$ ) da RNA (Silva *et al.*, 2001).



**Figura 3.11.** Diagrama esquemático demonstrando o processo de aprendizado de uma rede neural, onde (A) é o método de treinamento da RNA e (B) é o modelo obtido pelo treinamento da RNA (Freire Júnior *et al.*, 2005).

Tendo definido os objetivos e a estratégia para implementar o código da RNA utilizando os resultados experimentais, torna-se possível estabelecer um planejamento conforme mostrado na Figura 3.12.

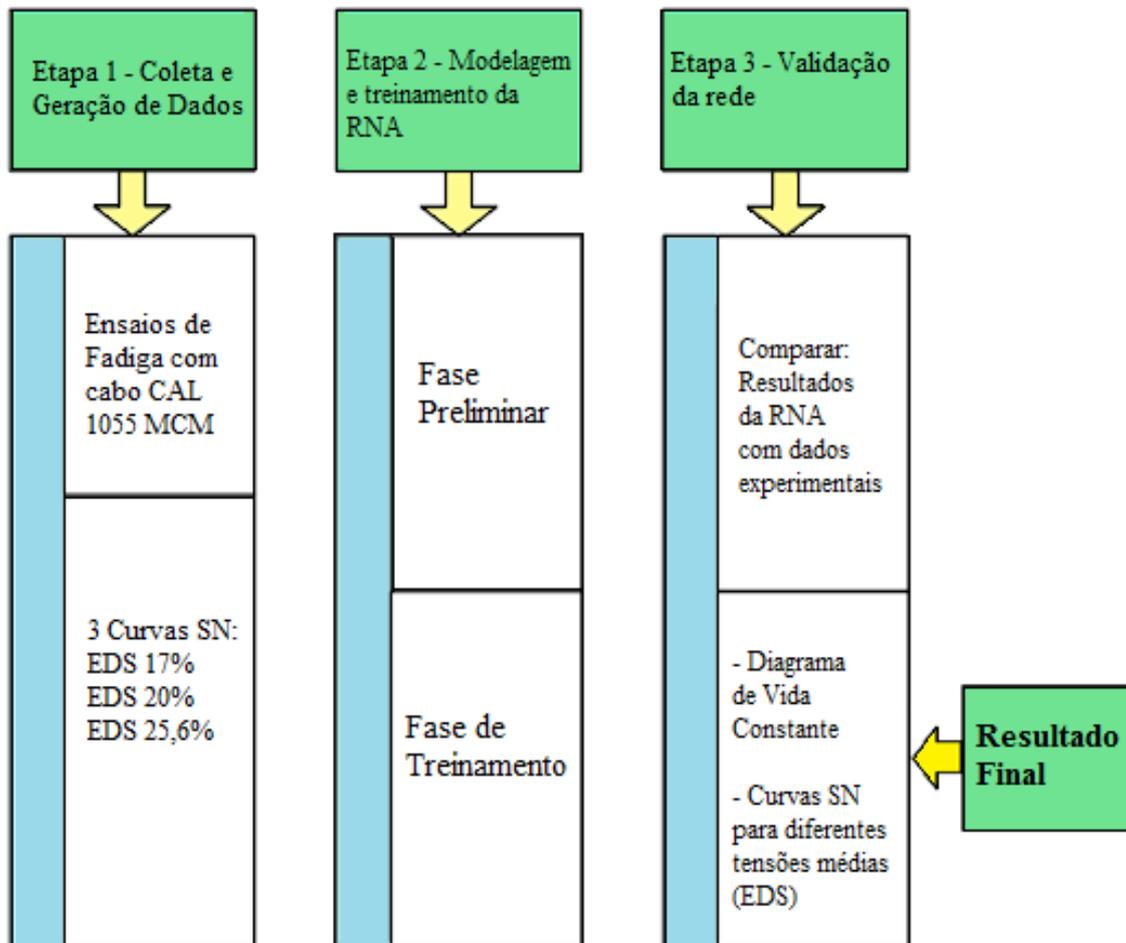
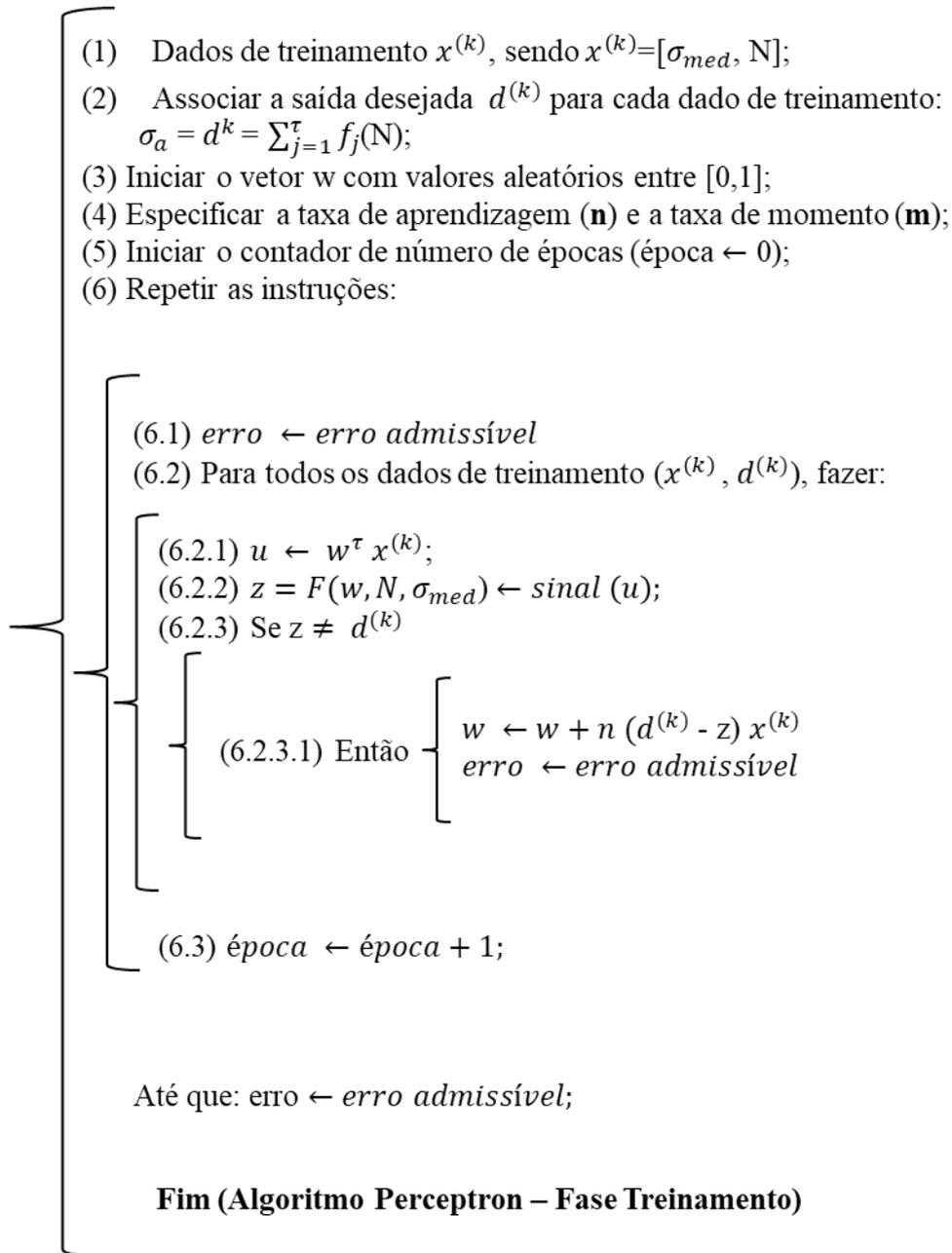


Figura 3.12. Planejamento da implementação da RNA.

Na Figura 3.13A é apresentado um Algoritmo da Rede Perceptron que é usado para implementar o código na fase de treinamento e na Figura 3.13B é apresentado o modelo encontrado pela **RNA**.



(A)

$$[\sigma_{med}, N] \rightarrow \mathbf{RNA} \rightarrow F(w, N, \sigma_{med}) \approx \sum_{j=1}^A f_j(N)$$

(B)

**Figura 3.13. (A) Método de treinamento da RNA. (B) Modelo obtido pelo treinamento da RNA.**

Observando a Figura 3.13, nota-se que no treinamento da rede é necessário especificar a taxa de aprendizado ( $n$ ) e a constante de momento ( $m$ ), que são constantes importantes para estabilizar as mudanças dos pesos sinápticos, exprimem o quão rápido o processo de treinamento da rede estará sendo conduzido rumo à convergência (Maeda *et al.*, 2011). Os valores escolhidos para a constante de momento e a taxa de

aprendizado para o presente trabalho, foram de 0,7 e 0,1, respectivamente, são valores constantes ao longo de todas as épocas de treinamento.

O treinamento da rede para este trabalho foi feito com dados obtidos das curvas **S-N** utilizando a equação simplificada da lei da potência (Power Law) ou equação de Basquin, apresentada na equação 3.12.

$$\sigma_a = AN^b \quad (3.12)$$

É importante salientar que os resultados obtidos para as constantes da Equação 3.12 foram obtidos considerando um comportamento determinístico.

No capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos com o treinamento de uma **RNA**, em uma primeira análise, utilizou-se dados disponíveis do condutor Ibis em Fadel *et al.*, (2012), com objetivo de fazer uma avaliação prévia da eficiência da rede neural artificial aplicada no comportamento à fadiga de cabos condutores. Em uma segunda análise, o treinamento da **RNA** é realizado utilizando dados obtidos experimentalmente pela presente autora do condutor CAL 1055 MCM.

# CAPÍTULO 4

## 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo dedica-se à descrição do laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia da Universidade de Brasília. É apresentada a bancada experimental utilizada para realização dos ensaios de fadiga, dinâmico e estático para o cabo CAL 1055 MCM. Também são descritas as metodologias utilizadas nestes ensaios, tendo como objetivo principal o levantamento das curvas **S-N** para diferentes cargas de esticamento/tensão média.

### 4.1 DESCRIÇÃO DA BANCADA DE ENSAIOS DE CABOS CONDUTORES

A Figura 4.1 ilustra as três bancadas de ensaios de cabos condutores utilizadas para os ensaios abordados nesta pesquisa. O comprimento total do vão é de 46,8 m, divididos em dois sub-vãos: ativo e passivo. O vão ativo define o comprimento do cabo ensaiado e é limitado pelo centro da roldana do bloco fixo e pelo centro do grampo de suspensão, localizado no bloco móvel, neste vão é onde encontra-se o excitador eletromecânico (*shaker*), responsável em simular a vibração causada pelo vento no cabo condutor. O comprimento deste vão pode variar de 31 a 41 m, dependendo da posição do bloco móvel. E o vão passivo tem como função fixar o condutor.

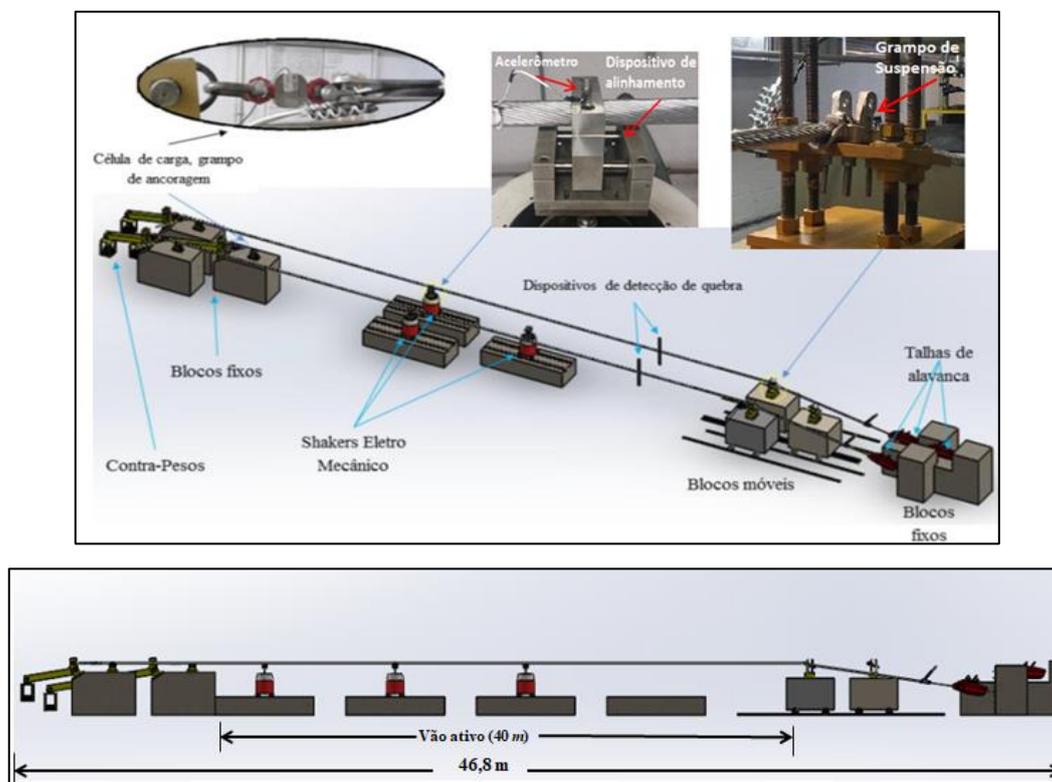


Figura 4.1 Desenho esquemático 2d e 3d da montagem da bancada de ensaios (Rocha, 2016)

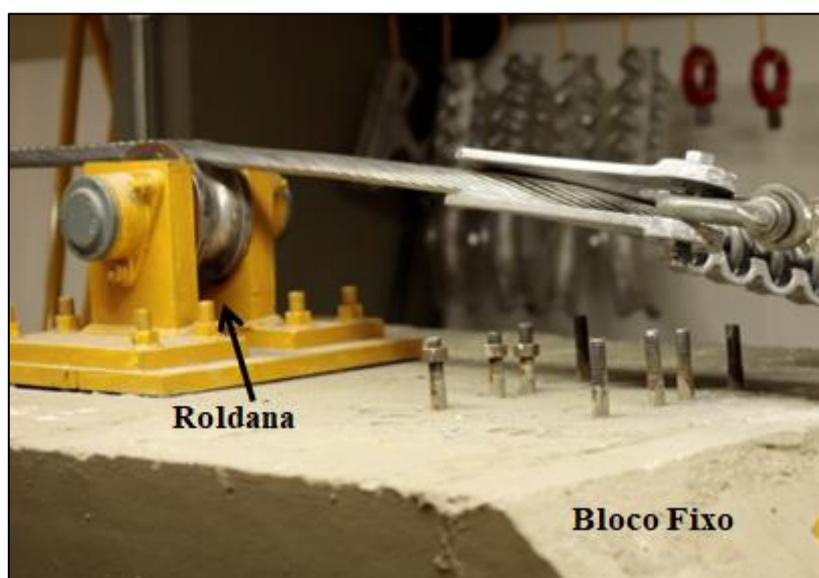
Visando a rigidez da montagem, os quatro blocos mostrados no desenho esquemático são feitos de concreto armado maciço (Fig. 4.2A). O condutor é disposto sobre dois pontos de apoio que funcionam como pontos de articulação, que é o grampo de suspensão e a roldana localizada no bloco fixo conforme a Figura 4.2.B e C.



(A)



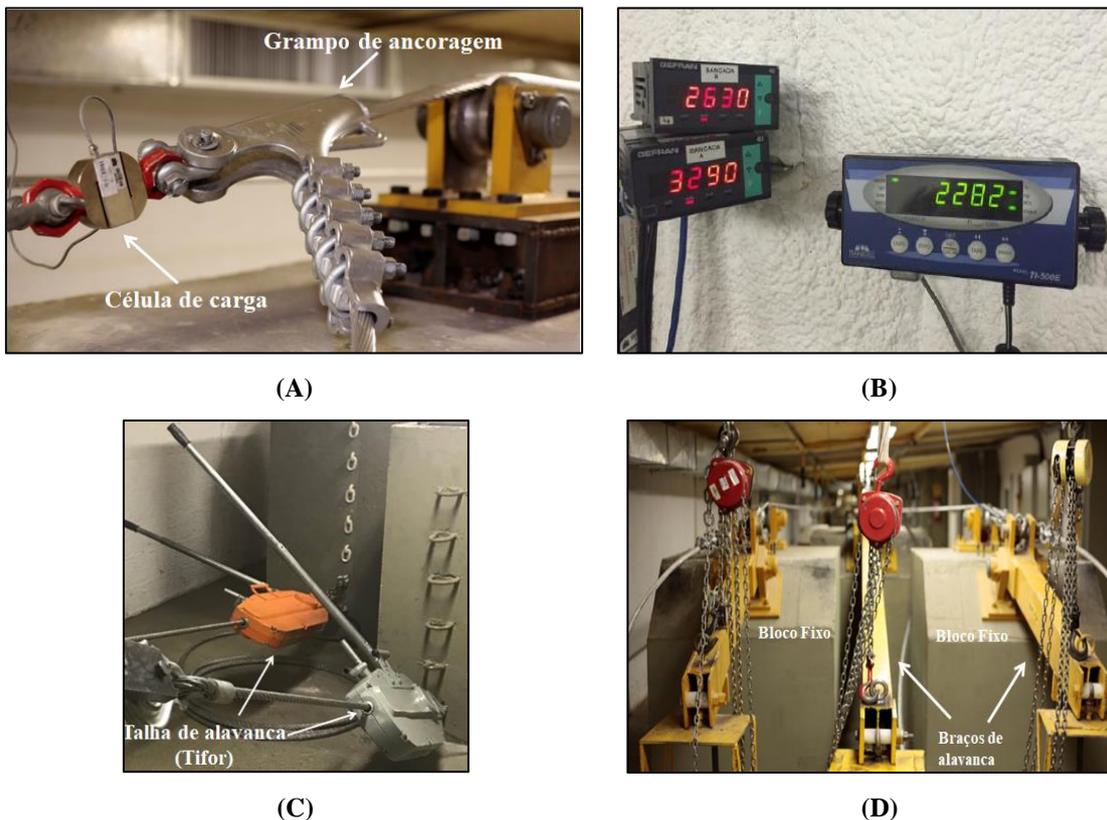
(B)



(C)

Figura 4.2. (A) Blocos móveis de concreto maciço; (B) Vista lateral do grampo de suspensão; (C) Roldana localizada no bloco fixo.

Na Figura 4.3A observa-se o condutor fixado nas extremidades aos grampos de ancoragem, o objetivo é manter o cabo firme para a aplicação da carga de esticamento, que é realizada por meio da talha de alavanca (tífor) e o braço de alavanca na extremidade oposta (Fig. 4.3C e D). Nota-se na Figura 4.3A uma célula de carga conectada ao grampo de ancoragem que é responsável em monitorar a carga de esticamento do condutor, controlando a **EDS** durante o ensaio. E na parte **B** da figura, observa-se os indicadores ou visores digitais, responsáveis em apresentar o valor de tração medido pela célula de carga.



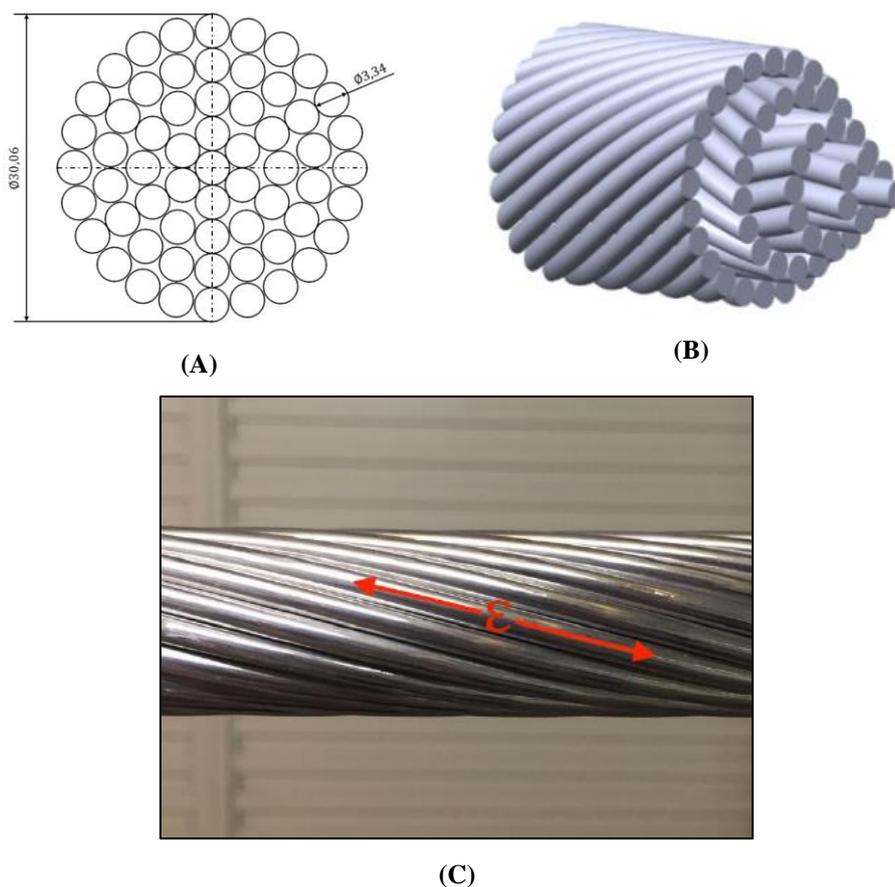
**Figura 4.3.** (A) Grampo de ancoragem conectado a célula de carga CSR-5000 Kgf; (B) Indicadores (visores digitais) (C) Talha de alavanca (tifor) e (D) Braço de alavanca.

A variação da temperatura influencia significativamente na resposta do condutor. Por esse motivo, existe no laboratório um sistema de condicionamento de ar, com o objetivo de garantir a estabilidade da temperatura durante a execução dos ensaios. Além disso, o teto do laboratório foi revestido com isolante térmico, para reduzir a transferência de calor com o ambiente externo.

## 4.2. MATERIAIS

### 4.2.1. Cabo Condutor

O alumínio liga do tipo Al 6201 é utilizado na fabricação do cabo CAL 1055 MCM. O alumínio é empregado em cabos condutores de energia elétrica especialmente devido ao seu baixo custo em relação a outros metais condutores e suas características elétricas e mecânicas. Este condutor possui encordoado concêntrico dos fios e direção de torção alternada em cada camada (Fig. 4.4A e B). As várias camadas movem-se entre si quando submetidas à vibração. As cargas são distribuídas por todos os fios do condutor e cada fio sofre deformação ( $\epsilon$ ) na direção no qual é enrolado, como consta na Figura 4.4C.



**Figura 4.4. (A) Vista frontal; (B) Vista isométrica do CAL 1055 MCM e (C) Deformação longitudinal ( $\epsilon$ ) do fio do condutor.**

Na Tabela 4.1 encontram-se algumas das características estruturais e dimensionais do condutor e algumas propriedades mecânicas da liga de alumínio 6201.

**Tabela 4.1. Características estruturais e dimensionais do condutor.**

<b>Propriedades do Cabo</b>	<b>CAL 1055 MCM</b>
<b>Carga de Ruptura (<i>kgf</i>)</b>	15.549
<b>Massa Linear (<i>kg/km</i>)</b>	1.466
<b>Diâmetro Nominal (<i>mm</i>)</b>	30,06
<b>Número de fios</b>	61
<b>Diâmetro do fio (<i>mm</i>)</b>	3,34
<b>Módulo de elasticidade Al 6201 (<i>MPa</i>)</b>	69.000
<b>Tensão última à tração (<i>MPa</i>)</b>	285

Segundo a Nexans (2016), a série CAL possui algumas vantagens que serão apresentadas a seguir. O que possibilita a redução de custos de projeto de linhas aéreas (Fuchs, 1992).

- Maior versatilidade para projeto;
- Boa resistência à corrosão;
- Alta relação ruptura/peso;
- Acessórios mais simples;
- Alta resistência à fluência.

#### 4.2.2. Grampo de Suspensão

A padronização das condições dos ensaios é fundamental para evitar a introdução de novos parâmetros que podem influenciar na vida em fadiga dos condutores. Assim adotou-se para realização dos ensaios o uso do grampo monoarticulado, fornecido pela empresa Forjasul.

O grampo é fabricado com liga de alumínio de alta resistência mecânica, não magnética, com boa resistência à corrosão, na sua composição são adicionados elementos ferrosos de aço, carbono e zincado por imersão a quente conforme a NBR (Norma Brasileira Registrada no INMETRO). O grampo também possui resistência de 60% da carga de ruptura do condutor de maior bitola. Além disso, sua superfície é suave e uniforme, com boca de saída de no máximo 20 graus, tais características são importantes para preservar a integridade do cabo.

O grampo utilizado nos ensaios deste trabalho é ideal para aplicação em conjunto com condutores do tipo CA (cabo de alumínio) e do tipo CAA (cabo de alumínio com alma de aço) com diâmetros entre 19 e 32 *mm*. A Figura 4.5 apresenta o grampo monoarticulado utilizado nos ensaios para o estudo aqui abordado.

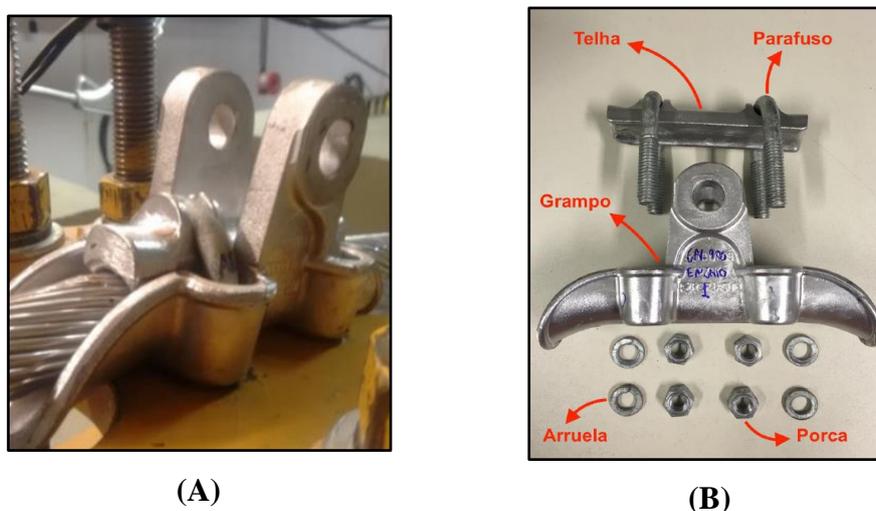
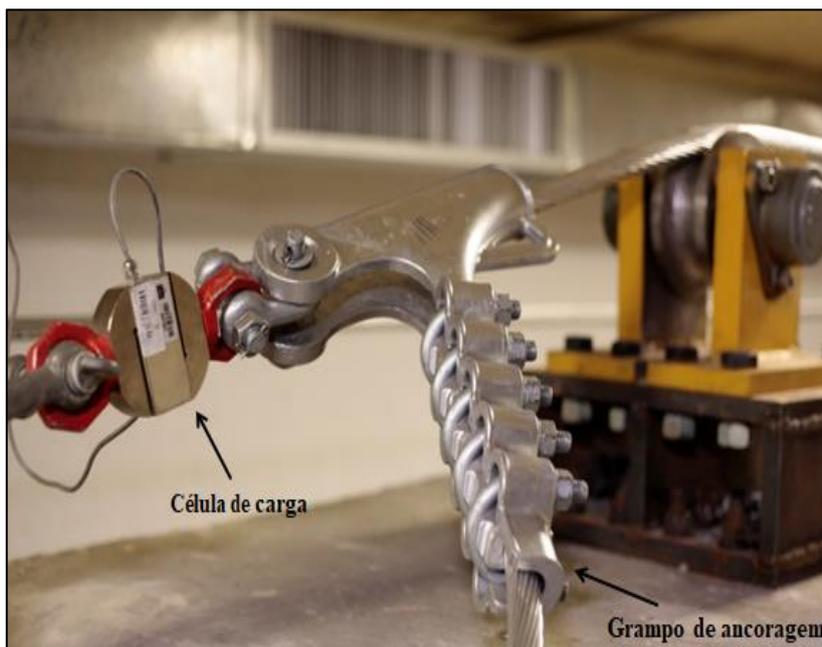


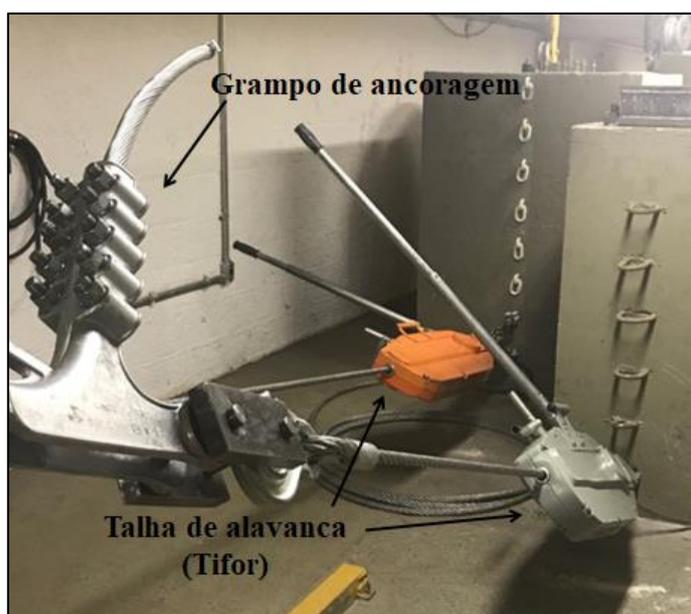
Figura 4.5. (A) Grampo monoarticulado fornecido pela Forjasul e (B) Partes que compõe um grampo de suspensão.

### 4.2.3. Grampo de Ancoragem

Como já mencionado, o grampo de ancoragem é utilizado para a fixação do condutor. Este faz a conexão da célula de carga com uma das extremidades do cabo e do outro lado é conectado a talha de alavanca (Fig.4.6). O modelo utilizado nos ensaios, fornecido pela Forjasul, é fabricado em liga de alumínio não magnética, isenta de cobre e elevada resistência mecânica. A Tabela 4.2 mostra algumas especificações técnicas do grampo.



(A)



(B)

Figura 4.6. (A) Montagem cabo/grampo de ancoragem/ célula de carga; (B) Grampo de ancoragem conectado a talha de alavanca (tifor).

Tabela 4.2. Especificações técnicas do grampo de ancoragem.

Modelo	Diâmetro máximo (mm)	Diâmetro mínimo (mm)	Carga de Ruptura (kgf)	Torque máximo (Nm)	Massa (kg)
55121/003	31	23	13,5	90	5,8

#### 4.2.4. Extensômetros

O ERE (Extensômetro de Resistência Elétrica), apresentado pela Figura 4.7, é um sensor empregado para medição de deformações utilizado no laboratório de cabos da Universidade de Brasília. Ressalta-se que na análise da tensão média atuante em componentes mecânicos, esse dispositivo é um elemento de grande importância. Pois, conhecer a deformação elástica do material devido a algum tipo de carregamento, junto ao módulo de elasticidade do mesmo, permite determinar indiretamente a tensão atuante em um componente utilizando a Lei de Hooke (Eq. 2.4).

Em cada ensaio dinâmico (apresentado na seção 4.4) que antecede os ensaios de fadiga são utilizados três extensômetros adequados para aplicação em alumínio, modelo unidirecional e forma tradicional da marca Excel Sensores (Fig.4.7). A técnica utilizada para colagem dos extensômetros será apresentada na seção 4.4.1.

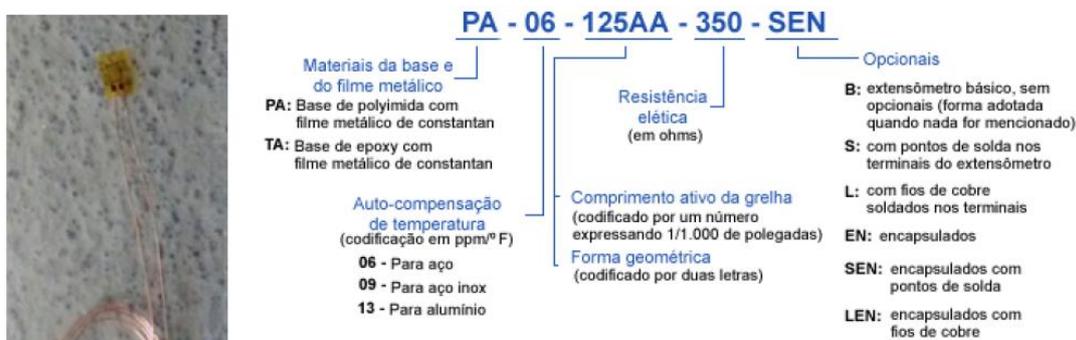


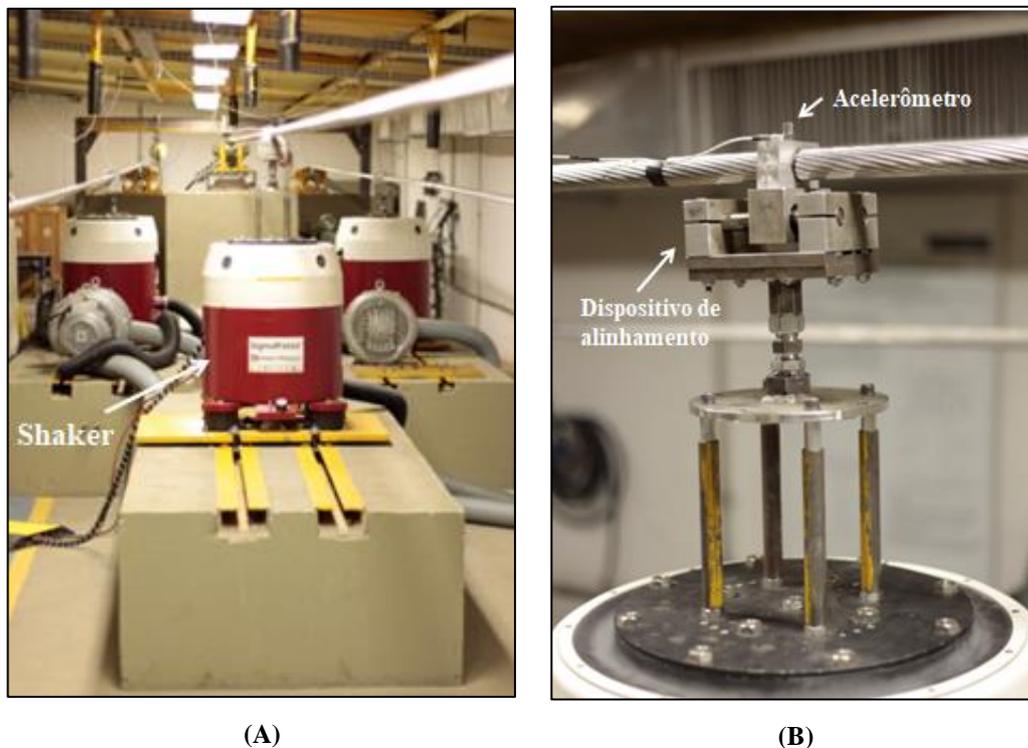
Figura 4.7. Extensômetro PA-13-120BA-350L (Excel Sensores).

O aquisitor de dados foi configurado para a utilização de 1/4 de ponte, com disposição de três fios, compensação interna em 350  $\Omega$  e alimentação estabilizadas de 7,5 VCC.

#### 4.2.5. Mecanismo Excitador (Shaker) e Acelerômetro

O principal equipamento do laboratório de cabos é o excitador eletromecânico (*shaker*), responsável por simular a vibração induzida pelo escoamento do vento (Fig. 4.8A). Este permite o controle da excitação do sistema (frequência e amplitude de

deslocamento), com a utilização de dois acelerômetros. Sendo um posicionado na parte superior do dispositivo de alinhamento do cabo com o Shaker (Fig. 4.8B) e o outro localizado no ponto a  $89\text{ mm}$  do UPC do grampo de suspensão. O laboratório dispõe de quatro dispositivos de vibração do modelo Signal Force da fabricante Data Physics.



**Figura 4.8. (A) Excitador eletromecânico (Shaker); (B) Dispositivo de alinhamento do cabo com shaker (mesa) e acelerômetro.**

Na Figura 4.8B observa-se o dispositivo de alinhamento do condutor, o objetivo dele é conectar o cabo ao shaker e evitar a transmissão de forças tangenciais ao equipamento, que podem danificá-lo.

#### **4.2.6. Dispositivo de Detecção de Quebras de Fios**

O dispositivo de detecção de quebra de fios é constituído por duas hastes de alumínio, uma abraçadeira específica para cada tipo de cabo e dois sensores de deslocamento a laser (Figura 4.9A). Através do mesmo é possível detectar o número de ciclos em que ocorreu as falhas dos fios do condutor. A faixa de medição destes sensores é de  $16$  a  $120\text{ mm}$ , uma resolução de  $2$  a  $100\ \mu\text{m}$  e são ligados a um aquisitor de dados que é descrito na seção 4.2.7.

Ao ser tracionado, o cabo produz uma componente de força na direção longitudinal e outra na tangencial. Quando um fio se rompe, a carga que antes era suportada pelo mesmo, passa a ser distribuída nos fios restantes, resultando em uma

rotação do condutor em relação a seu eixo longitudinal (Fig. 4.9B). Então, neste instante, os sensores registram uma mudança da distancia entre os lasers e a haste de alumínio, indicando que houve a ruptura de um fio.

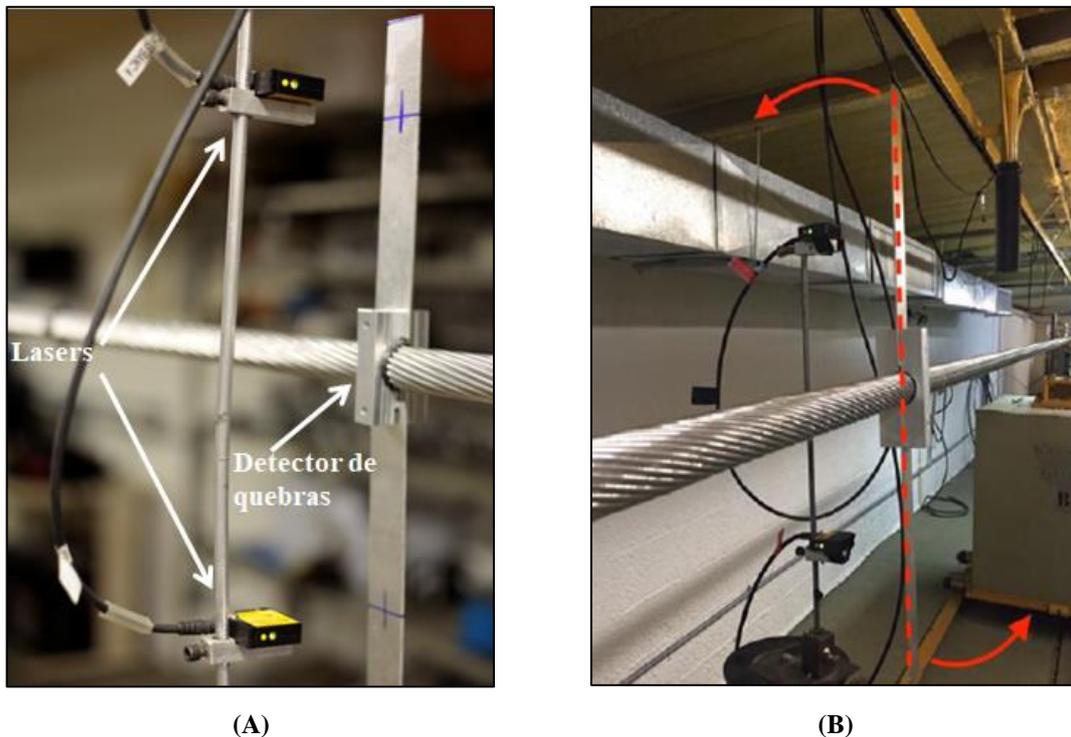


Figura 4.9. (A) Régua de detecção de quebras de fios e (B) Simulação do movimento de rotação da régua.

#### 4.2.7. Sistema de Aquisição de Dados e Controle das Bancadas

O laboratório de cabos da Universidade de Brasília dispõe de três aquisitores de dados ADS 2000 da empresa Lynx (arqdados) (Fig.4.10). Cada ADS possui pelo menos um módulo de aquisição, sendo que cada módulo é composto por 16 canais amplificadores de instrumentação. Os condicionadores destes equipamentos podem ser ajustados para entrada de *strain gages* (extensômetros), termopares, transdutores de pontes, tensão, corrente e sensores platina (Pt100). Para isso é necessário ajustar as configurações através de *dip switcher* (chave) ou pelo *software AqDados*. O *software AqDados* é um programa de aquisição de dados usado para coleta e armazenamento de sinais em arquivos de séries temporais. Através deste *software*, é possível amplificar o sinal de entrada em até 50 vezes.

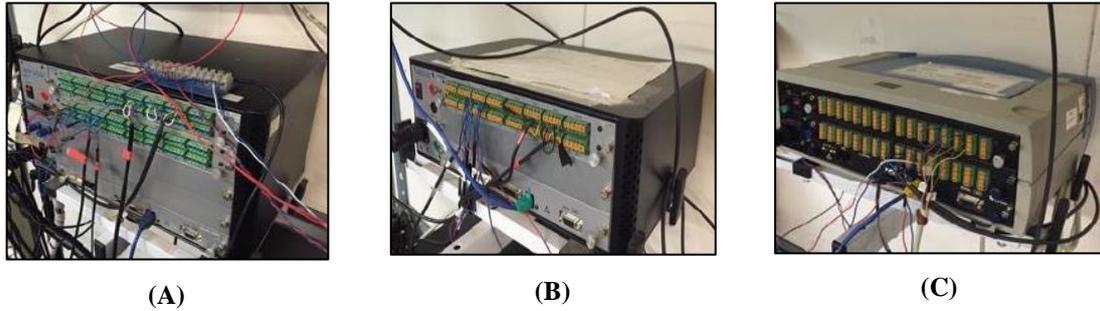
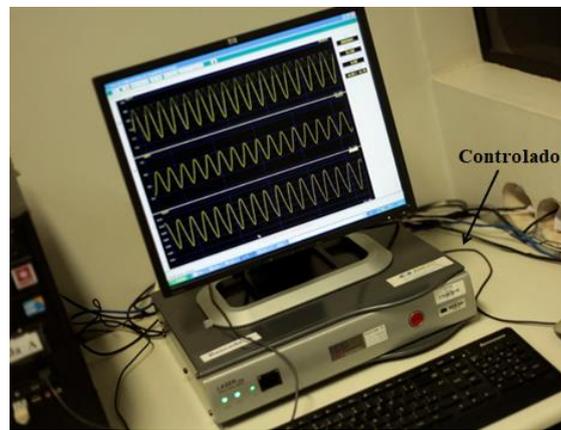
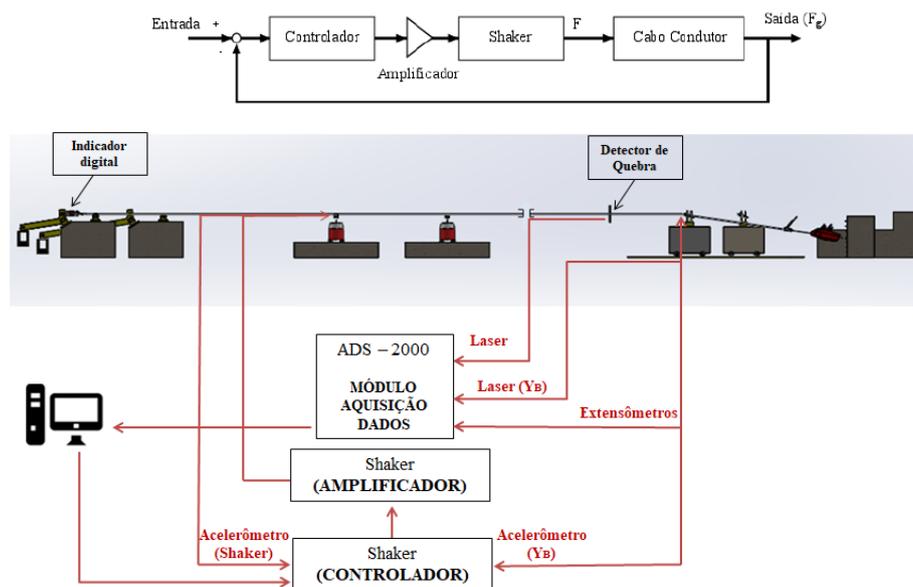


Figura 4.10. (A) Aqdados Bancada A; (B) Aqdados bancada B e (C) Aqdados bancada C.

A operação do ensaio é realizada por um controlador (Fig. 4.11A) que recebe os sinais coletados pelos transdutores e os compara com valores pré-definidos para o teste, reajustando deslocamento, velocidade e força no excitador eletromecânico para se aproximar dos valores pré-estabelecidos. A Figura 4.11B apresenta o esquema de monitoramento e controle do ensaio, tais ações envolvem aquisição e transmissão de diversos sinais provenientes dos transdutores.



(A)

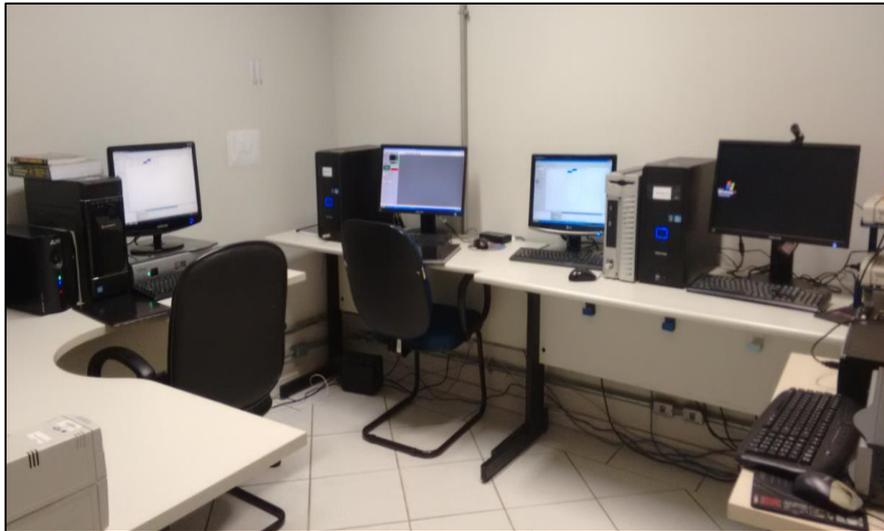


(B)

Figura 4.11. (A) Controlador (B)Esquema de funcionamento do sistema de controle e monitoramento de ensaios.

O monitoramento das três bancadas de ensaios é realizado na “sala de controle” do laboratório conforme a Figura 4.12. O software responsável por controlar a vibração no cabo chama-se *Shaker Control*. Para o ensaio de fadiga, sua configuração tem como objetivo manter as condições prescritas com referência ao deslocamento,  $Y_B$ , aplicado no ponto 89 mm distante do UPC. Através desse *software*, é possível aplicar no condutor ensaios senoidais, randômicos, blocos de carregamento senoidais, e também ensaios de choque. No entanto, para os ensaios realizados para este trabalho, foi necessário apenas conduzir o condutor a oscilações senoidais. O experimento é interrompido pelo *Shaker Control*, nas seguintes situações:

- O ensaio atinja o número de ciclos previamente programado;
- Caso a amplitude de vibração atinja valores diferentes dos programados;
- Ou a interrupção manual, quando observa-se no gráfico de falhas obtido através dos resultados do dispositivo de detecção de quebras, 10% de fios rompidos (CIGRE, 1985).



**Figura 4.12.** Sala de Controle do laboratório de cabos da Universidade de Brasília.

### **4.3. ENSAIOS DE FADIGA: LEVANTAMENTO DA CURVA S-N**

Os ensaios de fadiga em cabos condutores têm como objetivo levantar as curvas de Wöhler ou S-N que possibilitam determinar a durabilidade da montagem cabo/grampo de suspensão, considerando os fenômenos que afetam a vida deste componente, como a fadiga por *fretting* devido as vibrações eólicas. A realização dos ensaios utilizando diferentes valores de tensão de esticamento (EDS) é fundamental para avaliar o efeito da tensão média na vida do condutor.

### 4.3.1. Metodologia e Planejamento dos Ensaios

A metodologia aplicada nos ensaios de fadiga em cabos é semelhante aos demais testes em corpos de prova padrão. Onde realiza-se testes de flexão cíclica mantendo constante a amplitude de tensão para levantar cada ponto da curva **S-N**. Em cabos condutores, isto é feito, monitorando o rompimento de cada fio, determinando o número de ciclos até o momento de cada ruptura.

A fim de encontrar resultados de fato confiáveis, com objetivo de aperfeiçoar projetos de linhas de transmissão de energia, a padronização dos ensaios é fundamental. É por esse motivo que os ensaios são realizados de acordo com as recomendações da CIGRÉ (1985), EPRI (1979) e IEEE (1978). A CIGRÉ (1979) sugere que o ensaio tenha como critério de parada a quebra de 10% do total de fios do condutor. O condutor investigado nesta pesquisa possui 61 fios, assim, interromperam-se os ensaios com a quebra do sexto fio. Esse critério é baseado no comportamento da linha nesta situação, já que a ruptura de 10% do número de fios do condutor, ainda garante a transmissão de energia elétrica dentro da tolerância estabelecida.

Aplicando diferentes valores de amplitudes de deslocamento (equivalente a amplitude de tensão) em cada ensaio e verificando a quantidade de ciclos ocorridos até a falha (sexto fio) é possível levantar a curva **S-N**. São realizados nove testes para obter cada curva com o rigor de confiabilidade. Três amplitudes de tensão nominais são previamente escolhidas e convertidas para as respectivas amplitudes de deslocamento para cada **EDS**. Quatro fatores são considerados ao escolher os valores de amplitudes de tensão nominais ( $\sigma_{p-s}$ ) e de carga de esticamento (**EDS**) para os ensaios:

- 1) A duração de cada ensaio não deve se estender por mais de uma semana, visando a viabilidade do ensaio;
- 2) É levado em consideração o controle do ensaio, que depende dos valores de amplitudes de vibrações e carga de esticamento aplicados ao condutor;
- 3) As cargas atuantes no condutor e nos equipamentos não podem ultrapassar seus limites de operação;
- 4) A escolha dos valores de **EDS** é feita com intuito de comparar os resultados obtidos com a base de dados disponíveis no laboratório para outros tipos de condutores.

A Tabela 4.3 apresenta os valores dos parâmetros de ensaio selecionados para o levantamento das curvas **S-N**.

**Tabela 4.3. Parâmetros utilizados nos 27 ensaios do cabo CAL 1055 MCM.**

Tensão de Poffenberger-Swart [MPa]	Amplitude de Deslocamento do 89 mm, $Y_B$ [mm]		
	17%	20%	25,6%
28,22	0,92	0,87	0,81
31,35	1,02	0,97	0,90
34,49	1,12	1,07	0,99

Segundo Fadel (2010) e Henriques (2006), os seguintes parâmetros devem ser determinados previamente antes do início do ensaio:

- i. O ângulo de mergulho (ângulo de inclinação do grampo em relação a horizontal): tal parâmetro é função de diversos outros, como a tensão mecânica diária (**EDS**), densidade do condutor, comprimento do vão e flecha admissível. Nos ensaios adotou-se o ângulo de mergulho de 10°.
- ii. Torque de aperto dos parafusos de fixação do condutor no grampo de suspensão: este torque tem a finalidade de impedir o escorregamento do cabo ou evitar amassamento dos fios, caso a carga de aperto seja acima do permitido, tendo como consequência, acelerar o processo de fadiga. Para os ensaios do laboratório a carga de aperto adotada foi de 50 Nm, valor menor do que o indicado pelo fabricante (60 Nm). Em virtudes de experiências obtidas no laboratório tal carga de aperto provocava excessivo amassamento dos fios.
- iii. Carga de esticamento: Pois quanto maior a carga de esticamento no condutor menor será sua vida em fadiga, em virtude do aumento da tensão média e consequente da tensão máxima no cabo.
- iv. Amplitude de deslocamento ( $Y_B$ ): Este parâmetro correlaciona-se com a amplitude de tensão que causa a falha do cabo. É Por esse motivo que o  $Y_B$  é controlado durante todo o ensaio.

#### **4.3.2. Procedimento Experimental**

Os corpos de prova foram retirados diretamente das bobinas do cabo condutor CAL 1055 MCM. É importante salientar que é necessário muito cuidado para preservar a superfície do cabo na sua retirada da bobina, mantendo a sua integridade e evitando possíveis danos ao mesmo (Fig.4.13).



**Figura 4.13. Bobina do condutor CAL 1055 MCM.**

Neste sentido, os seguintes procedimentos são adotados:

1) O condutor é desenrolado da bobina, e estendido ao longo do vão sobre as polias, que servem como suporte do cabo no ato do seu esticamento durante a montagem do ensaio, como ilustrado pela Figura 4.14.



**(A)**



**(B)**

**Figura 4.14. (A) Condutor retirado da bobina e (B) Cabo estendido apoiado nas polias ao longo do vão.**

2) Em seguida o grampo de suspensão é colocado em sua posição no bloco móvel, ressalta-se que neste momento ainda não é aplicado o torque nas porcas dos parafusos do mesmo (Fig.4.15).



**Figura 4.15 - Grampo de suspensão posicionado.**

3) Ambas as extremidades do condutor é fixada através dos grampos de ancoragem, é importante que o aperto se dê de maneira gradual e cruzada para se evitar danos aos componentes (Fig.4.16).



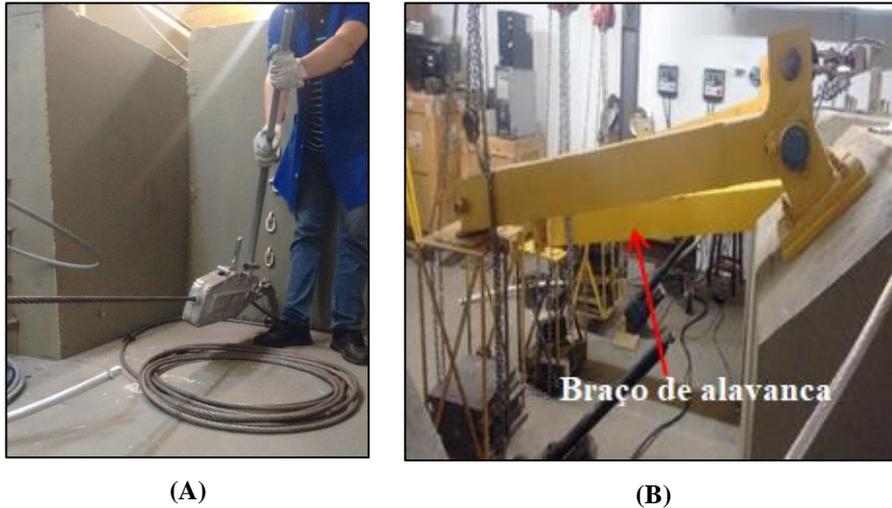
**(A)**



**(B)**

**Figura 4.16. Grampos de ancoragem conectados à: (A) célula de carga e ao (B) tifor.**

4) Aplica-se a pré-carga utilizando o tifor, e na outra extremidade utiliza-se o braço de alavanca conectada a gaiola de contrapeso para atingir a carga de esticamento planejada para o ensaio (Fig.4.17).



**Figura 4.17. (A) Aplicação de pré-carga usando tifor e (B) Braço de alavanca.**

5) Após o tempo de acomodação por fluência (*creep*), de aproximadamente 6 horas, aplica-se a carga de aperto ao grampo de suspensão com torque de 50 *Nm* nas porcas (Fig.4.18).



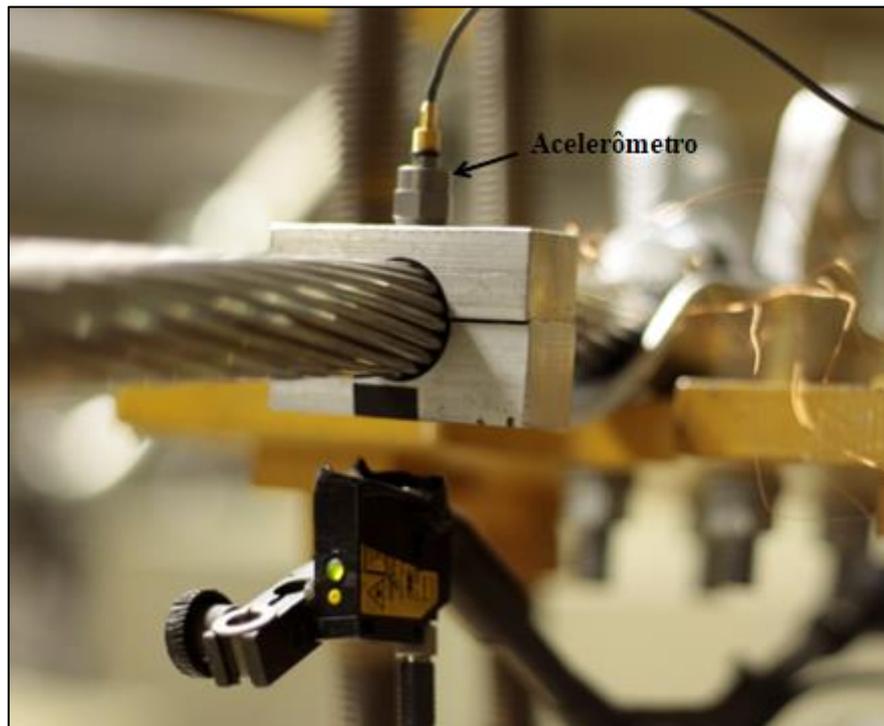
**Figura 4.18. Fixação do grampo de suspensão e aplicação do torque nas porcas.**

6) Cola-se três extensômetros nos fios diametralmente opostos ao último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão, conforme a Figura 4.19. Na seção 4.4.1 é fornecido detalhes sobre todo o procedimento de colagem dos extensômetros e o objetivo da realização da extensometria.



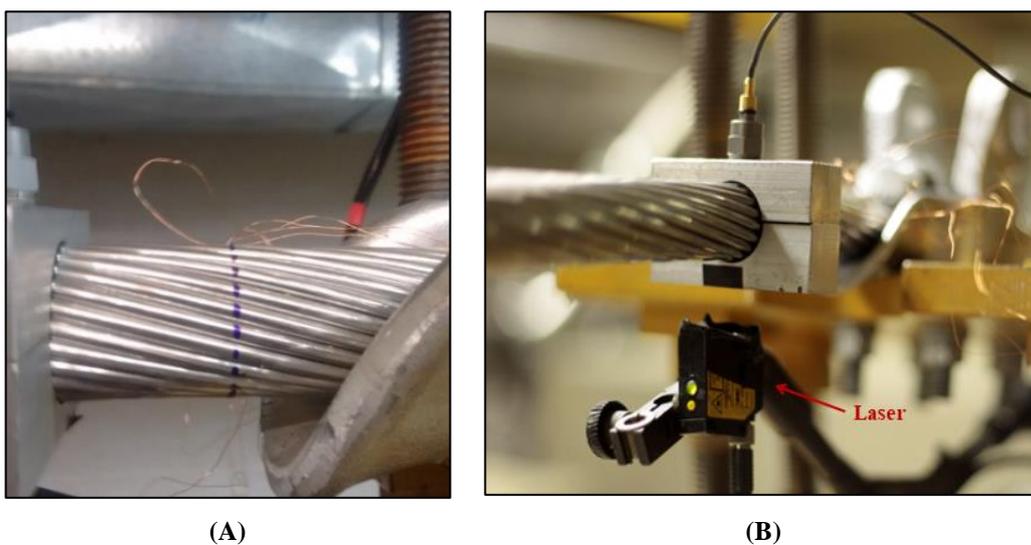
**Figura 4.19. Extensômetros colados nos três fios mais altos e opostos ao UPC.**

7) Fixa-se o acelerômetro no ponto 89 *mm*, para controlar neste ponto o deslocamento ( $Y_B$ ) (Fig.4.20).



**Figura 4.20.** Fixação da braçadeira com acelerômetro no ponto 89 *mm*.

8) A fim de detectar as falhas nos fios externos do condutor, é esboçada uma ou duas linhas em volta do cabo, entre a boca do grampo e o “ponto 89”. Em seguida, posiciona-se o laser para contagem de ciclos abaixo da abraçadeira (Fig.4.21);



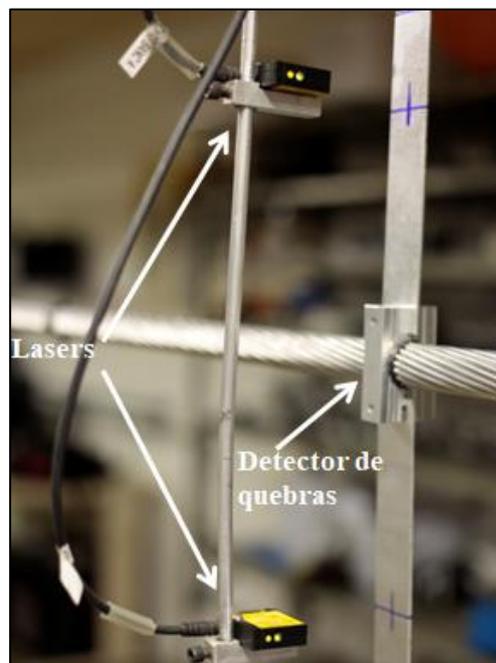
**Figura 4.21.** (A) Linha de detecção de quebra externa e (B) Laser para contagem do número de ciclos.

9) Fixa-se dispositivo de alinhamento e abraçadeira com acelerômetro no *shaker* (Fig.4.22).



**Figura 4.22. Dispositivo de alinhamento do *shaker* e abraçadeira com acelerômetro.**

10) O último passo da instrumentação do ensaio de fadiga é fixar as hastes para detecção de quebras dos fios sobre o primeiro nó de vibração do condutor. Em seguida, alinha-se os transdutores (lasers) com as hastes (Fig.4.23). Para determinar a posição do nó, deve-se iniciar a vibração do cabo utilizando os parâmetros de ensaio e visualmente é possível encontrar a posição do nó mais próximo ao grampo de suspensão;



**Figura 4.23. Posição do sistema de detecção de quebra.**

Após as dez etapas apresentadas acima, o cabo está pronto para o início do ensaio de fadiga. A configuração e controle de vibração são feitas através do software *Shaker Control*, conforme apresentados na seção 4.2.7.

Após o término dos ensaios de fadiga é realizado a retirada do cabo e a coleta da amostra, para isso, segue-se os seguintes passos:

- 1) Retira-se todos os sensores utilizados no ensaio. Após a redução da carga de esticamento, desmontam-se os grampos de ancoragem.
- 2) Dois pares de abraçadeiras são fixadas no cabo, antes e depois do grampo de suspensão para que seja possível realizar o corte do condutor, mantendo os fios na mesma posição. Ressalta-se que neste estágio é necessário reduzir toda a carga de esticamento do cabo e abrir os grampos de ancoragem, para garantir que o condutor esteja totalmente folgado, por questões de segurança.
- 3) Com um alicate específico para corte de condutores, corta-se o cabo entre cada um dos pares de abraçadeiras (Fig. 4.24).



**Figura 4.24. Corte da amostra.**

- 4) Após o corte do cabo, retira-se a parte de interesse da pesquisa: amostra do cabo com o grampo de suspensão, onde estão localizados os fios rompidos no ensaio (Fig. 4.25).



**(A)**



**(B)**

**Figura 4.25. (A) Retirada da amostra do cabo e (B) amostra do ensaio com os fios rompidos.**

- 5) Por fim, são extraídas algumas informações importantes da amostra:
- Medida da distância axial de cada fio rompido, da boca do grampo até a quebra (Fig. 4.26);



Figura 4.26. Medida da distância da falha (DF), da boca do grampo até a quebra.

- Retira-se os fios que sofreram as quebras para armazená-los para realizar análise de falha a nível macro e microscópico (Fig. 4.27);

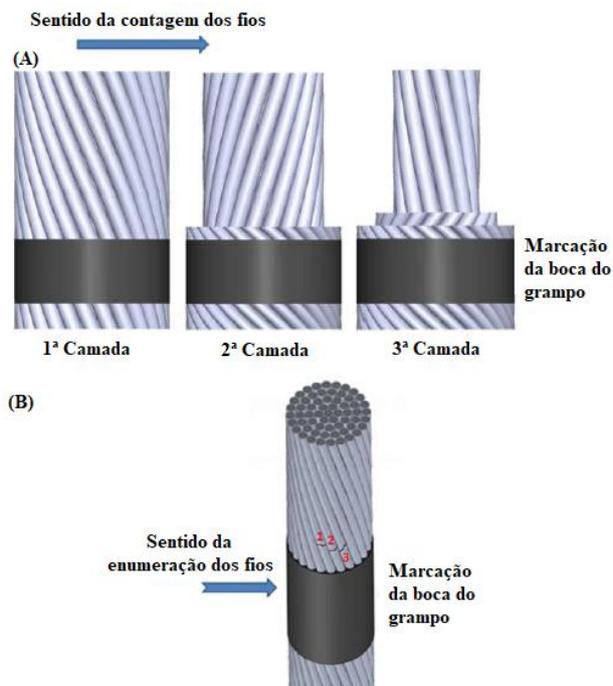


Figura 4.27. Exemplo do procedimento para (A) retirada dos fios por camada do cabo e (B) Enumeração das quebras.

- Registra-se o número de falhas e seus respectivos números de ciclos de acordo com o gráfico de quebras disponível na sala de monitoramento dos ensaios (Fig. 4.28).

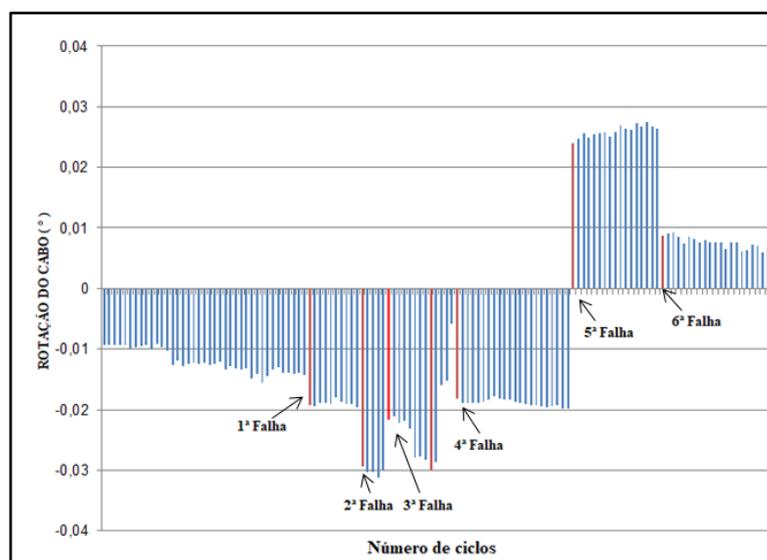


Figura 4.28. Gráfico da rotação do cabo, indica momento das quebras.

Ressalta-se que antes de iniciar todos os ensaios de fadiga são realizados os ensaios dinâmicos com objetivo de avaliar a formulação de Poffenberger-Swart, pois através da mesma é possível determinar a tensão nominal atuante na zona de falha do condutor durante as vibrações eólicas.

#### 4.4. ENSAIOS DINÂMICOS: VALIDAÇÃO DA EQUAÇÃO DE POFFENBERGER-SWART

Os ensaios dinâmicos são realizados com objetivo de obter as deformações experimentais para compará-las com as tensões nominais calculadas com a fórmula de **P-S**. Assim, após a montagem e instrumentação do ensaio de fadiga, que envolve a colagem dos extensômetros na região diametralmente oposta ao **UPC**, são realizados os ensaios dinâmicos. Em seguida, após análise da aderência das medições com a tensão nominal, inicia-se o teste de fadiga para obtenção da curva **S-N**.

A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros utilizados para ensaio dinâmico do cabo CAL 1055 MCM. Salienta-se que para cada amplitude de deslocamento  $Y_B$ , são realizados três ensaios dinâmicos.

Tabela 4.4. Parâmetros Ensaio Dinâmico CAL 1055 MCM.

Ensaio Dinâmico CAL 1055 MCM					
EDS	Amplitude de Deslocamento ( $Y_B$ ) [mm]			Frequência de Aquisição [Hz]	Resistência Extensômetros [Ω]
	28,22 [MPa]	31,35 [MPa]	34,49 [MPa]		
17%	0,92	1,02	1,12	100	350
20%	0,87	0,97	1,07	100	350
25,6%	0,81	0,90	0,99	100	350

#### 4.4.1. Procedimento Experimental

O procedimento experimental para realização do ensaio dinâmico inicia-se com o processo de extensometria, que pode ser dividido em cinco etapas: 1) Localização do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão; 2) Preparo da superfície; 3) Colagem dos Extensômetros; 4) Conexão dos fios dos extensômetros no aquisitor de dados e 5) verificação do funcionamento do **ERE**.

- 1) Localização do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão (**UPC**):

Esta etapa é muito importante, pois, os extensômetros devem ser colados nos três fios da camada externa, diametralmente opostos ao **UPC** do cabo, onde a tensão normal é máxima devido à flexão. Para isso, é utilizado um gabarito flexível que é inserido no espaço existente entre o condutor e o grampo até atingir o **UPC** (Fig. 4.29).

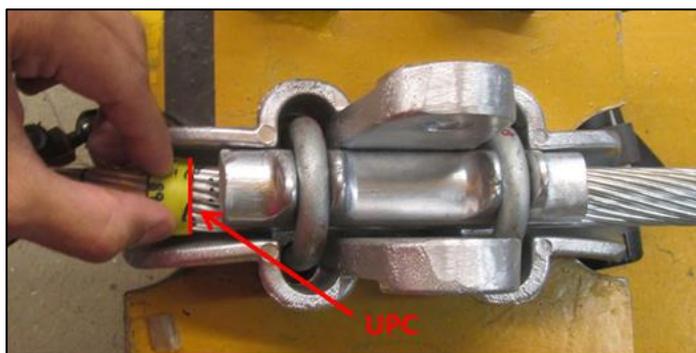


Figura 4.29. Posição do último ponto de contato e fios do topo.

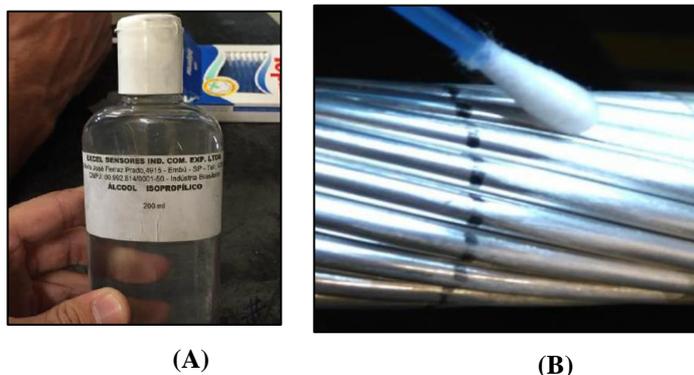
- 2) Preparo da superfície:

Para obter bons resultados na colagem dos extensômetros é fundamental dar um bom acabamento na superfície dos fios do condutor, para que a mesma fique o mais uniforme possível. Para isso, a superfície é lixada com uma lixa adequada (recomenda-se uma granulometria entre 80 a 120) (Fig.4.30).



**Figura 4.30. Processo de lixamento da superfície do fio.**

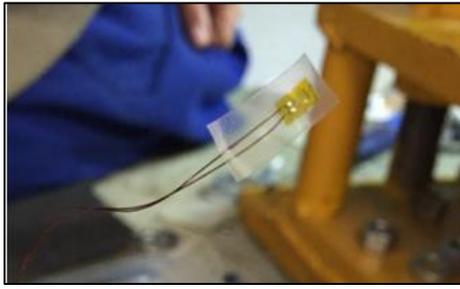
- 3) Em seguida, as superfícies dos três fios devem ser limpas com álcool isopropílico, removendo qualquer impureza, ficando totalmente livre de resíduos (Fig.4.31).



**Figura 4.31. A) Álcool Isopropílico; B) Limpeza da superfície com álcool e cotonete.**

- 4) Colagem dos extensômetros:

Antes de iniciar a colagem dos extensômetros é importante verificar a resistência elétrica dos mesmos, utilizando-se um multímetro, o valor deve ser o mesmo especificado pelo fabricante,  $350 \Omega$ . Em seguida, cola-se o extensômetro em uma fita adesiva, para que o manuseio no ato da colagem seja mais fácil. Aplica-se uma pequena quantidade de cola sobre a região do fio onde pretende-se colar o extensômetro. Para melhor fixação dos mesmos na superfície dos fios, usa-se uma espátula de silicone (Fig. 4.32).



(A)



(B)



(C)

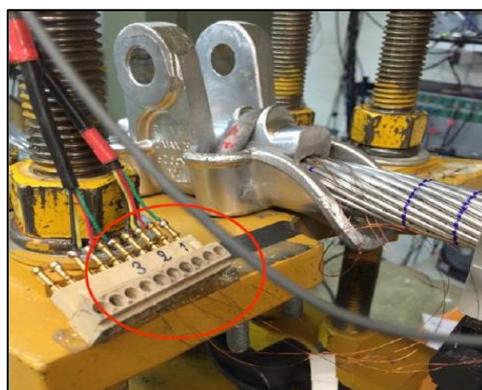


(D)

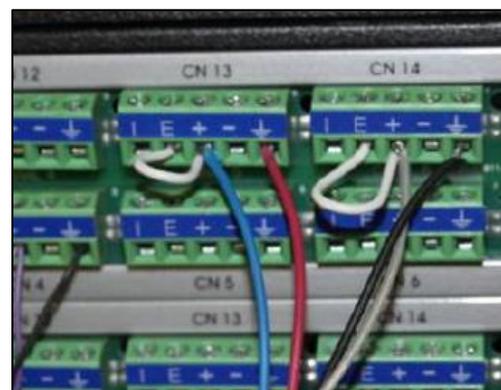
**Figura 4.32. (A) Fixação do extensômetro na fita adesiva; (B) Aplicação de cola na superfície; (C) Colagem do extensômetro e (D) Três extensômetros colados.**

5) Conexão dos fios dos extensômetros no aquisitor de dados:

É importante enfatizar, que nesta etapa, após colar os extensômetros é importante verificar a resistência elétrica novamente. Por fim, os fios dos extensômetros são conectados ao aquisitor de dados (ADS 2000), para que em seguida, os mesmos sejam calibrados e a ponte de wheatstone seja balanceada (Fig. 4.33).



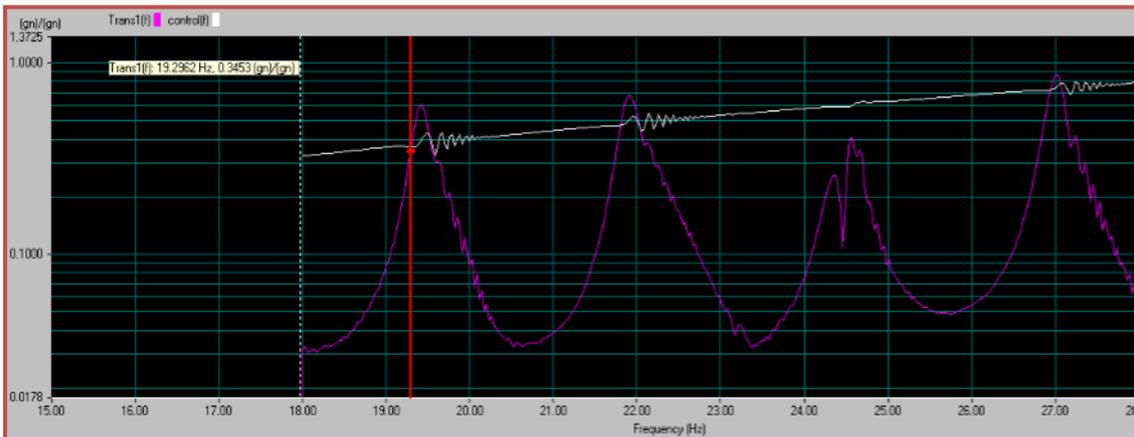
(A)



(B)

**Figura 4.33. (A) Fios dos extensômetros inseridos no conector sindal e (B) Conexão extensômetros no ADS 2000.**

Para cada amostra do cabo CAL 1055 MCM, são feitos três ensaios dinâmicos com frequências próximas da frequência natural do condutor, obtidas através da varredura utilizando o *software Skaker Control* (Fig.4.34).



**Figura 4.34.** Gráfico da varredura das frequências de ressonância do sistema.

A frequência de aquisição dos dados é de 100 Hz, configura-se o *software* para gravar 30 segundos por experimento, ou seja, obtêm-se aproximadamente 3000 pontos por gravação. Em seguida, calcula-se a média dos valores das deformações elásticas medidas pelos três extensômetros e, a partir da mesma, a tensão é obtida de forma indireta, utilizando a Lei de Hooke (Eq.2.4). Os resultados obtidos das tensões são comparados com os cálculos teóricos usando a formulação de **P-S**.

#### **4.5. ENSAIO ESTÁTICO: OBTENÇÃO DA TENSÃO MÉDIA ATRAVÉS DA VARIAÇÃO DA EDS**

A tensão média na fadiga influencia de maneira expressiva a vida do componente. Com o objetivo de avaliar o efeito da tensão média existem expressões que fazem a correção da resistência à fadiga, como os critérios de Goodman, Gerber, Soderberg e Smith-Watson-Topper (SWT). No caso dos cabos condutores, a tensão média varia com parâmetros como a carga de esticamento, porém, não existem critérios estabelecidos para determinar o quanto a tensão média influencia na vida em fadiga do condutor.

Neste sentido, é importante quantificar experimentalmente a tensão média do cabo CAL 1055 MCM com diferentes cargas de esticamento (EDS – *Every Day Stress*) aplicadas no mesmo. A tensão média aplicada ao cabo é uma variável que interfere nas forças de contato entre os fios do condutor e destes com o grampo, pois promovem deformações nos fios, e em consequência, aumenta-se significativamente a severidade da fadiga por flexão e também por *fretting*. De acordo com Fadel *et. al* (2012), à medida que aumenta-se a tensão média causada pela carga de esticamento aplicada ao condutor, a vida do mesmo pode ser reduzida de forma acentuada.

Assim, estudos experimentais que busquem reproduzir o comportamento real do cabo, possibilitam um melhor entendimento do problema e permite a determinação de parâmetros para desenvolver um projeto seguro e economicamente vantajoso. Nesta seção, por meio da extensometria, é feita uma avaliação do efeito da aplicação de diferentes cargas de esticamento (**EDS**) na distribuição das tensões médias nos fios da camada externa do condutor.

A seguir, serão descritos os procedimentos experimentais adotados para realizar o ensaio estático para avaliação do comportamento das tensões médias nos fios do condutor CAL 1055 MCM, em decorrência da variação da carga de esticamento (**EDS**).

#### 4.5.1. Procedimento Experimental

Após a fixação do cabo condutor nos grampos de ancoragem, aplica-se a carga de esticamento. A ancoragem do cabo no bloco fixo é feita utilizando uma talha de alavanca, a manipulação da talha permite a realização de ajustes na aplicação da carga de tração do cabo (Fig. 4.35).

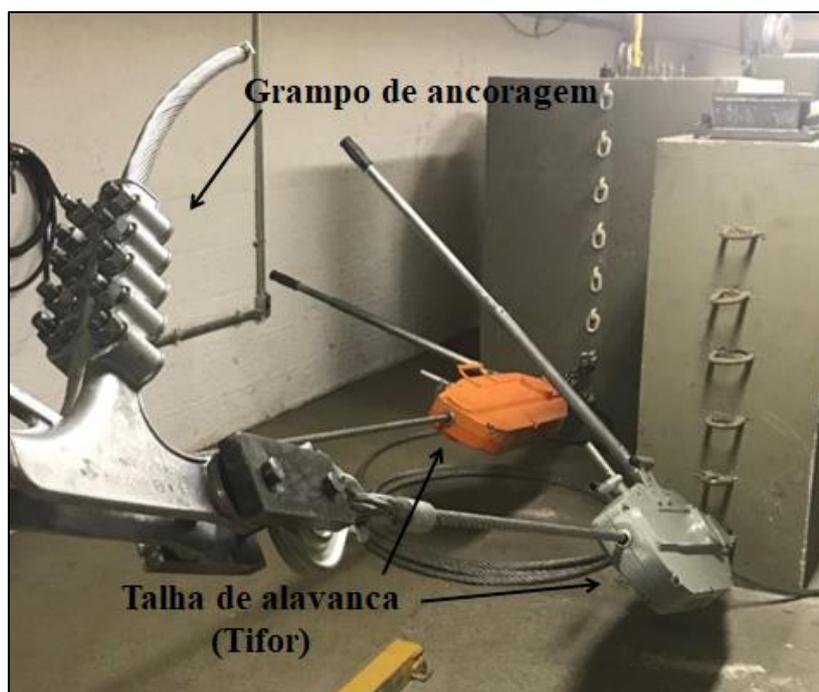
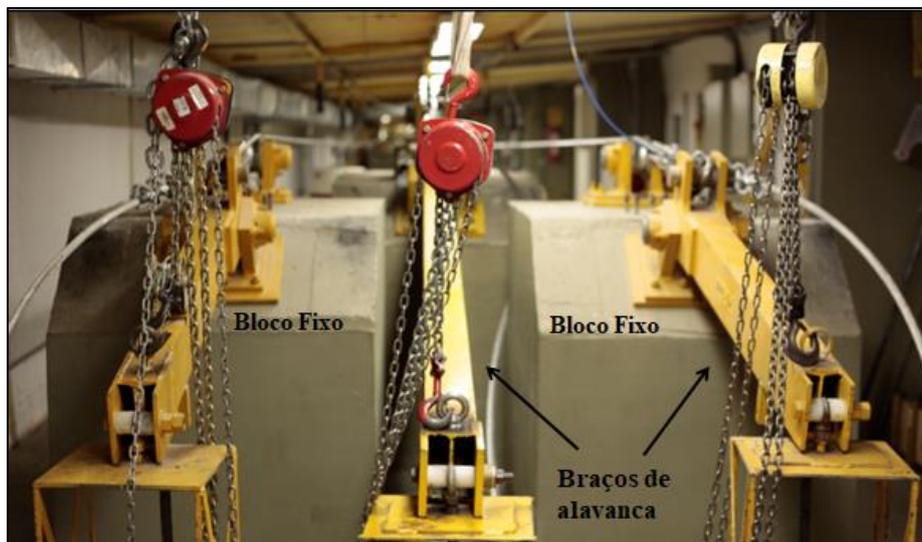


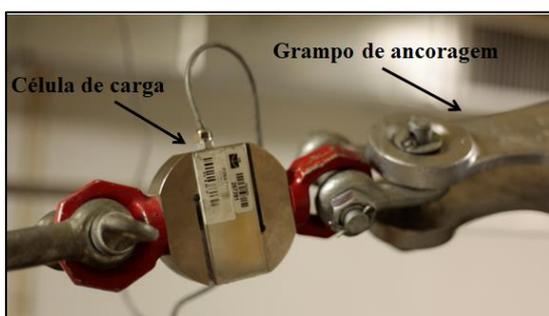
Figura 4.35. Fotos do bloco fixo com a talha de alavanca e o grampo de ancoragem.

Na extremidade oposta da bancada, encontra-se outro bloco fixo que é utilizado para prender a polia e o braço de alavanca. Pesos são conectados ao braço de alavanca para o tracionamento do cabo até ser obtida a **EDS** especificada pelo ensaio, o valor da

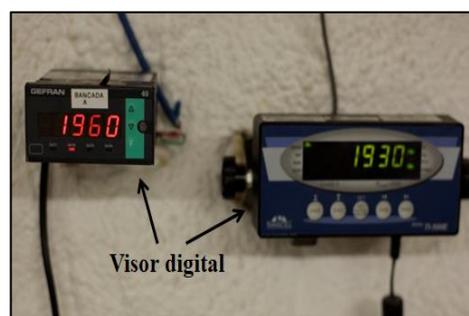
carga de esticamento aplicada é verificado por um visor digital que indica a leitura da célula de carga que é conectada ao grampo de ancoragem (Fig. 4.36).



(A)



(B)



(C)

Figura 4.36. (A) Bloco fixo e braço de alavanca, (B) Célula de carga e (C) visor digital para controle da carga de esticamento aplicada ao ensaio.

Nos ensaios realizados, a deformação foi medida por meio de extensometria e a EDS foi variada de 10% a 25% de RTS, em sentido crescente e decrescente da aplicação da carga (Tab. 4.5).

Tabela 4.5. Carga de esticamento em Kgf para cada EDS aplicada no cabo.

Cabo CAL 1055 MCM		
Carga de Ruptura [kgf]	EDS ( <i>Every Day Stress</i> ) [%]	Carga de Esticamento [Kgf]
15.549	10	1.554
	15	2.332
	17,1	2.658
	20,1	3.125
	25,6	3.980

Para determinação da tensão média do condutor, a amostra foi instrumentada com extensômetros nos fios da camada mais externa do condutor a uma distância de dois metros do último ponto de contato da montagem cabo/grampo de suspensão (Fig.4.37). Essa distância tem como objetivo evitar a influência de tensões localizadas próximas do grampo de suspensão, devido à carga de aperto aplicada ao mesmo.



**Figura 4.37. Localização para colagem dos extensômetros.**

Para colagem dos extensômetros são adotados os seguintes passos:

- Verifica-se a resistência dos extensômetros, conferindo-se se estes apresentam  $350 \Omega$  (Fig. 4.38).

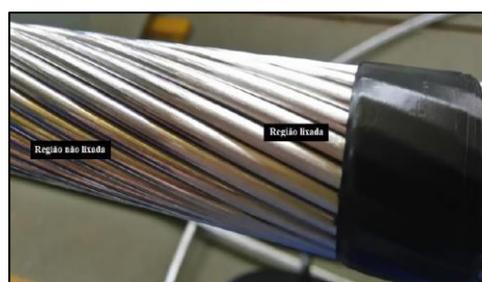


**Figura 4.38. Verificação da resistência dos extensômetros.**

- Lixa-se a superfície onde os extensômetros serão colados, com objetivo de uniformizar a superfície dos fios. Em seguida, limpa-se as superfícies utilizando cotonetes umedecidos com álcool isopropílico (Fig.4.39).



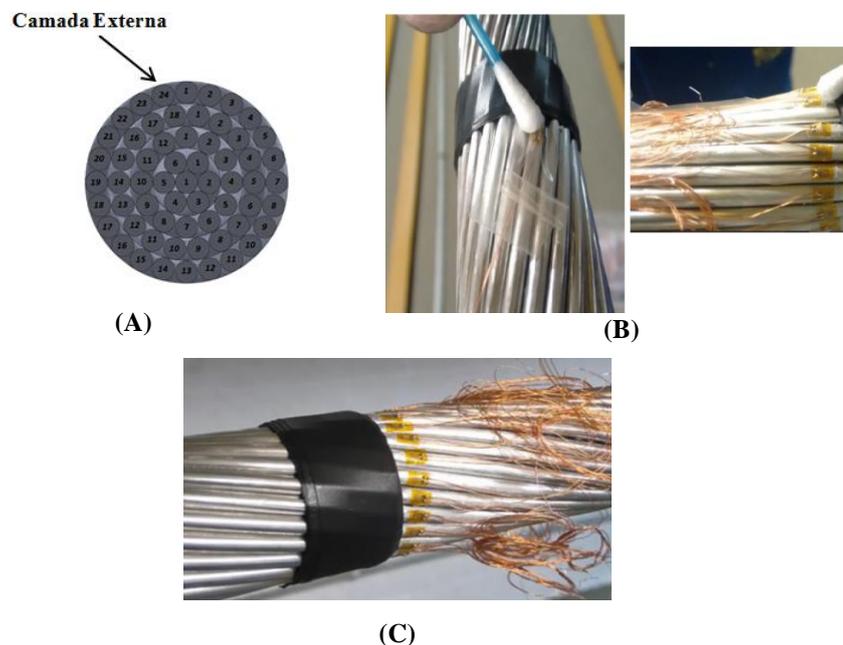
**(A)**



**(B)**

**Figura 4.39. (A) Superfície dos fios sendo lixada e (B) Fios após a limpeza com álcool isopropílico.**

- Cola-se os extensômetros nos 24 fios (quantidade de fios da camada externa do condutor CAL 1055), localizados na camada externa do condutor. Em seguida, utiliza-se silicone para melhor fixação dos mesmos (Fig.4.40).



**Figura 4.40. (A) Ilustração das camadas frontais do cabo CAL 1055 MCM; (B) Colagem dos extensômetros e (C) Extensômetros colados nos 24 fios das camadas externas no condutor.**

- Para fazer a conexão entre os extensômetros e o aquisitor de dados (ADS), utiliza-se um cabo de extensão, cuja ligação é feita por meio da soldagem dos fios dos extensômetros (Fig.4.41).



**Figura 4.41. Soldagem dos fios dos extensômetros no cabo de extensão com ADS.**

- Uma vez feita à conexão dos extensômetros com o ADS, mede-se novamente a resistência dos mesmos para certificar-se de que não houve alterações durante o procedimento de colagem.

- Após a instrumentação dos extensômetros na amostra, a carga de esticamento é reduzida para o valor de referência adotado para o ensaio (**EDS** de 5% de **RTS**), onde os extensômetros serão calibrados e balanceados para início do ensaio estático.

#### 4.5.2. Execução do Ensaio

O ensaio foi realizado aplicando-se carregamentos com a carga de esticamento variando de 5%, referência onde os extensômetros foram calibrados (zerados), até 25,6% de **RTS**. Para a variação da **EDS** aplicada ao ensaio, foi feito ajuste na talha de alavanca e os valores foram monitorados através da leitura da célula de carga. Ressalta-se ainda, que os valores das deformações foram medidas de forma crescente (5% a 25,6%) e decrescente (25,6% a 5%), com objetivo de verificar se haverá discrepância considerável nas duas metodologias adotadas. As variações das **EDS** aplicadas no ensaio foram apresentadas na Tabela 4.5. A gravação dos valores das deformações para cada **EDS** foi feita de forma contínua, com objeto de pegar todas as variações durante o ensaio.

A seguinte sequência de eventos foi seguida para a realização do teste:

- 1- Aumenta-se a carga de esticamento para o próximo nível de **EDS**, como o ensaio iniciou de forma crescente, logo, de 5% de **RTS** aumenta-se para 10% de **RTS**, e assim sucessivamente até que o nível da **EDS** chegue a 25,6% de **RTS**. É importante salientar que, aumenta-se o nível da carga de esticamento a cada trinta minutos, tempo este suficiente para que o cabo estabilize após a variação da **EDS**.
- 2- Após alcançar o maior nível de **EDS** planejado para o ensaio, inicia-se a etapa decrescente do mesmo, onde as deformações serão registradas à medida que a carga de esticamento é reduzida gradativamente, a cada trinta minutos.
- 3- Finalizando o ensaio, inicia-se a etapa de avaliação de resultados através de tabelas e gráficos.

A deformação é medida através dos extensômetros, onde o princípio de funcionamento dos mesmos é baseado na variação da resistência elétrica que ocorre no fio quando sua seção transversal é alterada e fornecem a leitura direta da deformação ( $\epsilon$ ) sofrida no mesmo, onde o extensômetro foi colado. Então, a Lei de Hooke é utilizada para determinar indiretamente os valores das tensões nos fios (Eq.2.4).

## CAPÍTULO 5

### 5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados de todos os ensaios experimentais realizados com o condutor CAL 1055 MCM: Ensaios de Fadiga, Carregamento Dinâmico e Carregamento Estático. Por fim, embora não seja o enfoque principal deste trabalho, no final deste capítulo é feita uma análise de falha do condutor a nível macroscópico e microscópico.

#### 5.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O CABO CAL 1055 MCM

##### 5.1.1 Resultados dos Ensaios de Fadiga

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados encontrados no programa experimental, que consistiu na realização dos ensaios de resistência em fadiga de 27 amostras do cabo CAL 1055 MCM. Estes ensaios foram realizados na faixa de frequência entre 18 e 20 *Hz*, operando na região ótima de trabalho do *shaker*. Para escolher a frequência mais apropriada para conduzir os ensaios é feito um ensaio prévio de varredura das frequências de ressonância do sistema (Fig.4.34).

O critério de parada utilizado no ensaio de fadiga foi o mesmo estabelecido pela CIGRE (1979) que considera a falha como sendo o maior valor dentre duas opções: *i*) a ruptura de 10% do número de fios de alumínio do cabo, ou, *ii*) a ruptura de três fios. Neste trabalho foi adotado como critério de parada o rompimento de 10% do número de fios do condutor, que neste caso, para o cabo CAL 1055 MCM, corresponde-se a seis fios rompidos, visto que o cabo possui 61 fios.

A Tabela 5.1 apresenta os resultados obtidos dos ensaios de fadiga com o cabo CAL 1055 MCM. Na tabela é possível verificar o número de ciclos da primeira à sexta quebra do condutor, por nível de tensão, com cargas de esticamento de 2.660 *Kgf* ou 17% da carga de ruptura (**RTS**), 3.125 *Kgf* ou 20% de **RTS** e 3.980 *Kgf* ou 25,6% de **RTS**.

**Tabela 5.1. Relação dos Ensaios Realizados.**

Resultados CAL 1055 MCM									
EDS	Nº do Ensaio	Amplitude	Tensão de P-S [MPa]	1ª quebra [Ciclos]	2ª quebra [Ciclos]	3ª quebra [Ciclos]	4ª quebra [Ciclos]	5ª quebra [Ciclos]	6ª quebra [Ciclos]
17%	Ensaio 1	0,92	28,22	1.702.800	2.012.400	2.244.600	2.863.800	3.096.000	3.173.400
	Ensaio 2	0,92	28,22	1.780.200	1.973.700	2.283.300	2.786.400	3.289.500	3.631.300
	Ensaio 3	0,92	28,22	1.664.100	1.896.300	2.012.400	2.515.500	3.018.600	3.753.900
	Ensaio 1	1,02	31,35	1.238.400	1.702.800	2.051.100	2.360.700	2.554.200	2.902.500
	Ensaio 2	1,02	31,35	1.315.800	1.509.300	1.780.200	1.973.200	2.709.000	2.747.700
	Ensaio 3	1,02	31,35	731.520	841.248	1.316.736	1.938.528	2.157.984	2.670.048
	Ensaio 1	1,12	34,49	978.120	1.617.948	1.807.488	2.072.844	2.148.660	2.414.016
	Ensaio 2	1,12	34,49	871.884	1.250.964	1.440.504	1.933.308	2.539.836	2.539.836
	Ensaio 3	1,12	34,49	530.010	795.816	1.024.668	1.329.804	1.711.224	2.390.328
20%	Ensaio 1	0,87	28,22	1.270.566	1.629.144	2.052.918	2.965.702	3.028.652	3.132.034
	Ensaio 2	0,87	28,22	1.007.190	1.072.170	1.560.384	2.505.726	3.010.470	3.113.068
	Ensaio 3	0,87	28,22	1.430.352	2.295.216	2.395.008	2.395.008	2.926.114	3.019.456
	Ensaio 1	0,97	31,35	1.140.300	1.433.520	2.201.400	2.209.880	2.301.880	2.329.940
	Ensaio 2	0,97	31,35	1.140.930	1.466.910	1.695.096	2.021.076	2.447.056	2.610.046
	Ensaio 3	0,97	31,35	1.339.920	1.674.900	2.110.374	2.277.864	2.314.820	2.408.150
	Ensaio 1	1,07	34,49	521.568	912.744	1.238.724	1.271.322	1.369.116	2.216.664
	Ensaio 2	1,07	34,49	619.200	851.400	1.044.900	1.161.000	1.509.930	2.102.200
	Ensaio 3	1,07	34,49	735.300	928.800	1.083.600	1.277.100	1.741.500	2.089.800
25,6%	Ensaio 1	0,81	28,22	586.764	814.950	945.342	1.173.528	1.271.322	1.534.322
	Ensaio 2	0,81	28,22	749.754	847.548	945.342	945.342	1.206.126	1.697.302
	Ensaio 3	0,81	28,22	358.578	1.010.538	1.043.136	1.173.528	1.206.126	1.762.498
	Ensaio 1	0,9	31,35	507.024	615.672	869.184	1.050.264	1.195.128	1.521.072
	Ensaio 2	0,9	31,35	438.912	694.944	1.060.704	1.097.280	1.243.584	1.426.461
	Ensaio 3	0,9	31,35	475.488	694.944	877.824	914.400	1.207.008	1.316.736
	Ensaio 1	0,99	34,49	475.488	804.672	877.824	914.400	987.552	1.024.128
	Ensaio 2	0,99	34,49	450.072	642.960	803.700	867.996	996.588	1.157.328
	Ensaio 3	0,99	34,49	546.516	610.812	707.256	771.552	993.558	1.125.180

Os resultados dos ensaios são apresentados no gráfico da Figura 5.1, em número de ciclos, para cada nível de tensão. As curvas de vida foram obtidas por meio do *software Microsoft Office Excel*. Onde é feita uma regressão linear utilizando a equação de Basquin ( $y=Ax^b$ ). Aplica-se o método dos mínimos quadrados para determinar o melhor ajuste das constantes de Basquin **A** e **b** com os dados experimentais.

Ao analisar os pontos do gráfico individualmente, nota-se que, quanto maior o nível de tensão, mais rápida a progressão da falha. Pode-se explicar esse comportamento, associando a redução da seção transversal do cabo devido à quebra de fios, assim, diminui-se a rigidez do mesmo. E em consequência, aumentam-se as forças de contato entre os fios e o desgaste promovido pelo *fretting* será maior.

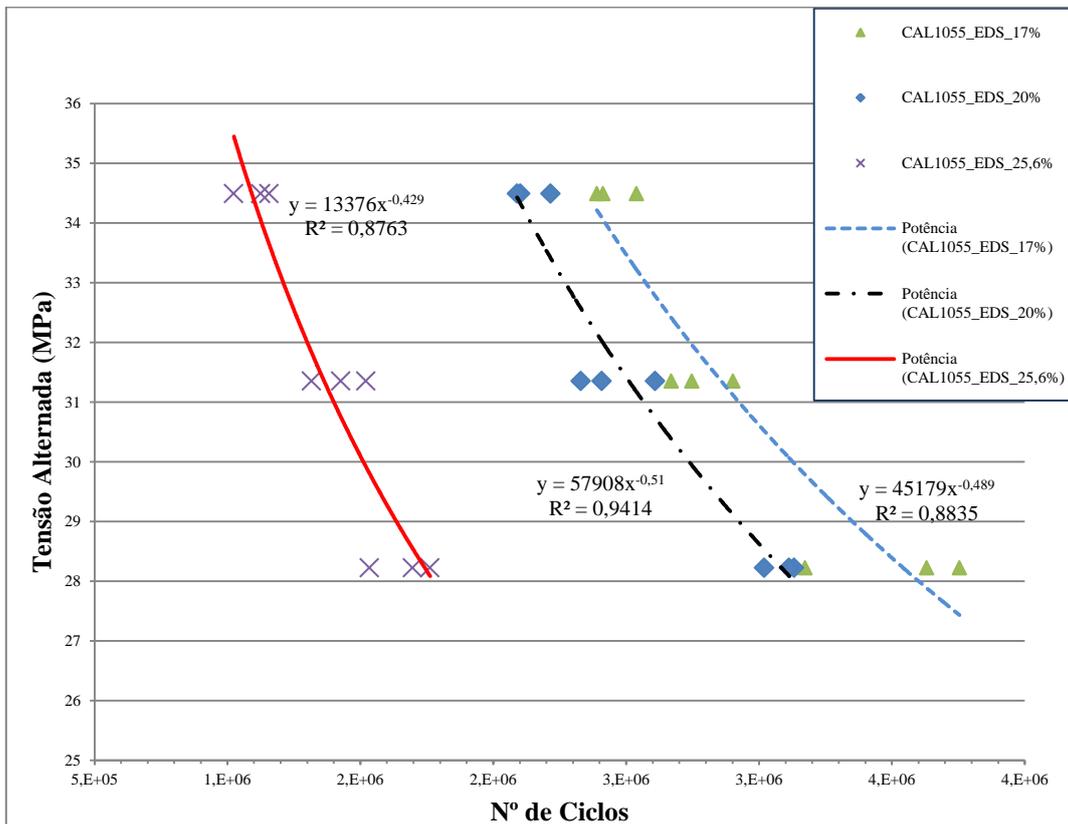
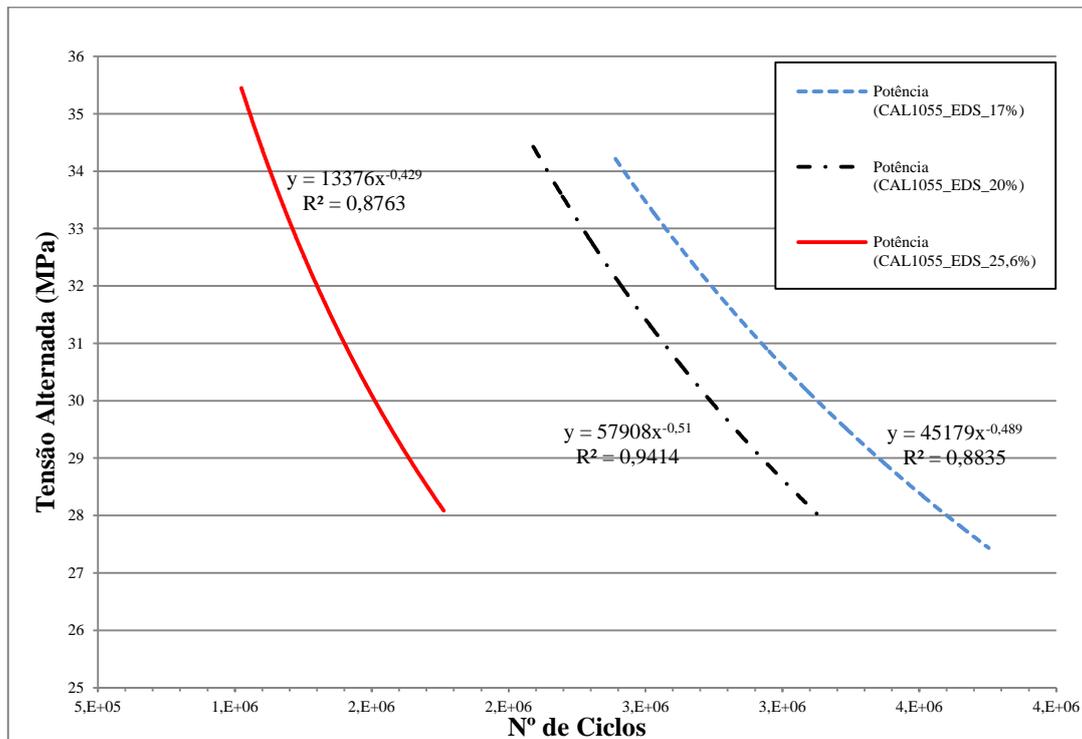


Figura 5.1. Resultados para as sextas quebras em número de ciclos para cada nível de amplitudes de tensões: 28,22; 31,35 e 34,49 MPa.

É possível verificar na Figura 5.1, que para a determinação de uma curva de fadiga consistente é necessário um controle rigoroso da EDS, da amplitude de deslocamento e do posicionamento dos sensores utilizados para medir o deslocamento do cabo. Caso isso não ocorra, a dispersão dos resultados pode ser significativamente elevada. Nota-se que as curvas de potência representaram de forma aceitável a distribuição dos pontos.

Para melhor visualização, no gráfico da Figura 5.2 são apresentadas apenas as curvas S-N para os resultados dos 27 ensaios realizados, com 17%, 20% e 25,6% de RTS.



**Figura 5.2. Curvas S-N para os ensaios realizados.**

Após o levantamento das três curvas, nota-se que o ajuste dos pontos experimentais, por meio de curvas de potência, é bastante satisfatória. Isto é observado através do valor do  $R^2$  (coeficiente de determinação de Pearson), das equações apresentadas das curvas, quanto mais próximo de “1”, melhor é o ajuste das curvas aos pontos experimentais.

Além disso, é possível observar que a curva com 25,6% de **RTS** apresentou um número de ciclos menor que as curvas com 20% e 17% de **RTS**, ou seja, nota-se que o aumento da carga de esticamento reduz de forma significativa a resistência em fadiga do cabo, uma vez que a carga de esticamento está relacionada aos contatos entre os fios e em consequência disso, altera-se a severidade do *fretting* presente no processo de fadiga (Fadel, 2010).

É evidente a relação entre o aumento da tensão média e a redução acentuada da resistência em fadiga do condutor, observada pelo distanciamento médio das curvas. Esta redução da vida do condutor em termos percentuais foi de -43%, quando aumentou a **EDS** de 20% para 25,6% de **RTS**. E da curva de 17% para 25,6% de **RTS**, diminuiu o número de ciclos em -49%. No entanto, aumentando a carga de esticamento de 17% para 20% de **RTS** reduziu a vida em apenas 12% (Fig. 5.3).

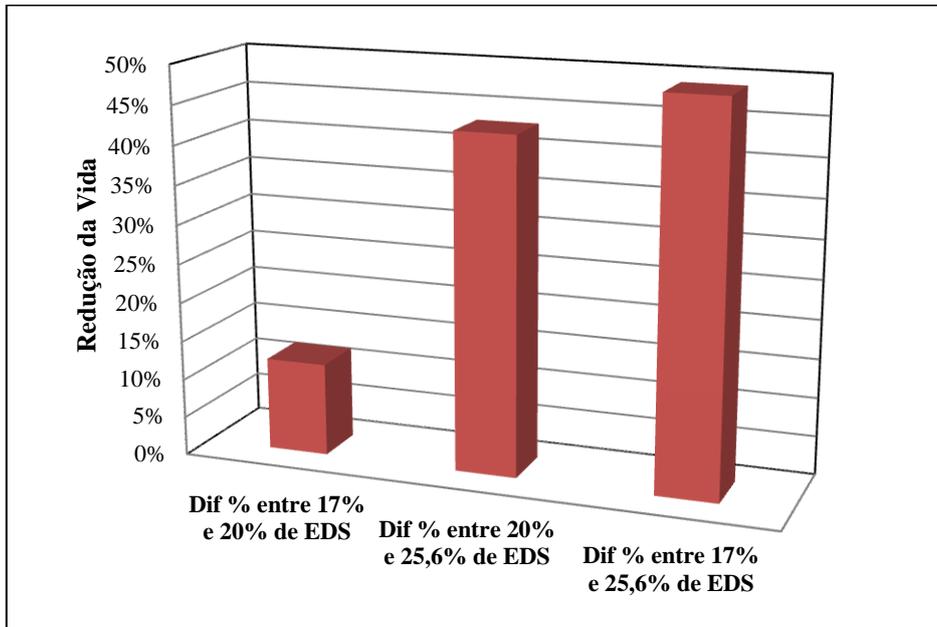


Figura 5.3. Redução em termos percentuais do número de ciclos para cada curva S-N.

Para comparar a previsão de vida dos ensaios de fadiga do cabo CAL 1055 MCM, adotou-se a abordagem da CIGRE para estimativa da vida do condutor, conforme observa-se na Figura 5.4.

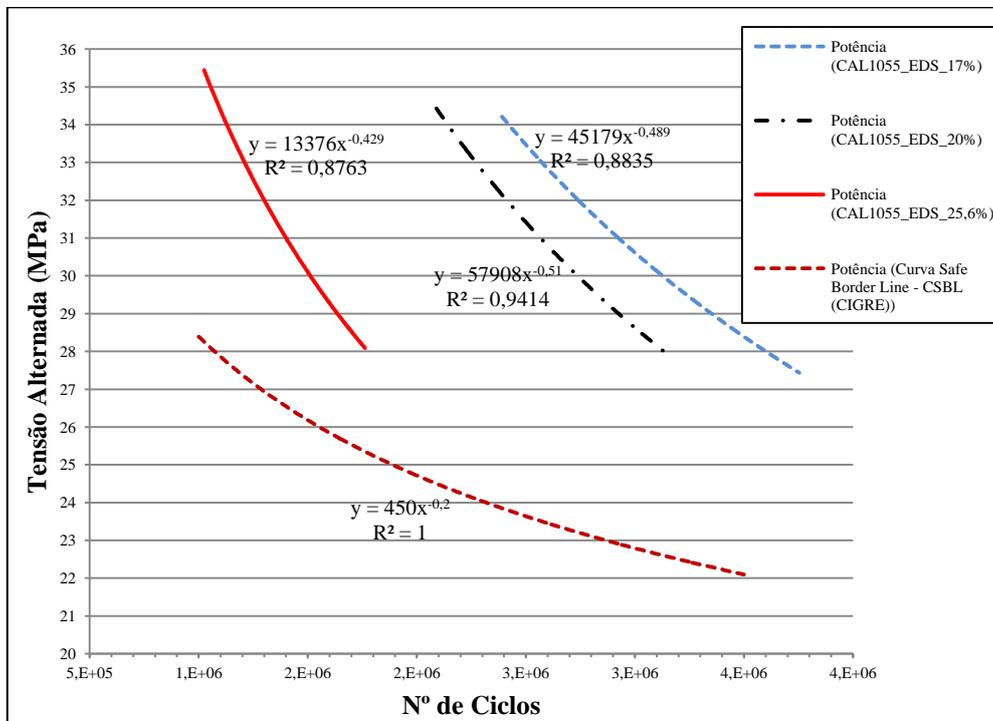


Figura 5.4. Curva obtida dos ensaios com o cabo CAL 1055 e Curva CSBL (CIGRE).

A curva CBLIS foi elaborada pela CIGRE com objetivo de estabelecer um padrão de referência para o projeto seguro de linhas de transmissão. Por se tratar de uma curva de segurança, espera-se que a mesma seja conservativa e que as condições de falha sejam menos críticas do que as previstas por ela. Analisando o gráfico da Figura 5.4, percebe-se que as curvas do cabo CAL 1055, com ensaios realizados com **EDS** de 17%, 20% e 25,6% de **RTS**, ficaram acima da curva **CBLIS**, baseada em uma **EDS** de 18% de **RTS**, ou seja, os resultados dos ensaios com o cabo CAL 1055 mostraram-se eficazes.

### 5.1.2 Resultados para Carregamento Dinâmico

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios dinâmicos, obtidos através de extensometria, para os quais foi avaliado o efeito da amplitude de excitação em uma mesma faixa de frequência (16 a 25 *Hz*), para **EDS** de 17%, 20% e 25,6% de **RTS**, com os parâmetros especificados na Tabela 4.4. Além disso, a fim de avaliar a formulação de Poffenberger-Swart para pequenos deslocamentos  $Y_B$  foram incluídos aos gráficos, resultados dos ensaios dinâmicos com deslocamentos de 0,1 a 1,0 *mm*, com passos de 0,1 *mm*.

No Laboratório de Cabos da Universidade de Brasília, adotou-se a metodologia de colar três extensômetros nos fios diametralmente opostos ao último ponto de contato, com objetivo de determinar quais dos três é o extensômetro chamado de topo. Pois, este está localizado no centro/topo da amostra no **UPC** que melhor representa a tensão nominal, onde a deformação é maior. Na região onde ocorrem as falhas, é onde o grampo de suspensão mantém contato com os fios, conferindo ao cabo maior rigidez, os fios em conjunto apresentam um comportamento similar ao de uma viga, conforme especificações usadas por **P-S** para criar a sua equação empírico-analítica. No entanto, regiões mais distantes do **UPC**, os fios comportam-se de forma mais independente, reduzindo a rigidez geométrica do cabo, e conseqüentemente, apresentam menores níveis de tensão/deformação (Poffenberger e Swart, 1965).

Os gráficos da Figura 5.5 mostram as respostas dinâmicas em tensões obtidas da amostra do cabo CAL 1055 MCM, submetido à **EDS** de 17% de **RTS**, que corresponde à carga de esticamento de 2.660 *kgf*. Estas amostras foram excitadas com frequências na faixa de 18 a 21 *Hz*.

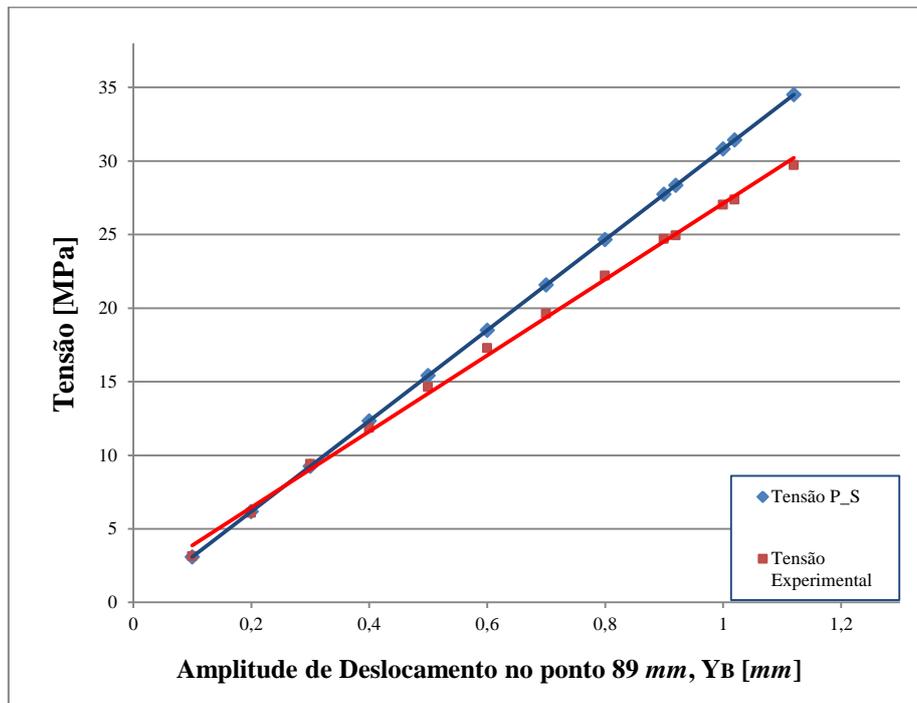


Figura 5.5. Tensão experimental e de P-S por amplitude de deslocamento  $Y_B$  (EDS 17% de RTS).

É possível observar nos gráficos da Figura 5.5 que os resultados teóricos, obtidos usando formulação de P-S, aderiu de forma significativa com os resultados experimentais. Nota-se que para menores deslocamentos os resultados tiveram melhores aproximações. À medida que aumentou-se os deslocamentos  $Y_B$  o erro entre as tensões experimentais e teóricas também aumentaram (Fig.5.6).

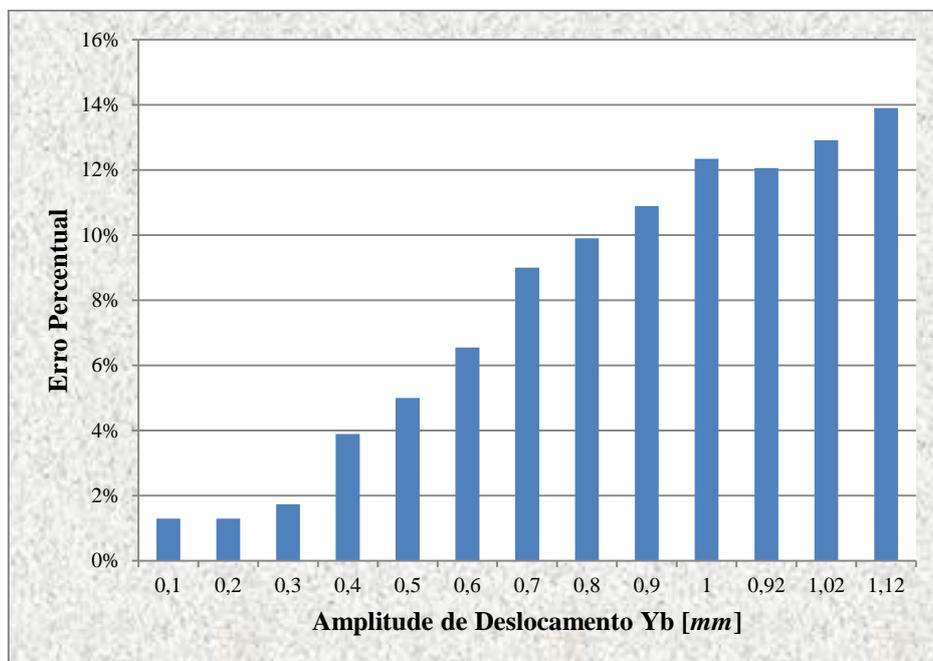
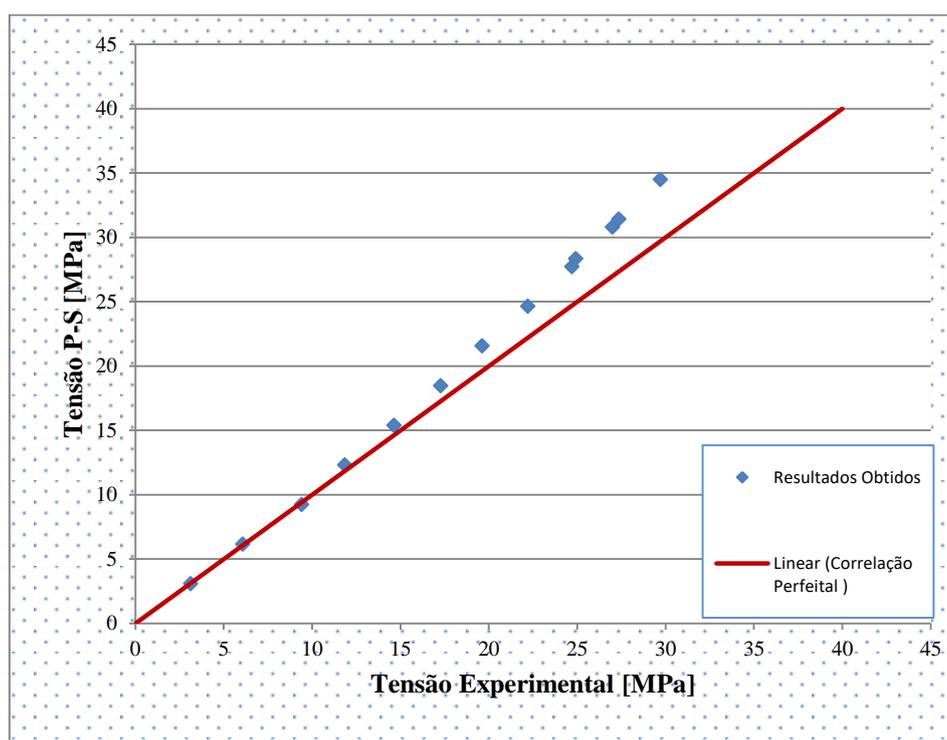


Figura 5.6. Erro médio entre os resultados da tensão teórica com a tensão experimental para deslocamento (EDS de 17% de RTS).

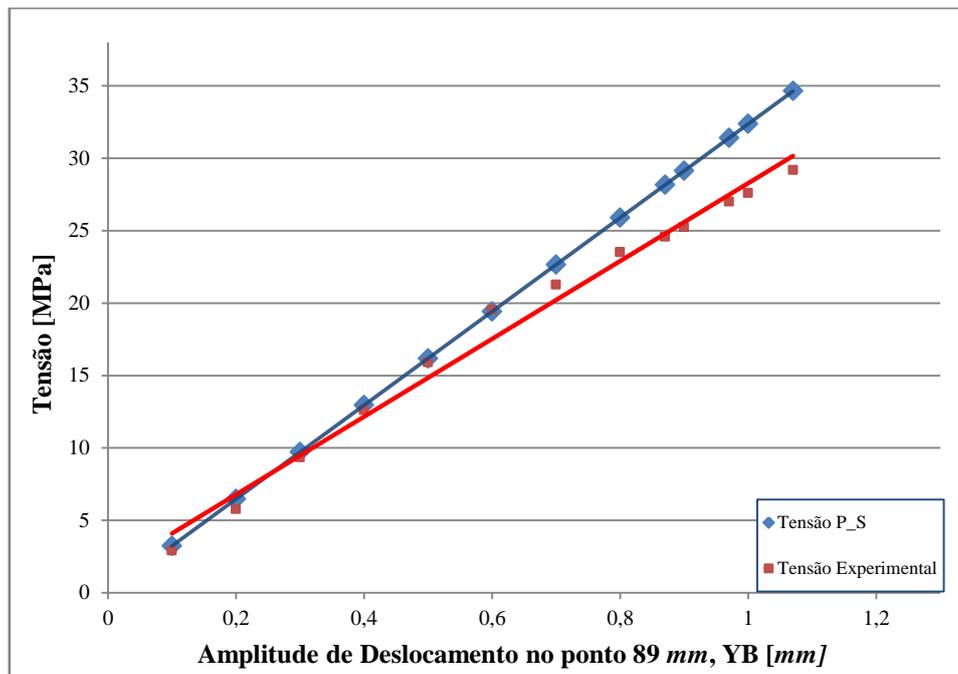
Vale ressaltar que estes resultados são esperados, pois, quanto maior a amplitude de flexão do condutor, mais os fios se comportam de forma independente e menos se aproximam do que se assemelha a uma viga, conforme as considerações feitas por **P-S** e o erro da tensão teórica e experimental tende a aumentar. É importante salientar, que para o cálculo da rigidez do cabo, a expressão de **P-S** considera o mesmo como sendo um conjunto de fios individuais paralelos, e uma vez que aumenta-se a amplitude de flexão do condutor, o contato e escorregamento entre os fios será maior (Poffenberger e Swart, 1965).

A fim de melhor visualizar o quanto os resultados experimentais se aproximaram dos teóricos, foi plotado o gráfico da Figura 5.7 (tensão P-S por tensão experimental). Neste gráfico, foi incluída uma reta para representação de uma correlação perfeita, que seria aderência de 100% dos resultados. Percebe-se que, à medida que aumentou-se os valores das tensões, foi maior a discrepância entre os resultados com a reta de correlação perfeita.



**Figura 5.7. Tensão P-S por Tensão Experimental para resultados com EDS de 17% de RTS.**

Os gráficos da Figura 5.8 mostram as respostas dinâmicas em tensões obtidas da amostra do cabo CAL 1055 MCM, submetido à **EDS** de 20% de **RTS**, que corresponde à carga de esticamento de 3.125 kgf. Estas amostras foram excitadas com frequências na faixa de 18 a 21 Hz.



**Figura 5.8. Tensão experimental e de P-S por amplitude de deslocamento  $Y_B$  (EDS 20% de RTS).**

Observa-se nos gráficos da Figura 5.8 que os resultados experimentais tiveram uma aproximação satisfatória com os valores teóricos calculados usando a formulação de **P-S**. Nota-se que para menores deslocamentos os resultados tiveram melhores aproximações. Na Figura 5.9 são apresentados os erros médios entre as tensões experimentais e teóricas, nota-se que, nos deslocamentos de 0,1 a 0,6 mm o erro decresceu, no entanto, de 0,7 a 1,07 mm o erro foi crescente. É importante esclarecer, que quanto maior a **EDS** ou carga de esticamento do condutor, para menores deslocamentos (0,1 a 0,4 mm), aumentou-se a dificuldade de controle do ensaio, e uma vez que o ensaio não estabiliza de forma contínua no momento da gravação ou da aquisição dos dados dos extensômetros, a tendência é que ocorra maior discrepância dos resultados experimentais dos teóricos.

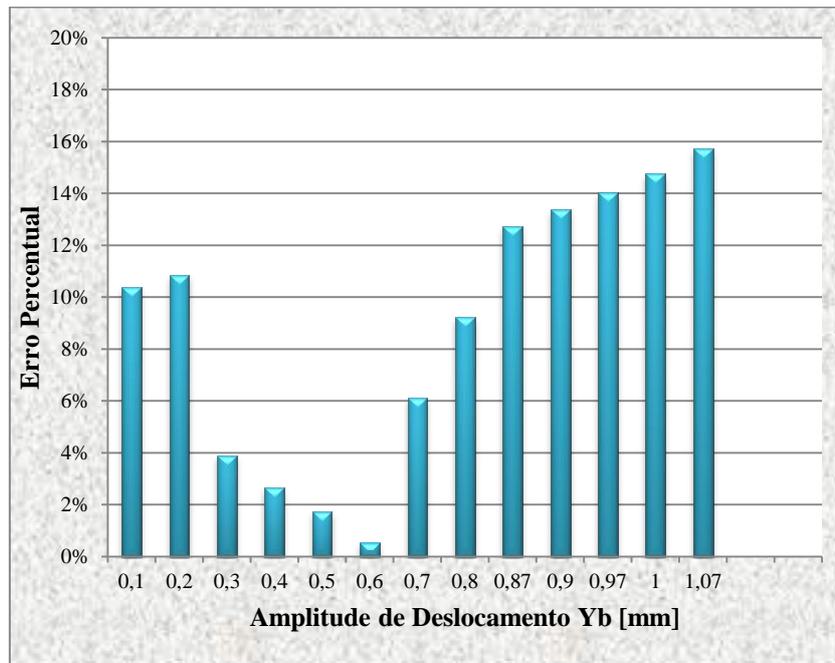


Figura 5.9. Erro médio entre os resultados da tensão teórica com a tensão experimental para cada deslocamento  $Y_B$  (EDS de 20% de RTS).

Para os ensaios com EDS de 20% de RTS, também foi plotado o gráfico com uma reta de correlação perfeita, apresentado na Figura 5.10 (tensão P-S por tensão experimental). Nota-se que, embora seja perceptível uma oscilação para as tensões de 3 a 22 MPa, os valores se aproximaram significativamente da reta “correlação perfeita” para esta faixa de tensão. A partir da tensão de 23 MPa a divergência entre os resultados obtidos com o comportamento ideal foi maior.

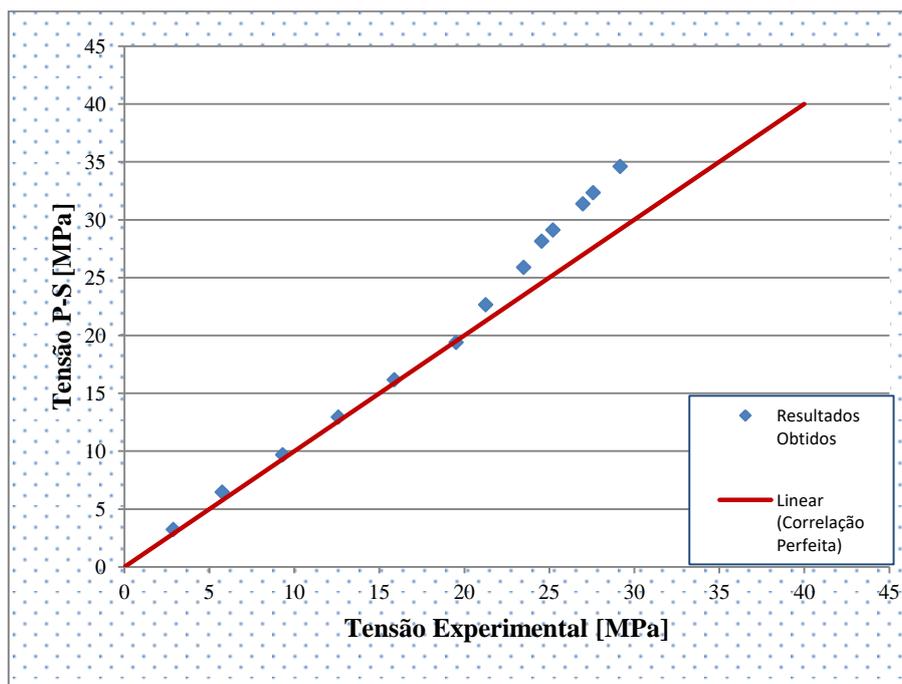
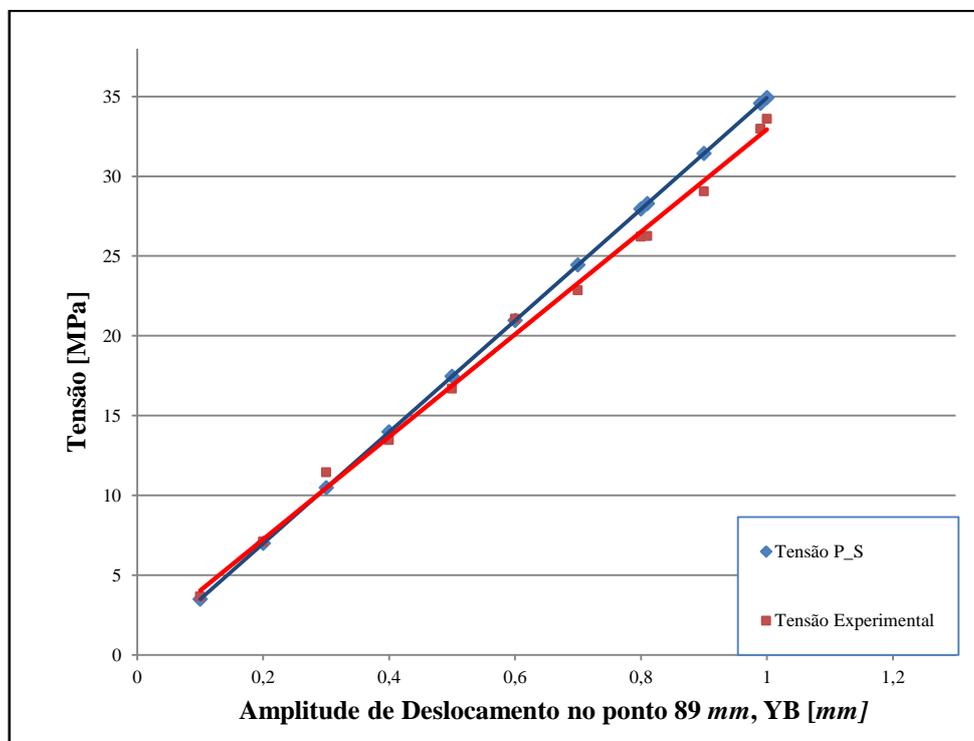


Figura 5.10. Tensão P-S por Tensão Experimental para resultados com EDS de 20% de RTS.

Os gráficos da Figura 5.11 mostram as respostas dinâmicas em tensões obtidas da amostra do cabo CAL 1055 MCM, submetido à **EDS** de 25,6% de **RTS**, que corresponde à carga de esticamento de 3.980 *kgf*. Estas amostras foram excitadas com frequências na faixa de 18 a 21 *Hz*.



**Figura 5.11. Tensão experimental e de P-S por amplitude de deslocamento YB (EDS 25,6% de RTS).**

O gráfico da Figura 5.11 apresenta resultados similares ao gráfico anterior para **EDS** de 20% de **RTS**. Onde é possível observar que para menores deslocamentos os resultados tiveram melhores aproximações. Entretanto, observando os erros médios entre as tensões experimentais e as teóricas apresentadas na Figura 5.12, verifica-se uma oscilação acentuada para todos os deslocamentos. Isso porque a **EDS** ou carga de esticamento do condutor foi maior do que os ensaios anteriores. E, conforme já mencionado, quanto maior a carga de esticamento aplicada ao cabo CAL 1055 MCM tornou-se mais complicado o controle do ensaio, logo, os erros médios das tensões experimentais e teóricas serão maiores. Assim, ao realizar o ensaio dinâmico é importante dar atenção à estabilização dos ensaios, pois quanto mais ocorre oscilação dos valores das amplitudes de deslocamentos no *software Skaker Control*, o erro entre os valores de tensão experimental e teórica tenderá a aumentar.

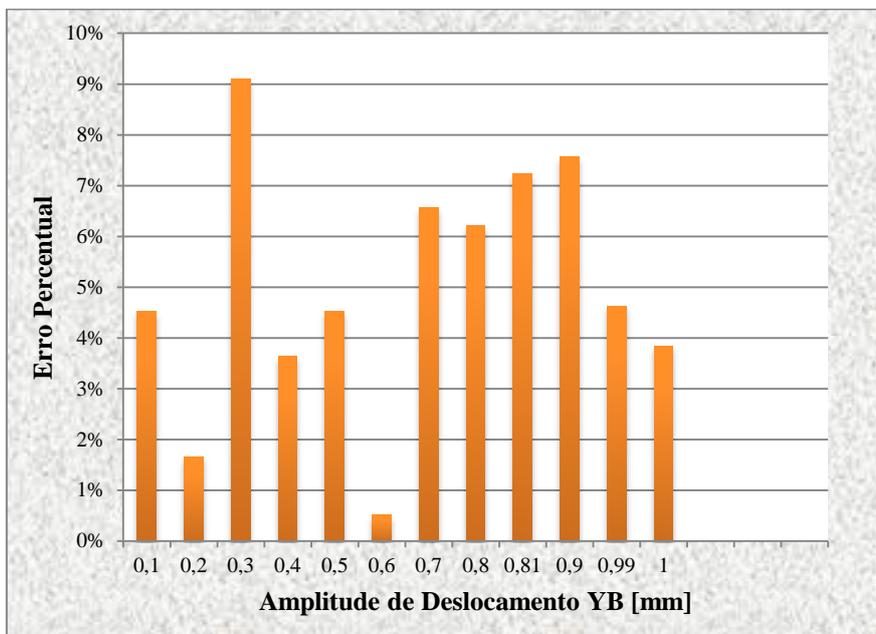


Figura 5.12. Erro médio entre os resultados da tensão teórica com a tensão experimental para cada deslocamento Y<sub>B</sub> (EDS de 25,6% de RTS).

A Figura 5.13 apresenta os resultados (tensão P-S por tensão experimental) para os ensaios com **EDS** de 25,6% de **RTS**, onde foi incluída uma reta de correlação perfeita. Nota-se que houve uma oscilação significativa dos valores das tensões em relação à reta correlação ideal. No entanto, é possível observar que para tensões menores, na faixa de 3 a 20 *MPa*, os resultados aproximaram mais do que considera-se ideal.

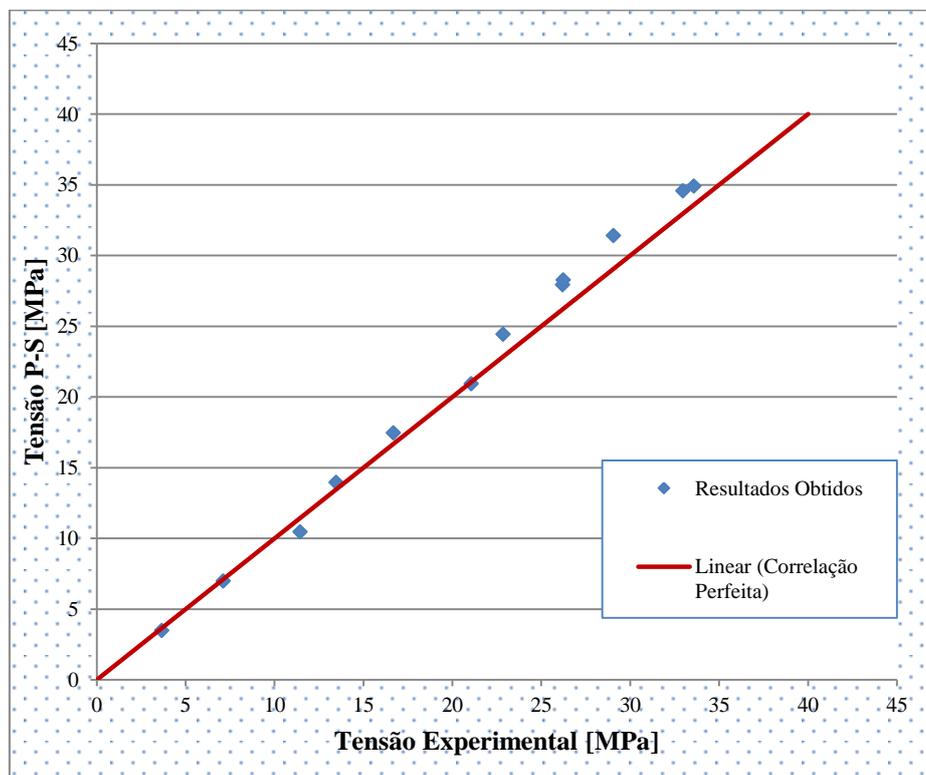
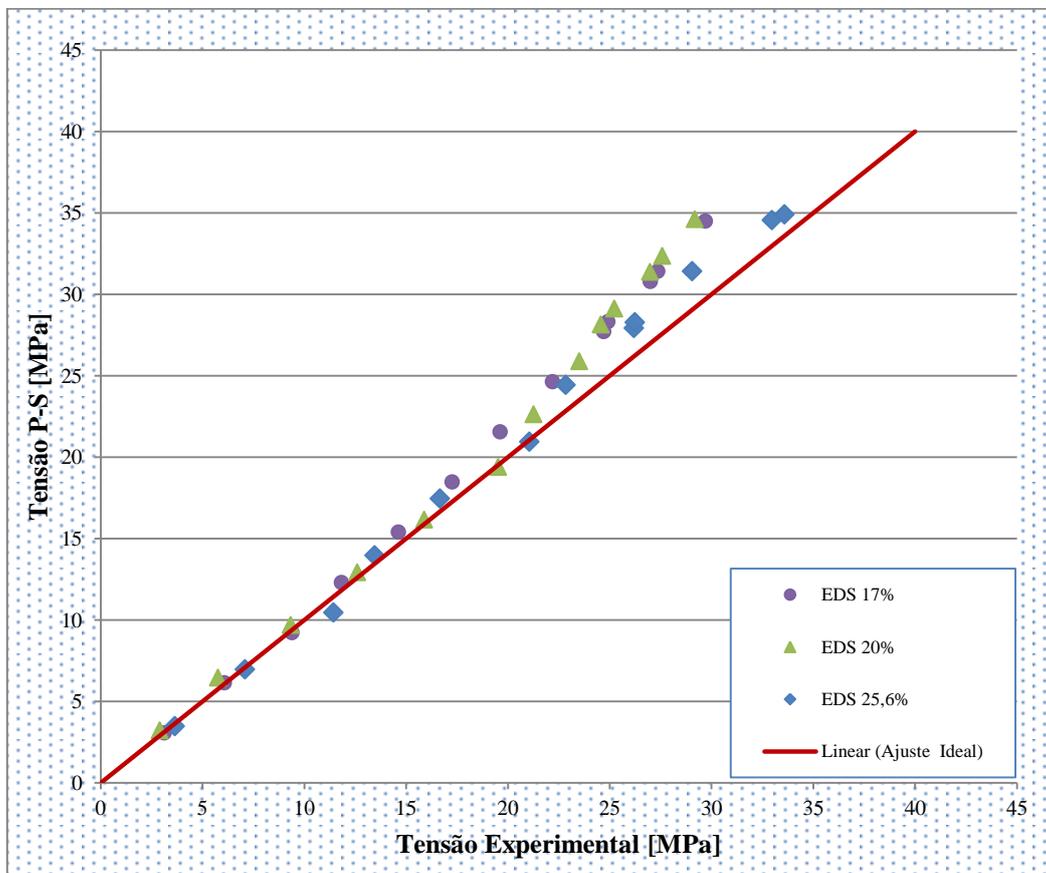


Figura 5.13. Tensão P-S por Tensão Experimental para resultados com EDS de 25,6% de RTS.

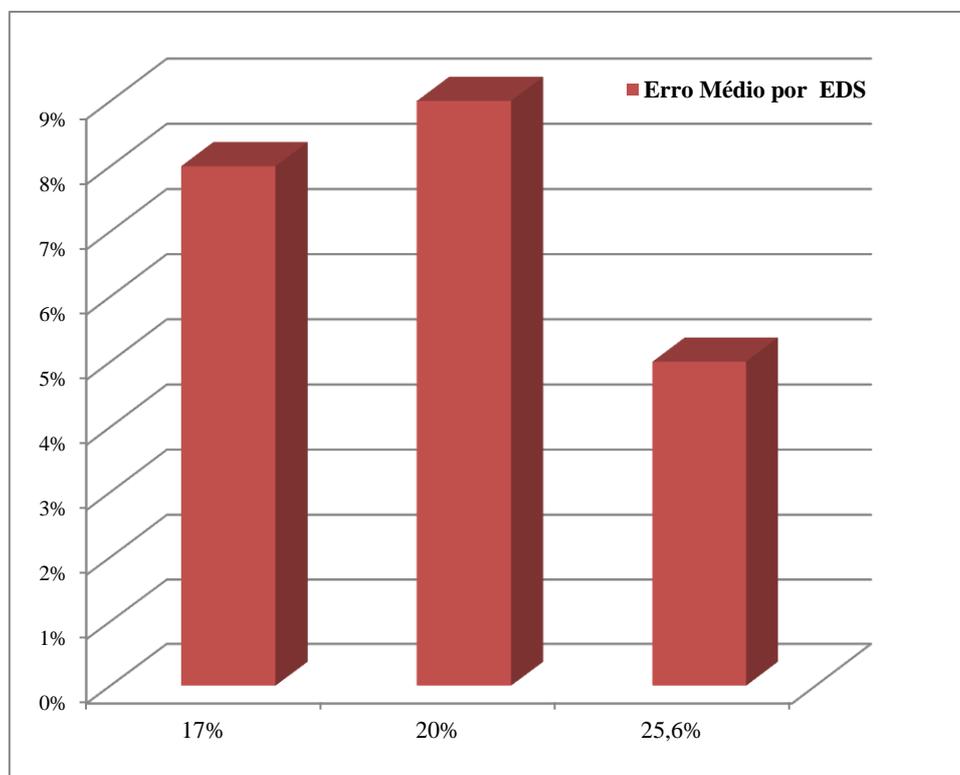
Na Figura 5.14 foram plotado todos os valores de tensões para **EDS** de 17%, 20% e 25,6% de **RTS**, com objetivo de comparar esses resultados com a reta de correlação perfeita e verificar qual carga de esticamento aplicada ao condutor CAL 1055 MCM melhor se aproximou do comportamento considerado ideal. Nota-se que, quando o cabo foi submetido à **EDS** de 17% de **RTS**, que corresponde à carga de esticamento de 2.660 *kgf*, os resultados tiveram um comportamento linear, ou seja, a medida que aumentou-se as tensões, estas foram distanciando-se gradativamente da reta de correlação perfeita, sem apresentar oscilações acentuadas, como ocorreram com os dados obtidos quando aplicou-se uma carga de esticamento maior ao cabo condutor.



**Figura 5.14. Tensões para EDS de 17%, 20% e 25,6% comparadas com a reta de correlação perfeita.**

Através do gráfico de erros médios percentuais entre as tensões teóricas e as experimentais apresentadas na Figura 5.15 para cada carga de esticamento o qual o cabo foi submetido, nota-se que, para **EDS** de 25,6% de **RTS** o erro médio foi o menor apresentado, comparando-o com os erros dos ensaios realizados com **EDS** de 17% e 20% de **RTS**. No entanto, apesar de apresentar um erro menor, considerando as médias dos erros para esta carga de esticamento, vale ressaltar que, foram os ensaios nos quais

os resultados apresentaram maiores oscilações. Assim, a tendência é que aumentando-se a carga de esticamento do condutor, as tensões calculadas usando a equação de **P-S** e as tensões obtidas experimentalmente se aproximem. Porém, quando o cabo é submetido a uma maior carga de esticamento, controlar os ensaios torna-se desafiador, comprometendo os resultados.



**Figura 5.15. Erros percentuais médios para cada EDS aplicada nos ensaios.**

As comparações realizadas nesta seção mostraram que há uma concordância muito satisfatória dos resultados experimentais com os teóricos, fornecidos pela fórmula de **P-S** para o cabo CAL 1055 MCM. Assim, para os níveis de amplitudes de vibração avaliados ( $Y_B$  de 0,1 a 1,12 mm) a formulação de Poffenberger-Swart representou bem a tensão nominal na região da falha. Onde, o maior erro apresentado entre os resultados teóricos e experimentais da tensão dinâmica, foi de 15,5% para deslocamento  $Y_B$ , de 1,07 mm, submetido à carga de esticamento de 3125 kgf ou **EDS** de 20% de **RTS**. Os demais ensaios apresentaram erros na faixa 1% a 10%.

### 5.1.3 Resultados para Carregamento Estático

Foram feitos cálculos teóricos das tensões médias e deformações utilizando as equações 5.1 e 5.2, respectivamente. A fim de validar os resultados teóricos encontrados

para cada nível de **EDS**, foram realizadas comparações destes com os valores obtidos experimentalmente.

$$\sigma_{med} = \frac{\text{Carga de esticamento [N]}}{A [mm^2]} \quad (5.1)$$

Onde a *carga de esticamento (EDS)* é o percentual da carga de ruptura do cabo condutor, esses valores são apresentados na Tabela 4.5. E, **A** é o valor da área da seção transversal do cabo condutor CAL 1055 MCM, esse valor é  $534,5 \text{ mm}^2$ .

Para calcular a deformação teórica  $\varepsilon_t$  foram utilizados os valores de tensões médias  $\sigma_{med}$  obtidos com a equação 5.1, e então, aplicou-se a equação da Lei de Hooke.

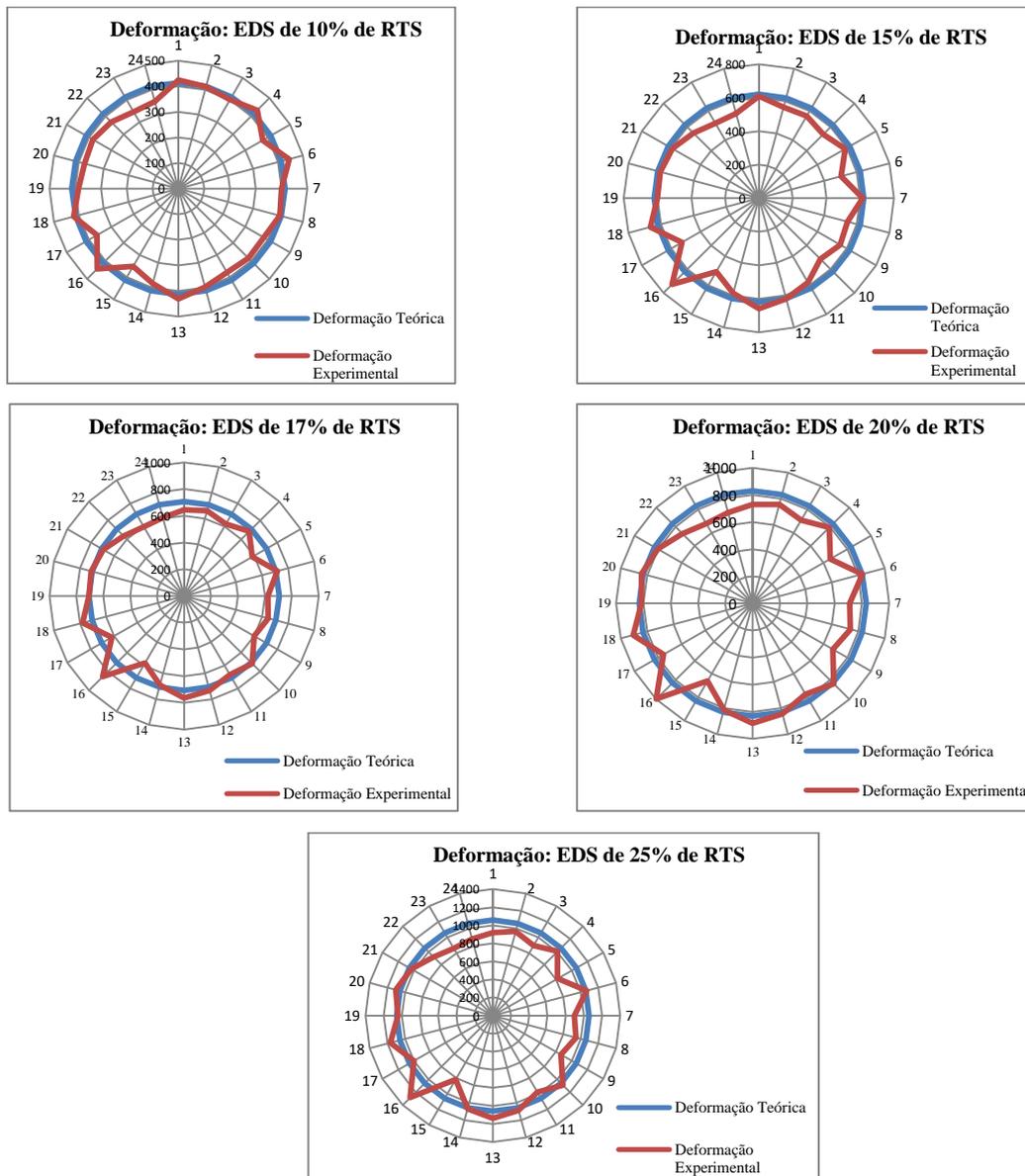
$$\varepsilon_t = \frac{\sigma_{med}}{E} \quad (5.2)$$

A Tabela 5.2 apresenta os valores de tensões médias e deformações obtidos teoricamente através das equações 5.1 e 5.2.

**Tabela 5.2. Cálculos teóricos da tensão média e deformações do cabo CAL 1055 MCM.**

CÁLCULOS TEÓRICOS				
Carga de Ruptura [kgf]	EDS (Every Day Stress) [%]	Carga de esticamento [kgf]	Tensão Média [MPa]	Deformação [ $\mu$ strain]
15.549	5	780	15	206
	10	1550	28	413
	15	2330	43	620
	17	2660	48	706
	20	3120	57	830
	25,6	3980	73	1058

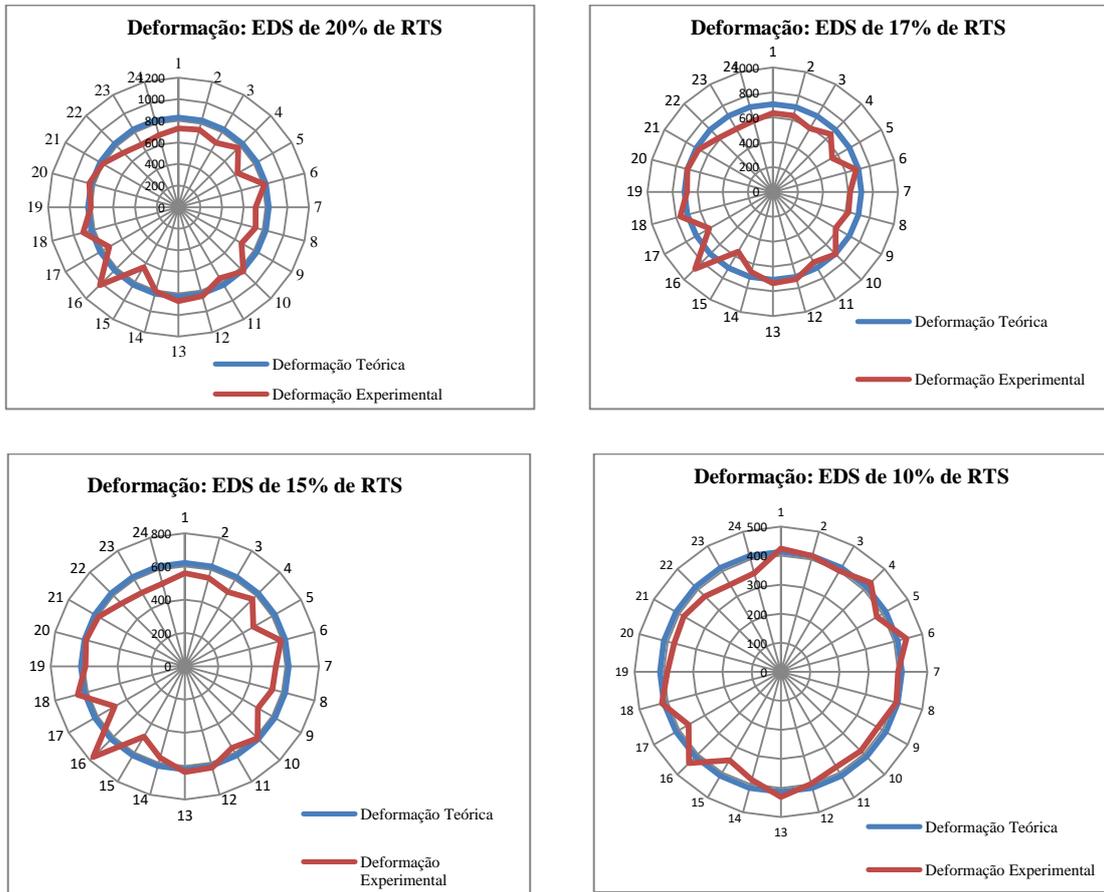
Os resultados das deformações obtidos no procedimento experimental na etapa crescente do teste para **EDS** de 10%, 15%, 17% e 25,6% de **RTS** são apresentados nos gráficos das Figuras 5.16. Estes gráficos são do tipo roseta, onde a enumeração de 1 a 24 representa cada fio da camada externa do condutor CAL 1055 MCM.



**Figura 5.16. Gráficos dos ensaios experimentais (crescente) para níveis de EDS de 10%, 15%, 17%, 20% e 25,6% de RTS.**

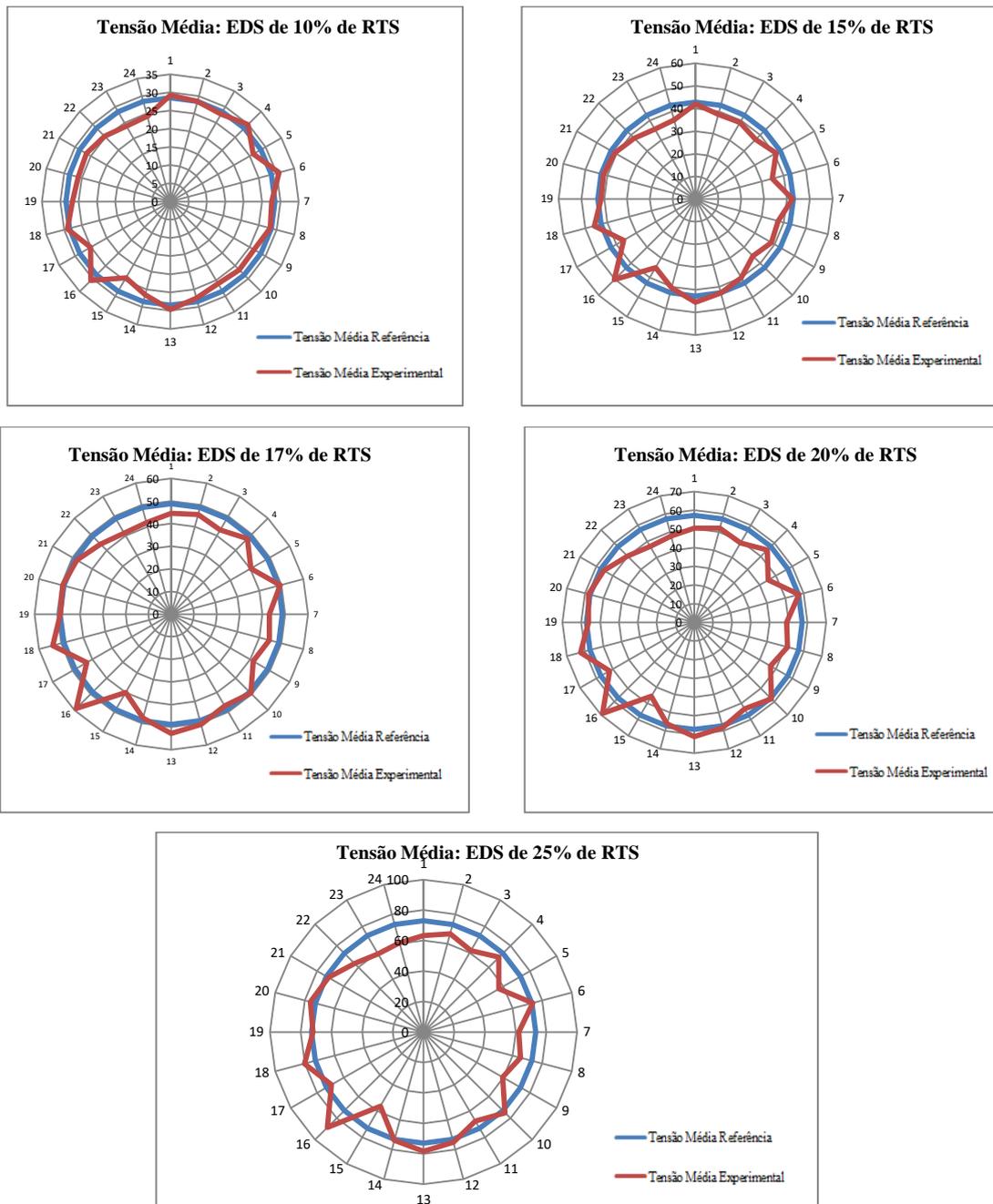
É possível verificar nos gráficos da Figura 5.16 que houve uma aproximação significativa dos resultados obtidos dos cálculos teóricos (linha azul) com os encontrados através dos procedimentos experimentais (linha vermelha).

Na Figura 5.17 são apresentados os gráficos com os resultados do teste na etapa decrescente. Nota-se que os resultados ficaram próximos dos valores encontrados com o teste da etapa crescente.

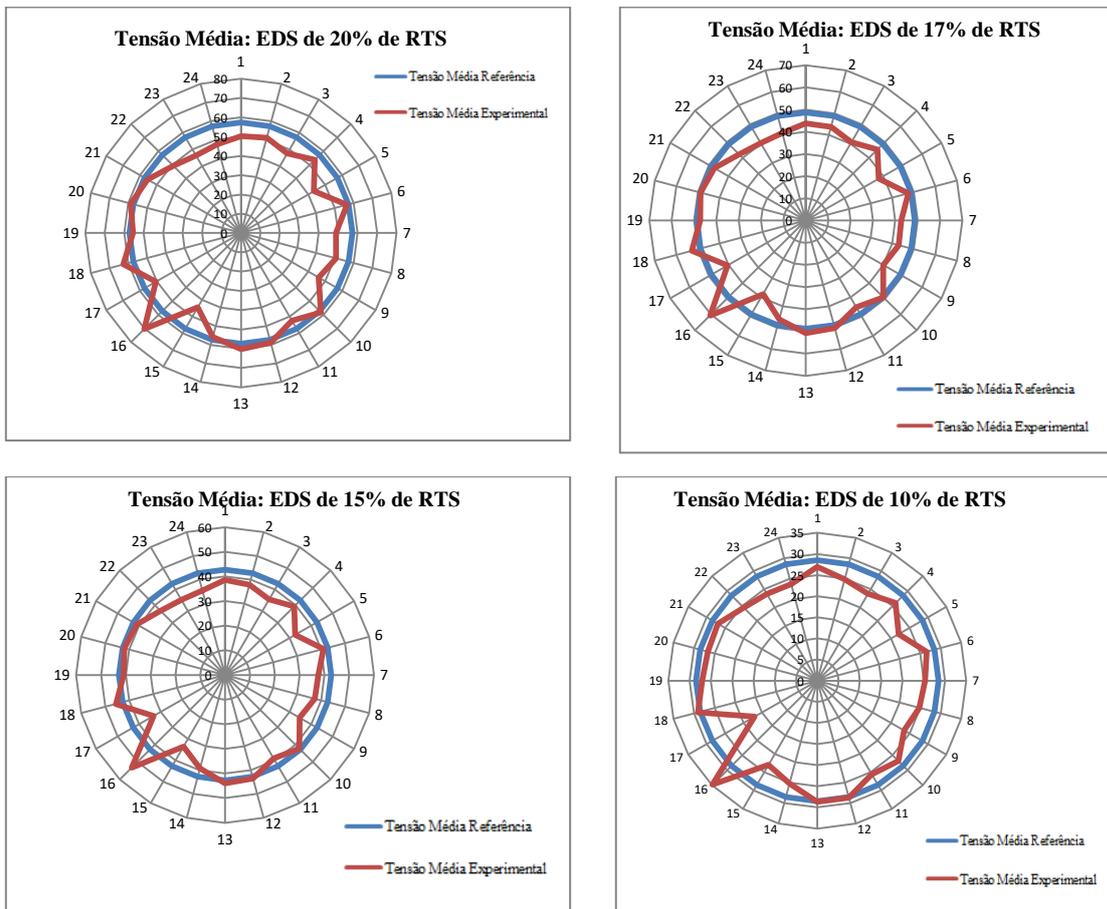


**Figura 5.17. Gráficos dos ensaios experimentais (decrecente) para níveis de EDS de 20%, 17%, 15% e 10% de RTS.**

Foram plotados os gráficos com os valores das tensões médias obtidas com os ensaios experimentais. Ao avaliar esses gráficos, nota-se que os resultados teóricos se aproximaram de forma aceitável com os valores obtidos com o experimento, tanto na etapa crescente como na decrescente, conforme é observado nos gráficos das Figuras 5.18 e 5.19, respectivamente.

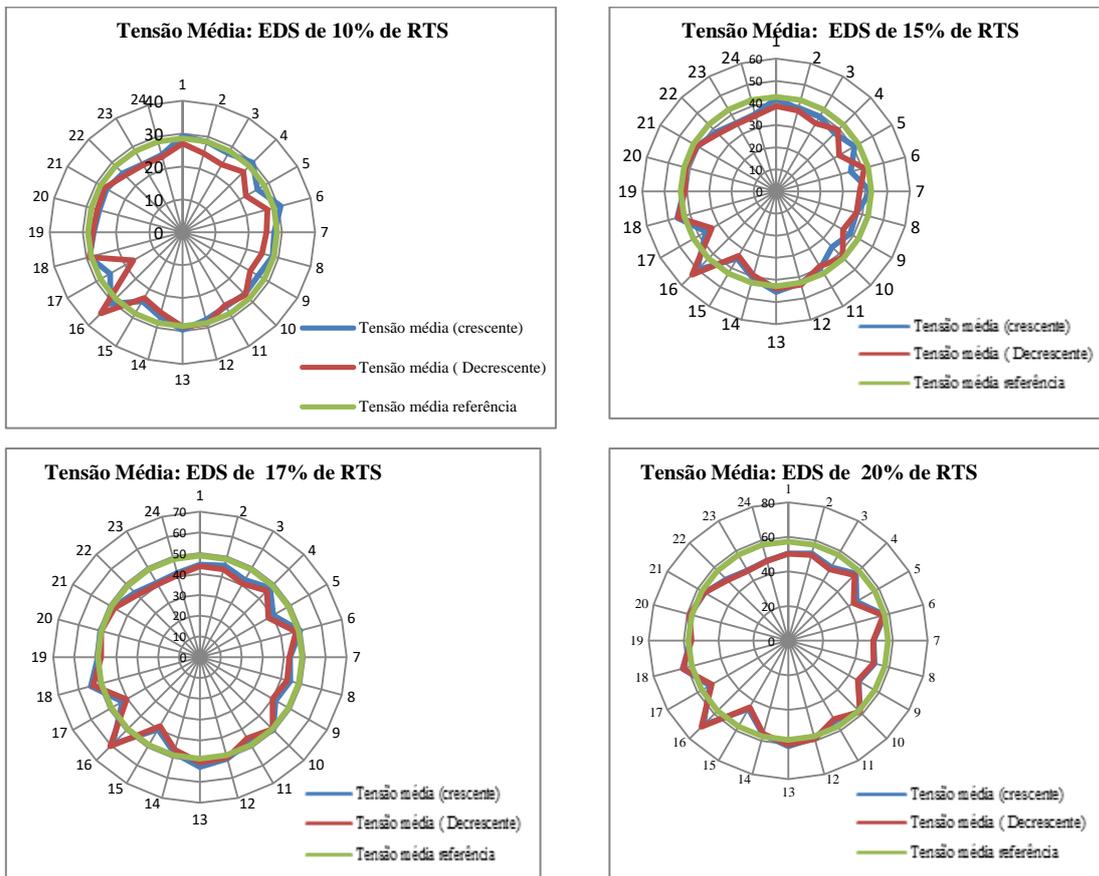


**Figura 5.18. Gráficos dos ensaios experimentais (crescente) para níveis de EDS de 10%, 15%, 17%, 20% e 25,6% de RTS.**



**Figura 5.19. Gráficos dos ensaios experimentais (decrecente) para níveis de EDS de 20%, 17%, 15% e 10% de RTS.**

Como já mencionado, o ensaio estático com o cabo CAL 1055 MCM foi realizado em duas etapas de níveis de **EDS**: crescente e decrecente. O objetivo foi verificar a aderência dos resultados utilizando duas metodologias diferentes. Além disso, foi possível analisar quais das etapas teriam melhor concordância com os valores teóricos encontrados. Neste sentido, para melhor visualização, os gráficos da Figura 5.20 apresentam os resultados das tensões médias na etapa crescente e decrecente, juntamente com os valores teóricos das mesmas.

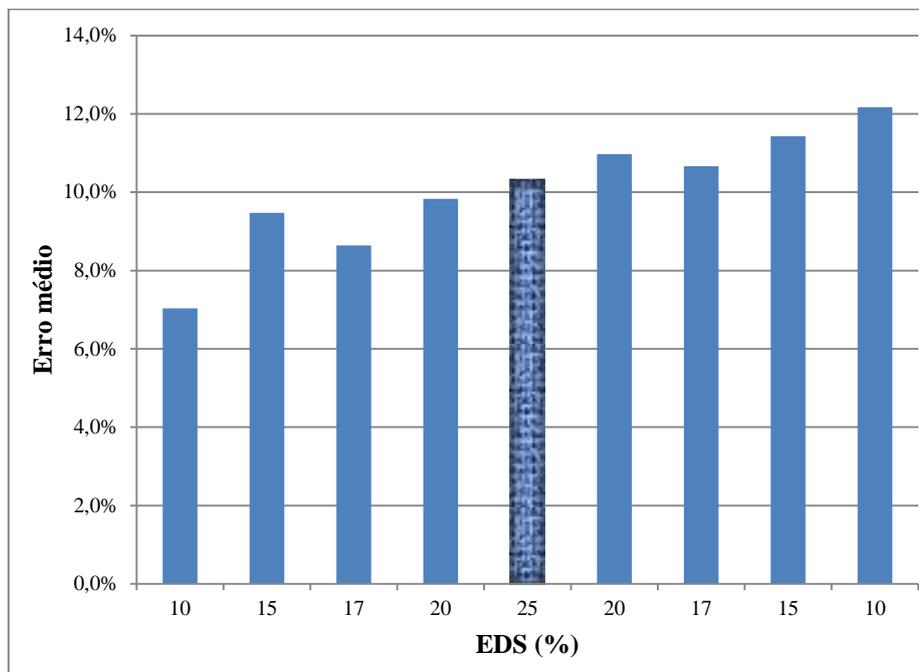


**Figura 5.20.** Gráficos dos valores das tensões médias na etapa crescente e decrescente com as tensões médias teóricas para níveis de EDS de: 10%, 15%, 17%, 20% e 25,6% de RTS.

Assim, para os níveis de **EDS** de 10% e 15% de **RTS**, os resultados das tensões médias calculadas analiticamente tiveram melhor concordância com os ensaios experimentais na etapa crescente. No entanto, para **EDS** de 17% e 20% as tensões médias não tiveram variações relevantes para os ensaios feitos na etapa crescente e decrescente, ou seja, os resultados se aproximaram significativamente.

A fim de melhor verificar a adesão dos valores das deformações e das tensões médios teóricos com os valores obtidos com os testes experimentais, são apresentados os gráficos da Figura 5.21. Onde, é possível observar os erros médios encontrados ao comparar os resultados teóricos com os experimentais para cada nível de **EDS** em ambas as etapas, crescente e decrescente.

Nota-se que na etapa crescente do ensaio estático, o percentual dos erros médios encontrados das tensões médias teóricos com os ensaios experimentais foi menor que o percentual dos erros calculados na etapa decrescente. Assim, a melhor metodologia para realização do ensaio estático para obter as tensões médias dos fios de um cabo condutor experimentalmente é aumentar gradativamente os níveis de **EDS** até o valor máximo planejado para o ensaio, ou seja, a “etapa crescente” do ensaio mostrou-se mais eficaz.



**Figura 5.21. Erros médios entre os resultados teóricos e experimentais das deformações e tensões médias, nas etapas crescente e decrescente.**

Portanto, através do ensaio estático é possível mensurar o efeito de fatores que podem agravar a redução da vida do cabo, como por exemplo, a influência da variação da **EDS** sobre a tensão média nos fios de um condutor, que podem acelerar o processo de fadiga no cabo.

Além disso, vale ressaltar que para o treinamento da rede neural artificial, que também é objetivo desta pesquisa, é necessário conhecer os valores das tensões médias, que são parâmetros utilizados como entrada para a **RNA**. Assim, os valores calculados teoricamente para o treinamento da rede, foram validados através do ensaio estático, proporcionando parâmetros mais confiáveis para o treinamento da **RNA**.

## 5.2 ANÁLISE DAS FALHAS

Embora não seja o foco deste trabalho, nesta seção é feita uma breve abordagem sobre análise de falhas. Pois como foram apresentados resultados de ensaios de fadiga na seção 5.1.1, torna-se importante mostrar as características associadas a este tipo de falha. Neste sentido, a seguir é realizada uma breve revisão bibliográfica sobre análises de falhas e alguns resultados obtidos com o cabo CAL 1055 MCM a nível macro e microscópico também são exibidos.

A análise de falhas tem como principal objetivo descobrir o que causou a falha e como é possível corrigi-la, para que falhas futuras sejam evitadas (Callister, 2007). Assim, em cabos condutores de energia é fundamental fazer esta análise, tendo como

meta encontrar possíveis causas das falhas e tentar ajustar os problemas que as causam.

Para estabelecer um mecanismo de predição, é essencial avaliar as superfícies de falha, que nos metais ocorrem de várias maneiras, e normalmente estabelecem um padrão morfológico que permitem a determinação da causa da falha. Essa avaliação é feita no formato macro e microscópio analisando a zona de falha. Os danos causados nos fios durante os ensaios de fadiga podem ter diferentes origens. Os contatos entre fios promovem sinais paralelos resultantes de deslizamentos parciais entre os fios, com altas tensões radiais entre os mesmos. Os esforços envolvidos neste tipo de contato causam fadiga por *fretting* (Fig. 5.22) (Fadel, 2010).



**Figura 5.22. Fios rompidos devido o desgaste fio-grampo na camada externa da amostra.**

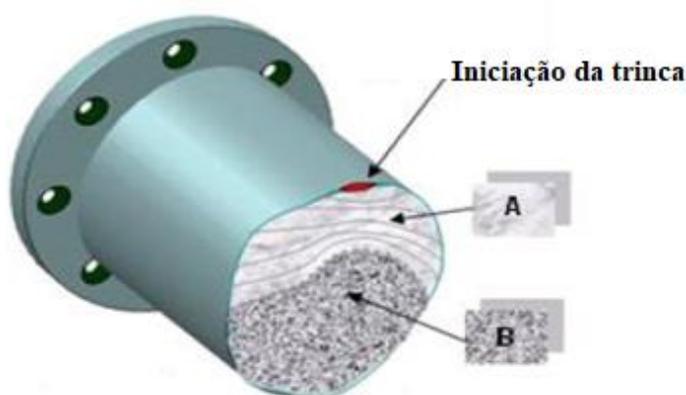
Estudos sobre análise de falhas têm atraído à atenção da comunidade científica, pode-se citar, Frickle e Rawlins (1968), avaliaram através de ensaios de fadiga em cabos condutores, o desgaste por *fretting* causado pelo contato entre fios e ferragens devido o movimento de amplitude. Concluíram que esse fenômeno acelera a falha no cabo condutor, pois verificaram que a iniciação das trincas ocorria sempre nas marcas de micro deslizamentos nesses pontos de contato.

Através de várias fotos de análises metalográficas relativas à *fretting* e a quebra de fios, Moecks (1970), verificou que a “corrosão friccional” influencia de forma significativa na resistência à fadiga dos condutores encordoados. Além disso, pode-se destacar o estudo realizado em 1971 por Dulhunty, por meio de fotos de fios quebrados tiradas próximas ao ponto de fixação dos amortecedores, concluiu-se que as marcas de *fretting* eram os pontos de início das trincas.

Ressalta-se que estes estudos realizados sobre o efeito do *fretting* em cabos condutores, foram confirmados pela CIGRE (1985), onde o mesmo enfatiza que, a falha

de condutores de energia acontece de fato, na região de restrição de movimento do cabo, onde encontra-se o maior nível de tensão. São regiões próximas aos grampos de suspensão, ou esferas sinalizadoras, ou dispositivos amortecedores.

Em 2000, Garcia *et al.*, avaliaram através de um estudo, que a trinca em fadiga avança progressivamente e de forma cíclica, ou seja, a cada novo ciclo de tensão (abertura/fechamento), é possível observar na macroestrutura da superfície de fratura, marcas características que podem ser vistas através do microscópio eletrônico, chamadas de marcas de praia. A Figura 5.23 ilustra as zonas típicas de uma fratura por fadiga: **zona lisa** – relacionada à iniciação e propagação da trinca e a **zona rugosa** – onde ocorre a ruptura catastrófica final (Rosa, 2002).



**Figura 5.23. Representação esquemática do processo de falha por fadiga: Iniciação da trinca, (A) área de propagação da trinca (marcas de praia) e (B) área da ruptura final (Rocha, 2016 (modificado)).**

Azevedo *et al.*, (2008) realizou uma microscopia nos fios do cabo Grosbeak, observou algumas características de fadiga como trincas secundárias, marcas de estria e marcas de *fretting* nos fios do condutor ensaiado. Segundo Zolin (2010), analisar as falhas dos materiais e equipamentos é uma necessidade para o moderno sistema de gestão de produção. Faz-se necessário o conhecimento de como ocorrem às falhas e quais são as possíveis soluções. A falha de um componente ocorre quando não se consegue mais executar a sua função com segurança, isso acontece durante a vida útil do equipamento. Ressaltando ainda estudos realizados em cabos condutores, Fadel *et al.*, (2012) fizeram análise macroscópica de fios do condutor Ibis onde foi possível determinar os tipos de superfície de falha e quantificar as quebras dos fios em relação a sua posição e camada.

Pode-se citar ainda, Botelho (2012), analisou possíveis causas de falhas em materiais metálicos, principalmente em virtude de esforços cíclicos. Buscou-se sucintamente abordar desde o início da formação da trinca no material até a sua ruptura. O autor concluiu que as deformações estavam localizadas ao longo dos planos de escorregamento, nos contornos do grão e ao redor de irregularidades de superfície causadas por defeitos geométricos ou de composição.

Em um trabalho recente, Kalombo *et al.* (2017), em um estudo comparativo entre os condutores CAL 900 (liga alumínio) e o Tern (alumínio com alma de aço), realizaram análises de falhas nos condutores e verificaram a presença de iniciação da trinca nas áreas de contato entre fios para ambos os condutores, por fim, concluíram que o condutor Tern apresentou um número de ciclos significativamente maior do que o CAL 900 submetidos as mesmas cargas de esticamento.

Como já mencionado, a análise de falha não é o objetivo principal deste trabalho, no entanto, como trata-se de ensaios de fadiga é interessante apresentar as características associadas ao aspecto e posicionamento das falhas obtidas para as quebras de cada amostra de cabo ensaiada, na tentativa de verificar o comportamento das falhas para cada nível de **EDS**. Neste sentido, são apresentadas na seção 5.2.1 análises de falhas a nível macroscópico: mapeamento da posição e ocorrência das falhas. E na seção 5.2.2 são mostradas algumas imagens de fios rompidos para ensaios realizados com **EDS** de 17%, 20% e 25,6% de **RTS**.

### **5.2.1 Mapeamento da Posição e Ocorrência das Falhas**

Para a verificação das falhas é importante observar dois aspectos principais: *i*) a posição de ocorrência da falha com referência à boca do grampo de suspensão e *ii*) o registro da sequência de quebras nas camadas externas e internas. Através desse mapeamento é possível criar metodologias de manutenção apropriadas, ou até mesmo, se necessário, modificar as ferragens utilizadas nas linhas de transmissão, com intuito de diminuir o efeito da fadiga por *fretting*.

A Tabela 5.3, 5.4 e 5.5 apresentam as distribuições das falhas dos 27 ensaios realizados com o cabo CAL 1055 MCM, para **EDS** de 17% e 20% e 25,6% de **RTS**, respectivamente.

Tabela 5.3. Distribuições das falhas nos fios das amostras ensaiadas com EDS de 17%.

Yb	ensaios	Quebras Externas			Quebras Internas					
		localização	1ª Camada		2ª camada		3ª camada		4ª camada	
			Posição da Falha (PF)[mm]	Nº Quebras	PF [mm]	Nº Quebras	PF [mm]	Nº Quebras	PF [mm]	Nº Quebras
0,92	1	base	59,05	2	80,73	1	70,62	1		
			54,53							
		topo			69,09	4	70,62	1		
					80,62					
				86,33						
				79,48						
	2	base	59,62	4	60,59	3	74,03	3	59,94	1
			58,33		73,13		69,75			
			54,75		76,06		61,66			
			69,59							
	topo									
	3	base	72,00	3	54,63	2				
			72,66		61,67					
			69,01							
		topo			85,73	5				
				83,44						
				73,74						
			94,74							
			87,78							
1,02	1	base	44,76	2	46,54	1	70,77	1		
			46,98							
		topo	70,29	1	50,06	4				
				38,42						
				62,78						
				52,32						
	2	base	62,10	2	63,06	3	52,02	2		
			53,01		73,71		49,21			
					38,55					
	topo	80,22	2	84,53	2					
		84,69		74,50						
	3	base			29,40	2				
				41,30						
topo		70,01	2	21,30	7					
		70,40		60,60						
				59,17						
				52,26						
				43,04						
		51,23								
		50,97								
1,12	1	base			61,00	1				
					61,04		2			
		topo	66,01	3	36,65					
		64,45								
		64,59								
	2	base	48,00	1	40,20	2				
					42,10					
		topo	72,70	5	44,60	5	59,23	2		
			69,35		59,90		39,00			
			67,32		50,30					
			68,70		71,70					
		79,20	48,20							
	3	base	48,73	3			45,06	2		
48,94					34,59					
51,76										
topo		72,96	2	65,47	5	71,28	1			
		71,95		52,37						
				61,44						
			69,16							
			78,40							

Tabela 5.4. Distribuições das falhas nos fios das amostras ensaiadas com EDS de 20%.

				Quebras Externas		Quebras Internas				
	Y <sub>B</sub>	ensaios	localização	1ª Camada		2ª Camada		3ª Camada		
				Posição da Falha (PF)[mm]	Nº Quebras	PF [mm]	Nº Quebras	PF [mm]	Nº Quebras	
20% de RTS	1,07	1	base	58,97	2					
				60,2						
			topo	87,15	4					
				79,92						
				81,59						
		84,09								
		2	base	54,08	1					
				71,62	1	72,63	5			
					80,28					
				83,93						
				83,23						
			71,43							
	3	base			58,1	3				
					66,9					
					69,9					
		topo			67,45	3				
					61,89					
			60,48							
	0,97	1	base	47,7	1	13,78	2			
								15,91		
			topo			57,01	3			
						65,56				
				72,57						
		2	topo		2	75,72	6	86,75	3	
85,63				87,87		75,32				
88,05				67,5		86,32				
				83,85						
				89,17						
				94,18						
3		base	51,15	2	50,8	1	49,69	2		
	46,37				41,33					
	topo	73,59	1	60,75	2					
				69,75						
0,87	1	base					56,58	3		
							60,07			
							68,67			
		topo	40,95	4	56,03	6				
			70,43		71,12					
			73,43		46,64					
			75,88		78					
					72,11					
					66,39					
	2	base	57,06	1	62,59	2				
							71,41			
		topo	78,86	2	61,05	1				
			78,01							
3	topo		2	39,36	1					
		64,36		37,36		46,15	1			
		64,58		40,44						

Tabela 5.5. Distribuições das falhas nos fios das amostras ensaiadas com EDS de 25,6%.

	Yb	ensaios	localização	Quebras Externas		Quebras Internas							
				1ª Camada		2ª camada		3ª camada		4ª camada			
				Posição da Falha (PF) [mm]	Nº Quebras	PF [mm]	Nº Quebras	PF [mm]	Nº Quebras	PF [mm]	Nº Quebras		
25,6% de RTS	0,81	1	base	42,32	6	74,58	2	73,77	1				
				51,31		69,77							
				50,51									
				50,46									
				51,78									
				55,73									
		topo	76,62	2									
			84,88										
		2	base	55,71	1	57,47	1						
				76,14	2	52,43	2						
		topo	78,38	50,96									
		3	base	55,31	3								
	52,24												
	55,35												
	topo		82,84	3	67,77	4							
			79,14		44,12								
			79,01		49,25								
				55,76									
	0,90	1	base	66,21	3			75,07	1				
				73,72									
				58,83									
			topo	61,22	2	56,71	1						
		66,30											
		2	base	49,10	1	56,13	3						
						61,11							
					30,08								
			topo	75,10	2	48,22	1						
		75,01											
		3	base	38,46	2	49,45	3						
				39,55		45,47							
	57,06												
topo	51,39		3	76,01	3								
	59,90			79,15									
	54,79			64,96									
0,99	1	base	52,81	1	31,32	2							
					42,84								
		topo	58,62	3	55,55	2							
			61,71		27,68								
	58,56												
	2	base	51,02	1	89,31	5							
					117,41								
					111,16								
					92,25								
		topo	80,51	3	91,13	3							
			79,75		93,78								
			80,83		91,18								
80,89													
3	base	53,39	2	43,73	2								
		51,03		49,93									
	topo	74,31	4	67,38	2								
		72,58		52,01									
69,69													
73,49													

Foram contabilizadas 95 quebras nos nove ensaios realizados para EDS de 17%, 69 quebras para ensaios com EDS de 20% e 82 quebras para os nove ensaios com EDS de 25,6% de RTS. São determinadas as falhas no condutor de acordo com a camada de ocorrência, elas podem acontecer na camada externa ou interna. Considerando todos os ensaios realizados, 60% das falhas aconteceram nas camadas internas e 40% nas externas conforme é possível verificar nas Figuras 5.24, 5.25, 5.26.

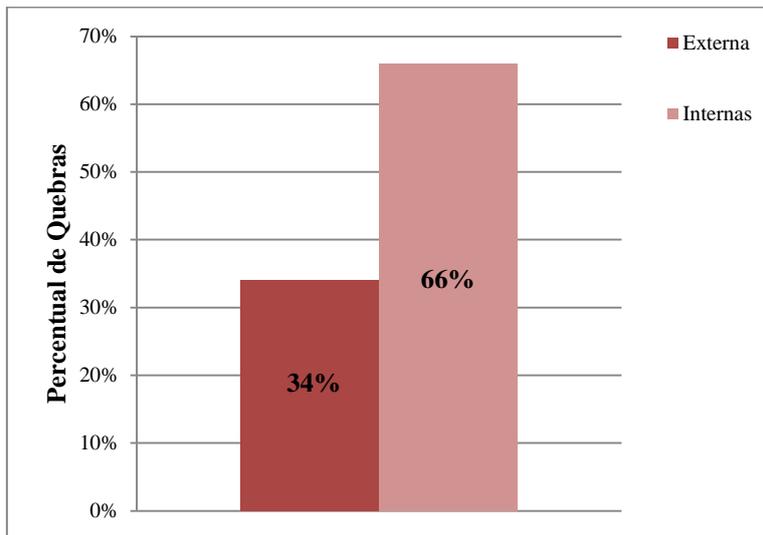


Figura 5.24. Percentual das camadas onde ocorreram as falhas para EDS de 17%.

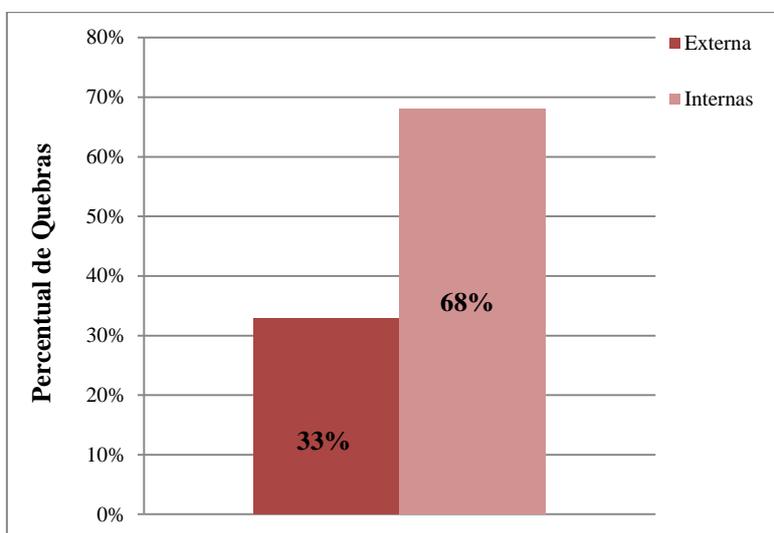


Figura 5.25. Percentual das camadas onde ocorreram as falhas para EDS de 20%.

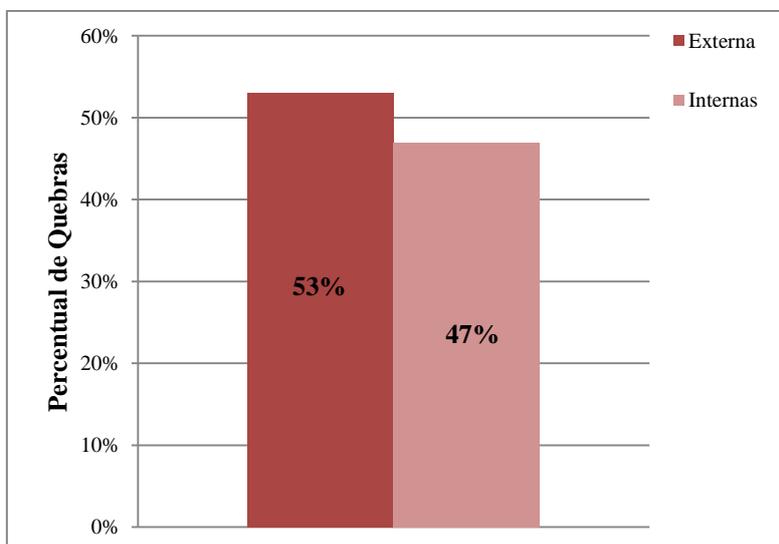


Figura 5.26. Percentual das camadas onde ocorreram as falhas para EDS de 25,6%.

Foi realizada também uma análise da distribuição das quebras de acordo com a sua posição relativa ao grampo conforme a Figura 5.27.

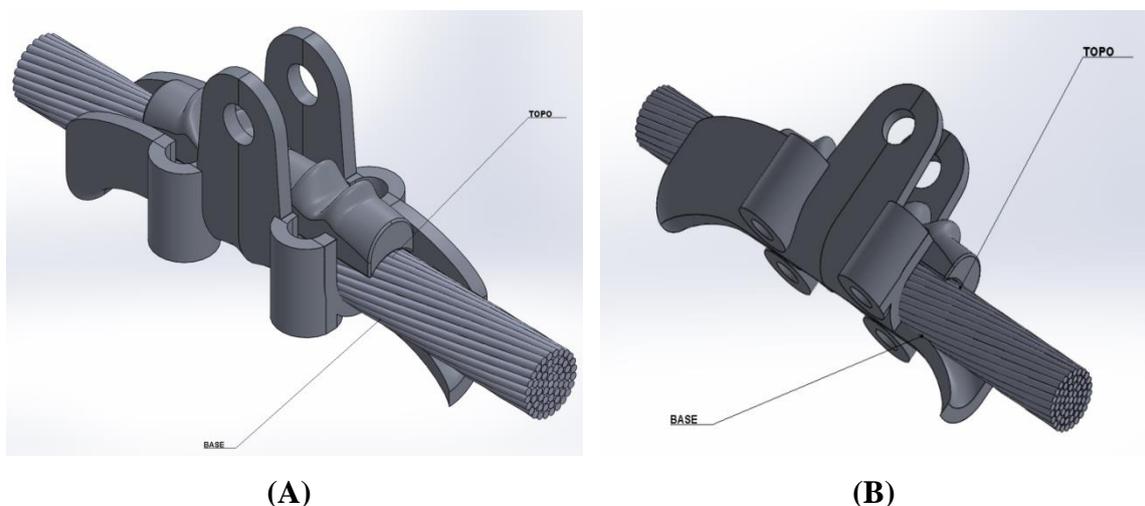


Figura 5.27. Localização do topo e da base da montagem cabo/grampo: (A) Vista Isométrica e (B) Imagem rotacionada.

Para os ensaios com 17% de **RTS** ocorreram 42 falhas na base e 53 falhas no topo. No entanto, para **EDS** de 20% foram 21 falhas na base e 48 falhas no topo e para **EDS** de 25,6% de **RTS**, foram 40 falhas na base e 42 no topo (Fig. 5.28, 5.29, 5.30). Nota-se que os 27 ensaios com o condutor CAL 1055 MCM (**EDS** de 17%, 20% e 25,6% de **RTS**) o maior número de falhas aconteceram no topo, somente quando o condutor foi submetido a 25,6% de **RTS** que 60% das falhas ocorreram na base.

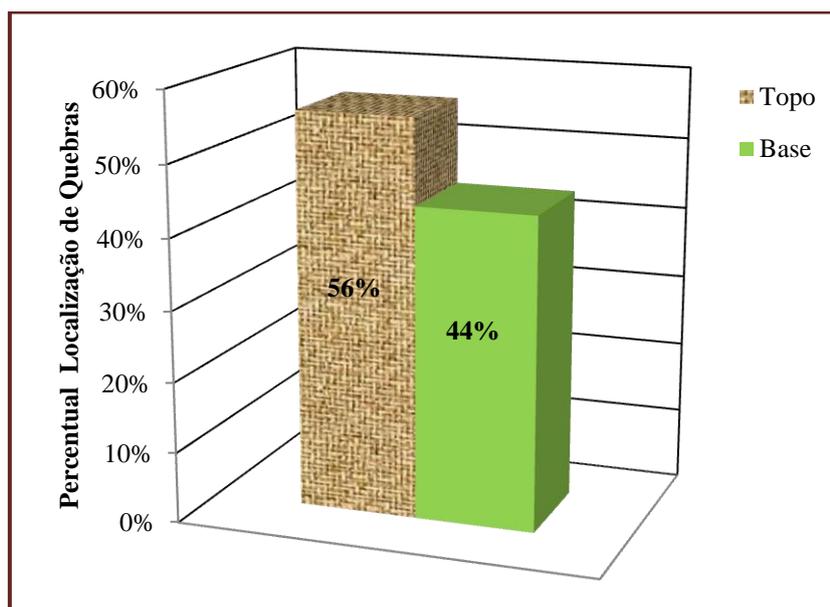
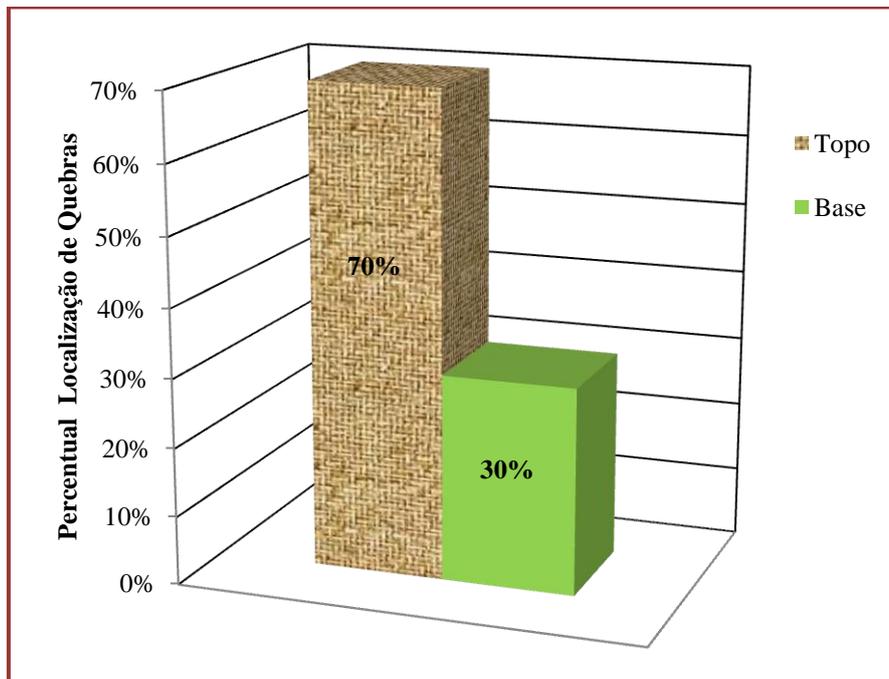
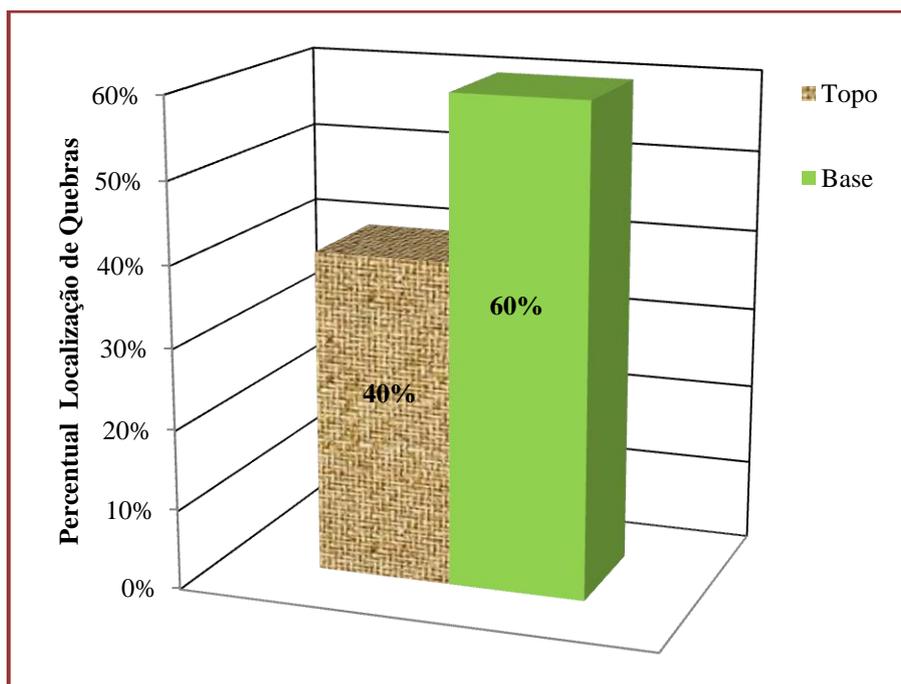


Figura 5.28. Localização das quebras para 17% de RTS.



**Figura 5.29. Localização das quebras para 20% de RTS.**



**Figura 5.30. Localização das quebras para 25,6% de RTS.**

Também é de interesse determinar a posição da falha em relação à boca do grampo de suspensão (a localização dos pontos de falhas é determinada através das distâncias entre os fios rompidos e a saída do grampo de suspensão pelo lado do vão ativo). A Figura 5.31 apresenta como são determinadas essas distâncias.

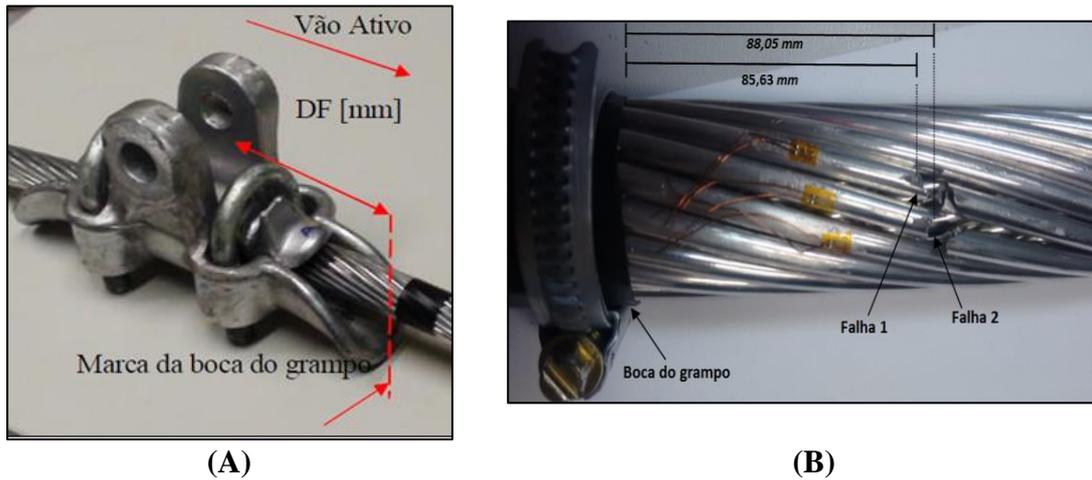


Figura 5.31. (A) Medição da falha a partir da boca do grampo e (B) Localização da distância das falhas na camada externa do ensaio 2 com deslocamento  $Y_B$  de 0,97 mm para EDS de 20%.

As Figuras 5.32, 5.33 e 5.34 apresentam as distâncias médias das falhas por camada para todos os ensaios realizados com as três cargas de esticamento. É possível verificar que as falhas com EDS de 17% de RTS ocorrem entre 52 e 74 mm de distancia da boca do grampo, enquanto que com EDS de 20% e 25,6% de RTS essa distância varia de 53 e 72 mm.

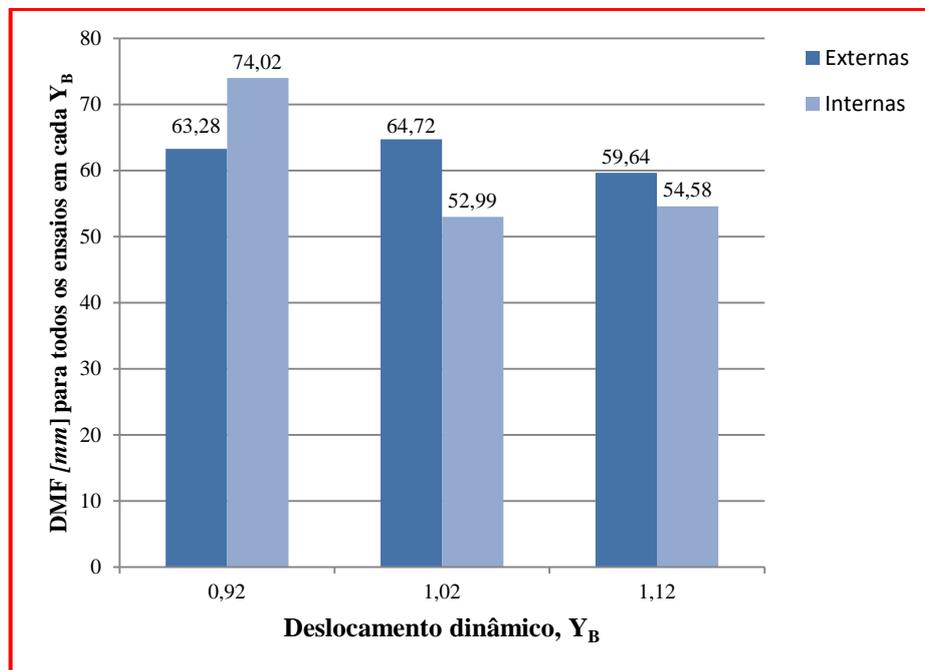


Figura 5.32. Distância média das falhas por camada para EDS de 17% de RTS.

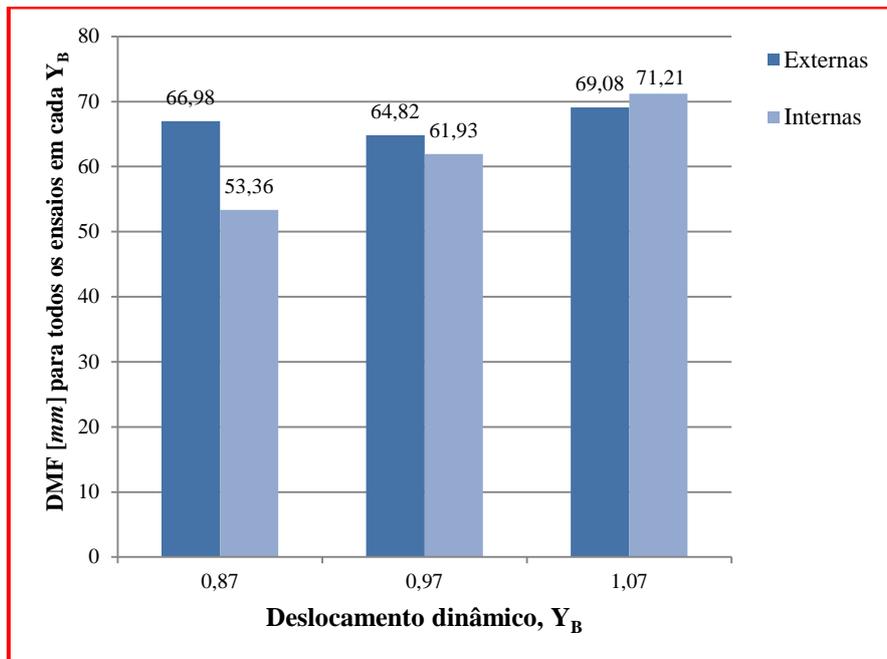


Figura 5.33. Distância média das falhas por camada para EDS de 20% de RTS.

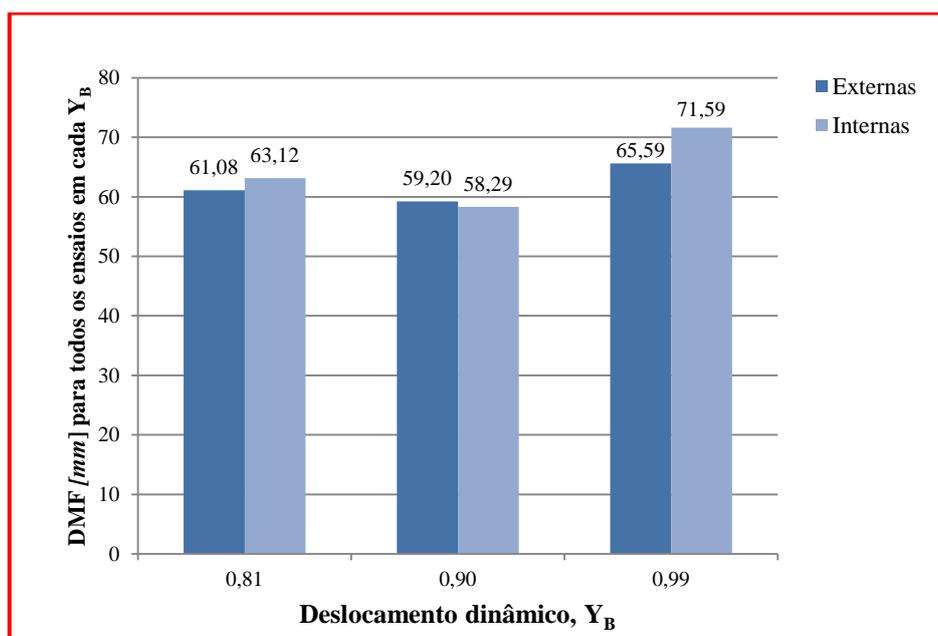


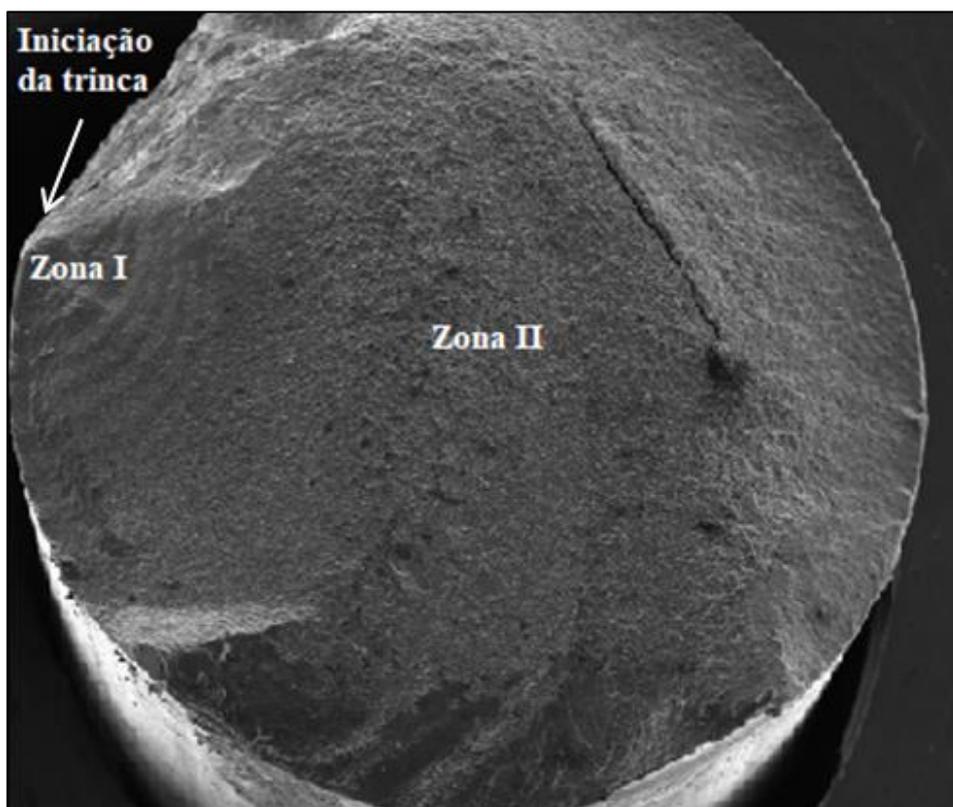
Figura 5.34. Distância média das falhas por camada para EDS de 25,6% de RTS.

## 5.2.2 Análise Microscópica das Superfícies das Falhas

Nesta seção, são apresentadas as análises de falhas feitas através do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), do Grupo de Fadiga Fratura e Materiais (GFFM). Verificou-se que as amostras apresentaram comportamento característico de um material que falha por fadiga, apresentando as três zonas comumente conhecidas, que são a iniciação da trinca, as marcas de praia (nucleação) e a ruptura do material. Todas

as amostras realizadas tiveram comportamento similar, neste sentido, foram escolhidas algumas imagens para mostrar que os fios rompidos possuem características de falhas por fadiga.

Na Figura 5.35 apresenta uma amostra de um ensaio com **EDS** de 17% de **RTS** e deslocamento  $Y_B$  de 1,02 mm, é possível observar onde ocorreu a iniciação da trinca, geralmente isso acontece onde um fio está em contato com o outro. Na zona I, pode-se observar as marcas de praia, que segundo Garcia et al. (2000) é uma marca característica deixada na macroestrutura da superfície da fratura avançando de maneira progressiva e cíclica a cada novo ciclo de tensão. Pode-se observar que, de maneira geral nas marcas de praia, as bandas mais claras representam uma propagação basicamente plana (níveis de tensão mais baixos), já nas escuras, correspondem a uma propagação tortuosa, e mostrando-se rugosas (níveis de tensão mais elevados) (Fadel, 2010). A zona II é a ruptura final, ou falha catastrófica.



**Figura 5.35.** Microscopia realizada em um dos fios rompidos do ensaio 2 com **EDS** de 17% de **RTS** e  $Y_B$  de 1,02 mm.

A Figura 5.36 apresenta uma amostra do ensaio 1 com **EDS** de 20% de **RTS**, com deslocamento  $Y_B$  de 0,97 mm. É possível observar onde ocorreram a iniciação da trinca. No entanto, na zona I a marca de praia não ficou tão evidente como da figura anterior, pois é desafiador encontrar tais marcas, demanda muito tempo e um

conhecimento mais aprofundado do **MEV**. Porém, na zona II é possível observar uma área mais rugosa, onde ocorreu a ruptura final.

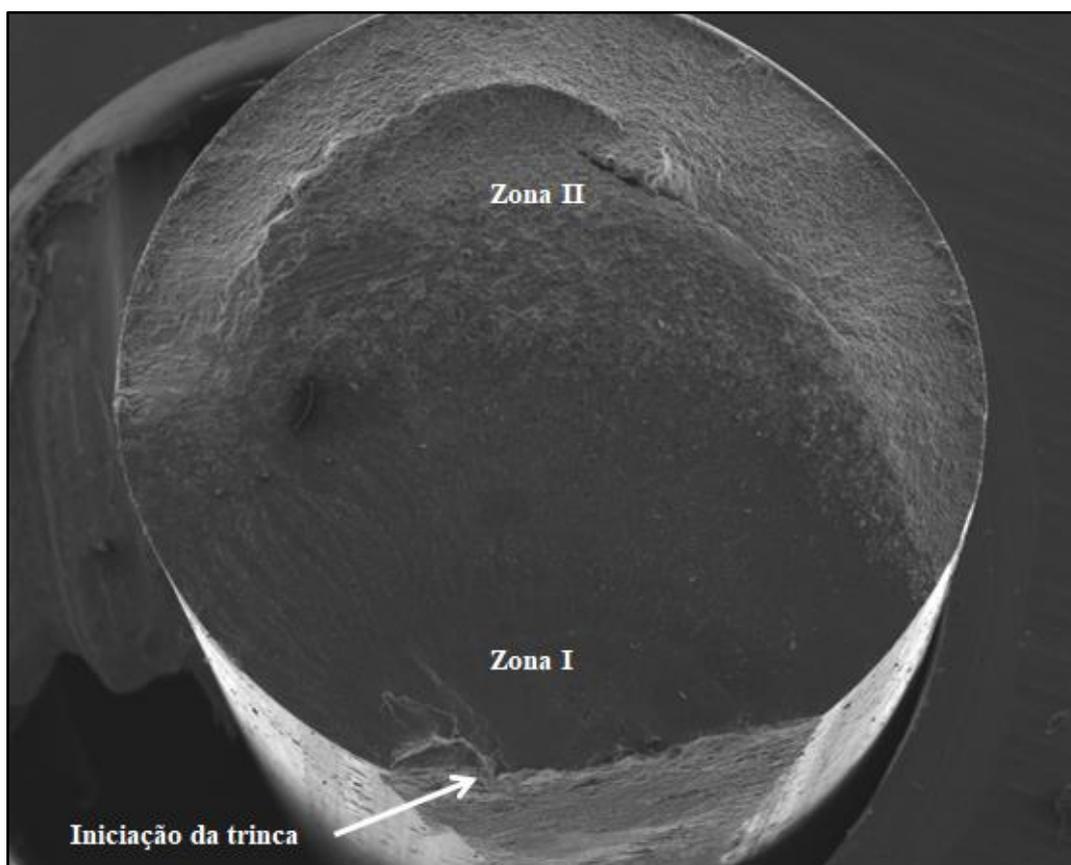


Figura 5.36. Microscopia em um dos fios do ensaio 1 com EDS de 20% de RTS e  $Y_B$  de 0,97 mm.

As Figuras 5.37 e 5.38 apresentam amostras de dois ensaios com **EDS** de 25,6% de **RTS**, com deslocamento  $Y_B$  de 0,81 e 0,99 mm, respectivamente. Nota-se onde a trinca iniciou nas duas imagens, a zona de propagação da trinca também não é tão nítida como na Figura 5.35. Entretanto, na zona II é visível uma área mais rugosa em ambas as figuras, onde ocorreu a ruptura catastrófica. Ressalta-se mais uma vez que todas as imagens feitas com o **MEV** apresentaram as três zonas de falhas, o que prova que de fato, as falhas nos fios do condutor CAL 1055 MCM aconteceram por fadiga.

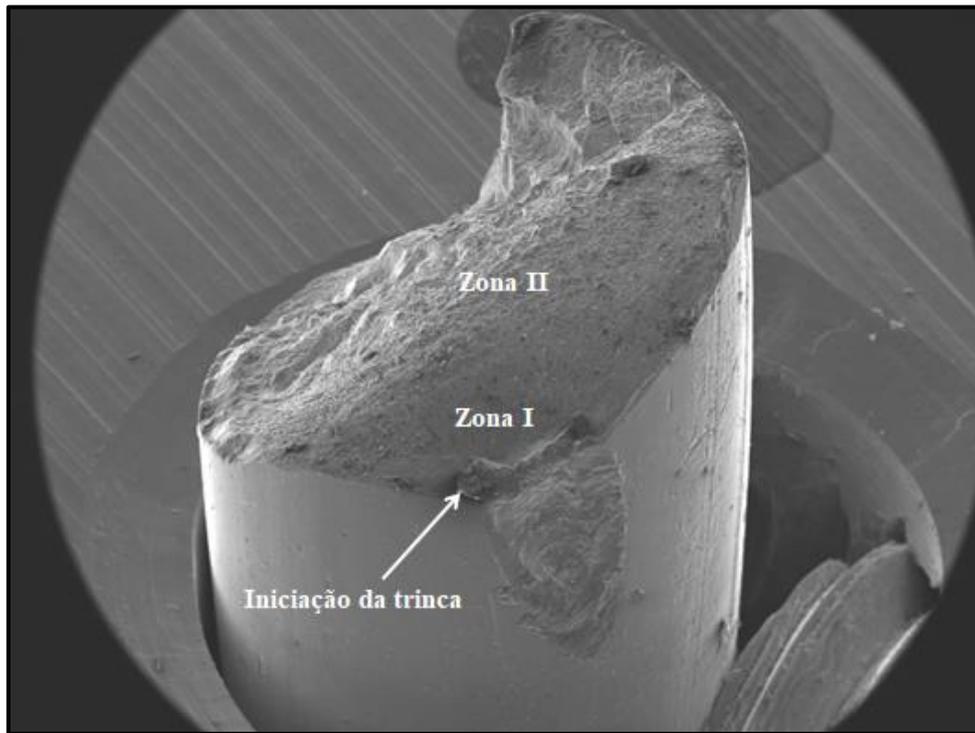


Figura 5.37. Microscopia em um dos fios do ensaio 2 com EDS de 25,6% de RTS e  $Y_B$  de 0,81mm.

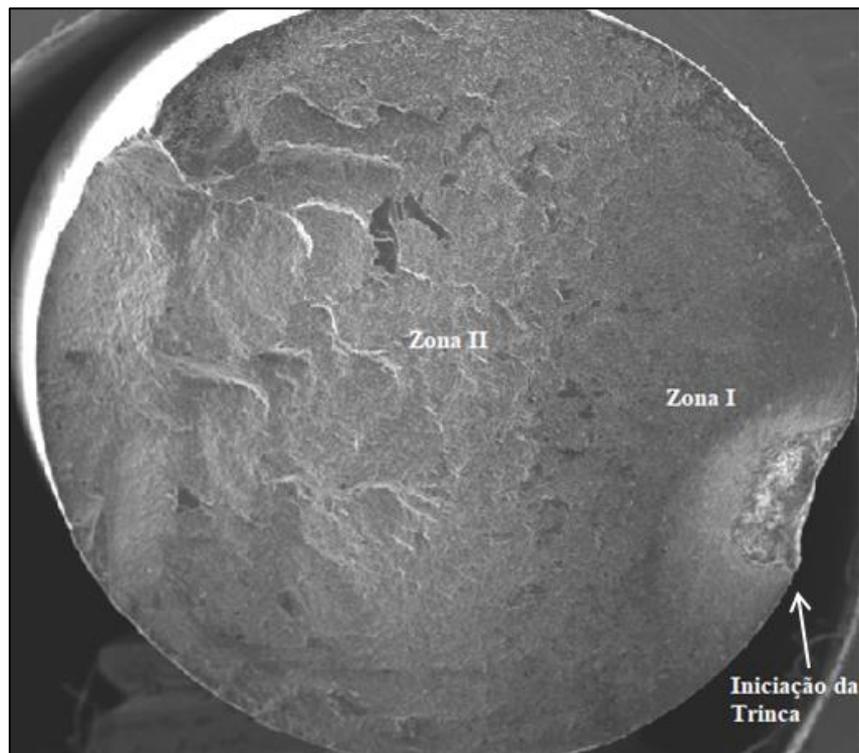


Figura 5.38. Microscopia em um dos fios do ensaio 3 com EDS de 25,6% de RTS e  $Y_B$  de 0,99 mm.

## CAPÍTULO 6

### 6 RESULTADOS E ANÁLISE DO COMPORTAMENTO À FADIGA DE CABOS CONDUTORES POR MEIO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões referentes ao treinamento da **RNA** com dois tipos de cabos condutores: Ibis – CAA 397,5 MCM (Cabo de Alumínio com Alma de Aço) e o condutor CAL 1055 MCM (Cabo liga alumínio 6201). Em uma primeira análise foram utilizados dados obtidos da literatura do condutor Ibis, com intuito de fazer uma avaliação preliminar da funcionalidade de redes neurais aplicadas a cabos condutores de energia. Após verificar a eficácia dos resultados, partiu-se para uma segunda análise, objetivo principal deste trabalho, a **RNA** foi treinada com resultados experimentais obtidos com o cabo CAL 1055 MCM.

#### 6.1 CABO CONDUTOR IBIS

Com a finalidade de fazer uma análise prévia da capacidade da **RNA** de modelar o efeito da tensão média em cabos condutores de energia, foram utilizados dados disponíveis de Fadel *et al.*, (2012). O condutor empregado para obtenção dos dados é o Ibis – CAA 397,5 MCM (*Aluminium Conductor Steel Reinforced* – Cabo de Alumínio com Alma de Aço). Ele possui 26 fios de alumínio 1350-H19 e 7 fios de aço (Fig.6.1). A Tabela 6.1 apresenta as características estruturais e dimensionais do condutor Ibis.



Tabela 6.1. Características dimensionais e estruturais do condutor Ibis.

Bitola MCM	Área Nominal [mm <sup>2</sup> ]			Nº fios x diâmetro		Diâmetro nominal [mm]	Peso linear [kg/km]	Carga Ruptura [kgf]
	Alumínio	Aço	Total	Alumínio	Aço			
397,5	201,21	234	435,21	26 x 3,14	7 x 2,44	19,88	557,5	7.394

A Tabela 6.2 apresenta os resultados dos ensaios de fadiga com o condutor Ibis, com **EDS** de 20% e 30% de **RTS**, que correspondem as tensões médias de 49 e 74 *MPa*, respectivamente.

**Tabela 6.2. Dados Experimentais usados na obtenção das curvas S-N.**

Dados Experimentais Para Treinamento RNA		
Nº de Ciclos	Amplitude de tensão ( <i>MPa</i> )	Tensão Média ( <i>MPa</i> )
7.135.000	28,22	49
4.500.000	28,22	49
7.440.000	28,22	49
5.500.000	28,22	49
8.120.000	28,22	49
7.100.000	31,35	49
5.740.000	31,35	49
3.710.000	31,35	49
7.100.000	31,35	49
7.300.000	31,35	49
1.840.000	34,49	49
6.270.000	34,49	49
3.150.000	34,49	49
2.490.000	34,49	49
1.640.000	39,82	49
2.310.000	39,82	49
1.900.000	43,56	49
2.240.000	43,56	49
2.750.000	43,56	49
1.650.000	31,35	74
2.970.000	31,35	74
2.750.000	31,35	74
1.820.000	35,87	74
1.300.000	35,87	74
2.500.000	35,87	74
1.780.000	35,87	74
2.310.000	35,87	74
1.630.000	39,46	74
1.290.000	39,46	74
1.020.000	43,05	74
980.000	43,05	74
1.360.000	43,05	74

Esses dois conjuntos de dados foram utilizados para o treinamento da **RNA**. Ressalta-se que para isso, foi usada a equação da lei da potência (3.12), onde os valores das constantes **A** e **b** desta equação são mostrados na Tabela 6.3, obtidas através do Método dos Mínimos Quadrados. E,  $\sigma_{ult}$  é o valor de tensão última do cabo Ibis.

Tabela 6.3. Valores das constantes A, B, c e da tensão última à tração do condutor Ibis.

$\sigma_{med}$ [MPa]	A	b	$\sigma_{ult}$ [MPa]
49	456	- 0,17	300
74	595	- 0,19	

Na implementação da **RNA**, a camada oculta variou de 2 a 20 neurônios para verificar qual arquitetura melhor generalizasse os resultados. Foi observado também a variação da **RMS** e do coeficiente de correlação (**r**), com objetivo de verificar como a rede se comporta a medida que aumenta-se o número de épocas.

Os efeitos da tensão média podem ser representados em um diagrama de vida constante. Onde, diferentes combinações de amplitudes de tensões e tensões médias definem regiões onde um componente poderia operar sem falhar por fadiga após aplicação de determinado número de ciclos de carregamento (Henriques, 2006). Para obter a mesma vida à medida que aumenta-se a tensão média,  $\sigma_{med}$ , do cabo condutor, é necessário uma queda da amplitude de tensão,  $\sigma_a$ . Assim, através do treinamento da **RNA**, foi possível encontrar combinações de amplitudes de tensões e tensões médias que produziram a mesma vida em fadiga, conforme apresentado na Figura 6.2.

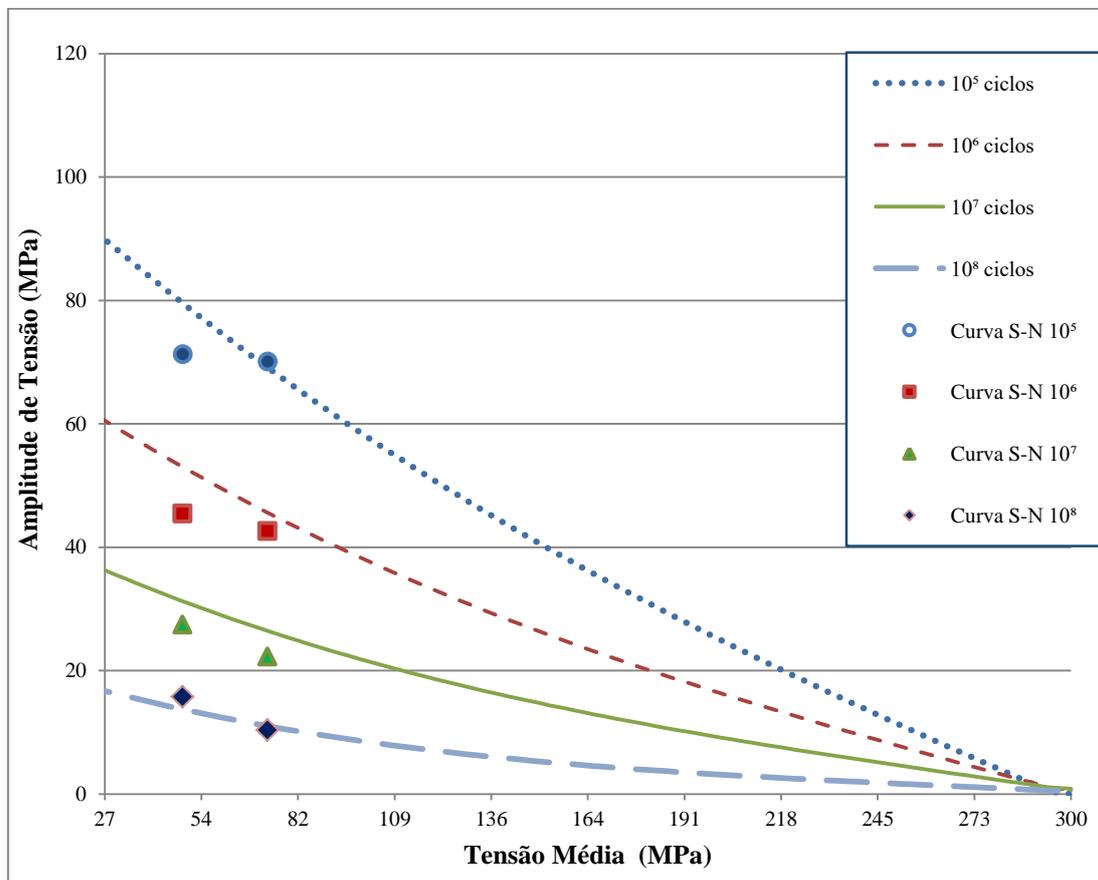


Figura 6.2. Diagrama de vida constante ( $\sigma_a \times \sigma_m$ ) para o cabo Ibis obtido a partir de RNA.

Através da Figura 6.2 é possível visualizar a redução que se faz necessária nas amplitudes das tensões para obter a mesma vida quando aumenta as tensões médias. Nota-se que para a curva com número de ciclos de  $10^5$ , as combinações de amplitudes de tensões e tensões médias são maiores em relação às demais vidas de  $10^6$ ,  $10^7$  e  $10^8$  ciclos, e com o aumento do número de ciclos os valores de tensões são reduzidos. Assim, os resultados encontrados através da **RNA** são coerentes com os estudos apresentados na literatura para estabelecer o efeito da tensão média no limite de fadiga do material (Kahn *et al.*, 2005) (Mortazavian & Fatemi, 2015).

As curvas obtidas através da **RNA** permitiram extrapolar o comportamento do cabo condutor Ibis para diferentes valores de tensões médias. É importante salientar, que de acordo com a metodologia adotada nos ensaios realizados no Laboratório de Cabos da Universidade de Brasília as curvas que compõem a Figura 6.2 consumiriam aproximadamente 100 corpos de prova. Destaca-se que, o corpo de prova para ensaios de fadiga com cabos condutores possuem 50m de comprimento, isso geraria custos muito elevados. Além disso, seriam necessários aproximadamente 16 meses sem interrupção para realizar tais ensaios experimentais. Logo, através da **RNA** é possível fazer previsões da provável vida à fadiga do cabo, com intuito de reduzir tempo e dinheiro.

A vida remanescente do condutor é de fundamental importância para manutenção das linhas de transmissão. Assim, a Figura 6.3 apresenta as curvas de fadiga **S-N** ou curva de Wöhler, onde os valores das amplitudes de tensões encontradas pela **RNA** foram plotados com os respectivos números de ciclos, para tensões médias de 49 e 74 *MPa*. Nota-se que os resultados mostraram-se coerentes com os apresentados na literatura, pois, uma vez que aplica-se uma carga de esticamento maior, menor será a vida do condutor. Observa-se que a “curva tracejada”, com tensão média de 74 *MPa* está abaixo da “curva contínua” com tensão média de 49 *MPa*. Isto é, os resultados para a “curva tracejada” tiveram uma redução do número de ciclos em relação à curva com tensão média menor (CIGRE, 2005) (Bellorio, 2009) (Fadel et al., 2012).

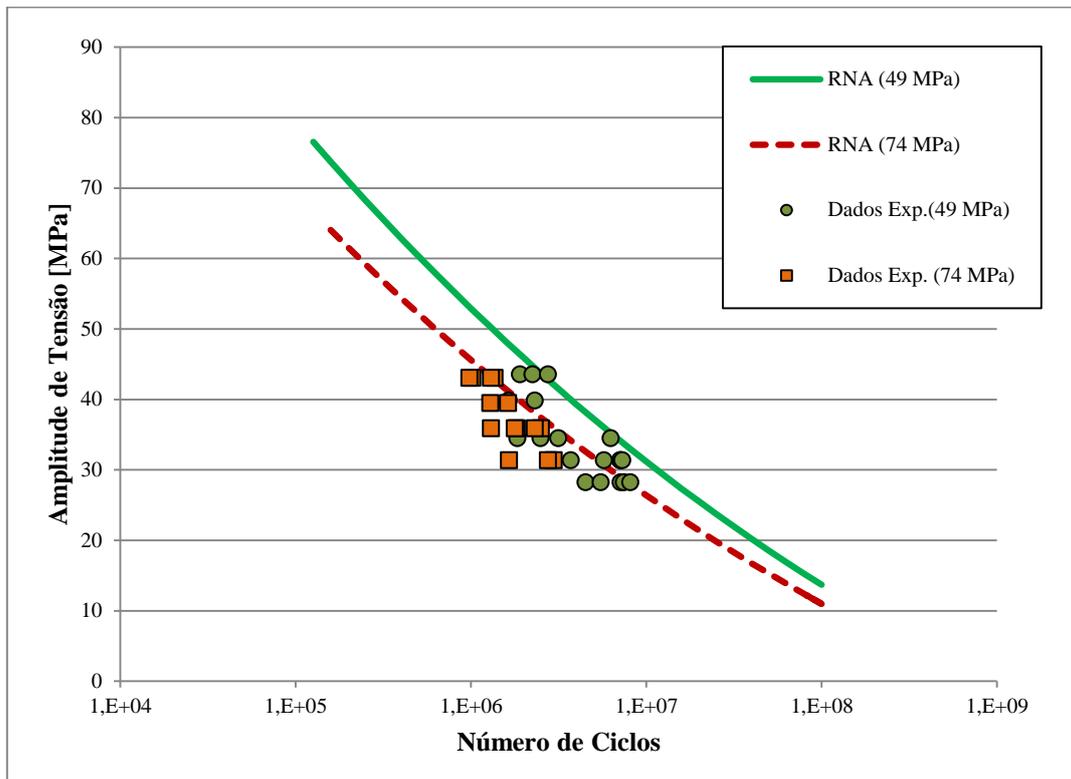


Figura 6.3. Dados Experimentais e Curvas S-N obtidas com os dois conjuntos de treinamento, com tensões médias de 49 e 74 MPa.

O algoritmo de treinamento tem o objetivo de minimizar o erro médio gerado entre a saída (**z**) da **RNA** e a resposta desejada (**d**). Neste sentido, o valor mínimo de erro médio quadrático (**EMQ**) (Eq. 3.4) encontrado para o presente estudo foi de 0,0005. É importante ressaltar, que como não foi possível utilizar uma terceira curva **S-N** para validar a **RNA**, foi adotado este erro como aceitável, pois o mesmo está de acordo com resultados apresentados na literatura, como de Lee et al., (1999), Freire Jr. et al., (2007) e Belísio, (2012).

Assim, com os resultados encontrados nota-se que é possível obter uma generalização da **RNA** utilizando apenas duas curvas **S-N**, isso mostra que as redes neurais artificiais possuem um grande potencial na previsão da resistência à fadiga em cabos condutores. Pode-se destacar ainda, que utilizando 15 neurônios na camada oculta para treinamento da rede foi possível obter resultados confiáveis com um custo computacional reduzido. No entanto, esta análise preliminar teve o inconveniente de não possuir dados suficientes para validação da rede. Neste sentido, o treinamento da **RNA** utilizando dados do condutor CAL 1055 MCM aumentará a credibilidade do uso de redes neurais para prever o comportamento a fadiga de cabos condutores.

## 6.2 CABO CONDUTOR CAL 1055 MCM

Após a realização de 27 ensaios experimentais com o condutor CAL 1055 apresentados na seção 5.1.1, tais dados foram utilizados para treinar uma arquitetura Perceptron de Múltiplas Camadas. Esta possui uma camada de entrada com dois neurônios, uma camada oculta, onde realizou-se uma análise variando 1 a 30 neurônios para verificar qual arquitetura melhor generalizasse os resultados e uma camada de saída com um neurônio. Para implementar todos os algoritmos foi empregado o software MATLAB.

Também neste caso estudado, usou-se o treinamento supervisionado, onde os conjuntos de dados de entrada e saída predeterminados são utilizados para supervisionar a rede neural. Para este fim, analisou-se três conjuntos de treinamento, que foram os dados experimentais apresentados na Tabela 5.1, com **EDS** de 17%, 20% e 25,6% de **RTS** que correspondem as tensões médias de 48, 57 e 73 *MPa*, respectivamente (Fig. 5.1). É importante salientar, que as curvas com 48 e 73 *MPa* foram utilizadas para o treinamento da rede e a curva com 57 *MPa* para validação da **RNA**.

Além disso, ressalta-se que assim como no caso do treinamento realizado com o condutor Ibis, com o CAL 1055 foi utilizado nos neurônios da camada oculta à função de ativação sigmoideal e nos neurônios da camada de saída a função linear (Fig. 3.4A e C) (Eq.3.3).

Os valores das constantes **A** e **b** da equação da lei da potencia utilizada (Eq. 3.12) são apresentados na Tabela 6.4. Onde a tensão última à tração ( $\sigma_{ult}$ ) do condutor CAL 1055 é de 285 *MPa*.

**Tabela 6.4. Valores das constantes A, B, c e da tensão última à tração do condutor CAL 1055.**

$\sigma_m$ [MPa]	A	b	$\sigma_{ult}$ [MPa]
48	45179	-0,49	285
57	57908	-0,51	
73	13376	-0,43	

Os valores das constantes de momento (**m**) e a taxa de aprendizagem (**n**) foram de 0,7 e 0,1, respectivamente. Como já mencionado, estas constantes são importantes para estabilizar as mudanças dos pesos sinápticos e acelerar o processo para determinação do peso ideal, objetivo do treinamento.

A fim de melhorar o desempenho computacional ao treinar a RNA para o atual condutor, os dados de entrada e saída da rede também foram normalizados (Freire Júnior *et al.*, 2005) (Fig. 6.4). A análise do número de ciclos ficou entre  $10^5$  e  $10^7$ , isto porque os dados experimentais analisados para este condutor estão nesta região de ciclos.

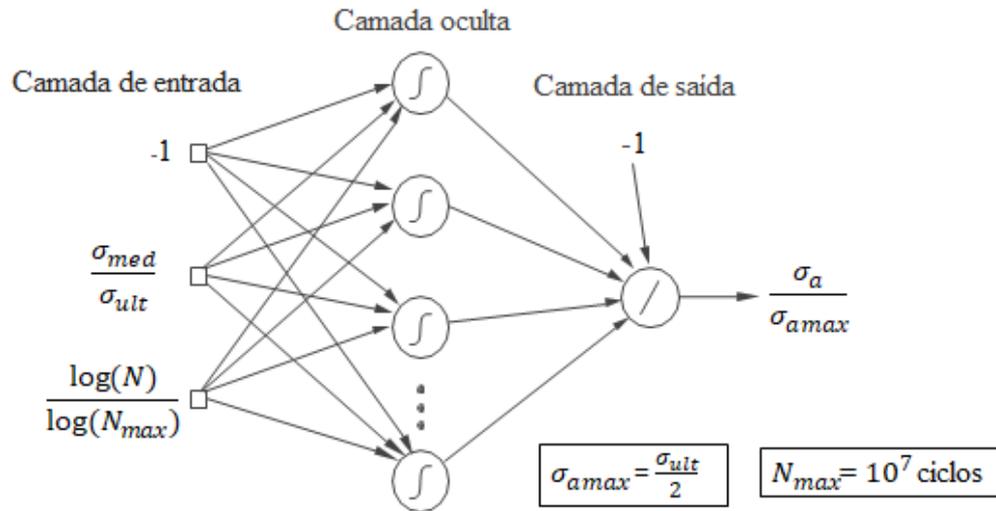
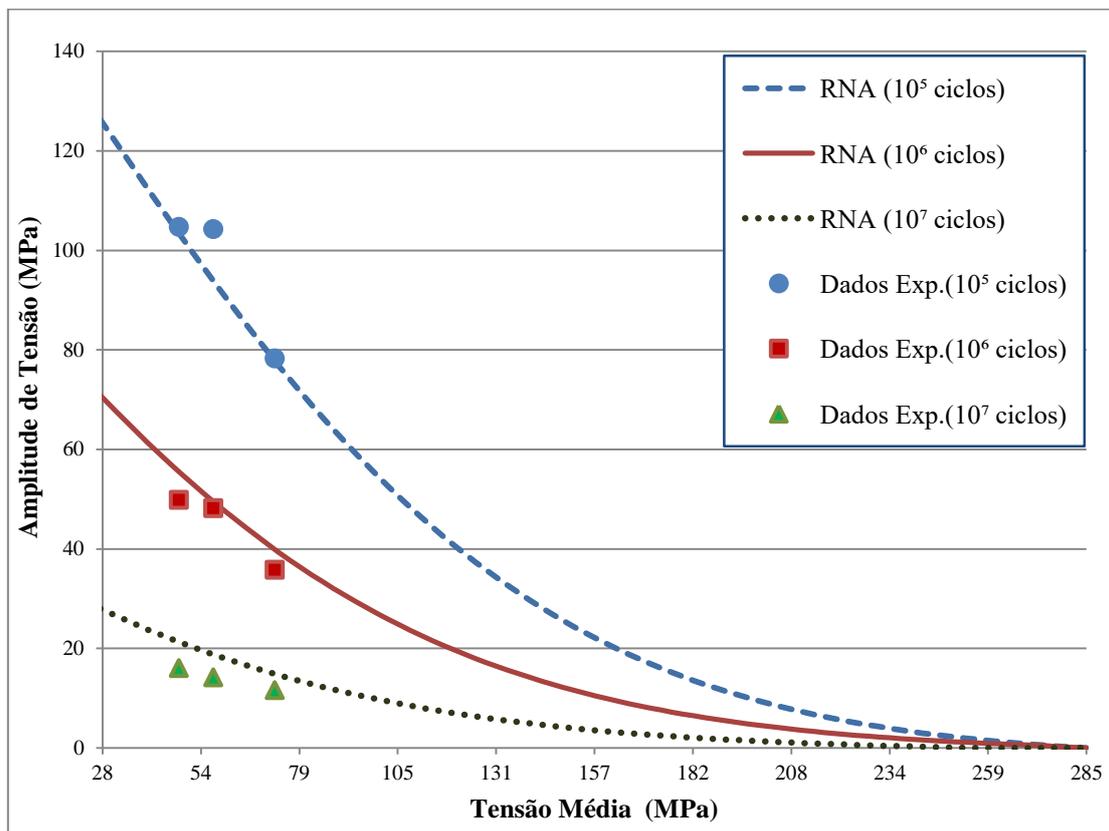


Figura 6.4. Arquitetura neural com suas entradas e saídas normalizadas.

O gráfico da Figura 6.5 apresenta os resultados dos diagramas de vida constante para o condutor CAL 1055 MCM. Nota-se neste diagrama diferentes combinações de tensões médias e amplitudes de tensões que definem regiões onde o condutor CAL 1055 pode operar em segurança sem falhar por fadiga após um determinado número de ciclos de carregamento.

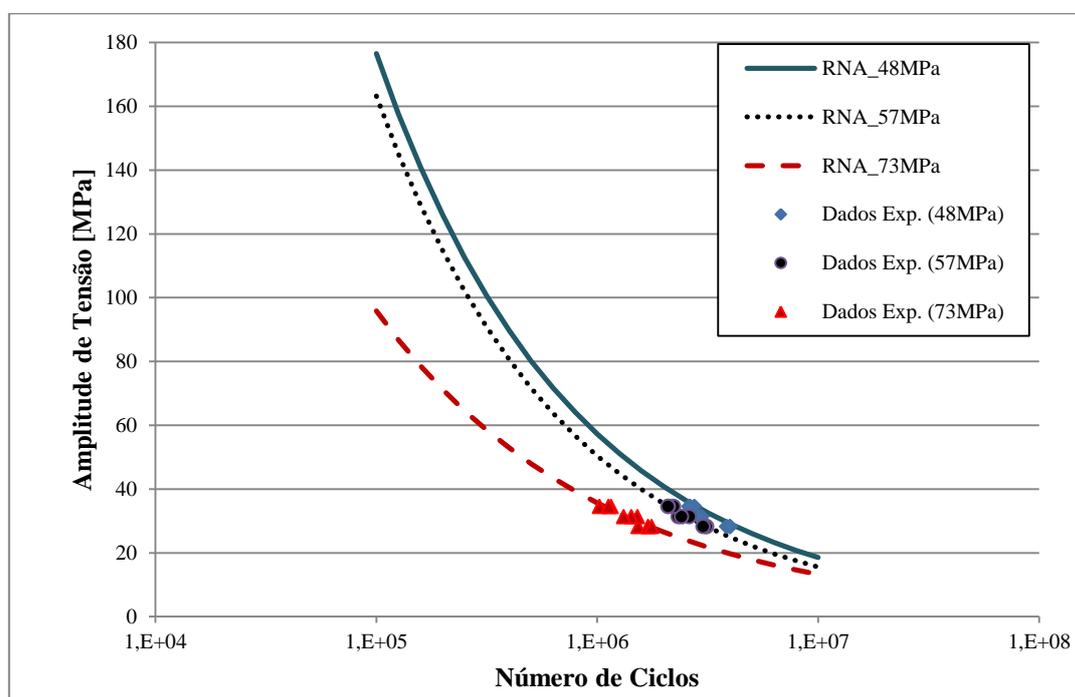


**Figura 6.5. Diagramas de vida constante para o condutor CAL 1055 MCM.**

Observando estes resultados é possível verificar que a cada aumento da tensão média ocorre um decréscimo na amplitude de tensão para obter a mesma vida em fadiga para o condutor. Ou seja, regiões onde os ventos provocam amplitudes de tensão maiores, as empresas transmissoras de energia precisam estar atentas a quanto tracionarão inicialmente o cabo na instalação da linha para garantir uma maior durabilidade do mesmo. Pois, aumentando a carga de esticamento do condutor intensificará as vibrações do mesmo (Rosa, 1974). Nota-se ainda na Figura 6.5 que quanto menor o número de ciclos esperado para cabo, maiores serão as combinações de amplitudes de tensões e tensões médias os quais o mesmo pode ser submetido.

Estes resultados obtidos permitiram extrapolar o comportamento a fadiga do cabo CAL 1055 MCM para diferentes valores de tensões médias. É importante salientar que seriam necessários aproximadamente 80 amostras de cabos para obter as curvas de vida constantes expostas na Figura 6.5. Como já mencionado, cada amostra de cabo possui 50 metros de comprimento, e o tempo necessário para levantamento destas curvas seria aproximadamente 13 meses sem interrupção dos ensaios. Portanto, com o uso da **RNA** é possível prever a vida em fadiga de condutores, reduzindo substancialmente o tempo e recursos necessários para realização de um programa experimental desta dimensão.

A Figura 6.6 apresenta as curvas de fadiga **S-N** ou curva de Wöhler, onde os valores das amplitudes de tensões encontradas pela **RNA** foram plotados com os respectivos números de ciclos, para tensões médias de 48, 57 e 73 *MPa*. No que se refere ao comportamento observado na Figura 6.6, que aumentando a tensão média do condutor reduziu a sua resistência à fadiga, nota-se que os resultados obtidos estão de acordo com dados observados na literatura como Fadel *et. al*, (2012) e (CIGRE, 2005). Além disso, percebe-se que a resposta da rede está condizente com as curvas **S-N** encontradas experimentalmente apresentadas na seção 5.1.1 do presente trabalho. Vale ressaltar ainda, que as curvas encontradas com a rede neural aproximaram de forma expressiva dos dados experimentais.



**Figura 6.6. Dados experimentais e curvas S-N obtidas através do treinamento da RNA, com tensões médias de 48, 57 e 73 MPa.**

A forma de aprendizado utilizado na **RNA** para o atual condutor também foi através da correção de erros, isto é, o algoritmo de treinamento minimiza o erro médio gerado entre a saída (**z**) da rede e a resposta desejada (**d**) (Eq. 3.4). Realizou-se uma avaliação modificando o número de épocas para treinar a rede, em uma primeira análise utilizou-se para o treinamento 6.000 épocas, determinando-se o **EMQ<sub>MIN</sub>** (erro médio quadrático mínimo) conforme a Figura 6.7. Em uma segunda análise aumentou-se o número de épocas de treinamento para 9.000 (Fig. 6.8), e foi verificado que ampliando o número de épocas houve uma redução significativa do **EMQ<sub>MIN</sub>**.

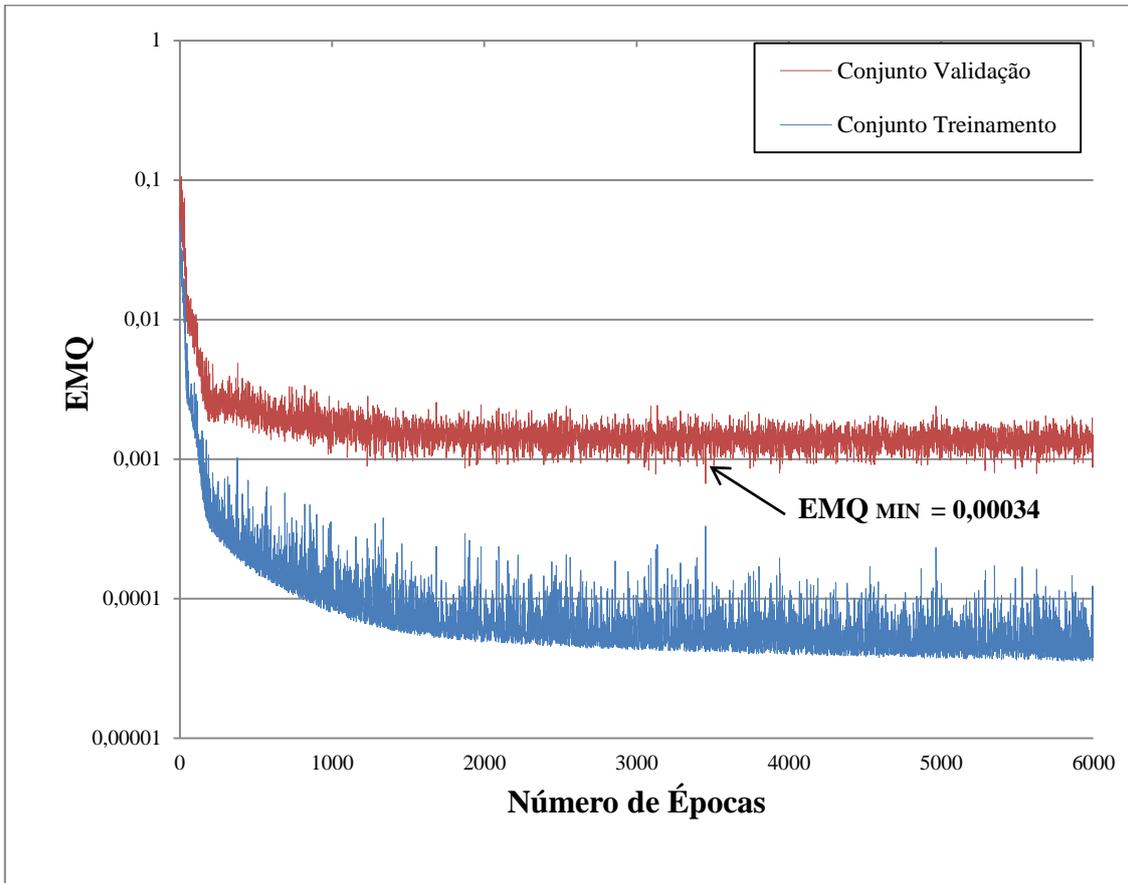


Figura 6.7. Curvas de EMQ obtidas durante treinamento de um RNA COM 18 neurônios ocultos com  $EMQ_{MIN}$  de 0,00034 em 3.453 épocas.

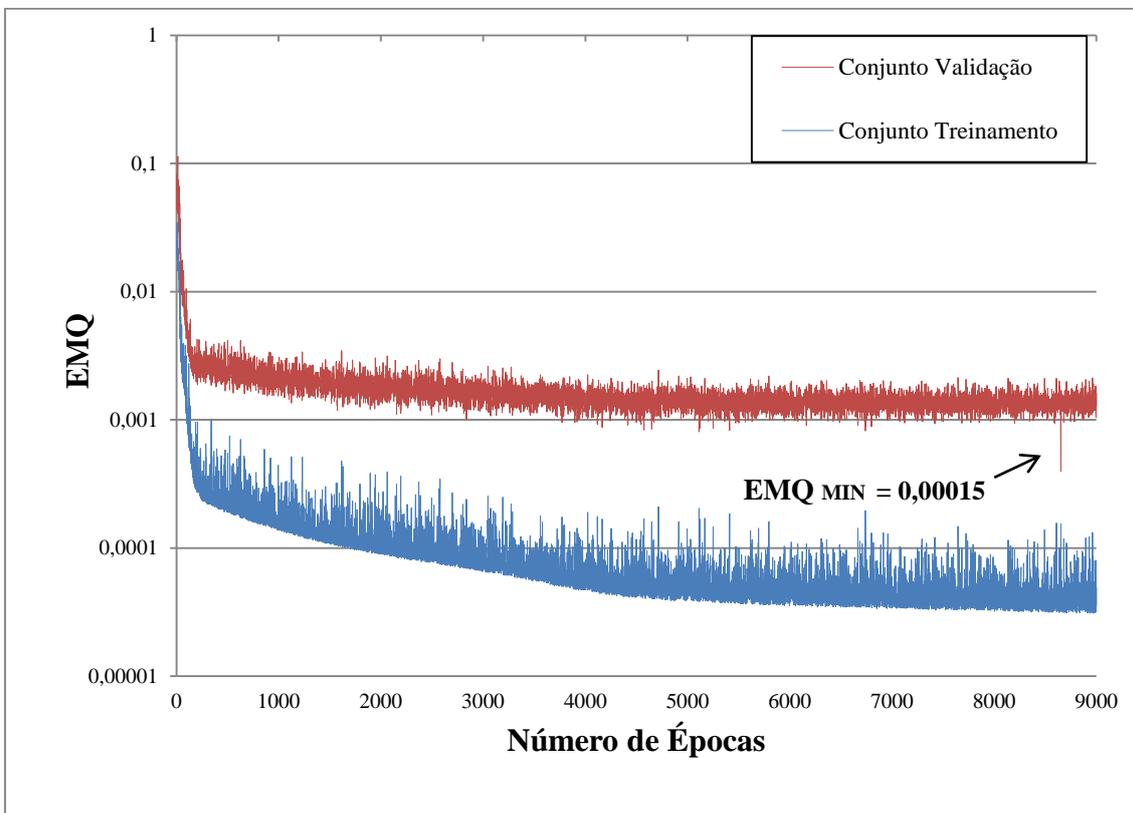


Figura 6.8. Curvas de EMQ obtidas durante treinamento de um RNA COM 14 neurônios ocultos com  $EMQ_{MIN}$  de 0,00015 em 8.652 épocas.

Embora o custo computacional para o treinamento foi mais elevado quando treinou a rede com 9.000 épocas, com a duração de 35 minutos e, na primeira análise o tempo foi de 8 minutos, o ponto de parada considerado ótimo foi em 8.652 épocas, onde encontrou-se  $EMQ_{MIN}$  do conjunto de validação de 0,00015. É importante salientar que esse erro aparentemente muito pequeno tem como justificativa a normalização dos dados de entrada para treinamento da **RNA**, com intuito de melhorar o desempenho da rede e diminuir o custo computacional.

A fim de verificar se acrescentando o número de épocas o **EMQ** reduziria, foram realizados mais três treinamentos da rede com 10.000, 15.000 e 20.000 épocas. No entanto, foi constatado que não houve uma diminuição significativa do erro médio quadrático, porém, o custo computacional envolvido aumentou significativamente. Assim, fica evidente que o treinamento apresentado na Figura 6.8 foi considerado o melhor de todos os avaliados.

Portanto, verificou-se neste capítulo que os resultados obtidos com o treinamento da rede neural tanto para o condutor Ibis como para o CAL 1055 MCM foram bastante satisfatórios, pois foi possível obter uma generalização da **RNA** utilizando-se em uma primeira análise com o Ibis apenas duas curvas **S-N**, e para o CAL 1055 MCM três curvas. Logo, fica claro que as redes neurais possuem uma grande capacidade de prever a vida em fadiga de cabos condutores. No entanto, como já citado, existem na literatura outros modelos de estimativa do efeito da tensão média na fadiga, conforme apresentado em Dowling *et al.*, (2008). Neste sentido, é importante a avaliação dos mesmos e a comparação destes com a **RNA**, isto é feito no capítulo 7 desta tese.

## CAPÍTULO 7

### 7 AVALIAÇÃO DOS MODELOS DE ESTIMATIVA DO EFEITO DA TENSÃO MÉDIA: GERBER, GOODMAN E SWT

Como já mencionado, as empresas do setor de transmissão de energia elétrica tem um forte desejo de elevar o nível da carga de pré-esticamento do condutor (tensão média), pois além de diminuir os custos, as dificuldades associadas às montagens das linhas de transmissão também pode ser reduzido. No capítulo anterior foi apresentado um modelo de inteligência artificial para estimar a vida em fadiga do cabo CAL 1055 MCM. No entanto, além do modelo de **RNA**, existem algumas equações na literatura conhecidas como *modelos de correção da tensão média* (Dowling *et al.*, 2008). Embora tenham sido desenvolvidas diversas equações para contabilização da tensão média na resistência à fadiga dos materiais, neste capítulo são apresentados três destes modelos: Gerber (Gerber, 1874), Goodman (Goodman, 1899) e **SWT** (Smith *et al.*, 1970), estas equações foram apresentadas no capítulo 2 do presente trabalho (Eq. 2.1, 2.2, 2.3).

Através das curvas **S-N** obtidas com ensaios de fadiga com o cabo CAL 1055 MCM é possível verificar o comportamento à fadiga do condutor para diferentes valores de tensões médias utilizando os modelos de Gerber, Goodman e **SWT**. Por fim, estes modelos são comparados com a **RNA** para avaliar qual deles melhor representa os dados experimentais e podem prever com segurança a resistência à fadiga do cabo CAL 1055 MCM. Ressalta-se que este procedimento é inédito na literatura para cabos condutores de energia, já que normalmente a tensão de solicitação para condutores são corrigidas através da equação de Poffenberger-Swart.

#### 7.1 PROCEDIMENTO PARA APLICAÇÃO DOS MODELOS DE GERBER, GOODMAN E SWT EM CABOS CONDUTORES

Com objetivo de esclarecer e tornar didático como foram utilizados estes modelos no presente trabalho, enumerou-se abaixo os passos adotados para aplicação destas equações.

- 1) Aplica-se o método dos mínimos quadrados para obtenção dos valores das constantes **A** (constante do material) e **b** (*expoente de Basquin*) das três curvas **S-N** com **EDS** de 17%, 20% e 25,6% de **RTS** (correspondem as tensões médias de 48, 57 e 73 *MPa*) obtidas experimentalmente (Cap. 5).

- 2) Em seguida, utiliza-se a equação de *Basquin* (Eq. 3.12) para calcular as amplitudes de tensão ( $\sigma_a$ ) para os três valores de tensões médias (**EDS**) e os respectivos números de ciclos (**N**) onde pretende-se avaliar o comportamento a fadiga do condutor. A análise do número de ciclos para este trabalho ficou entre  $10^5$  e  $10^7$ , pois os dados experimentais estão nesta região de ciclos.
- 3) Dando continuidade, calcula-se o  $\sigma_{ar}$  (limite resistência à fadiga para  $\sigma_{med} = 0$ ) dos respectivos modelos de Gerber, Goodman e **SWT** (Eq. 2.1, 2.2, 2.3). Para cada número de ciclos ( $10^5$ ,  $10^6$ ,  $10^7$ ) é obtido três valores de  $\sigma_{ar}$ , logo, é necessário determinar a média destes valores, pois para cada **N** é utilizado um valor constante de  $\sigma_{ar}$ .
- 4) Utilizando as equações 2.1, 2.2 e 2.3, isola-se as tensões médias ( $\sigma_{med}$ ) das mesmas. E, em seguida, calcula-se os valores de  $\sigma_{med}$ , modificando gradativamente os valores das amplitudes de tensões ( $\sigma_a$ ) até obter um conjunto de combinações destes componentes de tensão para cada número de ciclos. Ressalta-se que, quando a amplitude de tensão ( $\sigma_a$ ) for igual a zero, a tensão média ( $\sigma_{med}$ ) será igual a tensão última a tração ( $\sigma_{ult}$ ) do condutor, que para o cabo CAL 1055 MCM é 285 MPa. Finalmente são obtidos os diagramas de vida constante para  $10^5$ ,  $10^6$  e  $10^7$  ciclos. Estes resultados são apresentados na seção 7.1.1.

### **7.1.1 Resultados dos modelos de fadiga de Gerber, Goodman e SWT para o cabo CAL 1055 MCM.**

Aplicando os procedimentos apresentados na seção anterior foi possível determinar combinações de tensões médias e amplitudes de tensões para os modelos de Gerber, Goodman e **SWT**, conforme as Figura 7.1, 7.2 e 7.3 através de diagramas de vida constantes.

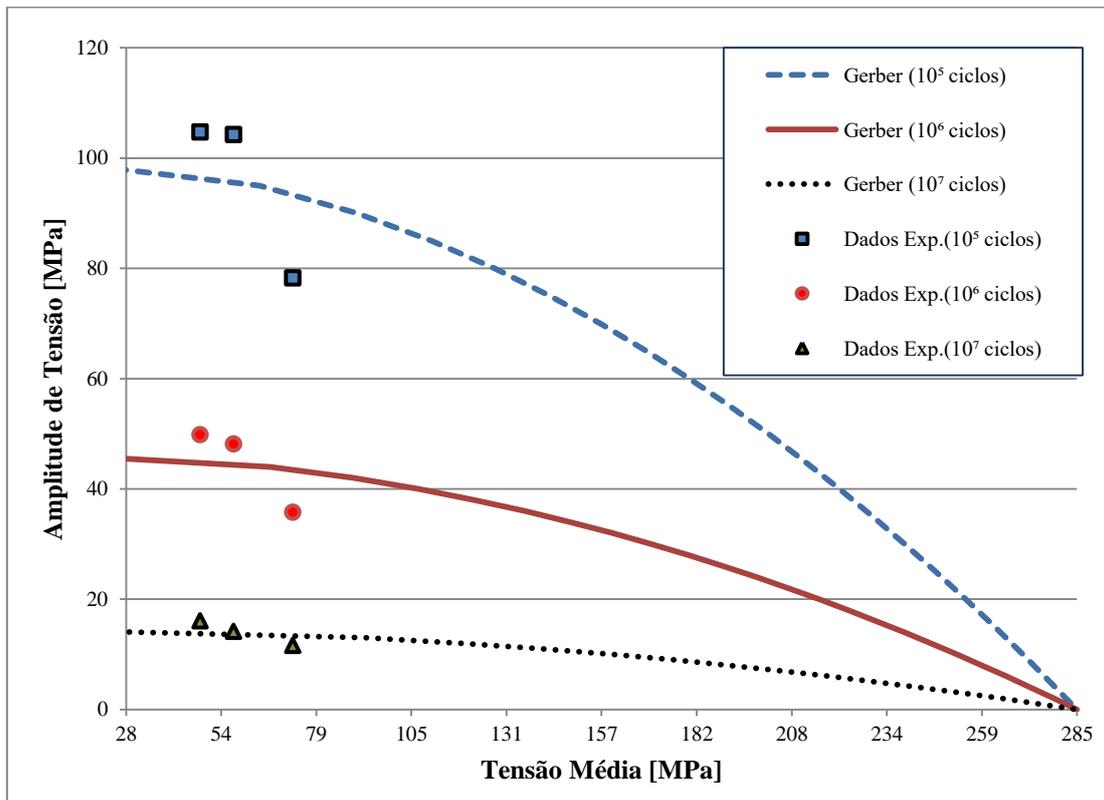


Figura 7.1. Diagrama de vida constante obtido através do modelo de Gerber.

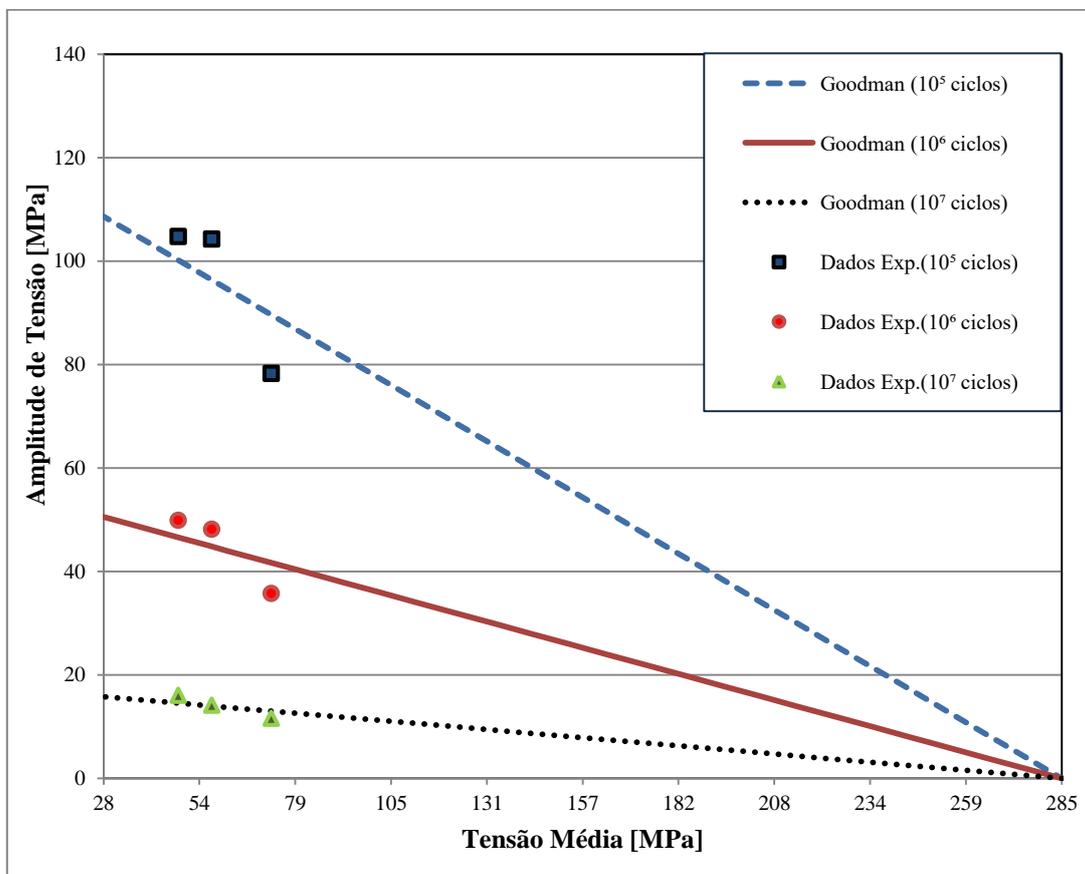


Figura 7.2. Diagrama de vida constante obtido através do modelo de Goodman.

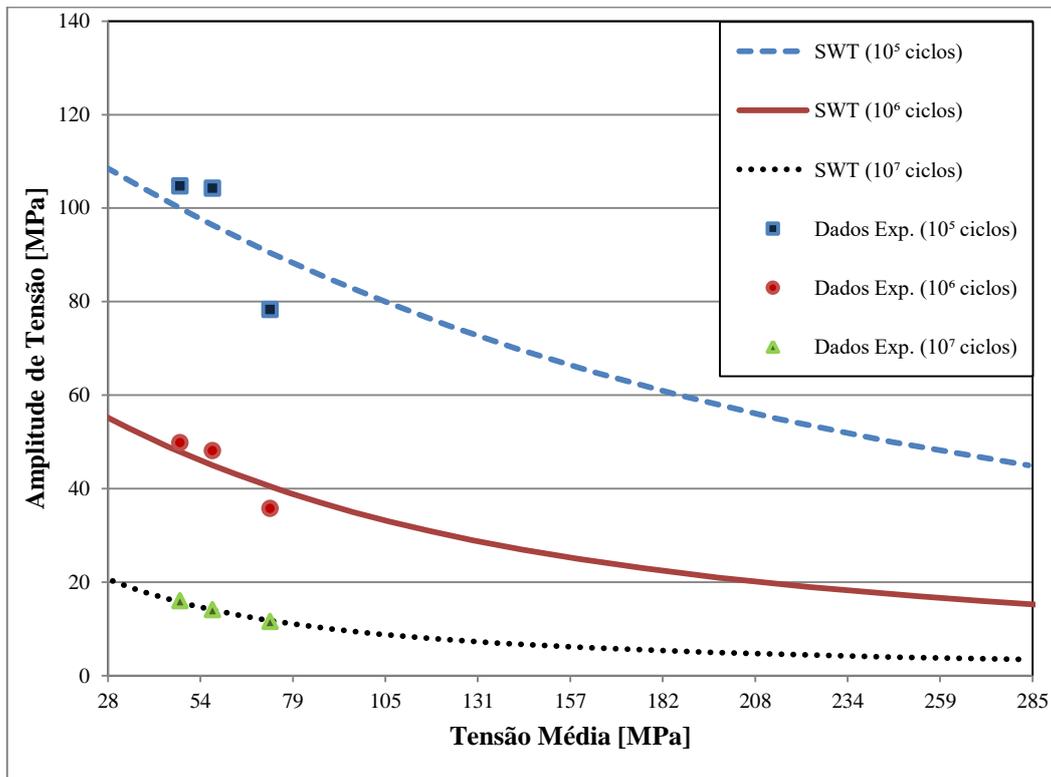


Figura 7.3. Diagrama de vida constante obtido através do modelo de SWT.

Nota-se que os diagramas para os três modelos tiveram o comportamento similar, à medida que aumentou-se as amplitudes de tensões foi necessário uma redução das tensões médias para obter a mesma vida em fadiga para o condutor, comportamento esperado, que estão condizentes com os resultados obtidos por Dowling, (2004). E em todos os casos as curvas aproximaram significativamente dos dados obtidos experimentalmente. E quanto maior o número de ciclos da curva de vida menores são as possíveis combinações dos componentes de tensões.

### 7.1.2 Comparando os modelos de Gerber, Goodman e SWT com RNA

Como proposto no início deste capítulo, nesta seção os modelos de Gerber, Goodman e SWT são comparados com os resultados obtidos com a rede neural artificial para o condutor CAL 1055 MCM apresentados no capítulo 6.

As Figuras 7.4, 7.5 e 7.6 apresentam os diagramas para curvas de vida de  $10^5$ ,  $10^6$  e  $10^7$  ciclos dos modelos de Gerber, Goodman, SWT e RNA, respectivamente. É possível observar que os modelos de RNA e SWT foram os que tiveram melhor aderência com os dados experimentais para todas as vidas analisadas. Nota-se que na Figura 7.4, para vida de  $10^5$  ciclos, a RNA apresentou melhor aproximação com os dados experimentais que o SWT. No entanto, para vida de  $10^7$  ciclos (Fig. 7.6) o modelo de SWT representou melhor os dados experimentais.

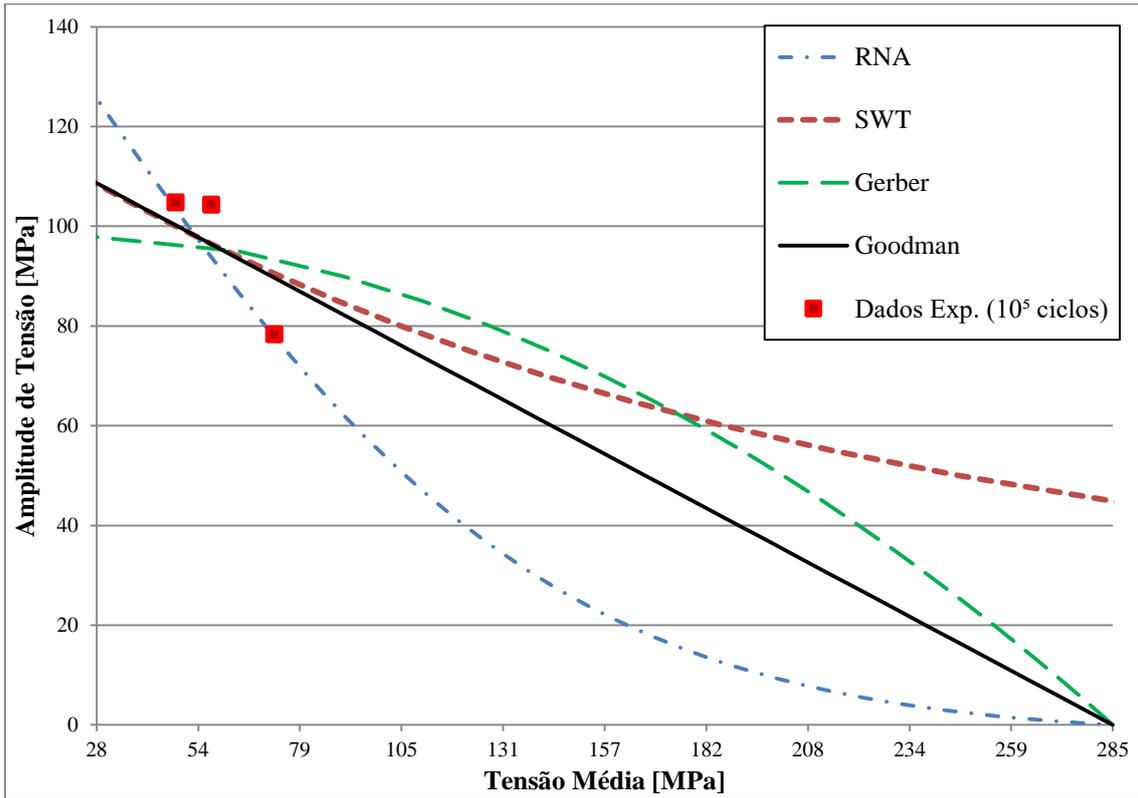


Figura 7.4. Diagrama amplitude de tensão versus tensão média e curvas características dos modelos de Gerber, Goodman, SWT e RNA para vida de  $10^5$  ciclos.

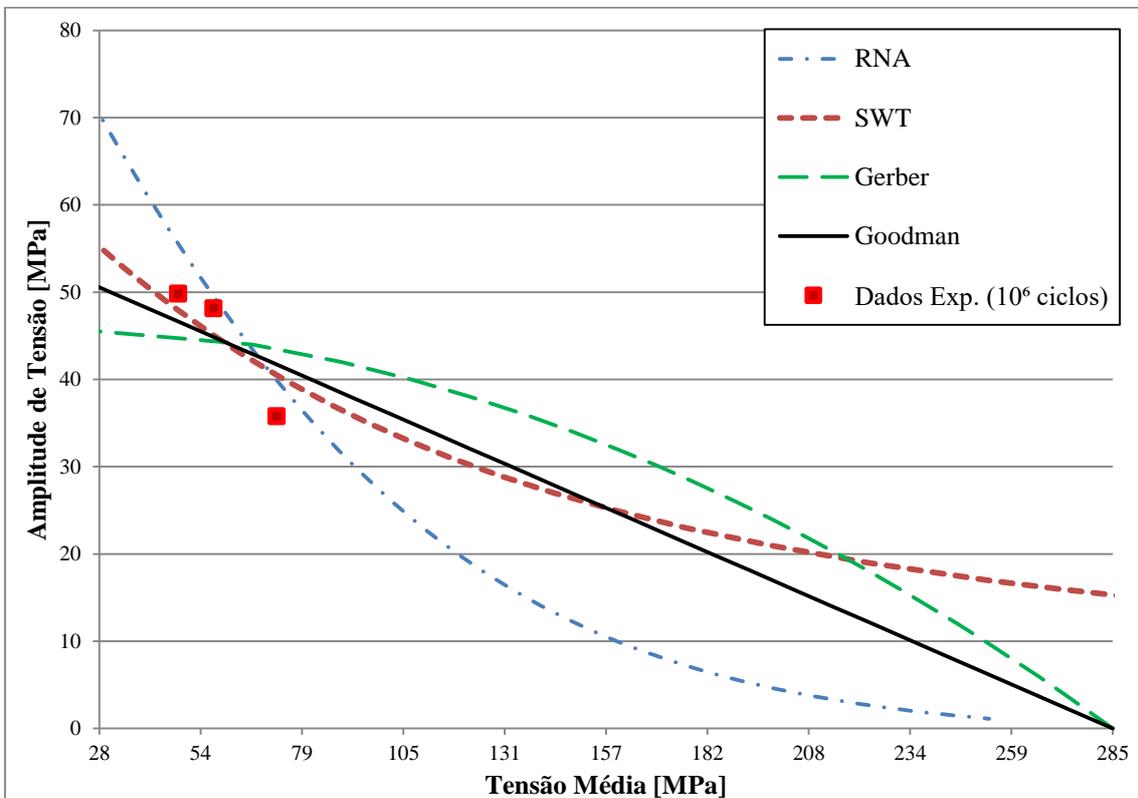


Figura 7.5. Diagrama amplitude de tensão versus tensão média e curvas características dos modelos de Gerber, Goodman, SWT e RNA para vida de  $10^6$  ciclos.

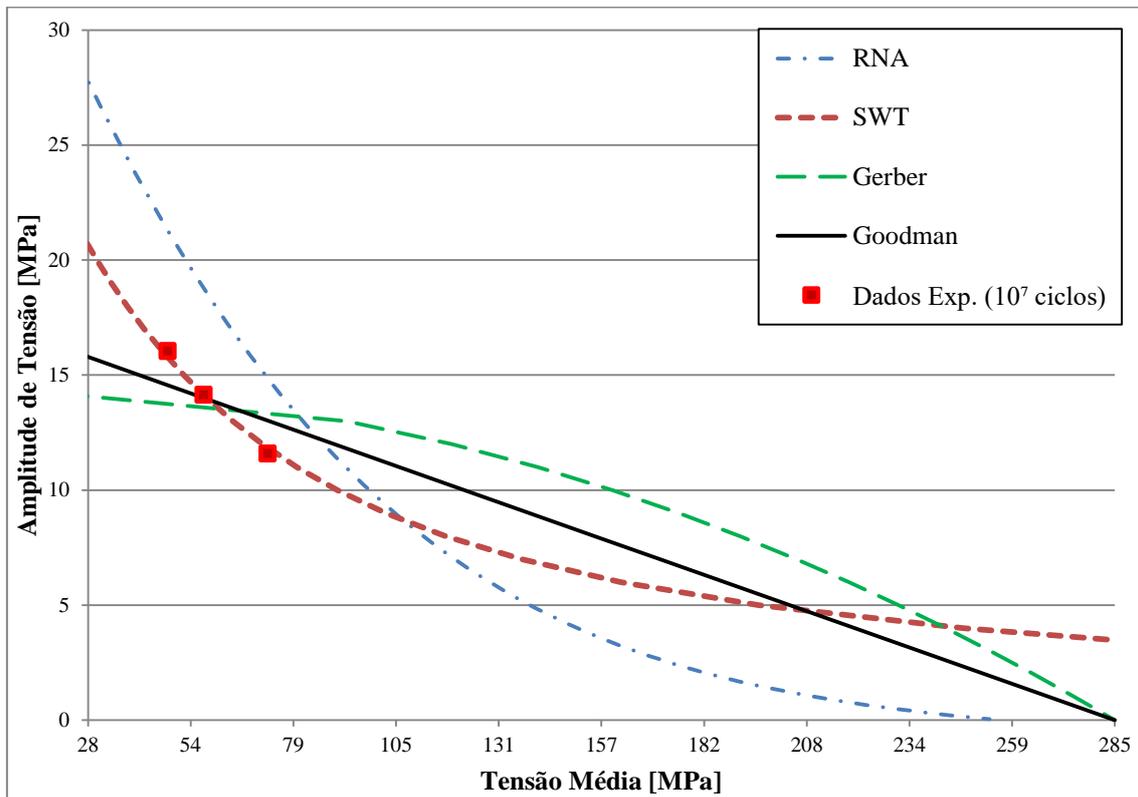


Figura 7.6. Diagrama amplitude de tensão versus tensão média e curvas características dos modelos de Gerber, Goodman, SWT e RNA para vida de  $10^7$  ciclos.

Para melhor análise dos modelos avaliados, os gráficos da Figura 7.7 apresentam os erros médios quadráticos (Eq. 3.4) entre as amplitudes de tensões experimentais ( $\sigma_{\text{exp}}$ ) e as amplitudes de tensões obtidas utilizando os modelos ( $\sigma_{\text{mod}}$ ) para todas as vidas avaliadas ( $10^5$ ,  $10^6$ ,  $10^7$  ciclos). Ressalta-se que os gráficos da Figura 7.7 são os EMQ normalizados e da Figura 7.8 sem normalizar. Percebe-se que a RNA e a equação de Smith-Watson-Topper se ajustaram satisfatoriamente aos pontos experimentais para todas as curvas de vidas analisadas. Estes resultados para o SWT estão de acordo com Dowling, (2004) e Dowling *et al.*, (2008), onde os autores enfatizam que este modelo é bem apropriado para vários tipos de materiais, principalmente ligas de alumínio. Além disso, tem a vantagem de ser simples, pois não possui variáveis relativas às propriedades dos materiais. Nestes mesmos artigos foi mencionado ainda, que os modelos de Goodman e Gerber são imprecisos para este tipo de material. É importante ressaltar que o cabo CAL 1055 MCM em sua totalidade é composto de fios de liga alumínio 6201, o que explica os resultados satisfatórios para o modelo de SWT.

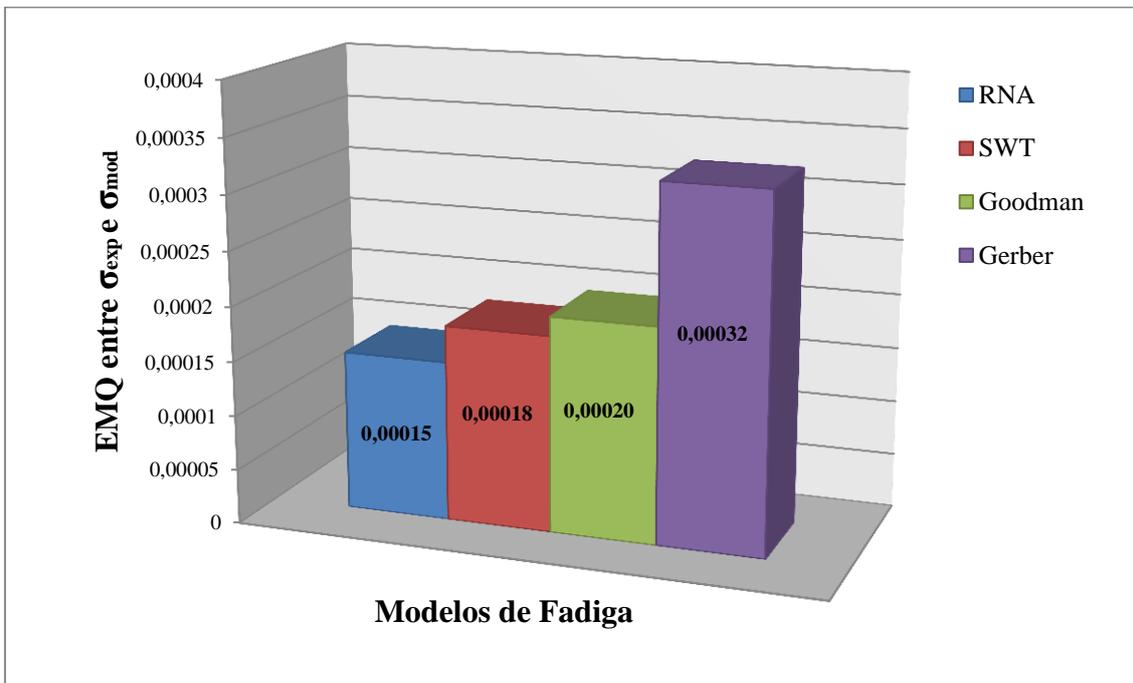


Figura 7.7. Gráficos dos EMQ normalizado entre amplitude de tensão experimental ( $S_{a\_exp}$ ) e amplitude de tensão dos modelos ( $S_{a\_mod}$ ) de Gerber, Goodman, SWT e RNA.

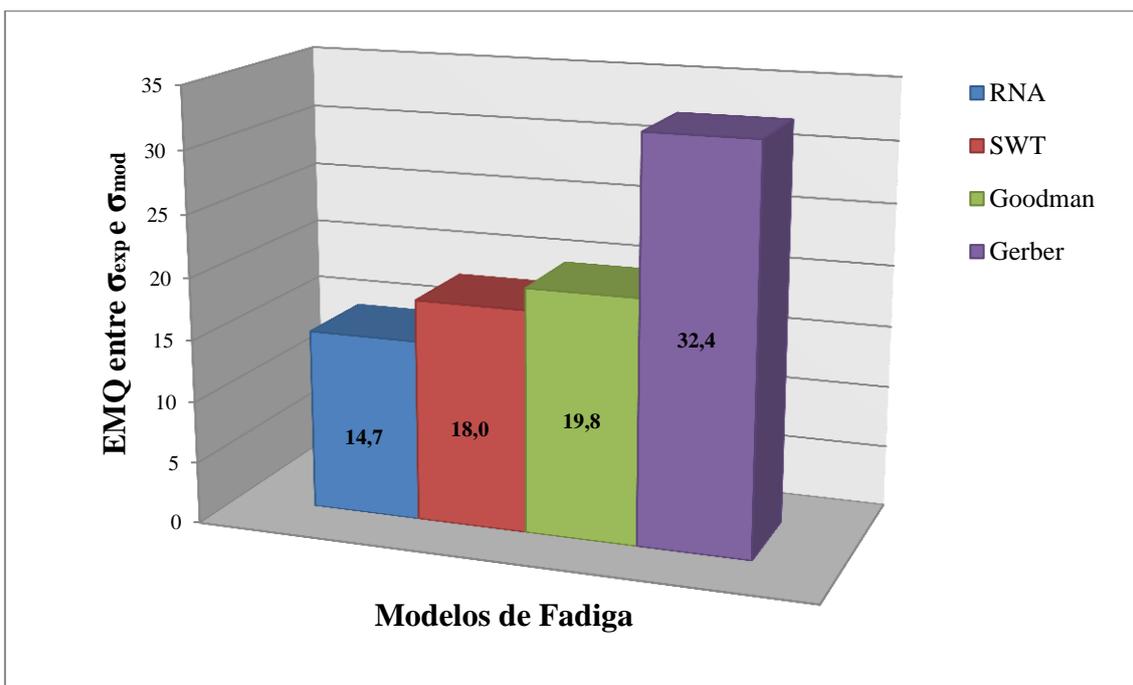


Figura 7.8. Gráficos dos EMQ sem normalizar entre amplitude de tensão experimental ( $S_{a\_exp}$ ) e amplitude de tensão dos modelos ( $S_{a\_mod}$ ) de Gerber, Goodman, SWT e RNA.

Embora percebe-se que tanto a **RNA** como o **SWT** apresentaram resultados bastante satisfatórios, é notável que os resultados encontrados utilizando a **RNA** mostraram-se mais eficientes para cabos condutores que o modelo de **SWT**, pois é mais conservador e possui a vantagem de demonstrar o comportamento a fadiga para qualquer número de ciclos, enquanto o **SWT** é aplicado para números específicos de

ciclos. Vale enfatizar que foram necessárias apenas duas curvas **S-N** para o treinamento da rede e uma para validação.

Portanto, fica evidente que a utilização de redes neurais artificiais para prever o comportamento em fadiga de cabos condutores de energia demonstrou ser uma ferramenta de fato eficiente conforme apresentado neste trabalho para os dois tipos de condutores Ibis (condutor de alumínio com alma de aço) e CAL 1055 MCM (condutor com fios de liga alumínio 6201). Assim, esta ferramenta pode proporcionar as empresas de linhas de transmissão de energia fazer previsões da vida à fadiga de cabos condutores submetidos a diferentes tensões médias, despendendo de menos tempo e recursos financeiros.

## 8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

### 8.1 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da tensão média de tração sobre a resistência em fadiga do cabo condutor CAL 1055 MCM. Para isso, foram realizados 27 testes de fadiga no laboratório de cabos da Universidade de Brasília.

Observou-se que a curva **S-N** com **EDS** de 25,6% de **RTS**, que corresponde a tensão média de 73 *MPa*, apresentou em número de ciclos uma redução de 43% comparando com a **EDS** de 20% (57 *MPa*). E, em relação à **EDS** de 17% (49 *MPa*), a vida diminuiu em 49%. Nota-se então, que com aumento da carga de esticamento do cabo (tensão média) reduziu de forma expressiva à resistência à fadiga do mesmo.

Assim, o condutor quando submetido à **EDS** de 17% e 20% de **RTS** apresentou um número de ciclos significativamente superior em relação a **EDS** de 25,6% de **RTS**. Ou seja, é necessário investigar os indícios de que a vida do condutor pode ser perigosamente reduzida pela utilização de uma **EDS** acima do padrão usualmente adotado. Portanto, é importante ressaltar que ao submeter o condutor CAL 1055 MCM a uma carga de esticamento maior ou igual a 25,6% de **RTS**, utilizar amortecedores poderá amenizar as amplitudes de vibrações causadas pelo vento e conseqüentemente melhorar a resistência à fadiga do mesmo. Nota-se ainda, que a comparação da curva padrão da CIGRE, *Safe Border Line* (CSBL) com as três curvas **S-N** obtidas experimentalmente revelam que os resultados com o cabo CAL 1055 MCM mostraram-se eficazes.

Além disso, o estudo verificou a qualidade dos resultados das tensões nominais encontrados através da Fórmula de Poffenber-Swart por meio dos ensaios dinâmicos, e constatou-se que a expressão empírico-analítica de **P-S** é de fato confiável, pois apresentou uma concordância bastante satisfatória com os dados obtidos experimentalmente.

A partir dos resultados obtidos através dos ensaios estáticos, dinâmicos e de fadiga com o cabo CAL 1055 MCM, pode-se afirmar que estes conjuntos de dados são de fundamental importância para o desenvolvimento de programas de manutenção preventiva de linhas de transmissão. Estes conhecimentos adquiridos fornecem parâmetros capazes de garantir segurança e economia nos projetos de linhas de transmissão utilizando este tipo de condutor.

Foi desenvolvido um modelo baseado em redes neurais artificiais para estimar o efeito da carga/tensão de esticamento sobre a resistência em fadiga de cabos condutores. Em uma análise preliminar foi utilizado dados disponíveis do condutor Ibis, os resultados obtidos utilizando duas curvas **S-N** mostraram-se acurados, onde o algoritmo de treinamento diminuiu o erro médio quadrático gerado entre a saída (**z**) da **RNA** e a resposta desejada (**d**) em 0,0005. Pode-se destacar ainda, que utilizando 15 camadas ocultas para o treinamento da rede foi possível obter resultados satisfatórios com um custo computacional reduzido.

No entanto, esta primeira análise apresentou o inconveniente de não possuir um conjunto de dados para validação da rede. Assim, em uma segunda análise neste trabalho foi possível fazer uma avaliação mais precisa do uso de **RNA** em cabos condutores de energia. Utilizou-se para isso as três curvas **S-N** obtidas com o condutor CAL 1055 MCM, sendo que a curva com **EDS** de 17% e 25,6% de **RTS** (tensões médias de 48 e 73 *MPa*) foram usadas para treinar a rede neural e a curva com 20% de **RTS** (tensão média de 57 *MPa*) para validar a rede. E o menor erro obtido entre a saída da rede (**z**) e a saída desejada (**d**) foi de 0,00015 com 8.652 épocas de treinamento, ou seja, o resultado mostrou-se bastante satisfatório, o que prova que esta ferramenta é de fato, promissora.

Por meio dos diagramas de vida constante encontrados utilizando a rede neural artificial foram determinadas regiões onde o condutor Ibis (alumínio com alma de aço) e o condutor CAL 1055 MCM (liga alumínio 6201) podem operar em segurança. Ressalta-se ainda que, é necessário que haja uma redução das amplitudes de tensões para obter a mesma vida em fadiga quando aumenta-se as tensões médias.

Ainda com objetivo de verificar a confiabilidade da **RNA** aplicada a cabos condutores foram avaliados três outros modelos de fadiga: Gerber, Goodman e **SWT**, nos quais foi possível analisar quais deles melhor descreveram o comportamento à fadiga do cabo CAL 1055 MCM. Os resultados mostraram que a **RNA** e **SWT** tiveram melhor aderência com os dados experimentais, apresentado **EMQ** de 0,00015 e 0,00018, respectivamente. No entanto, a **RNA** possui a vantagem de ser mais conservadora, o que possibilita maior segurança para a linha de transmissão de energia.

Portanto, ficou evidente que através de redes neurais artificiais é possível extrapolar o comportamento à fadiga de cabos condutores, utilizando-se para o treinamento da rede poucos dados experimentais. Isto permite ao projetista de linhas de

transmissão de energia antecipar resultados da provável vida à fadiga do cabo sujeito a diferentes tensões médias, economizando tempo e recursos financeiros para este fim.

## **8.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

- Verificação de outras arquiteturas de redes neurais para avaliar o efeito da tensão média em cabos condutores, com objetivo de comparar diferentes arquiteturas.
- Implementar o código da **RNA** de uma forma que seja possível extrapolar os resultados do comportamento em fadiga para qualquer configuração de cabo, utilizando como dados de entrada resultados de ensaios de fadiga para diferentes famílias de condutores.
- Usar a **RNA** para prever em quais números de ciclos ocorrerá às quebras dos fios a partir de dados levantados experimentalmente.
- Comparar os resultados obtidos com a **RNA** para modelar o efeito da tensão média sobre a resistência em fadiga de cabos condutores com outros modelos de fadiga teóricos encontrados na literatura.
- Avaliar experimentalmente o efeito da variação da temperatura na resistência em fadiga do condutor.
- Fazer uma análise probabilística dos resultados obtidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akira Júnior, P.S., Lúcio Júnior, C.N., Yoneyama, T. **Treinamento de Redes Neurais Artificiais Utilizando Time Assíncrono**. Proceedings of the IV Brazilian Conference on Neural Networks – IV Congresso Brasileiro de Redes Neurais, ITA, São José dos Campos – SP – Brazil., pp. 078-083, 1999.
- Al-Assaf, Y. El Kadi, H. **Prediction of the Fatigue Life of Unidirectional Glass Fiber/Epoxy Composite Laminae Using diferente Neural Network paradigms**. Composite Structures, Vol. 55, pp. 239-246, 2002.
- Altran, A. B.; Lopes, M.L.M; Minussi, C.R.; Alvarado, F.V. **Um estudo das funções de base radial aplicadas à previsão de cargas elétricas via redes neurais artificiais**. (CNMAC), XXVIII, 2005, Santo Amaro-SP), 2005.
- Assadi, M. A. Kadi, H. El. Deiab, I. M.. **Predicting the Fatigue Life of Different Composite Materials Using Artificial Neural Networks**. Springer Science, 2010.
- Azevedo, C.R.F and Cescon, T. **Faule analysis of aluminum cable steel reinforced (ACSR) conductor of the transmission line crossing the Paraná River**. Engineering Failure Analysis, 9, pp.654-664, 2002.
- Azevedo, C.R.F. **Fretting Fatigue in Overhead Conductors: Rig Design and Failure Analysis of a Grosbeak Aluminium Cable Steel Reinforced Conductor**. Engineering Failure Analysis, 16, pp 136-151, 2008.
- Bader, Q. & Kadum, E. **Mean Stress Correction Effects On the Fatigue Life Behavior of Steel Alloys by Using Stress Life Approach Theories**. International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS, Vol:14, N°:04, 2014.
- Barrett, J.S. and Motlis, Y. **Allowable Tension Levels for Overhead-Line Conductors**. IEEE Proc - Gener Transm Distrib Vol 148 No 1, January, 2001.
- Belísio, A. S.. **Utilização de RNA's na construção do diagrama de vida constante de probabilidade de materiais compósitos**. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.
- Bellorio, M. B. **Revisão sobre critérios de fadiga para cabos condutores de energia e uso de metodologia para estimative de sua vida remanescente**. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, 2009.
- Benite, Maurílio. **Aplicação de Modelos de Redes Neurais na Elaboração e Análise de Cenários Macroeconômicos**. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2003.
- Bernitsas, Michael M. **Vortex-induced vibration: Wikis**. University of Michigan, Ann Arbor, USA. November 17, 2009.

- Bessa, W. M. Fernandes, J.M.M. Tanaka, M.C. Freire Jr. R. C. S. **A neural network based controller for underwater robotic vehicles. In: 21 st International Congress of Mechanical Engineering.** Natal, 2011.
- Boniardi, M. Cincera, S. D'Errico, F. Tagliabue. **Fretting Fatigue Phenomena on an all Aluminium Alloy Conductor.** Key Engineering Materials Vols. 348-349 pp. 5-8, 2008.
- Botelho, Luiz Fernando Alves. **Análise Geral de Falhas por Fadiga.** Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2012.
- Braga, A. de.; Ludermir, T. B.; Carvalho, A.C. P. de L. F. **Redes Neurais Artificiais teoria e aplicações.** Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2000.
- Brasil, sua viabilidade e importância no contexto das mudanças climáticas.** Eletrobras, 2012.
- Brooks, H. and Tucker, N. **Electrospinning predictions using artificial neural networks.** Journal Polymer, 2015.
- Callister Jr., W. D. **Materials Science and Engineering: An introduction.** 7<sup>th</sup> Edition. John Wiley & Sons, Inc, 2007.
- Castro, L. N. e Zuben, F. J. **An artificial immune network for data analysis.** In Hussein A. Abbass e C. S. Newton (eds), Data Mining: A Heuristic Approach, Idea Group Publishing, USA, pp. 231-259, 2001.
- Cechin, A. L. & Stertz, K.. **Comparando a Performance de Redes Neurais Artificiais como Metamodelos de Simulação.** XXIII Encontro Nac. de Eng. de Produção - Ouro Preto, MG, 2003.
- CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. **Grandes Reservatórios de Água no** Cho, S.C., Rama, A.N. Kushida, C.A.:. **Normal Human Sleep.** In: Lee-Chiong, T.L.; 2006. Sleep – A Comprehensive Handbook. New Jersey: Wiley-Liss, 2006.
- Choi, Y. K. Kim, C.M. Park, H.M. **FPGA implementation of ICA algorithm for blind signal separation and adaptive noise canceling.** IEEE Transactions on Neural Networks (Volume: 14 , Issue: 5) , 2003.
- CIGRE SC22-WG04. **Guide for Endurance Tests of Conductors Inside Clamps.** Electra, No 100, pp. 77-86, 1985.

- CIGRÉ Study Committee 22, WG11, Task Force 1, "Modelling of Aeolian Vibrations of Single Conductors : Assessment of The Technology". Electra No. 198, pp. 53-69, 1998.
- CIGRE WG 04 SC 22 – 02. **Recommendations for the Evaluation of the Lifetime of Transmission Line Conductors**. ELECTRA 63. March, 1979.
- CIGRE, WG B2.30. Engineering Guidelines Relating to Fatigue Endurance Capability of Conductor/Clamp Systems. October, 2010.
- CIGRÉ. **Overhead conductor safe design tension with respect to aerolian vibrations**. B2.11.04, June, 2005.
- Claren, R. **The response of overhead line conductors to vortex shedding under laminar and turbulent air flow**. Presented to CIGRÈ, 1978.
- Coelho, F.G.F. **Modelo Semi-supervisionado Aplicado à Previsão da Eficiência da Quimioterapia Neoadjuvante no Tratamento de Câncer de Mama**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, Belo Horizonte-MG, 2008.
- Diniz, B. da C. **Desenvolvimento de diagramas de vida constante probabilísticos de compósitos utilizando RNA modular**. Tese de doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Natal, RN, 2017.
- Dowling, N. E. Calhoun, C. A. and Arcari, A. **Mean stress effects in stress-life fatigue and the Walker equation**. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2008.
- Dowling, N. E. **Mean Stress Effects in Stress-Life and Strain-Life Fatigue**. Department of Engineering Science and Mechanics, Blacksburg, Virginia 24061, USA, 2004.
- Dulhunty, P.W. **Some recent field experiences with vibration dampers**. CIGRE ISC22-71wg04, 7p. 1971.
- Eberhart, R. & Dobbins, R. **Neural Networks PC Tools - A Practical Guide**. Academic Press, San Diego, 1990.
- Electrotechnical Association, Vol. 61, No 5, 223-227, 1970.
- Eletronorte. **Revista corrente contínua, ano XXXII, nº 229**. Nov/dez. Disponível em: [http://www.eln.gov.br/opencms/export/sites/eletronorte/modulos/correnteContinua/arquivosCC/Corrente\\_Continua\\_229.pdf](http://www.eln.gov.br/opencms/export/sites/eletronorte/modulos/correnteContinua/arquivosCC/Corrente_Continua_229.pdf), Janeiro, 2009.

- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2015: Ano base 2014**. Rio de Janeiro, 2015.
- EPRI. **Electricity Energy Storage Technology Options**. Technical Update, December, 2010.
- EPRI. **Transmission Line Reference Book: The Orange Book**. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA, 1979.
- 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, Publicação ENM.TD-005/2010, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 185p. 2010.
- Fadel, A. A., Rosa, D., Murça, L.B., Ferreira, J.L.A., Araújo, J.A. **Effect of high mean tensile stress on the fretting fatigue life of an Ibis steel reinforced aluminium conductor**. International Journal of Fatigue, 2012.
- Fahlman, S. **An empirical study of learning speed in back propagation networks**. Technical Report CMU-CS-88-162, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, 1988.
- Fausett, L.V. **Fundamentals of neural networks: architectures, algorithms, and applications**. Prentice-Hall, Inc. New Jersey, 461p. 1994.
- Flore, D. & Wegener, K. **Modelling the mean stress effect on fatigue life of fibre reinforced plastics**. International Journal of Fatigue, 2016.
- Fragelli, R.R. & Araújo, J.A. **Vibração Eólica e Fadiga de Cabos em Linhas de Transmissão: Estado da Arte, Teorias de Projeto e Roadmapping**. Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas aplicadas a linhas de transmissão”/ Sergio de Oliveira Frontin (coordenador). Brasília: Goya, 2010.
- Freire Jr., R. C. S. Dória, A. D. & Aquino, E. M. F. **Use of modular networks in the building of constant life diagrams**. International Journal of Fatigue, pp. 389-396, 2007.
- Freire Jr., R. C. S. Dória, A. D. E. & Aquino, M. F.. **Building of constant life diagrams of fatigue using artificial neural networks**, International Journal of Fatigue, pp. 746-751, 2005.
- Frickle Jr., W. G., Rawlins, C. B. **Importance of Fretting in Vibration Fatigue of Stranded Conductors**. IEEE Transactions Paper, Vol. PAS-87, N° 6, Jun., pp.1381-1384, 1968.

- Frontin, S. de O. **Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas aplicadas a linhas de transmissão**. Brasília: Goya, 2010.
- Fuchs, R. D., Almeida, M. T., Labegalini, P. **Projetos Mecânicos de Linhas Áreas de Transmissão**. 1ª. Ed. Itajubá: Edgard Blücher, 252p, 1992.
- Garcia, A., Spin, J. A., Santos, C. A. **Ensaio dos Materiais**. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, 247p, 2000.
- Genel, K. **Application of artificial neural network for predicting strain-life fatigue properties of steels on the basis of tensile tests**. International Journal of Fatigue - Elsevier, 2004.
- Gerber, W.Z. **Bestimmung der zulässigen spannungen in eisen-constructionen (Calculation of the allowable stresses in iron structures)**. Z Bayer Archit. Ing-Ver. 6 101–110, 1874.
- Golden, R. M.. **Mathematical Methods for Neural Network Analysis and Desing**. Includes bibliographical references and index. Massachusetts Institute of Techonology, 1996.
- Gomes, F. B. **Análise Comparativa de Aparelhos para Medição de Vibração em Cabos Condutores de Energia e Cálculo da Vida Remanescente em Cabos**. 110 p. Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010.
- González, M. A. S.; Formoso, C. T. **Análise da Utilização de Inteligência Artificial na Determinação de Plantas de Valores**. Estudos Tecnológicos (São Leopoldo), São Leopoldo, v. 23, n.18, p. 35-44, 2000.
- Goodman , J. **Mechanics Applied to Engineering**. Longmans, Green & Co (1899).
- Gopalan, T.V. **New excitation system for indoor testing of overhead conductors**. Journal of Energy Engineering, vol. 119, n.3, pp. 159-167, 1993.
- Hardy, C. and Brunelle, J. **Principles of measurement and analysis with the new Pavica conductor vibration recorder**. CEA report (Canadian Electrical Association), 1991.
- Hardy, C. and Leblond A. **Estimated Maximum Safe  $H/w$  for Undamped Conductor Spans**. Report CIGRÉ SC22-WG11-TF4-95-13, September, 1994.
- Hardy, C., Watts, J.A, Brunelle, J. e Clutier, L.J. **Research on the Dynamics of Bundled Conductors at the Hydro-Quebec Institute of Research**. Canadian Electrical Associations, Engineering and Operating Division, vol. 14, Part 4, 1975.

- Haykin , S.. **Redes Neurais Princípios e Prática**. 2ª Edição; Ed.: Bookman, 2001.
- Haykin, S. **Redes neurais: princípios e prática**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.
- Haykin, S.. **Neural Networks – A Comprehensive Foundation**. Second Edition  
McMaster University, Hamilton, Ontario. Canadá; Ed.: Personal Education, Prentice  
Hall, 1999.
- Henriques, A. M. D.. **Bancada de Ensaios Mecânicos à Fadiga de Cabos Condutores  
de Energia**. Tese de Doutorado – Universidade de Brasília, 2006.
- IEEE, Std 563.**Guide on Conductor Self Damping Measurements**, 1966.
- IEEE. **Guide for the Design and Installation of Cable Systems in Substations**.  
Institute of Electrical and Electronic Engineers. New York, 2007.
- IEEE. **Standardization of Conductor Vibration Measurements**. IEEE PAS vol. 85  
Nº. 1, Trans. 31 TP65-156, 1978.
- Jalham, I. S. **Modeling capability of the artificial neural network (ANN) to predict  
the effect of the hot deformation parameters on the strength of Al-base metal  
matrix composites**. Composites science and technology- Elsevier, 2003.
- Kahn, H. Chen, L. Ballarini, R. Heuer, A.H. **Mechanical fatigue of polysilicon:  
Effects of mean stress and stress amplitude**, Acta Materialia Inc. Published by  
Elsevier, 2005.
- Kalombo, R.B. Pestana, M.S. Ferreira, J.L.A. da Silva, C.R.M. Araújo, J.A. **Influence  
of the catenary parameter (H/w) on the fatigue life of overhead conductors**.  
Tribology International 108, pp. 141–149, 2017.
- Kalombo, R.B.; Araújo, J.A.; Ferreira, J.L.A.; da Silva, C.R.M.; Alencar, R.; Capra,  
A.R. **Assessment of the Fatigue Failure of an All Aluminium Alloy Cable  
(AAAC) for 230 kV Transmission Line in the Center-West of Brazil**.  
Engineering Failure Analysis, v.61, pp. 77-87. 2016.
- Kamaya, M. & Kawakubo, M. **Mean stress effect on fatigue strength of stainless  
steel**. International Journal of Fatigue. Nº 74, pag. 20-29, 2015.
- Lent, Robert. **Cem bilhões de neurônios? Conceitos fundamentais de neurociência -  
2ª edição**, 2010.
- Lévesque, F., Goudreau, S., Langlois S. and Légeron, F. **Experimental Study of  
Dynamic Bending Stiffness of ACSR Overhead Conductors**. IEEE Transactions  
on Power Delivery, vol. 30, no. 5, October, 2015.
- Lima, Rafael & Barreto, Guilherme. **On the performance of Neural Networks for  
Face Recognition: Linear or Nonlinear Classifiers?.** IEEE International  
Symposium on Circuits and Systems, 2011.

- Lin, C.M. Hsu, C. F. **Controlo híbrido de rede neural para sistemas de travagem antibloqueio**. IEEE Transactions on Neural Networks (Volume: 14, Issue: 2), 2003.
- Lopes, L. I. Santos, A.O. F.; Pinheiro, A.M. C. **Inteligência Artificial** – 1. Ed. – Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- Maeda, E. Y. da Mota, J. F. Vitor, A.. **Aplicação das redes neurais de base radial na meteorologia**. VII Encontro de Produção Científica e Tecnológica, 2012.
- McCulloch, W. S.; Pitts, W. A. **Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity**. Bulletin of Mathematical Biophysics. [s.1.], v.5, p.115-133, 1943.
- Moecks, L. Moecks, L. **Vibration damage on stranded conductors**. Bulletin of the Swiss Electrotechnical Association, Vol. 61, No 5, 223-227, 1970.
- Morrow, J. **Fatigue properties of metals**. Section 3.2. In: *Fatigue Design Handbook*, Pub. No. AE-4. Soc. of Automotive Engineers, Warrendale, PA. Section 3.2 is a summary of a paper presented at Division 4 of the SAE Iron and Steel Technical Committee, Nov. 4, 1964, 1969.
- Mortazavian, S. and Fatemi, A. **Effects of mean stress and stress concentration on fatigue behavior of short fiber reinforced polymer composites**, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2015.
- Murça, L.B. **Estudo experimental do efeito da sequência de carregamento sobre a resistência à fadiga de cabos condutores**. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas. Universidade de Brasília, 2011.
- Niestony, A. & Böhm, M. **Mean stress effect correction using constant stress ratio S–N curves**. *International Journal of Fatigue*. DOI: 10.1016/j.ijfatigue, 2013.
- Norton, R. L. **Projeto de Máquinas – Uma abordagem integrada**. Ed. Bookman – 7ª Edição, 2005.
- Olding, D. H.. **The Organization of Behavior**. Jhon Wiley Sons, Inc. London. Chapman Hall, Limited. New York, 1949.
- ONS: **Operador Nacional do Sistema Elétrico. Plano da Operação Energética Pen**, 2014.
- Pestana, M.S. Kalombo, R.B. Araújo, J.A. Ferreira, J.L.A. Miranda, T.B. Silva, C.R.M. Vieira, R.E.R. Rocha, P.H.C. **Análise do efeito da tensão média sobre a resistência à fadiga do cabo condutor cal 1055 MCM**. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM, 2016.
- Poffenberger, J.C., and Swart, R. L. **Differential Displacement and Dynamic Conductor Strain**. IEEE Transactions Paper, Vol PAS 84, pp. 281-289, 1965.

- Prechelt, L. **Automatic Early Stopping Using Cross Validation: Quantifying the Criteria**. Fakult at fur Informatik Universitat Karlsruhe. Germany, 1998.
- Prechelt, L. **Investigation of the CasCor Family of Learning Algorithms**. Fakult at fur Informatik Universitat Karlsruhe. Germany, 1997.
- Preston, B., McGill, A., Ramey, G. E. **Effect of Suspencion Clamp Geometry on Transmission Line Fatigue**. Journal of Energy Engineering, vol. 112, no 3, pp. 168-183, 1986.
- Pujol, J. C. F. & Pinto, J.M.A. **A neural network approach to fatigue life prediction**. International Journal of Fatigue, 2011.
- Purdue Polytechnic Institute, Purdue University, 401 N. **A mean stress correction model for tensile and compressive mean stress fatigue loadings**. Fatigue Fract Engng Mater Struct, 40, pp. 939–948, 2017.
- Ramamurti, V. **Mechanical Vibration Practice With Basic Theory**. Departament of Applied Mechanics. Indian Institute of Technology, Madras, India, 2000.
- Ramey, G. E. McGill, P.B. **Effect of suspension clamp geometry on transmission line fatigue**. Journal of energy engineering, 1986.
- Ramey, G. E. Silva, J. M. **An Experimental Evaluation of Conductor Aeolian Fatigue Damage Mitigation by Amplitude Reduction**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems (Volume: PAS-100, Issue: 12), 1981.
- Rawlins, C.B, Hard, A.R, Ikegami R., Doocy, E.S. **Transmission Line Reference Book – Wind- Induced Conductor Motion**. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute, 1979.
- Riedmiller, M., and Braun, H. **A direct adaptive method for faster backpropagation learning: The RPROP algorithm**. Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, San Francisco, 1993.
- Rocha, P. H. C. **Estudo comparativo de vida em fadiga de cabos condutores utilizando o critério h/w**. Projeto de Graduação apresentado a Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Mecânica, 2016.
- Ronco, E. Gawthrop, P. **Modular Neural Networks: a state of the art**. Technical report: CSC-95026. Centre for System and Control. University of Glasgow, Glasgow, Uk, 1995.
- Rosa, A. A.; Monetti J. and SIter, R. B. **Overhead Line Vibration and Inspection Techniques**. Trabalho apresentado no IEE Laticon, São Paulo, 1974.
- Rosa, E. **Análise de Resistência Mecânica**. Grupo de análise e projeto mecânico, Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

- Rumelhart, D. E., & McClelland, J. L.. **Learning Internal Representations By Error Propagation**. In: Parallel Distributed Processing. Rumelhart, D. E. and McClelland, J. L. MIT Press, Cambridge, 1986.
- Sá, H. E. G. **Um método baseado em inteligência computacional para a geração automática de casos de teste de caixa preta**. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.
- Salomão, J.M. & Andreão, R.V. **Inteligência Artificial: Redes Neurais Artificiais**. Curso de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, 2014.
- Shigley, J. E. Charles, R. M. & Budynas, R. G.. **Projeto de Engenharia Mecânica**, 7ª Ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.
- Silva, I. N. da, Spatti, D.H. Flauzino, R. A. **Redes Neurais Artificiais para Engenharia e Ciências Aplicadas – Curso Prático**, Ed. Arliber, 399 p. São Paulo, SP, 2010.
- Smith, K. N. Watson, P. Topper, T. H. **A stress-strain function for the fatigue of metals**. J. Mater., ASTM 5, 767–778, 1970.
- Tatibana, C. Y. & Kaetsu, D.Y. **Introdução as Redes Neurais**. [www.din.uem.br/ia/neurais/#desenvolvimento](http://www.din.uem.br/ia/neurais/#desenvolvimento), 2017.
- Too, G.P.J., Chen, S.R. and Hwang, S. **Inversion for acoustic impedance of a wall by using artificial neural network**, *Applied Acoustics*. 68 (4), 377-389, 2007.
- Uygun, I. Cicek, A. Toklu, E. Kara, R. Saridemir, S. **Fatigue life predictions of metal matrix composites using artificial neural networks**. Archives of Metallurgy and Materials, 2014.
- Vassilopoulos, A. P., Georgopoulos, E.F., Dionysopoulos, V. **Artificial neural networks in spectrum fatigue life prediction of composite materials**. International Journal of Fatigue, 2007.
- Wasserman, P. **Neural Computing Theory and Practice**. Van Nostrand Rheinhold, New York, 1989.
- Watson, K. N. Watson, P., Topper, T. H. **A stress-strain function for the fatigue of metals**. J. Mater., ASTM 5, 767–778, 1970.
- Zetterholm, O. D. **Report on the Work of the International CIGRÈ. SC, 110.6: Bare Conductors and Mechanical Calculation**. Of Overhead Lines, 1960.
- Zhang, Z. & Friedrich, K. **Artificial Neural Networks Applied to Polymer Composites: a Review**. Composites Science and Technology, Vol. 63, pp. 2029-2044, 2003.

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

Zolin, I. **Ensaio Mecânicos e Análises de Falhas** / Ivan Zolin. – 3. ed. – Santa Maria : Universidade Federal de Santa Maria : Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 102 p. : il, 2010.