

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E  
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CABOS CONDUTORES  
ELÉTRICOS DO TIPO CAA USADOS E SUA ADEQUAÇÃO AO  
RETRACIONAMENTO.**

**Rogério Lavandoscki**

**SÃO CARLOS – SP**

**2005**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E  
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CABOS CONDUTORES  
ELÉTRICOS DO TIPO CAA USADOS E SUA ADEQUAÇÃO AO  
RETRACIONAMENTO.**

**Rogério Lavandoscki**

**Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-  
Graduação em Ciência e  
Engenharia de Materiais  
como requisito parcial à  
obtenção do título de  
MESTRE EM ENGENHARIA  
DE MATERIAIS.**

**Orientador: Prof. Dr. Claudemiro Bolfarini**

**SÃO CARLOS – SP  
2005**

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da  
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

L395ep

Lavandoscki, Rogerio.

Estudo das propriedades mecânicas de cabos condutores elétricos de tipo CAA usados e sua adequação ao retracionamento / Rogério Lavandoscki. -- São Carlos : UFSCar, 2006.  
89 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2005.

1. Propriedades mecânicas. 2. Retracionamento. 3. Condutores elétricos. 4. Grampeamento. 5. Fadiga. 6. Fretting I. Título.

CDD: 620.112 (20<sup>a</sup>)

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à minha esposa Juliana Aparecida Boaretto pelo apoio, companheirismo e incentivo.

## **VITAE DO CANDIDATO**

Engenheiro de Produção Mecânica pela UNIMEP (1995)

**MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE  
MESTRADO DE**

**ROGÉRIO LAVANDOSKI**

**APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E  
ENGENHARIA DE MATERIAIS, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO  
CARLOS, EM 24 DE OUTUBRO DE 2005.**

**BANCA EXAMINADORA:**

**DR. CLAUDEMIRO BOLFARINI  
ORIENTADOR  
PPG-CEM / UFSCAR**

**DR. NELSON GUEDES DE ALCÂNTARA  
DEMa / UFSCar**

**DR. LUIZ CARLOS CASTELETTI  
EESC / USP**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Dr. Claudemiro Bolfarini pela orientação, apoio, motivação e amizade.

Aos professores Dr. Nelson Guedes de Alcântara e Dr. Tomaz Toshimi Ishikawa pela argumentação construtiva no exame de qualificação.

Ao CCDM, em especial aos Engenheiros Camilo B. Carletti, Arthur Resende e Marcos Sylvestre, pelo apoio nas realizações dos ensaios.

Aos Engenheiros Breno de Souza Vianna, Mário Carlos Andreolli, Alexandre Emmanuel Mendes Meloni e Paulo César de Oliveira Teixeira (CTEEP), pelo apoio e incentivo.

Aos professores Dr. Carlos Roberto Camello Lima e Dr. Luis Carlos Molina Picinato da UNIMEP (Universidade Metodista de Piracicaba) pelo apoio e incentivo.

À CTEEP (Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista) pela autorização e dispensa para a realização do curso.

À UFSCar, ao DEMa e ao PPG-CEM pela oportunidade e suporte oferecidos.

À minha família, à todos os amigos e profissionais que me ajudaram nesse período.

## RESUMO

Diversas linhas aéreas de transmissão de energia elétrica (LTs) foram construídas numa época em que o Brasil dispunha de pouca tecnologia para o desenvolvimento dos projetos e construção. Com isso, os projetos eram baseados em normas estrangeiras, que prescreviam distâncias entre os condutores elétricos e o solo abaixo dos valores hoje recomendados pela norma brasileira. Uma das alternativas para a correção do problema de cabos baixos é a reforma da linha de transmissão, quando pode ser empregado o processo de retracionamento para alteamento dos cabos CAA (Condutores de Alumínio com Alma de Aço). Este trabalho tem como objetivo, o estudo da influência do grampo de suspensão (fadiga e “*fretting*” – desgaste por atrito entre os fios do condutor e o grampo de suspensão) em determinadas propriedades mecânicas dos condutores usados, visto que esse ponto do condutor é deslocado para fora do grampo de suspensão quando da aplicação do retracionamento, além de ficar submetido a um valor de carregamento mecânico mais elevado. Esses estudos englobam a realização de ensaios de tração e vibração, além de análises metalográficas em amostras de cabos condutores completos usados (regiões dentro e fora do grampo de suspensão) e em condutores novos sem uso. Os resultados obtidos do ensaio de tração indicaram que, para os cabos estudados, não há uma influência direta da região do grampo nas propriedades mecânicas estáticas, como a carga de ruptura e alongamento percentual. Com relação ao ensaio de vibração, todas as amostras de cabos não apresentaram qualquer tipo de fratura, o que levou o ensaio a ser realizado até 10.000.000 de ciclos. As análises microestruturais mostraram a presença de marcas de *fretting* na parte da camada mais externa e interna dos condutores, mas apenas com danos muito superficiais. Dessa forma, pode-se concluir que, para o condutor estudado é possível a utilização do processo de retracionamento para a reforma da linha de transmissão.

## **AGED ACSR CONDUCTORS' STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES AND ADEQUACY TO THE RE-TENSIONING**

### **ABSTRACT**

Several electric power overhead transmission lines were built in a time when Brazil had little technology for the development of the projects and construction. Those projects were based on foreign standards, that prescribed distances between the electric conductors and the soil below nowadays recommended values by the Brazilian standards. Just like an alternative for the correction of the problem of low height cables is the refurbished of the transmission line, when re-tensioning process can be used for increasing soil – conductor (ACSR – Aluminium Conductor Steel Reinforced) distance. This work intends to study of the influence of the suspension clamp (fatigue and fretting - attrition between the conductor's strands and the suspension clamp) in certain mechanical properties of the aged conductors because this point of the conductor is moved outside of the suspension clamp when the re-tensioning is used, besides that, conductor is still submitted to higher mechanical value loading. Those studies include the tension and vibration tests, besides metallographic analysis making use optical microscopy and electron scanning in samples of aged conductors (areas inside and out of the suspension clamp) and in new conductors, not submitted to loading or clamping before. The obtained results of the tension test indicated that, for studied conductors, there is not a direct influence of the area of the clamp in the static mechanical properties, such as the rupture load and percent elongation. Regarding the vibration test, all of the samples of cables didn't present any fracture type and this fact took the test to be accomplished up to 10.000.000 cycles. The microstructural analysis indicated the occurrence of fretting marks on the innermost and outermost layers of strands of the conductor, but just superficial damages were observed. So, it can be concluded that, for the studied conductor it is possible the use of the re-tensioning process for the refurbished of the transmission line.

## **PUBLICAÇÕES**

LAVANDOSCKI, R.; CARLETTI, C.B.; BONOME, E.C.; SYLVESTRE, M. A.; VICENTIM, R. L.; BOLFARINI, C. Determinação de Propriedades Mecânicas dos Condutores CAA para o Processo de Retracionamento. In: II Congresso Internacional do Alumínio da ABAL. São Paulo – SP. Agosto, 2005.

## SUMÁRIO

BANCA EXAMINADORA .....	i
AGRADECIMENTOS .....	iii
RESUMO .....	v
ABSTRACT .....	vii
PUBLICAÇÕES .....	ix
SUMÁRIO .....	xi
ÍNDICE DE TABELAS .....	xv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xvii
SÍMBOLOS E ABREVIACÕES .....	xxi
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Relevância do Projeto .....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1 Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica .....	5
2.1.1 Elementos Básicos para Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão .....	5
2.1.2 Projetos Mecânicos dos Condutores .....	7
2.1.2.1 Seleção do Cabo Condutor .....	7
2.1.2.2 Cálculo Mecânico dos Cabos – Suportes a Mesmas Alturas .....	7
2.1.2.2.1 Catenária e Parábola .....	7
2.1.2.2.2 Trações .....	8
2.1.2.2.3 Flechas .....	8
2.1.2.2.4 Dilatação do Cabo .....	9
2.1.2.3 Equação de Mudança de Estado – Vão Isolado .....	10
2.1.2.4 Seleção da Condição Básica .....	11
2.1.2.5 Vãos .....	12
2.1.2.5.1 Vão Máximo .....	12
2.1.2.5.2 Vão de Vento ou Vão Médio .....	12
2.1.2.5.3 Vão de Peso ou Vão Gravante .....	13
2.1.2.5.4 Vão Equivalente ou Vão Regulador .....	13
2.2 Cabo Condutor Elétrico Tipo CAA .....	13

2.2.1 Fios de Alumínio Nus de Seção Circular para Fins Elétricos .....	14
2.2.1.1 Material Utilizado na Fabricação dos Fios de Alumínio .....	14
2.2.1.2 Classificação do Alumínio 1350 .....	14
2.2.1.3 Características do Alumínio 1350.....	15
2.2.1.4 Mecanismo de Endurecimento dos Fios de Alumínio 1350 – Grau de Encruamento H19 .....	17
2.2.1.5 Resistência à Tração dos Fios de Alumínio 1350-H19.....	18
2.2.2 Fios de Aço Zincados para Alma do Cabo de Alumínio – CAA.....	18
2.2.2.1 Material Utilizado na Fabricação dos Fios de Aço.....	18
2.2.2.1.1 Aço Carbono Comum.....	18
2.2.2.2 Propriedades Mecânicas dos Fios de Aço .....	19
2.3 Retracionamento .....	19
2.4 Fatores que afetam as Propriedades Mecânicas dos Cabos CAA .....	20
2.4.1 Esforços Estáticos - Influência de Agentes Externos nos Cabos Condutores (Sobrecargas Mecânicas).....	20
2.4.2 Esforços Dinâmicos – Carregamento Cíclico Induzido pela Vibração Eólica .....	22
2.4.2.1 Dimensões e Causas das Vibrações.....	22
2.4.3 Efeito dos Grampos de Suspensão na Fadiga de Cabos CAA .....	23
2.5 Fadiga de Cabos CAA (Fadiga por <i>Fretting</i> e por Flexão Alternada) .....	26
2.5.1 Fadiga em Metais .....	26
2.5.1.1 Resistência à Fadiga.....	26
2.5.1.2 Falha por Fadiga .....	26
2.5.1.3 Tensões Cíclicas .....	26
2.5.2 Danos Causados em Cabos Sujeitos a Vibração Eólica .....	28
2.5.3 Fadiga por <i>Fretting</i> de Cabos CAA.....	34
2.5.3.1 Fenômeno da Fadiga por “ <i>Fretting</i> ” (Atrito entre Fios) .....	34
2.5.3.2 Mecanismo da Fadiga por <i>Fretting</i> em Cabos CAA .....	35
2.5.4 Fadiga por Flexão Alternada em Cabos CAA (Tensão Dinâmica) .....	38
2.5.4.1 Fenômeno da Fadiga Comum (Flexão dos Fios) .....	38
2.5.4.1.1 Nucleação de Trinca por Fadiga .....	38
2.5.4.1.2 Propagação de Trinca por Fadiga .....	40

2.5.4.1.3 Falha Catastrófica.....	41
2.5.4.2 Mecanismo de Fadiga por Flexão Alternada em Cabos CAA.....	42
2.5.4.2.1 Cálculo da Tensão Dinâmica Causada por Flexão do Condutor	46
2.6 Ensaio Mecânicos .....	47
2.6.1 Ensaio de Tração de Cabos de Alumínio com Alma de Aço – CAA .....	47
2.6.2 Ensaio de Vibração de Cabos de Alumínio com Alma de Aço - CAA ....	48
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	51
3.1 Materiais.....	51
3.1.1 Retirada de Corpos de Prova.....	51
3.2 Metodologia do Trabalho Experimental.....	53
3.3 Procedimento Experimental .....	54
3.3.1 Construção de Equipamento para Ensaio de Tração .....	54
3.3.2 Construção de Equipamento para Ensaio de Vibração .....	56
3.3.3 Realização dos Ensaio Mecânicos.....	58
3.3.3.1 Ensaio de Tração no Cabo Condutor.....	58
3.3.3.1.1 Ensaio de Tração no Cabo Condutor Completo .....	58
3.3.3.1.2 Ensaio de Tração na Alma de Aço .....	59
3.3.3.2 Ensaio de Vibração.....	59
3.3.4 Caracterização Microestrutural .....	60
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	61
4.1 Ensaio de Tração .....	61
4.2 Ensaio de Vibração .....	67
4.3 Caracterização Microestrutural .....	68
5 CONCLUSÕES .....	83
6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....	85
7 REFERÊNCIAS.....	87

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição química nominal - segundo dígito igual a 3 .....	15
Tabela 2.2 - Composição química do aço para fabricação dos fios .....	18
Tabela 2.3 - Propriedades mecânicas dos fios de aço .....	19
Tabela 2.4 - Limite de resistência à fadiga do EPRI .....	30
Tabela 2.5 - Ocorrência relativa de quebra de fios nas camadas internas e externas de cabo CAA: formação 30/7 (30 fios de alumínio / 7 fios de aço) ....	31
Tabela 2.6 - Seqüência de falha de fios em condutor multicamada CAA .....	32
Tabela 3.1 - Representação gráfica da matriz experimental .....	54
Tabela 4.1 - Valores obtidos do ensaio de tração dos condutores Oriole .....	63
Tabela 4.2 - Valores de carga de ruptura e alongamento das almas de aço para os condutores novos e usados para o condutor Oriole .....	65

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Detalhe do grampo de suspensão (ponto de grampeamento) .....	2
Figura 2.1 - Parâmetros geométricos da catenária.....	8
Figura 2.2 - Flecha $f$ de um determinado vão “ $a$ ”.....	9
Figura 2.3 - Formação do Cabo condutor CAA - 30 fios de alumínio (Coroa com duas camadas) e 7 fios de aço (Alma) .....	14
Figura 2.4 - Diagrama de Goodman .....	21
Figura 2.5 - Grampos de suspensão testados.....	24
Figura 2.6 - Falhas por fadiga versus raios dos grampos.....	25
Figura 2.7 - Posições dos fios onde ocorrem as falhas – três amostras de cabos ensaiadas por tamanho de raio de grampo .....	25
Figura 2.8 - Tipos de tensões cíclicas em fadiga: (2.8.a) tensão alternada reversa; (2.8.b) tensão repetida flutuante; (2.8.c) tensão irregular aleatória .....	28
Figura 2.9 - Resultados de ensaios compilados pelo EPRI.....	30
Figura 2.10 - Superfícies em contato sujeitas a carregamentos tangenciais – <i>Fretting</i> .....	34
Figura 2.11 - Curva de fadiga S-N com e sem <i>fretting</i> para amostra de aço 3,5%NiCrMoV e aço 1%CrMo .....	35
Figura 2.12 - Esquema da montagem cabo e grampo de suspensão .....	36
Figura 2.13 - Modos de contato (a) entre o grampo e (b) cabos de alumínio com alma de aço .....	36
Figura 2.14 - Resultados de ensaios compilados pela CIGRÉ.....	37
Figura 2.15 - (A) elementos de nucleação de trincas em componentes sujeitos a esforços cíclicos e (B) concentradores de tensão .....	39
Figura 2.16 - Mecanismo para formação de extrusões e intrusões propostos por Cottrell e Hull.....	40
Figura 2.17 - Mecanismo de propagação de trinca de fadiga (estágio II) através de um processo repetitivo de abaulamento e afilamento plástico da extremidade da trinca; (a) carga compressiva zero ou máxima, (b) carga de tração pequena, (c) carga de tração máxima, (d) carga compressiva pequena,	

(e) carga compressiva zero ou máxima, (f) carga de tração pequena. O eixo de carregamento é vertical.....	41
Figura 2.18 - Efeito da flexão do condutor sobre o movimento do fio externo ..	43
Figura 2.19 - Área de contato de fios entre camadas .....	44
Figura 2.20 - Movimento do fio adjacente ao grampo .....	44
Figura 3.1 - Distanciamentos para retiradas dos corpos de prova de condutores .....	52
Figura 3.2 - Acondicionamento dos corpos de prova de condutores .....	52
Figura 3.3 - Fluxograma do procedimento experimental.....	53
Figura 3.4 - Desenho esquemático da máquina de ensaio de tração em (mm) .....	55
Figura 3.5 - Máquina de ensaio de tração com sistema de aquisição de dados .....	55
Figura 3.6 - Sistemas de fixação (A) utilizando resina; (B) grampo pensado....	56
Figura 3.7 - Esquema do ensaio de vibração; (A) Visão geral; (B) Maiores detalhes .....	57
Figura 3.8 - (A) Dispositivo de vibração dos cabos; (B) Dispositivo de aplicação de carga .....	57
Figura 4.1 - Região de grampeamento e grampo para o condutor Oriole.....	61
Figura 4.2 - Figura ilustrativa da curva Carga x Deformação para o cabo novo, para o condutor Oriole .....	62
Figura 4.3 - Figura ilustrativa da curva Carga x Deformação para o cabo usado, sem a região do grampo, para o condutor Oriole.....	62
Figura 4.4 - Figura ilustrativa da curva Carga x Deformação para o cabo usado, com a região do grampo, para o condutor Oriole.....	63
Figura 4.5 - Figura ilustrativa da curva Carga x Deformação para alma de aço do cabo novo para o condutor Oriole .....	64
Figura 4.6 - Figura ilustrativa da curva Carga x Deformação para alma de aço do cabo usado para o condutor Oriole .....	65
Figura 4.7 – Microestrutura dos fios de alumínio do cabo usado sem a região de grampeamento. Seção longitudinal do fio .....	69

Figura 4.8 – Microestrutura dos fios de alumínio do cabo usado com a região de grampeamento. Seção longitudinal do fio.....	69
Figura 4.9 – Microestrutura dos fios de alumínio do cabo novo. Seção longitudinal do fio.....	70
Figura 4.10 - Microestrutura observada no MEV dos pontos escuros e claros dos fios de alumínio para o cabo usado (amostra B). Seção longitudinal do fio .....	71
Figura 4.11 - Microestrutura observada no MEV dos pontos escuros e claros dos fios de alumínio para o cabo novo (amostra D). Seção longitudinal do fio	71
Figura 4.12 - Resultado da microanálise referente ao ponto B-1 identificado na figura 4.10 (Cabo usado).....	72
Figura 4.13 - Resultado da microanálise referente ao ponto B-2 identificado na figura 4.10 (Cabo usado).....	72
Figura 4.14 - Resultado da microanálise referente ao ponto B-3 identificado na figura 4.10 (Cabo usado).....	73
Figura 4.15 - Resultado da microanálise referente ao ponto D-1 identificado na figura 4.11 (Cabo novo).....	73
Figura 4.16 - Resultado da microanálise referente ao ponto D-2 identificado na figura 4.11 (Cabo novo).....	74
Figura 4.17 - Resultado da microanálise referente ao ponto D-3 identificado na figura 4.11 (Cabo novo).....	74
Figura 4.18 - Microestrutura alongada do aço da alma do condutor usado. Presença de microtrincas (setas azuis) - Seção longitudinal do fio.....	75
Figura 4.19 - Microestrutura alongada do aço da alma do condutor novo. Seção longitudinal do fio.....	76
Figura 4.20 - Marcas na superfície do condutor Oriole.....	76
Figura 4.21 - Região de fixação do grampo de suspensão e a proteção do condutor Oriole .....	77
Figura 4.22 - Marca de <i>fretting</i> para o fio de alumínio na camada intermediária .....	78
Figura 4.23 - Marca de <i>fretting</i> para o fio da alma de aço .....	78
Figura 4.24 - Resultado de microanálise para o condutor Oriole.....	79

Figura 4.25 - Presença de óxido no fio de alumínio – Condutor Oriole.....	79
Figura 4.26 - Fissuras em camada de óxido sobre a superfície dos fios da alma de aço do condutor Oriole.....	80

## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- LT:** linha aérea de transmissão de energia elétrica
- CAA:** condutor de alumínio com alma de aço
- EDS:** everyday stress (tração mecânica diária do cabo) – (kgf)
- kWh:** kilo Watt hora
- Y(x):** equação da catenária
- c:** parâmetro da catenária
- T:** tração do cabo – (kgf)
- f:** flecha do cabo – (m)
- S<sub>0</sub>** = área da secção transversal do cabo (m<sup>2</sup>)
- E:** módulo de elasticidade – (MPa)
- N:** número de ciclos
- RMC:** resistência mecânica calculada – (kgf)
- CR:** carga de ruptura – (tf)
- Y<sub>b</sub>:** amplitude de vibração – (mm)
- K:** constante de proporcionalidade
- EI:** rigidez a flexão – (N.mm<sup>2</sup>)
- MO:** microscópio ótico
- MEV:** microscópio eletrônico de varredura
- CTEEP:** Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista
- α:** coeficiente de dilatação térmica linear – (°C)<sup>-1</sup>
- ΔT:** variação de temperatura – (°C)
- σ:** tensão mecânica – (MPa)
- σ<sub>máx</sub>:** tensão máxima – (MPa)
- σ<sub>mín</sub>:** tensão mínima – (MPa)
- σ<sub>r</sub>:** intervalo de tensões
- σ<sub>a</sub>:** tensão alternada ou dinâmica – (MPa)
- σ<sub>m</sub>:** tensão média – (MPa)
- ε:** deformação – (%)

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Relevância do Projeto

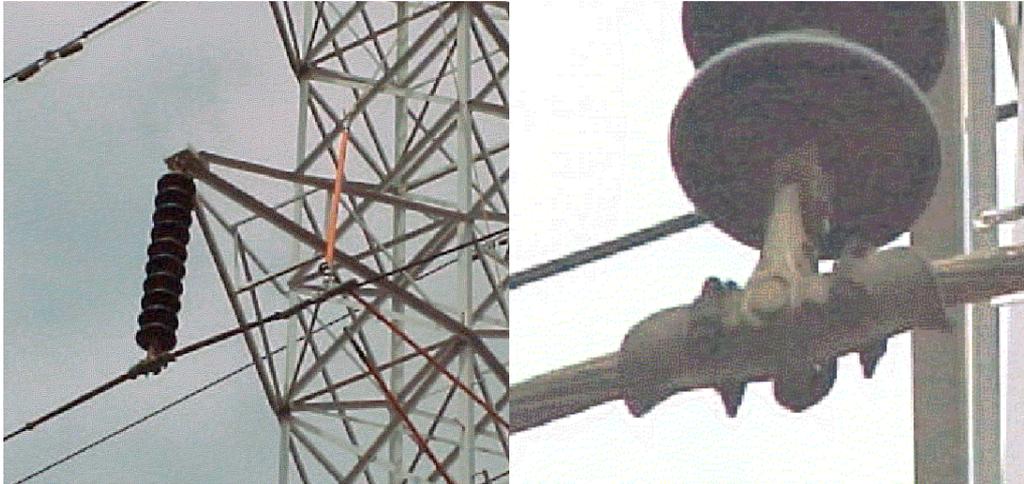
Diversas linhas aéreas de transmissão de energia elétrica (LTs) foram construídas numa época em que o Brasil dispunha de pouca tecnologia para o desenvolvimento dos projetos e construção.

Com isso, para essas linhas, os projetos foram executados a partir de normas estrangeiras, como por exemplo, a norma alemã VDE-210 [1], que entre outras coisas, prescreviam distâncias entre os condutores elétricos e o solo abaixo dos valores hoje recomendados pela norma brasileira NBR-5422 [2].

Tal diretiva de projeto, considerada à época de construção das LTs mais antigas, levou a constatação de cabos condutores com pequena distância ao solo (cabos baixos).

Para a correção dos problemas de cabos baixos, uma das alternativas seria a reforma da LT, quando pode ser empregado o processo de “retracionamento” para alteamento dos cabos condutores (cabos de alumínio com alma de aço).

No entanto, esses processos de reformas de LTs, onde na maioria das vezes é utilizado o processo de retracionamento, são feitos com algumas restrições, já que os cabos condutores do tipo CAA (cabo de alumínio reforçado com alma de aço) das LTs em suas condições de serviço, estão sujeitos a vibração eólica, podendo ocorrer alterações nas propriedades mecânicas dos condutores, como por exemplo, o limite de resistência à tração e o limite de resistência à fadiga. Segundo Ramey *et al.* [3], a resistência à fadiga do condutor poderá ser reduzida com o aumento da amplitude de vibração. Esses efeitos ocorrem principalmente nos pontos de fixação dos condutores aos grampos de suspensão (ferragem utilizada para fins de sustentação dos cabos condutores junto à estruturas de LTs - **figura 1.1**), que são deformados e sujeitos a ação de *fretting*. Além disso, o retracionamento aumenta o carregamento mecânico dos cabos e pode provocar o deslocamento do ponto de grampeamento do condutor para outro ponto fora do grampo.



**Figura 1.1:** Detalhe do grampo de suspensão (ponto de grampeamento)

Apesar das restrições, as reformas de LTs, através de alteamentos, são as melhores alternativas, tanto por motivos técnico-econômicos, resultando em menores investimentos e proporcionando tarifas menores aos consumidores finais, como por apresentar menor impacto ambiental.

Tomando-se como exemplo um caso de “recapacitação” (ampliação da capacidade de transmissão de energia) de uma LT, onde não há necessidade de substituição do cabo condutor, mas apenas a sua suspensão (alteamento), através do processo de retracionamento do cabo, para novos valores de tração (EDS – Everyday Stress: carregamento em tração predominante durante o dia) e da implantação de algumas novas estruturas, pode-se chegar a uma economia entre 20 e 30% no custo total da obra de reforma (as estruturas e os cabos condutores representam 40 e 45% respectivamente do custo total de uma LT).

Dentre as LTs existentes no Brasil, há uma grande diversidade de tipos de cabos, que variam desde as suas dimensões até suas composições e formações. No entanto, o cabo CAA 1350-H19, “Oriole” tem grande importância para o sistema de transmissão do estado de São Paulo, já que de toda a instalação, representa aproximadamente 20% de todo o sistema e apresenta média de idade de aproximadamente 30 anos e, portanto, será o objeto deste trabalho.

Este trabalho tem como objetivo, o estudo da influência do grampo de suspensão em determinadas propriedades mecânicas dos cabos condutores usados, visto que esse ponto do cabo, que sofre com os efeitos de fadiga e *fretting* (desgaste por atrito entre os fios do cabo e o grampo de suspensão) por vários anos, será deslocado para fora do grampo de suspensão quando da aplicação do retracionamento. Dessa forma, é possível verificar se os condutores usados apresentam os requisitos estruturais suficientes para serem submetidos aos níveis de carregamento impostos no retracionamento.

Esses estudos englobam a realização de ensaios de tração e vibração, além de análises metalográficas em amostras de cabos condutores completos usados (em regiões dentro e fora do grampo de suspensão) e em cabos novos sem uso.



## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica**

As linhas aéreas de transmissão de energia elétrica constam fundamentalmente de duas partes distintas. Uma parte ativa, representada pelos cabos condutores, que segundo a teoria eletromagnética, servem de guias aos campos elétrico e magnético, agentes do transporte de energia, e uma parte passiva, constituída pelos isoladores, ferragens e estruturas, que sustentam e asseguram o afastamento dos condutores do solo e entre si. Possuem as linhas, outrossim, elementos acessórios, dentre os quais deve-se mencionar os cabos pára-raios e aterramentos, destinados a interceptar e descarregar ao solo e as ondas de sobretensão de origem atmosférica, que de outra forma, atingiriam os condutores, provocando falhas nos isolamentos e, conseqüentemente, a interrupção do serviço [4].

Sob o ponto de vista da engenharia, as linhas aéreas de transmissão constituem tipos particulares de estruturas físicas, cujos elementos básicos são os cabos (condutores e pára-raios) e os suportes, que através das fundações, devem propiciar sua amarração ao terreno atravessado, ao qual devem ser adaptadas.

Um sistema de transmissão tem basicamente duas funções principais. De alimentação, quando fornece energia a uma área de consumo, conectando-a a uma fonte geradora ou a uma subestação, ou a função de interligação de sistemas com o objetivo primordial de aumentar a confiabilidade global e permitir a transmissão de grandes blocos de energia em situações de contingência [4].

#### **2.1.1 Elementos Básicos para Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão.**

Para cada transmissão de energia elétrica entre dois pontos, existem numerosas soluções tecnicamente viáveis, porém, apenas um número

relativamente pequeno é capaz de assegurar um serviço de padrão ótimo e, ao mesmo tempo, propiciar o transporte do kWh a um custo mínimo.

A rigor, o trabalho de projeto mecânico se inicia somente após os estudos de otimização, quando a escolha final já tenha sido feita, com a definição da classe de tensão, tipos de estruturas, bitolas e composições dos cabos condutores e pára-raios, composição das cadeias de isoladores, etc.

Uma vez que a transmissão de energia elétrica por linhas aéreas se faz com o emprego de tensões elevadas (centenas de milhares de volts) e que representam real perigo de vida para os seres vivos e para a integridade física de propriedades, existem regras e normas bastante rígidas que devem ser observadas nos projetos e durante a construção das linhas aéreas de transmissão, a fim de assegurar altos índices de segurança.

Essas normas têm, em geral, força de lei, e estabelecem critérios mínimos que devem ser observados pelo projetista, sem eximí-lo de responsabilidade pela adoção indiscriminada, sem maiores preocupações com sua aplicabilidade ao caso particular em estudo. Cada linha deve ser tratada como um caso particular. Tais normas especificam as máximas solicitações admissíveis nos elementos das linhas, os fatores mínimos de segurança, bem como, também, indicam quais os esforços solicitantes que devem ser considerados em projeto e a maneira de calculá-los. As distâncias mínimas entre condutores, solo e estruturas são igualmente especificadas [4].

No Brasil, os projetos de linhas aéreas de transmissão estão regulamentados pela Norma ABNT NBR 5422 [2].

Sendo os cabos condutores os elementos ativos no transporte da energia e que são mantidos sob tensões elétricas elevadas, todos os demais elementos das linhas de transmissão devem ser dimensionados em função dessas tensões, como também em função das solicitações mecânicas que estes transmitem às estruturas [4].

## 2.1.2 Projetos Mecânicos dos Condutores

### 2.1.2.1 Seleção do Cabo Condutor

A seleção do cabo condutor deve obedecer a diversos critérios, entre os quais o critério elétrico, econômico e o mecânico.

O critério mecânico, que considera os esforços máximos e flecha, determina uma carga de ruptura mínima para o cabo, acarretando a maior ou menor necessidade de aço na composição do cabo [4].

### 2.1.2.2 Cálculo Mecânico dos Cabos – Suportes a Mesmas Alturas

#### 2.1.2.2.1 Catenária e Parábola

O cabo é considerado como um elemento linear, com peso uniformemente distribuído ao longo de seu comprimento, e quando suspenso em dois pontos formará uma curva chamada catenária, similar à parábola.

No entanto, no vértice da curva, a parábola é mais crítica e nas laterais a catenária é mais crítica, em termos de distância ao solo [5].

A equação da catenária, tomando como origem o vértice da mesma, é:

$$Y(x) = c \cdot \left[ \cosh \cdot \left( \frac{x}{c} \right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

Onde,

$x$  = distância horizontal entre o ponto medido e a estrutura mais próxima (m)

$c$  = parâmetro da catenária que define a forma da curva. O parâmetro é calculado como sendo:

$$c = \frac{T_0}{P} \quad (2.2)$$

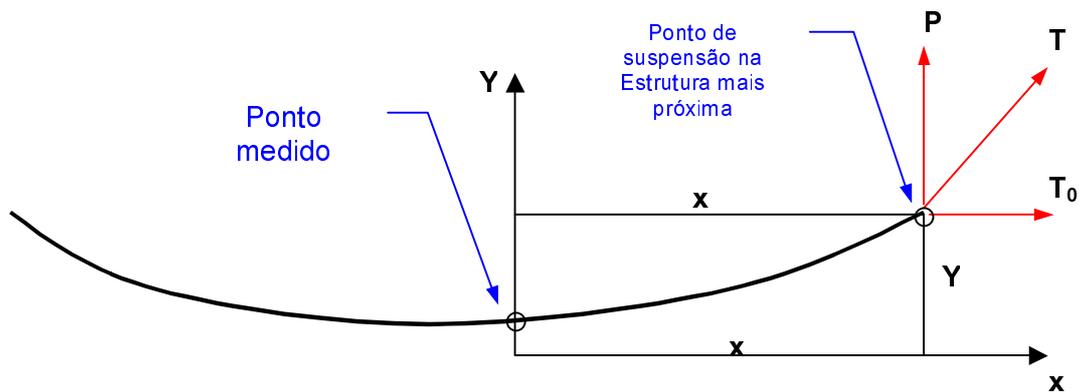
Onde,

$T_0$  = componente horizontal da tração do cabo (kgf)

$P$  = peso específico do cabo (kgf/m)

### 2.1.2.2.2 Trações

A partir da equação 2.3 de equilíbrio estático do cabo, pode-se deduzir que, a componente horizontal da tração no cabo  $T_0$ , é constante ao longo de todo o vão e a componente vertical  $P$  varia proporcionalmente com o peso do cabo, medido desde o vértice (ponto de suspensão na estrutura) até o ponto considerado (medido) (**figura 2.1**) [5].



**Figura 2.1:** Parâmetros geométricos da catenária.

$T_0$  (tração) = constante

$P$  (peso do cabo) = proporcional a  $x$

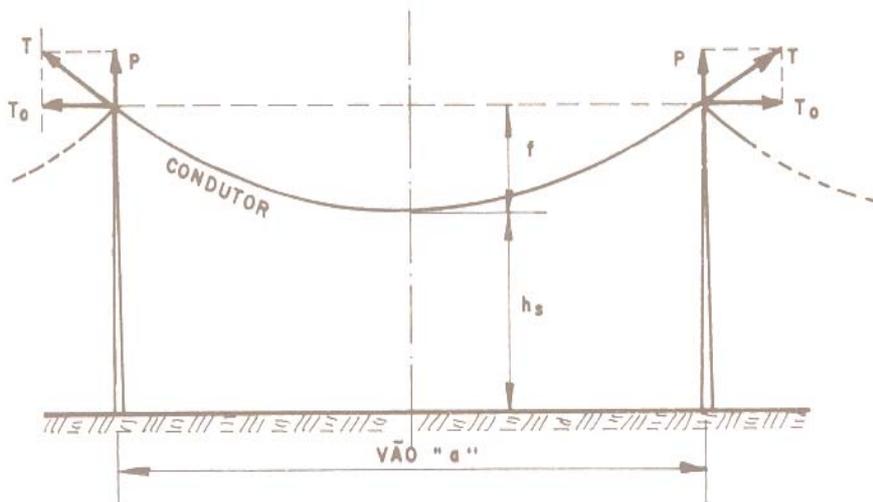
$$T = \sqrt{T_0^2 + P^2} \quad (\text{kgf}) \quad (2.3)$$

### 2.1.2.2.3 Flechas

A flecha de um determinado vão é definida como a distância entre o condutor e a corda, medida exatamente no meio do vão (**figura 2.2**). Pode ser calculada como [5]:

$$f = c \cdot \left[ \cosh \cdot \frac{a}{2c} - 1 \right] \quad (\text{m}) \quad (2.4)$$

sendo,  $a$  = vão (m)



**Figura 2.2:** Flecha  $f$  de um determinado vão " $a$ " [4].

A distância  $h_s$ , representa a distância entre o condutor e o solo.

#### 2.1.2.2.4 Dilatação do Cabo

Pode-se dividir a dilatação do cabo em dois componentes [5]:

- *Dilatação térmica:* devida à mudanças de temperatura, podendo ser expressa como:

$$l = l_0 + l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (2.5)$$

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \cdot \Delta T \quad (2.6)$$

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (2.7)$$

onde,  $\Delta l$  = variação do comprimento do cabo (m);  $l_0$  = comprimento inicial de referência do cabo (m);  $\alpha$  = coeficiente de dilatação linear ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) e  $\Delta T$  = variação de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )

- *Dilatação elástica:* devida à mudança da tensão mecânica, podendo ser expressa dentro da região elástica como:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.8)$$

Onde,  $\sigma$  = tensão mecânica (MPa);  $E$  = módulo de elasticidade (MPa) e  $\varepsilon$  = deformação (%)

Usando as definições:

$$\sigma = \frac{T}{S_0} \quad (2.9)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.10)$$

Pode-se escrever:

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{T}{E \cdot S_0} \quad (2.11)$$

onde,  $S_0$  = área da secção transversal do cabo ( $m^2$ ),  $T$  = esforço de tração no cabo (kgf)

Pode ser verificado que, de acordo com as equações 2.5, 2.6 e 2.7, qualquer mudança na temperatura, representa uma mudança no comprimento do cabo e conseqüentemente na tensão mecânica, a qual representa uma nova mudança no comprimento e assim sucessivamente.

Isso significa que, em qualquer cálculo mecânico de cabos, deve-se levar em conta os dois fenômenos simultaneamente, ou seja, a dilatação térmica e elástica.

### 2.1.2.3 Equação de Mudança de Estado – Vão Isolado

Considerando a dilatação total do cabo, é possível desenvolver uma equação baseada no comprimento do cabo para prever o seu comportamento mecânico.

Essa equação é chamada “equação de mudança de estado” e é aplicada quando todos os parâmetros de um determinado estado são conhecidos e se quer calcular a tração em uma condição diferente. Cada condição pode ser definida basicamente pela temperatura e pela sobrecarga (gelo ou vento) [5].

A equação para mudança de estado é a seguinte:

$$T_{02}^3 + T_{02}^2 \cdot \left[ \frac{E \cdot S \cdot P^2 \cdot a^2}{24 \cdot T_{01}^2} + E \cdot S \cdot \alpha_1 (t_2 - t_1) - T_{01} \right] = \frac{E \cdot S \cdot P^2 \cdot a^2}{24} \quad (2.12)$$

Onde:

$a$  = comprimento do vão (m)

$P$  = peso equivalente do cabo (kgf/m)

$T_{0i}$  = tração na condição  $i$  (kgf)

$\alpha$  = coeficiente de dilatação linear ( $^{\circ}\text{C}$ )<sup>-1</sup>

$t_i$  = temperatura na condição  $i$  ( $^{\circ}\text{C}$ )

$E$  = módulo de elasticidade (MPa)

$S$  = Área da seção transversal ( $\text{m}^2$ )

#### 2.1.2.4 Seleção da Condição Básica

A equação utilizada para cálculos mecânicos, permite conhecer o carregamento em tração do cabo em uma condição (ex. temperatura mínima de 30% da CR do cabo), a partir de uma outra condição inicial (ex. EDS de 20% da CR), sendo por isso denominada equação de mudança de estado. Assim, para se conseguir calcular o comportamento mecânico do cabo, os passos são os seguintes:

- a) Definir diferentes condições para representar as situações operacionais mais críticas a que o cabo será exposto. As condições mínimas a serem consideradas são:
  - Solicitação diária (EDS = everyday stress)
  - Sobrecarga máxima (vento e/ou gelo)
  - Temperatura mínima e Temperatura máxima
- b) Para cada condição deve ser definido um fator de segurança para o cabo em relação a sua carga de ruptura, ou seja, deve-se definir uma tração limite. Os valores recomendados pela norma brasileira [2] e usualmente adotados são os seguintes [5]:

- EDS: 20% da carga de ruptura (coeficiente de segurança = 5)
  - Sobrecarga máxima: 50% da carga de ruptura (coef. seg. = 2)
  - Temperatura mínima: 33% da carga de ruptura (coef. seg. = 3)
- c) Normalmente adota-se a primeira das condições em análise como básica (exemplo: EDS de 20%) e aplica-se a equação de mudança de estado para encontrar o carregamento em tração nas outras condições (sobrecarga máxima e temperatura mínima). Se algum carregamento em tração calculado exceder o limite admissível para aquela mesma condição (exemplo: sobrecarga máxima de 55%), esta condição é adotada como básica e o processo se reinicia, ou seja, adota-se o valor limite para essa condição (sobrecarga máxima de 50%) e recalcula-se os carregamentos em tração para as outras condições.
- d) Após calcular todas as condições, a mais crítica (EDS, sobrecarga máxima ou temperatura mínima) será assumida como básica, definindo-se a condição mecânica do cabo, denominando-se então, condição de governo do comportamento mecânico do cabo.

A seleção da condição básica deve ser repetida para cada vão [5].

## **2.1.2.5 Vãos**

### **2.1.2.5.1 Vão Máximo**

É o vão adjacente máximo permitido para um determinado tipo de estrutura de LT [5].

### **2.1.2.5.2 Vão de Vento ou Vão Médio**

É o vão no qual, a ação do vento pode ser suportada por uma determinada estrutura. É assumido que, devido às articulações nas

extremidades, o esforço de vento no vão será dividido igualmente entre as duas estruturas adjacentes.

Desta maneira, o vão de vento de uma determinada estrutura é a média dos vãos adjacentes, sendo por isso, também denominado vão médio, e está sempre referido a uma determinada estrutura [5].

#### **2.1.2.5.3 Vão de Peso ou Vão Gravante**

É a distância cujo peso de cabo será suportado por uma determinada estrutura. A partir das propriedades da catenária, pode ser deduzido que para cada estrutura, a carga vertical é proporcional ao peso de um comprimento de cabo medido desde o vértice da catenária até a estrutura.

Considerando os dois vãos adjacentes de uma estrutura, o vão de peso iguala-se à distância entre o vértice das catenárias adjacentes e está sempre referido a uma determinada estrutura [5].

#### **2.1.2.5.4 Vão Equivalente ou Vão Regulador**

É um vão fictício, cujo comportamento mecânico representa o comportamento de um trecho contínuo de uma linha entre estruturas de ancoragem [5].

## **2.2 Cabo Condutor Elétrico Tipo CAA.**

O condutor elétrico do tipo CAA (Condutor de Alumínio com Alma de Aço, **figura 2.3**), ou na língua inglesa “ACSR” (Aluminum conductor steel reinforced), especificado conforme norma ABNT NBR 7270 [6], composto por 30 (trinta) fios de alumínio 1350-H19, que tem a propriedade de elevadas condutividades térmica e elétrica. Como a resistência mecânica do alumínio

1350 é muito baixa, o cabo possui 7 (sete) fios de aço galvanizado, dispostos internamente, constituindo o seu núcleo “alma”, proporcionando uma alta resistência mecânica.



**Figura 2.3:** Formação do Cabo condutor CAA - 30 fios de alumínio (Coroa com duas camadas) e 7 fios de aço (Alma).

## 2.2.1 Fios de Alumínio Nus de Seção Circular para Fins Elétricos

### 2.2.1.1 Material Utilizado na Fabricação dos Fios de Alumínio

Desde o início do século passado o alumínio tem sido utilizado como condutor em linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Ao longo do período em que o alumínio tem sido utilizado em condutores elétricos, vários conceitos de projetos foram desenvolvidos, resultando na larga variedade de condutores disponíveis hoje no mercado [7].

O material utilizado na fabricação dos fios de alumínio do referido condutor é o vergalhão de alumínio 1350 (*série 1XXX* - alumínio não ligado “comercialmente puro”) [8].

### 2.2.1.2 Classificação do Alumínio 1350

De acordo com a norma ABNT NBR 6834 [9], a série 1XXX identifica o alumínio não ligado “comercialmente puro” em diferentes graus de pureza, desde 99,00% (denominado 1000) até 99,99% (denominado 1099). Nesse sistema, os dois últimos algarismos referem-se ao grau de pureza da liga, ou

seja, até à casa centesimal acima de 99,00%. Assim sendo, o alumínio comercialmente puro com 99,50% de alumínio é conhecido como 1050.

Já o segundo dígito da designação, indica modificações dos limites das impurezas, sendo que os algarismos de 1 a 9 indicam que houve controle especial de um ou mais elementos presentes como impurezas. Portanto, o algarismo 3 deve apresentar a composição química conforme a **tabela 2.1** a seguir: [8,9]

**Tabela 2.1:** Composição química nominal - segundo dígito igual a 3 [8].

<b>Elemento</b>	<b>% em peso</b>
Alumínio, mínimo	99,5
Silício, máximo	0,10
Ferro, máximo	0,40
Cobre, máximo	0,05
Manganês, máximo	0,01
Cromo, máximo	0,01
Zinco, máximo	0,05
Boro, máximo	0,05
Gálio, máximo	0,03
Titânio + Vanádio, total máximo	0,02
Outros, cada, máximo	0,03
Outros, total, máximo	0,10

### 2.2.1.3 Características do Alumínio 1350

O alumínio não ligado ou comercialmente puro caracteriza-se pelas elevadas condutividades térmica e elétrica e pela baixa resistência mecânica, ao contrário das ligas de alumínio das séries 2XXX a 8XXX. Devido a essas características, suas principais aplicações restringem-se a componentes de sistemas térmicos e elétricos, nos quais exige-se alta condutividade sem que haja o mesmo tipo de exigência com relação às propriedades mecânicas. O cobre apresenta maior condutividade térmica e elétrica do que o alumínio, entretanto, apresenta como significativas desvantagens o maior custo e a maior densidade (massa específica), mais do que o triplo da densidade do alumínio:

8,9 g/cm<sup>3</sup> contra 2,7 g/cm<sup>3</sup>, o que é muito significativo para determinadas aplicações [10].

Outra característica importante do alumínio comercialmente puro é sua elevada resistência à corrosão, devido à formação de uma camada de óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), muito fina, transparente e extremamente aderente que confere essa característica ao evitar o prosseguimento da oxidação, ou seja, o fenômeno conhecido como passivação. Essa alta resistência à corrosão pode ser diminuída pela introdução de elementos de liga, principalmente de elementos mais afastados do alumínio na tabela de potencial eletroquímico, como o cobre, por exemplo. Por outro lado, elementos mais próximos do alumínio nesta tabela, como o magnésio, prejudicam muito pouco a resistência à corrosão do mesmo. Por esse motivo, as ligas Al-Mg são aquelas que apresentam a maior resistência à corrosão, inferior somente à do alumínio comercialmente puro e muito superior à das ligas Al-Cu, por exemplo [10].

Os elementos mais comumente encontrados como impurezas no alumínio comercialmente puro são o ferro e o silício, em maior ou menor grau, dependendo do nível de pureza. Estes elementos formam fases intermetálicas, como FeAl<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>SiAl<sub>12</sub>, FeSiAl<sub>8</sub> (alfa), FeSiAl<sub>5</sub> (beta) e Fe<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>Al<sub>9</sub>, devido à limitada solubilidade do ferro no alumínio. Estas fases apresentam-se com diferentes tamanhos, formas e distribuição, mas normalmente só prejudicam as propriedades da matriz quando são grosseiras, alongadas e concentradas nos contornos de grão [11].

O sistema de classificação adotado pela Aluminum Association em 1971, e que atualmente é o mais aceito internacionalmente, é subdividido em duas partes: o adotado para ligas destinadas exclusivamente à produção de peças fundidas e o adotado para as ligas utilizadas em trabalho mecânico (laminação, extrusão, forjamento e outros), que é o de interesse para o trabalho, ou seja, da série 1XXX [10].

#### **2.2.1.4 Mecanismo de Endurecimento dos Fios de Alumínio 1350 – Grau de Encruamento H19**

O aumento da resistência mecânica do alumínio 1350 é conseguido através do tratamento de encruamento, designado por H19. De acordo com a norma ABNT NBR 6835 [12], esse mecanismo é obtido por deformação plástica, sem recozimento complementar, designada por “H1”. O segundo dígito desta designação indica o grau de encruamento, ou seja, o numeral 9, no caso em questão, designa a tratamento cujo limite mínimo de resistência à tração excede o da têmpera HX8 em pelo menos 10MPa [12].

A deformação nas ligas de alumínio ocorre através dos processos de movimento normal de discordâncias, sendo possível observar nessas ligas, bandas de deformação. As discordâncias normalmente combinam-se para formar subestruturas celulares [10].

Quando o grau de deformação (encruamento) é mais severo, aumenta a densidade de discordâncias e reduz-se o tamanho das células. As distorções do reticulado, associadas com as discordâncias e com as tensões resultantes da interação entre discordâncias, são as principais fontes de endurecimento resultante do trabalho a frio (encruamento) [10].

Entretanto, o aumento de resistência mecânica, obtido através do trabalho mecânico, é acompanhado por uma perda de ductilidade medida pelo alongamento ou pela redução de área no ensaio de tração [10].

A condutividade elétrica das ligas de alumínio é pouco afetada pelo encruamento, caindo de 63 % IACS (International Annealed Copper Standard) no alumínio comercialmente puro recozido para 62,5 % no grau de encruamento H19. A densidade também cai ligeiramente quando o encruamento é severo. Por outro lado, o trabalho a frio aumenta a energia interna armazenada, que pode chegar a 16 kJ/kg.átomo. O módulo de elasticidade, ao contrário, pouco é afetado pelo encruamento, entretanto, propriedades inelásticas, como o atrito interno e o amortecimento, são muito influenciadas. A resistência à corrosão não é muito influenciada pelo encruamento, com exceção dos casos de corrosão sob tensão [10].

### 2.2.1.5 Resistência à Tração dos Fios de Alumínio 1350-H19

Os fios de alumínio 1350 - H19, que constituem o condutor em estudo, e que possuem individualmente diâmetro nominal de 2,69 mm, de acordo com a norma ABNT NBR 5118 [13], devem apresentar uma resistência à tração mínima de 170 a 180 MPa.

## 2.2.2 Fios de Aço Zincados para Alma do Cabo de Alumínio - CAA

### 2.2.2.1 Material Utilizado na Fabricação dos Fios de Aço

O metal base deve apresentar composição química dentro dos limites especificados na norma ABNT NBR 6756 [14], conforme **tabela 2.2** a seguir:

**Tabela 2.2:** Composição química nominal do aço para fabricação dos fios [14].

ELEMENTO	TEOR (%)
Carbono	0,50 a 0,85
Manganês	0,50 a 1,10
Fósforo (máximo)	0,035
Enxofre (máximo)	0,045
Silício	0,10 a 0,35

#### 2.2.2.1.1 Aço Carbono Comum

Os aços-carbono utilizados na fabricação dos fios da alma de cabos condutores possuem na sua composição apenas quantidades limitadas dos elementos Carbono, Silício, Manganês, Cobre, Enxofre e Fósforo. Outros elementos existem apenas em quantidades residuais. A quantidade de Carbono presente no aço define a sua classificação, ou seja, baixo carbono o aço possui no máximo 0,30% desse elemento, o médio carbono de 0,30 a 0,60% e finalmente o alto carbono de 0,60 a 1,00% [10].

### 2.2.2.2 Propriedades Mecânicas dos Fios de Aço

Os fios de aço utilizados para compor a alma de condutores de alumínio são fabricados pelo processo de trefilação e podem apresentar nível diferenciado de propriedades mecânicas dentro das classes de galvanização 1 (um) e 2 (dois) [14].

No caso do condutor “Oriole”, a classe de galvanização é a 1 (um) e portanto, de acordo com a norma ABNT NBR 6756 [14], os fios apresentam as seguintes propriedades mecânicas, conforme **tabela 2.3**:

**Tabela 2.3:** Propriedades mecânicas dos fios de aço [14].

Diâmetro nominal do fio (mm)	Tensão mínima a 1% de alongamento (MPa)	Limite mínimo de resistência à tração (MPa)	Alongamento mínimo na ruptura, em 250mm (%)
2,25 – 2,75	1280	1410	2,5

## 2.3 Retracionamento

As reformas de LTs, através de alteamentos e recapitações, são realizadas, na maioria das vezes, através da inserção de estruturas no meio do vão, necessitando em alguns casos retracionar os cabos ou relocar as estruturas, proporcionando a suspensão desses cabos. Isso elimina problemas de cabos baixos, dilatados pelo aquecimento proveniente do aumento do transporte de energia elétrica ou mesmo nos casos em que ocorrem mudanças nos tipos de veículos que trafegam abaixo dos cabos, como, por exemplo, veículos agrícolas altos.

Na operação de retracionamento do cabo, a tração é ajustada aos valores calculados para a temperatura vigente no momento e constante das tabelas de tensionamento. Em vãos isolados ou seções de tensionamento de uns poucos vãos, essas trações podem ser medidas diretamente com

dinamômetros. Normalmente, no entanto, esse controle deve ser feito indiretamente, através de medida das flechas [4].

Os valores de tração (EDS – carregamento em tração que predomina diariamente) adotados nos processos de alteamentos, atingidos através do retracionamento, podem chegar a até aproximadamente 24% da carga de ruptura nominal (RMC) do cabo.

Valores de EDS acima de 24% são evitados, pois tornam o cabo mais suscetível aos efeitos da vibração eólica, além de submeter às estruturas carregamentos diários maiores, principalmente quando os efeitos de sobrecarga de vento no cabo ou temperatura mínima estão presentes.

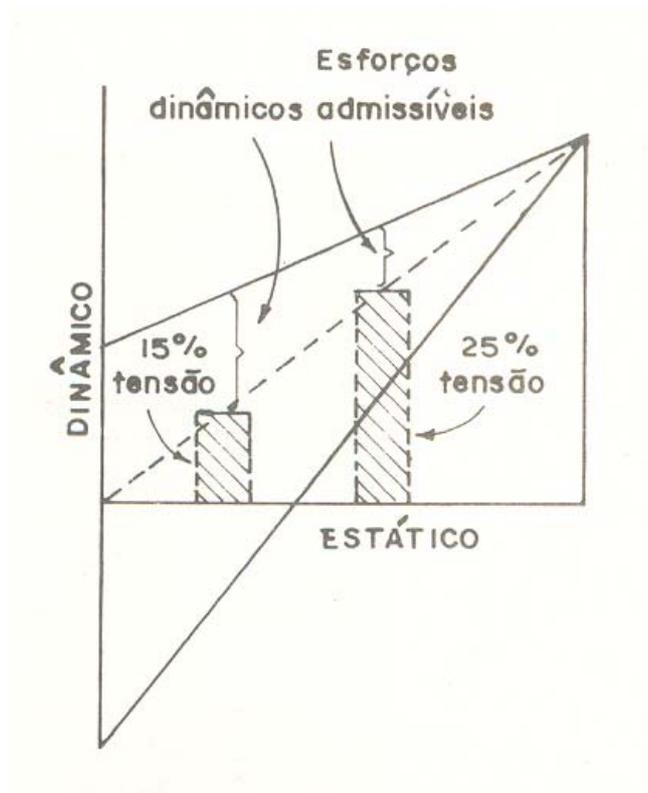
Portanto, em alguns casos o EDS pode passar de 18% para 24%, o que deve ser considerado para os estudos de comportamento dos pontos de grampeamento dos cabos condutores tipo CAA.

## **2.4 Fatores que Afetam as Propriedades Mecânicas aos Cabos CAA**

### **2.4.1 Esforços Estáticos - Influência de Agentes Externos nos Cabos Condutores (Sobrecargas Mecânicas)**

A vida de um cabo condutor relaciona-se inversamente com o nível de esforços estáticos e dinâmicos. Quanto maiores forem os esforços estáticos, menores serão os valores dinâmicos permitidos para evitar uma falha do material por fadiga, como pode ser visto no gráfico da **figura 2.4** [4].

Os esforços de sobrecarga têm influência na tensão de estiramento do cabo (solicitação diária - EDS = everyday stress) e conseqüentemente tem influência nos esforços dinâmicos resultantes do dobramento alternado do condutor (vibração eólica) nos pontos de restrição de movimento (grampo de suspensão) e, portanto, na fadiga dos cabos [15].



**Figura 2.4:** Diagrama de Goodman [4].

As sobrecargas em cabos podem ser de dois tipos:

- Horizontal: representada pela atuação do vento no cabo e é proporcional ao quadrado da velocidade do vento e ao diâmetro do cabo e também aquela decorrente da redução da temperatura dos condutores abaixo daquela vigente durante o seu carregamento.
- Vertical: representada pelo peso de gelo, neve (nos países de invernos rigorosos) ou outra sobrecarga distribuída.

O peso equivalente total é usado no cálculo mecânico e pode ser calculado como sendo a resultante da sobrecarga horizontal e do esforço vertical total (peso próprio do cabo mais sobrecarga vertical) [5].

## **2.4.2 Esforços Dinâmicos – Carregamento Cíclico Induzido pela Vibração Eólica**

A importância da vibração nas linhas de transmissão muitas vezes é esquecida, levando-se em consideração nos cálculos apenas as tensões estáticas. Embora os esforços estáticos de tração nos cabos sejam muito maiores que os esforços dinâmicos, estes podem ser altamente prejudiciais, em virtude de sua natureza alternada.

A vibração dos cabos é produzida pela passagem do vento contínuo ao redor do mesmo.

Com o uso dos cabos de alumínio, especialmente com alma de aço e com o emprego de maiores seções para condução de maiores potências, de estruturas mais pesadas, mais complexas, mais altas e mais distantes, e de tensões mecânicas maiores, a vibração tornou-se um inimigo mais perigoso, pois a ruptura dos cabos, fio a fio, passou a ser muito mais precoce, a ponto de se tornar a condição limite nos projetos de linhas de transmissão [4].

### **2.4.2.1 Dimensões e Causas das Vibrações**

A ação do vento sobre as linhas de transmissão provoca oscilações dos condutores, as quais, se não forem amortecidas, poderão chegar a valores críticos, culminando com o rompimento dos cabos, seja pela fadiga, seja pelo efeito de grande amplitude, e até a afetar seriamente os suportes. Essas oscilações típicas observadas nas linhas são as chamadas vibrações eólicas (de ressonância).

Oscilações desse tipo ocorrem com os ventos de velocidade constantes entre 2 e 35 km/h, que se verificam em terrenos planos ou levemente ondulados, principalmente ao amanhecer ou ao entardecer [4].

A vibração aerodinâmica é induzida pela ação transversal continua do vento no cabo aéreo tensionado, vórtices são formados em intervalos regulares nos lados do condutor, alternando na região superior e inferior, então o cabo é

sujeito a forças alternadas que o movimentam para cima e para baixo. A frequência destas forças aumenta com o aumento da velocidade do vento.

Se a frequência destas forças for igual à frequência do modo natural de vibração do condutor haverá uma progressiva absorção de energia de vibração, que aumentará, conseqüentemente, a amplitude de vibração.

As ondas mecânicas induzidas por forças aerodinâmicas propagam-se pelos cabos até atingirem restrições como os pontos de sustentação ou outras descontinuidades, sendo refletidas com pouca dissipação de energia podendo ocorrer interferência construtiva, e aumentar a amplitude de vibração [16].

Essas vibrações produzem flexões alternadas de pequenas amplitudes nos pontos de suspensão do condutor, causando esforços alternados que provocam a ruptura do cabo pela fadiga. [4].

### 2.4.3 Efeito dos Grampos de Suspensão na Fadiga de Cabos CAA

O efeito da geometria dos grampos de suspensão no processo de fadiga dos cabos condutores é outro fator que tem sido estudado.

Para avaliar tal efeito, Preston *et al.* [17] e Ramey *et al.* [18] realizaram uma série de testes de fadiga em cabos CAA utilizando grampos de suspensão com três diferentes raios longitudinais, conforme **figura 2.5**.

Medidas de deformações estática e dinâmica foram conduzidas nas camadas exteriores do cabo.

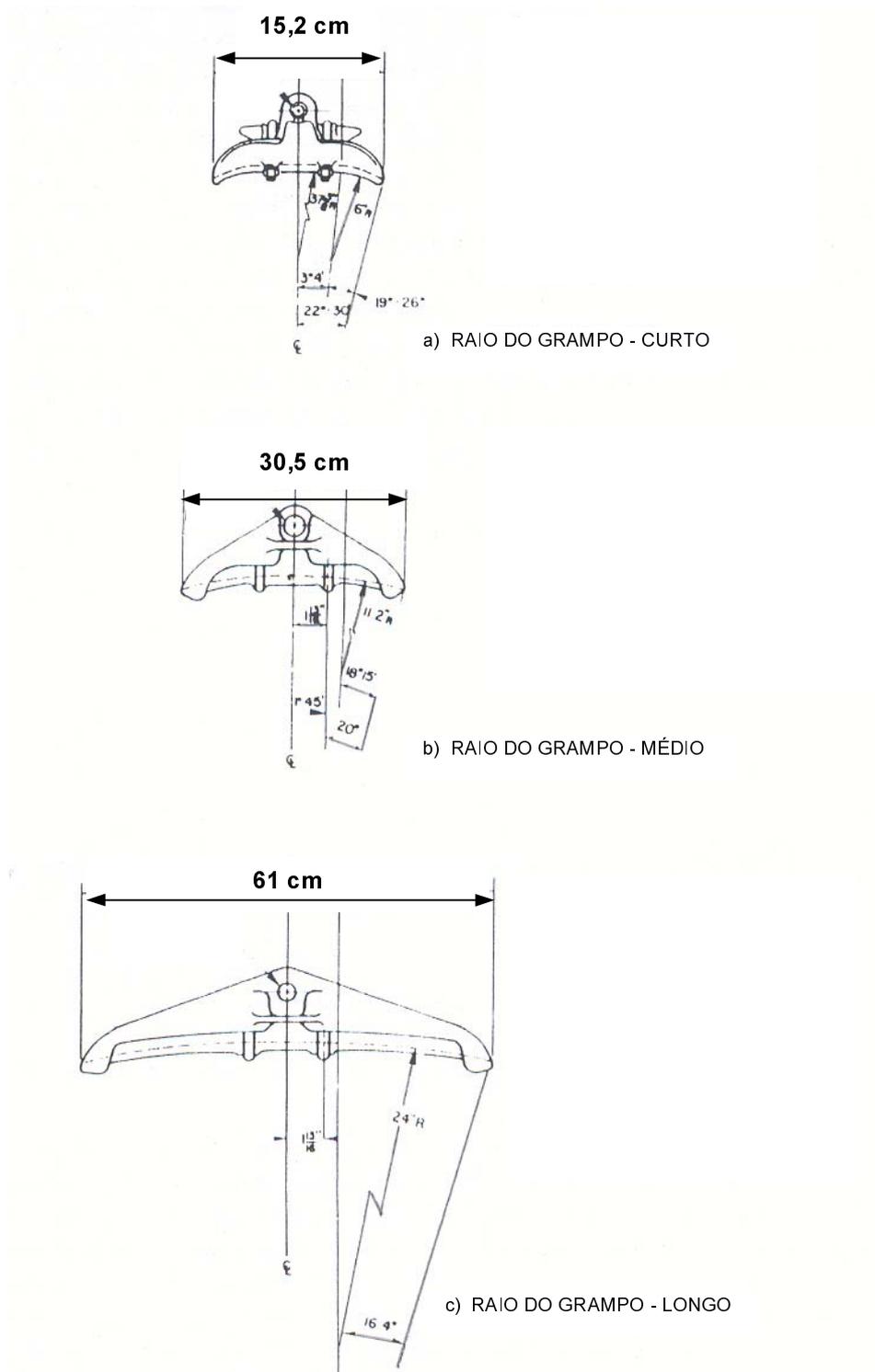
Observou-se que quanto maior o raio de curvatura do grampo de suspensão menor é o nível de tensão medido e conseqüentemente maior é a resistência à fadiga da montagem.

Na **figura 2.6** é possível verificar a relação da falha por fadiga versus os raios dos grampos.

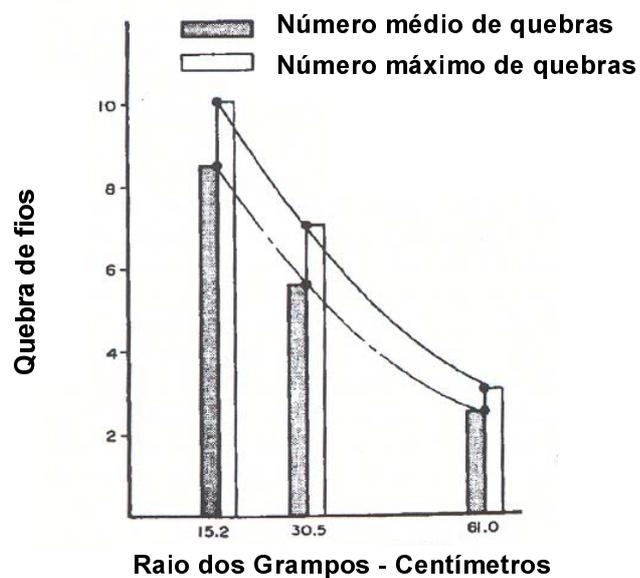
Também se verificou que todos os fios rompiam em algum lugar entre os últimos pontos de contato entre o cabo e as partes superior e inferior do grampo, em uma região onde o desgaste por *fretting* estava sempre presente.

A maioria dos fios rompidos (aproximadamente 75%) pertencia às camadas intermediárias do cabo, aonde o desgaste por *fretting* foi mais severo.

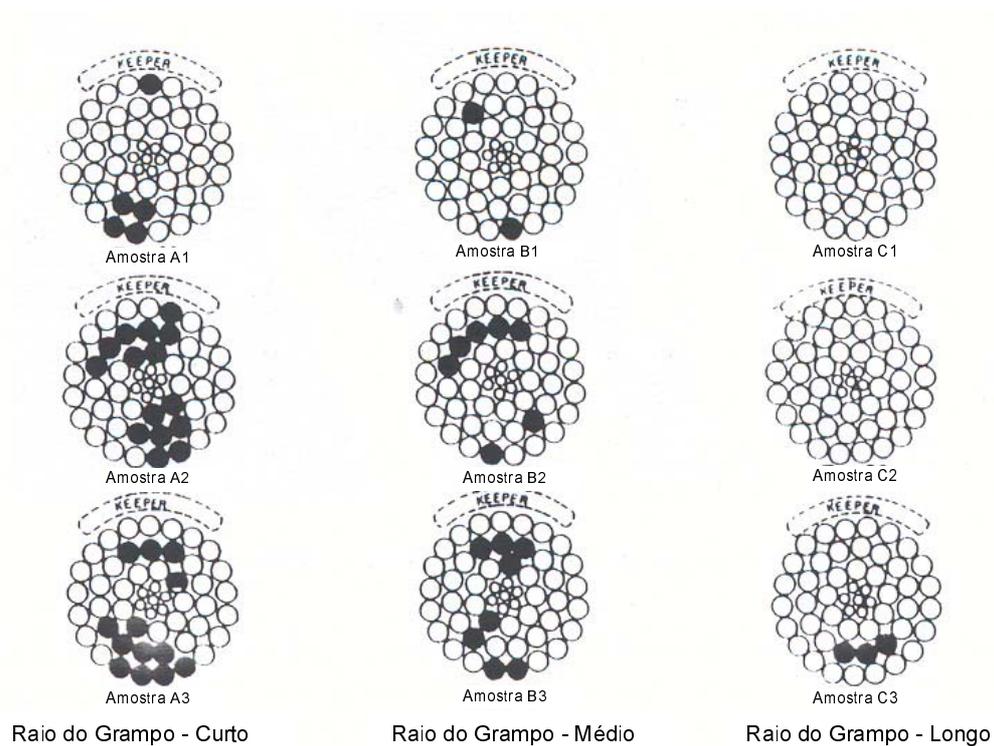
A **figura 2.7** mostra as posições dos fios, onde ocorrem as falhas.



**Figura 2.5:** Grampos de suspensão testados [18].



**Figura 2.6:** Falhas por fadiga versus raios dos grampos [17].



**Figura 2.7:** Posições dos fios onde ocorrem as falhas – três amostras de cabos ensaiadas por tamanho de raio de grampo [18].

## **2.5 Fadiga de Cabos CAA (Fadiga por *Fretting* e por Flexão Alternada)**

### **2.5.1 Fadiga em Metais**

#### **2.5.1.1 Resistência à Fadiga**

O limite de resistência determinado pelo ensaio de tração é função da carga máxima atingida durante o teste, após a qual ocorre a ruptura do material. Ficou então estabelecido que o material não se romperá com uma carga menor que aquela, quando submetido a esforços estáticos. Entretanto, quando são aplicados esforços dinâmicos, repetidos ou flutuantes a um material metálico, o mesmo pode romper-se com uma carga bem inferior à carga máxima atingida na tração (ou na compressão). Nesse caso, tem-se a chamada ruptura por fadiga do material [19].

#### **2.5.1.2 Falha por Fadiga**

São três os fatores básicos necessários para causar falha por fadiga:

- ⇒ Uma tensão de tração máxima suficientemente alta;
- ⇒ Variação ou flutuação na tensão aplicada suficientemente grande;
- ⇒ Número de ciclos de aplicação da tensão suficientemente grande.

Além destas, existem outras diversas variáveis, tais como concentração de tensão, corrosão, temperatura, sobrecarga, estrutura metalúrgica, tensões residuais e tensões combinadas, que tendem a alterar as condições de ocorrência da fadiga [20].

#### **2.5.1.3 Tensões Cíclicas**

É importante caracterizar os possíveis tipos de tensões cíclicas que provocam o fenômeno de fadiga, sendo que a tensão aplicada pode ser axial (tração-compressão), de flexão (dobramento) ou de torção (carga rotativa) [21].

A **figura 2.8** mostra três dos diversos ciclos de tensões possíveis para o ensaio de fadiga encontrados na prática e nos laboratórios em geral [19]. A **figura 2.8.a** ilustra um ciclo de tensão totalmente reverso de forma senoidal. As tensões máxima e mínima são iguais, em módulo. Convencionalmente, a tensão mínima é a tensão algebricamente menor no ciclo, as componentes de tração são positivas e as de compressão negativas. A **figura 2.8.b** ilustra um ciclo de tensão flutuante no qual a tensão máxima  $\sigma_{m\acute{a}x.}$  e a tensão mínima  $\sigma_{m\acute{i}n.}$  são diferentes. Nesta ilustração, ambas as tensões são de tração, embora um ciclo de tensão flutuante possa perfeitamente apresentar tensões máxima e mínima de sinais opostos ou ambas em compressão. A **figura 2.8.c** ilustra um ciclo de tensões que pode ser encontrado num componente como uma asa de avião, que está sujeita a sobrecargas periódicas imprevisíveis devido a correntes de vento.

Um ciclo de tensão flutuante pode ser dividido em duas componentes, uma tensão média, ou estática,  $\sigma_m$ , e uma componente de tensão alternada, ou variável,  $\sigma_a$ . Deve-se considerar também o intervalo de tensões  $\sigma_r$ . Na **figura 2.8.b** pode ser visto que, o intervalo de tensões é a diferença algébrica entre as tensões máxima e mínima em um ciclo [20].

$$\sigma_r = \sigma_{m\acute{a}x.} - \sigma_{m\acute{i}n.} \quad (2.13)$$

A tensão alternada é, então, a metade do intervalo de tensões.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} \quad (2.14)$$

A tensão média é a média algébrica das tensões máxima e mínima no ciclo.

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{m\acute{a}x.} + \sigma_{m\acute{i}n.})}{2} \quad (2.15)$$

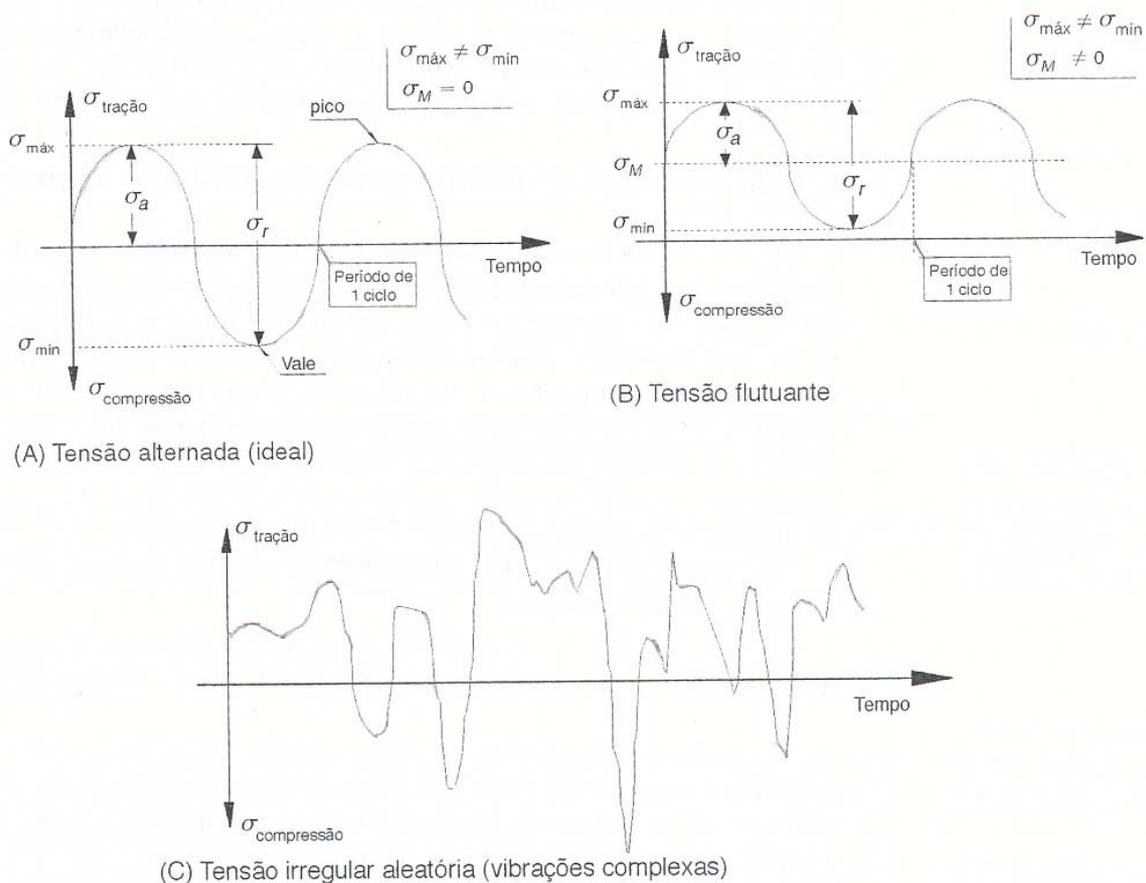
São utilizadas duas quantidades para apresentação dos dados de fadiga em termos da relação de tensões:

Razão de tensão

$$R = \frac{\sigma_{\min.}}{\sigma_{\max.}} \quad (2.16)$$

Razão de amplitude

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (2.17) [20]$$



**Figura 2.8:** Tipos de tensões cíclicas em fadiga: (2.8.a) tensão alternada reversa; (2.8.b) tensão repetida flutuante; (2.8.c) tensão irregular aleatória [21].

## 2.5.2 Danos Causados em Cabos Sujeitos a Vibração Eólica

A maioria das falhas em cabos condutores de energia está associada à fadiga do material, causada pela ação das forças eólicas que provocam vibrações de alta frequência e baixa amplitude nas linhas [16].

A fadiga é causada pelos esforços dinâmicos resultantes do dobramento alternado do condutor e ocorre normalmente nos pontos em que o movimento dos condutores é restringido, e está diretamente relacionada com a rigidez com a qual esta restrição é feita, principalmente no sentido vertical [15].

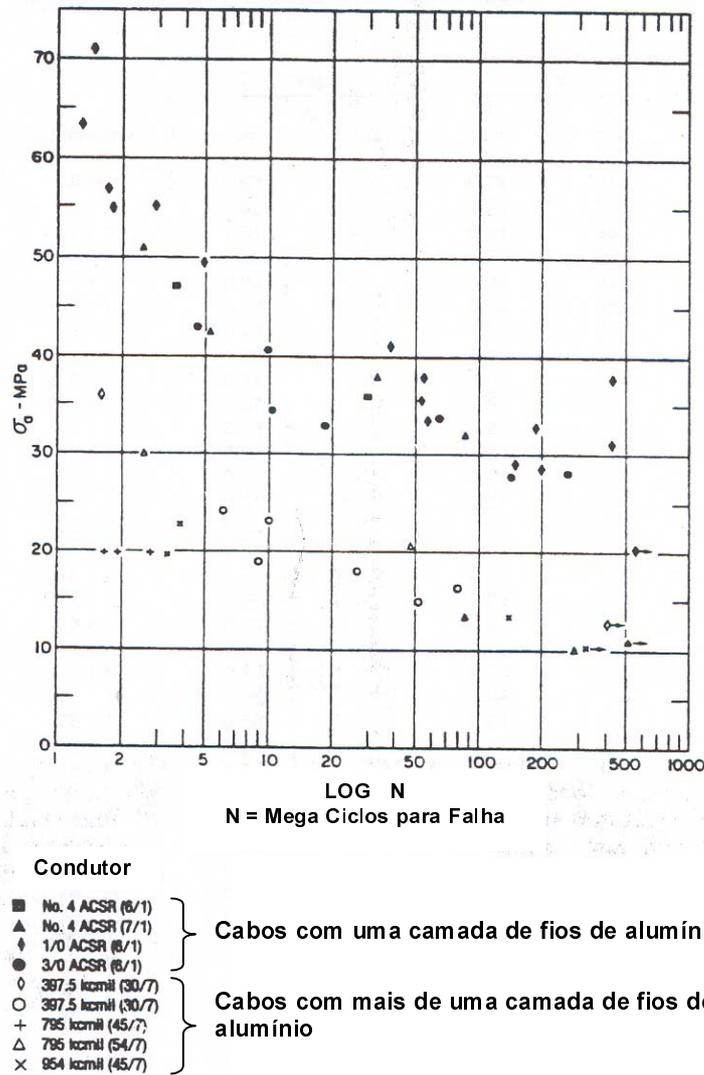
Por isso, a ruptura de fios é mais comum no interior ou nas extremidades de grampos de suspensão, pois em outros dispositivos tais como grampos de ancoragem, espaçadores, emendas, etc., sempre há alguma mobilidade vertical.

Os efeitos dos esforços dinâmicos são agravados pelo *desgaste por fretting* entre a superfície dos fios, que causa a mútua remoção de material. Esse material finamente dividido reage com o oxigênio formando  $Al_2O_3$  (óxido de alumínio), com dureza superior ao do próprio metal, que acelera a taxa de desgaste dos fios do cabo [15]. Outro fenômeno que pode ocorrer na região danificada pelo desgaste é o aparecimento de trincas, denominado por *fadiga por fretting* [22].

Em geral, os esforços dinâmicos e o *fretting* aumentam com a amplitude de flexão, provocando a ocorrência da fadiga mais rapidamente [23]. A severidade do dano, em termos de fios quebrados, próximo a um ponto de fixação, é também determinado pela amplitude de flexão e seus ciclos acumulados [23].

Para valores de N (Número de ciclos) muito altos,  $\sigma_a$  (tensão dinâmica) tende assintoticamente a um valor de tensão chamado “limite de resistência à fadiga”, que garante uma vida útil muito extensa para os cabos. Resultados de ensaios compilados pelo EPRI (Electric Power Research Institute), mostrados na **figura 2.9**, sugerem para os cabos CAA os limites de resistência mostrados na **tabela 2.4**. Para os cabos com mais de uma camada de fios de alumínio, como o Oriole, o limite de resistência à fadiga é de 8,5 MPa [15].

A partir destes limites é possível estabelecer amplitudes máximas admissíveis de vibração, para cada cabo, a partir das fórmulas demonstradas na **seção 2.5.4.2.1**.



**Figura 2.9:** Resultados de ensaios compilados pelo EPRI [23]

**Tabela 2.4:** Limite de resistência à fadiga do EPRI [15]

Nº de camadas de fios de alumínio do cabo	Limite de resistência à fadiga (MPa)
1	22,5
>1	8,5

A fadiga uma vez iniciada no ponto de fixação espalha-se para mais e mais fios, com a vibração contínua, e eventualmente resultará na fratura de todos os fios. Se o condutor for o CAA, a fadiga pode interromper quando restar somente a alma de aço. Na maioria dos casos, no entanto, a corrente



Exemplo: O valor 6 em destaque na **tabela 2.5** indica que durante as inspeções, em 6 vezes, foram encontrados quebrados 3 fios da camada interna e 5 fios da camada externa.

O condutor possui duas camadas de alumínio, a externa com 18 fios e a interna com 12. Nota-se que não houve ocorrência de falha na camada interna quando a camada externa encontrava-se intacta. Não houve falha completa do condutor na linha [23].

Em contraste, ocorreram casos em outras linhas onde fios da camada interna falharam antes que da camada externa. Na **tabela 2.6** é mostrada a seqüência de falhas para camada em um teste, num cabo CAA com formação 45 fios de alumínio e 7 fios de aço, no laboratório da Alcoa. A tensão do condutor foi de 25% da sua resistência nominal e a amplitude de flexão foi 0,88mm [23].

**Tabela 2.6:** Seqüência de falha de fios em condutor multicamada CAA [23].

Megaciclos de Vibração	Camada na qual ocorreu falha
5,29	Meio
6,99	Meio
7,56	Meio
8,47	Meio
8,62	Meio
8,81	Meio
9,03	Interna
9,05	Interna
9,25	Interna
11,00	Meio
11,49	Meio
11,79	Meio
11,87	Interna
11,96	Externa

O retardo entre a falha da primeira camada interna e a primeira camada externa e o número de fios internos quebrados antes de ocorrer a falha na camada externa, são importante com relação a inspeções de linhas em operação. Inspeções visuais detectam somente danos nas camadas externas e

conseqüentemente podem deixar passar evidência de inadequada proteção de vibração e até mesmo algum dano significativo que já tenha ocorrido [23].

Baseado nos dados da **tabela 2.6**, o tempo médio de retardo entre a primeira fadiga e a primeira evidência visível disso pode ser de uma razão na ordem de 3 ou 4, e a média de perda de área de alumínio anterior a primeira falha da camada externa pode ser de 10 ou 15%. O máximo retardo em algum ensaio foi de uma razão de 12 para 1 e a máxima perda de área de alumínio anterior à evidência visível da camada externa foi de 29%. Essas configurações referem-se a combinações condutor-grampo que favorece a falha na camada interna. Mas numa significativa fração de casos, as falhas em camadas externas ocorrem primeiro [23].

Em 1981, Ramey e Silva [3] realizaram uma série de testes para avaliar a eficiência da redução da amplitude de vibração na vida à fadiga de cabos condutores. Neste trabalho, um aparato experimental foi desenvolvido para simular em ambiente de laboratório, em condições tão próximas quanto possível às do campo, o carregamento eólico a que o cabo está submetido. Trinta e três testes foram realizados com cabos CAA. A maioria dos cabos testados foi submetida inicialmente a altas amplitudes de vibração. Após a ruptura de alguns fios (geralmente dois ou três) a amplitude de vibração era reduzida e o teste prosseguia. A rotação do condutor foi medida permitindo a monitoração cronológica das falhas nos fios. Este acompanhamento fornecia o número de ciclos de fadiga e a localização exata de cada fio rompido. Os resultados destes testes mostraram que a redução na amplitude de vibração dos cabos é uma forma eficiente de evitar a falha de outros fios que compõem o cabo. Cabos testados a altas amplitudes que apresentaram alguns fios rompidos após alguns poucos milhões de ciclos resistiram a vidas de até  $10^8$  ciclos, sem apresentar outras falhas, quando a amplitude de vibração foi reduzida a aproximadamente um terço da amplitude aplicada inicialmente. Assim os autores sugerem que o uso de amortecedores que sejam capazes de reduzir os níveis de vibração eólica nos cabos pode ser uma forma eficiente de conter o dano por fadiga nestes elementos [3].

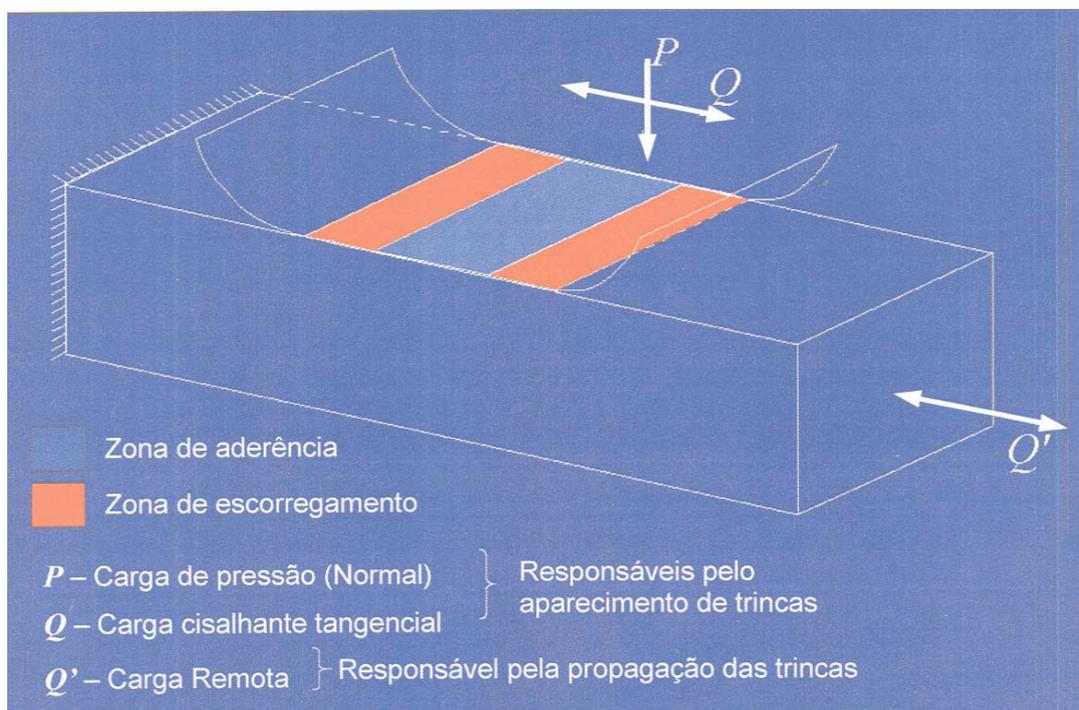
### 2.5.3 Fadiga por *Fretting* de Cabos CAA

#### 2.5.3.1 Fenômeno da Fadiga por “*Fretting*” (Atrito entre Fios)

Quando duas superfícies em contato estão sujeitas a forças tangenciais oscilatórias, zonas de microdeslizamentos ocorrem na qual as duas superfícies deslizam uma sobre a outra, fenômeno este denominado *fretting*. A **figura 2.10** mostra que as zonas em contato se dividem em uma zona de adesão, com desgaste insignificante e iniciação de trinca de fadiga e uma zona de escorregamento, com severo destacamento de partículas. Dois importantes fenômenos podem surgir como resultado desta ação:

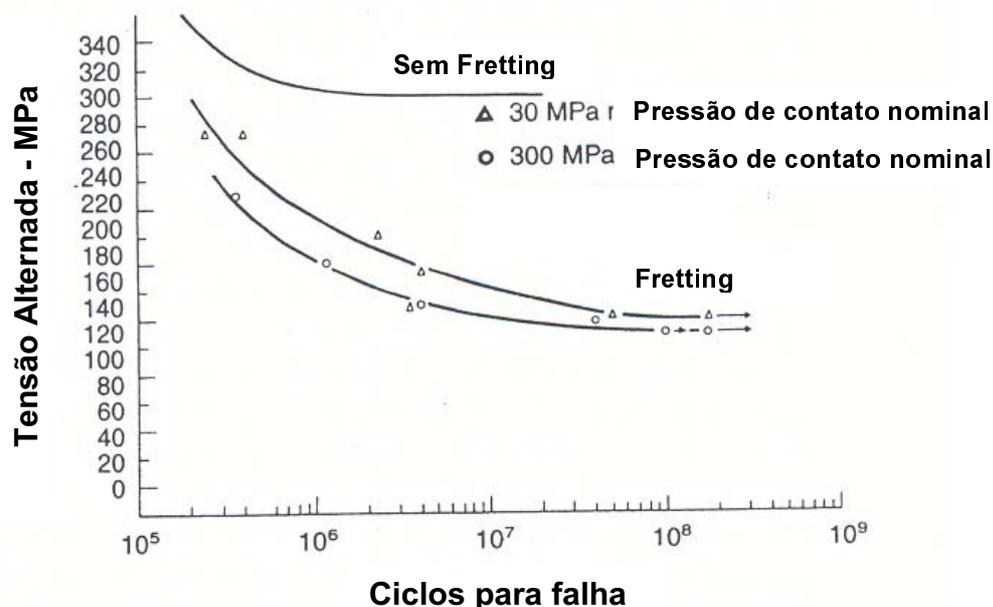
a) um desgaste das superfícies pode ocorrer, dando origem a um processo denominado desgaste por *fretting*;

b) trincas de fadiga podem ter início na região danificada levando a grandes reduções da resistência à fadiga de um componente carregado ciclicamente. Este processo é denominado fadiga por *fretting* e tem sido responsável por muitas falhas de componentes mecânicos em serviço [22].



**Figura 2.10:** Superfícies em contato sujeitas a carregamentos tangenciais – *Fretting* [24].

Testes em laboratório têm mostrado que a ação conjunta fadiga/*fretting* pode produzir reduções de até 60% na resistência à fadiga de um material metálico, conforme mostra a **figura 2.11** [22]. Esta abrupta abreviação na vida do componente tem desafiado engenheiros e pesquisadores a aprimorarem e desenvolverem novas técnicas experimentais e teóricas que permitam fazer uma previsão mais precisa da vida por fadiga na presença de *fretting* [24].

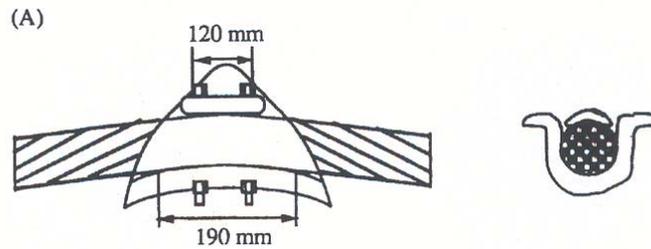


**Figura 2.11:** Curva de fadiga S-N com e sem *fretting* para amostra de aço 3,5%NiCrMoV e aço 1%CrMo [22].

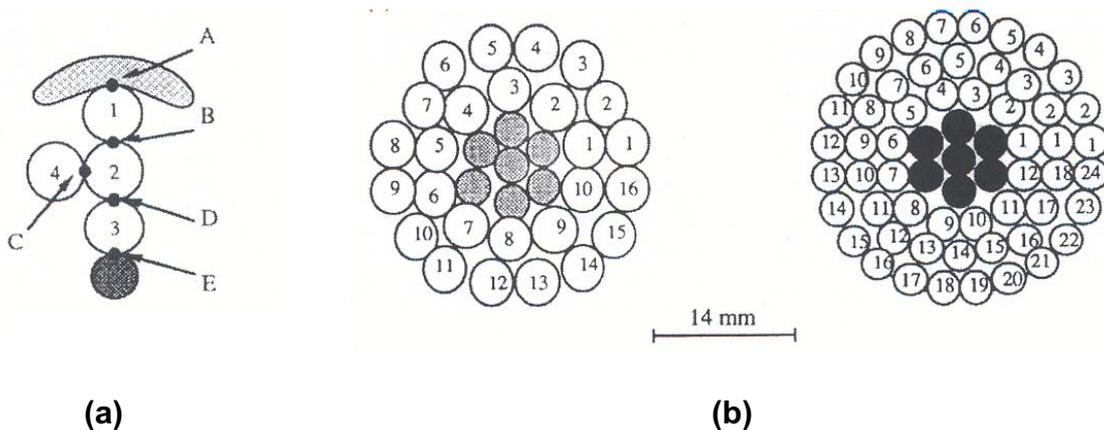
### 2.5.3.2 Mecanismo da Fadiga por *Fretting* em Cabos CAA

As falhas são caracterizadas pelo crescimento de trincas nos fios que constituem o cabo. Estas trincas são resultantes do processo de *fretting* e do carregamento cíclico do cabo, e invariavelmente ocorrem nas superfícies de contato entre o grampo de suspensão e o cabo. A **figura 2.12** representa esquematicamente a montagem cabo/grampo de suspensão. Dependendo das condições de carregamento, três diferentes modos de contato podem levar à fadiga por *fretting*: (i) o contato do grampo com os fios da camada mais externa do cabo (**figura 2.13**, ponto A), (ii) o contato entre dois fios de alumínio (**figura**

2.13 pontos C, B e D) e (iii) o contato entre um fio de alumínio e outro de aço (considerando Cabos de Alumínio com Alma de Aço – CAA) (**figura 2.13** ponto E) [25].



**Figura 2.12:** Esquema da montagem cabo e grampo de suspensão [25].

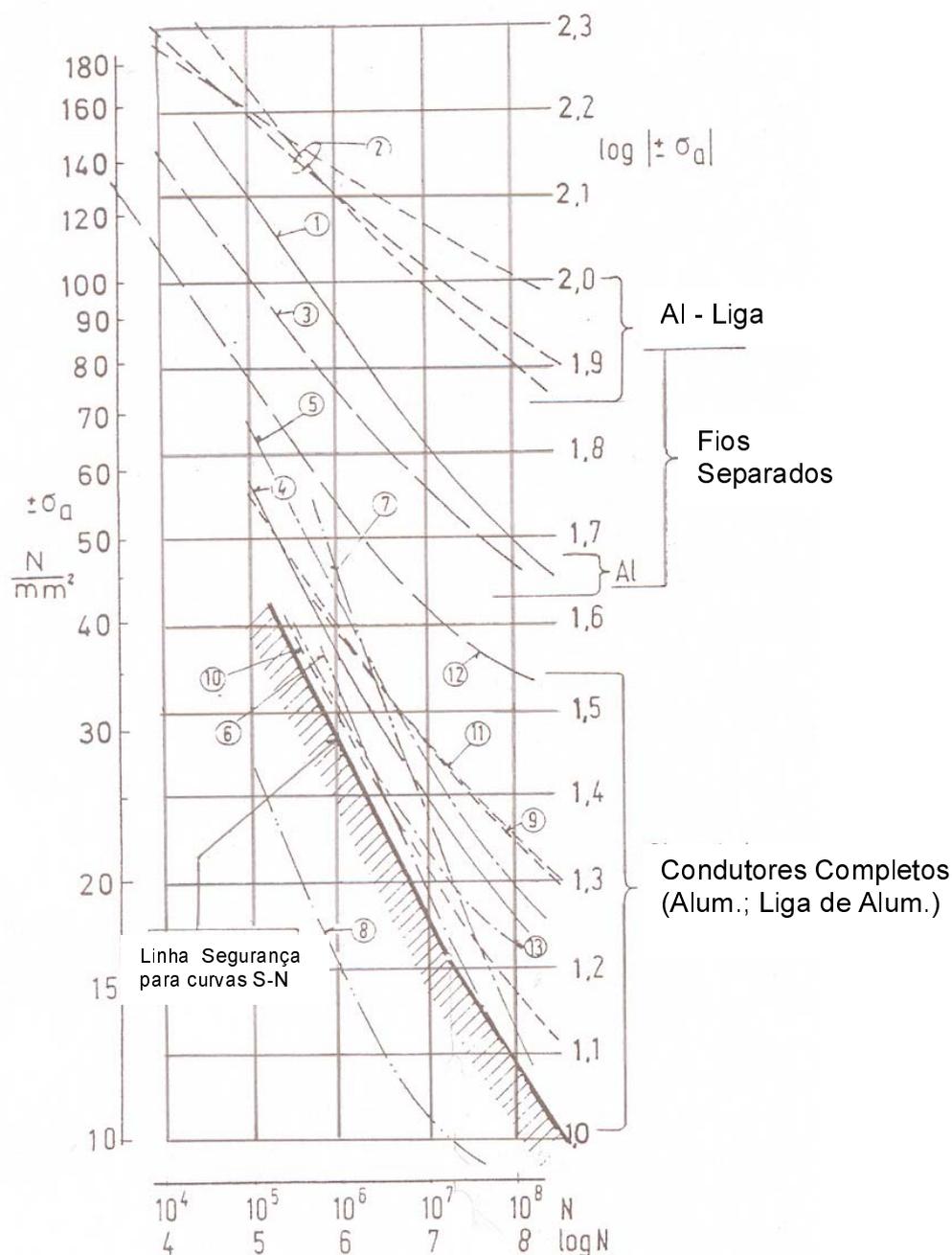


**Figura 2.13:** Modos de contato (a) entre o grampo e (b) cabos de alumínio com alma de aço [25].

Através da **figura 2.14**, que reúne diversos resultados de ensaios realizados em diversos países, compilados pelo Comitê de Estudos de Linhas Aéreas, o WG 22, da CIGRÉ (Conseil International des Grands Reseaux Electriques) [15], que traz a *curva 5*, construída a partir de ensaios de fadiga em condutores de alumínio do tipo CAA (com aplicação de carga de tração pulsante, com média de tensão de tração de 70 MPa, que equivale a 40% da RMC - ensaio realizado no “The Swedish State Power”, Suécia) e a *curva 1*, que representa o ensaio de fios de alumínio separados (com aplicação de flexão alternada - ensaio realizado no I.N.T.A. na Espanha) [26], pode-se

observar que a resistência à fadiga dos condutores completos é, devido ao atrito, muito menor que aquela dos fios separados.

A vida útil é considerada como o número de ciclos necessários para a ruptura de 10% dos fios do cabo ou 3 fios, prevalecendo o menor valor [15].



**Figura 2.14:** Resultados de ensaios compilados pela CIGRÉ [26].

## 2.5.4 Fadiga por Flexão Alternada em Cabos CAA (Tensão Dinâmica)

### 2.5.4.1 Fenômeno da Fadiga Comum (Flexão dos Fios)

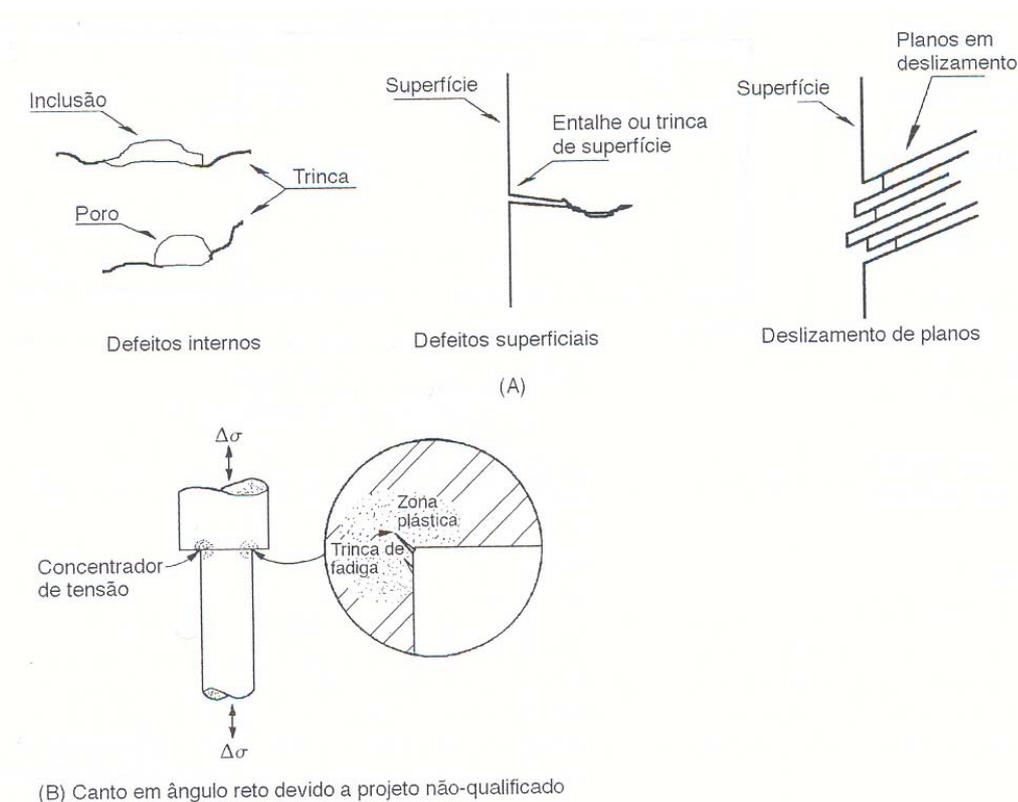
Os materiais, em particular os metálicos, falham ou sofrem ruptura quando expostos a cargas cíclicas, que podem ser axiais (tração-compressão), de flexão (dobramento) ou de torção (carga rotativa). A ruptura definitiva do componente em serviço ocorre em três etapas distintas:

- ⇒ Nucleação da trinca
- ⇒ Propagação cíclica da trinca – fenômeno lento
- ⇒ Falha catastrófica – Fenômeno rápido [21]

A fração relativa do número total de ciclos para a ruptura, que está associada a cada estágio, depende das condições de ensaio e do material. No entanto, já se encontra bem firmado o fato de que uma trinca de fadiga pode ser formada antes que tenham decorrido dez por cento da vida total da amostra [20].

#### 2.5.4.1.1 Nucleação de Trinca por Fadiga

As trincas têm início em regiões de alta concentração de tensão ou em regiões de baixa resistência local. Defeitos de superfície, como ranhuras, pequenas trincas de usinagem, mau acabamento superficial ou pontos que sofrem deformação localizada e, principalmente, formas que compõem cantos em ângulos retos ou entalhes devidos a projetos não-qualificados correspondem aos principais fatores para a nucleação de trincas na manufatura dos componentes. Inclusões, contornos de grão, porosidade acentuada, defeitos de solidificação, como segregação, concentração acentuada de defeitos na estrutura cristalina devido a processos de conformação, e pontos de corrosão também representam elementos potenciais para a nucleação de trincas de fadiga. A **figura 2.15** apresenta um esquema de alguns modos de nucleação de uma trinca em um componente sujeito a esforços cíclicos [21].

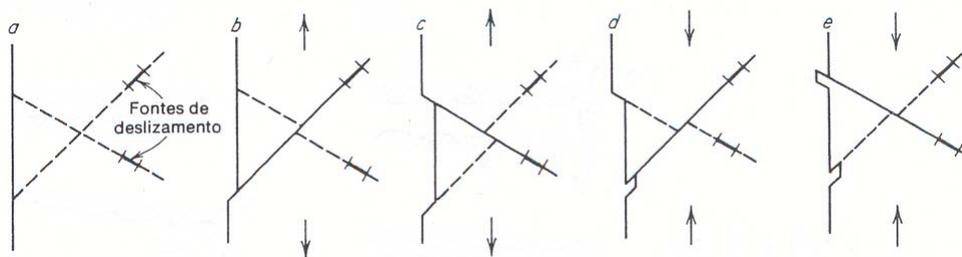


**Figura 2.15:** (A) elementos de nucleação de trincas em componentes sujeitos a esforços cíclicos e (B) concentradores de tensão [21].

Para regiões livres de defeitos, as trincas podem ser nucleadas por concentração localizada de tensão, provocadas por deformações locais em bandas de deslizamento particulares. Por outro lado, a presença de defeitos internos (como inclusões ou porosidade) deve reduzir o tempo necessário para a nucleação de trincas, uma vez que esses defeitos já concentram localmente a tensão aplicada [21].

Entre as bandas de deslizamento, existem aquelas que são mais persistentes, consideradas trincas de fadiga embrionárias, uma vez que após a aplicação de pequenas deformações de tração se transformam em trincas macroscópicas. As trincas de fadiga uma vez formadas tendem a se propagar inicialmente ao longo dos planos de deslizamento, embora em seguida tomem a direção normal à maior tensão de tração aplicada. A propagação da trinca de fadiga é normalmente transgranular. Uma característica estrutural importante que parece ser única para a deformação em fadiga é a formação de ressaltos e reentrâncias na superfície, denominadas intrusões e extrusões, que dão origem

as trincas de fadiga. Várias evidências experimentais indicam que o deslizamento cruzado desempenha papel importante para o processo de formação das extrusões. O alumínio puro, no qual o deslizamento cruzado ocorre com extrema facilidade, não apresenta a formação de extrusões (em contraste com a maioria das ligas de alumínio). O mecanismo de formação de extrusões e intrusões, como pode ser visto na **figura 2.16**, depende da existência de deslizamento em dois sistemas de deslizamento. Durante a atuação das componentes de tração do ciclo de tensões, os dois sistemas operam em seqüência produzindo dois degraus na superfície. Quando entra em atuação a componente de compressão, o deslizamento do primeiro sistema a operar dá origem à formação da intrusão, enquanto que uma extrusão é formada quando o outro sistema de deslizamento opera [20].



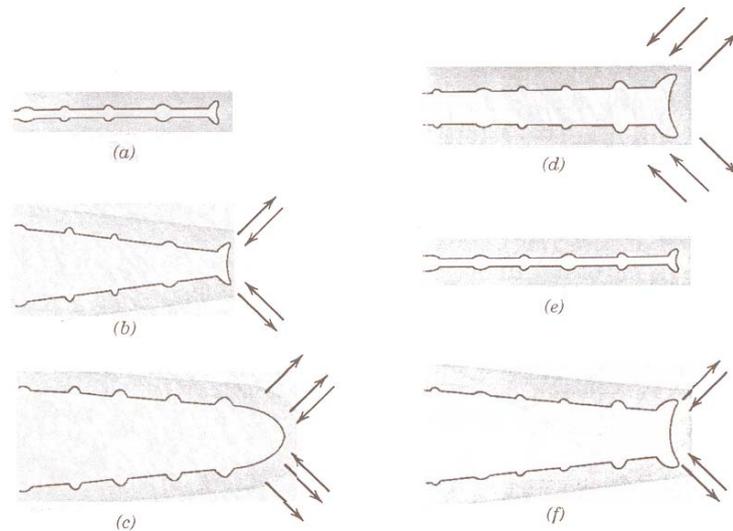
**Figura 2.16:** Mecanismo para formação de extrusões e intrusões proposto por Cottrell e Hull [20].

#### 2.5.4.1.2 Propagação de Trinca por Fadiga

Uma vez que uma trinca estável tenha se nucleado, esta então começa a se propagar muito lentamente e, em metais policristalinos, ao longo dos planos cristalográficos com elevadas tensões de cisalhamento (chamado de propagação de estágio I). Em metais policristalinos, a trinca se estende normalmente através de somente alguns grãos durante esse estágio de propagação. A superfície de fadiga que é formada durante essa propagação de estágio I possui uma aparência plana e sem características especiais.

Finalmente, um segundo estágio de propagação (estágio II) tem lugar, onde a taxa de crescimento da trinca aumenta drasticamente. Além disso,

neste ponto existe também uma alteração na direção de propagação para uma direção que é praticamente perpendicular à tensão de tração aplicada. Durante esse estágio de propagação, o crescimento da trinca avança através de um processo repetitivo de abaulamento plástico e afilamento da ponta da própria trinca, um mecanismo que está ilustrado na **figura 2.17** [27]. A superfície de fratura do estágio II apresenta freqüentemente a formação de rugas ou estrias de fratura por fadiga [20].



**Figura 2.17:** Mecanismo de propagação de trinca de fadiga (estágio II) através de um processo repetitivo de abaulamento e afilamento plástico da extremidade da trinca; (a) carga compressiva zero ou máxima, (b) carga de tração pequena, (c) carga de tração máxima, (d) carga compressiva pequena, (e) carga compressiva zero ou máxima, (f) carga de tração pequena. O eixo de carregamento é vertical [27].

#### 2.5.4.1.3 Falha Catastrófica

Durante o período de serviço, o comportamento encontra-se sujeito a mudanças abruptas de carga de fadiga. Essas mudanças registram-se na macroestrutura da superfície de fratura através de marcas que recebem o nome de marcas de praia (beach lines). Essas marcas apresentam-se curvadas em relação à origem da falha, permitindo, dessa forma, investigações

que conduzem à compreensão do início do processo de fratura. Em geral, nas marcas de praia as bandas mais claras representam uma propagação essencialmente plana, e as bandas mais escuras correspondem a uma propagação mais tortuosa, levando as marcas a uma condição mais rugosa. Assim, pode-se afirmar que as bandas mais claras representam níveis de tensões mais baixos, e as bandas mais escuras, níveis de tensões mais elevados. Deve-se observar que as estrias se encontram dentro das marcas de praia, que podem ser dezenas ou centenas. [21].

#### **2.5.4.2 Mecanismo de Fadiga por Flexão Alternada em Cabos CAA**

Inspeções e análises de falhas de um grande número de rompimentos de vãos de campo e laboratório indicam que trincas de fadiga sempre originam em lugares onde o fio que quebrou estava em contato com outro fio, com armadura blindada de proteção ou com dispositivo de grampeamento. As tensões nessas fixações são combinações de tensões estáticas devido à tensão do condutor, flexão e a força compressiva entre os membros, e as tensões dinâmicas devido à flexão, flutuação de tensão, e tração entre os membros de contato [23].

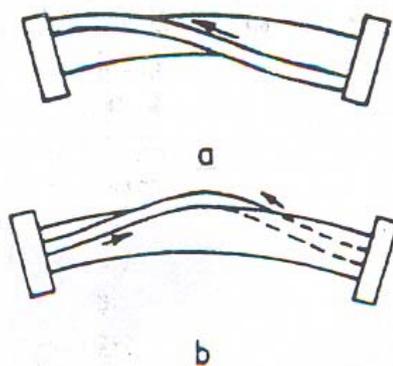
O comportamento de condutores à fadiga não pode simplesmente ser calculado a partir das características nominais de fadiga dos materiais usados em suas construções e as tensões que ocorrem neles. Características de fadiga de condutores devem ser determinados por ensaios de fadiga dos próprios condutores [23].

As tensões dos fios de cada camada produz as mesmas, ao abranger a camada abaixo ou central, uma certa quantidade de pressão. Essa pressão dá estabilidade estrutural ao condutor. Também resulta em atrito entre fios, e conseqüentemente impede seus movimentos relativos de deslizamento de um fio com outro durante a vibração [23].

Não ocorrendo atrito entre fios, não haveria possibilidade de variação na tensão num fio ao longo do seu comprimento. Se um condutor tiver seus

fios, sem atrito, flexionados, as tensões do fio em uma camada podem ou não mudar. Por exemplo, o fio representado em *a* na **figura 2.18** não estaria submetido à mudança de tensão, porque seu comprimento de arco não seria afetado pela flexão. O comprimento de arco do fio representado em *b* mudaria, portanto, resultando em uma mudança em sua tensão. Se o condutor fosse colocado num comprimento muito grande, a mudança no comprimento de arco seria dissipada sobre um grande comprimento de fio e a mudança na tensão seria fraca. Conseqüentemente, para longos comprimentos de condutores, em um condutor sem atrito, tensões de um fio individual não seriam mudadas por flexão do condutor em suas pontas. Na ausência de mudanças de tensão nos fios, a rigidez de flexão do condutor seria simplesmente a soma das resistências à flexão dos fios individuais. Tensões dinâmicas seriam somente aquelas associadas com a flexão de cada fio sobre seu próprio eixo neutro [23].

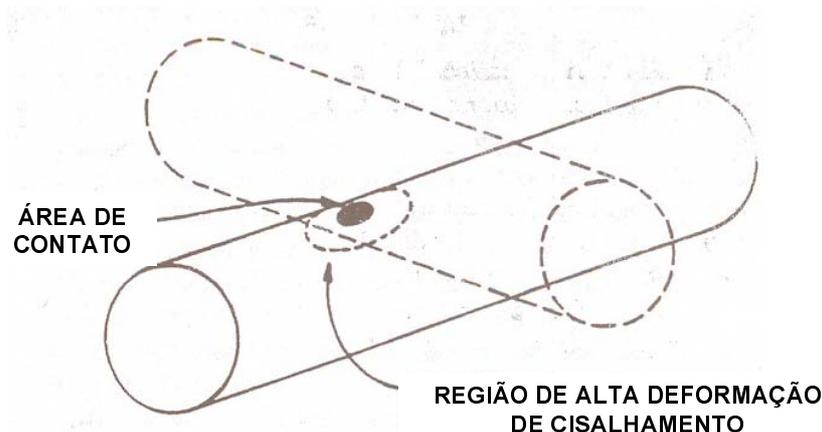
Nota-se que quando o cabo da **figura 2.18 a** é flexionado, o fio desliza ao longo do centro na direção indicada pela pequena seta. Deslizamento também ocorre no cabo em *b*, indicado pelas setas [23].



**Figura 2.18:**Efeito da flexão do condutor sobre o movimento do fio externo [23].

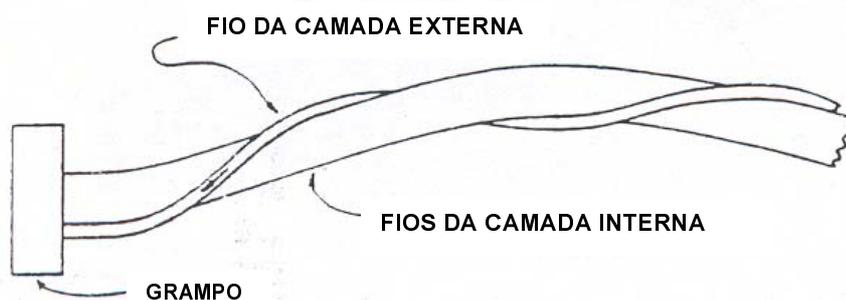
Condutores reais não possuem fios sem atrito e para pequenas quantidades de flexões experimentadas devido a ondas de vibração no vão, o atrito presente entre fios é normalmente grande o bastante para impedir enormes deslizamentos entre os mesmos. Os relativos movimentos axiais dos fios são absorvidos em grande parte por deformações elásticas de cisalhamento em torno de pequenas áreas de contato entre fios, indicado na

**figura 2.19.** A quantidade de movimento não é grande o bastante para desenvolver trações que excedam o limiar de deslizamento. (Quantidades muito pequenas de deslizamento levam às periferias dos contatos entre fios onde a pressão de contato tende à zero) [23].



**Figura 2.19:** Área de contato de fios entre camadas [23].

Próximos aos grampos de suspensão, as curvaturas causadas pela vibração são muito maiores que no vão livre. As simultâneas forças de deslizamento superam a restrição de atrito muito mais facilmente e ocorrem grandes deslizamentos, como indicado pela seta na **figura 2.20** [23].



**Figura 2.20:** Movimento do fio adjacente ao grampo [23].

Os contatos entre fios são normalmente linhas de contato entre o centro e a camada mais interna de fios e pontos de contatos entre fios de camadas adjacentes. Efetivamente, as linhas de contato aumentam em tiras de contatos, e o ponto de contato em elipses de tamanho finito por causa de forças de apoio agindo sobre os mesmos. O tamanho da área de contato

aumenta, principalmente através da deformação plástica dos fios, até que a tensão de contato caia para aproximadamente o limite convencional de escoamento do material do fio, em torno de 170 MPa para alumínio. A tensão de tração necessária para causar deslizamento é essa tensão multiplicada pelo coeficiente de atrito estático, o qual está em torno de 0,7 entre fios de alumínio. As tensões de cisalhamento dinâmicas no limiar de deslizamento são desta maneira bastante altas e a componente estática de tensão é em grande parte determinada pelo escoamento da área de contato sob a tensão de apoio no contato [23].

Essas tensões são reduzidas quando as amplitudes são grandes o bastante para causar enorme deslizamento num contato. As trações estáticas e dinâmicas são reduzidas quando o desgaste aumenta a área de contato, e as trações são mais reduzidas pelo efeito lubrificante dos produtos de desgaste [23].

Deslizamentos em alguns contatos adjacentes aos grampos de suspensão ocorrem quando a amplitude de vibração e a tensão de flexão resultante nos fios são ainda pequenas. Conforme a amplitude de vibração aumenta, deslizamentos ocorrem em mais e mais contatos entre fios naquela região, assim como as trações excedem o limiar de deslizamento resistido até então pela força de atrito. Ao mesmo tempo, tensões de flexão dinâmicas em todos os fios aumentam. Em alguma amplitude, os efeitos combinados de tensão de flexão e dano de superfície iniciam uma trinca de fadiga em uma das áreas de contato, e com continuada vibração, a trinca propaga através do fio, até a falha do mesmo [23].

Toda quebra por fadiga de fios de condutor parece originar-se nos contatos do fio onde ocorre *fretting* (corrosão de atrito). Existem numerosos contatos desse tipo na vizinhança de um grampo, entre os vários fios e entre os fios da camada externa e o grampo.

Ruptura por fadiga em condutor parece ser favorecida naqueles fios fixados, onde movimentos causam *fretting*, mas não desgastes elevados. A razão para isso está na idéia de que o desgaste remove material da superfície do fio mais rápido que trincas novas podem propagar [23].

### 2.5.4.2.1 Cálculo da Tensão Dinâmica Causada por Flexão do Condutor

Os esforços dinâmicos de flexão que surgem no cabo, junto ao grampo de suspensão, são proporcionais à amplitude de vibração, sendo que a constante de proporcionalidade depende das características do cabo e da tensão de esticamento.

A fórmula proposta pelo EPRI [23], descreve a relação entre os esforços dinâmicos de flexão e a amplitude de vibração, que é medida pelos vibrógrafos nas proximidades do grampo de suspensão, conforme segue:

$$\varepsilon = K \cdot Y_b \quad (2.18)$$

$$\sigma_a = E_a \cdot \varepsilon \quad (2.19)$$

$$\sigma_a = \frac{d \cdot E_a \cdot p^2}{4 \cdot (e^{-p \cdot x} - 1 + p \cdot x)} \cdot Y_b \quad (2.20)$$

Onde:

$\sigma_a$  = tensão dinâmica máxima, valor de pico (MPa)

$Y_b$  = amplitude de vibração, pico a pico, medido na distância  $x$  do grampo (mm)

O valor de  $K$  ( $\text{N}/\text{mm}^3$ ) é determinado a partir das características do cabo e da tensão de esticamento (EDS – Every Day Stress)

$d$  = diâmetro dos fios da camada mais externa do cabo (mm)

$E_a$  = módulo de elasticidade do material da camada mais externa do cabo (MPa)

$x$  = distância entre o sensor do medidor de vibração e o grampo (normalmente 89mm)

$\varepsilon$  = deformação dinâmica máxima, valor de pico (IEEE utiliza a unidade microstrains; normalmente  $\mu\text{m}/\text{m}$ )

$$p = \sqrt{\frac{T}{E \cdot I}} \quad (2.21)$$

Onde:

$T$  = componente horizontal de tração no condutor (N)

$E \cdot I$  = rigidez à flexão ( $\text{N} \cdot \text{mm}^2$ ), que no caso de cabos CAA é dado por:

$$E \cdot I = ns \cdot Es \cdot \left( \frac{\pi \cdot ds^4}{64} \right) + na \cdot Ea \cdot \left( \frac{\pi \cdot da^4}{64} \right) \quad (2.22)$$

Onde:

$Ea, Es$  = módulos de elasticidade do alumínio e do aço (MPa)

$na, ns$  = número de fios de alumínio e de aço

$da, ds$  = diâmetro dos fios de alumínio e de aço (mm)

## 2.6 Ensaios Mecânicos

Os ensaios mecânicos permitem a determinação de propriedades mecânicas que se referem ao comportamento do material quando sob a ação de esforços e que são expressas em função de tensões e/ ou deformações. Tensões representam a resposta interna aos esforços externos que atuam sobre uma determinada área em um corpo [21].

A classificação dos ensaios, quanto à integridade geométrica e dimensional do material ensaiado, pode ser destrutivo, onde ocorre a inutilização parcial ou total do corpo-de-prova, como por exemplo, o ensaio de tração, dureza, fadiga, fluência, mas também pode ser não destrutivo, onde não compromete a integridade do corpo-de-prova, ou seja, ensaios de raios X, raios  $\gamma$ , ultra-som, partículas magnéticas [21].

### 2.6.1 Ensaio de Tração de Cabos de Alumínio com Alma de Aço – CAA

Os cabos de alumínio, com ou sem alma de aço, empregados em linhas aéreas de transmissão elétrica são submetidos a dois tipos mais importantes de ensaios de tração. O primeiro tipo é o ensaio de tração-dimensional, onde os cabos são simplesmente levados até a ruptura, num comprimento mínimo de 8m, sendo medidos os seus diâmetros em seis pontos ao longo do cabo, com cargas pré-determinadas. Essas cargas são

porcentagens da carga de ruptura nominal do cabo (8, 30 e 50%). Com a carga de 50%, é também medida a irregularidade longitudinal (flecha ou ondulação), que não pode exceder um valor especificado para cada cabo [19]. Esse ensaio é regido pela norma ABNT NBR 7272 [28]. Cada tipo de cabo possui uma carga de ruptura nominal, também chamada de Resistência Mecânica Calculada (RMC), e a carga de ruptura do cabo ensaiado deve ser igual ou maior que a carga nominal [19].

O segundo tipo de ensaio efetuado por tração nesses cabos de alumínio é o ensaio tensão (carga) x deformação, ensaio adotado neste trabalho, padronizado pela norma ABNT NBR 7302 [29], onde o cabo é tracionado até cargas pré-estabelecidas (8, 30, 50, 70 e 75% da RMC), durante determinados tempos, para se determinar um possível aumento do alongamento durante a manutenção com a carga constante. Esse mesmo tipo de ensaio é feito, em uma alma de aço do mesmo tipo de cabo, de modo análogo. Depois de colocar os resultados em gráfico, por subtração dos valores do cabo completo e da alma, têm-se graficamente os valores de resistência da parte do alumínio. Com as curvas-padrão existentes para cada tipo de cabo, pode-se verificar se o cabo ensaiado está satisfatório ou não [19].

Segundo essa norma, a carga de ruptura é aquela para a qual ocorre a ruptura de qualquer fio elementar do cabo completo.

## **2.6.2 Ensaio de Vibração de Cabos de Alumínio com Alma de Aço – CAA**

O ensaio de vibração de cabos condutores para linhas aéreas não é normalizado. Como o objetivo do trabalho é verificar se o cabo, que se encontra instalado na linha de transmissão a um longo tempo e submetido à condições que favorecem a fadiga, *fretting* e etc, no ponto de grampeamento, teve suas propriedades mecânicas alteradas e qual seu comportamento quando da operação de retracionamento, o ensaio de vibração seguirá a norma ABNT NBR 8158 [30], que especifica ensaios mecânicos para fixadores.

Dessa forma, o ensaio simula as novas condições a que o cabo será submetido quando do retracionamento (onde o cabo é deslocado do ponto de grampeamento), ou seja, o mesmo será submetido a uma vibração, sem nenhum ponto de restrição de movimento (anteriormente imposto pelo grampo de suspensão), bem como a um carregamento (EDS) acima daquele em que o cabo foi submetido durante toda sua utilização na linha de transmissão.



### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 Materiais**

Para a realização dos ensaios foram utilizadas 6 (seis) amostras de cabos condutores do tipo CAA (Condutor de Alumínio com Alma de Aço), composto por fios de alumínio 1350-H19 e fios de aço galvanizado, dispostos internamente, constituindo o seu núcleo “alma”.

As características gerais desse cabo são: [6]

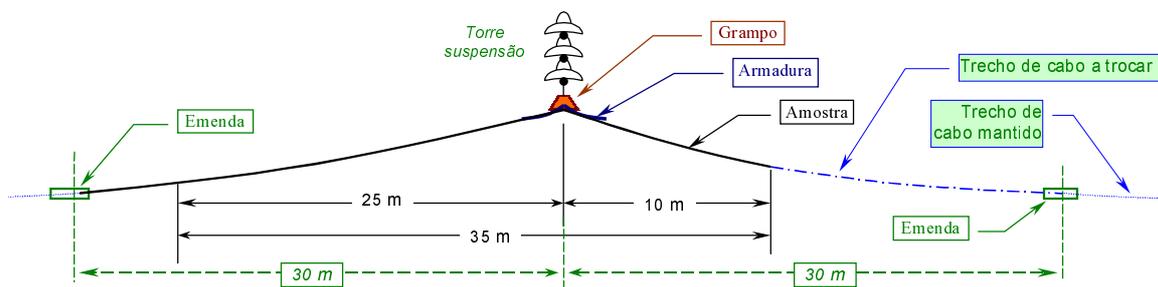
- Designação: “Oriole” (código canadense de referências comerciais);
- Composição: 30 fios de alumínio e 7 fios de aço;
- Diâmetro dos fios de alumínio: 2,69 mm;
- Diâmetro dos fios de aço: 2,69 mm;
- Diâmetro da alma de aço: 8,07 mm;
- Diâmetro do condutor (nominal): 18,83 mm;
- Área da seção transversal do condutor: 210,28 mm<sup>2</sup>;
- Peso do cabo (nominal): 782 kg/km;
- Módulo de elasticidade (nominal): 8000 kgf/mm<sup>2</sup>;
- Carga de ruptura (nominal): 7870 kgf.

##### **3.1.1 Retirada de Corpos de Prova**

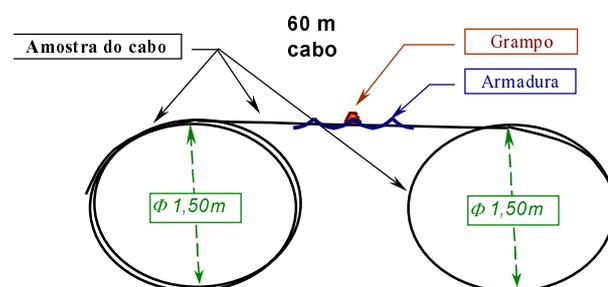
Como não há uma norma específica para retirada de corpos de prova de condutores elétricos em operação, foram adotados alguns procedimentos, como segue abaixo.

- Os corpos de prova foram retirados de cadeias de suspensão, com a armadura e o grampo juntos (sem removê-los durante o serviço);
- Ter pelo menos 35m, sendo uma parte de 10 m antes do grampo e 25 m depois;

- Devido à recomendação da norma NBR 7430 [31] de que as emendas de cabos devem ser feitas distanciadas das cadeias a no mínimo 25m do grampo, foram retirados, portanto, 60 m de cabo. Ver **figura 3.1**;
- Referente ao acondicionamento para transporte dos corpos de prova retirados da Linha de Transmissão deverá seguir o item 4.2.1 da norma NBR 7273 [32], utilizada para retirada e preparo de corpo de prova de condutores elétricos “novos” para ensaio de tipo, onde se recomenda preferencialmente acondicionar os corpos de prova em forma de rolo com diâmetro não inferior a 20 vezes o seu próprio diâmetro, evitando durante as operações a ocorrência de torções e dobramentos excessivos. Ver **figura 3.2**.



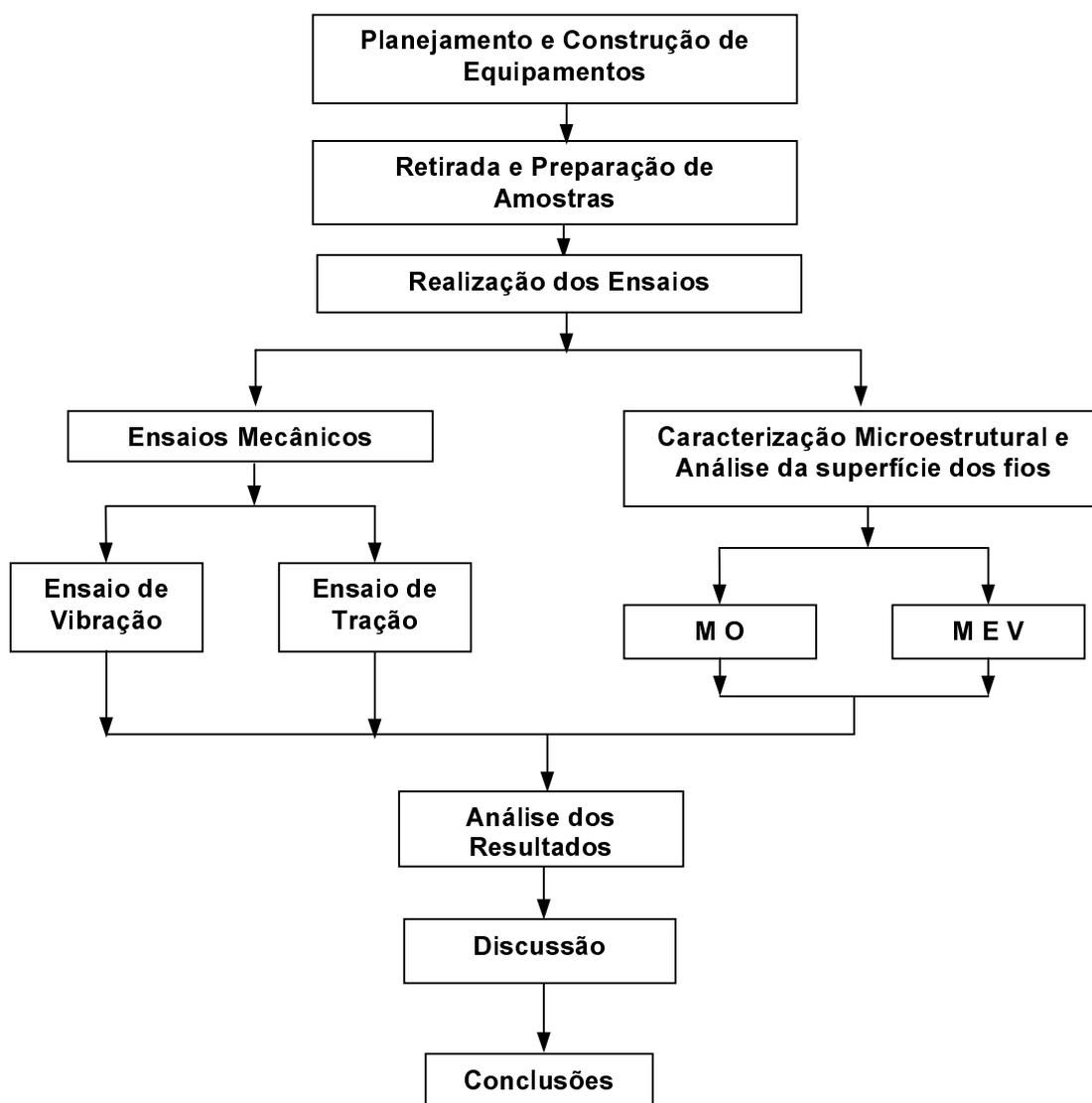
**Figura 3.1:** Distanciamentos para retiradas dos corpos de prova de condutores



**Figura 3.2:** Acondicionamento dos corpos de prova de condutores

### 3.2 Metodologia do Trabalho Experimental

O procedimento experimental ocorreu conforme apresentado no fluxograma da **figura 3.3**.



**Figura 3.3:** Fluxograma do procedimento experimental

### 3.3 Procedimento Experimental

Para a realização dessa pesquisa foram retirados corpos de prova de cabos condutores que se encontravam em operação na Linha de Transmissão de 138kV que interliga as subestações de Jurumirim até Capão Bonito, há aproximadamente 35 anos.

Os ensaios foram aplicados nesses corpos de prova de cabos usados, com e sem a região de grampeamento.

Também foram aplicados ensaios em corpos de prova de cabo novo, de forma a comparar os resultados com os obtidos para os cabos usados.

Os parâmetros avaliados foram: comparação do comportamento dos corpos de prova do cabo Oriole dentro e fora dos antigos pontos de grampeamento e para amostras de cabo Oriole novo, com relação aos resultados dos ensaios. A representação gráfica da matriz experimental é mostrada a seguir na **tabela 3.1**.

**Tabela 3.1:** Representação gráfica da matriz experimental

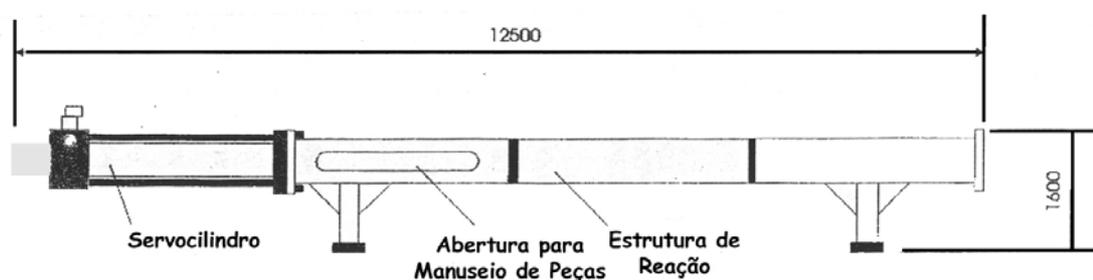
<i>Quantidade de Corpos de Prova</i>	<i>Amostra</i>	<i>Ensaio</i>
<b>03</b>	Cabo Novo	Tração
<b>01</b>	Alma de Aço do Cabo Novo	Tração
<b>03</b>	Cabo Usado sem Região do Grampo	Tração
<b>03</b>	Cabo Usado com Região do Grampo	Tração
<b>03</b>	Alma de Aço do Cabo Usado	Tração
<b>03</b>	Cabo Usado sem Região do Grampo	Vibração
<b>03</b>	Cabo Usado com Região do Grampo	Vibração

#### 3.3.1 Construção de Equipamento para Ensaio de Tração

O ensaio de tração foi realizado em equipamento construído especialmente, cujas dimensões foram determinadas a partir da utilização da norma ABNT NBR 7302 [29], que estabelece um comprimento mínimo de corpo de prova de 8,0m.

De modo geral, a máquina de tração é composta de um atuador hidráulico de curso de 2m, que apresenta capacidade de 20tf (tonelada força) ou 20.000kgf em tração (capacidade suficiente para atender os valores de carga determinados na literatura para o cabo Oriole) e 40tf em compressão; 01 célula de carga; estrutura metálica de 12,5m de comprimento e um microcomputador com sistema de aquisição de dados.

As **figuras 3.4 e 3.5**, respectivamente, ilustram o projeto da máquina e o aspecto final após sua construção.

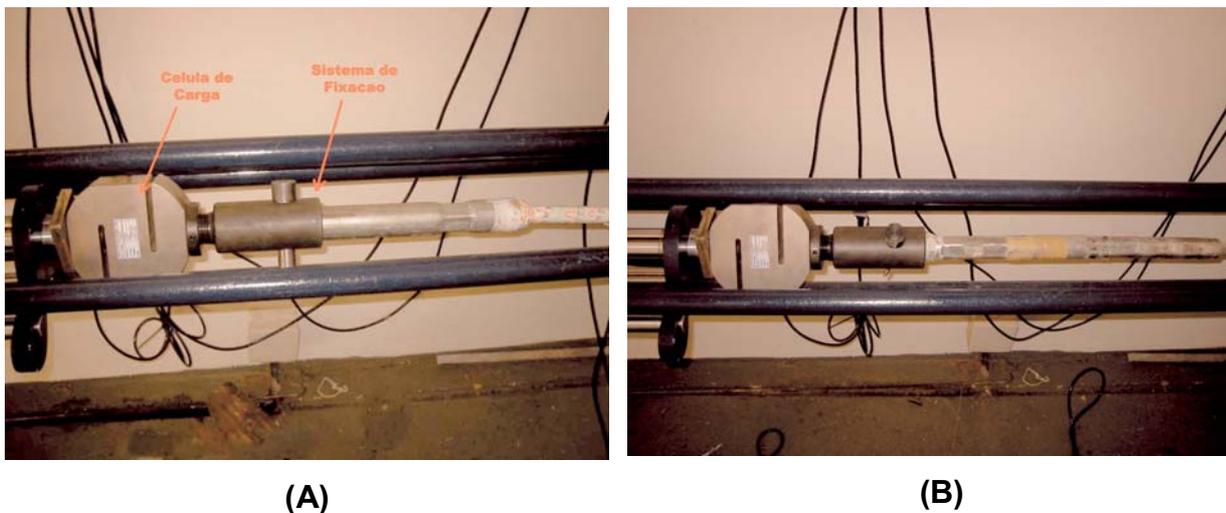


**Figura 3.4:** Desenho esquemático da máquina de ensaio de tração em (mm)



**Figura 3.5:** Máquina de ensaio de tração com sistema de aquisição de dados

Juntamente com o projeto e construção da máquina fez-se necessário o desenvolvimento de todo o sistema de garras de fixação para corpo de prova. O sistema mais adequado, até pelas especificações da máquina, foi um sistema de olhal, sendo que em um primeiro momento foram propostos dois métodos de fixação, um utilizando resina polimérica e outro utilizando sistema de grampos prensados. A **figura 3.6** ilustra as duas propostas de sistemas de fixação.



**Figura 3.6:** Sistemas de fixação (A) utilizando resina; (B) grampo pensado.

Durante os ensaios de validação notou-se que quando utilizado o sistema com resina polimérica havia o escorregamento da alma de aço do condutor, além dos valores de carga de ruptura serem significativamente inferiores aos valores quando utilizados os sistemas de grampos prensados.

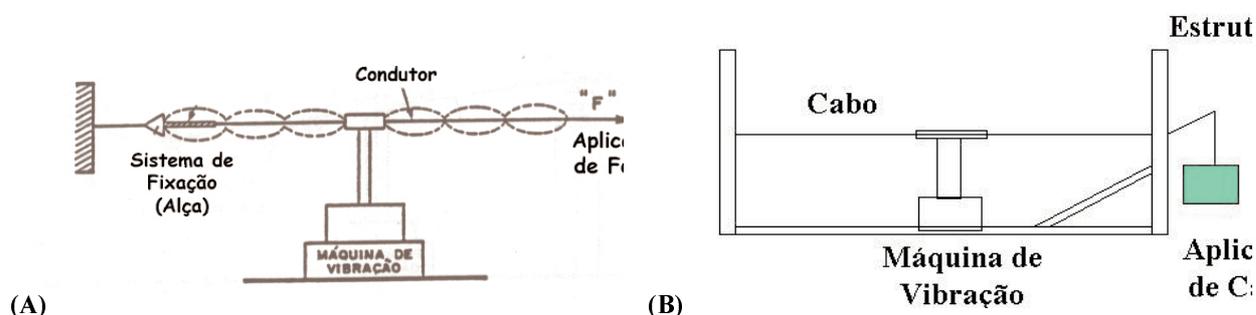
Deste modo, foi adotado como sistema padrão os grampos prensados, que além de promoverem uma melhor sollicitação do condutor (fios de alumínio com alma de aço), simula as condições de serviço a que estão sujeitos.

### 3.3.2 Construção de Equipamento para Ensaio de Vibração

O ensaio de vibração foi realizado em equipamento construído especialmente para atender as recomendações da norma adotada, a ABNT

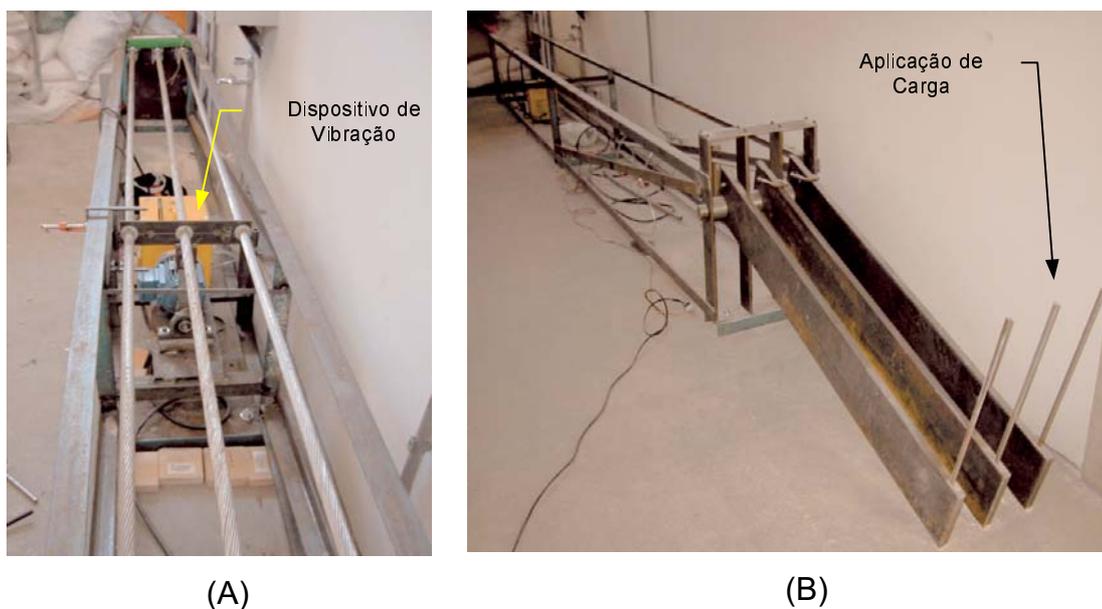
NBR 8158 - “Ferragens para redes aéreas urbanas e rurais de distribuição de energia elétrica – Especificação” [30]. Tal norma foi adotada, pois não há nenhuma norma específica para realização de ensaio de fadiga ou vibração para cabos elétricos ou que pudesse simular a ação dos ventos nas propriedades mecânicas dos condutores.

O esquema de realização do ensaio é apresentado na **figura 3.7** a seguir, sendo que a norma especifica um número máximo de ciclos de 10.000.000 a uma frequência que varia de 20 a 50 Hz dependendo do diâmetro do condutor.



**Figura 3.7:**Esquema ensaio de vibração; (A) Visão geral; (B) Maiores detalhes.

A **figura 3.8** ilustra a máquina de ensaio ressaltando o sistema de vibração de cabos e o dispositivo de aplicação de carga.



**Figura 3.8:** (A) Dispositivo de vibração dos cabos; (B) Dispositivo de aplicação de carga.

### **3.3.3 Realização dos Ensaio Mecânicos**

#### **3.3.3.1 Ensaio de Tração no Cabo Condutor**

O ensaio de tração em condutores elétricos CAA “Oriole” foi realizado conforme a norma NBR 7302 “Condutores e Elétricos de Alumínio – Tensão x Deformação em Condutores de Alumínio – Método de Ensaio” [29].

Esse ensaio permitirá avaliar se houve influência do ponto de fixação do grampo de suspensão em determinadas propriedades mecânicas do cabo CAA, ou seja, carga de ruptura e alongamento. Conseqüentemente, esse ensaio será importante em termos de projeto, pois os cálculos mecânicos dos cabos (situações operacionais mais críticas), que deverão considerar o novo valor de EDS (imposto no retracionamento), serão baseados nos novos valores de carga de ruptura.

Para um melhor entendimento e descrição dos procedimentos, dividiu-se o ensaio no condutor em duas etapas: (a) Cabo condutor como um todo; (b) Alma de aço.

##### **3.3.3.1.1. Ensaio de Tração no Cabo Condutor Completo**

A norma NBR 7302 [29] determina que o corpo de prova deve possuir um comprimento mínimo de 8 metros, ou seja, uma distância mínima entre garras.

O ensaio tensão x deformação em condutores consiste na aplicação de uma pré-carga de 8% da RMC (Resistência Mecânica Calculada) ou 500kgf, adotando-se o menor valor. Após 3 minutos de aplicação desta pré-carga, (a norma não estabelece um tempo de referência), mede-se o comprimento do corpo de prova, sendo que este será o valor utilizado como comprimento útil.

A seguir aumenta-se a carga até 30% do valor da RMC, registrando os valores de carga e alongamento, mantendo-a constante por 30 minutos e descarregando o sistema até a pré-carga inicial. Novamente aumenta-se a

carga até 50% do valor da RMC, mantendo-a constante por 1 hora e descarregando o sistema até a pré-carga inicial.

Procedendo da mesma maneira, o condutor é recarregado até 70% da RMC, mantendo a carga constante por 1h. Executa-se o último descarregamento registrando os valores de alongamento decrescente até a pré-carga inicial. A seguir o condutor é recarregado até 75% da RMC e a partir deste ponto a carga é crescente até a ruptura. Com a determinação destes valores é obtida uma curva de carga (tf) x alongamento (%), a qual avalia o comportamento mecânico do cabo.

#### **3.3.3.1.2 Ensaio de Tração na Alma de Aço**

O ensaio de tração na alma de aço é realizado de maneira análoga ao do ensaio de condutor completo, considerando-se os carregamentos e descarregamentos efetuados, assim como, os tempos de espera, durante as três paradas e o registro dos alongamentos.

#### **3.3.3.2 Ensaio de Vibração**

De modo geral o ensaio de vibração consiste na fixação do corpo de prova de 5m de comprimento a um ponto rígido, o qual é submetido a uma carga constante e ação de um sistema vibratório.

A frequência e a carga a que os corpos de prova estão sujeitos depende do tipo de condutor a ser ensaiado. No caso do condutor tipo Oriole, o valor específico de frequência é de 25Hz e o valor de carga de 2,4tf. O ensaio é realizado até que sejam obtidos 10.000.000 ciclos ou até que haja ruptura do corpo de prova.

Esse ensaio é um parâmetro importante na caracterização do comportamento do cabo frente à fadiga, ou seja, o cabo deve atingir um

número de ciclos de vibração sem que ocorra a ruptura de nenhum tento, para um determinado nível de tensão, ensaio “passa-não-passa”.

Portanto, o resultado desse ensaio é de suma importância em termos de projeto, pois a carga aplicada nesse ensaio corresponde ao novo carregamento de tração utilizado para a operação de retracionamento (EDS).

### **3.3.4 Caracterização Microestrutural**

A caracterização microestrutural foi realizada por meio de microscopia ótica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) em amostras de cabos novos e usados e na região de grampeamento de corpos de prova submetidos à tração, com a finalidade de observar alterações microestruturais nas amostras e sua implicação e influência nas propriedades mecânicas dos condutores.

A análise metalográfica utilizando MO, foi realizada em dois fios por camada em suas seções longitudinais, seguindo o procedimento convencional de preparação de amostra, com corte, embutimento, lixamento, polimento e ataque químico. Os reagentes químicos utilizados foram HF 0,5% para os fios de alumínio e nital 2% para a alma de aço.

A análise metalográfica utilizando MEV foi realizada na superfície dos fios entre a camada externa e interna de alumínio, e alma de aço, a fim de se avaliar a presença de marcas de *fretting* nos mesmos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

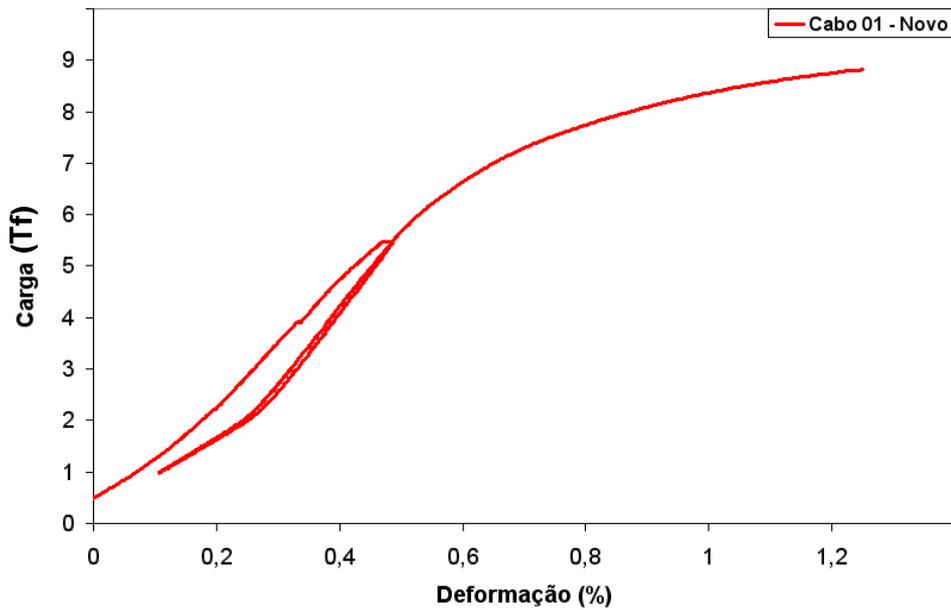
### 4.1 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados a uma velocidade constante de 10kgf/s, sendo que o comprimento útil dos corpos de prova, distância entre garras, foi de 8m. Foram utilizados cabos novos, usados, e usados com região de grampeamento, para se verificar a influência da região de grampeamento na resistência mecânica de condutores, já que há relatos de que a mesma está sujeita a ação de *fretting*, que influencia o comportamento do condutor. A **figura 4.1** ilustra a região de grampeamento para o condutor Oriole

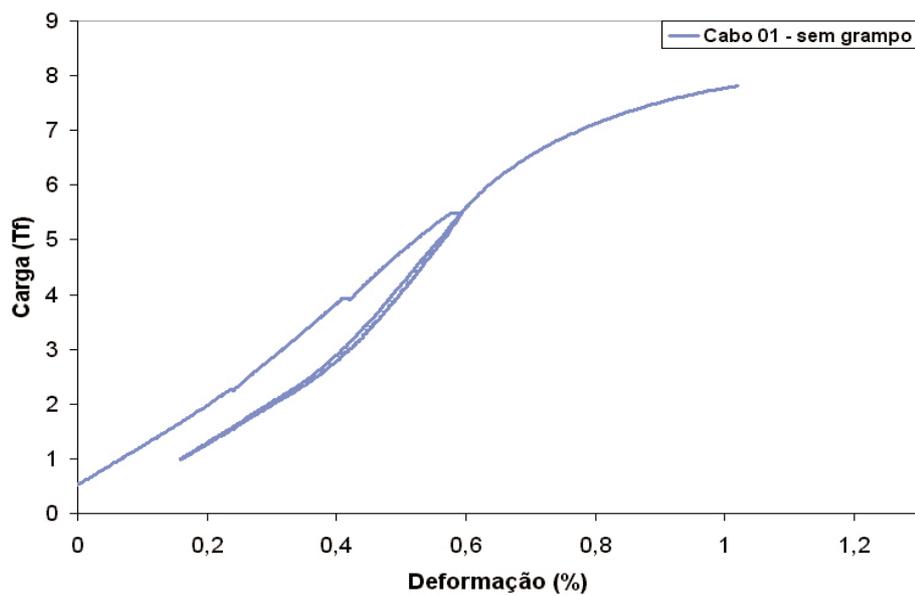


**Figura 4.1:** Região de grampeamento e grampo para o condutor Oriole.

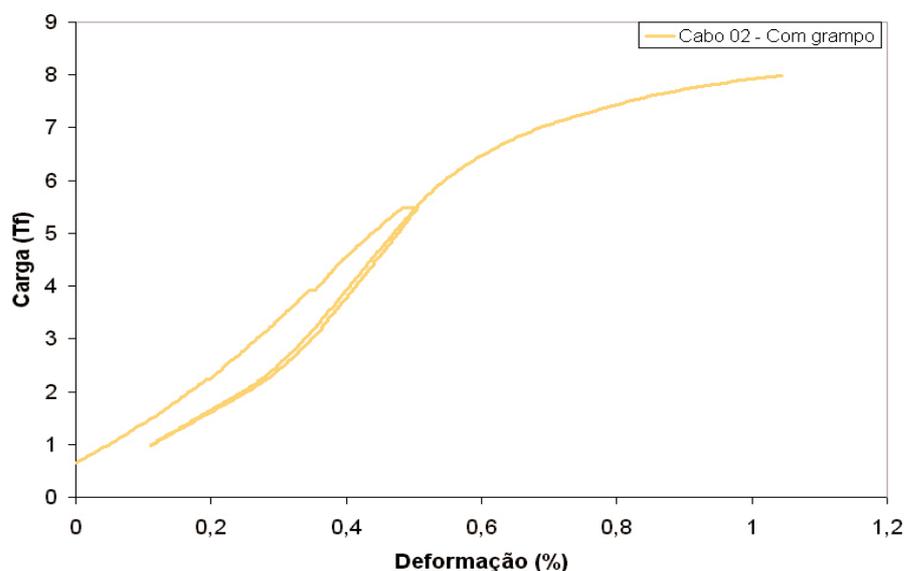
Todas as curvas obtidas apresentaram o mesmo formato, sendo que as **figuras 4.2, 4.3 e 4.4** ilustram, respectivamente, os resultados dos ensaios de tração para os condutores novos, usados sem a região de grampeamento e usados com a região de grampeamento, para o condutor Oriole.



**Figura 4.2:** Figura ilustrativa da curva Carga x Deformação para o cabo novo, para o condutor Oriole.



**Figura 4.3:** Figura ilustrativa da curva Carga x Deformação para o cabo usado, sem a região do grampo, para o condutor Oriole.



**Figura 4.4:** Figura ilustrativa da curva Carga x Deformação para o cabo usado, com a região do grampo, para o condutor Oriole.

A **tabela 4.1** mostra os valores de carga de ruptura e alongamento percentual para todos os corpos de prova para os condutores Oriole.

**Tabela 4.1:** Valores obtidos do ensaio de tração dos condutores Oriole.

<b>Corpo de prova</b>	<b>Carga de Ruptura (Tf)</b>	<b>Alongamento final(%)</b>
<b>Cabo Novo</b>	8,82	0,9
	8,56	1,3
	8,60	1,1
<b>Média</b>	8,66	1,19
<b>Desvio Padrão</b>	0,14	0,06
<b>Cabo usado sem Grampo</b>	7,81	1,02
	7,94	1,06
	7,45	0,95
<b>Média</b>	7,73	1,01
<b>Desvio Padrão</b>	0,25	0,06
<b>Cabo usado com Grampo</b>	8,1	1,2
	7,94	1,04
	7,97	0,91
<b>Média</b>	8,00	1,05
<b>Desvio Padrão</b>	0,09	0,15

Considerando-se o valor nominal de carga de ruptura de 7,87tf para o cabo Oriole, os resultados obtidos em qualquer condição (novo e usado com e

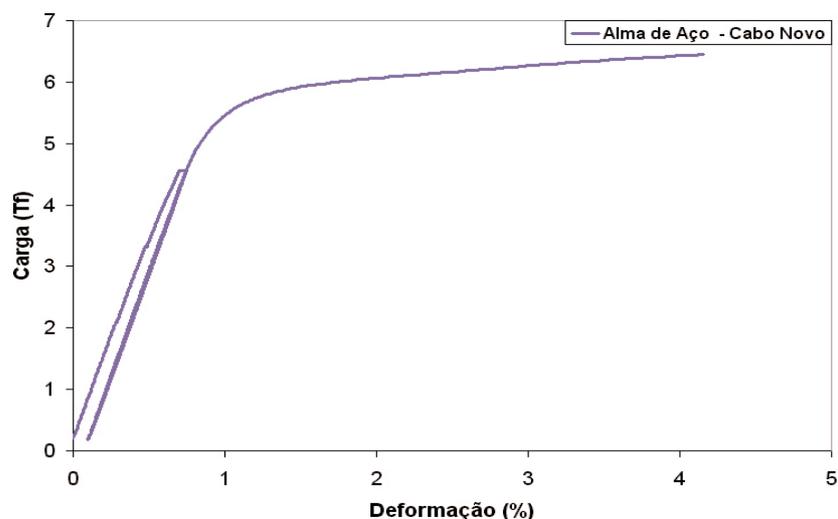
sem a região de ponto de fixação do grampo de suspensão) foram de mesmo nível para o Oriole. Isto leva a supor que se o carregamento em campo for baseado na carga nominal de ruptura, os cabos usados teriam o mesmo comportamento dos novos.

A média da carga de ruptura para os cabos Oriole usados com a região de grampeamento foi 3,3% superior a média dos cabos usados sem a região de grampeamento – **Tabela 4.1**. Em relação aos cabos novos, os cabos usados com a região de grampeamento apresentaram média de carga de ruptura 7,6% inferior.

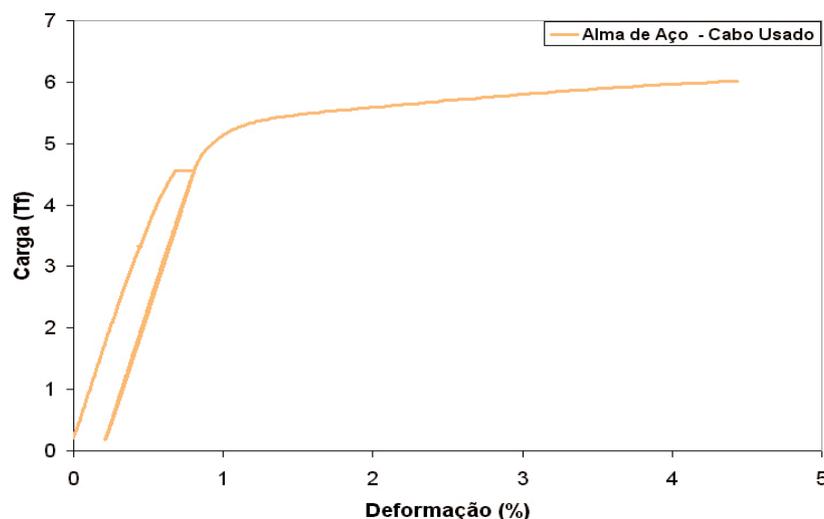
Referente ao alongamento dos condutores, os cabos usados com a região de grampeamento apresentaram um alongamento médio de 3,8% superior aos cabos usados sem a região de grampeamento e cerca de 11,8% inferior aos cabos novos.

Para todos os resultados, considerando-se os valores de desvio padrão apresentados, as diferenças encontradas não são significativas.

Como os condutores são compostos por dois tipos de materiais, foi realizado ensaio de tração nas almas de aço dos mesmos, como previsto pela norma NBR 7302 [29]. As **figuras 4.5 e 4.6** representam a curva carga x deformação para as almas de aços dos cabos novos e dos cabos usados para o condutor Oriole.



**Figura 4.5:** Figura ilustrativa da curva Carga x Deformação para alma de aço do cabo novo para o condutor Oriole.



**Figura 4.6:** Figura ilustrativa da curva Carga x Deformação para alma de aço do cabo usado para o condutor Oriole.

A **tabela 4.2** mostra os valores de carga de ruptura para alma de aço dos cabos novos e usados para os condutores Oriole.

**Tabela 4.2:** Valores de carga de ruptura e alongamento das almas de aço para os condutores novos e usados para o condutor Oriole.

<b>Corpo de prova</b>	<b>Carga de Ruptura (Tf)</b>	<b>Alongamento final(%)</b>
<b>Cabo Novo (1 corpo de prova)</b>	<b>6,44</b>	<b>4,15</b>
<b>Cabo Usado</b>	<b>5,95</b>	<b>4,99</b>
	<b>6,08</b>	<b>4,80</b>
	<b>6,02</b>	<b>4,43</b>
<b>Média</b>	<b>6,02</b>	<b>4,74</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,07</b>	<b>0,28</b>

Como pode ser observado na **tabela 4.2**, para o condutor Oriole, o comportamento dos valores de carga de ruptura da alma de aço é semelhante ao comportamento do condutor como um todo. A carga de ruptura para a alma de aço nova é 6,5% superior ao valor médio das almas de aço usadas, sendo que apenas o alongamento não apresenta valores semelhantes aos do condutor como um todo, já que o alongamento da alma de aço usada é cerca de 14% superior a alma de aço nova.

Os valores dos alongamentos finais referentes às almas de aço são maiores em relação aos valores apresentados pelos cabos condutores completos, pois durante o ensaio do cabo completo, de acordo com o item 6.1.6 da norma NBR 7302 [30], a carga de ruptura é aquela para a qual ocorre a ruptura de qualquer fio elementar do cabo completo e como os fios de alumínio possuem menor resistência à ruptura por tração, os mesmos se rompem antes que qualquer fio da alma de aço, fazendo com que o resultado do alongamento do cabo completo seja inferior ao alongamento resultante do ensaio da alma de aço, onde os fios de aço possuem maior ductilidade.

Com relação à região de grampeamento, observou-se que a mesma não influencia os valores de carga de ruptura e alongamento dos condutores, tanto novos como usados com e sem a região do grampeamento, principalmente pela pequena diferença entre os valores obtidos. Além disso, todos os pontos de ruptura nos condutores foram distante dos pontos de grampeamento.

Pela análise das características dos condutores rompidos observou-se que a fratura localizava-se nos pontos de fixação dos corpos de prova na máquina de tração. Estes pontos de fixação, como mencionado no procedimento experimental (**figura 3.6 B**), foram produzidos pela utilização de uma prensa hidráulica, que induz deformação plástica localizada nos fios de alumínio, resultando na formação de intensificadores de tensão, microtrincas, e tensão residual. Desta forma, pelas características estruturais críticas do ponto de fixação do corpo de prova à máquina de tração, essa é região de rompimento dos condutores. Tal fato, juntamente com as diferenças não expressivas dos valores do ensaio de tração, indica que o resultado da resistência mecânica dos condutores em uso apresenta forte influência da maneira com que o cabo é fixado na máquina de tração, influência essa que supera o efeito do deslocamento da região de grampeamento para outro ponto do vão da LT. Isto indica que o efeito do *fretting*, presente na região de grampeamento, não foi expressivo o suficiente para provocar uma diminuição da resistência mecânica dos condutores Oriole, abaixo da carga de ruptura nominal destes condutores. Com isso, é possível concluir que as propriedades

mecânicas (carga de ruptura e alongamento percentual) dos condutores Oriole atendem as especificações técnicas do fabricante.

A escolha da norma NBR 7302 [29] como base do desenvolvimento dos ensaios de tração foi devida às diversas etapas em que este é realizado, permanecendo a carga constante por determinado período. Tal procedimento de ensaio permitiu avaliar o comportamento do condutor, quando submetido a diversos níveis de carga, e a deformação resultante, fato esse essencial para a análise do processo de retracionamento dos condutores, principalmente considerando-se os níveis de carga obtidos e a influência do deslocamento da região de grampeamento para o meio da linha de transmissão.

Comparando-se os valores dos cabos usados com e sem grampos de suspensão, nota-se que não há uma diferença significativa entre os mesmos.

Outro ponto a ser avaliado é o grau de repetibilidade dos resultados do ensaio, principalmente pela análise das curvas “carga x deformação”, que são semelhantes, e pela proximidade de valores experimentais obtidos.

## **4.2 Ensaio de Vibração**

O ensaio de vibração ocorreu de maneira complementar ao ensaio de tração, já que o mesmo determinou o comportamento dos condutores quando tracionados. Assim sendo, o ensaio de vibração foi realizado nas amostras de condutores Oriole, em cabos usados com e sem a região de grampeamento, com um comprimento de 5m, a uma frequência de 25Hz e com uma carga constante de 2,4 tf. Nenhum corpo de prova apresentou fraturas pelos ensaios de vibração realizados. Mesmo os condutores usados na região de grampeamento passaram no teste de ensaio de vibração, ensaio este que mesmo os condutores novos devem atender. O valor constante de 2,4tf equivale a um novo valor de EDS de 30%, ou seja, o corpo de prova foi submetido a uma amplitude de vibração de 18mm até que fossem atingidos 10.000.000 ciclos.

O dimensionamento das solicitações mecânicas dos condutores em operação, antes ou após o retracionamento, é baseado nas cargas nominais de ruptura dos condutores especificadas pelo fabricante (EDS). Assim sendo, os condutores usados apresentaram os requisitos estruturais suficientes para serem retracionados 30% da sua carga de ruptura.

O ensaio de vibração foi um ensaio qualitativo, o qual avaliou o desempenho dos condutores sujeitos a vibração para simulação de vibração eólica a uma carga constante.

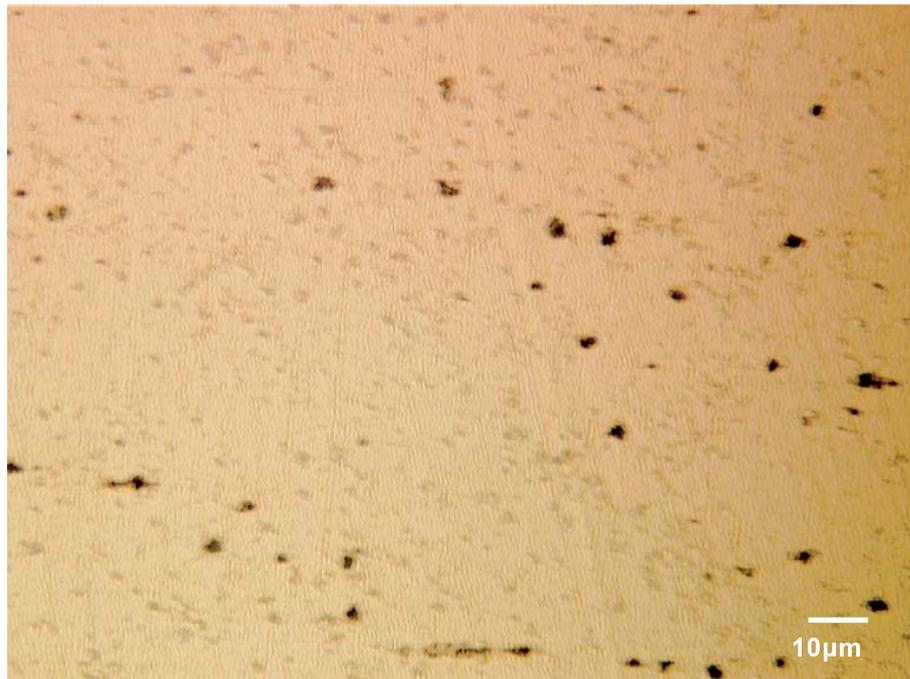
### 4.3 Caracterização Microestrutural

A análise microestrutural utilizando-se microscopia ótica foi realizada nos fios de alumínio e nos fios da alma de aço, dos cabos novos e usados com e sem a região de grampeamento.

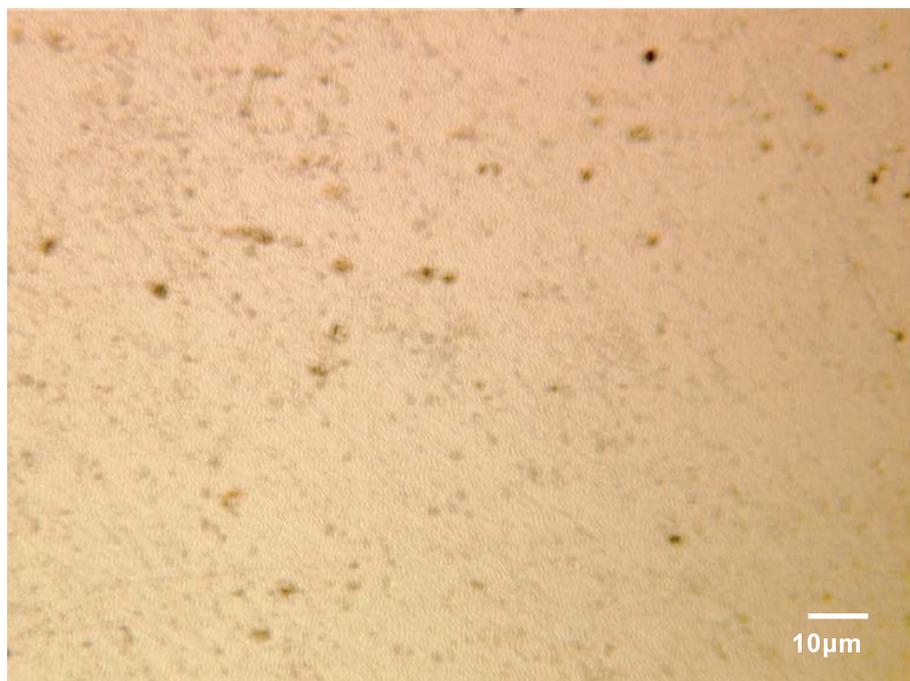
Os fios de alumínio possuem uma microestrutura com alto grau de encruamento, proveniente do processo de trefilação sem um posterior recozimento.

No entanto, como a liga de alumínio em questão é Al 1350 – H19, com alto teor de pureza, cerca de 99,5% de alumínio, a revelação dos contornos de grãos, através do ataque químico, muitas vezes é prejudicada. Com isso, não foi possível observar a microestrutura encruada do alumínio, ou seja, os grãos alongados por meio do microscópio ótico.

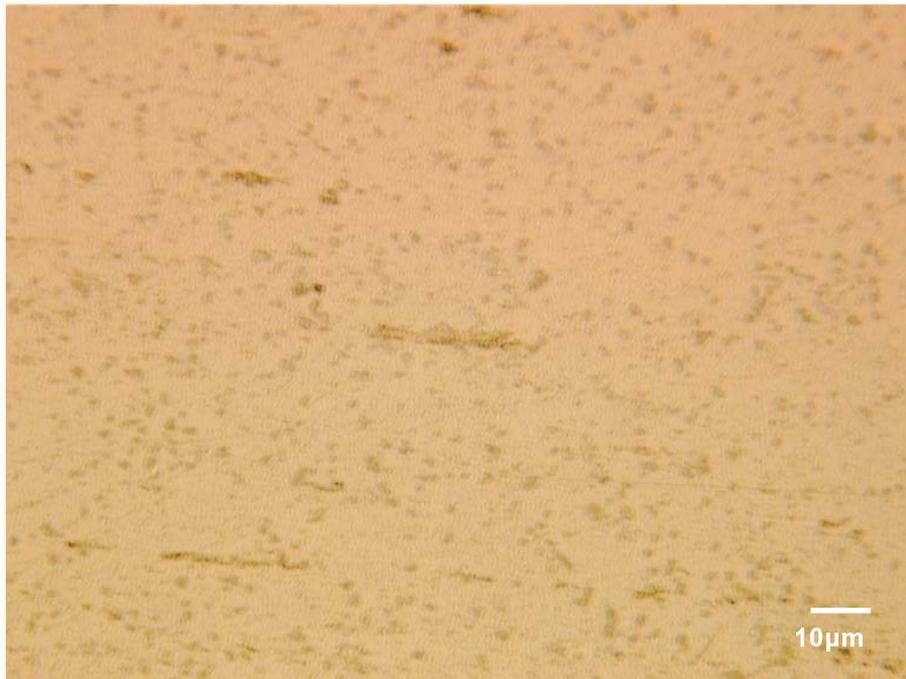
Não foi observada diferença microestrutural entre as amostras dos fios de alumínio dos cabos novos e usados com e sem a região de grampeamento, apenas nota-se a presença de pontos escuros, em maior ou menor proporção, como pode ser observado nas **figuras 4.7, 4.8 e 4.9**.



**Figura 4.7:** Microestrutura dos fios de alumínio do cabo usado sem a região de grampeamento. Seção longitudinal do fio.



**Figura 4.8:** Microestrutura dos fios de alumínio do cabo usado com a região de grampeamento. Seção longitudinal do fio.



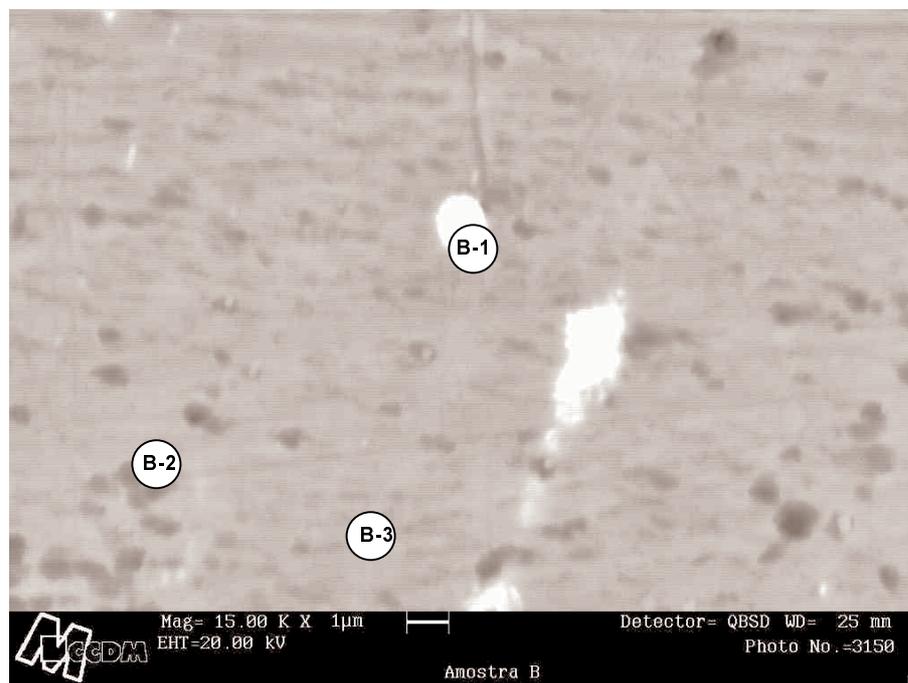
**Figura 4.9:** Microestrutura dos fios de alumínio do cabo novo. Seção longitudinal do fio.

Fazendo uma observação mais detalhada das microestruturas através do MEV, foi constatada, além dos pontos escuros, a presença também de alguns pontos mais claros.

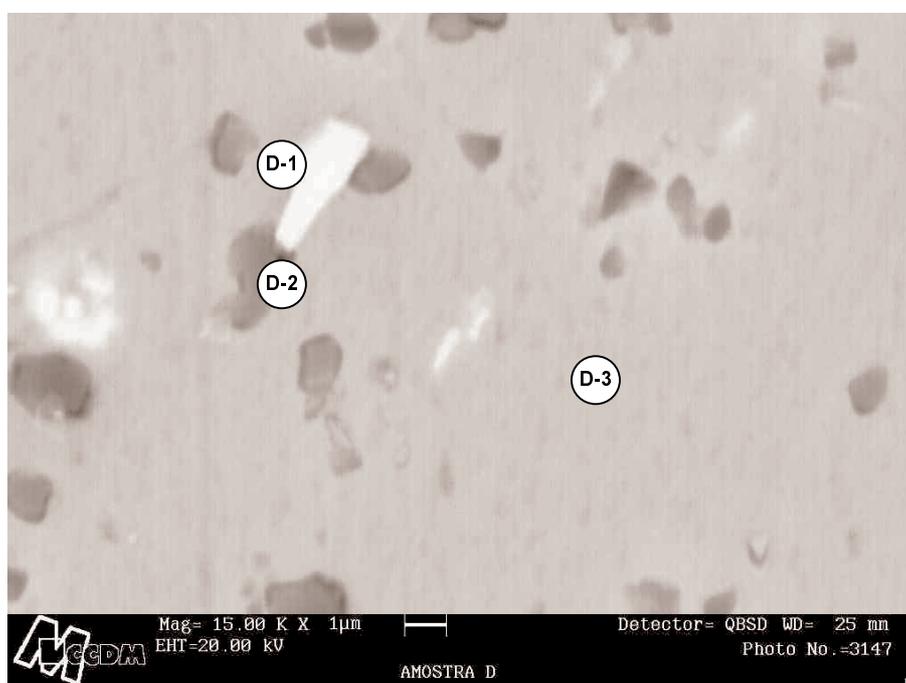
Esses pontos mais escuros ou mais claros observados podem ser decorrentes da presença de intermetálicos, como  $\text{Fe}_3\text{SiAl}_{12}$ ,  $\text{FeSiAl}_8$  (alfa),  $\text{FeSiAl}_5$  (beta) e  $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{Al}_9$ , já que o ferro atua como impureza e possui baixa solubilidade em alumínio [11].

As **figuras 4.10 e 4.11** ilustram as microestruturas das amostras dos fios dos cabos condutores usados (amostra **B**) e novos (amostra **D**) respectivamente, onde os prováveis intermetálicos (pontos mais escuros e mais claros), foram submetidos a microanálise de “Espectroscopia de Energia Dispersiva”, através do MEV. Esses pontos foram identificados como B-1 e B-2 (amostra B), D-1 e D-2 (amostra D), e as matrizes de alumínio identificadas como B-3 e D-3 (amostras B e D respectivamente).

De acordo com os resultados dessas microanálises demonstrados nas **figuras 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17**, foram identificados os elementos ferro e silício, indicando a presença de fases intermetálicas nas matrizes de alumínio dos fios, tanto nas amostras dos cabos usados como novos.



**Figura 4.10:** Microestrutura observada no MEV dos pontos escuros e claros dos fios de alumínio para o cabo usado (amostra **B**). Seção longitudinal do fio.



**Figura 4.11:** Microestrutura observada no MEV dos pontos escuros e claros dos fios de alumínio para o cabo novo (amostra **D**). Seção longitudinal do fio.

MEM1: amostra B - 1  
Livetime = 70 s

WINDOW LABEL	START keV	END keV	WIDTH CHANS	GROSS INTEGRAL	NET INTEGRAL	EFF. FACTOR	%AGE TOTAL
C K $\alpha$	.22	.30	5	59	12	1.00	.02
AlK $\alpha$	1.42	1.52	6	142711	60955	1.00	99.23
SiK $\alpha$	1.68	1.78	6	612	81	1.00	.13
AgL $\alpha$	2.92	3.04	7	711	18	1.00	.03
FeK $\alpha$	6.30	6.48	10	1102	362	1.00	.59

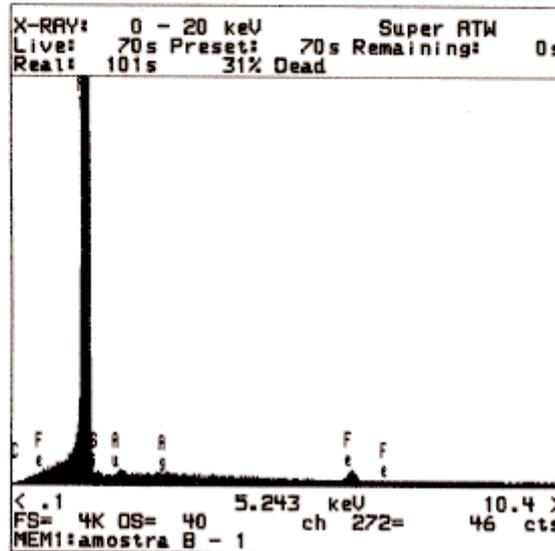


Figura 4.12: Resultado da microanálise referente ao ponto B-1 identificado na figura 4.10 (Cabo usado).

MEM1: amostra B - 2  
Livetime = 70 s

WINDOW LABEL	START keV	END keV	WIDTH CHANS	GROSS INTEGRAL	NET INTEGRAL	EFF. FACTOR	%AGE TOTAL
C K $\alpha$	.22	.30	5	46	1	1.00	.00
AlK $\alpha$	1.42	1.52	6	108830	46700	1.00	99.69
SiK $\alpha$	1.68	1.78	6	280	-2	1.00	-.00
AgL $\alpha$	2.92	3.04	7	491	57	1.00	.12
FeK $\alpha$	6.30	6.48	10	333	88	1.00	.19

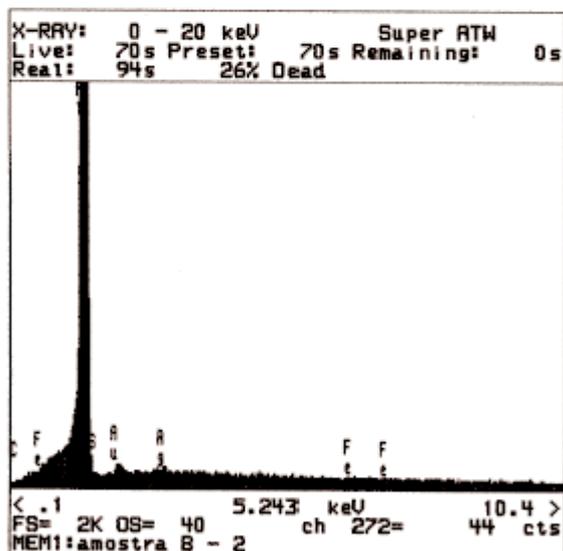


Figura 4.13: Resultado da microanálise referente ao ponto B-2 identificado na figura 4.10 (Cabo usado).

MEMI: amostra B - 3  
 Livetime = 70 s

LABEL	START keV	END keV	WIDTH CHANS	GROSS INTEGRAL	NET INTEGRAL	EFF. FACTOR	%AGE TOTAL
C K $\alpha$	.22	.30	5	71	14	1.00	.04
AlK $\alpha$	1.42	1.52	6	89814	37857	1.00	99.93
AgL $\alpha$	2.92	3.04	7	403	15	1.00	.04

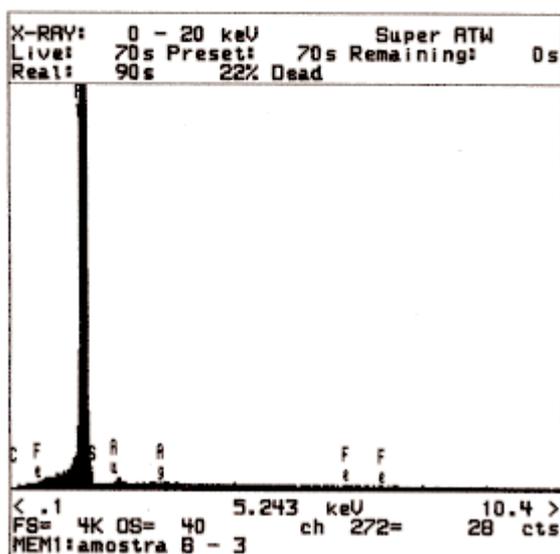


Figura 4.14: Resultado da microanálise referente ao ponto B-3 identificado na figura 4.10 (Cabo usado).

MEMI: amostra D - 1  
 Livetime = 70 s

LABEL	START keV	END keV	WIDTH CHANS	GROSS INTEGRAL	NET INTEGRAL	EFF. FACTOR	%AGE TOTAL
AlK $\alpha$	1.42	1.52	6	134117	57758	1.00	97.16
SiK $\alpha$	1.68	1.78	6	1953	585	1.00	.98
AgL $\alpha$	2.92	3.04	7	780	63	1.00	.11
FeK $\alpha$	6.30	6.48	10	2613	1038	1.00	1.75

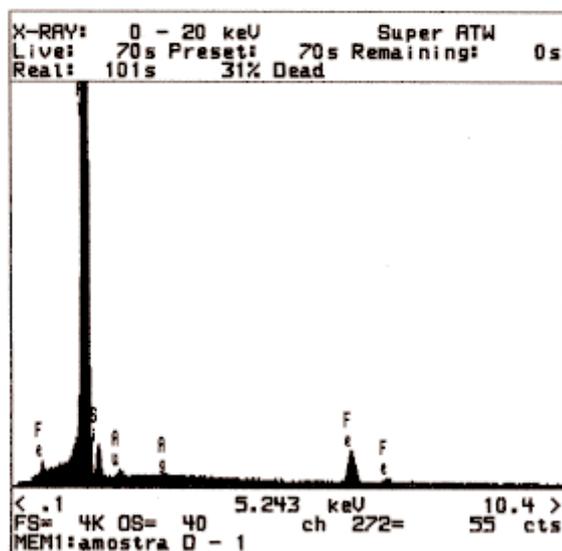


Figura 4.15: Resultado da microanálise referente ao ponto D-1 identificado na figura 4.11 (Cabo novo).

```
MEM1: amostra D - 2
Livetime = 70 s
WINDOW START      END WIDTH  GROSS  NET  EFF.  %AGE
LABEL   keV      keV CHANS  INTEGRAL  INTEGRAL  FACTOR  TOTAL
-----
```

LABEL	START keV	END keV	WIDTH CHANS	GROSS INTEGRAL	NET INTEGRAL	EFF. FACTOR	%AGE TOTAL
C Ka	.22	.30	5	291	99	1.00	.15
AlKa	1.42	1.52	6	152876	65813	1.00	99.41
SiKa	1.68	1.78	6	810	60	1.00	.09
AgLa	2.92	3.04	7	743	155	1.00	.23
FeKa	6.30	6.48	10	538	78	1.00	.12

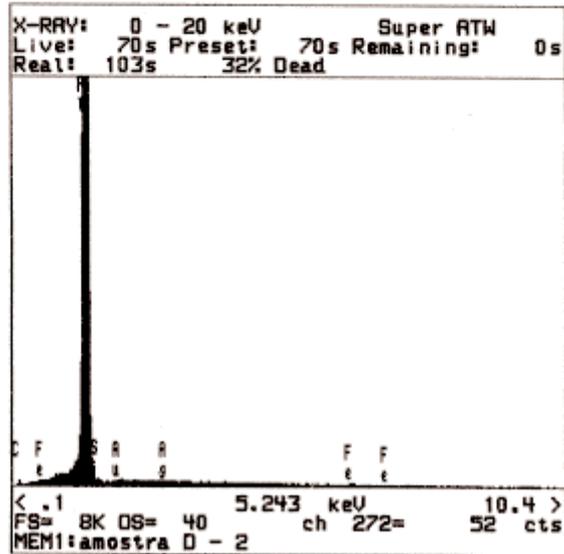


Figura 4.16: Resultado da microanálise referente ao ponto D-2 identificado na figura 4.11 (Cabo novo).

```
MEM1: amostra D - 3
Livetime = 70 s
WINDOW START      END WIDTH  GROSS  NET  EFF.  %AGE
LABEL   keV      keV CHANS  INTEGRAL  INTEGRAL  FACTOR  TOTAL
-----
```

LABEL	START keV	END keV	WIDTH CHANS	GROSS INTEGRAL	NET INTEGRAL	EFF. FACTOR	%AGE TOTAL
C Ka	.22	.30	5	77	27	1.00	.04
AlKa	1.42	1.52	6	165771	70656	1.00	99.86
SiKa	1.68	1.78	6	497	41	1.00	.06
AgLa	2.92	3.04	7	829	59	1.00	.08
FeKa	6.30	6.48	10	447	-28	1.00	-.04

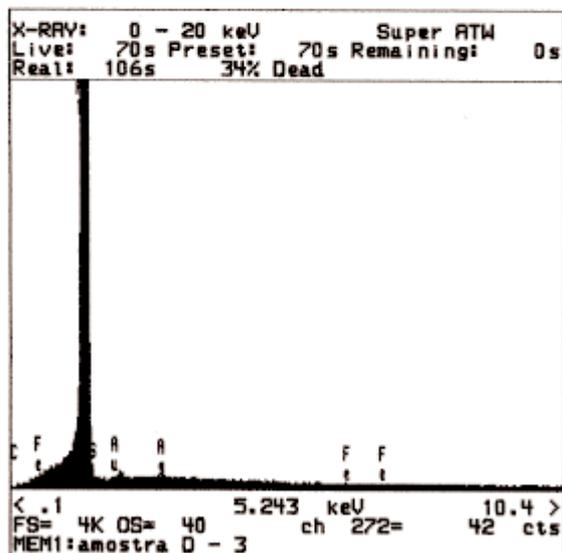
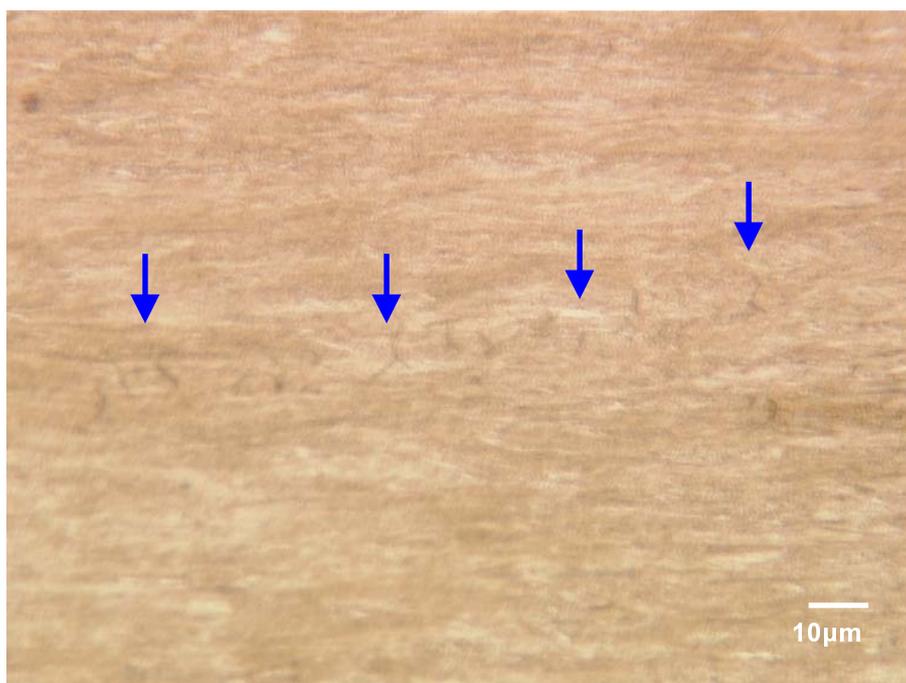


Figura 4.17: Resultado da microanálise referente ao ponto D-3 identificado na figura 4.11 (Cabo novo).

Apesar da presença dos intermetálicos na matriz de alumínio dos fios dos cabos condutores usados e novos, não houve alteração nas propriedades mecânicas, como resistência à tração e alongamento percentual.

A caracterização microestrutural dos fios da alma de aço utilizando microscopia ótica, para o condutor usado, identifica algumas microtrincas, indicadas pelas setas azuis da **figura 4.18**, provavelmente provenientes do processo de trefilação, durante a fabricação dos fios. Apesar disso, os valores de resistência à ruptura por tração dessas almas de aço, não apresentaram alterações em relação aos valores nominais.

Essa microestrutura alongada resultante do processo de trabalho à frio, também é observada na **figura 4.19**, para o aço dos fios da alma do condutor novo. Nesse caso não foi encontrada nenhuma microtrinca.



**Figura 4.18:** Microestrutura alongada do aço da alma do condutor usado. Presença de microtrincas (setas azuis) - Seção longitudinal do fio.



**Figura 4.19:** Microestrutura alongada do aço da alma do condutor novo. Seção longitudinal do fio.

Com relação ao desgaste superficial do condutor foram observadas marcas na parte interna e externa dos fios de alumínio na região de fixação dos grampos, sendo que as mesmas foram geradas pelo movimento relativo entre os fios e entre os fios e o sistema de fixação dos grampos. A **figura 4.20** ilustra a presença de marcas nos condutores Oriole.

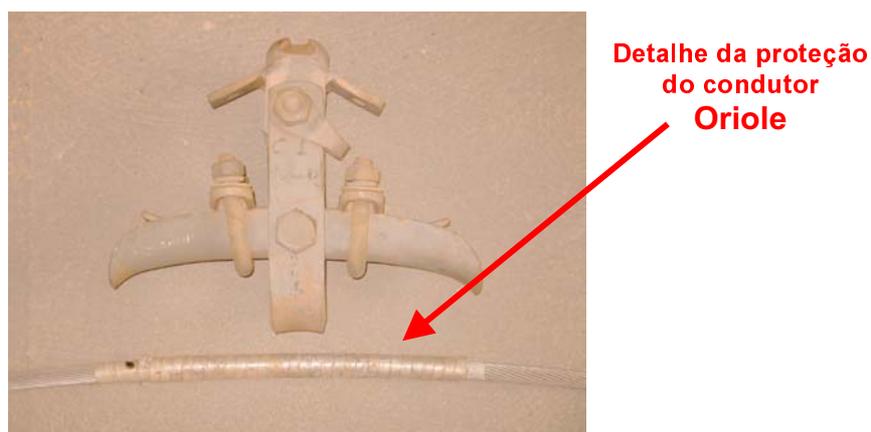


**Figura 4.20:** Marcas na superfície do condutor Oriole.

Segundo Azevedo [33] tais marcas superficiais, denominadas marcas de *fretting*, afetam consideravelmente a resistência mecânica dos condutores.

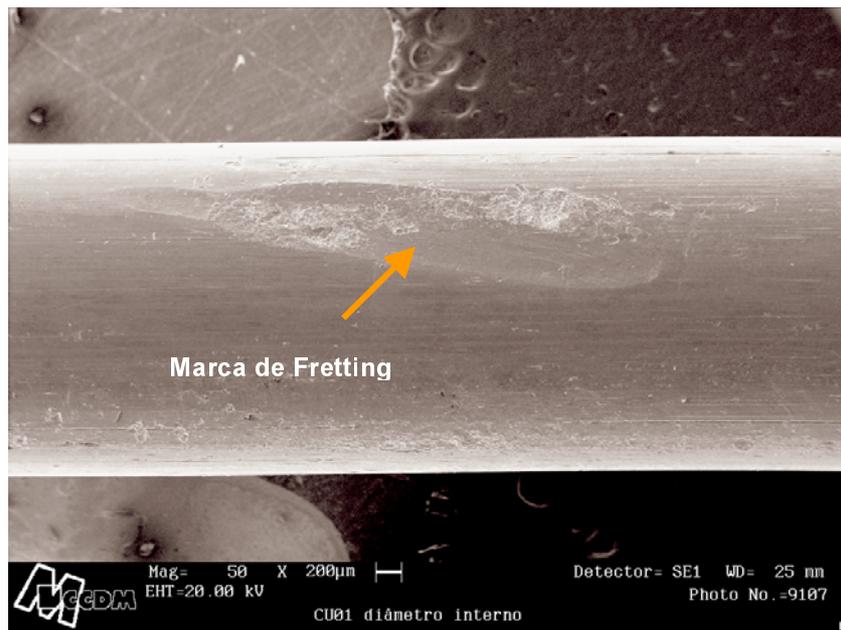
De acordo com Zhou [25] há 03 condições de contato que podem induzir a formação de marcas de *fretting*: (a) contato entre fios de alumínio de mesma ou diferentes camadas; (b) contato entre fios de alumínio e aço; (c) contato dos fios da camada externa com o grampo de fixação, sendo que a presença de marcas de *fretting* é decorrente da ação de vibração.

A **figura 4.21** apresenta a região de fixação do grampo de suspensão do condutor Oriole onde é indicada sua respectiva forma de proteção ao *fretting*, ou seja, o condutor é envolto por uma fita de alumínio antes da instalação do grampo de suspensão.

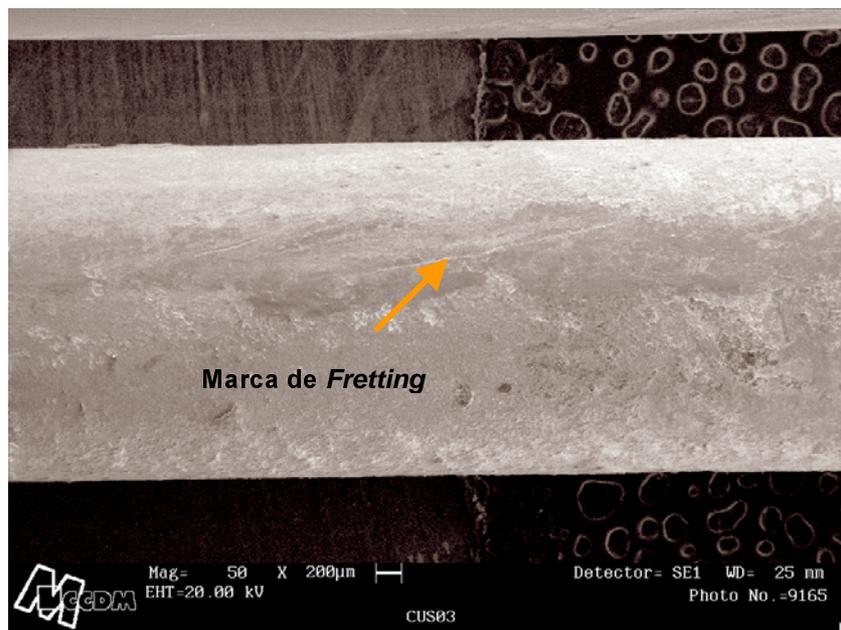


**Figura 4.21:** Região de fixação do grampo de suspensão e a proteção do condutor Oriole.

Em uma análise mais detalhada da deterioração dos condutores Oriole, na região de grampeamento, foram observadas por meio de MEV várias marcas de *fretting* nas superfícies dos fios, de alumínio e aço, em todas as camadas, como mostram as **figuras 4.22 e 4.23**.



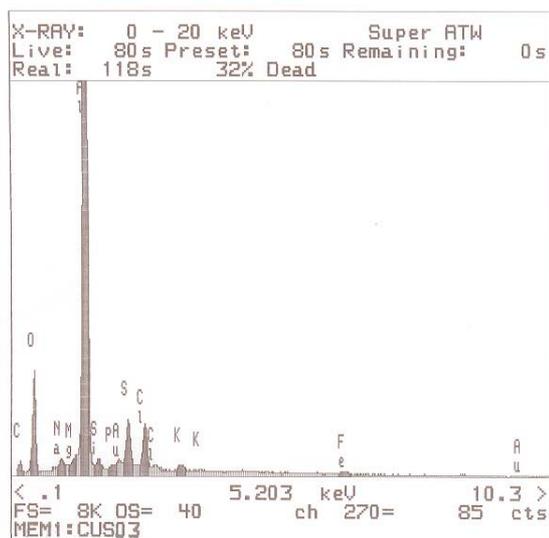
**Figura 4.22:** Marca de *fretting* para o fio de alumínio na camada intermediária.



**Figura 4.23:** Marca de *fretting* para o fio da alma de aço.

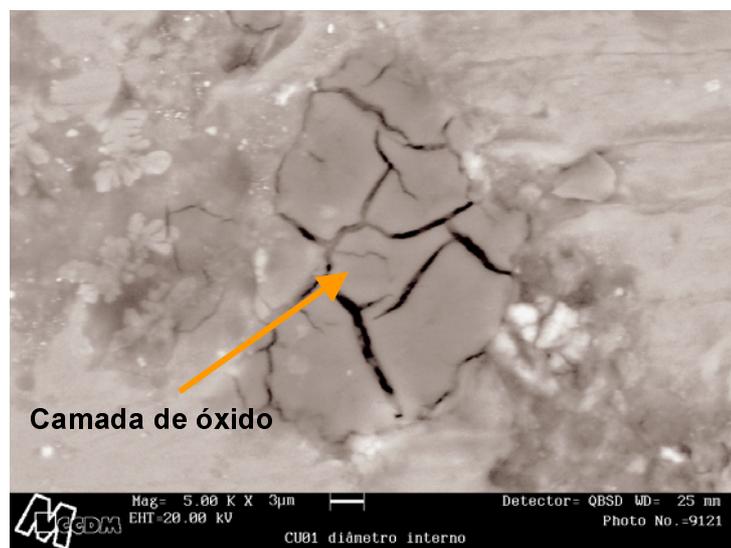
Outro ponto observado com relação à deterioração dos condutores foi a presença de compostos escuros nos fios de alumínio, que através de microanálise (**figura 4.24**) foram identificados como óxido de alumínio,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

WINDOW LABEL	START keV	END keV	WIDTH CHANS	GROSS INTEGRAL	NET INTEGRAL	EFF. FACTOR	%AGE TOTAL
C Ka	.22	.30	5	1190	238	1.00	.45
O Ka	.48	.56	5	7705	2838	1.00	5.35
NaKa	.98	1.08	6	2017	313	1.00	.59
MgKa	1.20	1.28	5	1641	19	1.00	.03
AlKa	1.42	1.52	6	105555	45195	1.00	85.17
SiKa	1.68	1.78	6	1866	360	1.00	.68
P Ka	1.94	2.06	7	1529	7	1.00	.01
S Ka	2.24	2.36	7	5956	2110	1.00	3.98
ClKa	2.54	2.66	7	5604	1485	1.00	2.80
K Ka	3.24	3.36	7	1603	228	1.00	.43
FeKa	6.30	6.48	10	993	278	1.00	.52



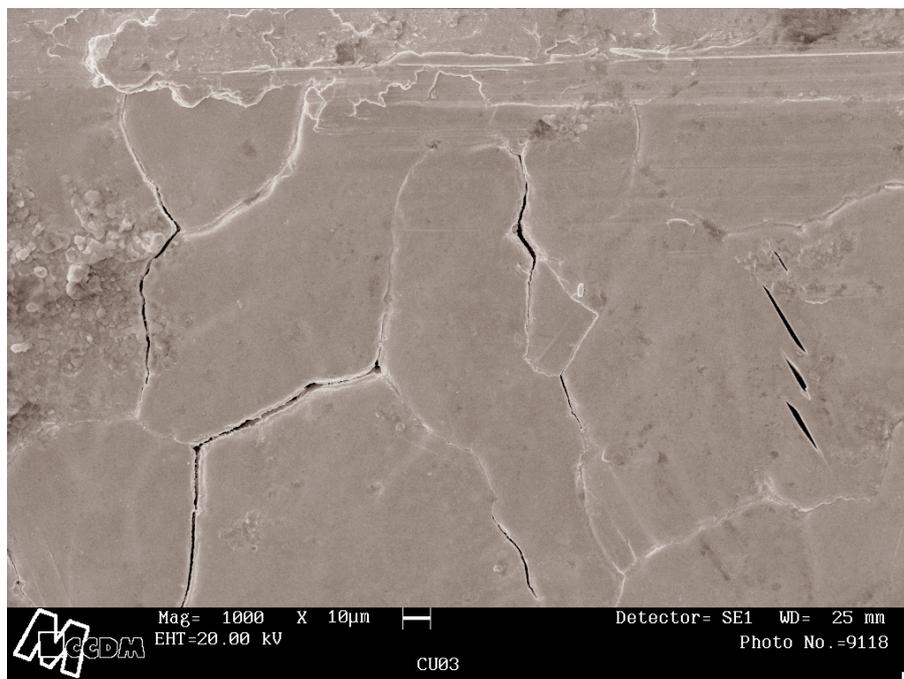
**Figura 4.24:** Resultado de microanálise para o condutor Oriole.

A presença da camada de óxido nos fios dos condutores é prejudicial à resistência mecânica dos mesmos, já que durante a ação de *fretting*, com o movimento relativo entre os fios, as partículas de óxido atuam como abrasivos aumentando o desgaste superficial dos condutores [33]. A **figura 4.25** ilustra a presença da camada de óxido nos condutores.



**Figura 4.25:** Presença de óxido no fio de alumínio – Condutor Oriole.

As caracterizações dos fios das almas de aço apresentaram comportamentos distintos. Por meio de MEV foi possível identificar nos condutores Oriole apenas fissuras nas camadas de óxidos sobre a superfície dos fios da alma de aço, como apresentado na **figura 4.26**, o que não apresentou influência nas propriedades mecânicas da alma de aço, dado que não houve uma diferença expressiva dos valores de carga de ruptura das almas de aço novas e usadas em relação aos seus valores de carga de ruptura nominal.



**Figura 4.26:** Fissuras em camada de óxido sobre a superfície dos fios da alma de aço do condutor Oriole.

A literatura indica que o *fretting* influencia em determinadas propriedades mecânicas, como a resistência à ruptura por tração e resistência à fadiga dos cabos condutores, principalmente nas regiões de grampeamento. No entanto, os resultados obtidos nas condições adotadas neste trabalho, mostraram que não.

Pode-se dizer que os defeitos encontrados, denominados “*fretting*”, são muito superficiais e não influenciam as propriedades mecânicas estáticas. No caso das dinâmicas poderia haver alguma influência, pois os defeitos

superficiais são importantes na resistência à fadiga. Este efeito, se existente, foi limitado, pois os cabos resistiram a mais de 10.000.000 de ciclos. Outra hipótese é de que o ensaio realizado não é sensível o suficiente para promover a trinca de fadiga, apesar do ensaio tentar simular as condições a que o cabo será submetido na prática, ou seja, o cabo que se encontrava submetido aos efeitos do carregamento cíclico da vibração e a restrição ao movimento imposta pelo grampo de suspensão, passará a não ter mais essa restrição ao sair da região do grampeamento, quando o mesmo for retracionado. Dessa forma, outros métodos para estudo de fadiga em cabos devem ser desenvolvidos para comprovar ou não esta hipótese. Deve-se ressaltar, no entanto, que avaliar a resistência dos cabos é bem mais complexo do que os fios individuais.

Outros efeitos que impediram a formação de trincas de fadiga podem estar presentes nos cabos analisados. Um deles seria o efeito dos fios de alumínio sofrerem deformação plástica nas primeiras solicitações e com isso seu comprimento aumentaria e nos ciclos subseqüentes a carga seria menor nos mesmos, o que aumentaria muito a vida em fadiga. Estudos mais detalhados são necessários para elucidar esta questão. Outro complicador seria que o ensaio de fadiga mais adequado seria o de controle de deformação e não o de tensão utilizado. Porém não existe uma metodologia adequada para estudar-se fadiga por controle de deformação em cabos condutores.

Além dos efeitos já citados, existem algumas condições a que os cabos estão sujeitos durante sua vida em operação nas linhas de transmissão, que podem influenciar nos resultados dos ensaios, mas que são difíceis de mensurá-los. Essas condições podem influenciar tanto na formação e magnitude dos danos superficiais aos cabos, como a formação e propagação de trincas de fadiga. Essas interferências podem ser devidas ao perfil topográfico da linha de transmissão, fazendo com que ela sofra maior ou menor influência do vento e conseqüentemente na intensidade de vibração eólica.

Deve-se considerar também a influência do próprio grampo, tanto com relação às suas características (articulações e dimensões) quanto da sua instalação, onde a intensidade dos danos causados aos fios do cabo depende do torque aplicado nos parafusos de aperto do referido grampo. Outro fator

importante é referente à utilização ou não de dispositivos de proteção ao cabo, que pode ser tanto uma fita de alumínio como a chamada armadura de proteção pré-formada, composta por fios de alumínio, onde ambas proteções são acomodadas ao redor do cabo na região em que o grampo de suspensão será fixado e que oferecem um determinado nível de proteção aos danos superficiais dos fios das camadas externas dos cabos, mas que não impedem a ocorrência de *fretting* entre os fios das camadas mais internas.

## **5 CONCLUSÕES**

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de tração e vibração, nas análises microestruturais e observações das superfícies dos fios ensaiados, e considerando que as amostras utilizadas nos ensaios foram retiradas de uma linha de transmissão que se encontra em operação há aproximadamente 35 anos e portanto está sujeita a alguns dos diversos efeitos citados neste trabalho, pode-se afirmar que o processo de alteamento através do retracionamento dos cabos é possível e viável, permitindo-se assim a reforma dessa linha de transmissão estudada, sem a necessidade de substituição dos cabos condutores.



## **6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS**

Realização de ensaio de fadiga em amostras de cabos novos e usados, utilizando vários tipos de grampos de suspensão, resultando no levantamento de curvas de fadiga S-N e proporcionando a verificação da influência dos grampos na resistência à fadiga dos condutores.

Realização de ensaios de tração, vibração e fadiga em amostras de condutores novos e usados, submetendo-os simultaneamente a um desses ensaios e à elevação de temperatura (picos), simulando situações que possam ocorrer nas linhas de transmissão, como por exemplo, o aumento de carregamento elétrico ou curto-circuito. Com isso, será possível verificar a influência da temperatura nas propriedades mecânicas em resposta aos ensaios impostos.



## 7 REFERÊNCIAS

- [1] VERBAND DEUTSCHER ELECTROTECHNIKER. **VDE-210**: normas para construção de linhas de alta tensão, Alemanha, 1962. 122 p.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR-5422**: projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica: procedimento. Rio de Janeiro, 1985. 52 p.
- [3] RAMEY, G. E.; SILVA, J. M. **An experimental evaluation of conductor aeolian fatigue damages mitigation by amplitude reduction**. In: IEEE PES Summer Meeting, 1981, Portland. Anais...Portland: IEEE, 1981. p. 1-6.
- [4] FUCHS, R. D.; ALMEIDA, M. T. **Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão**. 1. ed. Itajubá: Edgard Blücher, 1982. 256 p.
- [5] ANAUATE, S. **Curso de projeto e construção de linhas de transmissão**. São Paulo: USP/Departamento de Engenharia, 1999. 61 p. Notas de Aula.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7270**: cabos de alumínio com alma de aço para linhas aéreas: especificação. Rio de Janeiro, 1988. 21 p.
- [7] ALCAN ALUMÍNIO DO BRASIL S/A. **Liga de alumínio 6201**: linhas aéreas de transmissão. São Paulo. 10 p.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7103**: vergalhão de alumínio 1350 para fins elétricos: especificação. Rio de Janeiro, 1981. 5 p.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6834**: alumínio e suas ligas: classificação. Rio de Janeiro, 2000. 31 p.
- [10] INFOMET. **Informações britadas, fundidas e laminadas**. Disponível em: <<http://www.infomet.com.br>>. Acesso em: 28 abr. 2004.
- [11] AMERICAN SOCIETY OF MATERIALS. **ASM Handbook**: metallography and microstructures. Cleveland, 1993. v. 9.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6835**: alumínio e suas ligas: classificação das têmperas. Rio de Janeiro, 2000. 6 p.

- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5118**: fios de alumínio nus de seção circular para fins elétricos: especificação. Rio de Janeiro, 1985. 7 p.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6756**: fios de aço zincados para alma de cabos de alumínio e alumínio liga: especificação. Rio de Janeiro, 1987. 6 p.
- [15] CASTILHO, I.C.; SANGLARD, M.; REWAGEN, B. **Determinação de curva de fadiga em cabo CAA 336,4MCM Linnet**. In: Seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica, 15., 1999, Foz do Iguaçu. Anais...Foz do Iguaçu: SNPTE, 1999. p. 1-6.
- [16] DOOCY, E.S.; HARD, A. R. Introduction. In: Electric power research institute (Org.). **Transmission Line Reference Book: wind Induced Conductor Motion**. Palo Alto: EPRI, 1979. p. 1-50.
- [17] PRESTON, B.; RAMEY, G. E. Effect of suspension clamp geometry on transmission line fatigue. **Journal of Energy Engineering**, Auburn, v. 112, n. 3, p. 168-184, 1986.
- [18] RAMEY, G. E.; TOWNSEND, J. S. Effects of clamps on fatigue of acsr conductors. **Journal of Energy Division**, Auburn, v. 107, n. EY1, p. 103-119, 1981.
- [19] SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**: fundamentos teóricos e práticos. 5. ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1982. 286 p.
- [20] DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1981. 653 p.
- [21] GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 247 p.
- [22] LINDLEY, T. C. Fretting fatigue in engineering alloys. **Int. Journal Fatigue**, London, v. 19, n. 1, p. S39-S49, 1997.
- [23] RAWLINS, C. B. Fatigue of overhead conductors. In: Electric Power Research Institute (Org.). **Transmission line reference book: wind Induced Conductor Motion**. Palo Alto: EPRI, 1980. p. 51-81.

- [24] FERREIRA, J. L. A.; ARAÚJO, J. A. **Estudo experimental da ruptura de cabos de transmissão de energia devido a fadiga**. Brasília: UnB/Departamento de Engenharia Mecânica, 2004. 6 p. Relatório 1.
- [25] ZHOU, Z. R. et al. Fundamental investigations of electrical conductor fretting fatigue. **Tribology International**, Chengdu, v. 29, n. 3, p. 221-232, 1996.
- [26] Recommendations for the evaluation of the lifetime of transmission line conductors. *Electra*, Paris, n. 63, p. 103-145, 1979.
- [27] CALLISTER Jr.; WILLIAM D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589 p.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7272**: condutor elétrico de alumínio: ruptura e característica dimensional. Rio de Janeiro, 1982. 2 p.
- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7302**: condutores elétricos de alumínio - tensão-deformação em condutores de alumínio: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1982. 7 p.
- [30] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8158**: ferragens para redes aéreas urbanas e rurais de distribuição de energia elétrica: especificação. Rio de Janeiro, 1990. 24 p.
- [31] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7430**: manuseio e lançamento de cabos caa em linhas de transmissão de energia elétrica: procedimento. Rio de Janeiro, 1982. 13 p.
- [32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7273**: condutor elétrico de alumínio: retirada e preparo de corpo de prova para ensaio de tipo – procedimento. Rio de Janeiro, 1982. 4 p.
- [33] AZEVEDO, C. R. F.; CESCO, T. Failure analysis of cable steel reinforced (acsr) conductor of the transmission line crossing the parana river engineering failure analysis. **Engineering failure analysis**, São Paulo, n. 9, p. 645-664, 2002.