



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL DE CABOS CONDUTORES DE
ALUMÍNIO COM ALMA DE AÇO UTILIZADOS EM LINHAS
AÉREAS DE SUBTRANSMISSÃO E TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

BELINE QUINTINO DE ARAÚJO FONSECA

Belo Horizonte, 14 de outubro de 2009

Beline Quintino de Araújo Fonseca

**AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL DE CABOS CONDUTORES DE
ALUMÍNIO COM ALMA DE AÇO UTILIZADOS EM LINHAS
AÉREAS DE SUBTRANSMISSÃO E TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Projeto Mecânico

Orientador: Prof. Carlos Alberto Cimini Júnior, PhD

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2009

DEDICATÓRIA

A minha mãe, que nos deu durante toda sua vida seu carinho, sua compreensão, seu incentivo, sua fé e exemplo de vida.

E acima de tudo a Deus.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário
31270-901 - Belo Horizonte - MG
Tel. : +55 31 3499.5145, Fax: +55 31 3443.3783
E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**"AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL DE CABOS CONDUTORES DE
ALUMÍNIO COM ALMA DE AÇO UTILIZADOS EM LINHAS
AÉREAS DE SUBTRANSMISSÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA"**

BELINE QUINTINO DE ARAÚJO FONSECA

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Doutor em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Projeto Mecânico**".

Tese aprovada em: 06 de março de 2009.

Por

PROF. CARLOS ALBERTO CIMINI JUNIOR

Orientador - Ph.D., Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG

PROF. ALEXANDRE QUEIROZ BRACARENSE

Examinador - Ph.D., Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG

DOUTOR TANIS RODRIGUES MANSUR

Examinador - Doutor, Comissão Nacional de Energia Nuclear, MG

PROF. ERNANI SALES PALMA

Examinador - Doutor, Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG

PROF. RUY CARLOS RAMOS DE MENEZES

Examinador - Doutor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS

AGRADECIMENTOS

À Cemig Distribuição S.A. pela oportunidade de crescimento profissional e pessoal a mim dispensada durante o período de doutorando.

À Universidade Federal de Minas Gerais, especialmente ao Departamento de Engenharia Mecânica através de seus Professores e Funcionários, pela oportunidade de aprendizagem e renovação de conceitos, por possibilitar o convívio com pessoas de outras áreas e o retorno à linguagem acadêmica e pela disposição de compartilhar conhecimentos.

Ao meu orientador, Prof. Carlos Alberto Cimini Junior, cujos ensinamento e incentivo me propiciaram novas perspectivas profissionais.

À banca examinadora pela indispensável contribuição para aperfeiçoamento deste trabalho.

À minha família, Benedito Araújo, meu pai, Beraldo, meu irmão, Penha, minha irmã, e especialmente à minha esposa, Karina, e meus filhos Mariana, Gabriel e Laura pelo incentivo e atenção a mim dedicados durante esta etapa de minha vida.

Meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE GRÁFICOS.....	13
LISTA DE QUADROS.....	14
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	18
LISTA DE NOMENCLATURAS.....	19
1 INTRODUÇÃO	25
1.1 Classificação das linhas aéreas para transporte de energia elétrica.....	25
1.1.1 Linha aérea de subtransmissão de energia elétrica.....	25
1.1.2 Linha aérea de transmissão de energia elétrica.....	25
1.2 Linha de transmissão de energia elétrica	26
1.2.1 Cabo condutor de energia e seus acessórios.....	26
1.2.2 Cabo pára-raios e seus acessórios	27
1.2.3 Estruturas e suas fundações	28
1.2.4 Cadeias de isoladores e suas ferragens	29
1.2.5 Sistema de aterramento	30
1.2.6 Acessórios diversos	30
1.3 Definição de vida útil.....	31
1.4 Proposição	31
1.5 Objetivo	32
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	34
2.1 Transmissão de energia elétrica.....	34
2.2 Cabos condutores de Alumínio	35
2.2.1 Classificação do Alumínio e suas ligas.....	36
2.2.2 Sistema de classificação do Alumínio e ligas de Alumínio dúcteis.....	37
2.2.3 Tratamentos térmicos	38
2.2.4 Designações para Têmperas	39

2.2.5	Processos de fabricação de fios condutores.....	39
2.3	Cabo de Alumínio com alma de Aço - CAA.....	42
2.3.1	Composição química	44
2.3.2	Propriedades físicas.....	47
2.4	Critérios de limite de resistência mecânica dos cabos condutores utilizados para projeto de Linha de Transmissão.....	51
2.4.1	Limites utilizados nos projetos de linha de transmissão na CEMIG.....	52
2.4.2	Comparação do valor de carga máxima alcançada e valores das propriedades mecânicas.....	53
2.4.3	Fluência metalúrgica – creep utilizada.....	54
2.5	Vida útil de cabos condutores.....	54
2.6	Vida útil em função da fadiga devido à vibração eólica	55
2.6.1	Influência da topografia e do regime dos ventos	58
2.6.2	Influência das características da Linha de Transmissão	59
2.6.3	Resistência à Fadiga dos cabos condutores	60
2.7	Vida útil em função da temperatura de operação	70
2.7.1	Temperatura de operação.....	70
2.7.2	Redução de seção transversal dos fios	71
2.7.3	Perda de resistência mecânica de fios individuais de Alumínio em função da temperatura.....	72
2.7.4	Perda de resistência a tração do cabo condutor	74
2.7.5	Modelo de Harvey	74
2.7.6	Modelo de Morgan	75
2.8	Estado da arte atual sobre estimativa de vida útil de cabos condutores.....	77
3	METODOLOGIA	80
3.1	Realização de ensaios em laboratório.....	81
3.1.1	Análise Química.....	81
3.1.2	Ensaio de Tração.....	83

3.1.3	Ensaio de Dureza	88
3.1.4	Ensaio de resistência elétrica em corrente contínua	89
3.1.5	Experimento realizado - Variação da temperatura em função do rompimento de fios externos em cabos condutores	90
3.2	Desenvolvimento da ferramenta computacional	95
3.2.1	Premissas	95
3.2.2	Banco de dados desenvolvido para Linha de Transmissão	97
3.2.3	Banco de dados desenvolvido para características ambientais da região atravessada pela Linha de Transmissão	99
3.2.4	Modelo matemático incorporado a ferramenta computacional.....	100
3.2.5	Armazenamento dos resultados	107
3.2.6	Validação do banco de dados	108
3.2.7	Simulação computacional com dados de projeto e de operação das LT para cálculo da vida útil.....	109
3.2.8	Validação da ferramenta computacional para cálculo da vida útil de cabos condutores	109
3.3	Desenvolvimento de metodologia para manutenção preditiva de cabos condutores	109
3.3.1	Definição do intervalo de tempo para inspeção preditiva	110
3.3.2	Dados para cálculo do intervalo de tempo para inspeção termográfica	111
3.4	Inspeção Baseada em Risco – IBR	115
3.4.1	Modelo de aplicação da inspeção baseada em risco para LT	116
3.4.2	Metodologia desenvolvida.....	117
4	RESULTADOS	124
4.1	Ensaio realizados em laboratório	124
4.1.1	Análise química.....	124
4.1.2	Ensaio de Tração.....	125
4.1.3	Ensaio de Dureza	138
4.1.4	Ensaio de Resistência Elétrica	140

4.1.5	Variação da temperatura em função do rompimento de fios externos em cabos condutores	140
4.1.6	Resultado do cálculo da vida útil dos cabos condutores utilizando ferramenta computacional desenvolvida	144
4.1.7	Resultado do cálculo do perfil térmico do cabo condutor Penguin	153
4.1.8	Resultado da Inspeção Baseada em Risco.....	153
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	157
5.1	Ensaio realizado em laboratório	157
5.1.1	Cabo novo – Linnet - Código da amostra 8.....	157
5.1.2	LT Pirapora - Montes Claros, 138 kV – Código da amostra 3	159
5.1.3	LT Mariana – Timbopeba, 138 kV - Código da amostra 5	161
5.1.4	LT Barão de Cocais – Caeté, 69 kV - Código da amostra 6	163
5.1.5	LT Sete Lagoas 3 – Cominci, 138 kV - Código da amostra 7.....	165
5.1.6	Cabo novo – Penguin – Código da amostra 9	168
5.1.7	LT Várzea da Palma - Pirapora, 69 kV - Código da amostra 4.....	170
5.2	Variação da temperatura em função do rompimento de fios externos em cabos condutores	172
5.2.1	Análise dos valores de temperatura calculados por Morgan e a média calculada para cada etapa do ensaio.....	172
5.3	Resultado da Inspeção Baseada em Risco.....	173
6	CONCLUSÕES	174
6.1	Correlação entre os diversos ensaios realizados em laboratório	174
6.2	Estimativa da perda de vida útil de cabos condutores – ferramenta computacional	174
6.3	Variação da temperatura em função do rompimento de fios externos em cabos condutores	176
6.4	Resultado da Inspeção Baseada em Risco.....	176
7	SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE	178
	ABSTRACT	179

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 179

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. 1 – Cabo Condutor	26
FIGURA 1. 2 – Cabo pára-raios (a), condutor (b) e espaçador-amortecedor (c)	27
FIGURA 1. 3 – Cabo pára-raios (a), amortecedor (b) e esfera de sinalização (c)	27
FIGURA 1. 4 – Estrutura de suspensão	28
FIGURA 1. 5 – Estrutura de ancoragem	28
FIGURA 1. 6 – Fundação tipo tubulão	29
FIGURA 1. 7 – Cadeia de isoladores	30
FIGURA 2. 1 – Representação de um vão de uma linha de transmissão	35
FIGURA 2. 2 – Diâmetro nominal do cabo condutor	36
FIGURA 2. 3 – Composições de cabos condutores CAA	43
FIGURA 2. 4 – Curva teórica mostrando limite de escoamento	47
FIGURA 2. 5 – Curva de fluência típica de um metal	49
FIGURA 2. 6 – Formação de vórtices próximo ao condutor	56
FIGURA 2. 7 – Onda estacionária.....	57
FIGURA 2. 8 – Amplitudes máximas de vibração pico a pico (yb)	57
FIGURA 2. 9 – Forma de onda de vibração-batimento com 2 frequências	58
FIGURA 2. 10 – Forma de onda de vibração-batimento com mais de 2 frequências	58
FIGURA 2. 11 – Variação do comprimento de meia-onda (L) com o aumento da tração	60
FIGURA 2. 12 – Danos por fadiga em linhas aéreas de transmissão	61
FIGURA 2. 13 – Variação da tensão dinâmica ao longo do cabo condutor	62
FIGURA 2. 14 – Tensão dinâmica em função do EDS e do diâmetro do condutor	64
FIGURA 2. 15 – Resultados de ensaios compilados pelo CIGRÉ	65
FIGURA 2. 16 – Curva de fadiga obtida no ensaio comparada com a “Safe Border Line” da CIGRÉ	67
FIGURA 2. 17 – Método de cálculo para determinar a vida útil de cabos condutores	69
FIGURA 2. 18 – Curva de ciclos acumulados	70
FIGURA 2. 19 – Relação tempo-temperatura para perda resistência do fio de Alumínio 1350-H19	73

FIGURA 3. 1 – Corpos de prova para análise química	82
FIGURA 3. 2 – Legenda das amostras de cabo condutor utilizadas	84
FIGURA 3. 3 – Máquina de ensaio utilizada nos ensaios de tração e conjunto completo de fixação dos cabos Penguin e Linnet	85
FIGURA 3. 4 - Garra utilizada para ensaio dos fios do cabo Penguin	85
FIGURA 3. 5 - Garra Utilizada Para ensaio dos fios de Alumínio e de aço do cabo Linnet	86
FIGURA 3. 6 – Fratura de um fio de aço do cabo Penguin	86
FIGURA 3. 7 – Conjunto inicial de fixação da amostra do cabo condutor	87
FIGURA 3. 8 – Conjunto inicial de fixação da amostra do cabo condutor	87
FIGURA 3. 9 - Posição dos ensaios realizados em uma dada amostra	88
FIGURA 3. 10 – Circuito de teste utilizado nos ensaios de resistência elétrica	90
FIGURA 3. 11 – Seção de ruptura dos fios de Alumínio e indicação dos termopares	92
FIGURA 3. 12 – Seção de ruptura dos fios de Alumínio e indicação dos termopares	92
FIGURA 3. 13 – Diagrama elétrico do circuito de teste	93
FIGURA 3. 14 – Fixação dos termopares	94
FIGURA 3. 15 – Tela inicial da ferramenta computacional	96
FIGURA 3. 16 – Funções relativas à área de manutenção	96
FIGURA 3. 17 – Funções para cálculos específicos de temperatura, perfil térmico e resistência mecânica	97
FIGURA 3. 18 – Ponto quente detectado durante inspeção termográfica	106
FIGURA 3. 19 – Resultado da análise de quebra de fios	107
FIGURA 3. 20 – Fluxograma da validação do banco de dados	108
FIGURA 3. 21 – Equipamento de inspeção termográfica	112
FIGURA 3. 22 – Radiografia de um condutor com a alma de aço rompida	113
FIGURA 3. 23 – Fluxograma da metodologia de manutenção preventiva	115
FIGURA 4. 1 – Cabo com 01 fio de Alumínio rompido	141
FIGURA 4. 2 – Situação da fixação após corte do 5° fio	141
FIGURA 4. 3 – Situação da fixação e do fio de aço após corte do 6° fio	142
FIGURA 4. 4 – Resultado do cálculo de vida útil LT Pirapora – Montes Claros	146
FIGURA 4. 5 – Resultado do cálculo de vida útil LT Caeté – Barão de Cocais	147
FIGURA 4. 6 – Resultado do cálculo da vida útil LT Sete Lagoas 3 – Cominci	149
FIGURA 4. 7 – Condutor da LT S.Lagoas 3 – Cominci utilizado nos ensaios	149

FIGURA 4. 8 – Resultado da simulação da vida útil LT S.Lagoas 3 – Cominci para velocidade de vento igual a zero	151
FIGURA 4. 9 – Resultado do cálculo de vida útil LT Várzea da Palma – Pirapora	152
FIGURA 4. 10 – Perfil térmico do cabo condutor Penguin	153
FIGURA 4. 11 – Matriz de risco 69 kV	155
FIGURA 4. 12 – Matriz de risco 138 kV	155

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 4. 1 – Tempo versus Temperatura de todos os termopares ao longo do ensaio	143
GRÁFICO 4. 2 – Temperaturas máximas de cada etapa até o rompimento do 5° fio de Alumínio	144
GRÁFICO 4. 3 – Histórico térmico LT Pirapora – Montes Claros no período de 04/2006 à 11/2008	145
GRÁFICO 4. 4 – Histórico térmico LT Caeté – Barão de Cocais no período de 07/2000 à 12/2004	147
GRÁFICO 4. 5 – Histórico térmico LT Sete Lagoas 3 – Cominci no período de 01/2002 à 12/2003	148
GRÁFICO 4. 6 – Comparativo entre históricos térmicos calculados com resist. elétrica CC nominal e medida	148
GRÁFICO 4. 7 – Simulação do histórico térmico LT Sete Lagoas 3 – Cominci no período de 01/2002 à 12/2003 para velocidade de vento igual a zero	150
GRÁFICO 4. 8 – Histórico térmico LT Várzea da Palma – Pirapora no período de 04/2006 à 11/2008	152
GRÁFICO 5. 1 – Diferença entre temperatura calculada por Morgan e medida pelos termopares	173

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2. 1 - Principais elementos de liga – materiais dúteis.....	37
QUADRO 2. 2 - Composição química do Alumínio 1350.....	46
QUADRO 2. 3 - Limites dos elementos componentes do fio de Aço.....	46
QUADRO 2. 4 - Propriedades mecânicas dos fios de Alumínio 1350, aço galvanizado e cabos condutores Penguin e Linnet – Parte 1.....	50
QUADRO 2. 5 - Propriedades mecânicas dos fios de Alumínio 1350, aço galvanizado e cabos condutores Penguin e Linnet – Parte 2.....	50
QUADRO 2. 6 - Propriedades térmicas do fio de Alumínio 1350, fio de aço galvanizado e cabos condutores Penguin e Linnet.....	51
QUADRO 2. 7 - Propriedades elétricas do fio de Alumínio 1350, fio de aço galvanizado e cabos condutores Penguin e Linnet.....	51
QUADRO 2. 8 - Valores de carga utilizados nos projetos de linha de transmissão da CEMIG....	53
QUADRO 2. 9 - Comparação entre os valores de projetos de LT e propriedades mecânicas dos cabos condutores.....	53
QUADRO 2. 10 - Movimentos induzidos pelo vento.....	55
QUADRO 2. 11 - Classificação do terreno conforme IEC.....	59
QUADRO 2. 12 - Classificação do terreno conforme IEC.....	66
QUADRO 2. 13 - Constantes utilizadas nas equações.....	76
QUADRO 3. 1 - Identificação das LT onde foram retiradas amostras	80
QUADRO 3. 2 - Identificação das LT onde foram retiradas amostras e tipo de cabo condutor..	81
QUADRO 3. 3 - Dados nominais dos fios de Alumínio e de aço	83
QUADRO 3. 4 - Dados nominais dos cabos condutores.....	83
QUADRO 3. 5 - Motivo de rejeição dos ensaios realizados	84
QUADRO 3. 6 - Variáveis da instrumentação	91
QUADRO 3. 7 - Histórico do carregamento elétrico da LT Sete Lagoas 3 – Cominci, 138 kV ..	98
QUADRO 3. 8 - Características ambientais de região próxima à LT Sete Lagoas 3 – Cominci	100
QUADRO 3. 9 - Fatores para obtenção da RMC do cabo completo.....	103
QUADRO 3. 10 - Par temperatura versus tempo de exposição da LT Sete Lagoas 3 – Cominci, 138 kV.....	104

QUADRO 3. 11 - Extensão e características das LT de 69 e 138 kV	116
QUADRO 3. 12 - Lista de Códigos de ocorrências nas LT	117
QUADRO 3. 13 - Sistemas, conjuntos e componentes de LT	118
QUADRO 3. 14 - Ocorrências nas LT	119
QUADRO 3. 15 - Componentes que mais falharam nas LT	119
QUADRO 3. 16 - Ocorrências nas LT de 69 e 138kV	120
QUADRO 3. 17 - Níveis de Frequência de Ocorrência de Falhas – FOF	122
QUADRO 3. 18 - Níveis de Conseqüência de Ocorrência de Falhas – COF	123
QUADRO 4. 1 - Análise dos componentes dos fios de aço	124
QUADRO 4. 2 - Análise dos componentes dos fios de Alumínio	125
QUADRO 4. 3 - Resultados dos ensaios de tração para os fios de aço para o condutor Linnet novo	125
QUADRO 4. 4 - Resultados dos ensaios de tração para os fios de Alumínio para o condutor Linnet novo	126
QUADRO 4. 5 - Resultados dos ensaios de tração para o cabo condutor Linnet novo	126
QUADRO 4. 6 - Resultados dos ensaios de tração para os fios de aço para o condutor da LT Pirapora - Montes Claros	127
QUADRO 4. 7 - Resultados dos ensaios de tração para os fios de Alumínio para o condutor da LT Pirapora - Montes Claros	128
QUADRO 4. 8 - Resultados dos ensaios de tração para o cabo condutor da LT Pirapora - Montes Claros	128
QUADRO 4. 9 - Resultados dos ensaios de tração para os fios de aço para o condutor da LT Mariana - Timbopeba	129
QUADRO 4. 10 - Resultados dos ensaios de tração para os fios de Alumínio para o condutor da LT Mariana – Timbopeba	130
QUADRO 4. 11 - Resultados dos ensaios de tração para o cabo condutor da LT Mariana – Timbopeba	130
QUADRO 4. 12 - Resultados dos ensaios de tração para os fios de aço para o condutor da LT Barão de Cocais - Caeté	131
QUADRO 4. 13 - Resultados dos ensaios de tração para os fios de Alumínio para o condutor da LT Barão de Cocais - Caeté	132

QUADRO 4. 14 - Resultados dos ensaios de tração para o cabo condutor da LT Barão de Cocais – Caeté	132
QUADRO 4. 15 - Resultados dos ensaios de tração para os fios de aço para o condutor da LT Sete Lagoas 3 - Cominci	133
QUADRO 4. 16 - Resultados dos ensaios de tração para os fios de Alumínio para o condutor da LT Sete Lagoas 3 – Cominci	134
QUADRO 4. 17 - Resultados dos ensaios de tração para o cabo condutor da LT Sete Lagoas 3 – Cominci.....	134
QUADRO 4. 18 - Resultados dos ensaios de tração para os fios de aço para o condutor Penguin novo	135
QUADRO 4. 19 - Resultados dos ensaios de tração para os fios de Alumínio para o condutor Penguin novo	135
QUADRO 4. 20 - Resultados dos ensaios de tração para o cabo condutor Penguin novo.....	136
QUADRO 4. 21 - Resultados dos ensaios de tração para os fios de aço para o condutor LT Várzea da Palma – Pirapora.....	136
QUADRO 4. 22 - Resultados dos ensaios de tração para os fios de Alumínio para o condutor LT Várzea da Palma - Pirapora	137
QUADRO 4.23 - Resultados dos ensaios de tração para o cabo condutor da LT Várzea da Palma – Pirapora.....	137
QUADRO 4. 24 - Resultados dos ensaios de dureza dos fios de aço.....	138
QUADRO 4. 25 - Resultados dos ensaios de dureza dos fios de Alumínio.....	139
QUADRO 4. 26 - 140	-
QUADRO 4. 27 - Resumo das etapas do ensaio	141
QUADRO 4. 28 - Resumo das temperaturas medidas	142
QUADRO 4. 29 - 143	
QUADRO 4. 30 - Convenção utilizada para comparação de resultados de ensaios das LT	145
QUADRO 4. 31 - FOF e COF para LT 69 e 138 kV	154
QUADRO 4. 32 - Risco LT de 69 kV	156
QUADRO 4. 33 - Risco LT de 138 kV	156
QUADRO 5. 1 - Ensaio de Tração da Amostra 8 - comparação entre valores ensaiados e de norma	158

QUADRO 5. 2 - Amostra 8 - média dos valores medidos em diversos pontos dos fios de Alumínio e aço	158
QUADRO 5. 3 - Ensaios de Tração da Amostra 3 - comparação entre valores ensaiados e de norma	159
QUADRO 5. 4 - Ensaios de Tração da Amostra 5 - comparação entre valores ensaiados e de norma	162
QUADRO 5. 5 - Ensaios de Tração da Amostra 6 - comparação entre valores ensaiados e de norma	164
QUADRO 5. 6 - Ensaios de Tração da Amostra 7 - comparação entre valores ensaiados e de norma	166
QUADRO 5. 7 - Ensaios de Tração da Amostra 9 - comparação entre valores ensaiados e de norma	169
QUADRO 5. 8 - Amostra 9 - média dos valores medidos em diversos pontos dos fios de Alumínio e aço	169
QUADRO 5. 9 - Ensaios de Tração da Amostra 4 - comparação entre valores ensaiados e de norma	170
QUADRO 5. 10 - Comparação dos valores de Morgan e média dos resultados dos ensaios	172
QUADRO 6. 1 - Valores de perda de resistência dos cabos condutores e fio de Alumínio.....	175

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACSR	Aluminum Conductor Steel Reinforced
API	
ASTM	American Society of Testing and Materials
CAA	Cabo condutor de Alumínio com alma de aço
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CIGRÉ	International Council on Large Electric Systems
EPRI	Electric Power Research Institute
EDS	Everyday Stress
IACS	International Annealed Copper Standard
IEC	International Electro-Technical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IBR	Inspeção Baseada em Risco
LT	Linha aérea de subtransmissão ou transmissão de energia elétrica
NBR	Normas Brasileiras
RMC	Resistência Mecânica Calculada

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACSR	Aluminum Conductor Steel Reinforced
API	
ASTM	American Society of Testing and Materials
CAA	Cabo condutor de Alumínio com alma de aço
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CIGRÉ	International Council on Large Electric Systems
EPRI	Electric Power Research Institute
EDS	Everyday Stress
IACS	International Annealed Copper Standard
IEC	International Electro-Technical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IBR	Inspeção Baseada em Risco
LT	Linha aérea de subtransmissão ou transmissão de energia elétrica
NBR	Normas Brasileiras
RMC	Resistência Mecânica Calculada

NOMENCLATURA

Letras Latinas

f_s	Flecha do condutor [m]
h_s	Altura de segurança [m]
a	Número total de fios
b	Número de camadas ou capas
Re	Número de Reynolds
v	Velocidade de vento [m/s]
d_c	Diâmetro do cilindro [m]
f	Frequência de vibração [Hz]
l	Comprimento do condutor [m]
L	Meio comprimento de onda conhecido como “loop length”
n	Número de antinós ou meias ondas
S	tensão dinâmica [MPa]
K	[N/mm ³]
y_a	Amplitude de vibração, pico a pico [mm]
d_e	Diâmetro dos fios da camada mais externa do cabo [m]
E_e	Módulo de elasticidade do Alumínio [MPa]
x	Distância entre o sensor do medidor de vibração e o grampo (normalmente 89mm)
H	Componente horizontal da tração de esticamento do cabo condutor [N];
EI	Módulo de rigidez [Nm ²]
n_s	Número de fios de aço
E_s	Módulo de elasticidade do aço [MPa]
d_s	Diâmetro dos fios de aço [m]
n_a	Número de fios de Alumínio
E_a	Módulo de elasticidade do material da camada mais externa do cabo [MPa]
d_a	Diâmetro dos fios de Alumínio [m]
N	Vida útil em ciclos

D	Deterioração gradativa do material sujeito a vibração
n_1, n_2, \dots, n_i	Quantidade de ciclos quando se verificam no campo os níveis de tensão S_1, S_2, \dots, S_m
N_1, N_2, \dots, N_i	Quantidade de ciclos na curva S-N correspondentes a S_1, S_2, \dots, S_m
S_1, S_2, \dots, S_i	Diferentes níveis de tensão dinâmica a que os condutores estão sujeitos no campo [MPa]
V_u	Duração da vida útil [anos]
RS	Resistência à tração remanescente como um percentual da resistência inicial
SR_{EC}	Resistência à tração remanescente como um percentual da resistência inicial do fio EC (liga de Alumínio 1350)
STR_{EC}	Resistência inicial calculada do fio EC [N]
STR_{ST}	Resistência inicial calculada do núcleo de aço [N]
STR_T	Resistência inicial calculada do condutor [N]
T	Temperatura de exposição à duração t [°C]
t	Tempo transcorrido de exposição [h]
d	Diâmetro do fio [mm]
\bar{t}	Tempo de duração à temperatura T para causar 1% de perda de resistência [h]
A_2	Coefficiente dado no QUADRO 2.13
B_2	Coefficiente dado no QUADRO 2.13
T	Duração de tempo [h]
T_r	Temperatura à qual a duração t_r causa 1% de perda em resistência [°C]
\bar{t}_b	Tempo de duração à temperatura T_b para causar 1% de perda de resistência [h]
T_b	Temperatura base [°C]
t_r	Duração de tempo de referência [h]
R	Redução em área do fio de Alumínio como um percentual da área do vergalhão de Alumínio
\bar{t}_1	Tempo de duração à temperatura T_1 para causar 1% de perda de resistência e redução em área $R_a = 80\%$ [h]

T_1	Temperatura à qual a duração \bar{t}_1 causa 1% de perda em resistência e redução em área $R_a=80\%$ [°C]
R_a	Redução em percentual em área do fio de Alumínio
$W_{(80\%)}$	Perda total para uma redução em área $R_a=80\%$ como um percentual da resistência inicial
C_2	Coefficiente dado no QUADRO 2.13
$t_1, t_2, t_3, t_n, t_{n-1}$	Tempo de exposição à temperatura $T_1, T_2, T_3, T_n, T_{n-1}$ [horas]
$\bar{t}_1, \bar{t}_2, \bar{t}_3, \bar{t}_n, \bar{t}_{n-1}$	Tempo necessário para causar 1% de perda de resistência à tração a temperatura $T_1, T_2, T_3, T_n, T_{n-1}$ e $R_a=80\%$
W	Perda total para redução de área desejada como um percentual da resistência inicial
K_4	Coefficiente dado no QUADRO 2.13
R	Redução desejada em percentual em área do fio de Alumínio
W_a	Perda de resistência no estado de recozimento pleno
n_1	Coefficiente dado no QUADRO 2.13
A_3	Coefficiente dado no QUADRO 2.13
B_3	Coefficiente dado no QUADRO 2.13
k_{13}	Coefficiente dado no QUADRO 2.13
P_c	Perda por convecção [W/m]
P_r	Perda por irradiação
P_j	Aquecimento por efeito Joule
P_s	Aquecimento devido à radiação solar
I	Intensidade da corrente [A]
T_c	Temperatura do condutor [°C]
R	Resistência elétrica [Ω/m]
d	Diâmetro do condutor [m]
I_B	Intensidade de irradiação solar direta sobre uma superfície normal ao mesmo [W/m^2]
F	Reflectância (albedo) da superfície da terra sob o condutor
H_s	Altura solar [m]

I_d	Intensidade da irradiação difusa do céu sobre uma superfície horizontal [W/m ²]
h_c	Coefficiente médio de transferência de calor [W/m ² .°C]
A	Área da seção transversal [m ²]
t_c	Temperatura do corpo aquecido [°C]
t_a	Temperatura do fluido onde se dá a transferência, distante do corpo aquecido o suficiente para não sofrer influência da temperatura do condutor [°C]
T_c	Temperatura do condutor [°K]
T_d	Temperatura do céu [°K]
T_g	Temperatura da terra [°K]
d_{Al}	Diâmetro nominal do fio de Alumínio [m]
LR_{Al}	Limite de resistência do fio de Alumínio [MPa]
$d_{Aço}$	Diâmetro nominal do fio de aço [m]
$LR_{Aço}$	Limite de resistência do fio de Aço [MPa]
NF_{Al}	Número de fios de Alumínio
FC_{Al}	Fator de correção do fio de Alumínio
$NF_{Aço}$	Número de fios de aço
$FC_{Aço}$	Fator de correção do fio de aço
$Ca(i)$	Número de unidades interrompidas em um evento (i) no período de apuração
$t(i)$	Duração de cada evento (i) no período de apuração [horas]
i	Índice de eventos ocorridos no sistema que provocam interrupções em uma ou mais unidades consumidoras
k	Número máximo de eventos no período considerado
Cc	Número total de unidades consumidoras do conjunto considerado no final do período de apuração
Hi	Total de horas paradas no período 2002/2006
Ci	Custo por hora parada
j	número de ordem
N	tamanho da amostra

Letras Gregas

ν	Viscosidade cinemática do ar [m^2/s]
α_s	Coefficiente de absorção do condutor
η	Ângulo do raio solar com respeito ao eixo do condutor [graus]
ζ	Inclinação do condutor com a horizontal
σ	Constante de Stefan-Boltzmann = $5,67 \cdot 10^{-8}$ [$\text{w}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$]
ε_g	Emissividade da superfície do condutor voltada para a atmosfera abaixo
ε_d	Emissividade da superfície do condutor voltada para a atmosfera acima

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo da vida útil em função da temperatura de operação de **cabos condutores de Alumínio com alma de aço (CAA)** utilizados em **linhas aéreas de subtransmissão ou transmissão de energia elétrica (LT)** considerando os fatores que influenciam a vida útil em relação à resistência mecânica à tração. Apresenta também os resultados da metodologia implementada para o cálculo da vida útil. Esta metodologia proposta integra dados obtidos através de pesquisa – resistência mecânica, resistência elétrica, dureza e análise química; dados de operação e manutenção – correntes transportadas e ocorrências de manutenção; e dados coletados sobre o meio ambiente – temperatura e velocidade de vento nas regiões atravessadas pela LT. A integração dos dados é feita através de uma ferramenta computacional que após a compilação destes elementos apresenta os valores calculados para os prazos de inspeção da LT e da vida útil remanescente dos cabos condutores. A correlação dos resultados dos ensaios de resistência à tração, dureza e resistência elétrica com a predição da vida útil remanescente do cabo condutor é feita através da ferramenta computacional, auxiliando assim, a tomada de decisão sobre o reaproveitamento de cabos condutores das LT. A metodologia implementada poderá auxiliar os estudos de viabilidade de recapitação, as manutenções preditivas de cabos condutores existentes, a definição de tempo para manutenção preditiva de cabos condutores novos, as inspeções aéreas com equipamentos de termovisão para verificação do rompimento de fios individuais e a análise do estado atual do cabo condutor em relação a segurança de terceiros.

Palavras chaves: cabo condutor, cabo de alumínio com alma de aço, linha aérea de transmissão de energia elétrica, linha de subtransmissão de energia elétrica, vida útil de cabos condutores.

1 INTRODUÇÃO

A malha de transmissão e distribuição do Sistema Elétrico brasileiro é caracterizada por instalações que datam, em média, de 40 anos de operação. Com isto, é fundamental que as concessionárias mantenham um controle efetivo dos materiais que compõem o Sistema Elétrico, de forma a se garantir a confiabilidade necessária às instalações existentes.

Com a grande competitividade do setor energético, a escassez de recursos para novos investimentos e o envelhecimento do sistema são necessárias sua otimização e reforma para enfrentar o aumento da demanda de energia elétrica do mercado brasileiro.

O cabo condutor é, naturalmente, o elemento mais importante no transporte de energia elétrica e exige um cuidadoso trabalho de manutenção preditiva e preventiva, evitando-se o comprometimento de fornecimento de energia elétrica aos diversos segmentos de clientes e, conseqüentemente, o pagamento de multas.

Por isso, torna-se fundamental a predição da vida útil de cabos condutores para novas instalações e para instalações que sofrerão intervenções com o objetivo de otimizar sua capacidade de transporte de energia elétrica.

1.1 Classificação das linhas aéreas para transporte de energia elétrica.

1.1.1 Linha aérea de subtransmissão de energia elétrica

Caracterizada por possuir classe de tensão no intervalo entre 69 kV e inferior a 230 kV e ser aérea.

1.1.2 Linha aérea de transmissão de energia elétrica

Caracterizada por possuir classe de tensão igual ou superior a 230 kV e ser aérea.

Nesse trabalho, tanto as **linhas aérea de subtransmissão como as linhas aéreas de transmissão** serão chamadas por **Linha de Transmissão ou LT**.

1.2 Linha de transmissão de energia elétrica

Os principais elementos de uma linha aérea de transmissão são:

1.2.1 Cabo condutor de energia e seus acessórios

É o principal elemento de uma linha de transmissão definindo suas características elétricas: perdas por efeito Joule ou por efeito Corona e dimensionamento das distâncias elétricas nas estruturas utilizadas, e mecânicas: aplicação das estruturas. Os acessórios utilizados são importantes por auxiliar na redução dos riscos de danos ao cabo condutor ao longo de sua vida útil. Os acessórios são os amortecedores, espaçadores e outros. As FIG.1.1 e 1.2 mostram o cabo condutor e seus acessórios.



FIGURA 1. 1 – Cabo Condutor

FONTE – FURUKAWA ENERGIA, 1998

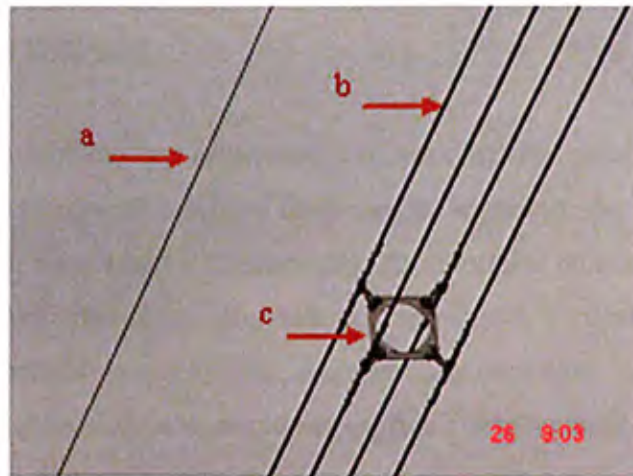


FIGURA 1. 2 – Cabo pára-raios (a), condutor (b) e espaçador-amortecedor (c)

1.2.2 Cabo pára-raios e seus acessórios

É responsável pela “blindagem” da linha de transmissão, reduzindo a exposição direta dos cabos condutores às descargas atmosféricas. É também responsável pela distribuição de corrente de curto circuito da linha. Os acessórios utilizados, tais como amortecedores, são importantes na redução dos riscos de danos ao cabo pára-raios ao longo de sua vida útil. A FIG.1.3 mostra o cabo pára-raios com 02 amortecedores instalados próximos a uma esfera de sinalização. Os amortecedores são utilizados para proteção contra vibração eólica.

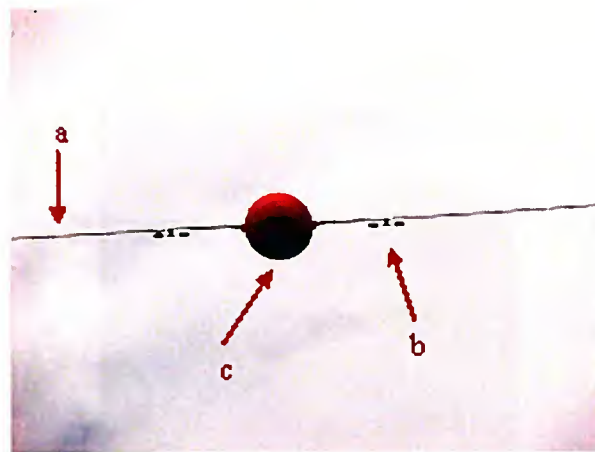


FIGURA 1. 3 – Cabo pára-raios (a), amortecedor (b) e esfera de sinalização (c)

1.2.3 Estruturas e suas fundações

Em uma linha de transmissão as estruturas são responsáveis pela sustentação dos cabos condutores e pela sua manutenção a uma distância de segurança do solo. São divididas em estruturas de suspensão, ancoragem e transposição. As estruturas de suspensão, como mostrado na FIG.1.4, resistem, principalmente, aos esforços mecânicos verticais e transversais; as de ancoragem, como mostrado na FIG.1.5, resistem aos esforços verticais, transversais e longitudinais e as de transposição são estruturas especiais responsáveis por proporcionar meios de se atingir o equilíbrio eletromagnético da linha de transmissão.



FIGURA 1. 4 – Estrutura de suspensão



FIGURA 1. 5 – Estrutura de ancoragem

Quanto à maneira de resistir aos esforços mecânicos as estruturas podem ser divididas em autoportantes e estaiadas.

Os materiais utilizados em sua construção podem ser: metais (aço ou liga de Alumínio), madeira e concreto armado.

As fundações são responsáveis pela fixação da estrutura ao solo. Os principais tipos são: grelha, tubulão, sapata de concreto, estaca e ancoragem em rocha. Uma fundação tipo tubulão é mostrada na FIG.1.6.



FIGURA 1. 6 – Fundação tipo tubulão

1.2.4 Cadeias de isoladores e suas ferragens

As cadeias de isoladores são responsáveis pelo isolamento elétrico dos cabos condutores em relação as suas estruturas e ao solo. São divididas em suspensão e ancoragem.

As cadeias de suspensão, conforme FIG.1.7, suportam os cabos condutores e transmitem às estruturas todos os esforços recebidos desses. As cadeias de ancoragem suportam todos os esforços transmitidos axialmente pelos cabos condutores em quaisquer condições de solicitação. Um pára-raio de óxido de Zinco também é mostrado na FIG.1.7, este equipamento é utilizado para proteger as instalações e equipamentos dos sistemas de potência contra sobretensão de tipo atmosférico e de manobras.

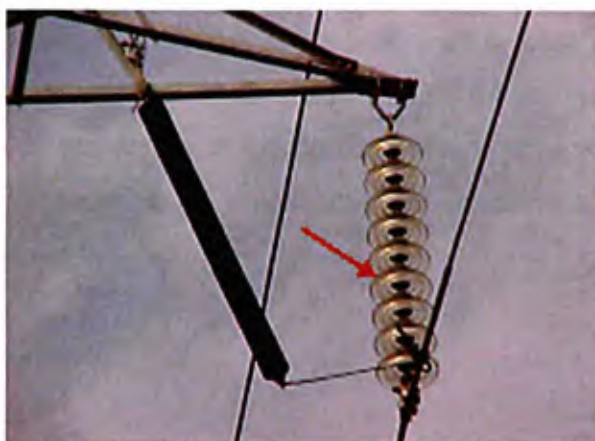


FIGURA 1. 7 – Cadeia de isoladores

1.2.5 Sistema de aterramento

O sistema de aterramento de uma linha de transmissão tem o objetivo de permitir o escoamento de correntes do sistema elétrico causadas por induções, curtos-circuitos e descargas atmosféricas, e, em alguns casos, manter os potenciais de passo e de toque dentro de limites aceitáveis pelo ser humano. Relacionado a solicitações de origem atmosférica, o sistema de aterramento tem papel fundamental quando ocorrem baixos valores de resistência e/ou impedância de aterramento da LT, no sentido de manter a linha em operação sem causar desligamento transitório. Pode ser do tipo radial, por estrutura e outros.

1.2.6 Acessórios diversos

São utilizados principalmente para a sinalização aérea da linha de transmissão, ou seja, sinalização de travessia sobre ferrovias e rodovias, sinalização de advertência a pedestres e de advertência a inspeção aérea. As esferas de sinalização e placas de sinalização são os principais acessórios utilizados em sinalização de advertência. Uma esfera de sinalização é mostrada na FIG. 1.3.

1.3 Definição de vida útil

Vida útil é o tempo calculado para a utilização dos cabos condutores em uma linha aérea de transmissão ou linha de transmissão. Consideram-se as seguintes condições de segurança no cálculo do tempo de utilização:

- segurança da instalação;
- segurança de terceiros;
- manutenção e operação da linha de transmissão.

Para cabos condutores novos calcula-se a vida útil total e para cabos condutores usados a vida útil residual ou remanescente.

1.4 Proposição

Diante de um cenário cada vez mais restritivo em relação aos aspectos financeiros e ambientais, torna-se difícil o processo de expansão física do sistema de linhas de transmissão, o que implica na utilização otimizada dos ativos existentes. A melhoria do conhecimento da vida útil dos cabos condutores de Alumínio com alma de aço - CAA permite uma melhor avaliação do tempo de utilização desses componentes, atrelada a uma confiabilidade necessária, podendo-se planejar de forma mais acurada as novas obras de expansão do sistema.

Outros aspectos importantes relacionados a vida útil de cabos condutores:

- é um tema de interesse para a Engenharia de Manutenção da Subtransmissão e Transmissão de energia elétrica em relação a manutenção preditiva de cabos condutores;
- melhoria na análise da confiabilidade das instalações existentes em relação segurança de terceiros;
- aproveitamento de um grande número de desmontagem de Linhas de Transmissão para retirada de amostra de cabos condutores e início de um banco de dados CEMIG sobre vida útil de cabos condutores;

- aprimoramento de ferramenta computacional de análise do fenômeno, visto que atualmente tem-se somente referências bibliográficas sobre o assunto.

1.5 Objetivo

O objetivo é avaliar a vida útil de cabos condutores através da realização de um programa de ensaios de amostras retiradas das Linhas de Transmissão da CEMIG e da comparação destes resultados com a predição da vida útil dos cabos condutores, a ser realizada por meio de uma ferramenta computacional desenvolvida no âmbito deste trabalho e do histórico térmico das Linhas de Transmissão onde foram retiradas as amostras.

As contribuições desse trabalho serão:

- Desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de prover recursos tecnológicos para auxiliar a tomada de decisão sobre as condições atuais de cabos condutores em operação para Linhas de Subtransmissão e Transmissão a serem reformadas ou recapitadas, e tomada de decisão sobre prazos de inspeções de manutenção e necessidade de intervenções nas LT considerando o risco de falha previsto. Esta ferramenta integra os dados obtidos através de pesquisa – resistência mecânica e resistência elétrica; dados de operação e manutenção – correntes transportadas e ocorrências de manutenção; e dados coletados sobre o meio ambiente – temperatura e velocidade de vento nas regiões atravessadas pela LT.

Estes recursos tecnológicos são: estimativa da vida útil de cabos novos e a vida útil remanescente de cabos condutores existentes, verificação da quantidade de fios de Alumínio rompidos em um cabo condutor considerando-se a temperatura indicada em uma imagem termográfica e cálculo do intervalo de tempo para inspeção termográfica de um cabo condutor de uma linha de transmissão existente.

- Desenvolvimento de uma metodologia de inspeção para utilização em manutenção preditiva de cabos condutores.

- Desenvolvimento de uma metodologia para definição dos componentes críticos de uma linha de transmissão baseada na metodologia da Inspeção Baseada em Risco - IBR.
- Desenvolvimento da metodologia para ensaio de tração vertical para cabos condutores com proposição de revisão das normas NBR 7272 (1982) e NBR 7302 (1982) para inclusão do ensaio de tração vertical como alternativa para obtenção da carga de ruptura e tensão-deformação de cabos condutores de Alumínio.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Transmissão de energia elétrica

A teoria da transmissão mostra que os agentes do transporte de energia elétrica são os campos elétricos e os campos magnéticos, para os quais os condutores constituem “guias” (FUCHS et al., 1992).

A escolha e o dimensionamento corretos dos cabos condutores são decisivos na limitação das perdas de energia por efeito Joule ou por efeito Corona, bem como para controlar os níveis de radio-interferência e ruídos acústicos. As perdas por efeito Joule são controladas pela escolha de condutores com áreas de seções transversais adequadas às correntes que deverão conduzir e tipos de materiais com resistividade compatível. As correntes são proporcionais às potências a serem transmitidas e inversamente proporcionais aos níveis de tensão adotados. As manifestações do efeito Corona dependem do gradiente de potencial nas imediações dos condutores, aumentando com o nível de tensão e diminuindo com o aumento nos diâmetros dos condutores. Este fator faz com que, principalmente em níveis de tensões acima de 200 kV, a escolha das dimensões dos condutores obedeça ao critério de minimização das manifestações do efeito Corona, já que existe consenso entre projetistas de linhas de que não se consegue economicamente sua total eliminação (FUCHS et al., 1992).

Os cabos condutores estão sujeitos a falhas dependendo dos tipos e intensidades das solicitações a que são submetidos e também de sua capacidade de resistir às mesmas. Os condutores das linhas aéreas de transmissão, para se manterem suspensos acima do solo são submetidos a forças axiais. Estas variam com a mudança das condições ambientais: abaixamentos de temperatura provocam aumentos nas trações e elevações de temperatura provocam reduções nas trações. Quanto menor a tração no cabo, maior será a flecha resultante “f” exigindo, assim, estruturas mais altas ou um número maior delas para garantir as distâncias mínimas do cabo ao solo. A FIG.2.1 mostra um vão típico de uma linha aérea de transmissão.

O vento atmosférico incidindo sobre a superfície dos condutores exerce sobre os mesmos uma pressão que se traduz também em aumento na tração axial. Se a tração resultante atingir valores maiores do que a resistência à ruptura dos condutores esta poderá ocorrer. O vento, por outro lado, induz nos condutores vibrações de frequências elevadas, que podem provocar a sua ruptura por fadiga junto aos seus pontos de fixação. Quanto maior for a taxa de trabalho a tração nos condutores, maiores serão os problemas decorrentes das vibrações. Outro fator que pode influenciar a escolha de um tipo de condutor é sua capacidade de operar com temperaturas mais elevadas sem perdas acentuadas de resistência mecânica, admitindo assim, maiores densidades de corrente.

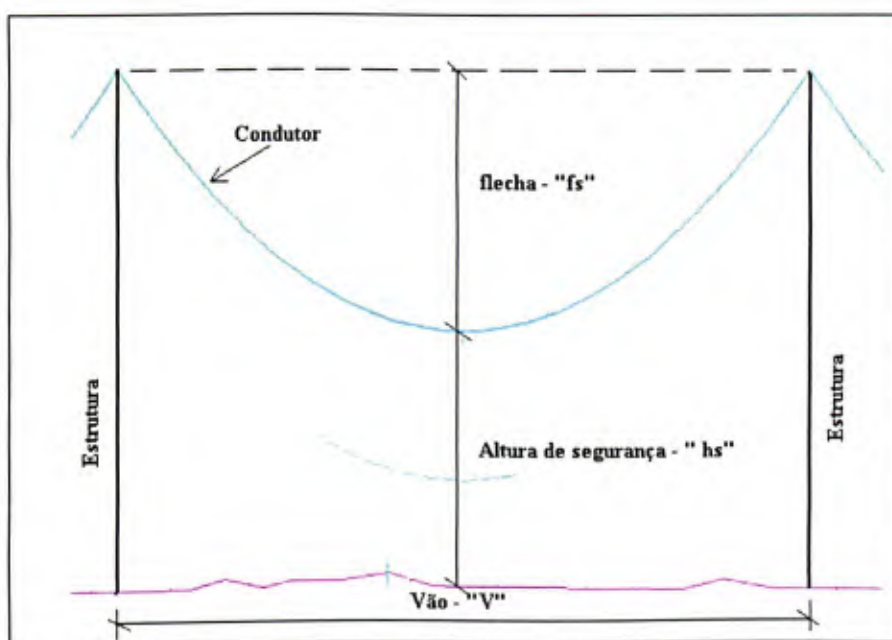


FIGURA 2. 1 – Representação de um vão de uma linha de transmissão

2.2 Cabos condutores de Alumínio

O cabo condutor é formado por um grupo de fios, dispostos concêntricamente em relação a um fio central, formando coroas compostas de fios torcidos helicoidalmente (FUCHS et al., 1992). Coroa é um conjunto de fios equidistantes do fio central do cabo; e alma é um fio ou conjunto de fios que forma a parte central de um cabo, quando constituída de aço. A alma tem por finalidade aumentar a resistência mecânica do cabo condutor. O sentido de enrolamento de cada uma das

coroas é sempre oposto ao da camada anterior. A camada mais externa é torcida para a direita como mostrado na FIG.1.1.

Os fios que compõem um cabo podem ser todos de um mesmo diâmetro, o que é mais comum, ou podem possuir diâmetros diferentes em camadas diferentes. Podem ser de materiais diferentes, desde que compatíveis eletroliticamente entre si. O fio nu é obtido por trefilação do vergalhão pelo processo de laminação Properzi geralmente na bitola 9,52mm (3/8”) de diâmetro, em rolos de aproximadamente 1.500 a 2.000 kg. Os cabos com fios de mesmo diâmetro são formados obedecendo à seguinte relação:

$$a = 3b^2 + 3b + 1 \quad (2.1)$$

Onde a é o número total de fios e b é o número de camadas.

Os cabos são especificados pelo seu diâmetro nominal, pela a área de sua seção transversal nominal, pelo o número de fios componentes, e pelos metais ou ligas com que são fabricados. O diâmetro nominal do cabo é o diâmetro do círculo que tangencia a geratriz externa dos fios componentes da camada externa como mostrado na FIG.2.2. A área da seção transversal é determinada pela soma das áreas das seções transversais dos fios componentes.

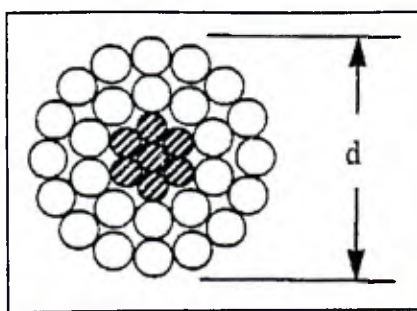


FIGURA 2. 2 – Diâmetro nominal do cabo condutor

2.2.1 Classificação do Alumínio e suas ligas

De acordo com NBR 6834 (2000) são adotadas as seguintes definições:

- **Elemento de Liga:** elemento químico que se adiciona intencionalmente ao Alumínio, segundo teores mínimos e máximos especificados.
- **Elemento de liga principal:** elemento de liga com maior porcentagem em massa.
- **Grupos de ligas:** aqueles identificados pelo elemento de liga principal.
- **Alumínio e ligas de Alumínio dúcteis:** aquele ou aquelas que suportam, pelo efeito de esforços aplicados, uma deformação plástica relativamente elevada antes da ruptura, e que podem ser trabalhados a frio ou a quente mediante processos mecânicos tais como: laminação, trefilação, forjamento, extrusão, etc.
- **Alumínio e ligas de Alumínio para fundição:** aqueles ou aquelas que se destinam à fabricação de peças fundidas em moldes.

2.2.2 Sistema de classificação do Alumínio e ligas de Alumínio dúcteis

De acordo com NBR 6834 (2000) o primeiro dígito indica o grupo de ligas, o segundo as modificações da liga original ou dos limites de impureza e os dois últimos identificam a liga de Alumínio ou indicam a pureza do Alumínio, conforme mostrado no QUADRO 2.1.

QUADRO 2.1

Principais elementos de liga – materiais dúcteis

	Principal elemento de liga	Dígitos
a	Alumínio não ligado de no mínimo 99,00% de pureza	1xxx
b	Ligas de Alumínio agrupadas segundo o elemento de liga principal	
	Cobre	2xxx
	Manganês	3xxx
	Silício	4xxx
	Magnésio	5xxx
	Magnésio e Silício	6xxx
	Zinco	7xxx
	Outros elementos	8xxx
	Série não utilizadas	9xxx

FONTE: NBR 6834, 2000

No grupo 1xxx, os dois últimos dígitos indicam os centésimos da porcentagem mínima de Alumínio. O segundo dígito da designação indica modificações dos limites das impurezas. O algarismo 0 (zero) indica o Alumínio não ligado que contém impurezas em seus limites naturais

ou que não houve um controle especial e os algarismos de 1 a 9 indicam que houve controle especial de um ou mais elementos presentes como impurezas. Nos grupos 2xxx até 8xxx, os dois últimos dígitos dos quatro da designação são arbitrários, servindo somente para identificar as diferentes ligas do grupo. O segundo dígito caracteriza modificações da liga: o algarismo 0 (zero) indica a liga original e os algarismos de 1 a 9 indicam modificações da liga original. As ligas experimentais também são designadas por este sistema, sendo diferenciadas por um prefixo x. O prefixo é abandonado quando a liga deixa de ser experimental.

2.2.3 Tratamentos térmicos

Melhoria de resistência, ductilidade, qualidade de quebra e resistência à corrosão freqüentemente são obtidas pela adição de elementos de liga, trabalho à frio (endurecimento por deformação) e tratamento térmico (ALUMINUM ASSOCIATION, 1989).

As ligas de Alumínio para trabalho mecânico podem ser divididas em dois grupos:

- ligas para tratamento térmico (tratáveis);
- ligas sem tratamento térmico (não tratáveis).

As ligas de Alumínio sem tratamento térmico não podem ser endurecidas por deformação a frio. Os três grupos principais para trabalho mecânico sem tratamento térmico são os grupos 1xxx, 3xxx e 5xxx. A resistência inicial de Alumínio não tratado (1350, 5005 e a série de ligas 8xxx) depende particularmente do efeito do endurecimento de elementos como o Manganês, Silício, Ferro e Magnésio, simples ou em combinação.

As ligas de Alumínio para trabalho mecânico e tratamento térmico são dos grupos 2xxx, 6xxx e 7xxx. Algumas ligas de Alumínio podem ser submetidas a tratamento térmico de endurecimento por precipitação. O objetivo do endurecimento por precipitação é o de promover, na liga tratada termicamente, a formação de uma dispersão densa e fina de partículas de precipitados numa matriz de metal deformável. As partículas dos precipitados atuam como obstáculo ao movimento das deformações e, como conseqüência, aumentam a resistência mecânica da liga tratada termicamente.

O tratamento térmico durante o processamento não aumenta a resistência, exceto para aquelas ligas contendo apreciáveis quantidades de Magnésio quando fornecidos nas têmperas de dureza artificial. Nestas têmperas é usualmente dado um tratamento térmico final à temperatura elevada chamado estabilização. O objetivo é estabilizar as propriedades. Este tratamento, algumas vezes, produz uma certa quantidade de recozimento.

2.2.4 Designações para Têmperas

Conforme a NBR 6835 (2000) as têmperas se classificam de acordo com os processos a que se submete o material, dentre outras, apresentamos abaixo dois tipos:

2.2.4.1 “O” – recozido

Aplica-se aos produtos acabados, no estado em que apresentam o menor valor de resistência mecânica.

2.2.4.2 “H” – encruado

Aplica-se aos produtos nos quais aumentou-se a resistência mecânica por deformação plástica a frio e que podem ou não serem submetidos a um recozimento complementar para produzir amolecimento parcial ou a um processo de estabilização. É utilizado para as ligas não tratáveis termicamente. A letra H será seguida de dois ou mais dígitos;

2.2.5 Processos de fabricação de fios condutores

Em Aluminum Association (1989) os seguintes processos utilizados para fabricação de fios e cabos condutores de fios retorcidos ou perfis e tubos são descritos:

2.2.5.1 Fundição

A produção de peças fundidas de Alumínio para acessórios de condutores, como grampos e luvas, é realizada com o vazamento de ligas fundidas em moldes de areia ou permanentes, ou em máquinas de fundição. Os materiais fundidos podem ser tratados termicamente, temperados, e

envelhecidos de acordo com o requerido. O processo de fundição contínua é usado para produção de vergalhões que são laminados para retrefila de diâmetro 9,52mm para posterior trefilação de fio. Envolve inicialmente a fusão dos lingotes de Alumínio a uma temperatura em torno de 1000°C

2.2.5.2 Extrusão

O Alumínio é forçado sob pressão através de uma ou mais aberturas de uma matriz. O lingote de Alumínio é aquecido e colocado em um recipiente cilíndrico que possui em sua extremidade uma matriz com o formato da seção desejada. Um cabeçote é ativado por um pistão hidráulico e força o metal do lingote através da abertura da matriz sobre uma mesa fixa de modo a produzir a forma desejada. Extrusões são utilizadas para produzir muitas formas de perfis condutores e também na produção de estágios preliminares de vergalhões que mais tarde serão laminados e trefilados para fios de pequeno diâmetro.

2.2.5.3 Laminação

É o processo de transformação mecânica de metais mais usado na prática porque apresenta uma alta produtividade e um controle do produto acabado que pode ser bastante preciso.

Um laminador consiste basicamente em rolos laminadores, mancais, uma carcaça chamada de gaiola para fixar essas partes e um motor para fornecer potência aos rolos e controlar a velocidade de rotação sincronizada. Laminadores com cilindros adequados são empregados para reduzir o diâmetro e aumentar o comprimento dos lingotes de Alumínio. Uma série de cabeçotes de laminação são necessários para que o diâmetro seja reduzido para 9,52mm. Este é o diâmetro usual de vergalhões laminados empregados como material para as máquinas de trefilação de fios que reduzem o Alumínio para o diâmetro final dos fios.

No início deste processo a temperatura do vergalhão é de 450°C e ao final é reduzida para 80°C, devido ao processo de resfriamento existente. O Alumínio é deformado a uma temperatura na qual a recristalização acontece quase imediatamente, substituindo os grãos deformados por novos grãos sem orientação (ASSUNÇÃO et al., 1992).

2.2.5.4 Laminação – processo Properzi

Nesta operação a máquina é composta basicamente por uma roda para moldar varas, as quais serão laminadas em laminador sincronizado na forma de vergalhões redondos de 12,7mm (1/2”) ou 19,05mm (3/4”). Todo defeito na vara permanece no vergalhão e são divididos em três classes principais:

- defeitos externos visíveis: rachaduras, bolhas e segregação de banda;
- defeitos internos: inclusão e óxidos;
- variação de temperaturas na vara ou laminação: modificam as propriedades do vergalhão (resistividade e tensão de ruptura são algumas delas).

2.2.5.5 Trefilação de fios

Nesta operação o vergalhão retrefilado de diâmetro 9,52mm (3/8”) é puxado através de uma série sucessiva de pequenas aberturas na máquina de trefila com acabamento grosseiro e depois através da máquina de trefila fina. A partir do vergalhão, através do processo de trefilação em máquinas trefiladeiras, é possível a obtenção de fios com diâmetro de 1,35 a 6,0mm. Estes fios irão compor o cabo condutor de 7, 19, 37 ou mais fios. Recozimentos intermediários, embobinamentos e tratamentos térmicos podem ser feitos entre as várias operações.

O vergalhão de diâmetro 9,52mm após estar em temperatura ambiente, 24 a 30 horas após a sua produção, é trefilado para os diâmetros dos fios que vão compor o cabo final. Quando o fio é produzido, devido a velocidade e o processo passando pelas fieiras, mesmo totalmente imerso em emulsão de óleo e água, a temperatura atinge aproximadamente 90°C. A velocidade deste processo também depende do tipo de máquina, mas como média, é de 25 a 30m/s.

Os fios individuais de um condutor são severamente trabalhados a frio durante o processo de trefilação, o qual destrói a grande organização dos cristais, reduz o tamanho dos sub-grãos e aumenta a energia armazenada. A energia armazenada é um resultado de imperfeições na estrutura reticulada, defeitos de empilhamento, vacâncias, intersticiais, deslocamentos e precipitados (MORGAN, 1979).

2.2.5.6 Encordoamento (Trançamento)

Na produção de quase todos cabos nus o encordoamento é a última operação, onde será obtido o cabo condutor final, que será submetido a testes e ensaios de avaliação. Condutores de Alumínio de 7, 19, 37 ou 61 fios são produzidos em máquinas de encordoamento. Quando esses encordoamentos circulam um núcleo de aço de 1 fio, ou de 7 ou 19 fios, vários tipos de encordoamentos podem ser produzidos. Os tipos de máquinas de encordoamento (trançadeiras) são:

- tubulares para 7 e 19 fios;
- buncher para 7, 19 e 37 fios;
- rígidas para 37, 61 e 91 fios.

Para a aplicação da última camada de fios é utilizada a máquina de encordoamento rígida. Os vários fios recebidos de bobinas são girados ao redor do núcleo central e lançados em uma forma de cone. A ponta do cone é o núcleo ao redor do qual os fios são espiraladamente lançados.

Em todo o processo a temperatura é praticamente a do ambiente. A operação final é o encordoamento com os fios de aço para formar o cabo condutor de Alumínio com alma de aço, esta última operação não afeta significativamente a deslocação ou subestrutura precipitada (ASSUNÇÃO et al., 1992).

2.3 Cabo de Alumínio com alma de Aço - CAA

Aluminum Conductor Steel Reinforced - ACSR

Condutor formado por uma alma de aço e coroas de fios de Alumínio, sendo padronizado pela NBR 7270 (1978).

A FIG.2.3 mostra algumas das composições mais comuns de cabos CAA, variando a relação entre as áreas das seções transversais do aço com relação ao Alumínio, esses condutores combinam a alta condutividade do Alumínio com a resistência mecânica do aço.

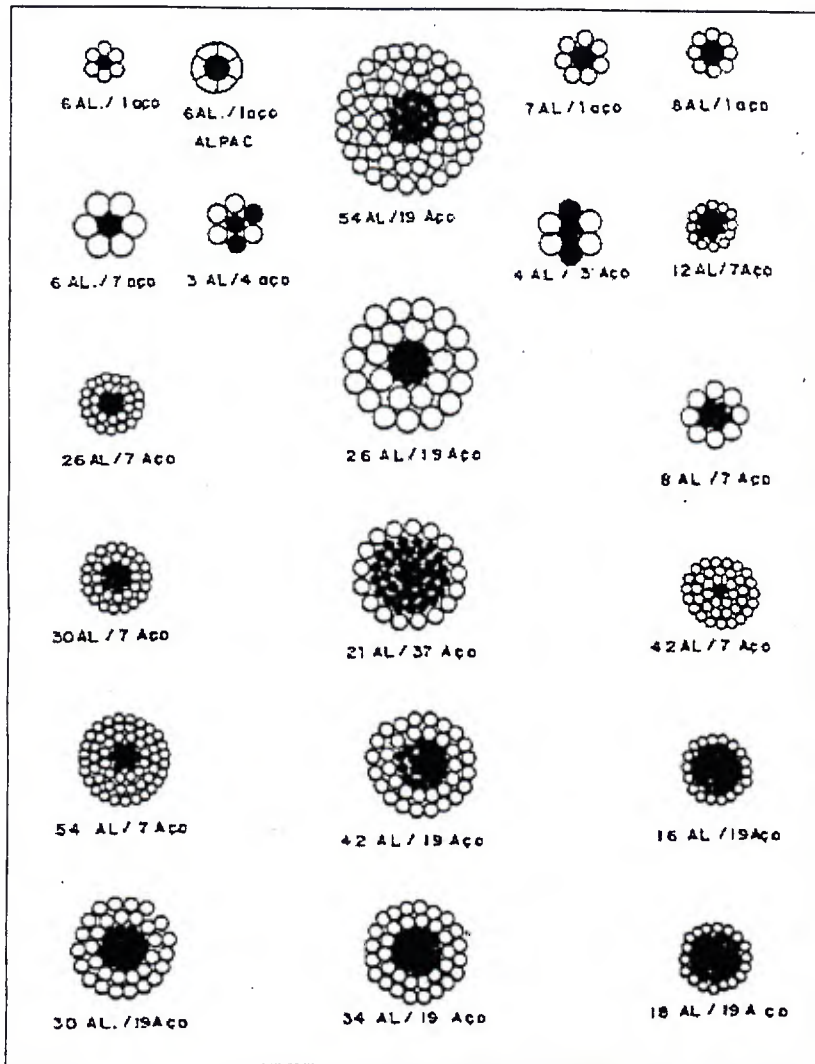


FIGURA 2.3 – Composições de cabos condutores CAA

FONTE: ALUMINUM ASSOCIATION, 1989

A galvanização dos fios de aço que compõem as almas desses cabos pode ser especificada com 2 categorias de espessuras de recobrimento pelo zinco: classes 1 e 2. Os cabos de fabricação normal apresentam espessuras de classe 1.

Nos cálculos elétricos considera-se que os fios de aço não participam da condução das correntes elétricas, sua função é apenas mecânica.

2.3.1 Composição química

2.3.1.1 Fios de Alumínio

Condutores derivam sua resistência à tração das propriedades do metal ou metais utilizados em sua fabricação. Para Alumínio e aço devem ser consideradas as propriedades do metal original antes do trabalho a frio, as alterações durante o trabalho a frio e o subsequente processamento até o encordoamento do cabo condutor. A adição de elementos liga como Magnésio, Silício e Cobre, pode melhorar as características físicas do Alumínio como a resistência mecânica, resistência à corrosão e outras.

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 $FeAl_3$, Fe_3SiAl_{12} , $FeSiAl_8$, $FeSiAl_5$ e $Fe_2Si_2Al_9$ 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.

O Ferro tem alta solubilidade em Alumínio fundido e é facilmente dissolvido em todos os estágios do processo de fundição. A solubilidade do Ferro no estado sólido é muito baixa (~0,05%), entretanto, a maior parte do Ferro presente em Alumínio acima desta quantidade aparece como uma segunda fase intermediária em combinação com o Alumínio e outros elementos. Devido a sua limitada solubilidade, é utilizado em condutores elétricos para fornecer um pequeno aumento em resistência mecânica e melhor característica de creep a elevadas temperaturas (ASM INTERNATIONAL, 2002).

O tamanho de grão também é muito afetado pela composição química. Em geral, elementos de liga comuns e impurezas como Cobre, Ferro, Magnésio e Manganês favorecem a redução do tamanho de grão. Os efeitos de elementos com baixa solubilidade sólida como Manganês, Cromo e Ferro dependem do tipo de fases que esses elementos formam, reagindo entre si e com outros elementos e pela sua distribuição na liga. (HATCH, 1990).

A adição de elementos como Magnésio e Manganês permitem obter maiores taxas de endurecimento por deformação, devido à maior densidade de discordâncias. A composição química também influencia a recristalização: a adição de qualquer impureza (átomos de soluto) aumenta substancialmente a temperatura de recristalização em relação à do Alumínio puro (HATCH, 1990).

O Boro é usado em Alumínio e suas ligas como um refinador de grão para melhorar a condutividade pela precipitação de Vanádio, Titânio, Cromo, e Molibdênio (todos os quais são prejudiciais a condutividade elétrica em seus usuais níveis de impureza no Alumínio de classe comercial). Pode ser usado sozinho, 0,005 à 0,1%, como um refinador de grão durante a solidificação, mas torna-se mais efetivo quando usado com um excesso de Titânio. Refinadores de grãos comerciais comumente contêm Titânio e Boro na proporção de 5 por 1 (ASM INTERNATIONAL, 2002).

O formato dos grãos é influenciado pela presença de alguns elementos como o Manganês, o Cromo e o Zircônio. Estes elementos estão distribuídos de modo não homogêneo no lingote fundido original e formam precipitados muito finos (dispersóides) com comprimento da ordem de 0,1 μm ou menor. A microestrutura trabalhada consiste de bandas ou camadas alternadas densas ou dispersas de dispersóides. Os grãos recristalizados têm seu crescimento obstruídos por essas bandas de dispersóides e assim formam-se os grãos alongados típicos das ligas de maior resistência mecânica (HATCH, 1990).

O tipo de Alumínio mais usado em condutores é o 1350, também conhecido como “Alumínio EC (Electric Conductor)”. Possui Alumínio com 99,50% de pureza com controle de elementos metálicos que afetam a condutividade elétrica.

A norma NBR 7103 (1981) estabelece que o vergalhão de Alumínio 1350 deve apresentar a composição química conforme o QUADRO 2.2.

QUADRO 2.2
Composição química do Alumínio 1350

Elemento	% em peso
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

2.3.1.2 Fios de aço galvanizado

A norma NBR 6756 (1987) estabelece que os fios de aço zincados deve apresentar a composição química conforme QUADRO 2.3.

QUADRO 2.3
Limites dos elementos componentes do fio de aço

Elemento	Teor
Carbono	0,5 - 0,85
Manganês	0,5 - 1,1
Fósforo (máx.)	0,035
Enxofre (máx.)	0,045
Silício	0,10 - 0,35

Aço de alto carbono contém mais de 0,6% de carbono, possuindo maior resistência e dureza, e menor ductilidade em relação aos aços baixo e médio carbono. O Carbono aumenta a dureza e a resistência à tração, por outro lado afeta a ductilidade. O Manganês tem influência no controle da resistência à tração e ductilidade, enquanto que o Silício aumenta a tenacidade e a resistência à tração.

2.3.2 Propriedades físicas

As propriedades físicas determinam o comportamento do material em todas as circunstâncias durante o processo de fabricação e de utilização.

2.3.2.1 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas compreendem a resposta dos materiais às influências mecânicas externas, manifestadas pela capacidade de desenvolverem deformações reversíveis e irreversíveis, e resistirem à fratura. Segundo Callister (1991), o conceito de resistência mecânica é utilizado de forma a estabelecer a propriedade mecânica mais crítica na qual o componente é submetido em sua situação de trabalho. A seguir são descritas algumas propriedades mecânicas consideradas no estudo do cabo condutor:

- Limite de escoamento: o escoamento é um tipo de transição heterogênea do material e localizada entre a deformação elástica e plástica. Quando um material exibe o fenômeno do escoamento, a forma da curva tensão-deformação é a dada pela FIG.2.4. Quando um projeto requer um material dútil, onde a deformação plástica deva ser evitada, o limite de escoamento é o critério adotado para a resistência mecânica.

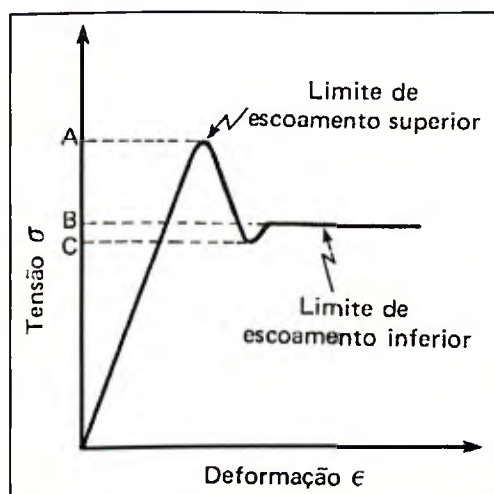


FIGURA 2. 4 – Curva teórica mostrando limite de escoamento

FONTE: SOUZA, 1995

- **Módulo de elasticidade:** é a medida da rigidez do material, quanto maior o módulo, menor será a deformação elástica resultante da aplicação de uma tensão e mais rígido será o material. É determinado pelas forças de ligação entre os átomos de um metal (SOUZA, 1995).
- **Limite de resistência mecânica a tração:** é calculado pela carga máxima atingida no ensaio. Para os fios de Alumínio e de aço o limite de resistência a tração é a carga de ruptura atingida no ensaio, para os cabos condutores é definido em função da Resistência Mecânica Calculada – RMC conforme NBR 7270 (1988).
A resistência à tração dos fios individuais de Alumínio é a resistência à tração média mínima para específico diâmetro de fio. Considerando que o alongamento do fio de Alumínio 1350-H19 é aproximadamente 1%, a resistência à tração do fio de aço à 1% de alongamento é usado pra o cálculo da resistência à tração do cabo condutor (SOUTHWIRE COMPANY, 1994).
- **Limite de resistência mecânica a fadiga:** 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. Nesse caso, a tensão cíclica, aplicada a ele, tem uma flutuação suficientemente grande e é maior que um valor característico de cada material denominado limite de fadiga (SOUZA, 1995).
- **Dureza:** para um engenheiro mecânico dureza é a resistência à penetração de um material duro no outro (SOUZA, 1995). É uma medida da resistência de um material à deformação plástica local.
- **Fluência (“Creep”):** é a deformação plástica ao longo do tempo de um material submetido a uma carga ou tensão constante, FIG.2.5. Normalmente, o metal tensionado abaixo do escoamento por um curto período de tempo retorna a sua forma e tamanho original em virtude de sua elasticidade. Entretanto, quando o período de tempo é suficientemente longo, ocorre deformação plástica. A extensão do creep é determinada por: propriedades do metal envolvido, tensão aplicada, temperatura e tempo sob carregamento. O creep

pode ser consideravelmente reduzido pela escolha adequada do metal, pelo processo de fabricação do metal, pela geometria e pelo carregamento.

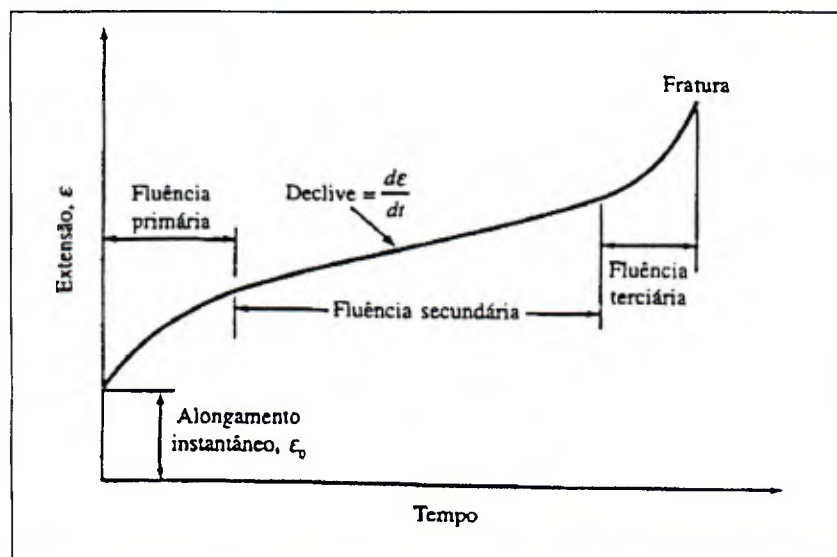


FIGURA 2. 5 – Curva de fluência típica de um metal

FONTE: SMITH, 1998

No projeto das linhas aéreas de transmissão a fluência precisa ser adequadamente considerada, já que o contínuo aumento do comprimento dos condutores após sua fixação permanente nas estruturas, ou grampeamento, conduz a um contínuo aumento das flechas. Para se considerar o efeito do fenômeno, há necessidade de se prever os alongamentos permanentes, devido à fluência, que ocorrerão durante a vida útil da linha.

As principais propriedades mecânicas dos fios de Alumínio 1350, de aço galvanizado e dos cabos condutores CAA 170,5 mm² Linnet e CAA 107 mm² Penguin são mostradas no QUADRO 2.4 e no QUADRO 2.5.

QUADRO 2. 4

Propriedades mecânicas dos fios de Alumínio 1350, aço galvanizado e cabos condutores Penguin e Linnet – Parte 1

Designação	Resistencia à tração mínima (MPa)	Tensão mínima a 1% de alongamento (MPa)	Resistência ao escoamento (MPa)	Alongamento mínimo na ruptura em 250 mm (%)
1350 - H19 Ø4,77mm (1)	160 (3)		166 (6)	1,50 (6)
1350 - H19 Ø2,89mm (1)	170 (3)		166 (6)	1,50 (6)
Aço galvanizado Ø4,77mm (2)	1.380 (4)	1.170 (4)		2,50 (4)
Aço galvanizado Ø2,25mm (2)	1.450 (4)	1.310 (4)		3,00 (4)
Cabo condutor Penguin	292,11 (5)			
Cabo condutor Linnet	312,35 (5)			

(1) Têmpera dura

(2) Aço galvanizado classe 1

(3) NBR 5118

(4) NBR 6756

(5) NBR 7270

(6) Aluminum Association

FONTE: NBR 5118, 1985; NBR 6756, 1987; NBR 7270, 1988 e ALUMINUM ASSOCIATION, 1989

QUADRO 2. 5

Propriedades mecânicas dos fios de Alumínio 1350, aço galvanizado e cabos condutores Penguin e Linnet – Parte 2

Designação	Módulo de elasticidade final (MPa)	Limite de resistência a fadiga (MPa)	Dureza (HB)
1350 - H19	69.000 (1)	48 (3)	42
Aço galvanizado	200.000 (1)		
Cabo condutor Penguin	79.000 (2)		
Cabo condutor Linnet	74.000 (2)		

(1) Southwire Company (1994)

(2) NBR 7270 (1988) – incerteza $\pm 3 \times 10^3$ MPa(3) À 5×10^8 ciclos em teste tipo R.R.Moore

(4) ASM INTERNATIONAL, 2002

FONTE: Southwire Company, 1994; NBR 7270, 1988 e ASM INTERNATIONAL, 2002

2.3.2.2 Propriedades térmicas

As propriedades térmicas determinam o comportamento dos materiais quando submetidos a variações de temperatura, acontece tanto na fabricação quanto na utilização do material. O QUADRO 2.6 apresenta as principais propriedades térmicas dos fios de Alumínio 1350, do aço galvanizado e dos cabos condutores.

QUADRO 2. 6

Propriedades térmicas do fio de Alumínio 1350, fio de aço galvanizado e cabos condutores Penguin e Linnet

Designação	Ponto de fusão (°C)	Dilatação térmica (1/°C)
Fio de Alumínio 1350 – H19	660	$23,0 \times 10^{-6}$
Aço galvanizado	1350	$11,5 \times 10^{-6}$
Cabo condutor Penguin		$19,110^{-6}$
Cabo condutor Linnet		$18,910^{-6}$

FONTE: ALUMINUM ASSOCIATION, 1989

2.3.2.3 Propriedades elétricas

As propriedades elétricas determinam o comportamento dos materiais quando submetidos a passagem de uma corrente elétrica. O QUADRO 2.7 apresenta as principais propriedades elétricas dos fios de Alumínio 1350, do aço galvanizado e do cabo condutor completo.

QUADRO 2. 7

Propriedades elétricas do fio de Alumínio 1350, fio de aço galvanizado e cabos condutores Penguin e Linnet

Designação	Condutividade mínima % IACS (1)	Resistividade elétrica à 20°C (mm ² . Ω/km)	Resistência elétrica em CC à 20°C (Ω/km)
Fio de Alumínio 1350 – H	61,0	28,173	
Fio de Alumínio 1350 – O	61,8	32,84	
Aço galvanizado	8,0	215,52	
Cabo condutor Penguin			0,26761
Cabo condutor Linnet			0,16925

(1) Condutividade é medida em termos do recozimento do Cobre como estabelecido pela International Electro-Technical Commission como um Padrão Internacional de Cobre Recozido (IACS). Fio de Cobre comercial laminado a frio tem uma condutividade de 96,16% IACS.

FONTE: Southwire Company, 1994

2.4 Critérios de limite de resistência mecânica dos cabos condutores utilizados para projeto de Linha de Transmissão

Linhas de transmissão são projetadas para suportar elevados carregamentos de vento sem a ocorrência de colapso estrutural e rompimento de cabos condutores. Além disso, são operadas evitando-se a redução da resistência mecânica do cabo condutor e a ocorrência de flechas excessivas e quebra de fios de Alumínio. O projeto de uma linha de transmissão considera que o

cabo condutor irá perder aproximadamente 10% de sua resistência mecânica durante sua vida útil (SOUTHWIRE COMPANY, 1994).

2.4.1 Limites utilizados nos projetos de linha de transmissão na CEMIG

2.4.1.1 Carga máxima com vento máximo

O cálculo é feito utilizando-se temperatura ambiente igual a 10°C e vento igual a 110 km/h. Nesse caso, considera-se o cabo condutor novo.

2.4.1.2 Carga máxima sem vento

O cálculo é feito utilizando-se temperatura ambiente igual a 0°C sem vento. Nesse caso, considera-se também o cabo condutor novo.

2.4.1.3 Carga de maior duração

EDS - Everyday Stress

Condição em que o cabo condutor é submetido a maior parte do tempo de operação da LT. O cálculo é feito utilizando-se temperatura ambiente igual a 20°C sem vento. Nesse caso, considera-se que já ocorreu o creep metalúrgico do cabo condutor.

2.4.1.4 Carga limite inicial

O cálculo é feito utilizando-se temperatura do cabo condutor igual a 20°C sem vento. Nesse caso, considera-se também o cabo condutor novo.

2.4.1.5 Flecha mínima

O cálculo é feito utilizando-se temperatura do cabo condutor igual a 0°C sem vento. Nesse caso, considera-se também o cabo condutor novo.

2.4.1.6 Flecha máxima

O cálculo é feito utilizando-se temperatura do cabo condutor igual a 75°C sem vento. Nesse caso, considera-se que já ocorreu o creep metalúrgico do cabo condutor. Para o cabo condutor CAA 33,6 mm² – Sparrow considera-se a temperatura do cabo condutor igual a 60°C.

2.4.1.7 Condição de emergência

O cálculo é feito utilizando-se temperatura do cabo condutor igual a 100°C sem vento. Nesse caso, considera-se que já ocorreu o creep metalúrgico do cabo condutor.

2.4.2 Comparação do valor de carga máxima alcançada e valores das propriedades mecânicas

O QUADRO 2.8 apresenta os valores utilizados em projeto de linha de transmissão na CEMIG, conforme Cemig (1988).

QUADRO 2. 8

Valores de carga utilizados nos projetos de linha de transmissão da CEMIG

Cabo	Carga máxima com vento (MPa)	Carga limite inicial (MPa)	EDS (MPa)
Penguin	116,85	64,27	54,04
Linnet	124,94	68,72	57,79

O QUADRO 2.9 apresenta a comparação entre o valor de carga máxima utilizada em projeto e operação das linhas de transmissão da CEMIG e os valores das propriedades mecânicas dos cabos condutores.

QUADRO 2. 9

Comparação entre os valores de projetos de LT e propriedades mecânicas dos cabos condutores

Cabo	Carga máxima com vento (1) (MPa)	Resistência à tração (2)	
		MPa	(1)/(2)
Penguin	118,85	297	40 %
Linnet	126,34	316	40 %

2.4.3 Fluência metalúrgica – creep utilizada

Para o cálculo da flecha máxima dos cabos condutores nos projetos de linha de transmissão da CEMIG, utiliza-se a fluência metalúrgica que ocorreria em 10 anos de operação da LT. Visando facilitar o projeto executivo transforma-se a fluência metalúrgica em equivalente térmico do creep, ou seja, soma-se o equivalente térmico à temperatura do cabo condutor para cálculo da flecha máxima, nesse caso 75°C.

Para o cabo condutor Penguin tem-se um equivalente térmico do creep igual a 23°C e para o Linnet igual a 28°C (CEMIG, 1988).

2.5 Vida útil de cabos condutores

Três fatores governam a operação de LT em condições de emergência: alturas de segurança, perda de resistência do condutor e a capacidade das ferragens operarem satisfatoriamente à alta temperatura (HARVEY, 1972).

Os fatores que determinam a vida útil de cabos condutores são:

- temperatura de operação dos cabos condutores e tempo de exposição a esta temperatura;
- composição química e propriedades físicas dos fios que compõem o cabo;
- processos de fabricação dos fios;
- tratamentos térmicos dos fios e durante fabricação dos cabos condutores;
- redução da seção transversal durante produção dos fios;
- fadiga devido a vibração eólica e tracionamento dos cabos condutores.

A resistência do Alumínio e ligas de Alumínio pode ser aumentada pelo trabalho a frio, tratamento térmico ou ambos. O processo de endurecimento, encruamento, aumenta a tensão e resistência de escoamento e reduz o alongamento e a condutividade da liga.

2.6 Vida útil em função da fadiga devido à vibração eólica

A vibração eólica ocorre em linhas de transmissão com condutores singelos, 01 condutor/fase, ou múltiplos, 02 ou mais condutores/fase, submetidas a vento predominantemente laminar, conforme mostrado no QUADRO 2.10.

QUADRO 2. 10
Movimentos induzidos pelo vento

Características	Vibração eólica
Tipo de LT afetada	Todas
Faixa de frequência	3 a 150 Hz
Faixa de amplitude (em pu do diâmetro do cabo)	0,01 a 1
Condições ambientes que favorecem: Tipo de vento Velocidade do vento Superfície do cabo	Laminar 1 a 7 m/s (3,6 a 25 km/h) Nua ou com gelo uniforme
Condições de projeto que influenciam	Tensão de esticamento, autoamortecimento dos cabos, uso de amortecedores, armaduras
Danos: Tempo aproximado para ocorrência Causas diretas Componentes mais afetados	2 meses a mais de 20 anos Falha devido à fadiga Cabos condutores e pára-raios

FONTE: FURTADO, 2001

Nessas condições o escoamento do vento é perturbado pelo condutor, com a formação de vórtices que causam variação de pressão nas proximidades do condutor, o qual é alternadamente solicitado para cima e para baixo, a uma frequência proporcional à velocidade do vento.

A forma em que se dará a perturbação depende do número de Reynolds,

$$Re = \frac{v \cdot d_c}{\nu} \quad (2.2)$$

Onde v é a velocidade do fluido, d_c é o diâmetro do cilindro e ν é a viscosidade cinemática do fluido, considera-se o condutor como um cilindro de seção circular.

Se o número de Reynolds for muito baixo ($Re < 1$) não há formação de vórtices ou turbulências, com o aumento do número de Reynolds ($1 < Re < 40$) começa a ocorrer a recirculação de fluido, com formação de um par de vórtices a sotavento (jusante), um acima e outro abaixo da linha média do cilindro (cabo condutor). À medida que o número de Reynolds aumenta, os vórtices começam a se desprender do cilindro assim que se formam. Isto cria uma esteira de vórtices a sotavento do cilindro conhecida como “esteira de Von Karman” como mostrado na FIG.2.6. A formação e o desprendimento de vórtices formam zonas de alta e baixa pressão, que solicitam o cilindro alternadamente para cima e para baixo, passando este a vibrar.

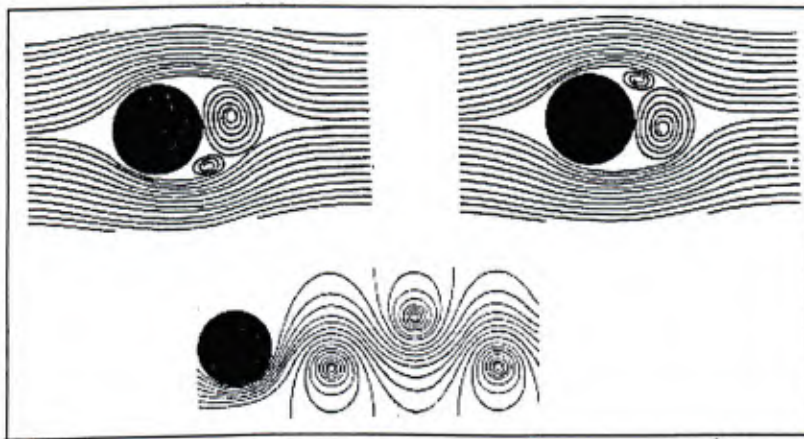


FIGURA 2. 6 – Formação de vórtices próximo ao condutor

FONTE: FURTADO, 2001

As velocidade de vento entre 1 e 7 m/s (3,6 e 25 km/h) são as mais propícias a provocar vibrações devido a:

- abaixo de 1m/s não há energia suficiente para sustentar as vibrações;
- acima de 7 m/s o fluxo de vento tende a ser turbulento e a formação de vórtices aperiódicas;
- altas velocidades de vento causam altas frequências, que são associadas a altos níveis de autoamortecimento interno do condutor.

Após se propagar como ondas viajantes as vibrações eólicas se estabelecem como ondas estacionárias, conforme FIG.2.7.

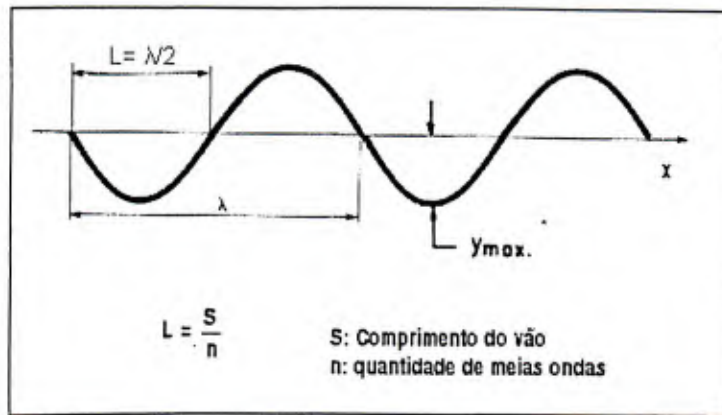
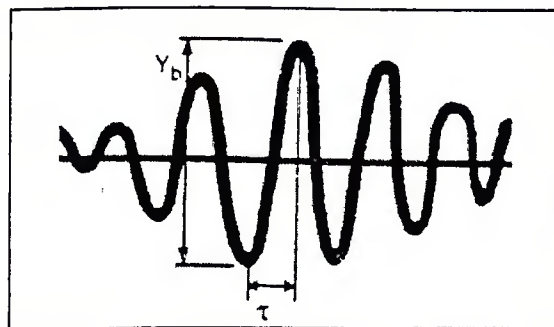


FIGURA 2. 7 – Onda estacionária

FONTE: FURTADO, 2001

A variação que se observa na amplitude de vibração é devida ao efeito combinado de duas ondas de frequência e amplitude muito próximas, que se somam, aumentando ou diminuindo a amplitude total como mostrado na FIG.2.8. Este efeito é conhecido como **batimento**. O fenômeno batimento é tão comum na vibração de condutores que raramente são observados registros com amplitude uniforme.

FIGURA 2. 8 – Amplitudes máximas de vibração pico a pico (y_b)

FONTE: FURTADO, 2001

A FIG.2.9 mostra um trecho de um registro contínuo de vibração de um vão de linha aérea de transmissão, sendo raro o batimento de duas frequências. O comum, são registros mostrando combinação de três ou mais ondas, como o ilustrado na FIG.2.10. Uma explicação plausível para a simultânea excitação de duas frequências separadas é a variação da velocidade do vento ao longo do vão (FURTADO, 2001).

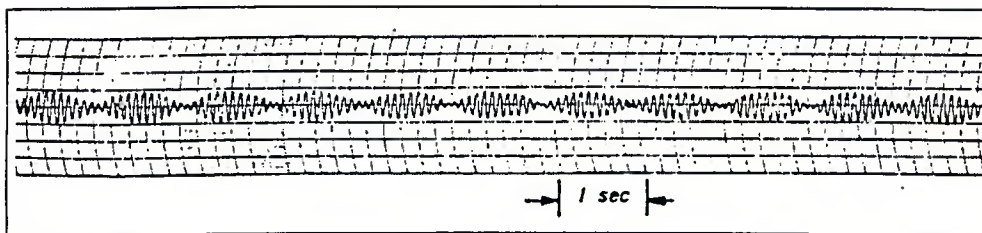


FIGURA 2. 9 – Forma de onda de vibração-batimento com 2 frequências

FONTE: EPRI, 1979

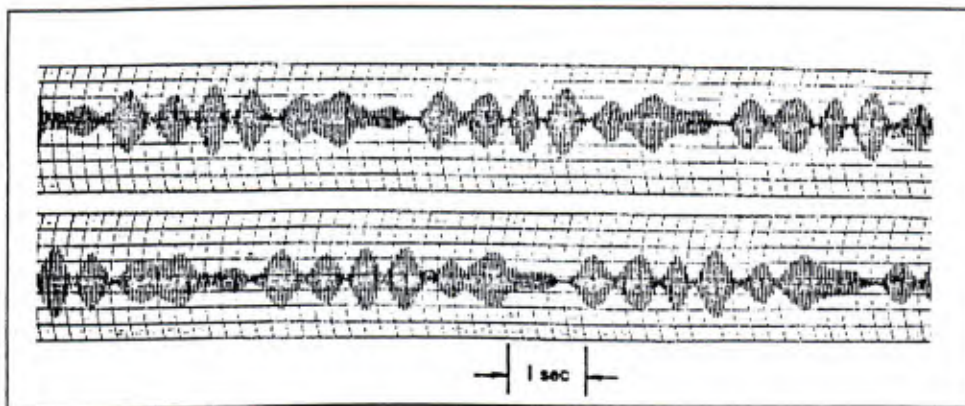


FIGURA 2. 10 – Forma de onda de vibração-batimento com mais de 2 frequências

FONTE: EPRI, 1979

A amplitude de vibração é determinada pela energia transmitida continuamente pelo vento ao condutor sendo crescente até que a energia fornecida pelo vento seja igualada pela energia dissipada por amortecimento. O amortecimento das vibrações ocorre internamente ao condutor - autoamortecimento, nas estruturas, cadeias de isoladores, ou em dispositivos colocados na LT especificamente para amortecer as vibrações.

O autoamortecimento depende da amplitude e frequência de vibração, da tensão de esticamento e das características do condutor: quantidade e dimensões dos fios e relação Alumínio/aço nos condutores CAA.

2.6.1 Influência da topografia e do regime dos ventos

A topografia do terreno atravessado pela linha de transmissão exerce considerável influência na determinação do nível de vibração, qualquer obstáculo que ajude a criar turbulência no vento que

atinge os condutores, contribui para reduzir a severidade das vibrações. Dessa forma, as condições mais severas são encontradas em linhas que atravessam vastas regiões planas ou vales de vegetação rasteira ou estão próximas a superfícies de água. Na classificação dos terrenos conforme mostrada no QUADRO 2.11, a predisposição a vibrar da LT cresce de D para A.

QUADRO 2.11
Classificação do terreno conforme IEC

Tipo	Descrição
A	Vastas extensões de água, áreas costeiras planas, desertos planos
B	Terreno aberto com poucos obstáculos (pastagens, campos cultivados), com poucas árvores e construções (terreno ondulado)
C	Numerosos pequenos obstáculos, tais como cercas vivas, pequenas árvores, construções
D	Área urbanizadas, terrenos com muitos obstáculos tais como árvores altas ou construções

FONTE: CEMIG, 1988

2.6.2 Influência das características da Linha de Transmissão

A tendência do condutor a vibrar aumenta com o aumento da **tensão de esticamento, H**, como consequência dos seguintes efeitos da tração sobre o autoamortecimento interno do condutor:

- sendo o valor da frequência de vibração invariável com a tensão, um aumento desta corresponde uma redução no número de meias ondas, n , no vão. A redução de n corresponde a um aumento proporcional do comprimento da meia onda, L , a uma menor flexão do cabo para uma mesma amplitude de vibração e a um decréscimo correspondente no movimento relativo dos fios e na potência autodissipada, como pode ser visto na FIG.2.11;
- as tensões de esticamento mais altas tendem a fazer os fios individuais vibrar em sincronismo, reduzindo sua fricção e a potência dissipada internamente no condutor.

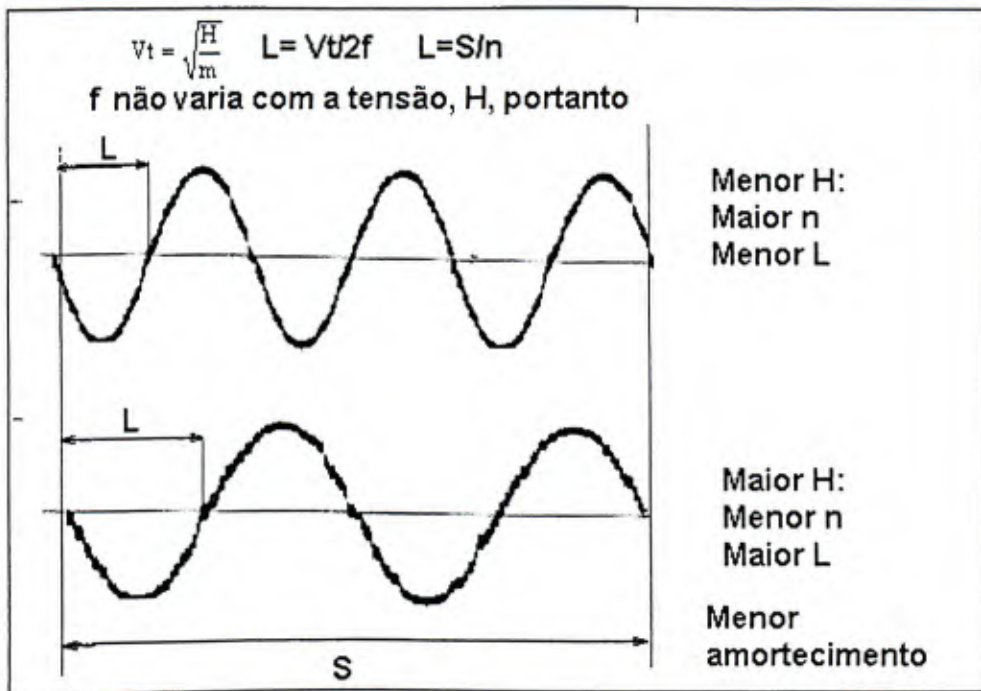


FIGURA 2. 11 – Variação do comprimento de meia-onda (L) com o aumento da tração

FONTE: FURTADO, 2001

O autoamortecimento dos condutores é maior nas meias ondas que ficam nas **extremidades de cada vão**, pois nesses pontos é maior a sua flexão. Há também sempre uma dissipação adicional nas extremidades dos vãos, devido ao movimento das ferragens de suporte e das estruturas, dessa forma, a dissipação por unidade de comprimento do condutor é maior em vãos menores e a intensidade de vibração tende a crescer com o aumento do comprimento dos vãos.

2.6.3 Resistência à Fadiga dos cabos condutores

O dano mais comum causado por vibrações eólicas em linhas de transmissão aéreas é o rompimento de fios individuais do condutor por fadiga, que 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 (CEMIG, 1995). A ruptura de fios é mais comum no interior ou nas proximidades de grampos de suspensão, pois em outros dispositivos tais como grampos de ancoragem, espaçadores e emendas, sempre existe alguma mobilidade vertical (CEMIG, 1988). As vibrações também causam outros problemas nas LT dentre os quais pode-se citar: afrouxamento de ferragens tais como grampos, parafusos ou porcas

das estruturas, pinos dos isoladores, ruptura por fadiga de isoladores e ruptura por fadiga de componentes de estruturas.

A severidade dos danos, em termos de fios rompidos, é função da amplitude de vibração e do número de ciclos acumulados, no caso dos condutores de Alumínio com alma de aço, CAA, pode ocorrer a ruptura de todos os fios de Alumínio restando somente a alma de aço, sendo comum neste caso, o recozimento do aço devido ao aquecimento pela corrente elétrica e o conseqüente rompimento total do condutor. Nos condutores CAA com mais de uma camada de fios de Alumínio é mais freqüente a ruptura dos fios das camadas intermediárias. Uma explicação para este fato é que, apesar dos esforços dinâmicos serem teoricamente máximos nos fios das camadas externas do condutor, estes estão submetidos à abrasão apenas na sua face interna, enquanto os das camadas intermediárias sofrem abrasão em toda sua superfície como mostrado na FIG.2.12.



FIGURA 2. 12 – Danos por fadiga em linhas aéreas de transmissão
FONTE: FUTADO, 2001

Um fator que influencia significativamente a resistência a fadiga dos condutores é a abrasão causada pelos pequenos movimentos relativos dos fios (“fretting”) que provocam a mútua remoção de material. Esse material finamente dividido reage com o oxigênio do ar formando óxido de Alumínio, composto de maior dureza que o próprio metal, que acelera a taxa com que os fios são desgastados. O óxido de Alumínio produzido pela abrasão pode ser visto sob a forma de

um fino pó preto na superfície externa dos condutores e armaduras preformadas, especialmente nas proximidades dos grampos de suspensão, a existência deste pó é uma boa indicação da falha nas camadas internas do condutor (EPRI, 1979).

Os esforços dinâmicos nos condutores podem ser medidos diretamente através de medições de deformação utilizando “straing gages” ou calculados à partir de medições de amplitude de vibração, o que é mais comum. Nesses cálculos o condutor é tratado como uma barra rígida submetida à tensão com o propósito de determinar a sua curvatura na saída do grampo causada pela vibração. A FIG.2.13 mostra a variação da tensão dinâmica medida pelos vibrógrafos ao longo do cabo.

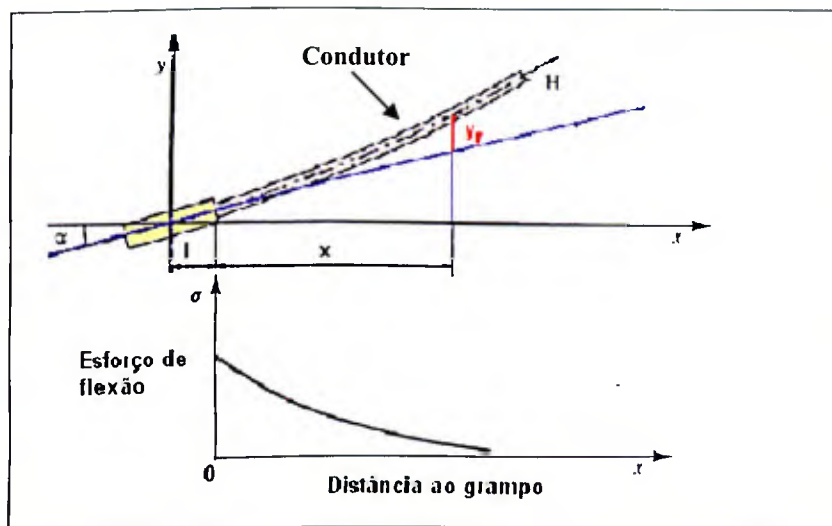


FIGURA 2. 13 – Variação da tensão dinâmica ao longo do cabo condutor
 FONTE: FUTADO, 2001

A relação entre os esforços dinâmicos, S , e a amplitude de vibração, y_a , é dada por:

$$S = K \cdot y_a \quad (2.3)$$

O valor de K (N/mm^3) é determinado a partir das características do cabo e da tensão de esticamento, de acordo com:

$$K = \frac{de.Ee.p^2}{4.(e^{-p.x} - 1 + p.x)} \quad (2.4)$$

Onde d_e é o diâmetro dos fios da camada mais externa do cabo, E_e é o módulo de elasticidade do Alumínio e x é a distância entre o sensor do medidor de vibração e o grampo.

$$p = \sqrt{\frac{H}{EI}} \quad (2.5)$$

Onde H é a componente horizontal da tração de esticamento do cabo condutor e EI é o módulo de rigidez.

$$EI = ns.E_s \frac{\pi.d_s^4}{64} + na.E_a \frac{\pi.d_a^4}{64} \quad (2.6)$$

Onde ns é o número de fios de aço, E_s é o módulo de elasticidade do aço, d_s é o diâmetro dos fios de aço, na é o número de fios de Alumínio, E_a é o módulo de elasticidade do Alumínio e d_a é o diâmetro dos fios de Alumínio.

A FIG.2.14 mostra a variação da tensão dinâmica com a tensão de esticamento de maior duração (EDS) para vários condutores caracterizados pelo seu diâmetro e rigidez à flexão. A tensão dinâmica tende a aumentar com a tensão de esticamento, ou seja, esta tensão tem dois efeitos nocivos na fadiga dos condutores:

- reduz o autoamortecimento, aumentando o nível de vibração;
- aumenta o fator de proporcionalidade entre a tensão dinâmica e a amplitude de vibração.

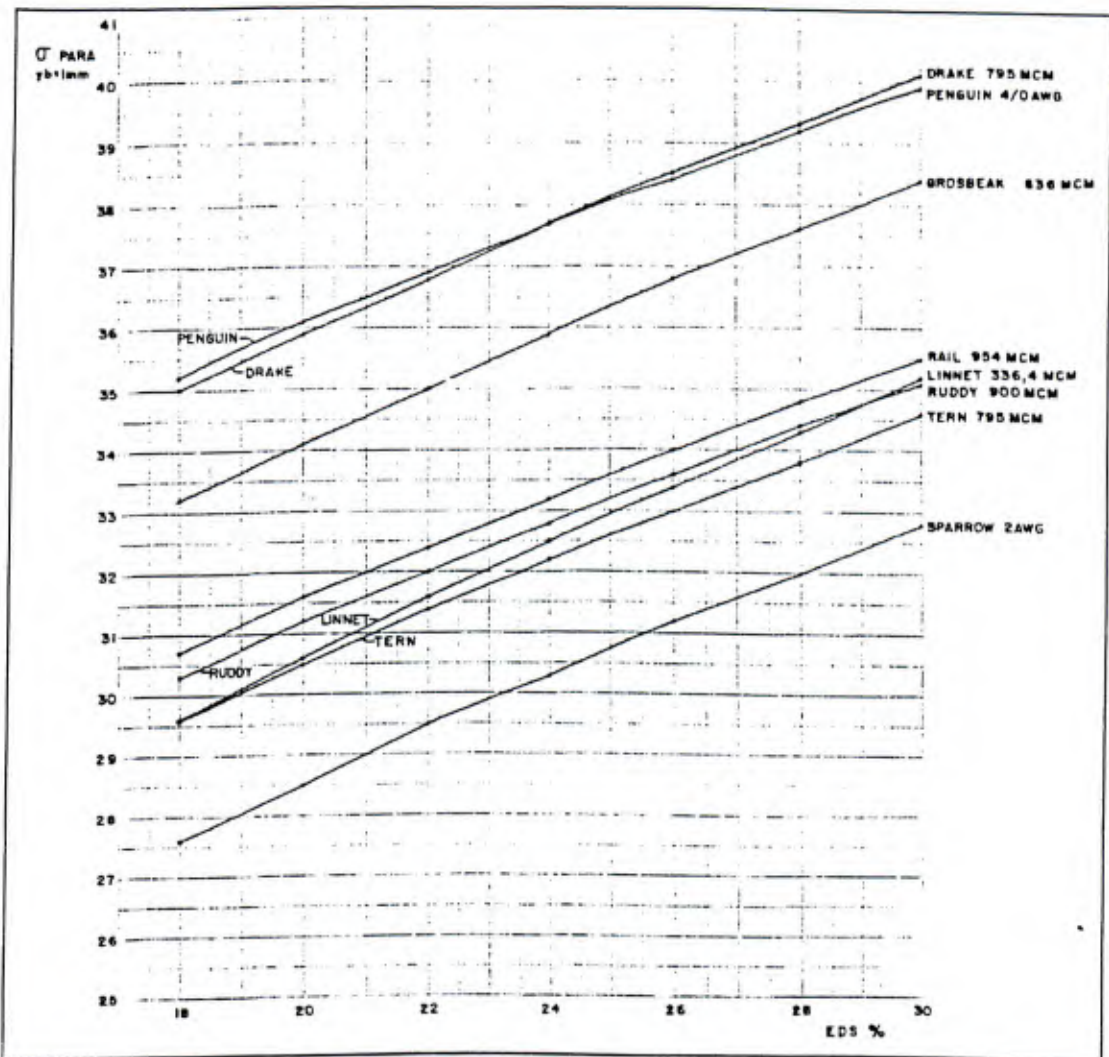


FIGURA 2. 14 – Tensão dinâmica em função do EDS e do diâmetro do condutor

FONTE: CEMIG, 1988

2.6.3.1 Limites de resistência à fadiga – Curvas S-N

Os limites de resistência à fadiga são determinados em ensaios de laboratório, nos quais a vida útil dos condutores, em número de ciclos, é determinada em função da intensidade de vibração.

As curvas obtidas nos ensaios são conhecidas como curvas de fadiga, ou curvas de Wöhler. Apresentam no eixo das ordenadas o esforço dinâmico - S, geralmente em MPa, e no eixo das abscissas, em escala logarítmica, a vida útil em ciclos - N.

A vida útil é considerada como o número de ciclos necessários para a ruptura de 10% dos fios do cabo ou de 3 fios, prevalecendo o menor valor (ELECTRA, 1985).

2.6.3.2 Limite de Segurança da CIGRÉ

A FIG.2.15 apresenta a curva limite de segurança, **Safe Border Line**, proposta pelo Comitê de Estudos de Linhas Aéreas - SC 22, da CIGRÉ, como uma estimativa conservadora da vida útil de cabos CAA e CALA.

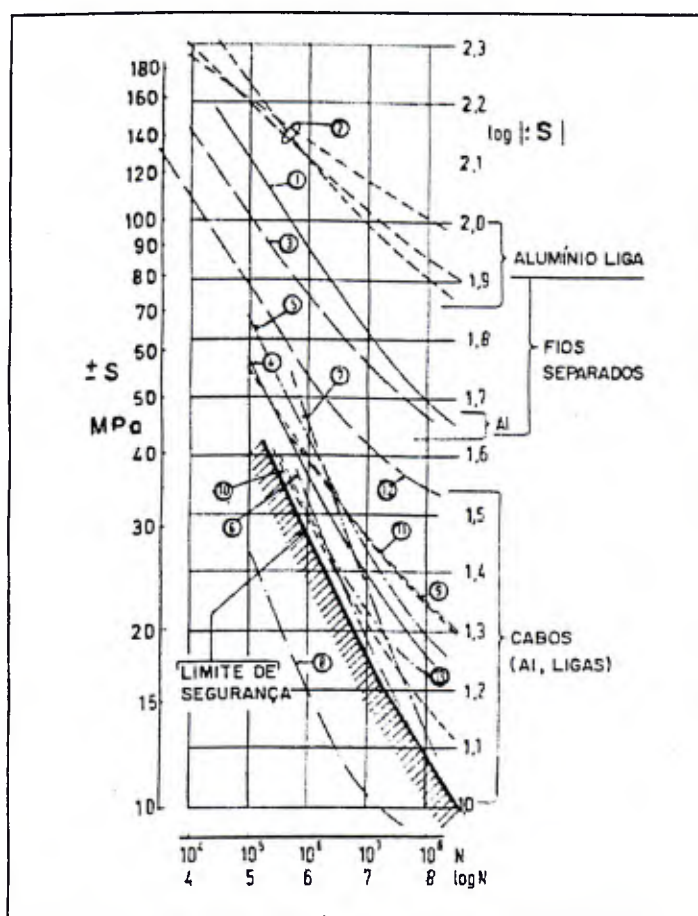


FIGURA 2. 15 – Resultados de ensaios compilados pelo CIGRÉ

FONTE: Electra, 1985

2.6.3.3 Limite de Segurança do EPRI

Para valores de N muito altos, S tende assintoticamente a um valor de tensão dinâmica chamado **limite de resistência à fadiga**, que garante uma vida útil muito extensa para os cabos. Resultados de ensaios compilados em EPRI (1979), sugerem para os cabos CAA os limites de resistência mostrados no QUADRO 2.12. Para cabos com mais de uma camada de fios de Alumínio, como o Linnet, o limite de resistência à fadiga é de 8,5 MPa. À partir destes limites é possível estabelecer amplitudes máximas admissíveis de vibração para cada cabo.

QUADRO 2.12
Classificação do terreno conforme IEC

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

FONTE: EPRI, 1979

2.6.3.4 Limite de Segurança da CEMIG

Em 1997 a CEMIG e o CEPEL realizaram uma série de ensaios de fadiga em cabos condutores (CASTILHO, 1999), levando em conta métodos e aparelhagens recomendados pela CIGRÉ. Tendo em vista a longa duração e o alto custo dos ensaios as seguintes limitações de ordem prática e econômica foram consideradas:

- as curvas foram levantadas apenas para o cabo CAA 170,5mm² - Linnet, tendo em vista sua importância para o sistema CEMIG, e o fato de ser um dos cabos que mais apresentam problemas de vibração e fadiga;
- foram levantados nove pontos da curva de fadiga. Estes pontos ficam na parte da curva onde maiores tensões causam a ruptura mais rápida dos fios que compõem o cabo;
- cada ponto da curva foi obtido a partir de ensaios em uma amostra.

Através de análise de regressão, foi determinada a Equação que melhor representava os resultados obtidos nos ensaios, ou seja,

$$N = (400/S)^{5.8} \quad (2.7)$$

Onde N é a vida útil em ciclos e S é a tensão dinâmica.

Seu gráfico é mostrado na FIG.2.16, que também inclui uma comparação com o “Safe Border Line” da CIGRÉ.

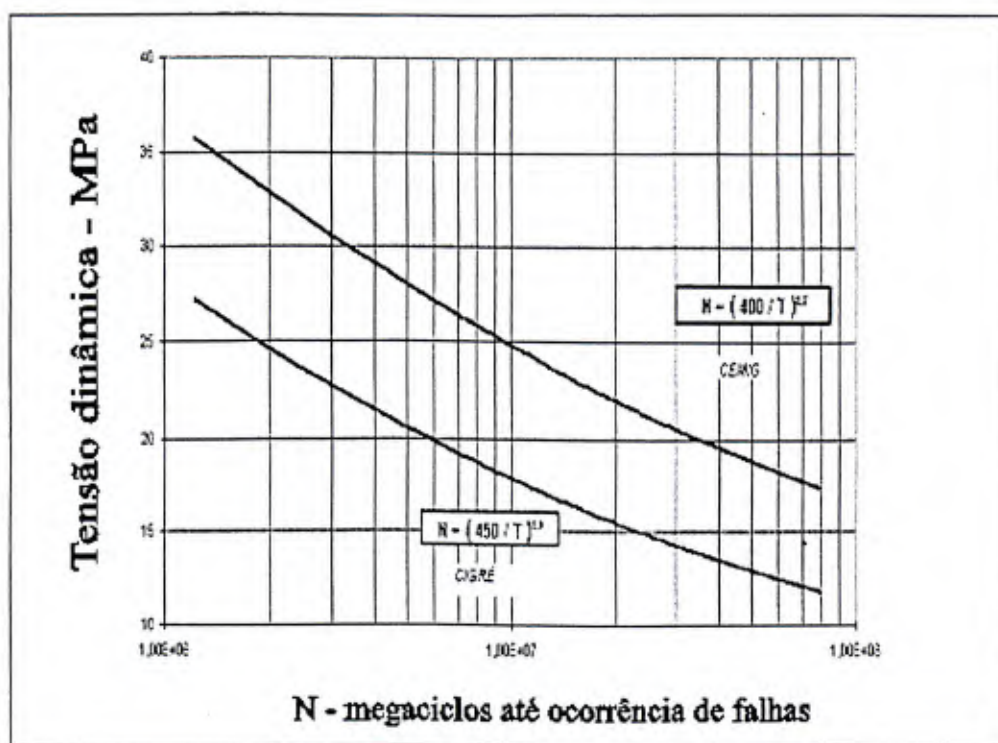


FIGURA 2. 16 – Curva de fadiga obtida no ensaio comparada com a “Safe Border Line ” da CIGRÉ
 FONTE: CASTILHO, 1999

2.6.3.5 Aplicação das curvas S-N – Teoria de Miner

Durante sua vida útil os condutores estão sujeitos a uma complexa gama de solicitações, compostas de vários níveis de vibração, superpostos à tensão estática de esticamento, cada nível tendo diferente número de ciclos durante a vida do condutor. É normalmente aceito que a deterioração dos materiais é cumulativa, de forma que é possível definir uma função “D” que descreva a deterioração gradativa do material sujeito a vibração. Esta função assume valores cuja

acumulação durante a vida do material aumenta desde zero até atingir o valor 1, no instante de completa fadiga, ruptura.

De acordo com a teoria de Miner a função “D” é linear, independe da ordem em que as diferentes tensões são aplicadas e é válida para qualquer nível de tensão de vibração (BRUNAIR, 1987).

A função “D” é dada por:

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (2.8)$$

A completa fadiga ou ruptura ocorre quando:

$$S_m = \sum D_i = \sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (2.9)$$

Onde,

n_1, n_2, \dots, n_i é a quantidade de ciclos quando se verificam no campo os níveis de tensão S_1, S_2, \dots, S_m , respectivamente;

N_1, N_2, \dots, N_i é a quantidade de ciclos na curva S-N correspondentes a S_1, S_2, \dots, S_m ;

S_1, S_2, \dots, S_i são os diferentes níveis de tensão dinâmica a que os condutores estão sujeitos no campo.

Na realidade, ensaios realizados para comprovar a teoria de Miner tem mostrado que o valor de S_m varia entre 0,5 e 2 de acordo com o material e a estrutura mecânica ensaiada, no entanto, considera-se geralmente que S_m é igual à unidade.

2.6.3.6 Estimativa de vida dos cabos condutores

Em Electra, 1979 é proposto um método para estimar a vida do condutor utilizando-se a teoria de Miner. Este método considera econômica e tecnicamente satisfatória uma **vida média** para o condutor da ordem de **30 anos**. Desta forma, em condições ideais, submetido a vibrações cujas

intensidade estivessem exatamente no limite máximo de segurança da FIG.2.17, a somatória da Equação 2.9 deveria atingir o valor S_m após 30 anos. Com maior ou menor grau de vibração, a duração da vida, V_u , do condutor poderia ser estimada de:

$$V_u = \sum \frac{n_i}{N_i} = S_m \cdot 30 \text{ anos} \tag{2.10}$$

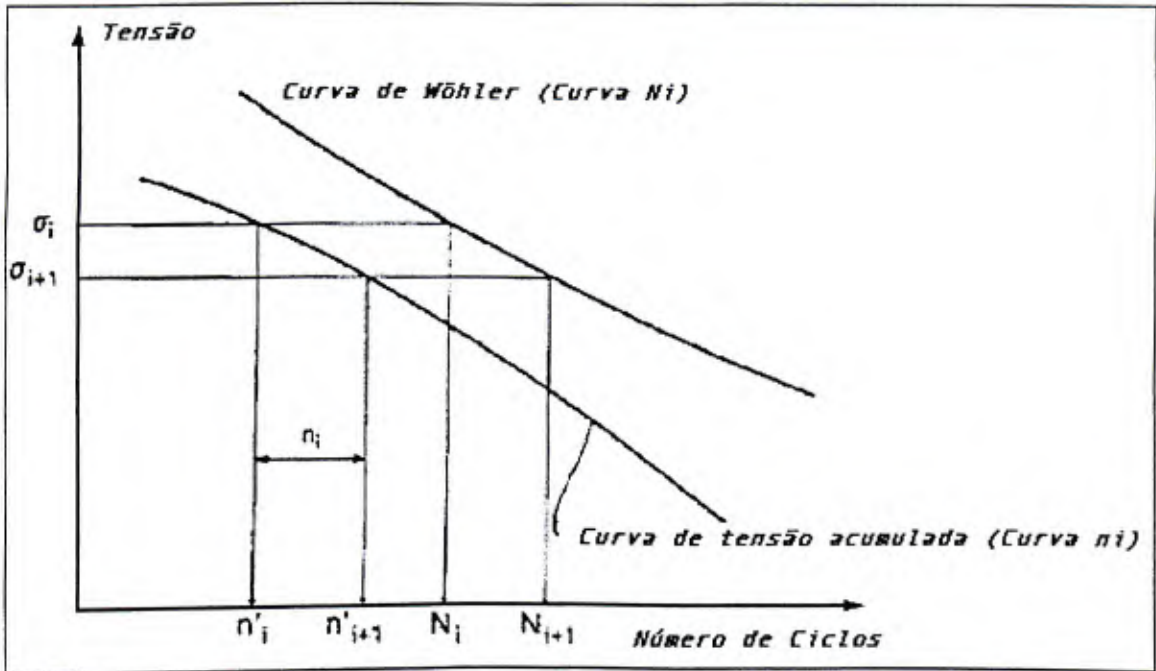


FIGURA 2. 17 – Método de cálculo para determinar a vida útil de cabos condutores
 FONTE: ELETRA, 1989

Considerando $S_m=1$ tem-se

$$V_u = \frac{30 \text{ anos}}{\sum \frac{n_i}{N_i}} \tag{2.11}$$

A curva de tensão acumulada versus ciclos acumulados, como mostrado na FIG.2.17, é obtida da seguinte forma:

- a – Calcula-se os níveis de tensão dinâmica (S_i) pela fórmula de Poffenberger-Swart à partir das medições de vibração (frequência e amplitude);
- b – para cada nível de tensão S_i , determina-se a quantidade de ciclos de vibração;
- c – traça-se a curva de ciclos acumulados.

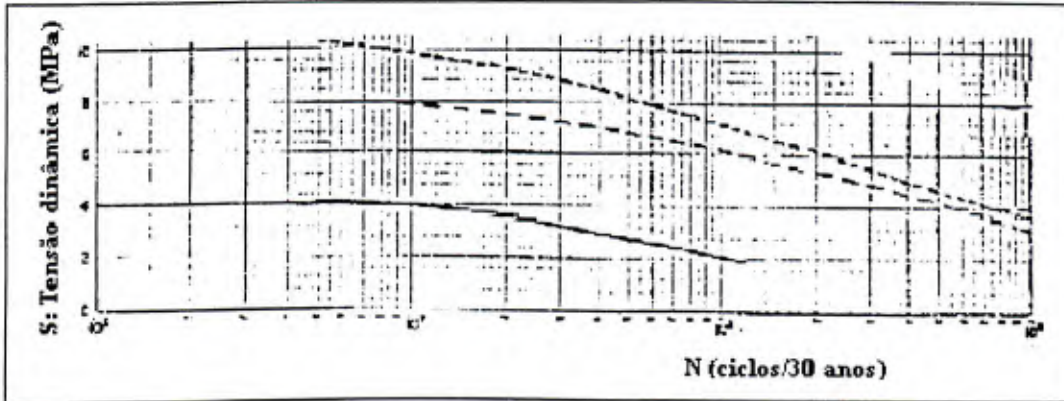


FIGURA 2. 18 – Curva de ciclos acumulados

FONTE: FURTADO, 2001

2.7 Vida útil em função da temperatura de operação

Um dos maiores problemas encontrados pela Engenharia de cabos aéreos é na estimativa da perda em resistência mecânica de condutores causado por longos e curtos períodos de anos de exposição à elevadas temperaturas (ELECTRA n° 162, 1995).

2.7.1 Temperatura de operação

Perda de resistência à tração em cabos condutores é resultado do recozimento nos fios de Alumínio pelo alívio da tensão mecânica nas bordas dos grãos e reticulado cristalino ocorrido durante o trabalho a frio. A extensão desta perda é em função da composição do material, sua temperatura de operação, o tempo de exposição à temperatura de operação e pode também depender da tensão de esticamento. O Alumínio começa a perder resistência a tração quando operado a temperatura acima de 93°C (IEEE, 2001).

Quando os fios são aquecidos em serviço, dois processos ocorrem: **recuperação e recristalização**. Exposição à temperatura acima de 90°C, mas abaixo da temperatura de recristalização da liga, reduzirá a resistência por um processo chamado **recuperação**. O efeito da recuperação, a várias temperaturas e tempos sobre a resistência à tração do condutor de Alumínio, deve ser conhecido para se avaliar os resultados das condições de operação em emergência. Durante a recuperação, algumas propriedades não-mecânicas do metal, como resistividade, podem alterar e um pouco de pequenos grãos ($< 2\mu\text{m}$) grãos são formados. Na recuperação é fornecida energia térmica suficiente para que as deslocamentos se rearranjem em configurações de menor energia, a resistência mecânica do material metálico deformado a frio diminui ligeiramente, mas a ductilidade aumenta de modo significativo (MORGAN, 1979).

Durante a **recristalização**, ocorre a nucleação e crescimento de novos grão livres de deformação, e após um intervalo de tempo suficientemente longo à temperatura de recristalização a estrutura deformada a frio é totalmente substituída por uma estrutura de grão recristalizado. Durante este processo, o aumento da ductilidade e a redução da resistência a tração são observados. Geralmente não há entendimento sobre a velocidade de perda de resistência à tração durante a recristalização (MORGAN, 1979).

Fios trefilados de tarugo Properzi retêm levemente mais resistência após exposição à elevadas temperaturas que fios trefilados de tarugos laminados a quente, mas o efeito é pequeno. A taxa a qual um condutor trefilado perde resistência a tração depende de um número de fatores. A perda aumenta com o aumento da redução na área da seção transversal, aumento de temperatura, aumento de duração de tempo e, provavelmente, aumento de tensão (MORGAN, 1979).

2.7.2 Redução de seção transversal dos fios

A maioria dos fios é trefilada de 9,52mm (3/8”), retrefilado sem recozimento intermediário. Assim, fios de diâmetro de 2,54mm (0,1”) serão trabalhados a frio consideravelmente mais e têm resistência a tração maior que o fio de diâmetro 3,18mm (0,18”), entretanto, ambos são classificados como têmpera H19 (HARVEY, 1972).

Os limites de grão aumentam a resistência mecânica dos metais e ligas, uma vez que atuam como obstáculo ao movimento das deslocações, exceto a elevadas temperaturas, quando se tornam regiões frágeis. Devido a deformação a frio, são criadas novas deslocações que interagem com as previamente existentes. Como a densidade de deslocações aumenta com a deformação, o movimento das deslocações através da “floresta de deslocações” torna-se cada vez mais difícil, e por isso, o metal encrua, ou seja, endurece por deformação com o aumento da deformação a frio (SMITH, 1998).

Para uma dado tempo de exposição, um condutor feito de fios de pequenos diâmetros perderá mais resistência que um condutor com fios de diâmetro maior.

2.7.3 Perda de resistência mecânica de fios individuais de Alumínio em função da temperatura

A FIG.2.19 mostra o “percentual remanescente de resistência inicial” como uma função da duração de exposição à elevada temperatura para o fio de Alumínio 1350-H19. Os testes de tração foram realizados a temperatura ambiente após exposição a temperatura indicada.

O método mais usado de cálculo da perda de resistência devido ao recozimento dos fios de Alumínio é recalculá-la a resistência mecânica total usando a resistência mecânica do Alumínio recozido. Por exemplo, considerar que durante sua vida útil de 30 anos, um condutor CAA 402,8mm² - Drake é exposto a um equivalente efeito tempo-temperatura de 500 horas de operação à 150°C, a FIG.2.19 indica que a resistência à tração dos fios de Alumínio poderia reduzir à 77% do valor inicial. No caso desse cabo, o decréscimo corresponde a aproximadamente 23% de redução da resistência mecânica a tração dos fios de Alumínio e 11% do cabo condutor completo (SOUTHWIRE COMPANY, 1994).

Os limites de grão aumentam a resistência mecânica dos metais e ligas, uma vez que atuam como obstáculo ao movimento das deslocações, exceto a elevadas temperaturas, quando se tornam regiões frágeis. Devido a deformação a frio, são criadas novas deslocações que interagem com as previamente existentes. Como a densidade de deslocações aumenta com a deformação, o movimento das deslocações através da “floresta de deslocações” torna-se cada vez mais difícil, e por isso, o metal encrua, ou seja, endurece por deformação com o aumento da deformação a frio (SMITH, 1998).

Para uma dado tempo de exposição, um condutor feito de fios de pequenos diâmetros perderá mais resistência que um condutor com fios de diâmetro maior.

2.7.3 Perda de resistência mecânica de fios individuais de Alumínio em função da temperatura

A FIG.2.19 mostra o “percentual remanescente de resistência inicial” como uma função da duração de exposição à elevada temperatura para o fio de Alumínio 1350-H19. Os testes de tração foram realizados a temperatura ambiente após exposição a temperatura indicada.

O método mais usado de cálculo da perda de resistência devido ao recozimento dos fios de Alumínio é recalcular a resistência mecânica total usando a resistência mecânica do Alumínio recozido. Por exemplo, considerar que durante sua vida útil de 30 anos, um condutor CAA 402,8mm² - Drake é exposto a um equivalente efeito tempo-temperatura de 500 horas de operação à 150°C, a FIG.2.19 indica que a resistência à tração dos fios de Alumínio poderia reduzir à 77% do valor inicial. No caso desse cabo, o decréscimo corresponde a aproximadamente 23% de redução da resistência mecânica a tração dos fios de Alumínio e 11% do cabo condutor completo (SOUTHWIRE COMPANY, 1994).

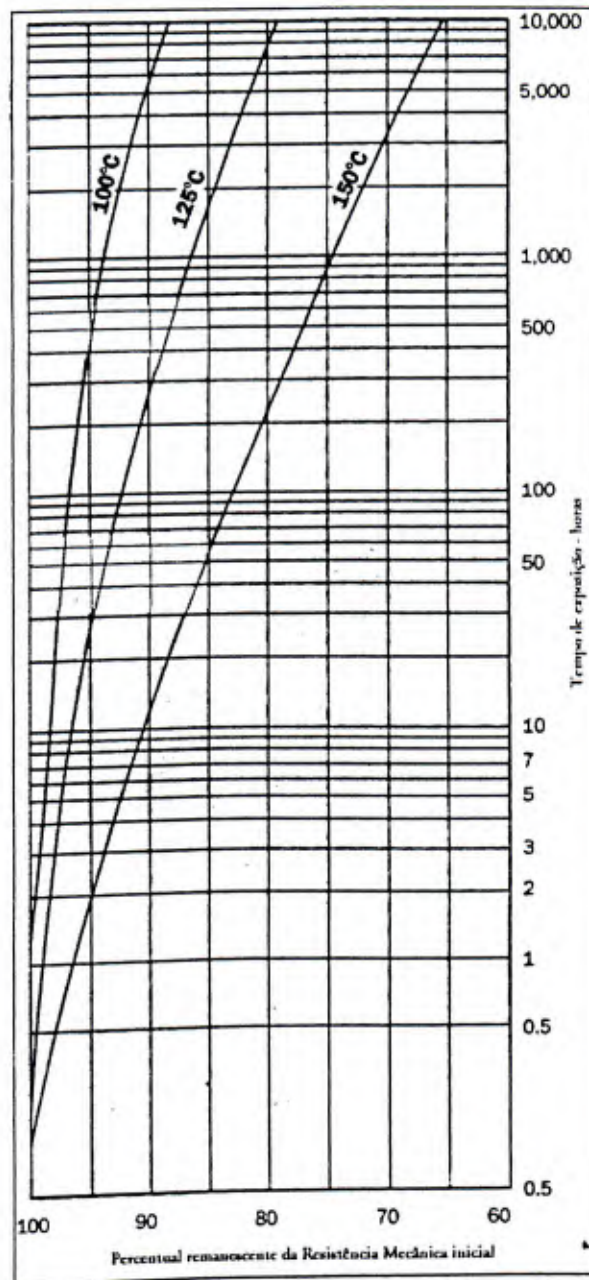


FIGURA 2. 19 – Relação tempo-temperatura para perda resistência do fio de Alumínio 1350-H19

FONTE: Southwire Company, 1994

2.7.4 Perda de resistência a tração do cabo condutor

O cálculo da vida útil, ou remanescente, de um cabo condutor considera o tempo de exposição do cabo as diversas temperaturas de operação, ou seja, a perda de resistência mecânica devido ao efeito cumulativo do recozimento dos fios de Alumínio.

Para o cálculo da resistência à tração remanescente dos cabos condutores CAA pode-se utilizar os modelos de HARVEY (1972) e de MORGAN (1979).

2.7.5 Modelo de Harvey

Para uma dada exposição, um condutor feito de fios de pequenos diâmetros perderá mais resistência que um condutor com fios de diâmetro maior. Foi definido que este efeito pode ser incluído no modelo parabólico, EQUAÇÃO 2.13, usando uma proporção de uma constante para o diâmetro do fio como um multiplicador para o expoente n.

2.7.5.1 Cabo condutor de Alumínio com alma de aço – CAA

$$RS = RS_{EC} \cdot \left(\frac{STR_{EC}}{STR_T} \right) + 100 \cdot \left(\frac{STR_{ST}}{STR_T} \right) \cdot 1,09 \quad (2.12)$$

$$RS_{EC} = (-0,240 \cdot T + 134) \cdot t^{(0,241 - 0,00254 \cdot T) / d} \quad (2.13)$$

Se $(-0,24T+134)$ for maior que 100 deverá ser assumido o valor 100.

Se $(0,241-0,00254 \cdot T)$ for maior que 0, deverá ser assumido o valor 0.

Onde RS é a resistência remanescente do condutor como um percentual da resistência inicial, RS_{EC} é a resistência remanescente do fio de Alumínio como um percentual da resistência inicial, STR_{EC} é a resistência inicial calculada dos fios de Alumínio EC, STR_{ST} é a resistência inicial calculada do núcleo de aço à 1% de alongamento, STR_T é a resistência inicial calculada do condutor, T é a temperatura de exposição, t é o tempo transcorrido de exposição e d é o diâmetro do fio de Alumínio.

O fator 1,09 no modelo CAA explica o aumento da transferência de carregamento para o núcleo de aço como um resultado de creep e alívio de tensão nos fios de Alumínio durante o aquecimento sob tensão. Ambos, creep e alívio de tensão residual, aumentam a extensão do Alumínio à falha, desse modo aumenta a extensão do núcleo de aço, por isso, a transferência de carregamento para o núcleo de aço (HARVEY, 1972).

2.7.6 Modelo de Morgan

Para o cálculo da perda de resistência pode-se utilizar as seguintes opções:

2.7.6.1 Para perdas (W) no intervalo: $0 < W \leq 15\%$

O cálculo é feito nas seguintes etapas:

(a) Cálculo do tempo de duração para causar 1% de perda de resistência

$$\ln \bar{t} = A_2 + B_2 \cdot T \quad (2.14)$$

$$A_2 = (T_r \cdot \ln \bar{t}_b - T_b \ln t_r) / (T_r - T_b) \quad (2.15)$$

Onde T_b é a temperatura base, t_r é a duração de tempo de referência, T_r é a temperatura à qual a duração t_r causa 1% de perda de resistência e \bar{t}_b e \bar{t} são os respectivos tempos de duração às temperaturas T_b e T para causar 1% de perda em resistência.

$$B_2 = (\ln t_r - \ln \bar{t}_b) / (T_r - T_b) \quad (2.16)$$

O tempo para causar 1% perda de resistência à tração à estas temperaturas e redução em área, R_a , igual a 80% é:

$$\bar{t}_1 = A_2 + B_2 T_1 \quad (2.17)$$

(b) Cálculo da perda total para redução em área em 80%

$$\sum W_{(80\%)} = \left[\left(\dots \left(\left(t_1 \cdot \bar{t}_2 / \bar{t}_1 \right) + t_2 \right) \bar{t}_3 / \bar{t}_2 + \dots t_{n-1} \right) \cdot \bar{t}_n / \bar{t}_{n-1} + t_n \right) / \bar{t}_n \right]^{C_2} \quad (2.18)$$

Onde,

C_2 é o coeficiente conforme QUADRO 2.13;

$t_1, t_2, t_3, t_n, t_{n-1}$ é o tempo de exposição à temperatura $T_1, T_2, T_3, T_n, T_{n-1}$;

$\bar{t}_1, \bar{t}_2, \bar{t}_3, \bar{t}_n, \bar{t}_{n-1}$ é o tempo necessário para causar 1% de perda de resistência à tração a temperatura $T_1, T_2, T_3, T_n, T_{n-1}$ e $R_a=80\%$, calculado conforme EQUAÇÃO 2.17.

QUADRO 2. 13
Constantes utilizadas nas equações

Constante	Cobre	Alumínio	Alumínio liga 6201
K_4	9	8,1	18
A_2	9,21	14,7	13,1
B_2	-0,064	-0,123	-0,0755
C_2	0,372	0,260	0,759
n_1	0,40	0,285	0,79
$W_a, \%$	41	56	60
A_3	-7,4	-8,3	-14,5
B_3	0,0255	0,035	0,060
K_{13}	11	9	18
A_4	$0,481 \times 10^{-14}$	$1,084 \times 10^{-14}$	$1,3000 \times 10^{-14}$
B_4	$3,646 \times 10^{-36}$	$2,778 \times 10^{-34}$	$7,995 \times 10^{-38}$
r	2,25	2,19	2,40

FONTE: MORGAN, 1979

(c) Perda total para redução de área desejada

$$\sum W = \exp[\ln W_{(R=80\%)} + K_4 \cdot \ln(R/80)] \quad (2.19)$$

Onde K_4 é o coeficiente dado no QUADRO 2.13 e R é a redução desejada em área do fio de Alumínio.

2.7.6.2 Para perdas (W) no intervalo: $0 < W < W_a$

Neste método, considera-se a perda fracionada de resistência $Y = (W/W_a)$, onde W_a é a perda de resistência no estado de recozimento pleno. É assumido que a taxa de perda de resistência é proporcional à taxa de recristalização, então $Y = X$, onde X é a fração recristalizada.

$$W = W_a [1 - \exp\{-\exp(k_{12}(T, R_a) + n_1 \ln t \dots)\}] \quad (2.20)$$

$$k_{12}(T, R_a) = A_3 + B_3 T + k_{13} \ln\left(\frac{R_a}{80}\right) \quad (2.21)$$

Onde n_1 , A_3 , B_3 e k_{13} são valores obtidos no QUADRO 2.13.

2.8 Estado da arte atual sobre estimativa de vida útil de cabos condutores

EM IEEE (2001) é apresentada uma equação para predição da resistência mecânica residual de cabos condutores para alta temperatura de operação que é a mesma descrita em 2.7.5.

Em LAVANDOSCKI (2004) é apresentado os resultados de estudos sobre o comportamento estrutural dinâmico e determinação de parâmetros de vida útil para cabos condutores de linhas de transmissão sujeitos a carregamentos eólicos. Utiliza-se o método de elementos finitos na elaboração de modelos de cabos para determinação das frequências naturais e modos de vibração dos cabos. A análise da resposta dinâmica determinou os níveis de tensões aos quais os cabos estão submetidos e, com tais resultados, foi possível estimar parâmetros de vida útil para o cabo

analisado. Foi definido um fator multiplicador para estimar a vida útil de cabos com armadura e o cálculo da vida útil é realizado conforme descrito em 2.6.3.

Em LAVANDOSCKI (2005) é analisado as propriedades mecânicas de cabos condutores CAA existentes e que serão alteados nas reformas das LT. Para determinação das propriedades mecânicas são realizados ensaios de tração e vibração, e avaliado também a influência da região de grampeamento nas propriedades mecânicas finais através de análise metalográfica utilizando microscopia ótica e eletrônica de varredura. Os resultados dos ensaio de tração indicaram que não há influência direta da região de grampeamento nos valores de carga de ruptura e alongamento dos condutores, os valores médios de carga de ruptura dos cabos usados foram cerca de 4% inferiores ao apresentados pelos cabos novos. Os ensaios de vibração foram realizados até 10^7 ciclos sem ocorrência de ruptura e as análises microestruturais mostraram a presença de fretting na camada mais externa e interna dos condutores.

Em MANNALA (2005) é apresentado o comportamento do módulo de elasticidade e coeficiente de dilatação térmica de cabos condutores a altas temperaturas objetivando identificar a influência destes parâmetros sobre o projeto eletromecânico das LT. São realizados ensaios de ruptura, tensão-deformação, dilatação térmica e fluência. É indicado a utilização do módulo de elasticidade e coeficiente de dilatação térmica obtido em laboratório em substituição aos valores tabelados, devido ao aumento da flecha dos condutores a temperaturas acima de 80°C. E como conclusão ressalta-se que a obtenção mais precisa destes parâmetros, em conjunto com a estimativa de perda de vida útil dos condutores, calculado conforme 2.7.5, permitirá a determinação da capacidade de transmissão com maior nível de confiabilidade, de forma a assegurar o desempenho esperado para os cabos e sem violação das distâncias de segurança.

Em LIU (2007) é apresentado um modelo integrado projetado e desenvolvido em função de cabos condutores de camada simples para investigar suas propriedades eletromagnéticas, térmicas e mecânicas baseado em um modelo unificado o qual foi inicialmente projetado para cabos CAA de 03 camadas de fios de Alumínio. São realizados experimentos para obter propriedades eletromagnéticas e térmicas sob várias condições mecânicas dos cabos Guinea, Raven e Penguin. Como conclusão foram feitas as seguintes observações: para cabos condutores de camada simples a relação R_{ac}/R_{dc} é considerável não devendo ser omitido a perda do núcleo de aço; o creep e a

deformação elástica decrescem com o aumento da corrente, a dilatação térmica aumenta com o aumento da corrente e a deformação total é em função da soma de todas as deformações, ou seja, a soma de creep, deformação “settling”, térmica e elástica; o creep é o fator determinante para o aumento da deformação com o tempo de duração, é função da tensão, temperatura e a quantidade de creep inicial. A discussão de tensão, deformação e tração tem significado prático porque a tração de projeto tradicional é uma percentagem da resistência à tração nominal por experiência, e não é um bom critério para novos condutores ou condutores sob diferentes condições. Desde que a falha do cabo CAA é relacionada com a deformação dos fios de Alumínio, deformação do Alumínio pode ser o melhor critério de projeto do que a tração do cabo condutor completo.

3 METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido em duas etapas:

- realização de ensaios mecânicos e elétricos em amostras de cabos condutores novos e de LT existentes e realização de ensaio em laboratório para definição do perfil térmico do cabo condutor novo;
- desenvolvimento de ferramenta computacional para alcançar os objetivos descritos no item 1.6.

As amostras de LT existentes foram utilizadas nos ensaios mecânicos e elétricos, com o objetivo de se definir suas características físicas atuais (cabo condutor, fios de Alumínio e fios de aço) e compará-las com as características de um cabo novo, definindo assim, a perda de resistência mecânica do cabo condutor. O QUADRO 3.1 mostra a relação das linhas de subtransmissão nas quais foram retiradas amostras.

QUADRO 3. 1
Identificação das LT onde foram retiradas amostras

Código da amostra	Linha de Transmissão			Temperatura de projeto (°C)
	Nome	Data		
		Energização	Retirada de amostras	
3	Pirapora - Montes Claros 2, 138 kV	01/1978	22 à 25/05/2003	
4	Várzea da Palma - Pirapora, 69 kV	1965 e alterada em 1986	12/2005	75
5	Mariana – Timbopeba, 138 kV	12/1992	07/2003	75
6	Barão de Cocais – Caeté, 69 kV	02/2003	12/2003	
7	Sete Lagoas 3 – Cominci, 138 kV	01/1972	18/07/2003	60

A codificação das linhas de subtransmissão onde foram retiradas amostras é definida no QUADRO 3.2.

QUADRO 3. 2

Identificação das LT onde foram retiradas amostras e tipo de cabo condutor

Código da amostra	Cabo condutor				
	Nome	Descrição	Tipo	Qtde de fios	
				Al	Aço
3	Pirapora - Montes Claros, 138 kV	Linnet	CAA 170,5 mm ²	26	7
4	Várzea da Palma - Pirapora, 69 kV	Penguin	CAA, 107 mm ²	6	1
5	Mariana - Timbopeba, 138 kV	Linnet	CAA 170,5 mm ²	26	7
6	Barão de Cocais - Caeté, 69 kV	Linnet	CAA 170,5 mm ²	26	7
7	Sete Lagoas 3 - Cominci, 138 kV	Linnet	CAA 170,5 mm ²	26	7
8	Cabo novo	Linnet	CAA 170,5 mm ²	26	7
9	Cabo novo	Penguin	CAA, 107 mm ²	6	1

Paralelamente, foram realizadas simulações computacionais utilizando-se a metodologia desenvolvida para o cálculo da vida útil e os dados e históricos térmicos das LT onde foram retiradas as amostras de condutores.

A correlação entre os resultados obtidos nos ensaios e nas simulações computacionais foi utilizada para validar a metodologia desenvolvida para o cálculo de vida útil de cabos condutores CAA.

A estimativa de vida útil calculada em função da temperatura de operação do cabo condutor foi a premissa básica utilizada para desenvolvimento da metodologia.

3.1 Realização de ensaios em laboratório

Os seguintes ensaios para definição das características físicas de amostras de cabos condutores novos e usados foram realizados:

3.1.1 Análise Química

Para fins de identificação dos principais elementos presentes nos fios de aço e Alumínio analisados, assim como para validação das diferenças encontradas nas propriedades de cada amostra, a análise química fornece a porcentagem encontrada no material dos elementos mensurados.

3.1.1.1 Método de Preparação das Amostras

Para preparação dos corpos de prova utilizados na análise química, os fios componentes dos cabos condutores foram fundidos através de um arco elétrico. Para isso, utilizou-se um equipamento de soldagem GTAW (Gás Tungsten Arc Welding). Antes da fusão dos fios de aço, a camada de zinco foi desbastada.

A FIG.3.1 mostra as amostras dos fios de aço e de Alumínio preparadas para a análise química.



FIGURA 3. 1 – Corpos de prova para análise química

3.1.1.2 Método para análise e equipamento utilizado

Os corpos de prova foram enviados para o Centro Tecnológico de Fundição Marcelino Corradi – SENAI/CETEF em Itaúna – MG para realização da análise, esta foi realizada por espectrometria de emissão ótica segundo a instrução técnica IT Lab 019 .

O equipamento utilizado foi um espectômetro de emissão ótica Spectrolab de identificação 98416, calibrado pelo fabricante.

3.1.2 Ensaio de Tração

3.1.2.1 Informações sobre o ensaio

O QUADRO 3.3 relaciona os dados nominais de tensão dos fios e o QUADRO 3.4 os dados nominais de tensão dos cabos.

QUADRO 3.3

Dados nominais dos fios de Alumínio e de aço

Material	Diâmetro (mm)	Tensão Mín. Ruptura (MPa)	Tensão de pré-carga (MPa)	Velocidade de pré-carga (mm/min)	Velocidade de ensaio (mm/min)
Alumínio	2,888	170	17	5	20
Alumínio	4,77	160	16	5	20
Aço	2,245	1450	145	20	20
Aço	4,77	1380	138	20	20

Fonte: NBR 5118 (1985) e NBR 6756 (1987)

QUADRO 3.4

Dados nominais dos cabos condutores

Cabo	Diâmetro Equivalente (mm)	Diâmetro Nominal (mm)	Tensão Mín. Ruptura (MPa)	Tensão de pré-carga (MPa)	Velocidade de pré-carga (mm/min)	Velocidade de ensaio (mm/min)
Linnét	15,88	18,29	316	31,6	20	20
Penguim	12,62	14,31	297	29,7	20	20

Fonte: ALUMINUM ASSOCIATION (1989) e NBR 7302 (1982)

Como mostrado na tabela anterior a norma estabelece uma aplicação de pré-carga de magnitude igual a 10% do valor nominal da tensão de ruptura mínima e as velocidades de ensaio se mantiveram de acordo com os limites estipulados pela norma NBR 7272 (1982).

3.1.2.2 Codificação das amostras

A FIG.3.2 mostra a legenda utilizada na identificação das amostras utilizadas nos ensaios.

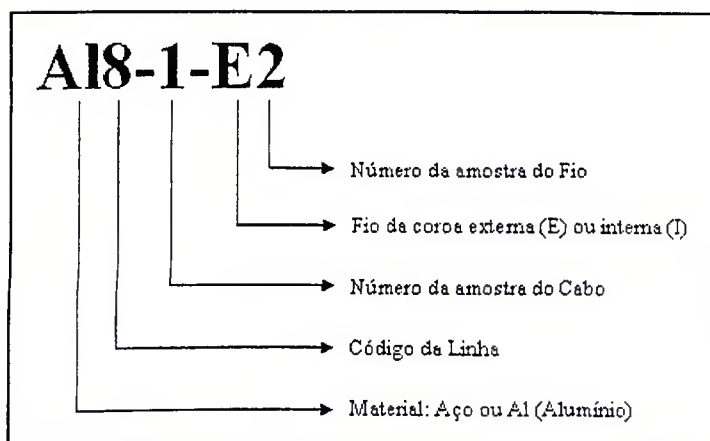


FIGURA 3. 2 – Legenda das amostras de cabo condutor utilizadas

3.1.2.3 Rejeição de amostras

O QUADRO 3.5 classifica os motivos de rejeição de alguns ensaios realizados.

QUADRO 3. 5

Motivo de rejeição dos ensaios realizados

Item	Tipo de rejeição
1	Rompimento na Garra Superior
2	Rompimento na Garra Inferior
3	Escorregamento
4	Cisalhamento

3.1.2.4 Equipamento e garras utilizadas

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina de ensaios Instron, modelo 8802 calibrada pelo fabricante.

A FIG.3.3 mostra a máquina de tração e o conjunto completo de fixação do cabo condutor preparados para o ensaio do cabo condutor Linnet. O grampo de ancoragem passante foi utilizado para a fixação dos cabos condutores Penguin e Linnet na máquina de tração.



FIGURA 3. 3 – Máquina de ensaio utilizada nos ensaios de tração e conjunto completo de fixação dos cabos Penguin e Linnet

A FIG.3.4 mostra a garra utilizada para a fixação dos fios de Alumínio do cabo condutor Penguin na máquina de tração e a FIG.3.5 mostra a garra utilizada para a fixação dos fios de Alumínio e de aço do cabo condutor Linnet.



FIGURA 3. 4 - Garra utilizada para ensaio dos fios do cabo Penguin

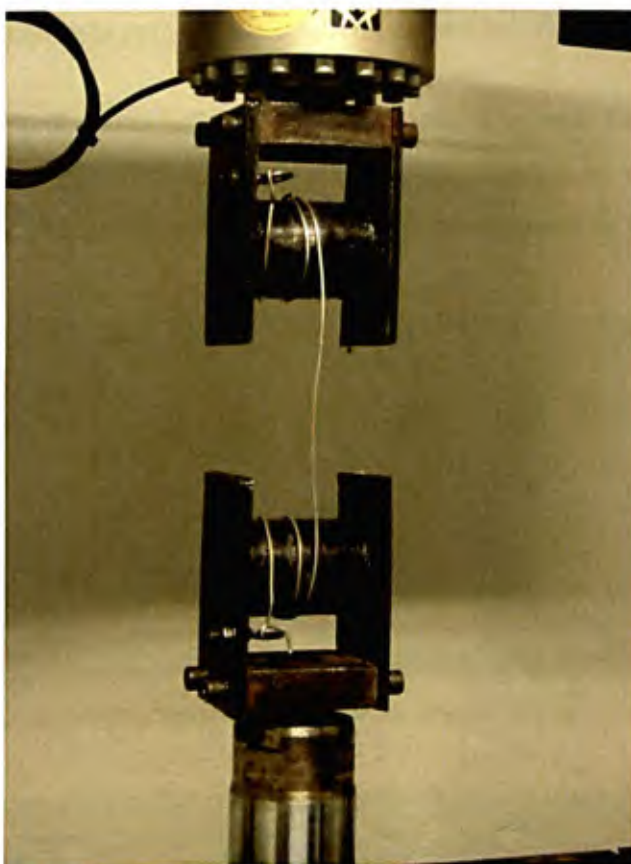


FIGURA 3. 5 - Garra Utilizada Para ensaio dos fios de Alumínio e de aço do cabo Linnet

A FIG.3.6 mostra o tipo de fratura ocorrido em um ensaio de tração do fio de aço.



FIGURA 3. 6 – Fratura de um fio de aço do cabo Penguin

3.1.2.5 Dificuldade encontrada para definir o tipo de garra a ser utilizada para o cabo condutor

As FIG.3.7 e 3.8 mostram o conjunto inicialmente utilizado para fixar a amostra de cabo condutor na máquina de tração. Este conjunto, olhal e clips, mostrou-se inadequado para fixação porque a amostra estava rompendo junto aos clips conforme mostrado na FIG.3.8.



FIGURA 3. 7 – Conjunto inicial de fixação da amostra do cabo condutor



FIGURA 3. 8 – Conjunto inicial de fixação da amostra do cabo condutor

3.1.3 Ensaio de Dureza

O ensaio de Microdureza Vickers foi realizado no Laboratório e Metrologia do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais.

3.1.3.1 Preparação das Amostras

Para a realização do ensaio de Microdureza Vickers, foram utilizadas as amostras embutidas em baquelite.

3.1.3.2 Procedimento Experimental

Foram feitos cinco ensaios em cada amostra ao longo de uma linha que passa pelo centro da seção transversal do fio como pode ser visto na FIG.3.9. A carga utilizada foi de 1k, sendo que em cada posição foram realizadas três medições de cada diagonal.

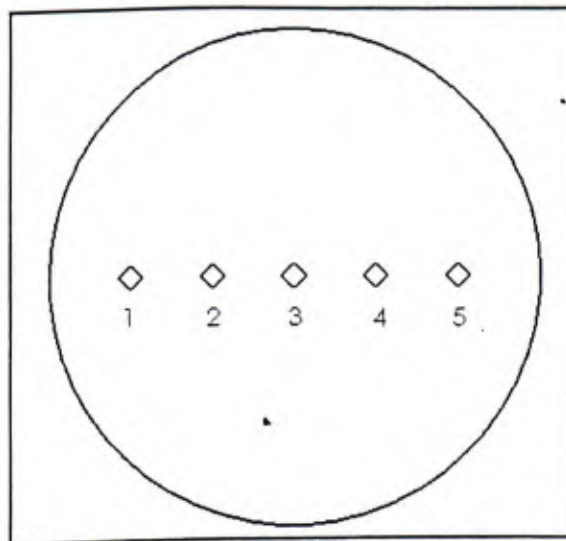


FIGURA 3. 9 - Posição dos ensaios realizados em uma dada amostra

3.1.3.3 Equipamento Utilizado

Para a realização dos ensaios utilizou-se um microdurômetro do fabricante MITUTOYO modelo MVK-H1.

3.1.4 Ensaio de resistência elétrica em corrente contínua

O ensaio de resistência elétrica foi realizado no Laboratório de Extra Alta Tensão do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

3.1.4.1 Procedimento utilizado

Medição da resistência de corrente contínua através da medição da corrente e queda de tensão na amostra sob ensaio.

3.1.4.2 Equipamentos utilizados

- (a) Fonte digital OS-5000/ICEL;
- (b) Multímetro digital HP 34401A;
- (c) Multímetro digital ICEL MD-6450;
- (d) Digital Thermometer Minipa MT401A.

3.1.4.3 Descrição do circuito de teste

O corpo de prova foi disposto na área de testes do Laboratório ligado a uma fonte de corrente contínua através de conectores apropriados conforme mostrado na FIG.3.10. Foram utilizados um voltímetro e um amperímetro digital, tendo sido aplicado 03 valores de corrente ao corpo de prova, e medido a queda de tensão em seus terminais. Para cada valor de corrente foram feitas 300 medições e registrado o valor médio destas medidas. Foi obtida também a temperatura ambiente e a temperatura na superfície do condutor.

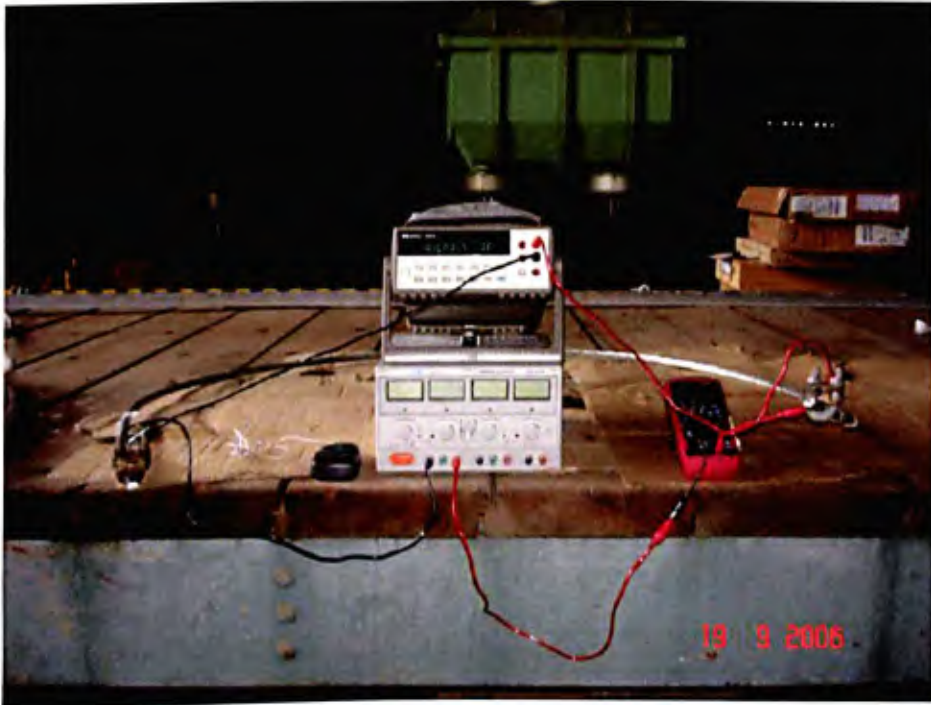


FIGURA 3. 10 – Circuito de teste utilizado nos ensaios de resistência elétrica

3.1.5 Experimento realizado - Variação da temperatura em função do rompimento de fios externos em cabos condutores

Foi realizado em laboratório o experimento “perfil térmico de um cabo condutor” cujo objetivo foi verificar a temperatura atingida pelo cabo condutor quando da ocorrência de quebra de fios de Alumínio. A correlação entre a temperatura verificada em laboratório e a temperatura calculada pela ferramenta computacional de cálculo do perfil térmico foi utilizada para validar a metodologia desenvolvida para o cálculo de vida útil de cabos condutores CAA. Além desse objetivo, a experiência foi utilizada para verificar o comportamento térmico da alma de aço quando ocorrer a quebra de todos os fios de Alumínio do cabo condutor.

Para se introduzir um modelo de variação de temperatura em função da ruptura de fios externos em cabos condutores se faz necessário realizar ensaios que estabeleçam experimentalmente uma relação matemática para cabos específicos. O aumento da resistência do cabo e conseqüente aumento da temperatura por efeito Joule podem ser inicialmente modelados através de uma redução linear de áreas quando o fio se rompe, uma vez que a resistência elétrica do fio é função da sua seção transversal. Porém, efeitos locais tais como resistência de contato, recozimento do

material, existência de defeitos, etc., podem alterar essa relação. Além disso, é importante também conhecer até onde o efeito térmico da ruptura de fios se faz notar em um cabo de transmissão de energia elétrica.

3.1.5.1 Metodologia

O corpo-de-prova - CPD do cabo condutor ensaiado apresentado no QUADRO 3.6 foi instrumentado com termopares segundo as direções circunferencial e axial.

QUADRO 3. 6
Variáveis da instrumentação

Cabo	Penguin
Fios de Alumínio	6
Fios de Alumínio Externos	6
Fios de Aço	1
Comprimento (m)	2
D (m)	1
Δx (m)	0,15
Termopares (n ^o)	10

3.1.5.2 Instrumentação circunferencial

Com a instrumentação circunferencial pretendeu-se conhecer as variações locais de temperatura com o rompimento progressivo de fios externos do cabo, na seção de ruptura desses fios.

Os termopares foram posicionados nos fios ao longo da circunferência na seção de ruptura, segundo FIG.3.11. Determinou-se que o 6^o fio não seria rompido, e posicionou-se o primeiro termopar no fio anterior a este e os demais no sentido anti-horário. A determinação do fio que não será rompido foi importante porque nele seria efetuada a instrumentação axial.

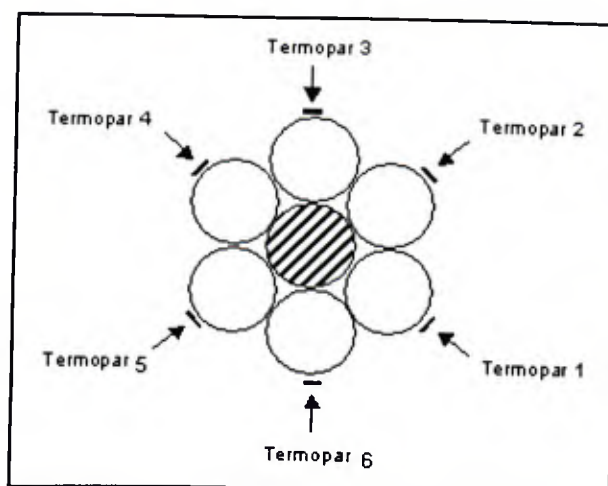


FIGURA 3. 11 – Seção de ruptura dos fios de Alumínio e indicação dos termopares

3.1.5.3 Instrumentação axial

A instrumentação axial, por sua vez, teve o intuito de estabelecer até onde o efeito do rompimento de fios teria influência na temperatura de operação do cabo.

Os termopares foram posicionados a distâncias iguais a Δx até a distância D da seção de ruptura dos fios, segundo a FIG.3.12 e QUADRO 3.6. A instrumentação axial foi posicionada sempre no 6° fio, tendo dessa forma, uma variação circunferencial considerando a posição inicial. Devido à simetria do problema, a instrumentação axial foi efetuada apenas em um lado do corpo-de-prova.

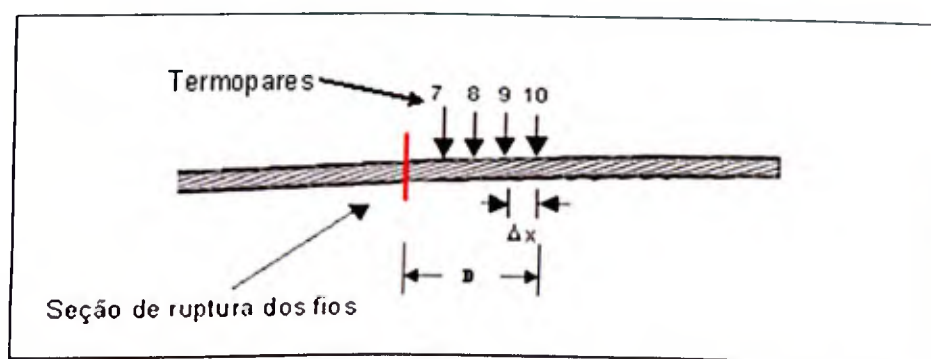


FIGURA 3. 12 – Seção de ruptura dos fios de Alumínio e indicação dos termopares

3.1.5.4 Bancada de ensaio

Constituída dos seguintes componentes:

- (a) Alimentação: 127 V (220 V) CA;
- (b) Controle e Ajuste da Tensão: Varivolt e Regulador de tensão;
- (c) Ganho de Corrente: TC tipo janela;
- (d) Medição de corrente: Amperímetro Alicate;
- (e) Aquisição de dados: Termopares e Sistema de Aquisição e Armazenamento de Dados;
- (f) Amostra: Cabo condutor ensaiado: Penguin – CAA 4/0 – 6/1 fios.

O aquecimento da amostra foi realizado através do circuito mostrado nas FIG.3.13. Utilizou-se um Varivolt e um Regulador de Tensão para o ajuste fino da tensão necessária a ser fornecida ao circuito, associado a um Transformador de Corrente, tipo janela, pelo qual passa o condutor sob ensaio, e por indução magnética é transferido a esse condutor a corrente necessária para o aquecimento do mesmo. A intensidade da corrente elétrica que passa através do condutor sob ensaio é monitorada por um Amperímetro Alicate. Um conjunto de termopares foi fixado em vários pontos do condutor e conectados a um sistema de aquisição.

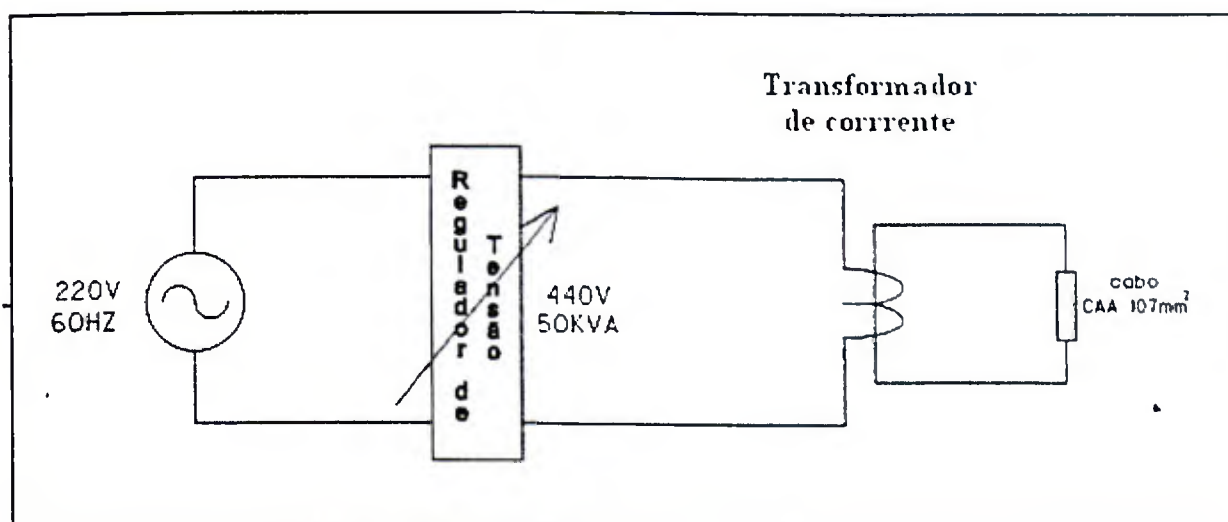


FIGURA 3. 13 – Diagrama elétrico do circuito de teste

As principais características dos equipamentos utilizados são:

- (a) Regulador de tensão: tensão 440 V, potencia 50 kVA, fabricante Anel;
- (b) alicate amperímetro: escala 0 a 800A, marca GE;

- (c) termopares: XF-324-FAR, Tipo K, com isolamento em fibra de vidro, precisão $\pm 1,5$ °C, fabricante Labfacility. A fixação dos termopares foi feita braçadeiras de nylon padrão e isolamento de mica. A FIG.3.14 mostra o conjunto de termopares fixados na amostra;



FIGURA 3. 14 – Fixação dos termopares

- (d) sistema de aquisição de dados: Agilent 34970A, Data Acquisition/Switch unit, fabricante Agilent Technologies.

3.1.5.5 Condução do ensaio

O ensaio foi conduzido de acordo com os seguintes passos:

- (a) instrumentar o corpo-de-prova (FIG. 3.11 e 3.12);
- (b) calibrar o sistema de aquisição de dados;
- (c) montar circuito elétrico (FIG. 3.13);
- (d) ligar a fonte de corrente contínua até se atingir a corrente nominal de operação do condutor;
- (e) esperar o sistema entrar em regime;
- (f) efetuar as leituras dos termopares;
- (g) romper o primeiro fio externo;
- (h) repetir os passos (e) a (g);
- (i) repetir o passo (h) até restar apenas o fio que não será rompido.

3.2 Desenvolvimento da ferramenta computacional

3.2.1 Premissas

As seguintes premissas são consideradas para o cálculo da vida útil em função da temperatura de operação da linha de transmissão:

- **limite de resistência mecânica ou limite de resistência mecânica à tração** é igual a 70% da carga de ruptura nominal do cabo condutor, para condições de vento extremo (ONS Submodulo 2.4, 2002);
- o núcleo de aço galvanizado dos cabos ACSR será afetado por temperatura acima de **225°C** (Electra nº 162, 1995);
- a metodologia da Inspeção Baseada em Risco – IBR (API Recommended Practice 580, 2002) foi utilizada para calcular as funções relativas a área de manutenção.

As variáveis consideradas na metodologia são:

- velocidade média de vento da região atravessada pela linha de transmissão;
- temperatura ambiente média da região atravessada pela linha de transmissão;
- corrente transportada pela linha de transmissão.

Na metodologia implementada utiliza-se o vento médio e temperatura ambiente média da região atravessada pela linha e a corrente transportada para calcular a temperatura de operação da LT. Após o cálculo da temperatura de operação por hora de operação tem-se o histórico térmico da LT utilizado na ferramenta computacional para o cálculo da vida útil do cabo condutor.

3.2.1.1 Recursos tecnológicos da ferramenta computacional

O ambiente computacional utilizado para o desenvolvimento da ferramenta computacional foi o MATLAB versão R14 de 05/2004. O MATLAB é um sistema interativo e uma linguagem de programação para computação técnica e científica em geral. Ele integra a capacidade de fazer cálculos, visualização gráfica e programação em um ambiente fácil de usar.

A ferramenta computacional foi desenvolvida para ser utilizada com as seguintes funções:

- (a) cálculo do histórico térmico da LT;
- (b) cálculo da vida útil de cabos condutores.

A FIG. 3.15 mostra as funções principais da ferramenta computacional.

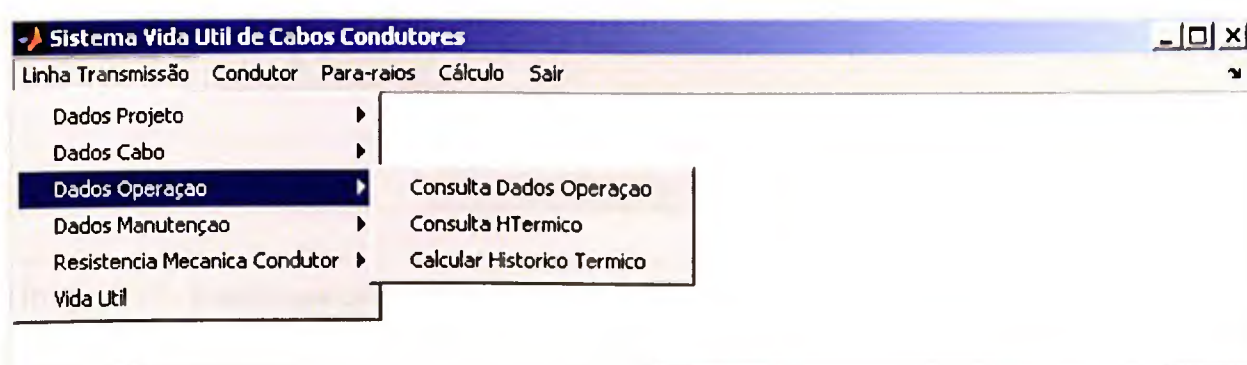


FIGURA 3. 15 – Tela inicial da ferramenta computacional

- (c) cálculo dos componentes críticos da LT;
- (d) cálculo do intervalo para realização de inspeção preditiva;
- (e) cálculo do DEC - Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora.

A FIG. 3.16 mostra as funções relativas à área de manutenção, tendo como base a Inspeção Baseada em Risco – IBR.

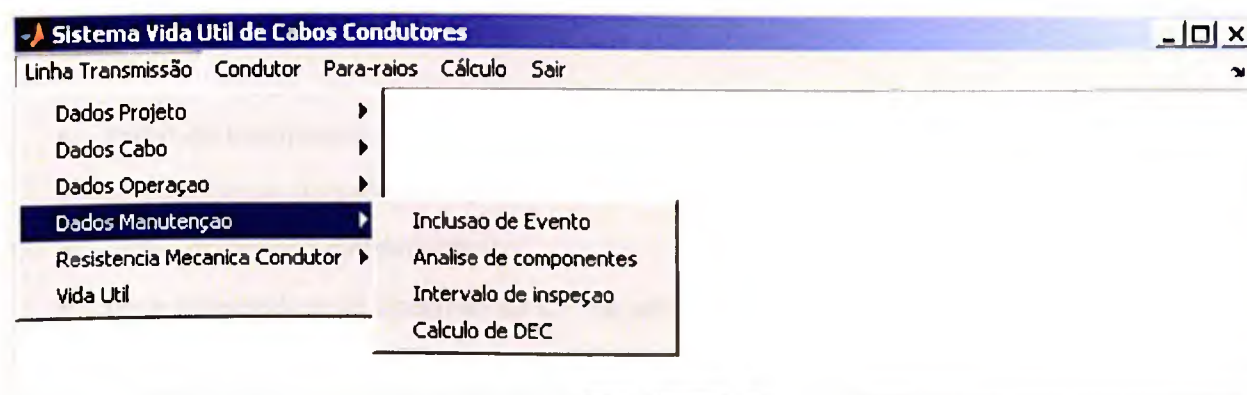


FIGURA 3. 16 – Funções relativas à área de manutenção

- (f) cálculo da elevação da temperatura do cabo em função da corrente transportada;
- (g) cálculo da elevação da temperatura do cabo devido ao rompimento de fios de Alumínio;
- (h) cálculo da resistência mecânica à tração do cabo condutor.

A FIG. 3.17 mostra as funções auxiliares para cálculo de temperatura, perfil térmico e resistência mecânica que podem auxiliar as equipes de manutenção e projeto.

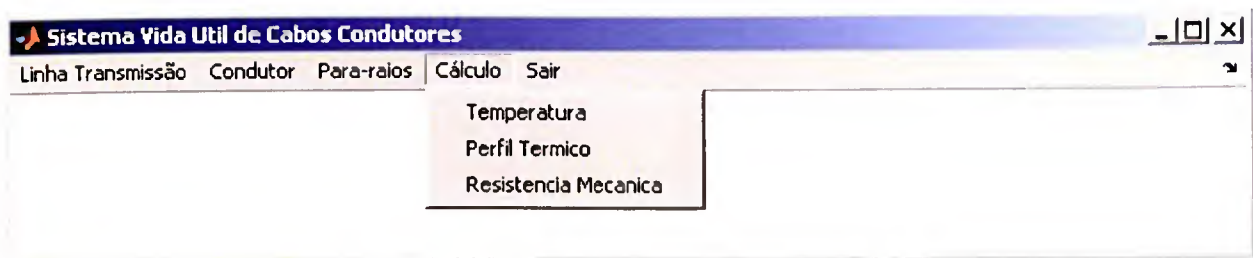


FIGURA 3. 17 – Funções para cálculos específicos de temperatura, perfil térmico e resistência mecânica

3.2.2 Banco de dados desenvolvido para Linha de Transmissão

O banco de dados foi desenvolvido na linguagem Microsoft Office Excel.

As seguintes informações foram armazenadas no banco de dados para cálculo da vida útil e para definição de prazo de inspeção térmica de cabos condutores:

3.2.2.1 Dados técnicos da Linha de Transmissão

Informações armazenadas:

- dados da localização da linha de transmissão;
- características do cabo condutor;
- dados do projeto eletromecânico;
- nova temperatura de operação da LT, se necessário;
- dados ambientais da região atravessada pela LT.

Estas informações serão utilizadas para:

- cálculo da temperatura do cabo condutor – dados da localização da LT, características do cabo condutor e dados ambientais;
- cálculo da vida útil do cabo condutor – dados de projeto e características do cabo condutor.

3.2.2.2 Dados de operação da Linha de Transmissão – Histórico térmico

Informações a serem armazenadas:

- dia da medição;
- horário da medição;
- corrente medida.

Estas informações, conforme QUADRO 3.7, serão utilizadas para:

- cálculo da vida útil do cabo condutor.

QUADRO 3. 7

Histórico do carregamento elétrico da LT Sete Lagoas 3 – Cominci, 138 kV

Data	Horário	Corrente (A)
1/1/2002	00:00:00	139,043
1/1/2002	00:15:00	137,549
1/1/2002	00:30:00	137,728
1/1/2002	00:45:00	138,076
1/1/2002	01:00:00	139,043
1/1/2002	01:15:00	137,021
1/1/2002	01:30:00	137,373
1/1/2002	01:45:00	138,516
1/1/2002	02:00:00	138,691
1/1/2002	02:15:00	137,812
1/1/2002	02:30:00	137,285
1/1/2002	02:45:00	138,779
1/1/2002	03:00:00	138,340
1/1/2002	03:15:00	138,779
1/1/2002	03:30:00	139,307
1/1/2002	03:45:00	137,725

FONTE: Cemig, 2002

3.2.2.3 Dados da manutenção da Linha de Transmissão – manutenção preditiva

Informações a serem armazenadas:

- ocorrência de ruptura de cabo condutor (código ocorrência, data);
- ocorrência de vibração eólica (código ocorrência, data);
- manutenções corretivas realizadas (código ocorrência, data);
- vandalismos (código ocorrência, data);
- corrosão (código ocorrência, data);
- pontos quentes (código ocorrência, data), etc.

Estas informações serão utilizadas para:

- Cálculo do intervalo de tempo entre inspeções termográficas.

3.2.3 Banco de dados desenvolvido para características ambientais da região atravessada pela Linha de Transmissão

Informações a serem armazenadas:

- dia do ano;
- horário do dia;
- temperatura ambiente média em relação aos anos considerados;
- velocidade média de vento em relação aos anos considerados;
- temperatura ambiente média anual;
- velocidade média de vento anual.

Estas informações serão utilizadas para:

- Cálculo do histórico térmico da linha de transmissão.

O QUADRO 3.8 mostra o modelo de banco de dados utilizado na ferramenta computacional.

QUADRO 3. 8

Características ambientais de região próxima à LT Sete Lagoas 3 – Cominci

Código Estação	Data Medição	Hora Medição	Temperatura Média (°C)	Velocidade Média Vento (m/s)
107	3/1/2000	10	24	5,3
107	3/1/2000	11	25	5,2
107	3/1/2000	12	26	7,0
107	3/1/2000	13	27	6,9
107	3/1/2000	14	27	6,9
107	3/1/2000	15	25	5,1
107	3/1/2000	16	26	3,4
107	3/1/2000	17	23	2,7
107	3/1/2000	18	23	2,6
107	3/1/2000	19	23	3,6
107	3/1/2000	20	23	3,4
107	3/1/2000	21	23	3,3
107	3/1/2000	22	22	1,6
107	3/1/2000	23	22	0,7
107	4/1/2000	0	21	0,3
107	4/1/2000	1	21	0,6
107	4/1/2000	2	21	1,3
107	4/1/2000	3	21	2,6
107	4/1/2000	4	21	1,7
107	4/1/2000	5	20	2,0
107	4/1/2000	6	20	2,7
107	4/1/2000	7	20	2,6

FONTE: Cemig, 2000

3.2.4 Modelo matemático incorporado a ferramenta computacional

3.2.4.1 Cálculo da temperatura do condutor

A temperatura do condutor é calculada conforme modelo de MORGAN (1999):

$$P_c + P_r = P_j + P_s \quad (3.1)$$

a) Aquecimento por efeito Joule - P_j

$$P_j = I^2 \cdot R T_c \quad (3.2)$$

Onde I é a intensidade de corrente, T_c é a temperatura do condutor e R é a resistência elétrica.

b) Aquecimento solar - P_s

O ganho de calor total de um condutor devido aquecimento solar é dado como

$$P_s = \alpha_s \cdot d \left\{ \left[I_B (\sin \eta) + \frac{\pi}{2} \cdot F \cdot \sin Hs \cdot \cos^2 \left(\frac{\zeta}{2} \right) \right] + \frac{\pi}{2} I_d \cdot \cos^2 \left(\frac{\zeta}{2} \right) \cdot (1 + F) \right\} \quad (3.3)$$

Onde α_s é o coeficiente de absorção do condutor, d é o diâmetro do condutor, I_B é a intensidade de irradiação solar direta sobre uma superfície normal ao mesmo, η é o ângulo do raio solar com respeito ao eixo do condutor, F é a reflectância (albedo) da superfície da terra sob o condutor, Hs é a altura solar, I_d é a intensidade da irradiação difusa do céu sobre uma superfície horizontal e ζ é a inclinação do condutor com a horizontal.

c) Perdas por convecção - P_c

As perdas por convecção, tem seu cálculo baseado na equação de definição do coeficiente médio de transferência convectivo de calor h_c , dada por Newton, quando não ocorre qualquer radiação:

$$P_c = h_c \cdot A \cdot (t_c - t_a) \quad (3.4)$$

Onde h_c é o coeficiente médio de transferência de calor, A é a área da seção transversal, t_c é a temperatura do corpo aquecido e t_a é a temperatura do fluido onde se dá a transferência, distante do corpo aquecido o suficiente para não sofrer influência da temperatura do condutor

d) Perdas por irradiação - P_r

Um condutor aquecido perde o calor devido as trocas de calor por irradiação entre a sua parte superior e a atmosfera acima e entre a sua parte inferior e a terra. A perda por irradiação do condutor pode ser determinada pela expressão que se segue, baseada na lei de Stefan-Boltzmann

$$P_r = \frac{\pi}{2} \cdot d \cdot \sigma \left[\varepsilon_g (T_c^4 - T_g^4) + \varepsilon_d (T_c^4 - T_d^4) \right] \quad (3.5)$$

Onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann, ε_g é a emissividade da superfície do condutor voltada para a atmosfera abaixo, T_c é a temperatura do condutor, T_d é a temperatura do céu, T_g é a temperatura da terra e ε_d é a emissividade da superfície do condutor voltada para a atmosfera acima.

3.2.4.2 Cálculo da resistência mecânica dos cabos condutores novos e usados

O cálculo da resistência mecânica do cabo condutor CAA é a soma da resistência de dois materiais diferentes multiplicados por um fator apropriado. De acordo com NBR 7270 (1978) calcula-se da seguinte maneira:

- a) A contribuição de resistência oferecida pelos fios de Alumínio deve ser tomada como um percentual indicado no QUADRO 3.9, da soma das cargas de ruptura dos fios de Alumínio calculadas à partir de seus diâmetros nominais e do limite de resistência à tração.

$$R_{FioAl} = \frac{\pi}{4} \cdot d_{Al}^2 \cdot LR_{Al} \quad (3.6)$$

Onde d_{Al} é o diâmetro nominal do fio de Alumínio e LR_{Al} é o limite de resistência do fio de Alumínio.

QUADRO 3. 9
Fatores para obtenção da RMC do cabo completo

Encordoamento				Fator de correção (%)	
Número de fios		Número de coroas			
Alumínio	Aço	Alumínio	Aço	Alumínio	Aço
6	1	1	---	96	96
12	7	1	1	96	96
18	1	2	---	93	96
26	7	2	1	93	96
30	7	2	1	93	96
30	19	2	2	93	93
45	7	3	1	91	96
54	7	3	1	91	96
54	19	3	2	91	93

FONTE: NBR 7270, 1978

b) A contribuição de resistência oferecida pelos fios de aço deve ser tomada como um percentual, indicado no QUADRO 3.9, da soma das cargas de ruptura dos fios de aço calculadas à partir de seus diâmetros nominais e do limite de resistência à tração.

$$R_{Fio.Aço} = \frac{\pi}{4} \cdot d_{Aço}^2 \cdot LR_{Aço} \quad (3.5)$$

Onde $d_{Aço}$ é o diâmetro nominal do fio de aço e $LR_{Aço}$ é o limite de resistência do fio de aço.

c) Resistência mecânica calculada (RMC)

$$RMC = NF_{Al} \cdot R_{Fio.Al} \cdot FC_{Al} + NF_{Aço} \cdot R_{Fio.Aço} \cdot FC_{Aço} \quad (3.6)$$

Onde NF_{Al} é o número de fios de Alumínio, FC_{Al} é o fator de correção do fio de Alumínio, $NF_{Aço}$ é o número de fios de aço e $FC_{Aço}$ é o fator de correção do fio de aço.

3.2.4.3 Cálculo do histórico térmico da Linha de Transmissão

Utilizando-se os dados de operação da LT, de projeto e ambientais da região atravessada pela LT calcula-se a temperatura do cabo condutor para cada medição de corrente e acumula-se o tempo de exposição conforme mostrado no QUADRO 3.10.

Para o cálculo da temperatura do condutor utiliza-se a ferramenta computacional desenvolvida no âmbito deste trabalho.

QUADRO 3. 10

Par temperatura versus tempo de exposição da LT Sete Lagoas 3 – Cominci, 138 kV

Temperatura (°C)	Total Horas
25	596
26	475
27	329
28	281
29	259
30	310
31	279
32	299
33	301
34	340
35	354
36	416
37	328
38	337
39	413
40	408
41	352
42	350
43	315
44	329
45	267
46	197
47	157
48	83
49	28
50	33
51	7

FONTE: Cemig, 2002

3.2.4.4 Cálculo da perda de resistência mecânica devido ao recozimento do condutor

O cálculo da vida útil, ou remanescente, de um cabo condutor considera o tempo de exposição do cabo às diversas temperaturas de operação, ou seja, a perda de resistência mecânica devido ao efeito cumulativo do recozimento dos fios de Alumínio.

Adota-se para cálculo da perda de resistência dos fios de Alumínio o método descrito no item 2.7.6.2 para perdas (W) no seguinte intervalo $0 < W < W_a$.

3.2.4.5 Cálculo da vida útil dos cabos condutores

Considerando que a alma de aço do condutor não perde resistência mecânica, conforme NASCIMENTO (1999), o cálculo da perda de vida útil do cabo será em função do recozimento dos fios de Alumínio.

a) Para cabo condutor novo – dados de projeto

Em função da temperatura de operação do cabo condutor verifica-se qual será o tempo necessário para que a resistência mecânica à tração do cabo condutor seja igual a 70% de sua carga de ruptura.

b) Para cabo condutor usado – dados de projeto e de operação

Utilizando-se o histórico térmico do cabo condutor calcula-se a perda de resistência mecânica do cabo até a data atual.

A partir da perda de resistência mecânica atual e em função da nova condição de temperatura de operação do cabo condutor, verifica-se qual será o tempo necessário para que a resistência à tração do cabo condutor seja igual a 70% de sua carga de ruptura.

c) Para cabo condutor usado – dados de ensaios de amostras retiradas da LT e de operação

Utilizando-se os resultados dos ensaios de tração mecânica (perda mecânica) e em função da nova condição de temperatura de operação do cabo condutor, verifica-se qual será o tempo necessário para que a resistência à tração do cabo condutor seja igual a 70 % de sua carga de ruptura.

3.2.4.6 Cálculo do intervalo de inspeção preditiva

Além do cálculo da vida útil, a ferramenta computacional poderá calcular o intervalo de tempo para as inspeções termográficas utilizando os dados de manutenção da LT.

3.2.4.7 Cálculo do perfil térmico do cabo condutor

É importante para utilização na metodologia de manutenção preditiva de cabos condutores, visto que, pode-se comparar resultado de uma inspeção termográfica, FIG.3.18, e da simulação na ferramenta computacional desenvolvida, FIG.3.19.

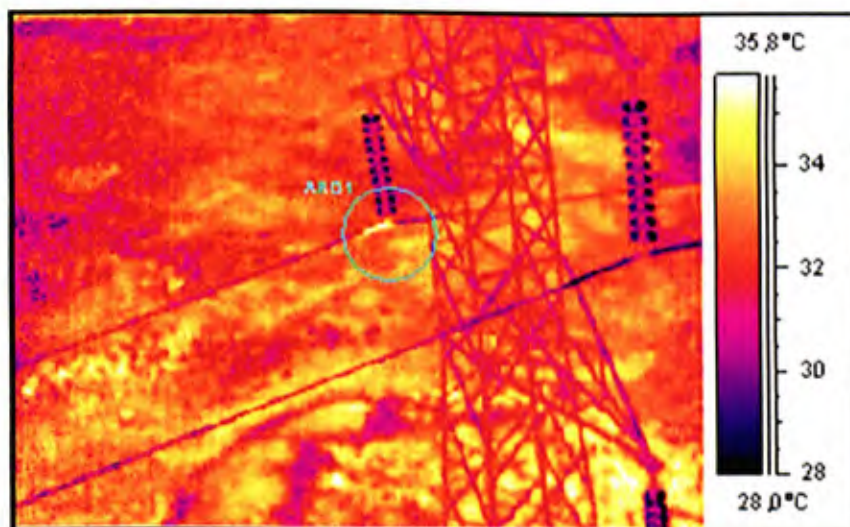


FIGURA 3. 18 – Ponto quente detectado durante inspeção termográfica

FONTE: Resende, 2001

Calcular Perfil Termico do Cabo Condutor

Dados do Cabo Condutor Completo

Nome : Linnet
 Material : CAA
 Coeficiente de emissividade : 0.5
 Formação (Fios de Al e Aço) : 26/7
 Coeficiente de absorção - onda curta : 0.9
 Coeficiente de absorção - onda : 0.05

Dados de Localização da LT

Azimute (graus) : 0
 Longitude (graus) : -40
 Radiação solar (w/m2) : 980
 Angulo condutor - solo (graus) : 0
 Resistencia Elétrica CC a 20 oC : 0.16925
 Latitude (graus) : -20
 Altitude (m) : 650
 Reflectância : 0.15
 Angulo ação vento - condutor (graus) : 90
 Coef.Var Resist. a 20 oC (ohm/m) : 0.00403

Dados da medição de campo

Data (dd/mm/aaaa) : 01/01/2008
 Corrente (A) : 525
 Temperatura ambiente (oC) : 25
 Horário (hh:mm) : 14:00
 Condições da atmosfera : 0.9
 Velocidade de vento (m/s) : 1

Perfil Termico (oC)

Cabo Completo : 76 Alma de aço : 1855

Cabo com rompimento de fios de Alumínio:

	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1ª Camada:	77	79	81	83	86	89	92	95	99	103								
2ª Camada:	108	114	121	129	139	152	167	187	214	250	301	375	487	665	1017	1855		
3ª Camada:																		
3ª Camada:	19	20	21	22	23	24												

Calcular Perfil Termico Retornar Menu Principal

FIGURA 3. 19 – Resultado da análise de quebra de fios

Com realização dos ensaios descritos em 3.1.5, a ferramenta computacional para cálculo da vida útil, no item relativo ao cálculo de temperatura do condutor em função da ruptura de fios de Alumínio, poderá ser otimizada, substituindo a redução linear de áreas quando o fio se rompe por uma relação matemática estabelecida a partir dos resultados dos ensaios.

3.2.5 Armazenamento dos resultados

Após a execução dos cálculos os seguintes resultados serão armazenados no banco de dados: resistência mecânica do fio de Alumínio, resistência mecânica do fio de aço, resistência mecânica do cabo condutor completo, vida útil remanescente do cabo condutor, código do resultado (1 – cálculo teórico e 2 – resultando de ensaio) e data de realização do cálculo ou do ensaio.

3.2.6 Validação do banco de dados

A validação do banco de dados será feita conforme fluxograma indicado nas FIG. 3.20.

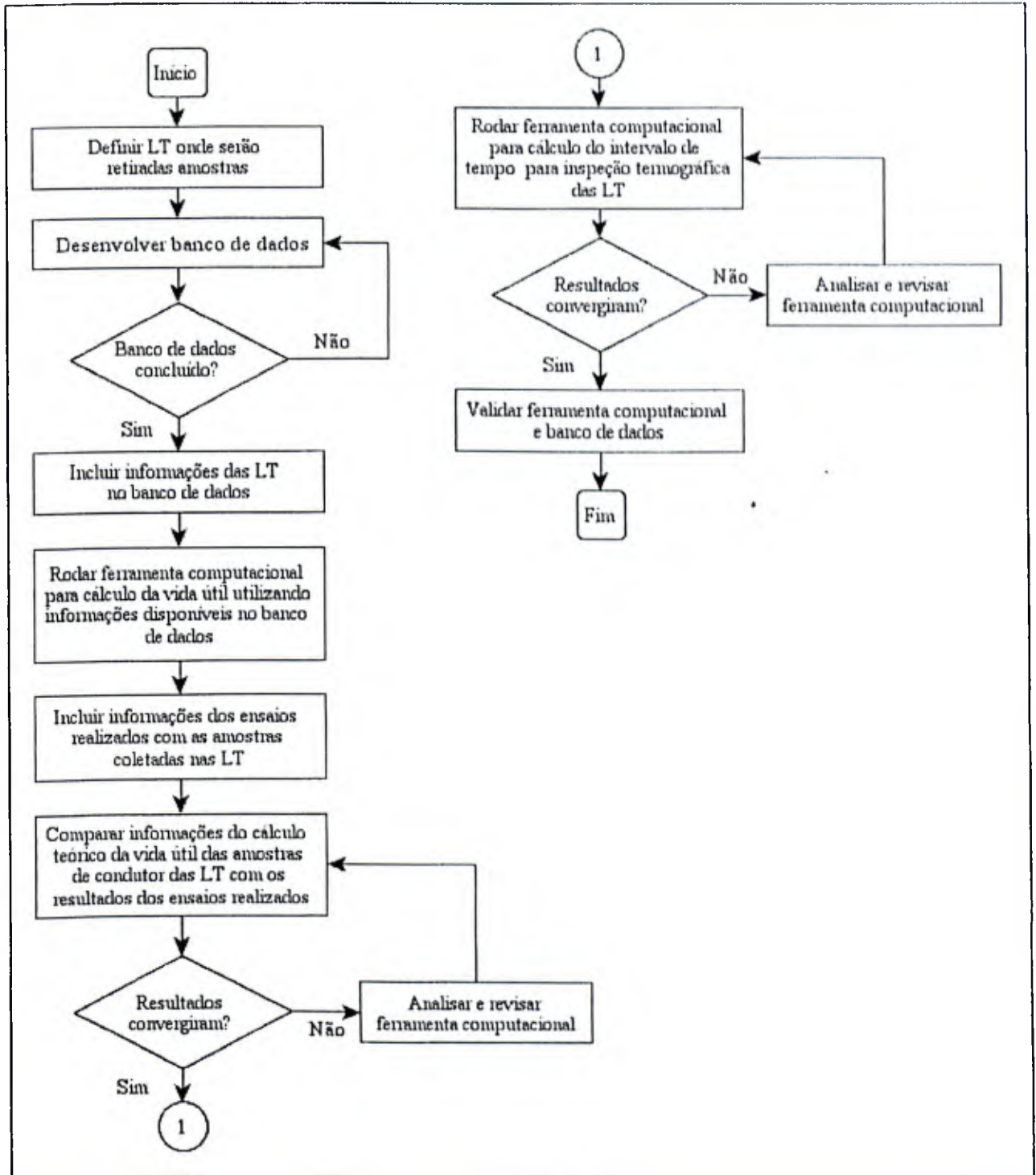


FIGURA 3. 20 – Fluxograma da validação do banco de dados

3.2.7 Simulação computacional com dados de projeto e de operação das LT para cálculo da vida útil

Após a inclusão dos dados da Linha de Transmissão e dos resultados dos ensaios realizados em cabos condutores novos e existentes serão feitas simulações com dados teóricos do histórico térmico dos cabos condutores e dados práticos obtidos a partir dos ensaios. O objetivo é comparar os resultados e analisar se a ferramenta computacional está dentro das incertezas características desse tipo de atividade, ou seja, perda de resistência mecânica por recozimento.

3.2.8 Validação da ferramenta computacional para cálculo da vida útil de cabos condutores

A validação da ferramenta computacional será feita de acordo com o fluxograma mostrado na FIG.3.20.

3.3 **Desenvolvimento de metodologia para manutenção preditiva de cabos condutores**

A Manutenção Preditiva consiste na definição e no planejamento antecipado das intervenções corretivas, a partir da aplicação sistemática de uma ou mais técnicas de monitoração, como a análise de vibrações, a termografia e a análise de resíduos em lubrificantes (ferrografia). Trata-se da manutenção que prediz o tempo de vida útil dos componentes das máquinas e equipamentos e as condições para que esse tempo de vida seja bem aproveitado.

Essas técnicas são capazes de detectar os defeitos de funcionamento sem interrupção do processo produtivo e com antecedência suficiente para programar as intervenções de modo a atingir os seguintes objetivos:

- aumento da segurança e da disponibilidade dos equipamentos, com redução dos riscos de acidentes e interrupções inesperadas da produção;
- eliminação da troca prematura de componentes com vida útil remanescente ainda significativa;
- redução dos prazos e custos das intervenções, pelo conhecimento antecipado dos defeitos a serem corrigidos;

- aumento da vida útil das máquinas e componentes, pela melhoria das condições de instalação e operação.

Através da análise estatística dos dados coletados pela Manutenção Preditiva, é possível ainda:

- identificar equipamentos com problemas crônicos e orientar a sua correção;
- avaliar a eficácia e a qualidade dos serviços corretivos e propor programas de treinamento e a adoção de novas tecnologias, visando o seu aprimoramento.

Através desses objetivos pode-se deduzir que eles estão direcionados a uma finalidade maior e importante: redução de custos de manutenção e aumento da produtividade. De um modo geral, pode-se afirmar que a aplicação de programas de Manutenção Preditiva em indústrias de processo resulta, a médio e longo prazo, em reduções da ordem de 2/3 nos prejuízos com interrupções inesperadas de produção e de 1/3 nos gastos com a manutenção, após uma fase inicial de investimentos.

A manutenção preditiva de cabos condutores visa evitar as conseqüências danosas que a falha de um cabo condutor possa ocasionar, procurando evitar falhas acidentais e perda de tempo no reparo dessas falhas. Um programa de manutenção preditiva consiste basicamente de três etapas: detecção, análise e correção do problema.

Como resultado da aplicação dessa metodologia espera-se reduzir custos de manutenção e tempo de desligamento, aumentar a confiabilidade e otimizar a capacidade de transporte de energia elétrica das linhas.

A manutenção preditiva de cabos condutores será dividida nas seguintes etapas:

3.3.1 Definição do intervalo de tempo para inspeção preditiva

O cálculo do intervalo de tempo será feito considerando os seguintes parâmetros de confiabilidade:

3.3.1.1 Características da região atravessada pela LT: relevo e vento

Premissa 1: Se vento é laminar, intervalo de tempo para inspeção é menor, conforme QUADRO 2.10.

Premissa 2: Se região é plana, intervalo de tempo para inspeção é menor, ver classificação dos diversos tipos de terreno considerados no QUADRO 2.11.

3.3.1.2 Características do projeto da LT: proteção mecânica dos cabos condutores

Premissa 3: Se existe amortecedor, intervalo de tempo para inspeção é maior.

Premissa 4: Se tracionamento é maior que 18,5% da Carga de Ruptura, intervalo de tempo para inspeção é menor.

3.3.1.3 Condições operativas da LT: temperatura de operação do cabo condutor

Premissa 5: Temperatura maior, intervalo de tempo para inspeção é menor.

3.3.1.4 Ocorrências na LT

Através de informações da área de manutenção, será verificado o número de ocorrência de falhas mecânicas na LT ao longo do tempo de utilização, ou seja, ruptura de cabo condutor e pára-raios, pontos quentes na LT e outros.

Premissa 6: Grande número de ocorrências, intervalo de tempo para inspeção é menor.

3.3.2 Dados para cálculo do intervalo de tempo para inspeção termográfica

Será utilizado o banco de dados a ser implementado para o cálculo da vida útil de cabos condutores conforme item 3.2.2.

3.3.2.1 Inspeção termográfica

As inspeções termográficas permitem a localização de pontos quentes nas linhas de transmissão através da captação da imagem térmica numa câmara de infra-vermelho. O ponto quente gera perda de energia elétrica pelo calor ou perda joulica e pode provocar a queda do cabo condutor ao solo provocando o desligamento da linha.

O equipamento Esfera de Giro Estabilizado, mostrado na FIG.3.21, possui duas câmaras, uma de infra-vermelho e outra convencional. Com esse equipamento é possível combinar as inspeções aéreas de rotina, filmando a linha, com a inspeção termográfica.



FIGURA 3. 21 – Equipamento de inspeção termográfica

3.3.2.2 Inspeção instrumentalizada por radiografia digital portátil

Possibilita a obtenção de imagem interna de um equipamento (radiografia) obtida com a exposição do equipamento a uma fonte de raios gama e a coleta da projeção dessa imagem do objeto do outro lado, sobre uma chapa de imageação (*phosphoric filtram*). A Figura 3.22 mostra a radiografia de uma emenda à compressão de um cabo condutor. Esta tecnologia substitui o uso de filme radiográfico tradicional e pode ser usada em todo tipo de material sólido, metálico ou não.

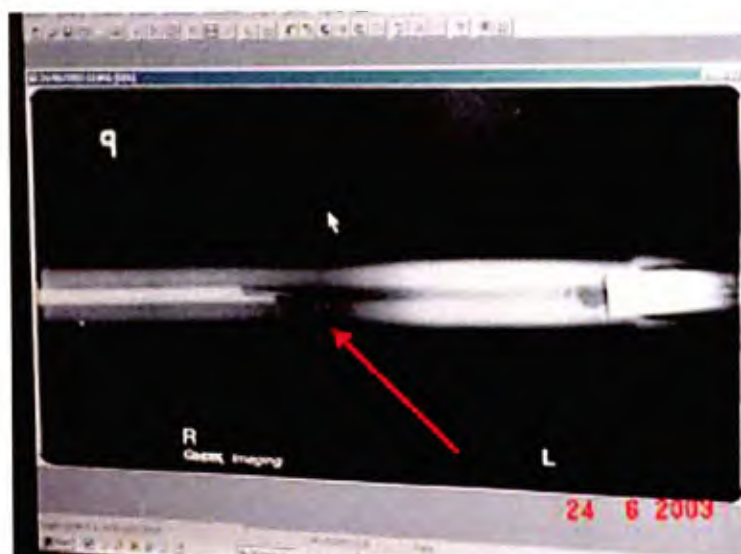


FIGURA 3. 22 – Radiografia de um condutor com a alma de aço rompida

3.3.2.3 Reparo do cabo condutor

Se o número de fios de Alumínio rompidos for maior que 10% do total de fios de Alumínio ou de 3 fios da camada externa deverá ser executada emenda à compressão. Caso contrário, deverá ser executada emenda preformada total.

3.3.2.4 – Cálculo da perda de resistência à tração do cabo condutor

Para o cálculo da perda de resistência será utilizado a ferramenta computacional desenvolvida. Se a perda for maior que 30% da carga de ruptura do condutor, deverá ser retirada amostra do cabo condutor para realização de ensaio de tração.

3.3.2.5 Ensaio de tração do cabo condutor

A finalidade deste ensaio é confirmar os resultados obtidos através da ferramenta computacional para cálculo de vida útil de condutores.

3.3.2.6 Substituição do cabo condutor

Se a perda de resistência mecânica for maior que 30% da carga de ruptura o cabo condutor deverá ser substituído.

3.3.2.7 Cálculo da vida útil do cabo condutor

Utilizando-se os resultados do ensaio de tração do cabo condutor ou o histórico térmico da LT calcula-se a vida útil residual do cabo condutor.

3.3.2.8 Redefinição do intervalo de tempo para inspeção termográfica

Caso o tempo de vida útil residual do condutor seja menor que o intervalo de tempo para inspeção preditiva deve-se recalcular o novo intervalo para as futuras inspeções.⁴

O fluxograma mostrado nas FIG. 3.23 representa a metodologia a ser implementada para a manutenção preditiva de cabos condutores.

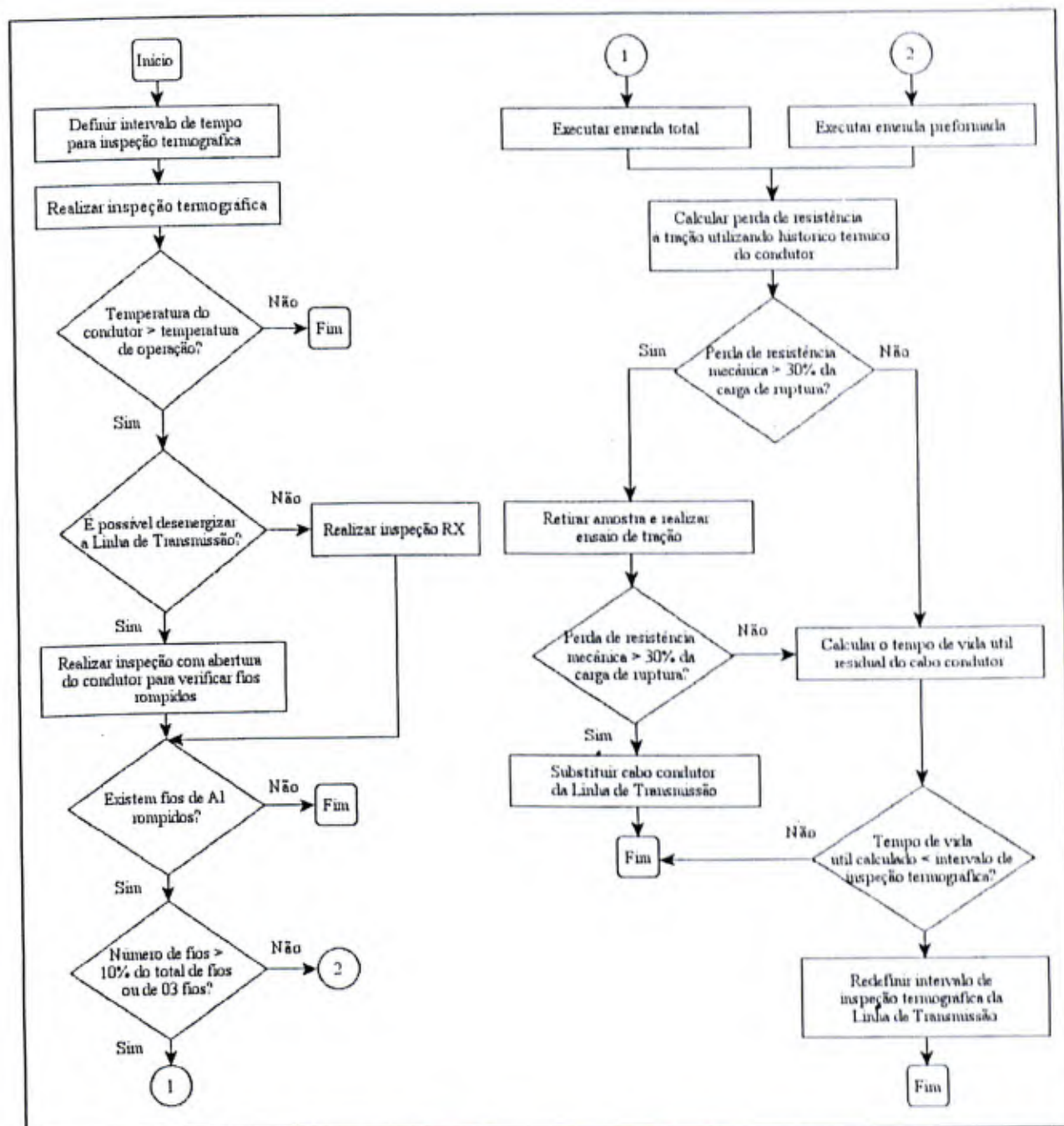


FIGURA 3. 23 – Fluxograma da metodologia de manutenção preventiva

3.4 Inspeção Baseada em Risco – IBR

A metodologia da IBR consiste na estimativa da frequência de falha e na determinação da consequência dessa falha, calculando-se o risco através do par [frequência, consequência]. A frequência, quando não conhecida com exatidão, é estimada através de frequência de falhas

genéricas e aplicação de fatores modificadores. A consequência considera a segurança, perdas econômicas e o impacto ambiental.

O risco poderá ser aplicado de forma qualitativa, quantitativa ou combinado. A aplicação qualitativa requer menor quantidade de informações e a quantitativa fornece o risco por cada equipamento de uma unidade. Elas podem ser utilizadas em conjunto sendo que a qualitativa define a unidade/sistema com o equipamento que possui o risco mais alto e a quantitativa para uma análise dos itens mais críticos nessa unidade/sistema.

3.4.1 Modelo de aplicação da inspeção baseada em risco para LT

A IBR foi aplicada quantitativamente em uma família de cento e quinze LT, conforme QUADRO 3.11. As informações de falhas e frequência foram coletadas no período entre jan/2002 e dez/2006.

QUADRO 3. 11
Extensão e características das LT de 69 e 138 kV

Classe de Tensão	Total de LT	Total (km)	Tipo de Estrutura					
			Metálica		Madeira		Concreto	
69	58	2.707	434	16%	1.793	66%	481	18%
138	57	3.507	2.727	78%	481	14%	299	9%

FONTE: CEMIG

O QUADRO 3.12 descreve os tipos de ocorrências que ocasionaram falhas nas LT, ou seja, desligamentos permanentes que são caracterizados como um evento onde a LT só retorna à operação quando uma equipe de manutenção faz uma inspeção “in loco” e, se necessário, intervem para restabelecer as condições originais da linha.

QUADRO 3. 12

Lista de Códigos de ocorrências nas LT

Descrição	Código
Abalroamento - carro, caminhão, trator, avião, asa delta, balão, etc	1
Agressividade do meio - salinidade, umidade, altas temperaturas, etc	2
Animais - eletrocussão de animais - cobra, gambá, pássaros, etc	3
Apodrecimento - postes ou cruzetas de madeira	4
Causa externa - não relativo ao sistema elétrico. Exemplos: objetos jogados pelo vento como galhos de árvores, folhagens, pipas, lonas, etc	5
Corrosão, oxidação	6
Descarga atmosférica	7
Desgaste - perda de material por atrito	8
Efeito capacitivo - queima de estruturas de madeira por correntes capacitivas de 60 Hz	9
Em estudo - classificação temporária, alterada após conclusão do estudo	10
Enchente	11
Erosão/recalque do solo	12
Execução inadequada de manutenção	13
Envelhecimento - perda gradual das propriedades iniciais dos materiais	14
Fabricação - processo de fabricação do equipamento/componentes	15
Fadiga	16
Indeterminada - utilizada exclusivamente em duas situações: estudos não conclusivos ou por ser antieconômico investigar a causa	17
Material (matéria prima que compõe o componente)	18
Montagem - em fábrica ou anterior ao início da operação comercial do equipamento	19
Pássaros - desligamentos causados por excrementos de pássaros	20
Poluição - poluição do ar ou da água	21
Projeto - concepção, cálculos, desenhos, especificações utilizadas, etc	22
Queimada - queima da vegetação nas faixas de servidão ou próximo às LT que provoque desligamento(s) e queima de estrutura(s)	23
Sobreaquecimento - aquecimento anormal dos condutores, emendas e conexões causando rompimento ou danos nos componentes	24
Sobrecarga - potência superior à máxima prevista no projeto da LT	25
Vandalismo - provocada pela ação de terceiros que tem como objetivo provocar danos aos componentes das LT	26
Vegetação/faixa - vegetação alta na faixa de servidão ou próxima à LT, e por motivo de queda ou balanço excessivo cause a falha na LT	27
Vegetação/terceiros - causada pela queda de árvores na LT devido à poda ou corte da vegetação executada irregularmente por terceiros	28
Vento - ação direta de ventos fortes/vendaval sobre os componentes da LT	29
Vibração - ação contínua do vento sobre os cabos condutores e pára-raios nos pontos de emendas e grampeamento	30

FONTE: CEMIG

3.4.2 Metodologia desenvolvida

A metodologia desenvolvida foi elaborada considerando as referências bibliográficas API Recommended Practice 580 (2002), PEZZI (2003) e SILVA (2004). A seguir, são apresentadas as etapas do desenvolvimento da metodologia de inspeção baseada em risco para LT.

3.4.2.1 Divisão das LT em sistemas, conjunto e componentes

O QUADRO 3.13 identifica os sistemas, conjuntos e componentes de uma Linha de Subtransmissão visando facilitar a definição dos componentes críticos que irão contribuir com grande parte dos desligamentos permanentes das LT de 69 e 138 kV.

QUADRO 3.13
Sistemas, conjuntos e componentes de LT

SISTEMA	CONJUNTO	COMPONENTE
A - Estrutura	A1 - Parte Aérea	A1.1 - Cantoneiras
		A1.2 - Parafusos
		A1.3 - Mancais
		A1.4 - Cruzeta
		A1.5 - Poste
	A2 - Fundação	A2.1 - Cantoneiras
		A2.2 - Parafusos
	A3 - Sistema de aterramento	A3.1 - Fio contrapeso
		A3.2 - Hastes
		A3.3 - Conectores
	A4 - Estaiamento	A4.1 - Estai
		A4.2 - Conectores
A4.3 - Hastes		
A4.4 - Âncoras		
B - Cabo condutor		B1 - Cabo
		B2 - Emenda preformada total
		B3 - Emenda preformada condutora
		B4 - Emenda à compressão
		B5 - Amortecedor
		B6 - Amortecedor-espaçador
		B7 - Espaçador
C - Cabo pára-raios		C1 - Cabo
		C2 - Emenda tipo cunha
		C3 - Amortecedor
		C4 - Esfera de sinalização
		C5 - Pára-raios de ZNO
D - Cadeira de isoladores	D1 - Suspensão	D1.1 - Isolador
		D1.2 - Grampo
		D1.3 - Ferragens
	D2 - Ancoragem	D2.1 - Isolador
		D2.2 - Grampo
		D2.3 - Ferragens
	D3 - Jumper	D3.1 - Isolador
		D3.2 - Grampo
		D3.3 - Ferragens

3.4.2.2 Análise do banco de dados de manutenção de LT

O banco de dados utilizado para desenvolvimento da metodologia indica os tipos de ocorrências, por classe de tensão, que ocasionaram os desligamentos permanentes. O QUADRO 3.14 mostra as ocorrências registradas no período entre 2002 e 2006 e o QUADRO 3.15 mostra um resumo das falhas nas LT de 69 e 138 kV.

QUADRO 3. 14
Ocorrências nas LT

Tensão	Ocorrências																				
	Total	1	2	4	5	6	7	8	9	10	13	16	17	23	24	25	26	27	28	29	30
69 kV	142	4	0	12	3	1	17	1	24	0	0	5	8	21	1	0	18	5	7	14	1
138 kV	86	5	1	1	4	1	11	1	4	1	2	1	4	3	4	1	21	7	2	11	1

FONTE: CEMIG

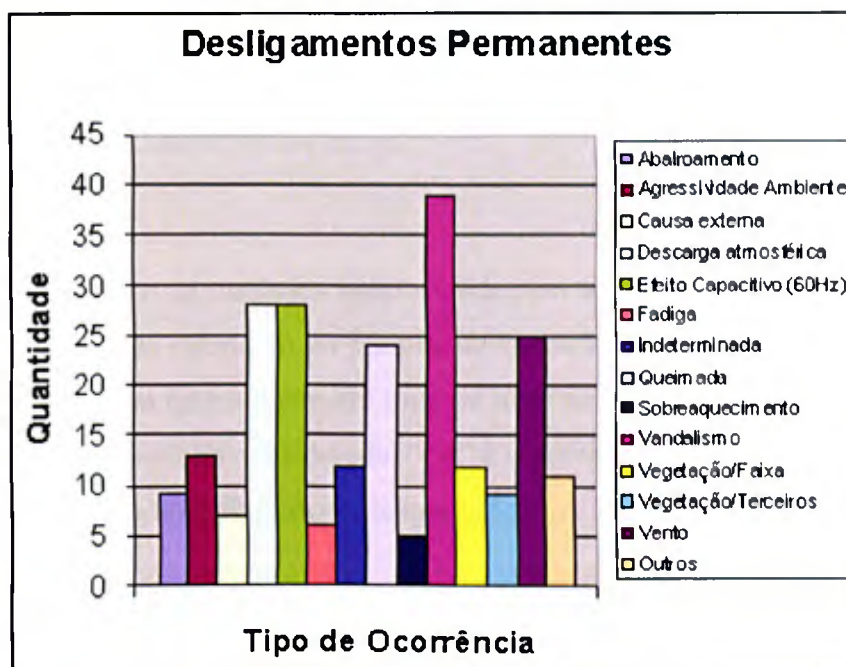
QUADRO 3. 15
Componentes que mais falharam nas LT

Sistema	Conjunto/Componentes		% Falha	
	Descrição	Código	69 kV	138 kV
Estrutura	Parte aérea	A1	4	13
	Cruzeta	A1.4	28	2
	Poste	A1.5	15	6
Cabo condutor	Cabo condutor	B1	29	47
	Emenda pref. total	B2	2	0
Cabo Pára-raios	Cabo pára-raios	C1	6	4
	Pára-raios ZnO	C5	0	2
Cadeia de isoladores	Isolador	D1.1	17	26

Nas LT de 138 kV é elevado o índice de falha no item A1 – Parte Aérea porque o principal tipo de estrutura é metálica – 84% das LT e as falhas foram discriminadas no banco de dando somente como estrutura, não sendo detalhado o componente.

O QUADRO 3.16 mostra um resumo dos diversos tipos de ocorrências que ocasionaram desligamentos permanentes nas LT de 69 e 138 kV.

QUADRO 3. 16
Ocorrências nas LT de 69 e 138kV



3.4.2.3 Determinação da Frequência de Ocorrência de Falhas (FOF)

O desempenho das concessionárias de energia elétrica quanto à continuidade do serviço prestado de energia elétrica é medido conforme Resolução ANEEL nº 024 (2000). Para determinação da FOF levou-se em consideração o indicador denominado Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora – DEC que mostra o número de horas, em média, que um consumidor fica sem energia elétrica durante um período, geralmente mensal. As penalidades relativas ao não cumprimento das metas de continuidade estão descritas em Resolução ANEEL nº 063 (2004).

Os valores máximos estabelecidos para o DEC são mensais, trimestrais e anuais. O valor mensal corresponde ao intervalo entre o início e o final da contabilização das interrupções ocorridas no conjunto de unidades consumidoras. Os valores das metas para cada conjunto são os seguintes:

- Mensais: 30% dos valores anuais. Se as metas anuais forem iguais ou inferiores a 8 horas fica assegurado o limite de 2,5 horas mensais;
- trimestrais: 60% dos valores anuais estabelecidos.

O cálculo do DEC, Resolução ANEEL nº 024 (2000), utiliza a seguinte fórmula:

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^k Ca(i) * t(i)}{Cc} \quad (3.7)$$

Onde “Ca(i)” é o número de unidades interrompidas em um evento (i) no período de apuração, “t(i)” é a duração de cada evento (i) no período de apuração, “i” é o Índice de eventos ocorridos no sistema que provocam interrupções em uma ou mais unidades consumidoras, “k” é o número máximo de eventos no período considerado, “Cc” é o número total de unidades consumidoras do conjunto considerado no final do período de apuração.

Para a definição dos níveis de frequência, levam-se em consideração os seguintes fatores: valores mensais e anuais de DEC e para metas anuais iguais ou inferiores a oito horas o DEC mensal limite é 2,5 horas.

Foram determinados quatro níveis de FOF, QUADRO 3.17, para aplicação na matriz de risco quantitativa. Utilizou-se o método “Median Ranks” para ordenar cumulativamente dados de falha. O método foi aplicado em relação à média anual de horas paradas de cada sistema/componente. O método “Median Ranks” tem um nível de confiança específico (50%) e pode ser estimado utilizando-se a seguinte equação:

$$MR\% = \frac{j - 0,3}{N - 0,4} * 100 \quad (3.8)$$

Onde “j” é o número de ordem e “N” é o tamanho de amostra.

QUADRO 3. 17

Níveis de Frequência de Ocorrência de Falhas – FOF

Nível	Frequência de Ocorrência de Falha FOF	Horas paradas anuais	
		69 kV	138 kV
1	Sistema/Componente parado para manutenção no intervalo entre	0,00 – 2,00	0,00 – 2,00
2		2,01 – 4,00	2,01 – 4,00
3		4,01 – 8,00	4,01 – 8,00
4		Acima de 8,01	Acima de 8,01

3.4.2.4 Determinação da Conseqüência de Ocorrência de Falhas (COF)

a) Conseqüência de Ocorrência de Falha referente à Interrupção dos Negócios

Para a definição dos 4 níveis de COF foram considerados somente os custos relativos a equipe de manutenção que interveio para o retorno da LT a operação normal. Para a definição do custo médio dessa equipe foram considerados os custos de homem-hora, hospedagem e alimentação. Em relação à interrupção dos negócios, ou seja, comprometimento do atendimento aos setores residencial, comercial e industrial, o cálculo da perda de receita seria complexo para uma determinada LT. Dependeria da situação do sistema elétrico na região considerada, onde deveria ser verificado o tipo da malha elétrica se é interligada, radial ou outra.

b) Conseqüência de Ocorrência de Falha referente à Segurança

Considerando-se que as LT trabalham com distâncias de segurança determinadas por norma e padronizadas, esta conseqüência de falha não será utilizada.

c) Conseqüência de Ocorrência de Falha referente ao Meio Ambiente

Considerando-se que as LT não causarão riscos ao meio ambiente por estarem confinadas aos terrenos onde está implantada, esta conseqüência de falha não será utilizada.

O QUADRO 3.18 indica intervalos de custo de hora parada e os quatro níveis de Conseqüência de Ocorrência de Falhas dos sistemas/componentes das LT.

QUADRO 3. 18

Níveis de Conseqüência de Ocorrência de Falhas – COF

Nível	Consequência de Ocorrência de Falha COF	Custo anual com parada – R\$	
		69 kV	138 kV
1	Sistema/Componente parado para manutenção no intervalo entre	0,00 – 1.900,00	0,00 – 1.900,00
2		1.901,00 – 2.800,00	1.901,00 – 2.800,00
3		2.801,00 – 9.200,00	2.801,00 – 9.200,00
4		Acima de 9.201,00	Acima de 9.201,00

3.4.2.5 Definição da Matriz de Risco

Após a determinação dos quatro níveis de FOF e COF, foi definida a matriz de risco através da abordagem quantitativa de Inspeção Baseada em Risco. A finalidade da matriz de risco é determinar os sistemas/componentes críticos. A matriz possui quatro níveis de risco: baixo, médio, alto e muito alto.

3.4.2.6 Determinação dos sistemas/componentes críticos

Os sistemas/componentes críticos foram definidos como aqueles que apresentaram risco alto e muito alto. A definição dos sistemas/componentes críticos é importante para direcionar o programa de inspeção e manutenção para gerenciamento dos riscos em determinados patamares. O cálculo do risco total para a definição dos sistemas/componentes críticos é dado através da seguinte fórmula:

$$Risco = \sum_{i=1}^n H_i * C_i \quad (3.16)$$

Onde “Hi” é o total de horas paradas no período 2002/2006 e “Ci” é o custo por hora parada.

4 RESULTADOS

4.1 Ensaios realizados em laboratório

4.1.1 Análise química

4.1.1.1 Fio de aço

Os resultados das análises dos fios de aço são apresentados no QUADRO 4.1.

QUADRO 4. 1
Análise dos componentes dos fios de aço

	Aço 3	Aço 4	Aço 5	Aço 6	Aço 7	Aço 8	Aço 9
Carbono (C) %	0,3999	0,5333	0,6448	0,3264	0,4618	0,7039	0,4343
Silício (Si) %	0,0345	0,0606	0,0481	0,0164	0,0475	0,1322	0,0566
Manganês (Mn) %	0,1920	0,2892	0,2730	0,2225	0,2361	0,3971	0,1874
Fosforo (P) %	0,0076	0,0192	0,0119	0,0119	0,0101	0,0175	0,0180
Enxofre (S) %	0,0135	0,0285	0,0173	0,0153	0,0145	0,0150	0,0147
Cromo (Cr) %	< 0,0050	0,0772	0,0070	0,0403	0,0336	0,0244	0,0075
Molibdênio (Mo) %	< 0,0010	0,0081	< 0,0010	0,0013	< 0,0010	< 0,0010	0,0015
Níquel (Ni) %	< 0,0050	0,0705	< 0,0050	0,0243	0,0115	0,0068	0,0241
Alumínio (Al) %	0,0083	0,0072	0,0076	0,0068	0,0080	0,0074	0,0082
Cobalto (Co) %	< 0,0050	0,0163	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050
Cobre (Cu) %	< 0,0100	0,1418	0,0117	0,0780	0,0320	0,0139	0,0513
Niobio (Nb) %	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050
Titânio (Ti) %	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050
Vanádio (V) %	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050
Chumbo (Pb) %	< 0,0030	< 0,0030	< 0,0030	< 0,0030	< 0,0030	< 0,0030	< 0,0030
Estanho (Sn) %	0,0062	0,0244	0,0066	0,0115	0,0075	0,0066	0,0082
Magnésio (Mg) %	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050
Ferro (Fe) %	99,3156	98,7158	98,9644	99,2341	99,1254	98,6663	99,1804

4.1.1.2 Fio de Alumínio

Os resultados das análises dos fios de aço são apresentados no QUADRO 4.2.

QUADRO 4.2

Análise dos componentes dos fios de Alumínio

	Alum. 3	Alum. 4	Alum. 5	Alum. 6	Alum. 7	Alum. 8	Alum. 9
Silício (Si) %	0,0659	0,0633	0,0502	0,0326	0,0513	0,0509	0,0427
Ferro (Fe) %	0,2171	0,2518	0,1635	0,1477	0,1622	0,2101	0,1354
Cobre (Cu) %	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050
Manganês (Mn) %	0,0061	0,0060	0,0060	0,0051	0,0071	0,0051	0,0048
Magnésio (Mg) %	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050
Zinco (Zn) %	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	0,0152	< 0,0050	< 0,0050
Níquel (Ni) %	0,0053	0,0062	0,0052	0,0077	0,0053	0,0069	0,0082
Cromo (Cr) %	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050
Chumbo (Pb) %	0,0033	0,0027	0,0031	0,0030	0,0034	0,0030	0,0031
Estanho (Sn) %	0,0039	0,0040	0,0042	0,0040	0,0042	0,0044	0,0045
Titânio (Ti) %	< 0,0020	< 0,0020	< 0,0020	< 0,0020	< 0,0020	0,0032	< 0,0020
Alumínio (Al) %	99,6970	99,6641	99,7634	99,7942	99,7480	99,7147	99,7961

4.1.2 Ensaios de Tração

4.1.2.1 Cabo condutor novo – Linnet

Os resultados dos ensaios de tração dos fios de aço são apresentados no QUADRO 4.3, dos fios de Alumínio no QUADRO 4.4 e do cabo completo no QUADRO 4.5.

QUADRO 4.3

Resultados dos ensaios de tração para os fios de aço para o condutor Linnet novo

Amostra 1					
Nome	Carga Máx. (N)	Tensão Máx. (MPa)	Extensão (mm)	Ext. Pré Carga (mm)	Ext. Efetiva (mm)
Aco8Am1Ex1	6344,97	1602,90	61,99	17,32	44,67
Aco8Am1Ex2	6326,65	1598,27	46,78	9,11	37,67
Aco8Am1Central	6601,57	1667,73	48,08	12,42	35,66
Média	6424,40	1622,97	52,28	12,95	39,33
Desv. Padrão	153,71	38,83	8,43	4,13	4,73
Amostra 2					
Aco8Am2Ex1	6270,26	1584,03	54,89	16,22	38,67
Aco8Am2Ex2	6296,84	1590,74	59,43	22,43	37,00
Aco8Am2Central	6557,46	1656,58	59,63	16,6	43,00
Média	6374,85	1610,45	57,98	18,43	39,56
Desv. Padrão	158,70	40,09	2,68	3,47	3,10
Média Geral	6399,63	1616,71	55,13	15,69	39,45

QUADRO 4. 4

Resultados dos ensaios de tração para os fios de Alumínio para o condutor Linnet novo

Amostra 1						
Nome	Carga Máx. (N)	Tensão Máx. (MPa)	Extensão (mm)	Ext. Pré Carga (mm)	Ext. Efetiva (mm)	Rej.
Camada Externa						
A18-1-E1	1199,51	183,11	24,90	9,90	15,00	1
A18-1-E2	1201,48	183,41	18,50	4,50	14,00	
A18-1-E3	1186,25	181,09	20,40	8,74	11,66	
Média	1193,87	182,25	19,45	6,62	12,83	
Desv. Padrão	10,77	1,64	1,34	3,00	1,65	
Camada Interna						
A18-1-I1	1021,65	155,96	24,29	10,29	14,00	2
A18-1-I2	1135,98	173,41	20,79	6,12	14,67	
A18-1-I3	1127,75	172,16	24,30	10,30	14,00	
Média	1131,87	172,79	22,55	8,21	14,34	
Desv. Padrão	5,82	0,89	2,48	2,96	0,47	
Amostra 2						
Nome	Carga Máx. (N)	Tensão Máx. (MPa)	Extensão (mm)	Ext. Pré Carga (mm)	Ext. Efetiva (mm)	Rej.
Camada Externa						
A18-2-E1	1090,35	166,45	21,93	9,60	12,33	
A18-2-E2	1227,5	187,39	20,85	8,51	12,34	1
A18-2-E3	1155,61	176,41	26,66	12,32	14,34	
Média	1122,98	171,43	24,30	10,96	13,34	
Desv. Padrão	46,15	7,04	3,34	1,92	1,42	
Camada Interna						
A18-2-I1	1063,2	162,30	19,51	7,17	12,34	
A18-2-I2	1182,97	180,59	25,62	10,28	15,34	2
A18-2-I3	1080,69	164,97	25,89	12,89	13,00	
Média	1071,95	163,64	22,70	10,03	12,67	
Desv. Padrão	12,37	1,89	4,51	4,04	0,47	
Média Geral	1130,16	172,53	22,25	8,96	13,29	

QUADRO 4. 5

Resultados dos ensaios de tração para o cabo condutor Linnet novo

Cabo Linnet Novo					
Nome	Carga Máx. (N)	Tensão Máx. (MPa)	Extensão (mm)	Ext. Pré Carga (mm)	Ext. Efetiva (mm)
Amostra 1	66035,60	333,42	58,30	46,55	11,75
Amostra 2	66920,67	337,89	64,02	49,52	14,50
Amostra 3	67872,79	342,69	30,21	18,54	11,67
Média	66943,02	338,00	50,84	38,20	12,64
Desv. Padrão	918,80	4,64	18,10	17,09	1,61

4.1.2.2 Linha de Transmissão Pirapora - Montes Claros, 138 kV

Os resultados dos ensaios de tração dos fios de aço são apresentados no QUADRO 4.6, dos fios de Alumínio no QUADRO 4.7 e do cabo completo no QUADRO 4.8.

QUADRO 4.6

Resultados dos ensaios de tração para os fios de aço para o condutor da LT Pirapora - Montes Claros

Amostra 1					
Nome	Carga Máx. (N)	Tensão Máx. (MPa)	Extensão (mm)	Ext. Pré Carga (mm)	Ext. Efetiva (mm)
Aco3Am1Ex1	6556,12	1656,24	53,87	20,54	33,33
Aco3Am1Ex2	6647,47	1679,32	55,24	13,25	41,99
Aco3Am1Central	6691,28	1690,39	54,13	14,13	40,00
Média	6631,62	1675,32	54,41	15,97	38,44
Desv. Padrão	68,96	17,42	0,73	3,98	4,54
Amostra 2					
Aco3Am2Ex1	6581,69	1662,70	66,05	30,71	35,34
Aco3Am2Ex2	6387,65	1613,68	48,44	15,44	33,00
Aco3Am2Central	6666,12	1684,03	62,43	25,76	36,67
Média	6545,15	1653,47	58,97	23,97	35,00
Desv. Padrão	142,79	36,07	9,30	7,79	1,86
Média Geral	6588,39	1664,40	56,69	19,97	36,72

QUADRO 4. 7

Resultados dos ensaios de tração para os fios de Alumínio para o condutor da LT Pirapora - Montes Claros

Amostra 1						
Nome	Carga Máx. (N)	Tensão Máx. (MPa)	Extensão (mm)	Ext. Pré Carga (mm)	Ext. Efetiva (mm)	Rej.
Camada Externa						
A13-1-E1	1224,04	186,86	24,52	9,86	14,66	2
A13-1-E2	1100,66	168,02	19,93	5,60	14,33	
A13-1-E3	1200,02	183,19	29,24	11,57	17,67	
Média	1150,34	175,61	24,59	8,59	16,00	
Desv. Padrão	70,26	10,73	6,58	4,22	2,36	
Camada Interna						
A13-1-I1	1225,44	187,07	30,08	9,08	21,00	2
A13-1-I2	1292,08	197,24	46,65	15,32	31,33	
A13-1-I3	1298,04	198,15	22,33	5,00	17,33	2
A13-1-I4	1282,75	195,82	23,43	4,43	19,00	
Média	1287,42	196,53	35,04	9,88	25,17	
Desv. Padrão	6,60	1,01	16,42	7,70	8,72	
Amostra 2						
Nome	Carga Máx. (N)	Tensão Máx. (MPa)	Extensão (mm)	Ext. Pré Carga (mm)	Ext. Efetiva (mm)	Rej.
Camada Externa						
A13-2-E1	1195,82	182,55	28,15	5,81	22,34	2
A13-2-E2	1156,18	176,50	25,25	9,25	16,00	
A13-2-E3	1254,59	191,52	26,31	5,98	20,33	1
A13-2-E4	1181,78	180,41	31,79	15,45	16,34	
Média	1168,98	178,45	28,52	12,35	16,17	
Desv. Padrão	18,10	2,76	4,62	4,38	0,24	
Camada Interna						
A13-2-I1	1232,06	188,08	25,54	6,87	18,67	
A13-2-I2	1120,27	171,02	30,63	8,30	22,33	
Média	1176,17	179,55	28,09	7,59	20,50	
Desv. Padrão	79,05	12,07	3,60	1,01	2,59	
Média Geral	1195,73	182,54	29,06	9,60	19,46	

QUADRO 4. 8

Resultados dos ensaios de tração para o cabo condutor da LT Pirapora - Montes Claros

Cabo Linnnet - Pirapora - Montes Claros					
Nome	Carga Máx. (N)	Tensão Máx. (MPa)	Extensão (mm)	Ext. Pré Carga (mm)	Ext. Efetiva (mm)
Amostra 1	68549,69	346,11	51,75	39,25	12,50
Amostra 2	70066,39	353,77	86,16	72,91	13,25
Amostra 3	70207,21	354,48	82,75	69,76	13,00
Média	69607,76	351,45	73,55	60,64	12,92
Desv. Padrão	919,02	4,64	18,96	18,59	0,38

4.1.2.3 Linha de Transmissão Mariana - Timbopeba, 138 kV

Os resultados dos ensaios de tração dos fios de aço são apresentados no QUADRO 4.9, dos fios de Alumínio no QUADRO 4.10 e do cabo completo no QUADRO 4.11.

QUADRO 4. 9

Resultados dos ensaios de tração para os fios de aço para o condutor da LT Mariana - Timbopeba

Amostra 1					
Nome	Carga Máx. (N)	Tensão Máx. (MPa)	Extensão (mm)	Ext. Pré Carga (mm)	Ext. Efetiva (mm)
Aco5Am1Ex1	6356,24	1605,75	93,38	41,38	52,00
Aco5Am1Ex2	6244,03	1577,40	107,55	65,88	41,67
Aco5Am1Central	6426,48	1623,49	74,34	53,67	20,67
Média	6342,25	1602,21	91,76	53,64	38,11
Desv. Padrão	92,03	23,25	16,66	12,25	15,96
Amostra 2					
Aco5Am2Ex1	6135,11	1549,89	70,44	39,77	30,67
Aco5Am2Ex2	6468,15	1634,02	65,44	23,77	41,67
Aco5Am2Central	6397,37	1616,14	67,81	19,48	48,33
Média	6333,54	1600,02	67,90	27,67	40,22
Desv. Padrão	175,45	44,32	2,50	10,69	8,92
Média Geral	6337,90	1601,12	79,83	40,66	39,17

QUADRO 4. 10

Resultados dos ensaios de tração para os fios de Alumínio para o condutor da LT Mariana - Timbopeba

Amostra 1						
Nome	Carga Máx. (N)	Tensão Máx. (MPa)	Extensão (mm)	Ext. Pré Carga (mm)	Ext. Efetiva (mm)	Rej.
Camada Externa						
A15-1-E1	1054,53	160,98	25,28	6,95	18,33	
A15-1-E2	1173,44	179,13	30,70	10,04	20,66	
Média	1113,99	160,98	27,99	8,50	19,50	
Desv. Padrão	84,08	12,84	3,83	2,18	1,65	
Camada Interna						
A15-1-I1	996,98	152,20	22,78	5,78	17,00	1
A15-1-I2	1209,47	184,63	25,55	8,89	16,66	
A15-1-I3	1119,43	170,89	25,26	8,93	16,33	
Média	1164,45	177,76	25,41	8,91	16,50	
Desv. Padrão	63,67	9,72	0,21	0,03	0,23	
Amostra 2						
Nome	Carga Máx. (N)	Tensão Máx. (MPa)	Extensão (mm)	Ext. Pré Carga (mm)	Ext. Efetiva (mm)	Rej.
Camada Externa						
A15-2-E1	993,64	151,69	26,79	14,79	12,00	
A15-2-E2	1073,81	163,92	21,48	8,15	13,33	1
A15-2-E3	1168,94	178,45	20,87	6,54	14,33	
Média	1081,29	165,07	23,83	10,67	13,17	
Desv. Padrão	123,96	18,92	4,19	5,83	1,65	
Camada Interna						
A15-2-I1	1162,65	177,49	21,74	6,39	15,35	
A15-2-I2	---	---	---	---	---	3
A15-2-I3	999,03	152,51	21,55	2,55	19,00	1
A15-2-I4	1191,38	181,87	22,56	3,90	18,66	1
A15-2-I5	1121,88	171,26	24,09	7,42	16,67	
Média	1142,27	174,37	22,92	6,91	16,01	
Desv. Padrão	28,83	4,40	1,66	0,73	0,93	
Média Geral	1125,50	169,55	25,04	8,74	16,29	

QUADRO 4. 11

Resultados dos ensaios de tração para o cabo condutor da LT Mariana - Timbopeba

Cabo Linnet - Mariana - Timbopeba					
Nome	Carga Máx. (N)	Tensão Máx. (MPa)	Extensão (mm)	Ext. Pré Carga (mm)	Ext. Efetiva (mm)
Amostra 1	67746,13	342,05	65,38	52,88	12,50
Amostra 2	67042,14	338,50	64,18	51,18	13,00
Amostra 3	68690,03	346,82	73,61	61,27	12,33
Média	67826,10	342,46	67,72	55,11	12,61
Desv. Padrão	826,85	4,17	5,13	5,40	0,35

4.1.2.4 Linha de Transmissão Barão de Cocais - Caeté, 69 kV

Os resultados dos ensaios de tração dos fios de aço são apresentados no QUADRO 4.12, dos fios de Alumínio no QUADRO 4.13 e do cabo completo no QUADRO 4.14.

QUADRO 4. 12

Resultados dos ensaios de tração para os fios de aço para o condutor da LT Barão de Cocais - Caeté

Amostra 1					
Nome	Carga Máx. (N)	Tensão Máx. (MPa)	Extensão (mm)	Ext. Pré Carga (mm)	Ext. Efetiva (mm)
Aco6Am1Ex1	6379,25	1611,56	45,52	11,86	33,66
Aco6Am1Ex2	6396,06	1615,81	54,45	19,79	34,66
Aco6Am1Central	6440,55	1627,05	93,58	43,58	50,00
Média	6405,29	1618,14	64,52	25,08	39,44
Desv. Padrão	31,67	8,00	25,56	16,51	9,16
Amostra 2					
Aco6Am2Ex1	6446,39	1628,52	62,67	24,67	38,00
Aco6Am2Ex2	6518,6	1646,77	65,53	21,53	44,00
Aco6Am2Central	6480,01	1637,02	72,27	22,60	49,67
Média	6481,67	1637,44	66,82	22,93	43,89
Desv. Padrão	36,13	9,13	4,93	1,60	5,84
Média Geral	6443,48	1627,79	65,67	24,01	41,67

QUADRO 4. 13

Resultados dos ensaios de tração para os fios de Alumínio para o condutor da LT Barão de Cocais - Caeté

Amostra 1						
Nome	Carga Máx. (N)	Tensão Máx. (MPa)	Extensão (mm)	Ext. Pré Carga (mm)	Ext. Efetiva (mm)	Rej.
Camada Externa						
Al6-1-E1	1322,06	201,82	34,19	12,19	22,00	2
Al6-1-E2	1330,7	203,14	26,72	10,72	16,00	2
Al6-1-E3	1240,28	189,34	30,86	8,86	22,00	1
Al6-1-E4	1258,05	192,05	34,24	11,23	23,01	1
Al6-1-E5	1289,73	196,89	27,03	8,36	18,67	
Al6-1-E6	1227,08	187,32	23,77	7,43	16,34	
Média	1258,41	192,10	25,40	7,90	17,51	
Desv. Padrão	44,30	6,76	2,31	0,66	1,65	
Camada Interna						
Al6-1-I1	1192,96	182,11	35,00	10,00	25,00	2
Al6-1-I2	1280,49	195,48	30,03	10,03	20,00	
Al6-1-I3	1248,63	190,61	28,40	8,74	19,66	
Média	1264,56	193,04	29,22	9,39	19,83	
Desv. Padrão	22,53	3,44	1,15	0,91	0,24	
Amostra 2						
Nome	Carga Máx. (N)	Tensão Máx. (MPa)	Extensão (mm)	Ext. Pré Carga (mm)	Ext. Efetiva (mm)	Rej.
Camada Externa						
Al6-2-E1	1297,68	198,10	21,03	7,06	13,97	
Al6-2-E2	1328,5	202,80	27,58	12,92	14,66	
Média	1313,09	200,45	24,31	9,99	14,32	
Desv. Padrão	21,79	3,33	4,63	4,14	0,49	
Camada Interna						
Al6-2-I1	1268,89	193,70	31,1	13,76	17,34	
Al6-2-I2	1245,23	190,09	28,07	10,17	17,90	1
Al6-2-I3	1299,26	198,34	30,41	11,41	19,00	2
Al6-2-I4	1303,76	199,03	28,53	10,87	17,66	
Média	1286,33	196,37	29,82	12,32	17,50	
Desv. Padrão	24,66	3,76	1,82	2,04	0,23	
Média Geral	1280,60	195,49	27,18	9,90	17,29	

QUADRO 4. 14

Resultados dos ensaios de tração para o cabo condutor da LT Barão de Cocais - Caeté

Cabo Linnet - Barão de Cocais - Caeté					
Nome	Carga Máx. (N)	Tensão Máx. (MPa)	Extensão (mm)	Ext. Pré Carga (mm)	Ext. Efetiva (mm)
Amostra 1	70919,72	358,08	58,54	46,04	12,50
Amostra 2	66383,99	335,18	46,32	36,58	9,74
Amostra 3	74337,63	375,33	79,20	64,20	15,00
Média	70547,11	356,20	61,35	48,94	12,41
Desv. Padrão	3989,89	20,15	16,62	14,04	2,63

4.1.2.5 Linha de Transmissão Sete Lagoas 3 - Cominci, 138 kV

Os resultados dos ensaios de tração dos fios de aço são apresentados no QUADRO 4.15, dos fios de Alumínio no QUADRO 4.16 e do cabo completo no QUADRO 4.17.

QUADRO 4.15

Resultados dos ensaios de tração para os fios de aço para o condutor da LT Sete Lagoas 3 - Cominci

Amostra 1					
Nome	Carga Máx. (N)	Tensão Máx. (MPa)	Extensão (mm)	Ext. Pré Carga (mm)	Ext. Efetiva (mm)
Aco7Am1Ex1	5878,00	1484,93	60,14	19,48	40,66
Aco7Am1Ex2	5786,27	1461,76	42,62	11,62	31
Aco7Am1Central	5788,62	1462,35	55,10	20,77	34,33
Média	5817,63	1469,68	52,62	17,29	35,33
Desv. Padrão	52,30	13,21	9,02	4,95	4,91
Amostra 2					
Aco7Am2Ex1	5283,98	1334,87	52,90	25,23	27,67
Aco7Am2Ex2	5720,53	1445,15	52,98	18,98	34,00
Aco7Am2Central	5740,14	1450,11	49,84	14,50	35,34
Média	5581,55	1410,04	51,91	19,57	32,34
Desv. Padrão	257,89	65,15	1,79	5,39	4,10
Média Geral	5699,59	1439,86	52,26	18,43	33,83

QUADRO 4. 16

Resultados dos ensaios de tração para os fios de Alumínio para o condutor da LT Sete Lagoas 3 - Cominci

Amostra 1						
Nome	Carga Máx. (N)	Tensão Máx. (MPa)	Extensão (mm)	Ext. Pré Carga (mm)	Ext. Efetiva (mm)	Rej.
Camada Externa						
A17-1-E1	998,97	152,50	17,77	7,10	10,67	
A17-1-E2	1231,04	187,93	18,94	6,61	12,33	1
A17-1-E3	1105,01	168,69	18,47	6,14	12,33	
A17-1-E4	1229,02	187,62	23,92	8,26	15,66	2
Média	1051,99	160,59	18,12	6,62	11,50	
Desv. Padrão	74,98	11,45	0,49	0,68	1,17	
Camada Interna						
A17-1-I1	1018,26	155,44	16,54	5,21	11,33	
A17-1-I2	1149,89	175,54	23,88	9,88	14,00	
Média	1084,08	165,49	20,21	7,55	12,67	
Desv. Padrão	93,08	14,21	5,19	3,30	1,89	
Amostra 2						
Nome	Carga Máx. (N)	Tensão Máx. (MPa)	Extensão (mm)	Ext. Pré Carga (mm)	Ext. Efetiva (mm)	Rej.
Camada Externa						
A17-2-E1	1145,9	174,93	23,19	11,19	12,00	1
A17-2-E2	971,11	148,25	23,57	7,90	15,67	
A17-2-E3	1056,79	161,33	18,11	7,11	11,00	
Média	1013,95	154,79	20,84	7,51	13,34	
Desv. Padrão	60,58	9,25	3,86	0,56	3,30	
Camada Interna						
A17-2-I1	1146,79	175,07	20,92	7,58	13,34	
A17-2-I2	1201,3	183,39	23,57	7,57	16,00	2
A17-2-I3	1147,96	175,24	21,83	8,83	13,00	
Média	1147,38	175,15	21,38	8,21	13,17	
Desv. Padrão	0,83	0,13	0,64	0,88	0,24	
Média Geral	1074,35	164,01	20,14	7,47	12,67	

QUADRO 4. 17

Resultados dos ensaios de tração para o cabo condutor da LT Sete Lagoas 3 - Cominci

Cabo Linnnet - Sete Lagoas 3 / Cominci					
Nome	Carga Máx. (N)	Tensão Máx. (MPa)	Extensão (mm)	Ext. Pré Carga (mm)	Ext. Efetiva (mm)
Amostra 1	61962,10	312,85	58,36	48,85	9,51
Amostra 2	62769,20	316,92	69,50	59,25	10,25
Amostra 3	65121,59	328,80	53,72	41,72	12,00
Média	63284,30	319,53	60,53	49,94	10,59
Desv. Padrão	1641,52	8,29	8,11	8,82	1,28

4.1.2.6 Cabo condutor novo - Penguin

Os resultados dos ensaios de tração dos fios de aço são apresentados no QUADRO 4.18, dos fios de Alumínio no QUADRO 4.19 e do cabo completo no QUADRO 4.20.

QUADRO 4. 18

Resultados dos ensaios de tração para os fios de aço para o condutor Penguin novo

Aço 9					
Nome	Carga Máx. (N)	Tensão Máx. (MPa)	Extensão (mm)	Ext. Pré Carga (mm)	Ext. Efetiva (mm)
Aço9Am1	23536,00	1317,06	12,34	5,51	6,83
Aço9Am2	24722,30	1383,45	12,3	1,97	10,33
Média	24129,15	1350,25	12,32	3,74	8,58
Desv. Padrão	838,84	46,94	0,03	2,50	2,47

QUADRO 4. 19

Resultados dos ensaios de tração para os fios de Alumínio para o condutor Penguin novo

Amostra 1						
Nome	Carga Máx. (N)	Tensão Máx. (MPa)	Extensão (mm)	Ext. Pré Carga (mm)	Ext. Efetiva (mm)	Rej.
Camada Única						
A19-1-Ex1	2717,91	152,09	39,04	16,37	22,67	1
A19-1-Ex2	2764,85	154,72	34,18	11,17	23,01	
A19-1-Ex3	2648,8	148,23	51,28	28,61	22,67	
Média	2706,83	151,47	42,73	19,89	22,84	
Desv. Padrão	82,06	4,59	12,09	12,33	0,24	
Amostra 2						
Camada Única						
A19-2-Ex1	2500,71	139,94	55,19	22,65	32,54	4
A19-2-Ex2	2750,66	153,93	46,2	20,87	25,33	
A19-2-Ex3	2682,21	150,09	51,29	22,95	28,34	
Média	2716,44	152,01	48,75	21,91	26,84	
Desv. Padrão	48,40	2,71	3,60	1,47	2,13	
Média Geral	2740,64	153,36	41,46	16,54	24,92	

QUADRO 4. 20

Resultados dos ensaios de tração para o cabo condutor Penguin novo

Cabo Penguin Novo					
Nome	Carga Máx. (N)	Tensão Máx. (MPa)	Extensão (mm)	Ext. Pré Carga (mm)	Ext. Efetiva (mm)
Amostra 1	38385,63	306,87	50,37	40,37	10,00
Amostra 2	38818,09	310,33	43,76	33,01	10,75
Amostra 3	39141,48	312,92	39,91	29,25	10,66
Média	38781,73	310,04	44,68	34,21	10,47
Desv. Padrão	379,23	3,03	5,29	5,66	0,41

4.1.2.7 Linha de Transmissão Várzea da Palma – Pirapora, 69 kV

Os resultados dos ensaios de tração dos fios de aço são apresentados no QUADRO 4.21, dos fios de Alumínio no QUADRO 4.22 e do cabo completo no QUADRO 4.23.

QUADRO 4. 21

Resultados dos ensaios de tração para os fios de aço para o condutor LT Várzea da Palma - Pirapora

Aço 4					
Nome	Carga Máx. (N)	Tensão Máx. (MPa)	Extensão (mm)	Ext. Pré Carga (mm)	Ext. Efetiva (mm)
Aço4Am1	26264,00	1469,72	46,73	3,40	43,33
Aço4Am2	25759,90	1441,51	26,99	12,49	14,50
Média	26011,95	1455,61	36,86	7,95	28,92
Desv. Padrão	356,45	19,95	13,96	6,43	20,39

QUADRO 4. 22

Resultados dos ensaios de tração para os fios de Alumínio para o condutor LT Várzea da Palma - Pirapora

Amostra 1						
Nome	Carga Máx. (N)	Tensão Máx. (MPa)	Extensão (mm)	Ext. Pré Carga (mm)	Ext. Efetiva (mm)	Rej.
Camada Única						
Al4-1-Ex1	2811,88	157,35	49,80	14,47	35,33	2
Al4-1-Ex2	2720,42	152,23	42,75	14,08	28,67	
Al4-1-Ex3	2291,41	128,23	23,05	4,38	18,67	1
Al4-1-Ex4	2544,73	142,40	42,46	11,47	30,99	
Média	2632,58	147,32	42,61	12,78	29,83	
Desv. Padrão	124,23	6,95	0,21	1,85	1,64	
Amostra 2						
Camada Única						
Al4-2-Ex1	2371,28	132,70	40,51	13,51	27,00	1
Al4-2-Ex2	2858,37	159,95	65,07	17,40	47,67	2
Al4-2-Ex3	2651,04	148,35	55,89	16,23	39,66	2
Al4-2-Ex4	2842,04	159,04	46,08	14,08	32,00	
Al4-2-Ex5	2776,03	155,35	39,06	18,39	20,67	
Média	2809,04	157,19	42,57	16,24	26,34	
Desv. Padrão	46,68	2,61	4,96	3,05	8,01	
Média Geral	2720,81	152,25	42,59	14,51	28,08	

QUADRO 4. 23

Resultados dos ensaios de tração para o cabo condutor da LT Várzea da Palma - Pirapora

Cabo Penguin - Várzea da Palma / Pirapora					
Nome	Carga Máx. (N)	Tensão Máx. (MPa)	Extensão (mm)	Ext. Pré Carga (mm)	Ext. Efetiva (mm)
Amostra 1	40313,63	322,29	41,31	30,06	11,25
Amostra 2	40592,25	324,51	43,82	33,08	10,74
Amostra 3	41615,34	332,69	55,81	43,48	12,33
Média	40840,41	326,50	46,98	35,54	11,44
Desv. Padrão	685,42	5,48	7,75	7,04	0,81

4.1.3 Ensaio de Dureza

Os resultados dos ensaios de dureza dos fios de aço são apresentados no QUADRO 4.24 e dos fios de Alumínio no QUADRO 4.25.

QUADRO 4. 24

Resultados dos ensaios de dureza dos fios de aço

Aço 3					
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
Medição	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)
1	331,9	325,3	358,7	334,6	319,8
2	328,8	321,9	346,1	327,5	324,0
3	329,2	316,5	336,4	323,2	317,3
Média	330,0	321,2	347,1	328,4	320,4
Desvio Padrão	1,7	4,5	11,2	5,7	3,4
Aço 4					
Medição	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)
1	291,6	298,6	307,6	312,8	309,9
2	285,5	290,5	303,2	305,6	304,0
3	289,0	310,7	295,6	312,8	307,6
Média	288,7	300,0	302,1	310,4	307,2
Desvio Padrão	3,1	10,2	6,0	4,1	3,0
Aço 5					
Medição	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)
1	310,7	348,9	341,9	340,0	335,5
2	320,2	354,3	327,0	335,5	332,8
3	321,9	351,8	339,1	319,0	309,5
Média	317,6	351,7	336,0	331,5	325,9
Desvio Padrão	6,0	2,7	7,9	11,1	14,3
Aço 6					
Medição	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)
1	334,1	348,9	359,2	364,8	330,1
2	337,7	348,5	355,7	340,9	322,3
3	348,9	348,0	364,3	337,3	313,6
Média	340,3	348,5	359,7	347,7	322,0
Desvio Padrão	7,7	0,5	4,3	14,9	8,3
Aço 7					
Medição	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)
1	294,5	296,0	309,1	327,0	316,5
2	292,7	288,7	315,6	328,4	308,7
3	297,9	278,2	313,2	312,4	309,5
Média	295,0	287,6	312,6	322,6	311,6
Desvio Padrão	2,6	9,0	3,3	8,9	4,2
Aço 8					
Medição	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)
1	320,2	326,6	318,5	323,6	322,3
2	312,4	324,9	330,6	328,4	316,0
3	324,9	332,8	325,8	327,9	331,0
Média	319,2	328,1	324,9	326,6	323,1
Desvio Padrão	6,3	4,1	6,0	2,6	7,5
Aço 9					
Medição	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)
1	316,9	315,6	326,2	317,3	291,6
2	330,1	294,5	334,6	317,3	313,2
3	321,5	300,2	348,9	325,8	306,0
Média	322,8	303,4	336,6	320,1	303,6
Desvio Padrão	6,7	10,9	11,5	4,9	11,0

QUADRO 4. 25

Resultados dos ensaios de dureza dos fios de Alumínio

Alumínio 3					
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
Medição	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)
1	47,5	42,7	44,1	44,3	43,6
2	46,5	43,3	43,9	44,1	44,0
3	46,1	42,4	43,1	44,8	43,8
Média	46,7	42,8	43,7	44,4	43,8
Desvio Padrão	0,7	0,4	0,5	0,3	0,2
Alumínio 4					
Medição	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)
1	37,8	35,9	37,6	36,4	37,4
2	36,4	36,6	37,3	36,8	38,8
3	37,0	35,8	37,1	37,0	38,2
Média	37,1	36,1	37,3	36,7	38,1
Desvio Padrão	0,7	0,4	0,2	0,3	0,7
Alumínio 5					
Medição	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)
1	40,1	42,9	44,6	43,6	41,1
2	41,4	43,3	45,0	43,9	41,0
3	40,6	42,9	45,4	44,1	40,6
Média	40,7	43,0	45,0	43,9	40,9
Desvio Padrão	0,7	0,2	0,4	0,3	0,3
Alumínio 6					
Medição	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)
1	39,5	45,7	45,7	45,7	45,6
2	39,9	47,8	45,1	45,2	44,7
3	39,3	46,9	45,5	45,5	44,4
Média	39,6	46,8	45,4	45,5	44,9
Desvio Padrão	0,3	1,0	0,3	0,2	0,6
Alumínio 7					
Medição	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)
1	41,9	40,2	42,6	41,9	40,8
2	41,8	40,3	44,0	42,0	41,9
3	41,9	40,3	44,1	41,8	41,0
Média	41,9	40,3	43,6	41,9	41,3
Desvio Padrão	0,1	0,1	0,9	0,1	0,6
Alumínio 8					
Medição	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)
1	44,7	43,4	44,3	42,5	45,8
2	44,8	43,4	43,8	41,5	45,6
3	43,4	43,4	43,6	41,6	45,9
Média	44,3	43,4	43,9	41,9	45,8
Desvio Padrão	0,8	0,0	0,3	0,6	0,2
Alumínio 9					
Medição	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)	Dureza (HV 1)
1	41,5	43,5	42,7	44,0	43,4
2	42,0	43,0	42,8	44,6	41,7
3	42,2	43,2	43,8	44,3	41,3
Média	41,9	43,3	43,1	44,3	42,1
Desvio Padrão	0,3	0,2	0,6	0,3	1,1

4.1.4 Ensaio de Resistência Elétrica

Os resultados dos ensaios de resistência elétrica dos cabos condutores das diversas linhas de subtransmissão são apresentados no QUADRO 4.26.

QUADRO 4. 26

Resultados dos ensaios de resistência elétrica dos cabos condutores

Amostra	Corrente (A)			Tensão (mV)			Resistência (mΩ/km)				Temp (°C)		Data
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	média	ambiente	cabo	
Cabo condutor LINNET - Resistência elétrica CC a 20°C: 169,25 mΩ/km (nominal)													
6	1,026	2,044	3,061	0,501	0,996	1,489	162,97	162,5	162,17	162,55	17	17	21/9/2006
6	1,024	2,044	3,062	0,501	0,996	1,489	163,21	162,54	162,12	162,62	17	17	21/9/2006
3	1,022	2,046	3,064	0,492	0,993	1,485	160,37	161,7	161,6	161,22	21	21	20/9/2006
3	1,021	2,046	3,064	0,492	0,993	1,485	160,53	161,74	161,57	161,28	21	21	20/9/2006
5	1,021	2,047	3,064	0,499	0,999	1,496	162,99	162,64	162,78	162,8	17	16	21/9/2006
5	1,022	2,047	3,063	0,499	0,999	1,496	162,91	162,68	162,84	162,81	17	17	21/9/2006
7	1,024	2,042	3,066	0,543	1,083	1,622	176,73	176,81	176,39	176,65	18	18	21/9/2006
7	1,026	2,047	3,066	0,442	0,878	1,311	143,72	142,97	142,48	143,06	18	18	21/9/2006
8	1,023	2,044	3,064	0,494	0,985	1,474	161,06	160,69	160,39	160,72	21	20	20/9/2006
8	1,023	2,042	3,063	0,494	0,985	1,474	160,98	160,85	160,45	160,76	21	21	20/9/2006
Cabo condutor PENGUIN - Resistência elétrica CC a 20°C: 267,61 mΩ/km (nominal)													
9	1,024	2,042	3,06	0,753	1,498	2,242	245,12	244,56	244,23	244,64	17	17	21/9/2006
9	1,025	2,041	3,065	0,753	1,498	2,242	245	244,68	244,84	244,51	17	17	21/9/2006
4	1,025	2,046	3,064	0,758	1,51	2,26	246,64	246,07	245,89	246,2	20	19	20/9/2006
4	1,022	2,045	3,062	0,758	1,51	2,26	247,37	246,19	245,05	246,54	20	19	20/9/2006

4.1.5 Variação da temperatura em função do rompimento de fios externos em cabos condutores

4.1.5.1 Dados do ensaio realizado

Local de realização: Depto. Elétrica - UFMG/LEAT - Laboratório de extra-alta tensão.

Data de realização: 03/03/2006.

4.1.5.2 Etapas do ensaio

O objetivo do ensaio era realizar o rompimento dos cinco primeiros fios de Alumínio, conforme mostrado no QUADRO 4.27.

QUADRO 4. 27
Resumo das etapas do ensaio

Etapa	Corrente de ensaio (A)	Início				Final			
		Horário (hh:mm)	Tempo transcorrido (min)	Temp. Ambiente (°C)	Umidade (%)	Horário (hh:mm)	Tempo transcorrido (min)	Temp. Ambiente (°C)	Umidade (%)
Cabo completo	325	13:45	0	28	70,4	14:14	29	29	62,9
1º fio rompido	325	14:20	35	29	61,4	14:36	51	29	58,5
2º fio rompido	325	14:42	57	29	58,5	14:58	73	31	60,9
3º fio rompido	325	15:01	76	31	60,9	15:20	95	29	59,6
4º fio rompido	325	15:25	100	29	59,6	15:40	115	30	60,8
5º fio rompido	325	15:45	120	30	60,8	16:00	135	30	68,6
6º fio rompido	325	16:05	140						

A FIG.4.1 mostra o corpo de prova com o 1º fio de Alumínio rompido.



FIGURA 4. 1 – Cabo com 01 fio de Alumínio rompido

A FIG.4.2 mostra a degradação da fixação dos termopares ao cabo após o rompimento do 5º fio.



FIGURA 4. 2 – Situação da fixação após corte do 5º fio

O QUADRO 4.28 indica as temperaturas alcançadas pelos termopares ao longo do ensaio.

QUADRO 4. 28
Resumo das temperaturas medidas

Etapa	Resumo da medição de temperatura do ensaio										
	Tempo (min)	Termopares									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 - Início aquecimento	0	32	32	33	32	32	33	33	33	33	34
2 - Início corte 1° fio	29	95	93	94	96	99	99	94	92	94	98
3 - Término corte 1° fio	35	100	94	96	94	98	97	96	92	91	97
4 - Início corte 2° fio	51	103	101	103	102	106	105	101	95	94	98
5 - Término corte 2° fio	57	103	101	103	102	106	106	100	95	96	101
6 - Início corte 3° fio	73	115	117	114	117	122	123	107	96	95	100
7 - Término corte 3° fio	76	117	119	116	119	124	122	112	102	99	102
8 - Início corte 4° fio	95	138	139	134	142	150	155	130	107	99	100
9 - Término corte 4° fio	100	140	145	140	149	155	156	140	115	103	102
10 - Início corte 5° fio	115	165	175	168	183	201	205	175	138	118	113
11 - Término corte 5° fio	120	172	183	176	190	206	209	183	149	128	119
12 - Temperatura máxima atingida	126	193	173	174	205	243	300	56	159	125	117
13 - Início do corte 6° fio	135	168	187	175	228	274	232	56	189	148	126
14 - Término corte 6° fio	140	177	196	182	236	284	240	65	198	158	130
15 - Retirada dos termopares	145	60	47	52	71	46	74	41	180	148	127

Como uma etapa adicional, rompeu-se o 6° fio de Alumínio. Rapidamente, o fio de aço galvanizado tornou-se avermelhado e a corrente de ensaio caiu para 196A, não sendo possível regular a corrente para 325A. Os termopares próximos à seção de ruptura afastaram-se do cabo condutor conforme mostrado na FIG.4.3.

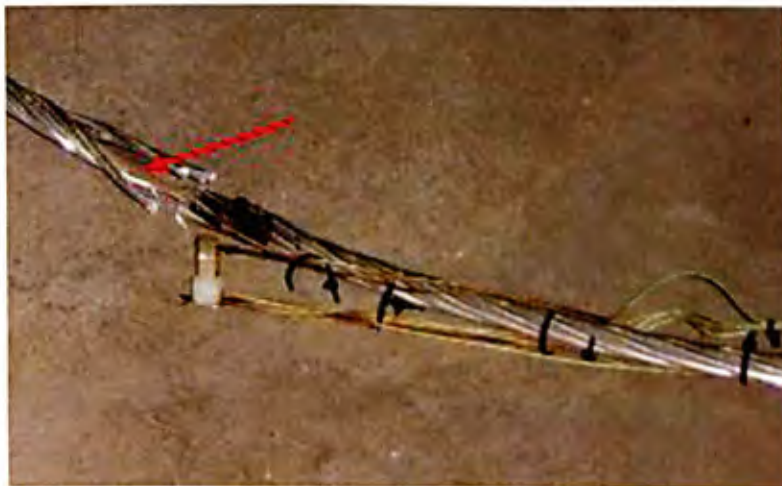


FIGURA 4. 3 – Situação da fixação e do fio de aço após corte do 6° fio

O QUADRO 4.29 indica a seqüência de falha das fixações.

QUADRO 4. 29

Resumo das falhas das fixações dos termopares

Termopar	Ensaio		
	Tempo decorrido (min)	Temperatura (°C)	Etapa
2	120,4	185	11 – Término corte 5° fio
3	120,4	179	11 – Término corte 5° fio
7	124,9	218	11 – Término corte 5° fio
6	126,8	300	11 – Término corte 5° fio
4	126,8	206	11 – Término corte 5° fio
1	126,9	193	11 – Término corte 5° fio
5	143,2	291	11 – Término corte 5° fio
8	139,6	201	11 – Término corte 5° fio
10	142,1	136	11 – Término corte 5° fio
9	142,7	165	11 – Término corte 5° fio

4.1.5.3 Temperatura dos fios de Alumínio ao longo do ensaio

O GRA 4.1 mostra todos os dados armazenados ao longo do ensaio, desde o início do aquecimento do corpo de prova até a retirada dos termopares.

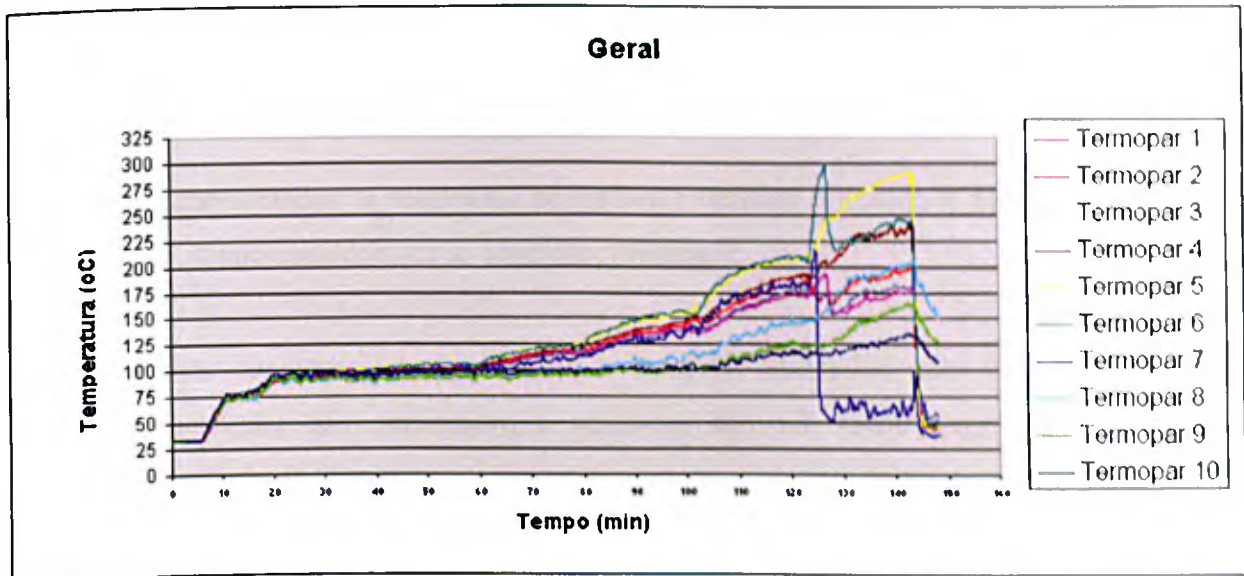


GRÁFICO 4. 1 – Tempo versus Temperatura de todos os termopares ao longo do ensaio

O GRA 4.2 indica as temperaturas atingidas pelos termopares até o rompimento do 4° fio de Alumínio. A fixação dos termopares 2, 3 e 7 falha após o rompimento do 5° fio, etapa tracejada.

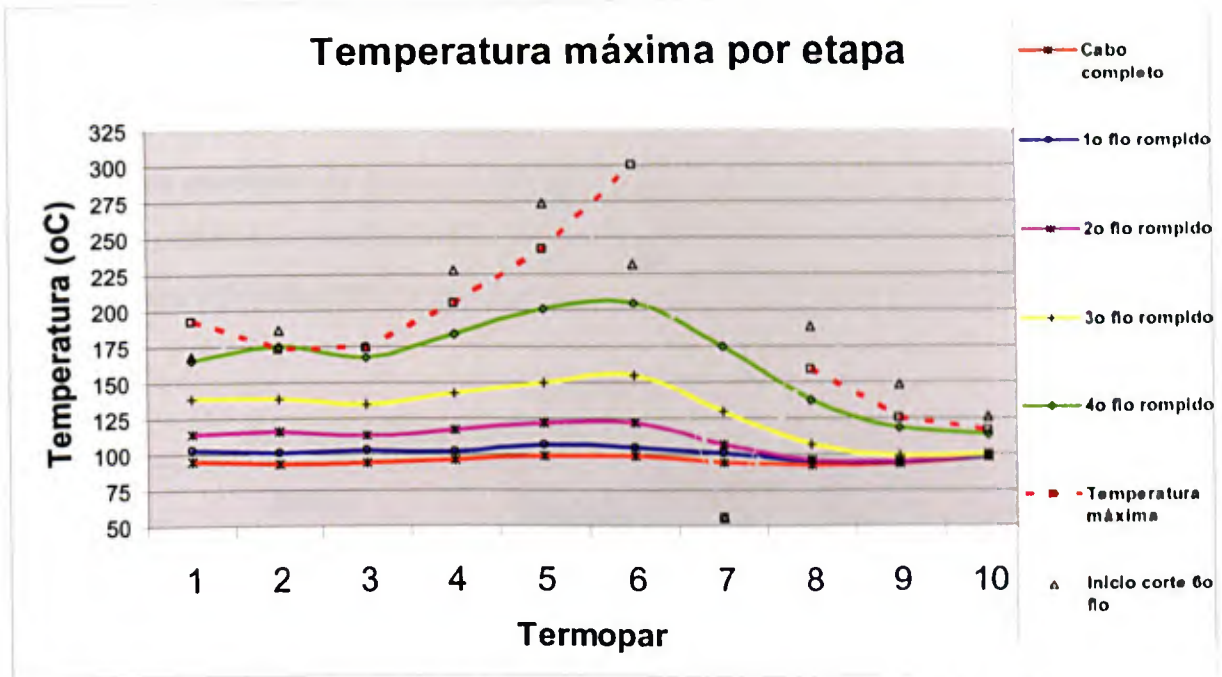


GRÁFICO 4.2 – Temperaturas máximas de cada etapa até o rompimento do 5º fio de Alumínio

Pode-se observar que existe uma diferença de 183°C entre a temperatura do termopar 6, próximo a seção de ruptura, e a temperatura do termopar 10.

4.1.6 Resultado do cálculo da vida útil dos cabos condutores utilizando ferramenta computacional desenvolvida

A seguir são apresentados os resultados do histórico térmico calculado e dos ensaios realizados para cada LT, sendo consideradas as seguintes premissas:

- os cabos condutores novos, Linnet e Penguin, utilizados para validar a ferramenta computacional não pertenciam a nenhuma das LT escolhidas, foram retirados do almoxarifado da Cemig;
- para os resultados de análise química, a comparação entre o valor descrito na Norma e o resultado da análise da amostra padrão/cabo condutor novo está na segunda linha, e a comparação entre o valor descrito na Norma e o resultado da última análise realizada está na terceira linha;

- para os resultados de ensaio de tração, dureza e resistência elétrica, a comparação entre o valor descrito na Norma e o resultado da análise da amostra padrão/cabo condutor novo está à esquerda da amostra padrão;
- para os resultados de ensaio de tração, dureza e resistência elétrica, a comparação entre o valor padrão e os resultados das análises realizadas está à direita da amostra padrão;
- as cores utilizadas para comparação dos resultados estão definidas no QUADRO 4.30.

QUADRO 4. 30

Convenção utilizada para comparação de resultados de ensaios das LT

Ensaio	Comparação de valores (%)			
	Verde	Branco	Amarelo	Vermelho
Análise Química	V > 100	B = 100	A < 100	
Resistência Mecânica à tração	V > 100	B = 100	100 > A > 49	V < 50
Dureza	V > 100	B = 100	A < 100	
Resistência elétrica		B = 100	A < 100	V > 100

4.1.6.1 LT Pirapora – Montes Claros 2, 138 kV

O GRA 4.3 mostra o histórico térmico da LT durante o período de aquisição de dados.

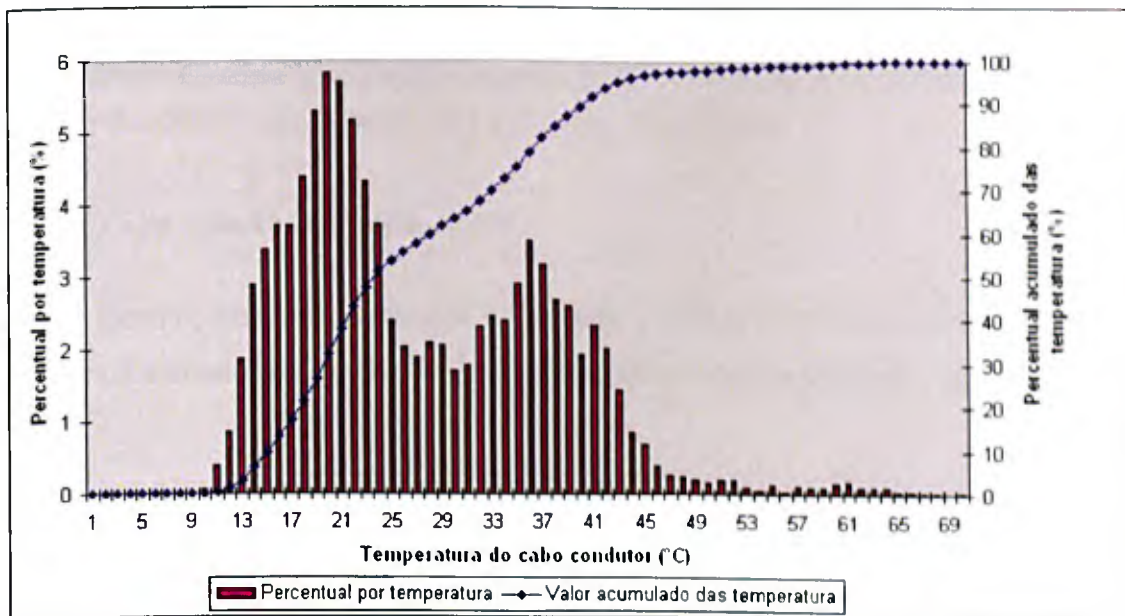


GRÁFICO 4. 3 – Histórico térmico LT Pirapora – Montes Claros no período de 04/2006 à 11/2008

A FIG.4.4 mostra os resultados dos ensaios realizados, a comparação com os valores padrão e a vida útil calculada.

Dados Gerais da LT																							
Nome : Pirapora - Montes Claros 1			Tensão (kV) :		138	Extensão (m) :		24,5	Codigo : 00569														
Dados do Cabo Condutor Completo																							
Nome :		Linnel		Material :		CAA		Formação (Fios Al e Aço) :		26/7													
Redução		90		Diametro Nominal Cabo (mm) :		18,31		Diametro Nom. Fio Alumínio (mm) :		2,89													
Area Nominal Total (mm ²) :		198,38																					
Diametro Nom. Fio Aço (mm)		2,25																					
Tempo de Operação																							
Data de energização :			1/1/1978			Tempo de medição de corrente (anos) :			2,6411			Tempo de operação (anos) :			31,7945								
Análise Química																							
	Al_min(%)	Si_max(%)	Fe_max(%)	Cu_max(%)	Mn_max(%)	Cr_max(%)	Zn_max(%)	Bo_max(%)	Ga_max(%)	Ti+V_max(%)	Outros_max(%)												
NBR-7103	99,5	0,10	0,4	0,05	0,01	0,01	0,05	0,05	0,03	0,02	0,10												
Condutor novo LT	99,714	0,0509	0,2101	0,005	0,0051	0,005	0,005	0	0	0,0032	0,0193												
Ultima análise	99,697	0,0659	0,2171	0,005	0,0061	0,005	0,005	0	0	0,002	0,0175												
Data	1/2/2007																						
Ensaio de Tração																							
Resistência mecânica nominal - NBR-7270		Condutor novo LT		Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4		Ensaio 5											
61966,6		110 68298,9		740,3 108		723,6 105		695,4 100		700,6 103		703,7 103											
Data de realização		1/2/2007		1/2/2007		1/2/2007		1/2/2007		1/2/2007		1/2/2007											
Ensaio de Dureza																							
Dureza Nominal - HV1		Data Ensaio		Media		Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3		Ponto 4		Ponto 5									
0		Amostra_Padrao 1/2/2007		0 43,8467		44,3		43,4		43,9		41,8667		45,7667									
Amostra 1		1/2/2007		44,36 101		46,5 104		43,3 99		43,9 100		44,1 103		44 96									
Amostra 2		1/2/2007		44,04 100		46,1 104		42,4 97		43,1 99		44,3 103		43,8 95									
Ensaio de Resistência Elétrica																							
Resistência elétrica nominal - NBR-6815		Condutor novo LT		Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4		Ensaio 5											
0,16925		94 0,16074		0,00000 0,00		0,00000 0,00		0 0		0 0		0 0											
Data de realização		20/9/2006		0,00000 0,00		0,00000 0,00		0 0		0 0		0 0											
Vida Útil remanescente do cabo condutor (Metodo Morgan) - Limite 70% RMN do cabo condutor																							
Data de realização :		10-Oct-2009		Tempo de medição de corrente (%RMN) :		98,9695		Simulação Tempo de operação da LT (%RMN) :		97,9516													
Simulação:		50°C		60°C		70°C		80°C		90°C		100°C		110°C		120°C		130°C		140°C		150°C	
Vida Útil Remanescente (Anos):		70		70		70		70		70		70		70		70		70		70		70	
Vida Útil Remanescente (%RMN):		93,5519		91,9532		89,9017		87,3776		84,451		81,3311		78,3766		76,0083		74,5055		73,6173		73,6169	
Perda Fio Alumínio (%RMN):		10,111		13,785		18,4993		24,3		31,0256		38,1955		44,9651		50,4278		53,8814		55,4629		55,9234	

FIGURA 4. 4 – Resultado do cálculo de vida útil LT Pirapora – Montes Claros

4.1.6.2 LT Caeté – Barão de Cocais, 69 kV

O GRA 4.4 mostra o histórico térmico da LT durante o período de aquisição de dados e a FIG.4.5 os resultados dos ensaios realizados, a comparação com os valores padrão e a vida útil calculada.

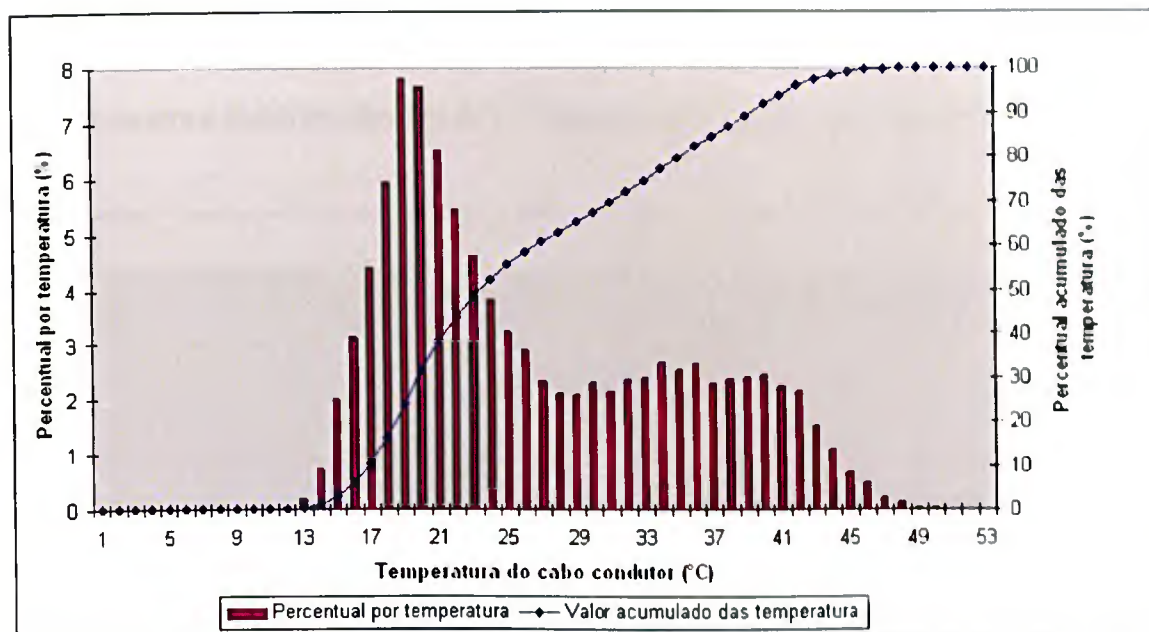


GRÁFICO 4. 4 – Histórico térmico LT Caeté – Barão de Cocais no período de 07/2000 à 12/2004

Dados Gerais da LT													
Nome : Caeté - Barão de Cocais				Tensão (kV) :	69	Extensão (m) :	27	Codigo :	30952				
Dados do Cabo Condutor Completo													
Nome :	Linnet	Material :	CAA	Formação (Fios Al e Aço) :	26/7	Area Nominal Total (mm2) :	190.30						
Redução :	90	Diametro Nominal Cabo (mm) :	18.31	Diametro Nom.Fio Aluminio (mm) :	2.89	Diametro Nom. Fio Aço (mm) :	2.25						
Tempo de Operação													
Data de energização :	1/2/2003		Tempo de medição de corrente (anos) :	4.50411		Tempo de operação (anos) :	6.69063						
Análise Química													
	Al_min(%)	Si_max(%)	Fe_max(%)	Cu_max(%)	Mn_max(%)	Cr_max(%)	Zn_max(%)	Bo_max(%)	Ga_max(%)	Ti+V_max(%)	Outros_max(%)		
NBR-7103	99.5	0.10	0.4	0.05	0.01	0.01	0.05	0.05	0.03	0.02	0.10		
Condutor novo LT	99.714	0.0509	0.2101	0.005	0.0051	0.005	0.005	0	0	0.0032	0.0193		
Ultima análise	99.794	0.0326	0.1477	0.005	0.0051	0.005	0.005	0	0	0.002	0.0197		
Data	12/2007												
Ensaio de Tração													
Resistencia mecanica nominal - NBR-7270	Condutor novo LT		Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5						
61966.6	110	68298.9	73546.2	107	74344.7	108	70919.7	103	66304	97	74337.6	108	
Data de realização	1/2/2007		1/2/2007		1/2/2007		1/2/2007		1/2/2007		1/2/2007		
Ensaio de Dureza													
Dureza Nominal - HV1	Data Ensaio	Media	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5						
0	1/2/2007	0 43.8467	44.3	43.4	43.3	41.8667	45.7667						
Amostra 1	1/2/2007	44.54	101	39.9	90	47.8	110	45.1	102	45.2	107	44.7	97
Amostra 2	1/2/2007	44.32	101	39.3	68	46.9	108	45.4	103	45.3	108	44.4	97
Ensaio de Resistencia Elétrica													
Resistencia eletrica nominal - NBR-6815	Condutor novo LT		Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5						
0.16925	94	0.16074	0.1825	0.1825	0	0	0	0	0	0	0		
Data de realização	20/9/2006		20/9/2006	20/9/2006									
Vida Útil remanescente do cabo condutor (Metodo Morgen) - Limite 70% RMN do cabo condutor													
Data de realização:	12-Oct-2009		Tempo de medição de corrente (%RMN):	98.8816		Simulação Tempo de operação de LT (%RMN)	98.7511						
Simulação:	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C	110°C	120°C	130°C	140°C	150°C		
Vida Útil Remanescente (Anos):	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70		
Vida Útil Remanescente (%RMN):	94.3514	92.7527	90.7012	88.1771	85.2505	82.1306	79.1761	76.8078	75.305	74.6168	74.4164		
Perde Fio Aluminio (%RMN):	10.111	13.785	18.4993	24.3	31.0256	38.1955	44.9851	50.4278	53.8814	55.4629	55.9234		

FIGURA 4. 5 – Resultado do cálculo de vida útil LT Caeté – Barão de Cocais

4.1.6.3 LT Sete Lagoas 3 - Cominci, 138 kV

O GRA 4.5 mostra o histórico térmico da LT durante o período de aquisição de dados.

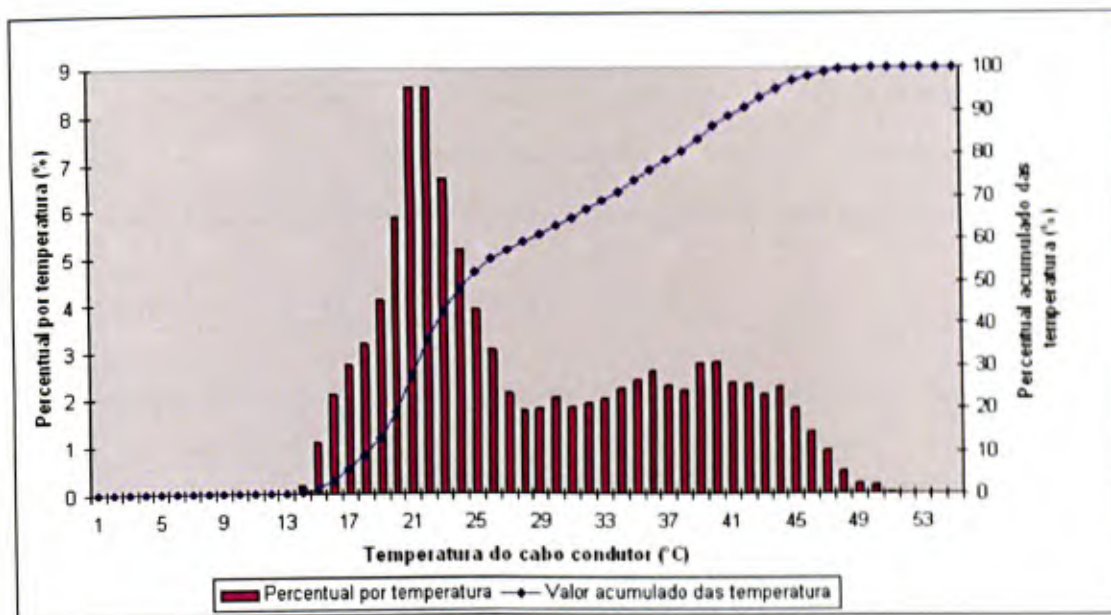


GRÁFICO 4.5 – Histórico térmico LT Sete Lagoas 3 – Cominci no período de 01/2002 à 12/2003

O GRA 4.6 compara resultado do histórico térmico calculado utilizando a resistência elétrica CC nominal e a resistência elétrica CC medida a 18°C, cujo valor é 0,17655 Ω /km.

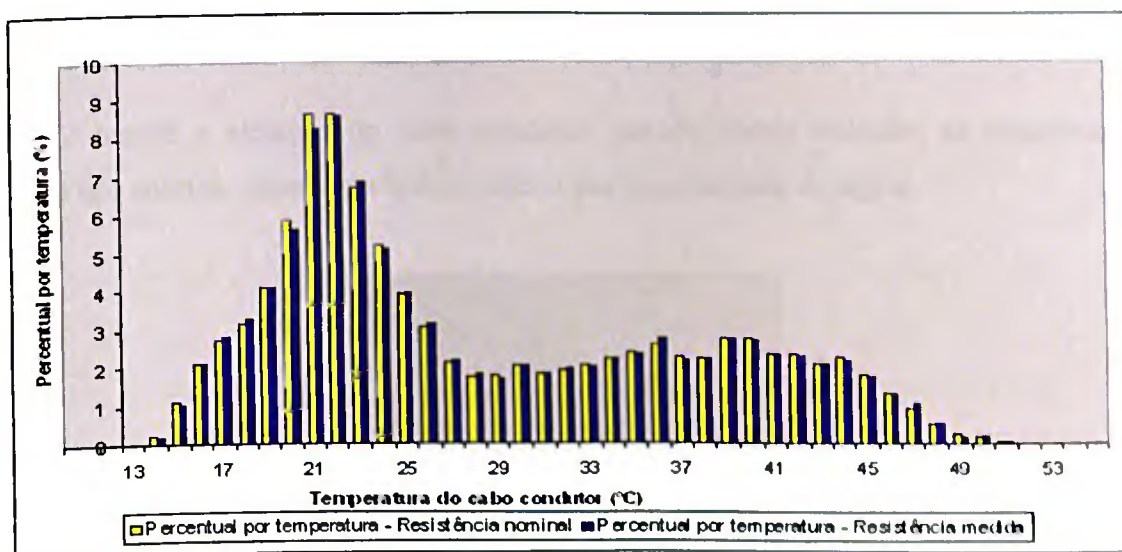


GRÁFICO 4.6 – Comparativo entre históricos térmicos calculados com resist. elétrica CC nominal e medida

A FIG.4.6 os resultados dos ensaios realizados, a comparação com os valores padrão e a vida útil calculada.

Dados Gerais da LT																							
Nome: Sete Lagoas 3 - Cominci				Tensão (kV):	130	Extensão (m):	24,5	Codigo:				30220											
Dados do Cabo Condutor Completo																							
Nome:	Linnet	Material:	CAA	Formação (Fios Al e Aço):	26/7	Area Nominal Total (mm ²):	190,30																
Redução:	90	Diametro Nominal Cabo (mm):	18,31	Diametro Nom.Fio Alumínio (mm):	2,89	Diametro Nom. Fio Aço (mm)	2,25																
Tempo de Operação																							
Data de energização: 11/1/1972				Tempo de medição de corrente (anos):				1,99726	Tempo de operação (anos):				37,0027										
Análise Química																							
	Al_min(%)	Si_max(%)	Fe_max(%)	Cu_max(%)	Mn_max(%)	Cr_max(%)	Zn_max(%)	Bo_max(%)	Ga_max(%)	Ti+V_max(%)	Outros_max(%)												
NBR-7103	99,5	0,10	0,4	0,05	0,01	0,01	0,05	0,05	0,03	0,02	0,10												
Condutor novo LT	99,714	0,0509	0,2101	0,005	0,0051	0,005	0,005	0	0	0,0032	0,0193												
Ultima análise	99,748	0,0513	0,1622	0,005	0,0071	0,005	0,0152	0	0	0,002	0,0179												
Data	1/2/2007																						
Ensaio de Tração																							
Resistencia mecanica nominal - NBR-7270		Condutor novo LT		Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4		Ensaio 5											
61966,6		110 68298,9		64919,5 95		63638,4 93		61962,1 90		62769,2 91		65121,6 95											
Data de realização		1/2/2007		1/2/2007		1/2/2007		1/2/2007		1/2/2007		1/2/2007											
Ensaio de Dureza																							
Dureza Nominal - HV1		Data Ensaio		Media		Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3		Ponto 4		Ponto 5									
0		Amostra_Padro 1/2/2007		0,438467		42		43,4		43,9		41,8667		45,7667									
Amostra 1		1/2/2007		42 95		41,8 94		40,3 92		44 100		42 100		41,9 91									
Amostra 2		1/2/2007		41,82 95		41,9 94		40,3 92		44,1 100		41,0 99		41 89									
Ensaio de Resistencia Eletrica																							
Resistencia eletrica nominal - NBR-6815		Condutor novo LT		Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4		Ensaio 5											
0,16925		94 0,16074		0,00199 0,00199		0 0		0 0		0 0		0 0											
Data de realização		20/9/2006		21/9/2006		0		0		0		0											
Vida Util remanescente do cabo condutor (Metodo Morgan) - Limite 70% RMN do cabo condutor																							
Data de realização:		11-Oct-2009		Tempo de medição de corrente (%RMN):				99,0546	Simulação Tempo de operação da LT (%RMN):				97,0690										
Simulação:		50°C		60°C		70°C		80°C		90°C		100°C		110°C		120°C		130°C		140°C		150°C	
Vida Util Remanescente (Anos):		70		70		70		70		70		70		70		70		70		70		70	
Vida Util Remanescente (%RMN):		93,47		91,8713		89,8199		87,2957		84,3691		81,2492		78,2947		75,9264		74,4236		73,7354		73,535	
Perda Fio Alumínio (%RMN):		10,111		13,785		18,4993		24,3		31,0256		38,1955		44,9051		50,4270		53,8814		55,4620		55,9234	

FIGURA 4.6 – Resultado do cálculo da vida útil LT Sete Lagoas 3 – Cominci

A FIG.4.7 mostra a situação do cabo condutor quando foram retiradas as amostras para a realização dos ensaios, estando na época coberto por uma camada de argila.



FIGURA 4.7 – Condutor da LT S.Lagoas 3 – Cominci utilizado nos ensaios

O GRA 4.7 mostra a simulação do histórico térmico da LT considerando a velocidade de vento igual a 0 (zero) para compensar a camada de material depositada sobre o condutor.

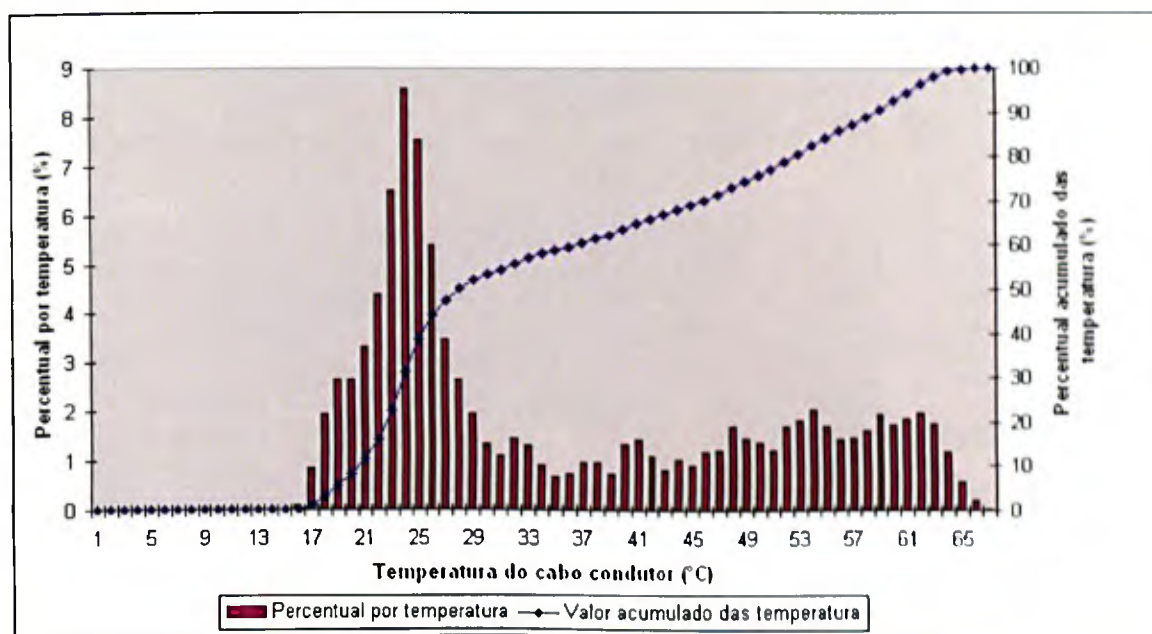


GRÁFICO 4. 7 – Simulação do histórico térmico LT Sete Lagoas 3 – Cominci no período de 01/2002 à 12/2003 para velocidade de vento igual a zero

A FIG.4.8 mostra o resultado da simulação feita para o cálculo da vida útil considerando a velocidade de vento igual a 0 (zero) para compensar a camada de material depositada sobre o condutor, que provavelmente operou a uma temperatura superior a condição normal devido ao isolamento causado pelo material depositado.

A temperatura média calculada do cabo condutor considerando os dados ambientais da região onde a LT está localizada e o histórico térmico é igual a $28,3^{\circ}\text{C}$. Considerando a velocidade de vento igual a 0 (zero) a temperatura média calculada aumenta para $35,9^{\circ}\text{C}$. Utilizando-se os resultados dos ensaios de resistência elétrica do cabo condutor, as condições ambientais originais e o histórico térmico da LT tem-se uma temperatura média calculada é igual a $28,4^{\circ}\text{C}$

Dados Gerais da LT																							
Nome : Sete Lagoas 3 - Cominci			Tensao (kV) :		138	Extensao (m) :		24,5	Codigo :		30220												
Dados do Cabo Condutor Completo																							
Nome :		Linnnet	Material :		CAA	Formação (Fios Al e Aço) :		26/7	Area Nominal Total (mm²) :		190,30												
Redução		90	Diametro Nominal Cabo (mm) :		18,31	Diametro Nom.Fio Alumínio (mm) :		2,89	Diametro Nom. Fio Aço (mm)		2,25												
Tempo de Operação																							
Data de energização :			1/1/1972		Tempo de medição de corrente (anos) :		1,99726		Tempo de operação (anos) :		37,0055												
Análise Química																							
	Al_min(%)	Si_max(%)	Fe_max(%)	Cu_max(%)	Mn_max(%)	Cr_max(%)	Zn_max(%)	Ba_max(%)	Ga_max(%)	Ti+V_max(%)	Outros_max(%)												
NBR-7103	99,5	0,10	0,4	0,05	0,01	0,01	0,05	0,05	0,03	0,02	0,10												
Condutor novo LT	99,714	0,0509	0,2101	0,005	0,0051	0,005	0,005	0	0	0,0032	0,0193												
Ultima análise	99,748	0,0513	0,1622	0,005	0,0071	0,005	0,0152	0	0	0,002	0,0179												
Data	1/2/2007																						
Ensaio de Tração																							
Resistencia mecanica nominal - NBR-7270			Condutor novo LT		Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4		Ensaio 5										
61966,6			111 68298,9		64919,5 95		63638,4 93		61962,1 90		62769,2 91		65121,6 95										
Data de realização			1/2/2007		1/2/2007		1/2/2007		1/2/2007		1/2/2007		1/2/2007										
Ensaio de Dureza																							
Dureza Nominal - HV1		Data Ensaio		Media		Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3		Ponto 4		Ponto 5									
0		Amostra_Padrao 1/2/2007		0 43,8467		44		43,4		43,9		41,8667		45,7667									
Amostra 1		1/2/2007		42 95		41,8 94		40,3 92		44 100		41 100		41,9 91									
Amostra 2		1/2/2007		41,82 95		41,9 94		40,3 92		44,1 100		41,8 99		41 99									
Ensaio de Resistencia Elétrica																							
Resistencia eletrica nominal - NBR-6815			Condutor novo LT		Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4		Ensaio 5										
0,16925			94 0,16074		0 0		0 0		0 0		0 0		0 0										
Data de realização			20/9/2006		0 0		0 0		0 0		0 0		0 0										
Vida Util remanescente do cabo condutor (Metodo Morgan) - Limite 70% RMN do cabo condutor																							
Data de realização:		12-Oct-2009		Tempo de medição de corrente (%RMN):		98,4486		Simulação Tempo de operação da LT (%RMN)		98,562													
Simulação:		50°C		60°C		70°C		80°C		90°C		100°C		110°C		120°C		130°C		140°C		150°C	
Vida Util Remanescente (Anos):		70		70		70		70		70		70		70		70		70		70		70	
Vida Util Remanescente (%RMN):		92,1623		90,5636		88,5122		85,988		83,0614		79,9415		76,987		74,6187		73,1159		72,4277		72,2273	
Perda Fio Alumínio (%RMN):		10,111		13,785		18,4993		24,3		31,0256		38,1955		44,9851		50,4278		53,8814		55,4620		55,9234	

FIGURA 4. 8 – Resultado da simulação da vida útil LT S.Lagoas 3 – Cominci para velocidade de vento igual a zero

4.1.6.4 LT Várzea da Palma – Pirapora, 69 kV

O GRA 4.8 mostra o histórico térmico da LT durante o período de aquisição de dados, a FIG.4.9 os resultados dos ensaios realizados, a comparação com os valores padrão e a vida útil calculada.

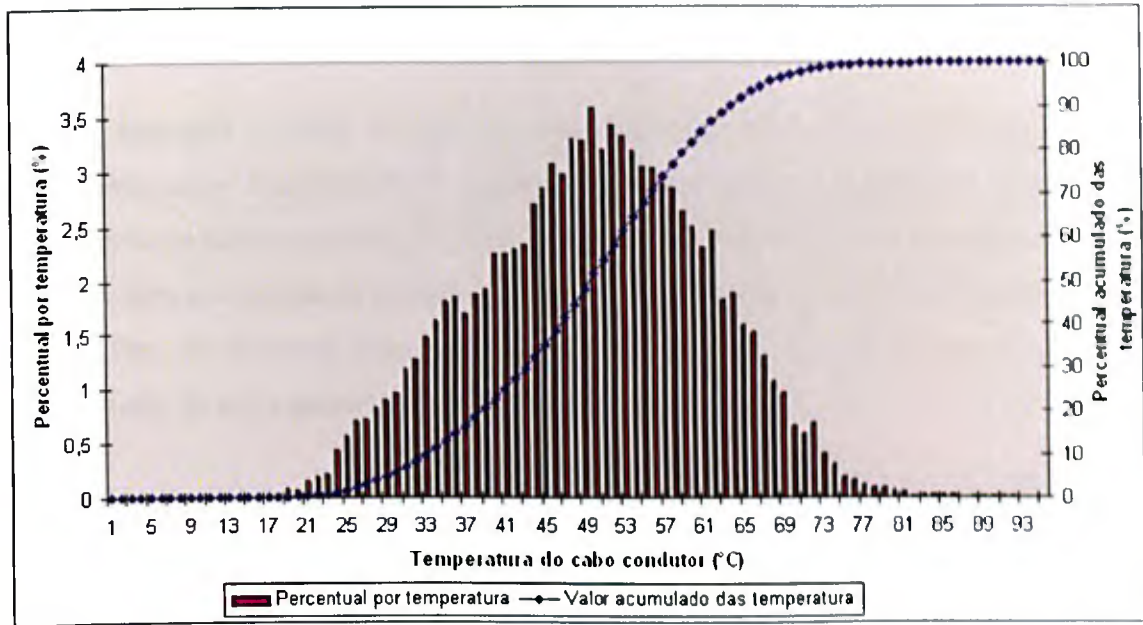


GRÁFICO 4. 8 – Histórico térmico LT Várzea da Palma – Pirapora no período de 04/2006 à 11/2008

Dados Gerais da LT																							
Nome : Várzea da Palma - Pirapora			Tensão (kV) :		69	Extensão (m) :		36.0	Codigo :			30220											
Dados do Cabo Condutor Completo																							
Nome :		Penguin	Material :		CAA	Formação (Fios Al e Aço) :		6/1	Área Nominal Total (mm ²) :		125.09												
Redução :		74	Diâmetro Nominal Cabo (mm) :		14.31	Diâmetro Nom. Fio Alumínio (mm) :		4.77	Diâmetro Nom. Fio Aço (mm) :		4.77												
Tempo de Operação																							
Data de energização :			11/1/1965			Tempo de medição de corrente (anos) :			2.6411		Tempo de operação (anos) :	44.0002											
Análise Química																							
	Al_min(%)	Si_max(%)	Fe_max(%)	Cu_max(%)	Mn_max(%)	Cr_max(%)	Zn_max(%)	Bo_max(%)	Ge_max(%)	Ti+V_max(%)	Outros_max(%)												
NBR-7103	99.5	0.10	0.4	0.05	0.01	0.01	0.05	0.05	0.03	0.02	0.10												
Condutor novo LT	99.796	0.0427	0.1354	0.005	0.0048	0.005	0.005	0	0	0.002	0.0200												
Última análise	99.664	0.0633	0.2518	0.005	0.006	0.005	0.005	0	0	0.002	0.0179												
Data	1/2/2007																						
Ensaio de Tração																							
Resistência mecânica nominal - NBR-7270		Condutor novo LT		Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4		Ensaio 5											
36540.8		106 38782.2		40377.1 104		40809.5 105		40313.1 103		40582.3 104		41615.7 107											
Data de realização		1/2/2007		1/2/2007		1/2/2007		1/2/2007		1/2/2007		1/2/2007											
Ensaio de Dureza																							
Dureza Nominal - HV1		Data Ensaio		Media		Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3		Ponto 4											
0		Amostra_Padro 1/2/2007		0 42.9333		41.9		43.2333		43.1		44.1											
Amostra 1		1/2/2007		37.18 86		36.4 86		36.6 84		37.3 86		36.8 83											
Amostra 2		1/2/2007		37.02 86		37 88		35.8 82		37.1 86		37 83											
38.2 92												38.2 90											
Ensaio de Resistência Elétrica																							
Resistência elétrica nominal - NBR-6815		Condutor novo LT		Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4		Ensaio 5											
0.26761		91 0.244575		0.246 0.11		0.2454 0.11		0 0		0 0		0 0											
Data de realização		20/9/2006		21/9/2006		21/9/2006		0		0		0											
Vida Útil remanescente do cabo condutor (Método Morgan) - Limite 70% RMN do cabo condutor																							
Data de realização:		12-Oct-2009		Tempo de medição de corrente (%RMN):				99.5547				Simulação Tempo de operação da LT (%RMN)		99.013									
Simulação:		50°C		60°C		70°C		80°C		90°C		100°C		110°C		120°C		130°C		140°C		150°C	
Vida Útil Remanescente (Anos):		70		70		70		70		70		70		70		70		70		70		70	
Vida Útil Remanescente (%RMN):		98.1389		97.7817		97.2837		96.5947		95.6516		94.3796		92.7006		90.55		87.9104		84.8623		81.6294	
Perda Fio Alumínio (%RMN):		1.93933		2.73194		3.8368		5.36544		7.45812		10.2802		14.0056		18.7772		24.6328		31.3968		38.5600	

FIGURA 4. 9 – Resultado do cálculo de vida útil LT Várzea da Palma – Pirapora

4.1.7 Resultado do cálculo do perfil térmico do cabo condutor Penguin

A FIG.4.10 apresenta o perfil térmico do cabo condutor CAA 107 mm² Penguin calculado conforme ferramenta computacional desenvolvida. Na parte superior da apresentação do resultado tem-se os dados do cabo condutor, da linha de transmissão e da medição de campo, na parte inferior tem-se o resultado do cálculo do perfil térmico para o cabo condutor completo, para quebra dos fios de Alumínio desde o primeiro fio até o sexto, nesse caso considerando-se somente o núcleo de aço conduzindo a corrente elétrica.

Calcular Perfil Termico do Cabo Condutor																			
Dados do Cabo Condutor Completo																			
Nome :	Penguin	Formação (Fios de Al e Aço) :	6/1																
Material :	CAA	Coefficiente de absorção - onda curta:	0.5																
Coefficiente de emissividade :	0.5	Coefficiente de absorção - onda	0.05																
Dados de Localização da LT																			
Azimute (graus) :	0	Latitude (graus) :	0																
Longitude (graus) :	0	Altitude (m) :	0																
Radiação solar (w/m2) :	980	Reflectância :	0.15																
Angulo condutor - solo (graus) :	0	Angulo ação vento - condutor (graus) :	90																
Resistencia Eletrica CC a 20 oC:	0.26761	Coef.Var.Resist. a 20 oC (ohm/m):	0.00403																
Dados da medição de campo																			
Data (dd/mm/aaaa) :	03/03/2006	Horario (hh:mm) :	15:00																
Corrente (A) :	325	Condições da atmosfera:	0.9																
Temperatura ambiente (oC) :	25	Velocidade de vento (m/s) :	0																
Perfil Termico (oC)																			
Cabo Completo :	97	Alma de aço :	1669																
Cabo com rompimento de fios de Alumínio :																			
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1ª Camada:	107	124	151	207	365	1669													
2ª Camada:																			
3ª Camada:																			
	19	20	21	22	23	24													
3ª Camada:																			

FIGURA 4. 10 – Perfil térmico do cabo condutor Penguin

4.1.8 Resultado da Inspeção Baseada em Risco

4.1.8.1 Determinação da Frequência de Ocorrência de Falhas (FOF) e da Conseqüência de Ocorrência de Falhas (COF)

O QUADRO 4.31 indica os valores de FOF e COF para os sistemas/componentes das LT.

QUADRO 4. 31
FOF e COF para LT 69 e 138 kV

Linhas de Subtransmissão de 69 kV								
Níveis	Tipo de LT	Sistema / Componente	Código Matriz de Risco	Média anual horas paradas	Custo hora parada (R\$)	Custo anual com parada (R\$ / hora)	Item	Median Ranks (%)
1	Metálica	Condutor / B.1	1-69	0,850	680,82	578,70	1	4,02
	Madeira	Condutor / B.2	2-69	0,893	669,63	598,20	2	9,77
	Metálica	Cadeia de Isoladores / D1.1	3-69	0,980	650,20	637,20	3	15,52
	Metálica	Estrutura / A1.4	4-69	1,117	625,70	698,70	4	21,26
	Madeira	Pára-raios / C.1	5-69	2,213	1.141,40	2.526,30	5	27,01
	Metálica	Condutor / B.2	6-69	2,280	1.072,11	2.444,40	6	32,76
	Concreto	Estrutura / A1.5	7-69	2,297	1.070,86	2.459,40	7	38,51
2	Metálica	Pára-raios / C.1	8-69	2,713	1.379,30	3.742,50	8	44,25
	Metálica	Estrutura / A1.5	9-69	4,130	1.052,54	4.347,00	9	50,00
3	Madeira	Estrutura / A1	10-69	5,517	980,43	5.408,70	10	55,75
	Concreto	Estrutura / A1.4	11-69	6,013	1.185,67	7.129,80	11	61,49
	Concreto	Condutor / B.1	12-69	6,883	1.046,09	7.200,60	12	67,24
4	Madeira	Cadeia de Isoladores / D1.1	13-69	20,757	1.100,35	22.839,60	13	72,99
	Madeira	Estrutura / A1.5	14-69	22,287	1.116,21	24.876,60	14	78,74
	Madeira	Condutor / B.1	15-69	24,810	1.061,84	26.344,20	15	84,48
	Concreto	Cadeia de Isoladores / D1.1	16-69	29,347	996,26	29.236,80	16	90,23
	Madeira	Estrutura / A1.4	17-69	32,160	978,29	31.461,90	17	95,98
Linhas de Subtransmissão de 138 kV								
1	Madeira	Pára-raios / C.5	1-138	0,360	995,00	358,20	1	6,14
	Madeira	Estrutura / A1	2-138	1,313	599,39	787,20	2	14,91
2	Concreto	Condutor / B.1	3-138	2,843	1.176,01	3.343,80	3	23,68
	Madeira	Estrutura / A1.4	4-138	3,463	1.126,60	3.901,80	4	32,46
	Metálica	Estrutura / A1.5	5-138	3,617	1.135,08	4.105,20	5	41,23
	Metálica	Pára-raios / C.1	6-138	3,647	1.167,78	4.258,50	6	50,00
	Madeira	Cadeia de Isoladores / D1.1	7-138	3,763	936,67	3.525,00	7	58,77
3	Madeira	Condutor / B.1	8-138	5,137	973,69	5.001,50	8	67,54
	Metálica	Estrutura / A1	9-138	7,200	1.022,29	7.360,50	9	76,32
4	Metálica	Cadeia de Isoladores / D1.1	10-138	14,953	1.027,62	15.366,30	10	85,09
	Metálica	Condutor / B.1	11-138	31,867	971,67	30.963,90	11	93,86

4.1.8.2 Definição da Matriz de Risco

As FIG.4.11 e 4.12 mostram respectivamente o posicionamento dos diversos sistemas/componentes das LT de 69 e 138 kV na matriz de risco.

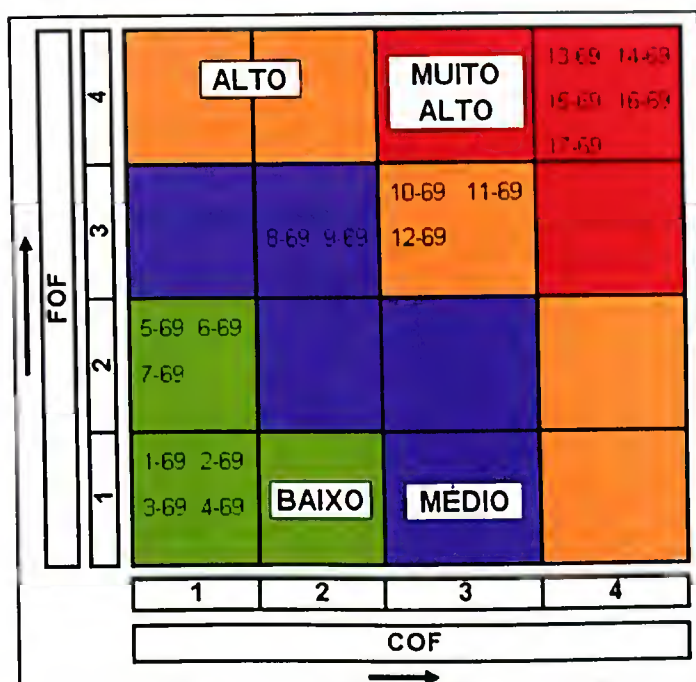


FIGURA 4. 11 – Matriz de risco 69 kV

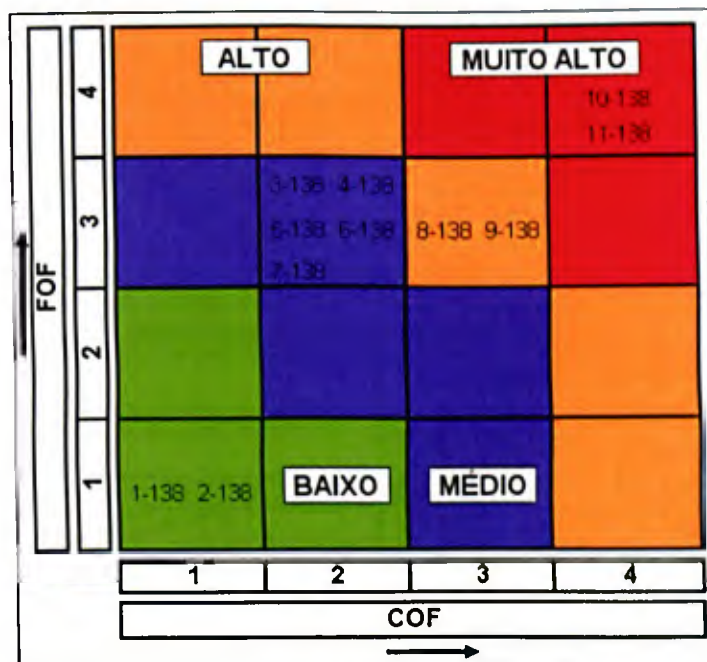


FIGURA 4. 12 – Matriz de risco 138 kV

4.1.8.3 Determinação dos sistemas/componentes críticos

Os QUADROS 4.32 e 4.33 mostram as horas paradas para correção das falhas dos diversos sistemas/componentes e os riscos calculados para as LT de 69 e 138 kV.

QUADRO 4. 32
Risco LT de 69 kV

Risco Total - Linhas de Subtransmissão						
Níveis	Tipo de LT	Sistema / Componente	Horas paradas 2002/2006		Custo com parada - Cj (R\$/hora)	Risco (Hi x Cj) Risco - R\$
			Hi (1)	% (1/2)		
69 kV						
1	Metálica	Condutor / B.1	4,250	0,514	680,82	2 893,50
	Madeira	Condutor / B.2	4,467	0,541	669,63	2 991,00
	Metálica	Cadeia de Isoladores / D1.1	4,900	0,593	650,20	3 186,00
	Metálica	Estrutura / A1.4	5,583	0,676	625,70	3 493,50
	Madeira	Pára-raios / C.1	11,067	1,339	1.141,40	12 631,50
	Metálica	Condutor / B.2	11,400	1,380	1 072,11	12 222,00
	Concreto	Estrutura / A1.5	11,483	1,390	1.070,86	12 297,00
2	Metálica	Pára-raios / C.1	13,567	1,642	1.379,30	18 712,50
	Metálica	Estrutura / A1.5	20,650	2,499	1.052,54	21 735,00
3	Madeira	Estrutura / A	27,583	3,338	980,43	27 043,50
	Concreto	Estrutura / A1.4	30,067	3,639	1 185,67	35 649,00
	Concreto	Condutor / B.1	34,417	4,165	1 046,09	36 003,00
4	Madeira	Cadeia de Isoladores / D1.1	103,783	12,561	1.100,35	114 198,00
	Madeira	Estrutura / A1.5	111,433	13,487	1 116,21	124 383,00
	Madeira	Condutor / B.1	124,050	15,014	1 061,84	131 721,00
	Concreto	Cadeia de Isoladores / D1.1	146,733	17,759	996,26	146 184,00
	Madeira	Estrutura / A1.4	160,800	19,462	978,29	157 309,50
Total 69 (2)			665,433		16.807,69	862 653,00

QUADRO 4. 33
Risco LT de 138 kV

Risco Total - Linhas de Subtransmissão						
Níveis	Tipo de LT	Sistema / Componente	Horas paradas 2002/2006		Custo com parada - Cj (R\$/hora)	Risco (Hi x Cj) Risco - R\$
			Hi (1)	% (1/2)		
138 kV						
1	Madeira	Pára-raios / C.5	1,80	0,461	995,00	1 791,00
	Madeira	Estrutura / A	6,57	1,680	599,39	3 936,00
2	Concreto	Condutor / B.1	14,22	3,638	1.176,01	16 719,00
	Madeira	Estrutura / A1.4	17,32	4,431	1.126,60	19 509,00
	Metálica	Estrutura / A1.5	18,08	4,627	1.135,08	20 526,00
	Metálica	Pára-raios / C.1	18,23	4,665	1.167,78	21 292,50
	Madeira	Cadeia de Isoladores / D1.1	18,82	4,815	936,67	17 625,00
3	Madeira	Condutor / B.1	25,68	6,572	973,69	25 007,50
	Metálica	Estrutura / A	36,00	9,211	1 022,29	36 802,50
4	Metálica	Cadeia de Isoladores / D1.1	74,77	19,131	1 027,62	76 831,50
	Metálica	Condutor / B.1	159,33	40,769	971,67	154 819,50
Total 138 (2)			390,817		11 131,80	394 859,50

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Ensaio realizado em laboratório

5.1.1 Cabo novo – Linnet - Código da amostra 8

5.1.1.1 Análise química

A análise realizada no fio de aço indicou que o Manganês está abaixo do limite estabelecido pela NBR 6756 (1987).

5.1.1.2 Ensaio de Tração

O QUADRO 5.1 compara os resultados dos valores dos ensaios de tração e de norma. Para os ensaios realizados observa-se uma diferença em torno de 4% da carga máxima do fio de aço da camada central para os fios da camada externa, para os fios de Alumínio existe uma diferença em torno de 5% da média da carga máxima dos fios da camada externa para os fios da camada interna.

Comparando-se o resultado do cálculo da resistência mecânica calculada, conforme NBR 7270 (1988), utilizando-se a média dos resultados dos ensaios dos fios de Alumínio e aço e a média dos resultados dos ensaios para o cabo condutor completo, tem-se uma diferença em torno de 5% entre estes valores.

QUADRO 5. 1

Ensaio de Tração da Amostra 8 - comparação entre valores ensaiados e de norma

CABO NOVO – LINNET					
ENSAIO DO FIO DE ALUMÍNIO					
Amostra	Carga máxima (N)		Média (N)	Norma NBR 5118 (1985)	Diferença (%)
	Camada Externa	Camada interna			
A18-1	1.201,48 / 1.186,25	1.135,98 / 1.127,75	1.130,16	1.115,15	1,35
A18-2	1.090,35 / 1.155,61	1.063,20 / 1.080,69			
ENSAIO DO FIO DE AÇO					
Amostra	Carga máxima (N)		Média (N)	Norma NBR 6756 (1987)	Diferença (%)
	Camada Externa	Fio central			
Aço8Am1	6.344,97 / 6.326,65	6.601,57	6.399,63	5.208,66 (Classe 1)	22,87
Aço8Am2	6.270,26 / 6.296,84	6.557,46			
ENSAIO DO CABO CONDUTOR COMPLETO					
Amostra	Carga máxima (N)		Média (N)	Norma NBR 7270 (1988)	Diferença (%)
Amostra 1	66.035,60		66.943,02	61.966,61	8,03
Amostra 2	66.920,67				
Amostra 3	67.872,79				
Valor calculado utilizando média dos fios de Alumínio e aço conforme NBR 7270 (1988)			70.332,78		13,50
CABO CONDUTOR COMPLETO – RELAÇÃO ENTRE VALOR CALCULADO E VALOR ENSAIADO					
Valor calculado utilizando média dos fios			70.332,78	Diferença (%)	
Valor ensaiado – média das amostras de condutor			66.943,02	5,06	

5.1.1.3 Ensaio de Dureza

O QUADRO 5.2 mostra a média dos resultados dos ensaios de dureza realizados para os fios de Alumínio e de aço ao longo dos 05 pontos definidos e a média geral dos fios.

QUADRO 5. 2

Amostra 8 - média dos valores medidos em diversos pontos dos fios de Alumínio e aço

Dureza (HV 1)						
Material	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Média
Fio de Alumínio	44,3	43,4	43,9	41,9	45,8	43,86
Fio de aço	319,2	328,1	324,9	326,6	323,1	324,38

5.1.1.4 Ensaio de Resistência Elétrica

Os resultados dos ensaios foram 0,16072 e 0,16076 Ω /km, estando abaixo do valor nominal para o cabo condutor Linnet, ou seja, 0,16925 Ω /km.

5.1.2 LT Pirapora - Montes Claros, 138 kV – Código da amostra 3

5.1.2.1 Análise química

A análise realizada no fio de aço indicou que o Carbono, Silício e Manganês estão abaixo do limite estabelecido pela NBR 6756 (1987).

5.1.2.2 Ensaio de Tração

O QUADRO 5.3 compara os resultados dos valores dos ensaios de tração e de norma. Para os ensaios realizados observa-se uma diferença em torno de 2% da carga máxima do fio de aço da camada central para os fios da camada externa, para os fios de Alumínio existe uma diferença em torno de 10,6% da média da carga máxima dos fios da camada externa para os fios da camada interna da amostra A13-1.

QUADRO 5.3

Ensaio de Tração da Amostra 3 - comparação entre valores ensaiados e de norma

CABO LT PIRAPORA – MONTES CLAROS 2, 138 kV					
ENSAIO DO FIO DE ALUMÍNIO					
Amostra	Carga máxima (N)		Média (N)	Norma NBR 5118 (1985)	Diferença (%)
	Camada Externa	Camada interna			
A13-1	1.100,66 / 1.200,02	1.292,08 / 1.282,75	1.195,73	1.115,15	7,23
A13-2	1.156,18 / 1.181,78	1.232,06 / 1.120,27			
ENSAIO DO FIO DE AÇO					
Amostra	Carga máxima (N)		Média (N)	Norma NBR 6756 (1987)	Diferença (%)
	Camada Externa	Fio central			
Aço3Am1	6.556,12 / 6.647,47	6.691,28	6.588,39	5.208,66 (Classe 1)	26,49
Aço3Am2	6.581,69 / 6.387,65	6.666,12			
ENSAIO DO CABO CONDUTOR COMPLETO					
Amostra	Carga máxima (N)		Média (N)	Norma NBR 7270 (1988)	Diferença (%)
Amostra 1	68.549,69		69.607,76	61.966,61	12,33
Amostra 2	70.066,39				
Amostra 3	70.207,21				
Valor calculado utilizando média dos fios de Alumínio e aço conforme NBR 7270 (1988)			73.186,73		18,11
CABO CONDUTOR COMPLETO – RELAÇÃO ENTRE VALOR CALCULADO E VALOR ENSAIADO					
Valor calculado utilizando média dos fios			73.186,73	Diferença (%)	
Valor ensaiado – média das amostras de condutor			69.607,76	5,14	

Comparando-se o resultado do cálculo da resistência mecânica calculada, conforme NBR 7270 (1988), utilizando-se a média dos resultados dos ensaios dos fios de Alumínio e aço e a média

dos resultados dos ensaios para o cabo condutor completo, tem-se uma diferença em torno de 5% entre estes valores.

5.1.2.3 Ensaios de Dureza

O QUADRO 4.25 e a FIG.4.4 mostram que nos ensaios realizados para os fios de Alumínio ocorreu a redução da dureza nos pontos 2, 3 e 5 em comparação com as amostras do cabo condutor novo, resultado do recozimento dos fios de Alumínio do cabo da LT.

5.1.2.4 Ensaios de Resistência Elétrica

Os resultados dos ensaios foram 0,16122 e 0,16122 Ω/km , estando abaixo do valor nominal para o cabo condutor Linnet, ou seja, 0,16925 Ω/km e acima da média dos resultados do cabo condutor novo que foi de 0,16074 Ω/km .

5.1.2.5 Correlação entre os diversos ensaios realizados

A correlação será realizada comparando-se os resultados dos ensaios realizados com as amostras do cabo condutor da LT e de amostras de um cabo condutor novo retirado do almoxarifado da CEMIG. Ressalta-se que o recomendável seria realizar a correlação com uma amostra do cabo condutor retirada durante a construção da LT, servindo essa amostra como referência ao longo da vida útil do cabo condutor.

A FIG.4.4 facilita a correlação entre os diversos ensaios realizados e também mostra o cálculo da vida útil remanescente do cabo condutor.

A média dos resultados dos ensaios de tração do cabo condutor da LT está 4% acima da média dos ensaios do cabo condutor novo. Estando essa LT em operação a mais de 31 anos e analisando a composição química do cabo condutor novo e da LT verifica-se que a resistência a tração do cabo novo deveria ser maior, tanto pelo recozimento do cabo como pela composição química, mas pelo processo de fabricação dos cabos condutores em épocas diferentes verifica-se que o diâmetro dos fios de Alumínio e aço do cabo da LT é maior que do cabo novo, contribuindo assim, para que o cabo da LT tenha uma carga de ruptura maior que o novo. Para o cabo da LT a

média do diâmetro dos fios de Alumínio é 2,98mm e dos fios de aço é 2,32mm, valores superiores aos nominais para o cabo condutor Linnet.

A comparação entre os ensaios de dureza indica alguns pontos onde a dureza das amostras da LT é menor que do cabo novo. Para os ensaios de resistência elétrica o cabo condutor da LT está com uma resistência maior que do cabo novo. A estimativa da vida útil do cabo condutor indica que ocorreu uma perda de resistência a tração do condutor da LT, recozimento dos fios de Alumínio devido a temperatura de operação da LT, igual a 2,05% para uma temperatura média do cabo condutor ao longo do tempo de operação em torno de 27°C.

A correlação entre os ensaios de dureza e resistência elétrica, redução da dureza e aumento da resistência elétrica, e a perda da vida útil do cabo condutor indica o recozimento do cabo condutor da LT.

5.1.3 LT Mariana – Timbopeba, 138 kV - Código da amostra 5

5.1.3.1 Análise química

A análise realizada no fio de aço indicou que o Silício e Manganês estão abaixo do limite estabelecido pela NBR 6756 (1987).

5.1.3.2 Ensaios de Tração

O QUADRO 5.4 compara os resultados dos valores dos ensaios de tração e de norma. Para os ensaios realizados observa-se uma diferença em torno de 2% da carga máxima do fio de aço da camada central para os fios da camada externa, para os fios de Alumínio existe uma diferença em torno de 5% da média da carga máxima dos fios da camada externa para os fios da camada interna.

Comparando-se o resultado do cálculo da resistência mecânica calculada, conforme NBR 7270 (1988), utilizando-se a média dos resultados dos ensaios dos fios de Alumínio e aço e a média

dos resultados dos ensaios para o cabo condutor completo, tem-se uma diferença em torno de 3% entre estes valores.

QUADRO 5. 4

Ensaio de Tração da Amostra 5 - comparação entre valores ensaiados e de norma

CABO LT MARIANA – TIMBOPEBA, 138 kV (AMOSTRA 5)					
ENSAIO DO FIO DE ALUMÍNIO					
Amostra	Carga máxima (N)		Média (N)	Norma NBR 5118 (1985)	Diferença (%)
	Camada Externa	Camada interna			
A15-1	1.054,53 / 1.173,44	1.209,47 / 1.119,43	1.125,50	1.115,15	0,93
A15-2	993,64 / 1.168,94	1.162,65 / 1.121,88			
ENSAIO DO FIO DE AÇO					
Amostra	Carga máxima (N)		Média (N)	Norma NBR 6756 (1987)	Diferença (%)
	Camada Externa	Fio central			
Aço5Am1	6.356,24 / 6.244,03	6.426,48	6.337,90	5.208,66 (Classe 1)	21,68
Aço5Am2	6.135,11 / 6.468,15	6.397,37			
ENSAIO DO CABO CONDUTOR COMPLETO					
Amostra	Carga máxima (N)		Média (N)	Norma NBR 7270 (1988)	Diferença (%)
Amostra 1	67.746,13		67.826,10	61.966,61	9,46
Amostra 2	67.042,14				
Amostra 3	68.690,03				
Valor calculado utilizando média dos fios de Alumínio e aço conforme NBR 7270 (1988)			69.805,28		12,65
CABO CONDUTOR COMPLETO – RELAÇÃO ENTRE VALOR CALCULADO E VALOR ENSAIADO					
Valor calculado utilizando média dos fios			69.805,28	Diferença (%)	
Valor ensaiado – média das amostras de condutor			67.826,10	2,92	

5.1.3.3 Ensaio de Dureza

O QUADRO 4.25 mostra que nos ensaios realizados para os fios de Alumínio tem-se indicação de redução da dureza nos pontos 1, 2 e 5 em comparação com as amostras do cabo condutor novo, resultado do recozimento dos fios de Alumínio do cabo da LT.

5.1.3.4 Ensaio de Resistência Elétrica

Os resultados dos ensaios foram 0,16280 e 0,16281 Ω/km , estando abaixo do valor nominal para o cabo condutor Linnet, ou seja, 0,16925 Ω/km e acima da média dos resultados do cabo condutor novo que foi de 0,16074 Ω/km .

5.1.3.5 Correlação entre os diversos ensaios realizados

Como não foi possível a aquisição do histórico térmico desta LT, pode-se observar através dos resultados dos ensaios de tração e de dureza dos fios de Alumínio que ocorreu uma perda de resistência mecânica destes fios, indicando assim, uma elevação na temperatura de operação da LT.

A média dos resultados dos ensaios de tração do cabo condutor da LT está 1,3% acima da média dos ensaios do cabo condutor novo. Estando essa LT em operação a mais de 16 anos e analisando a composição química do cabo condutor novo e da LT verifica-se que a resistência a tração do cabo novo deveria ser maior, tanto pelo recozimento do cabo como pela composição química, mas pelo processo de fabricação dos cabos condutores em épocas diferentes verifica-se que o diâmetro dos fios de Alumínio e aço do cabo da LT é maior que do cabo novo, contribuindo assim, para que o cabo da LT tenha uma carga de ruptura maior que o novo.

A correlação entre os ensaios de dureza e resistência elétrica, redução da dureza e aumento da resistência elétrica, indica o recozimento do cabo condutor da LT.

5.1.4 LT Barão de Cocais – Caeté, 69 kV - Código da amostra 6

5.1.4.1 Análise química

A análise realizada no fio de aço indicou que o Carbono, Silício e Manganês estão abaixo do limite estabelecido pela NBR 6756 (1987).

5.1.4.2 Ensaio de Tração

O QUADRO 5.5 compara os resultados dos valores dos ensaios de tração e de norma. Para os ensaios realizados observa-se uma diferença em torno de 1% da carga máxima do fio de aço da camada central para os fios da camada externa, para os fios de Alumínio existe uma diferença em torno de 1% da média da carga máxima dos fios da camada externa para os fios da camada interna.

QUADRO 5. 5

Ensaio de Tração da Amostra 6 - comparação entre valores ensaiados e de norma

CABO LT BARÃO DE COCAIS – CAETÉ, 69 kV					
ENSAIO DO FIO DE ALUMÍNIO					
Amostra	Carga máxima (N)		Média (N)	Norma NBR 5118 (1985)	Diferença (%)
	Camada Externa	Camada interna			
Al6-1	1.289,73 / 1.227,08	1.280,49 / 1.248,63	1.280,60	1.115,15	14,83
Al6-2	1.297,68 / 1.328,5	1.268,89 / 1.303,76			
ENSAIO DO FIO DE AÇO					
Amostra	Carga máxima (N)		Média (N)	Norma NBR 6756 (1987)	Diferença (%)
	Camada Externa	Fio central			
Aço6Am1	6.379,25 / 6.396,06	6.440,55	6.443,48	5.208,66 (Classe 1)	23,71
Aço6Am2	6.446,39 / 6.518,60	6.397,37			
ENSAIO DO CABO CONDUTOR COMPLETO					
Amostra	Carga máxima (N)		Média (N)	Norma NBR 7270 (1988)	Diferença (%)
Amostra 1	70.919,72		70.547,11	61.966,61	13,85
Amostra 2	66.383,99				
Amostra 3	74.265,09				
Valor calculado utilizando média dos fios de Alumínio e aço conforme NBR 7270 (1988)			74.265,09		19,85
CABO CONDUTOR COMPLETO – RELAÇÃO ENTRE VALOR CALCULADO E VALOR ENSAIADO					
Valor calculado utilizando média dos fios			74.265,09	Diferença (%)	
Valor ensaiado – média das amostras de condutor			70.547,11	5,27	

Comparando-se o resultado do cálculo da resistência mecânica calculada, conforme NBR 7270 (1988), utilizando-se a média dos resultados dos ensaios dos fios de Alumínio e aço e a média dos resultados dos ensaios para o cabo condutor completo, tem-se uma diferença em torno de 5% entre estes valores.

5.1.4.3 Ensaio de Dureza

O QUADRO 4.25 e a FIG.4.5 mostram que nos ensaios realizados para os fios de Alumínio ocorreu a redução da dureza nos pontos 1 e 5 em comparação com as amostras do cabo condutor novo, resultado do recozimento dos fios de Alumínio do cabo da LT.

5.1.4.4 Ensaio de Resistência Elétrica

Os resultados dos ensaios foram 0,16255 e 0,16262 Ω/km , estando abaixo do valor nominal para o cabo condutor Linnet, ou seja, 0,16925 Ω/km e acima da média dos resultados do cabo condutor novo que foi de 0,16074 Ω/km .

5.1.4.5 Correlação entre os diversos ensaios realizados

A FIG.4.5 facilita a correlação entre os diversos ensaios realizados e também mostra o cálculo da vida útil remanescente do cabo condutor.

A média dos resultados dos ensaios de tração do cabo condutor da LT está 5,4% acima da média dos ensaios do cabo condutor novo. Estando essa LT em operação a mais de 6 anos e analisando a composição química do cabo condutor novo e da LT verifica-se que a resistência a tração do cabo novo deveria ser maior, tanto pelo recozimento do cabo como pela composição química, mas pelo processo de fabricação dos cabos condutores em épocas diferentes verifica-se que o diâmetro dos fios de Alumínio e aço do cabo da LT é maior que do cabo novo, contribuindo assim, para que o cabo da LT tenha uma carga de ruptura maior que o novo.

A comparação entre os ensaios de dureza indica alguns pontos onde a dureza das amostras da LT é menor que do cabo novo. Para os ensaios de resistência elétrica o cabo condutor da LT está com uma resistência maior que do cabo novo. A estimativa da vida útil do cabo condutor indica que ocorreu uma perda de resistência a tração do condutor da LT, recozimento dos fios de Alumínio devido a temperatura de operação da LT, igual a 0,35% para uma temperatura média do cabo condutor ao longo do tempo de operação em torno de 25°C.

A correlação entre os ensaios de dureza e resistência elétrica, redução da dureza e aumento da resistência elétrica, e a perda da vida útil do cabo condutor indica o recozimento do cabo condutor da LT.

5.1.5 LT Sete Lagoas 3 – Cominci, 138 kV - Código da amostra 7

5.1.5.1 Análise química

A análise realizada no fio de aço indicou que o Carbono, Silício e Manganês estão abaixo do limite estabelecido pela NBR 6756 (1987).

5.1.5.2 Ensaios de Tração

O QUADRO 5.6 compara os resultados dos valores dos ensaios de tração e de norma. Para os ensaios realizados observa-se uma diferença em torno de 7,95% da carga máxima do fio de aço da camada central para os fios da camada externa da amostra Aço7Am2, para os fios de Alumínio existe uma diferença em torno de 11,63% da média da carga máxima dos fios da camada externa para os fios da camada interna da amostra A17-2.

Comparando-se o resultado do cálculo da resistência mecânica calculada, conforme NBR 7270 (1988), utilizando-se a média dos resultados dos ensaios dos fios de Alumínio e aço e a média dos resultados dos ensaios para o cabo condutor completo, tem-se uma diferença em torno de 1,6% entre estes valores.

QUADRO 5. 6

Ensaios de Tração da Amostra 7 - comparação entre valores ensaiados e de norma

CABO LT SETE LAGOAS 3 – COMINCI, 138 kV					
ENSAIO DO FIO DE ALUMÍNIO					
Amostra	Carga máxima (N)		Média (N)	Norma NBR 5118 (1985)	Diferença (%)
	Camada Externa	Camada interna			
A17-1	998,97 / 1.105,01	1018,26 / 1.149,89	1.074,35	1.115,15	3,66
A17-2	971,11 / 1.056,79	1.146,79 / 1.147,96			
ENSAIO DO FIO DE AÇO					
Amostra	Carga máxima (N)		Média (N)	Norma NBR 6756 (1987)	Diferença (%)
	Camada Externa	Fio central			
Aço7Am1	5.878,00 / 5.786,27	5.788,62	5.699,59	5.208,66 (Classe 1)	9,43
Aço7Am2	5.283,98 / 5.720,53	5.740,14			
ENSAIO DO CABO CONDUTOR COMPLETO					
Amostra	Carga máxima (N)		Média (N)	Norma NBR 7270 (1988)	Diferença (%)
Amostra 1	61.962,10		63.284,52	61.966,61	2,13
Amostra 2	62.769,20				
Amostra 3	65.121,59				
Valor calculado utilizando média dos fios de Alumínio e aço conforme NBR 7270 (1988)			64.279,03		3,73
CABO CONDUTOR COMPLETO – RELAÇÃO ENTRE VALOR CALCULADO E VALOR ENSAIADO					
Valor calculado utilizando média dos fios			64.279,03	Diferença (%)	
Valor ensaiado – média das amostras de condutor			63.284,52	1,57	

5.1.5.3 Ensaio de Dureza

O QUADRO 4.25 e a FIG.4.6 mostram que nos ensaios realizados para os fios de Alumínio ocorreu a redução da dureza nos pontos 1, 2, 3, 4 e 5 em comparação com as amostras do cabo condutor novo, resultado do recozimento dos fios de Alumínio do cabo da LT.

5.1.5.4 Ensaio de Resistência Elétrica

O resultado do ensaio foi 0,17665 Ω/km , estando abaixo do valor nominal para o cabo condutor Linnet, ou seja, 0,16925 Ω/km e acima da média dos resultados do cabo condutor novo que foi de 0,16074 Ω/km . Foi desconsiderado o resultado de 01 ensaio cujo valor foi igual a 0,14306 Ω/km .

5.1.5.5 Correlação entre os diversos ensaios realizados

A FIG.4.6 facilita a correlação entre os diversos ensaios realizados e também mostra o cálculo da vida útil remanescente do cabo condutor.

A média dos resultados dos ensaios de tração do cabo condutor da LT está 5,5% abaixo da média dos ensaios do cabo condutor novo. Neste caso, estando o cabo condutor coberto por uma camada de argila, conforme mostrado na FIG.4.7, ocorreu a elevação da temperatura de operação da LT e um maior recozimento dos fios de Alumínio do cabo condutor.

A comparação entre os ensaios de dureza indica o recozimento dos fios de Alumínio, o mesmo ocorrendo com a análise dos ensaios de resistência elétrica. A estimativa da vida útil do cabo condutor para 37,8 anos indica que ocorreu uma perda de resistência a tração do condutor da LT, recozimento dos fios de Alumínio devido a temperatura de operação da LT, igual a 2,35% para uma temperatura média do cabo condutor ao longo do tempo de operação em torno de 28,3°C. Considerando a velocidade de vento igual a 0 (zero), para compensar a camada de argila que estava recobrindo o condutor, a temperatura média calculada aumenta para 35,9°C e a perda de resistência a tração do condutor para 3,44%.

A correlação entre os ensaios de dureza e resistência elétrica, redução da dureza e aumento da resistência elétrica, e a perda da vida útil do cabo condutor indica o recozimento do cabo condutor da LT.

5.1.6 Cabo novo – Penguin – Código da amostra 9

5.1.6.1 Análise química

A análise realizada no fio de aço indicou que o Carbono, Silício e Manganês estão abaixo do limite estabelecido pela NBR 6756 (1987).

5.1.6.2 Ensaios de Tração

O QUADRO 5.7 compara os resultados dos valores dos ensaios de tração e de norma. A média dos resultados dos ensaios de tração do cabo condutor novo está 6,13% acima do valor nominal da NBR 7270 (1988).

Comparando-se o resultado do cálculo da resistência mecânica calculada, conforme NBR 7270 (1988), utilizando-se a média dos resultados dos ensaios dos fios de Alumínio e aço e a média dos resultados dos ensaios para o cabo condutor completo, tem-se uma diferença em torno de 1,3% entre estes valores.

QUADRO 5.7

Ensaio de Tração da Amostra 9 - comparação entre valores ensaiados e de norma

CABO CONDUTOR PENGUIN NOVO					
ENSAIO DO FIO DE ALUMÍNIO					
Amostra	Carga máxima (N)		Média (N)	Norma NBR 5118 (1985)	Diferença (%)
	Camada Única				
A19-1-2	2.764,85		2.711,64	2.859,14	5,16
A19-1-3	2.648,80				
A19-2-2	2.750,66				
A19-2-3	2.682,21				
ENSAIO DO FIO DE AÇO					
Amostra	Carga máxima (N)		Média (N)	Norma NBR 6756 (1987)	Diferença (%)
	Fio único				
Aço9Am1	23.536,00		24.129,15	20.908,00 (Classe 1)	15,4
Aço9Am2	24.722,30				
ENSAIO DO CABO CONDUTOR COMPLETO					
Amostra	Carga máxima (N)		Média (N)	Norma NBR 7270 (1988)	Diferença (%)
Amostra 1	38.385,63		38.781,73	36.540,75	6,13
Amostra 2	38.818,09				
Amostra 3	39.141,48				
Valor calculado utilizando média dos fios de Alumínio e aço conforme NBR 7270 (1988)			38.294,94		4,80
CABO CONDUTOR COMPLETO – RELAÇÃO ENTRE VALOR CALCULADO E VALOR ENSAIADO					
Valor calculado utilizando média dos fios			38.294,94	Diferença (%)	
Valor ensaiado – média das amostras de condutor			38.781,73	1,26	

5.1.6.3 Ensaio de Dureza

O QUADRO 5.8 mostra a média dos resultados dos ensaios de dureza realizados para os fios de Alumínio e de aço ao longo dos 05 pontos definidos e a média geral dos fios.

QUADRO 5.8

Amostra 9 - média dos valores medidos em diversos pontos dos fios de Alumínio e aço

Material	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Média
Fio de Alumínio	41,9	43,3	43,1	44,3	42,1	42,94
Fio de aço	322,8	303,4	336,6	320,1	303,6	317,3

5.1.6.4 Ensaio de Resistência Elétrica

Os resultados dos ensaios foram 0,24464 e 0,24451 Ω /km estão abaixo do valor nominal para o cabo condutor Penguin, ou seja, 0,26761 Ω /km.

5.1.7 LT Várzea da Palma - Pirapora, 69 kV - Código da amostra 4

5.1.7.1 Análise química

A análise realizada no fio de aço indicou que o Silício e Manganês estão abaixo do limite estabelecido pela NBR 6756 (1987).

5.1.7.2 Ensaios de Tração

O QUADRO 5.9 compara os resultados dos valores dos ensaios de tração e de norma.

QUADRO 5. 9

Ensaios de Tração da Amostra 4 - comparação entre valores ensaiados e de norma

CABO LT VÁRZEA DA PALMA – PIRAPORA, 69 kV					
ENSAIO DO FIO DE ALUMÍNIO					
Amostra	Carga máxima (N)		Média (N)	Norma NBR 5118 (1985)	Diferença (%)
	Camada Única				
A14-1-2	2.720,42		2.720,81	2.859,14	4,83
A14-2-4	2.544,73				
A14-2-4	2.842,04				
A14-2-5	2.776,03				
ENSAIO DO FIO DE AÇO					
Amostra	Carga máxima (N)		Média (N)	Norma NBR 6756 (1987)	Diferença (%)
	Fio único				
Aço9Am1	26.264,00		26.011,95	20.908,00 (Classe 1)	24,41
Aço9Am2	25.759,90				
ENSAIO DO CABO CONDUTOR COMPLETO					
Amostra	Carga máxima (N)		Média (N)	Norma NBR 7270 (1988)	Diferença (%)
Amostra 1	40.313,63		40.840,41	36.540,75	11,77
Amostra 2	40.592,25				
Amostra 3	41.615,34				
Valor calculado utilizando média dos fios de Alumínio e aço conforme NBR 7270 (1988)			40.153,59		9,89
CABO CONDUTOR COMPLETO – RELAÇÃO ENTRE VALOR CALCULADO E VALOR ENSAIADO					
Valor calculado utilizando média dos fios			40.153,59	Diferença (%)	
Valor ensaiado – média das amostras de condutor			40.840,41	1,68	

Comparando-se o resultado do cálculo da resistência mecânica calculada, conforme NBR 7270 (1988), utilizando-se a média dos resultados dos ensaios dos fios de Alumínio e aço e a média dos resultados dos ensaios para o cabo condutor completo, tem-se uma diferença em torno de 1,7% entre estes valores.

5.1.7.3 Ensaios de Dureza

O QUADRO 4.25 e a FIG.4.9 mostram que nos ensaios realizados para os fios de Alumínio ocorreu a redução da dureza nos pontos 1, 2, 3, 4 e 5 em comparação com as amostras do cabo condutor novo, resultado do recozimento dos fios de Alumínio do cabo da LT.

5.1.7.4 Ensaios de Resistência Elétrica

Os resultados dos ensaios foram 0,2462 e 0,24654 Ω/km estão abaixo do valor nominal para o cabo condutor Penguin, ou seja, 0,26761 Ω/km e acima da média dos resultados do cabo condutor novo que foi de 0,244575 Ω/km .

5.1.7.5 Correlação entre os diversos ensaios realizados

A FIG.4.9 facilita a correlação entre os diversos ensaios realizados e também mostra o cálculo da vida útil remanescente do cabo condutor.

A média dos resultados dos ensaios de tração do cabo condutor da LT está 5,3% acima da média dos ensaios do cabo condutor novo. Estando essa LT em operação a mais de 44 anos e analisando a composição química do cabo condutor novo e da LT verifica-se que a resistência a tração do cabo novo deveria ser maior, tanto pelo recozimento do cabo como pela composição química, mas pelo processo de fabricação dos cabos condutores em épocas diferentes verifica-se que o diâmetro dos fios de Alumínio e aço do cabo da LT é maior que do cabo novo, contribuindo assim, para que o cabo da LT tenha uma carga de ruptura maior que o novo.

A comparação entre os ensaios de dureza indica que em todos os pontos de medição a dureza das amostras da LT é menor que do cabo novo. Para os ensaios de resistência elétrica o cabo condutor da LT está com uma resistência maior que do cabo novo. A estimativa da vida útil do cabo condutor indica que ocorreu uma perda de resistência a tração do condutor da LT, recozimento dos fios de Alumínio devido a temperatura de operação da LT, igual a 0,99% para uma temperatura média do cabo condutor ao longo do tempo de operação em torno de 50°C.

A correlação entre os ensaios de dureza e resistência elétrica, redução da dureza e aumento da resistência elétrica, e a perda da vida útil do cabo condutor indica o recozimento do cabo condutor da LT.

5.2 Variação da temperatura em função do rompimento de fios externos em cabos condutores

5.2.1 Análise dos valores de temperatura calculados por Morgan e a média calculada para cada etapa do ensaio

Utilizando-se a metodologia de Morgan para o cálculo da temperatura do cabo condutor, conforme MORGAN (1991), e considerando-se ainda a redução da área de Alumínio na seção transversal do cabo devido ao rompimento progressivo dos fios, calculou-se a temperatura teórica do cabo condutor para as diversas etapas do ensaio, nas mesmas condições ambientais e de corrente transportada.

Considerou-se a temperatura do cabo condutor ensaiado como a média das temperaturas medidas pelos termopares 1 a 6.

A comparação entre os valores teóricos e ensaiados, conforme QUADRO 5.10 e GRA 5.1, indicam um aumento progressivo da diferença entre os mesmos em relação ao aumento da temperatura.

QUADRO 5. 10

Comparação dos valores de Morgan e média dos resultados dos ensaios

Etapa	Dados do ensaio			Temperatura do condutor		
	Corrente de ensaio (A)	Tempo (min)	Temp. Ambiente (0C)	Morgan (1) Calculada (°C)	Ensaio (2) Média (°C)	Relação (1)/(2) (%)
1 - Cabo completo	325	29	28	93	96	96,88
2 - 1º fio rompido	325	51	29	104	103	100,97
3 - 2º fio rompido	325	73	29	123	118	104,24
4 - 3º fio rompido	325	95	31	153	143	106,99
5 - 4º fio rompido	325	115	29	213	183	116,39
6 - 5º fio rompido	325	135	30	399		

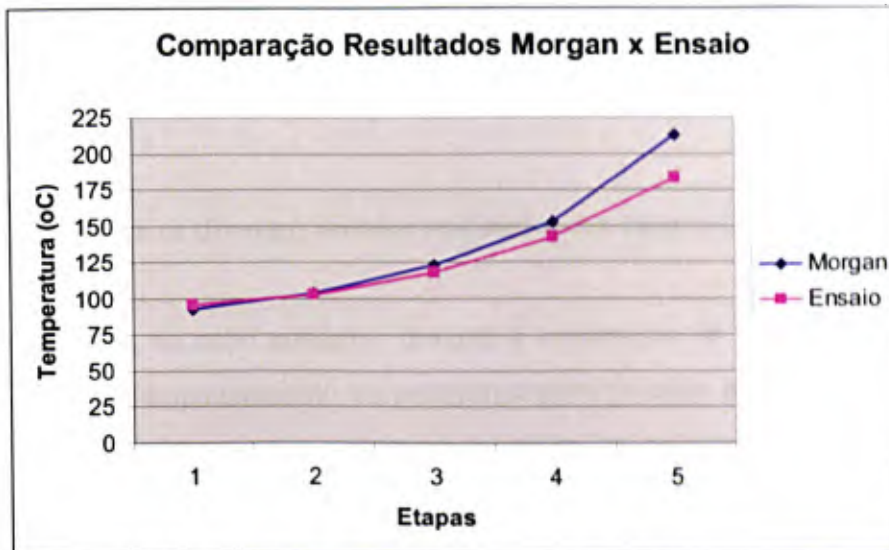


GRÁFICO 5. 1 – Diferença entre temperatura calculada por Morgan e medida pelos termopares

5.3 Resultado da Inspeção Baseada em Risco

Os resultados foram importantes para definir os sistemas/componentes críticos para as classes de tensão de 69 e 138 KV, não sendo comparados com trabalhos correlatos porque não foram encontrados outros trabalhos sobre este assunto.

A matriz de risco para as LT de 69 kV, FIG. 4.11, apresenta os oito sistemas/componentes críticos, níveis alto e muito alto, que são: Madeira–Estrutura/A, Concreto–Estrutura/A1.4, Concreto–Condutor/B.1, Madeira–Cadeia de Isoladores/D1.1, Madeira–Estrutura/A1.5, Madeira–Condutor/B.1, Concreto–Cadeia de Isoladores/D1.1 e Madeira–Estrutura/A1.4. Estes sistemas/componentes correspondem a 90% do risco total, deste valor, 25% está relacionado as LT com estruturas de concreto e 65% às LT com estruturas de madeira. Para as LT de 138 kV os resultados apresentados na matriz da FIG. 4.12 indicam quatro sistemas/componentes críticos que são: Madeira–Condutor/B.1, Metálica–Estrutura/A, Metálica–Cadeia de Isoladores/D1.1 e Metálica–Condutor/B.1. Estes sistemas/componentes correspondem a 74% do risco total, desse valor 9% está relacionado às LT com estruturas de madeira e 91% as LT com estruturas metálicas. Importante ressaltar que, para as duas classes de tensão apareceram como sistemas/componentes críticos a Estrutura/A1 (estrutura, parte aérea, sem descrição da parte afetada), Condutor/B.1 (cabo condutor) e Cadeira de Isoladores/D1.1 (isolador).

6 CONCLUSÕES

6.1 Correlação entre os diversos ensaios realizados em laboratório

A retirada de amostra de cabo condutor durante a construção de uma linha de transmissão é fundamental para o acompanhamento do comportamento do cabo ao longo de sua vida útil em relação aos diversos parâmetros que podem ser monitorados, ou seja, resistência a tração, dureza, resistência elétrica e estrutura cristalina. No caso deste trabalho a comparação foi realizada com amostras de cabos condutores retirados do almoxarifado da CEMIG.

Os ensaios de tração, dureza e resistência elétrica juntamente com o histórico térmico da LT podem indicar a tendência de perda de resistência à tração do cabo condutor. Mesmo quando não existe o histórico térmico da LT, esta tendência é perfeitamente definida examinando-se os três parâmetros citados anteriormente.

A comparação entre o resultado do valor de resistência a tração calculado de acordo com a NBR 7270 (1978), utilizando-se para este cálculo os resultados dos ensaios de tração dos fios de Alumínio e aço da LT, e o valor médio dos resultados dos ensaios do cabo condutor completo da LT indica uma grande convergência entre os mesmos. Portanto, a resistência à tração dos cabos condutores pode ser obtida tanto utilizando-se os resultados de ensaios dos cabos completos quanto os resultados dos ensaios dos fios de Alumínio e aço. Esta constatação é importante porque na impossibilidade de realização do ensaio à tração do cabo completo, em virtude do tipo de máquina de tração disponível ou do comprimento da amostra coletada, pode-se utilizar somente os resultados dos ensaios a tração dos fios de Alumínio e aço para definição da resistência a tração atual do cabo condutor da LT.

6.2 Estimativa da perda de vida útil de cabos condutores – ferramenta computacional

A utilização da ferramenta computacional para os cabos condutores e históricos térmicos das diversas linhas de transmissão contempladas neste trabalho indica resultados com baixa perda de

resistência mecânica dos condutores, conforme indicado nas FIG. 4.4, 4.5, 4.6, 4.8 e 4.9. A redução do diâmetro dos fios de Alumínio é fundamental para a perda de resistência, ou seja, quanto maior a redução, maior a perda de resistência em um dado intervalo de tempo de exposição, conforme descrito em 2.7.2. Neste caso, o cabo condutor Linnet tem uma redução em área igual a 90% e o Penguin a 74%, função da relação “diâmetro do fio de Alumínio do cabo condutor / diâmetro do vergalhão trefilado”.

Em MORGAN (1978) é feito o cálculo de perda de resistência de um fio de Alumínio com redução de 96% e o seguinte histórico térmico: 100.000 horas a 50°C, 10.000 horas a 70°C, 1.000 horas a 100°C, 1.000 horas a 120°C e 10 horas a 150°C, totalizando 12,79 anos. O resultado do cálculo foi uma perda de resistência igual a 27,93%. Comparando-se este resultado com os valores das linhas de transmissão utilizadas neste trabalho, indicados no QUADRO 6.1, verifica-se valores bem menores de perda para as LT, mostrando assim, a influência da redução do diâmetro do fio de Alumínio e do histórico térmico com temperaturas relativamente baixas de operação do cabo condutor na estimativa de perda.

QUADRO 6.1

Valores de perda de resistência dos cabos condutores e fio de Alumínio

Linha de Transmissão	Dados de Operação		Cabo condutor	Redução fio de Al (% O inicial)	Perda de R.Mecânica (% carga de ruptura)	
	Tempo (anos)	Temp. média (°C)			Condutor	Fio Al
Pirapora – M.Claros 1	31,8	27	Linnet	90	2,05	4,71
Barão de cocais – Caeté	6,7	25	Linnet	90	1,25	2,87
Sete Lagoas 3 - Cominci	37,8	36	Linnet	90	3,44	7,90
V.Palma - Pirapora	44,8	50	Penguin	74	0,99	2,19

Pelos resultados das simulações realizadas com a ferramenta computacional e as comparações feitas com os ensaios de laboratório, esta ferramenta pode ser utilizada em projetos executivos, recapitações, reformas e manutenções preditivas de linhas de transmissão.

6.3 Variação da temperatura em função do rompimento de fios externos em cabos condutores

Com base nos resultados das temperaturas obtidas ao longo do ensaio e de sua comparação com os valores teóricos calculados, QUADRO 5.10, verifica-se a necessidade de realização de novos ensaios com o cabo condutor Penguin. Os novos ensaios seriam para aferição dos resultados obtidos e para correção do cálculo teórico da temperatura do condutor, considerando-se a redução da área do Alumínio devido ao rompimento de fios de Alumínio.

Para os novos ensaios a serem realizados, a fixação dos termopares ao cabo condutor deverá ser modificada, evitando-se assim, a interrupção das medições de temperatura ao longo das diversas etapas do ensaio. E a quantidade de termopares ao longo da amostra também deverá ser aumentada para que possa ser verificado o comprimento de cabo condutor comprometido em caso de ruptura de fios.

Para a verificação da ocorrência de quebra de fios Alumínio em cabos condutores, manutenção preditiva, pode-se utilizar imagens termográficas, FIG.4.18, em conjunto com o perfil térmico do cabo condutor, FIG.4.19. Neste caso, deve-se planejar a realização de ensaios com outros tipos de cabos condutores usados em linhas de subtransmissão de energia elétrica.

6.4 Resultado da Inspeção Baseada em Risco

A definição dos sistemas/componentes críticos sinaliza os pontos mais importantes das LT que devem ser inspecionados com mais frequência e que podem afetar os indicadores de continuidade das concessionárias de energia elétrica com a conseqüente aplicação de multa pelo órgão regulador, Resolução ANEEL nº 063 (2004).

Os componentes críticos assinalados: cruzetas, postes, cabos condutores e isoladores merecem um programa de inspeção preditiva evitando a necessidade de intervenções não programadas nas LT.

Os próximos passos para o desenvolvimento da metodologia são: determinação das árvores de falhas e definição do Programa de Inspeção Baseado em Risco para os diversos componentes críticos.

Após a definição dos componentes críticos de um conjunto de LT, do respectivo Programa de Inspeção Baseado em Risco e utilizando-se o Banco de Dados Manutenção e Inspeção existente pode-se definir as LT críticas para o Sistema de Subtransmissão de Energia Elétrica considerado.

7 SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE

As seguintes sugestões poderão ser desenvolvidas para a melhoria da análise de vida útil residual de cabos condutores:

- Elaboração de programa para desenvolvimento de pesquisa sobre as transformações na estrutura dos grãos dos fios de Alumínio em função do tempo de utilização. Este trabalho resultaria em padrões de imagens metalográficas, desde a fabricação do cabo condutor - laminação, trefilação e encordoamento e durante a operação da LT, mostrando assim, as diversas fases do envelhecimento do cabo condutor, que poderão ser utilizadas na análise e definição de vida útil residual de cabos condutores.
- Elaboração de programa de coleta de amostras dos cabos condutores a serem utilizados em linhas de transmissão em construção ou a serem construídas. O objetivo é utilizar estas amostras como parâmetro aos estudos técnicos necessários a recapacitação ou reforma de LT durante o tempo de operação destas. As amostras seriam utilizadas na realização de ensaios de tração mecânica, análise química, metalografia e dureza, sendo os resultados armazenados e utilizados na análise da vida útil residual dos condutores.

ABSTRACT

This work presents a study of life estimation of Aluminum Conductors Steel Reinforced – ACSR used in overhead transmission lines, considering factors of influence with respect to tensile strength. In addition, it presents the results of an implemented methodology used to estimate the conductor life. The proposed methodology integrates survey data of existing lines, such as mechanical strength and hardness, data from operation and maintenance (transmitted currents and maintenance occurrences) and environment data (temperature and wind velocity) of the crossed regions. Result correlation is performed through a computational tool which considers the history of the line for estimating the remaining life of the conductor. The implemented methodology can be used to subsidize upgrade viability studies, planning of predictive maintenance of existent conductors, period fo predictive maintenance for new conductors, overhead inspections using helicopter with thermal-vision equipment to check the breakage of Aluminum strands, and analysis of the actual state of the conductor in terms of public safety.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALUMINUM ASSOCIATION. Aluminium Electrical Conductor Handbook. Third edition. Washington, D.C., 1989.
2. AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Aluminum, Vol.I. Properties, Physical Metallurgy and Phase Diagrams. Third Edition. Metals Park, Ohio, 1968.
3. AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. Annual Book of ASTM Standards, Section 2 – Nonferrous Metal Products, Volume 02.03 - Electrical Conductors. West Conshohocken, PA, 1993.
4. AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. ASTM B232: Concentric-Lay-Stranded Aluminum Conductors, Coated, Steel-Reinforced (ACSR), 1997.
5. AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. ASTM B415: Hard-Drawn Aluminum-Clad Steel Wire.
6. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução ANEEL nº 024. Janeiro/2000.
7. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA Resolução ANEEL nº 063. Maio/2004.
8. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API Recommended Practice 580: Risk-based Inspection. First Edition. Washington, D.C., May/2002.
9. ASM INTERNATIONAL. ASM Specialty Handbook - Aluminium and Aluminum Alloys. Fifth edition. Material Park, Ohio, 2002.

10. ASM HANDBOOK COMMITTEE. Metals Handbook – Volume 2 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals. Ninth Edition. Material Park, Ohio, 1979.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5118: Fios de Alumínio nus de seção circular para fins elétricos. Rio de Janeiro, 1985.
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5422: Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de energia elétrica. Rio de Janeiro, 1985.
13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6599: Alumínio e suas ligas – Processos e produtos – Terminologia. Rio de Janeiro, 2000.
14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6756: Fios de aço zincados para alma de cabos de Alumínio. Rio de Janeiro, 1987.
15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6834: Alumínio e suas ligas – Classificação. Rio de Janeiro, 2000.
16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6835: Alumínio e suas ligas – Classificação das têmperas. Rio de Janeiro, 2000.
17. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7103: Vergalhão de Alumínio 1350 para fins elétricos – Especificação. Rio de Janeiro, 1981.
18. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7270: Cabos de Alumínio com alma de aço para linhas aéreas. Rio de Janeiro, 1978.
19. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7271: Cabos de Alumínio para linhas aéreas. Rio de Janeiro, 1978.
20. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7272: Condutor elétrico de Alumínio – Ruptura e característica dimensional. Rio de Janeiro, 1982.

21. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7302: Condutor elétrico de Alumínio – Tensão-deformação em condutores de Alumínio. Rio de Janeiro, 1982.
22. ASSUNÇÃO, F.C.R.; CARVALHO, A.H.P.; ŞAMICO, R.A.M. e ROSA FILHO, P.P. Investigation on the aging of old ACRS cables in transmission lines: microstructural evolution and loss of strenght. Cigré Session, Paris, 1992.
23. BRUNAIR, R.M.; RAMEY, G.E.; DUCAN III, R.R. “An experimental evaluation of S-N curves and validity of Miner’s cumulativ damage hypothesis for an ACSR conductor”. Presented at IEEE/PES Winter Meeting. New Orleans, Lousiana, 1987.
24. CALLISTER, William D. Ciência e Engenharia de Materiais: 5ª edição, Rio de Janeiro, 2005.
25. CASTILHO, I.C.; REWAGEN, B.; SANGLARD, M. “Determinação de curva de fadiga em cabo CAA 336 MCM Linnet. Apresentado no Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE, 1999.
26. CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA. CIMM: Aspectos de temperatura na conformação. Disponível em: <<http://www.cimm.com.br/portal>>. Acesso em: 11 agosto 2008a.
27. CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA. CIMM: Processos de recuperação e recristalização. Disponível em: <<http://www.cimm.com.br/portal>>. Acesso em: 11 agosto 2008b.
28. COMPANHIA ENÉRGETICA DE MINAS GERAIS. CEMIG 30.000-O1/PL3-2225: Critérios para projeto eletromecânico – Linhas de Transmissão até 500 kV. Belo Horizonte, 1984.
29. COMPANHIA ENÉRGETICA DE MINAS GERAIS. CEMIG 30.000-TN/NT-0140: Vibração eólica em condutores aéreo – Princípios básicos. Belo Horizonte, 1988.

30. COMPANHIA ENÉRGICA DE MINAS GERAIS. CEMIG 30.000-ST/DN-0004: Mapeamento de ocorrências de vibração eólica em Linhas de Transmissão. Belo Horizonte, 1995.
31. ELECTRA. Paris: Cigré, nº 63, 1979. Bimestral. Recommendations for the evaluation of the lifetime of transmission line conductors.
32. ELECTRA. Paris: Cigré, nº 100, 1985. Bimestral. Guide for endurance tests of conductor inside clamps.
33. ELECTRA. Paris: Cigré, nº 162, 1995. Bimestral. Loss in strength of overhead electrical conductors caused by elevated temperature operation.
34. EPRI. Research Project 792, Transmission Line Reference Book – Wind Induced Conductor Motion, Electric Power Research Institute - EPRI, 1979.
35. LIU, F. e FINDLAY, R.D. Investigation of mechanical properties of single layer ACSR based on an Integrated Model. Electric Power Systems Research 78(2008) 209-216. Amsterdam, The Netherlands, March/2007.
36. FINK, D.G. e BEATY, H.W. Standard Handbook for Electrical Engineers - Section 4. New York: MacGraw-Hill, Inc, Thirteenth edition, 1993.
37. FONSECA, B.Q.A. Vida Útil de Cabos Condutores. Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte, dez/2002.
38. FUCHS, R.D.; LABEGALINI, P.R.; LABEGALINI, J.A e ALMEIDA, M.T. Projetos mecânicos de linhas aéreas de transmissão. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 2ª Edição, 1992.
39. FURUKAWA ENERGIA. Fios e cabos nus de Alumínio: catálogo. Curitiba, 1998, 8 p.

40. FURUKAWA INDUSTRIAL S.A. Fios e cabos nus de Alumínio: catálogo, 1998.
41. FURTADO, T. A.. Vibrações Eólicas em Linhas de Transmissão e Subtransmissão, Treinamento Técnico CEMIG, 2001.
42. HARVEY, J.R. Effect of elevated temperature operation on the strength of Aluminum conductors. In: IEEE Winter Meeting, New York City, 1972.
43. HATCH, J.E. Aluminum: Properties and Physical Metallurgy, ASM, Metals Park, USA, 1990.
44. IEEE. Guide for Determining the Effects of High Temperature Operation on Conductors, Connectors, and Accessories, P1283/D7.0, Draft 7.0, August, 2001.
45. INTERNATIONAL COUNCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEMS. Cigré Working Group 4 of Study Committee 22: Endurance capability of conductors. Final Report, 1988.
46. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IACS-International Annealed Copper Standard, 1913.
47. LAVANDOSCKI, R.; TEIXEIRA JR., H.S.; DAMILANO, J.G. Numerical and Experimental Analyzes on Lifetime Expectancy of Transmission Line Conductor Cables. In: 2004 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America, 2004, São Paulo - SP. 2004 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America, 2004.
48. LAVANDOSCKI, R.; BOLFORINI, C.; CARLETTI, C.B.; SYLVESTRE, M.A.; BONOME, E. C.; VICENTIM, R. L. Determinação de Propriedades Mecânicas dos Condutores CAA, para o Processo de Retracionamento. In: III CITENEL - Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, Florianópolis - SC, 2005.

49. MANNALA, M.J.; SOUZA JR., O.H.; HOFFMANN, J.N. Investigação dos parâmetros mecânicos de cabos CAA em temperaturas elevadas. In: XVIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba - PR, 2005.
50. MORGAN, V.T. The loss of tensile strength of hard-drawn conductors by annealing in service. In: IEEE PES Summer Meeting, Los Angeles, CA, July/1978.
51. MORGAN, V.T. Thermal Behaviour of Electrical Conductors – Steady, Dynamic and Fault-Current Ratings. CSIRO Division of Applied Physics, 1990.
52. MOURÃO, M. Informe Tecnológico n° 2, EG/MN, Cemig, 2001.
53. NASCIMENTO, C. A. M. Metodologia Experimental para utilização de cabos condutores termorresistentes (TAL) em linhas de transmissão. Dissertação de mestrado, UFMG, Belo Horizonte, 1999.
54. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Procedimentos de Rede, ONS Submodulo 2.4, Requisitos mínimos para linhas de transmissão, 24/12/2002.
55. PEZZI, M.F. Aplicação de IBR, Inspeção Baseada em Riscos a Oleodutos segundo a API 581 BRD – Verificação de Consistência com Práticas Usuais da Indústria para Avaliação de Risco. Dissertação de mestrado, PUC/RJ, Rio de Janeiro, maio/2003.
56. REED-HILL, R.E. Princípios de Metalurgia Física. 2ª Edição. Brasil: Editora Guanabara Dois, 1998.
57. RESENDE, D.B. Informe Tecnológico: Testes com a Tele de 12° do Agema 570, EG/MN, Cemig, 2001.
58. SOUZA, S.A. Ensaios mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos. 5ª Edição. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda., 1995.

59. SILVA, A.B. Programa de Inspeção para Ponte Rolante Baseado em Risco. Dissertação de mestrado, PUC/RJ, Rio de Janeiro, dez/2004.
60. SMITH, W. Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais. Portugal: Editora McGraw-Hill, 3ª Edição, 1973.
61. SOUTHWIRE COMPANY. Overhead Conductor Manual. First edition, Carrollton, Georgia, 1994.
62. STEVENSON JR., Willian D. Elementos de análise de sistema de potência. Brasil: Editora McGraw-Hill Ltda, 2ª Edição em português, 1986.
63. UEDA, S. e FUKUMOTO, A. Liga de Alumínio termoresistente. In: SALTEE, 1996, Belo Horizonte.