

Cabos Aéreos Para Linhas de Transmissão de Energia Elétrica

Com referências às suas resistências às vibrações eólicas
Geraldo Roberto de Almeida (Eng^o Eletricista MSc – DSc)

RESUMO

Os cabos condutores aéreos usados em linhas de transmissão têm evoluído nos últimos 130 anos em diversas tecnologias: seja em materiais seja em formas. Os materiais condutores evoluíram do cobre para o alumínio, por motivação de preço, devido a abundância do metal na crosta terrestre. Os materiais mecanicamente resistentes evoluíram do Cobre para o aço e mais recentemente para nanomateriais em cerâmicas e polímeros. Os materiais mecanicamente resistentes foram combinados aos materiais condutores para melhoram o desempenho mecânico dos cabos suspensos, aumentando os vãos de suspensão dos cabos. A combinação de material condutor e material resistente favoreceu muito o metal condutor alumínio, devido a menor densidade deste ($2,703 \text{ g/cm}^3$) em detrimento do cobre ($8,89 \text{ g/cm}^3$). O material clássico mecanicamente resistente é o aço, que na metalurgia física é uma liga de ferro e cementita. A cementita é uma cerâmica Fe_3C de dureza muito elevada. A partir de 1920 os americanos desenvolveram os cabos aéreos denominados ACSR (Aluminum Conductor Steel Reinforced), que até hoje tem sido usado com muito sucesso. A versão ACSR comporta inovações na cobertura do aço: São os revestimentos em alumínio e cobre, ao invés do tradicional zinco, aplicado eletroquimicamente ou termodinamicamente. Mais recentemente o reforço do metal condutor alumínio tem sido feito por materiais compósitos e construção com nanotecnologia: São os compósitos cerâmicos e poliméricos, que entram na emulação com o aço tradicional. Também entre o aço tradicional e os nanomateriais, tem sido aproveitado o próprio alumínio, como material alternativo para reforço mecânico de cabos suspensos. Este aproveitamento é possível através de um processo industrial de metalurgia mecânica que permite ao material, alumínio liga, adquirir elevada carga de ruptura, equivalente as cargas de rupturas do aço, aplicando aquilo que em metalurgia mecânica é rotulado como trabalho mecânico a frio. Isto tem sido aclamado como um grande avanço tecnológico, que teve início em 1939, sendo retomado após a II guerra e mais recentemente, reivindicando um papel de grande economia nos projetos de vãos de cabos condutores para a linhas de transmissão. Este trabalho faz um inventário da história destes cabos, em materiais e formas e atualiza o presente estado da arte.

PALAVRAS CHAVES

Overhead Bare Cables, Transmission Lines, Aluminum Alloys, Reinforcement.

INTRODUÇÃO

F. R. Trash [01] (Southwire) apresentou um tutorial para seleção e aplicação de condutores nus para transmissão, que excetuando os nanomateriais, todos os demais foram contemplados

com assertivas interessantes para cada material e forma.

O melhor material condutor elétrico e também mecanicamente resistente é o Cobre. Este metal foi usado no início da tecnologia elétrica (1880) nos EUA e EUROPA. A raridade do metal na crosta terrestre e a I Guerra mundial, tornaram o preço deste metal proibitivo como condutor elétrico. Assim a partir destes eventos o alumínio foi paulatinamente substituindo o cobre como metal condutor elétrico e mecanicamente resistente.

Os cabos condutores para linhas aéreas de transmissão de energia elétrica desde 1920 têm sido construídos com um material bom condutor elétrico associado a um material mecanicamente resistente que reforce o condutor. Na literatura de língua inglesa e mais especificamente nos EUA estes cabos são denominados ACSR (Aluminum Conductor Steel Reinforced).

Depois da II guerra mundial os cabos suspensos evoluíram para cabos de alumínio liga que recebendo um notável trabalho mecânico de conformação a frio, aumentavam muito a tensão de ruptura. Sendo este material de densidade muito próxima a densidade do alumínio comercial (2.703 g/cm^3) traziam uma grande vantagem de peso para o vão de transmissão e com redução de seu peso trazia aumento do vão suspenso e quase sempre redução do metal das torres de suspensão.

Estas ligas geralmente baseadas em silício e magnésio e mais recentemente com o cobre substituindo o silício e magnésio, depois de alguns anos de desempenho apresentavam grande sensibilidade à ruptura de tentos devido a vibração eólica. Ainda assim, tais ligas continuavam a serem usadas, mas com esta penalização. Se as rupturas dos tentos levavam somente ao aparecimento de pontos quentes, o problema podia ser mitigado sem grandes perdas de confiabilidade. Mas se houver ruptura do condutor a confiabilidade estará definitivamente comprometida.

Os cabos do tipo ACSR também não estavam imunes ao problema de quebra dos tentos por vibração eólica, mas neste caso os cabos da linha não se rompiam totalmente porque a alma de aço continuava a desempenhar o papel de sustentação. Deste modo o problema se resolvia com uma emenda do componente condutor.

O problema do desempenho frente à vibração eólica, fenômeno muito comum nas linhas de transmissão aéreas, continua em aberto: seja do ponto de vista de modelamento em engenharia, seja na tecnologia dos materiais. Os estudos conduzidos pelo CIGRE e pelo IEEE têm trazido

melhorias no entendimento do fenômeno, mas um modelamento em sede de CONFIABILIDADE de um cabo aéreo suspenso ainda continua nas hipóteses e conjecturas.

Os novos materiais são alternativas muito interessantes ao aço e aos alumínio ligas, mas estes materiais também deve focar o comportamento frente à fadiga cíclica devido às vibrações eólicas.

Existe um enfoque de engenharia alternativa aos materiais para mitigar e/ou resolver o sofrimento dos cabos frente às vibrações eólicas mudando a forma de construção dos cabos de modo a promover o auto amortecimento. De modo geral os cabos encordoados de alumínio já possuem alguma características de auto amortecimento (devido ao encordoamento). Esta característica, todavia, decresce exponencialmente com o aumento da tensão mecânica nos fios. Este trabalho constrói e estado atual da arte de materiais e construções de cabos e discute tecnicamente as vantagens e desvantagens das diversas soluções em uso.

OS MATERIAIS

Os materiais são escolhidos segundo três critérios: (i) Energia a ser transmitida; (ii) *Esforços e Momento (energia) nas estruturas, incluindo os cabos suspensos* (iii) Topologia da linha de transmissão (Pontos de Entrada e Saída, Perfil Altimétrico); O critério regente é o custo anual de operação. Uma linha de transmissão é na sua mais simples interpretação, uma máquina térmica. *O critério regente é o critério de otimização do custo de operação e governará os três anteriores.* Nas referências [02],[03] e [04] esta abordagem pode ser apreciada, no mais avançado estado da arte.

No critério da energia a ser transmitida, dois aspectos são essenciais: A tensão entre fase e terra (condutores – cabos suspensos e o solo), tensão entre fases e a corrente que circula nos condutores. A tensão nos condutores é uma parte substancial da engenharia elétrica da linha e é tratada num capítulo específico de coordenação do isolamento. A corrente circulante é tratada na termodinâmica, mais especificamente no capítulo de transferência de calor.

No critério de esforços e momento, este trabalho abordará com muito mais ênfase o comportamento dinâmico mecânico dos cabos suspensos e a resposta dos materiais [03] e [04]. Serão feitas considerações mecânica dinâmica da implicação do comportamento de uma linha elástica (cabos) suspensa entre estruturas e como os esforços desta linha elástica são transmitidos

para esta estrutura.

O terceiro critério está suficientemente equacionado e resolvido, existindo sistemas especialistas (PLS – CADD), [05] conhecidos dos projetistas de linhas, que quando, usados trazem uma grande economia de tempo no projeto.

O custo anual de operação de uma linha de transmissão tem implicação direta na escolha dos materiais e será dada uma ênfase neste capítulo.

ESFORÇOS E MOMENTOS

Os cabos suspensos e as estruturas, não considerando o efeito provindo do ambiente (Ventos, Gelo, Fogo ETC), são governados pela tensão mecânica de suspensão dos cabos e pela corrente circulante neles [03].

A tensão mecânica que garante a suspensão dos cabos provoca nos materiais dos cabos o fenômeno denominado FLUÊNCIA mecânica [06], [07]. A corrente que circula nos cabos provoca um alongamento dos cabos por dilatação térmica.

Assim a engenharia clássica [03] aprendeu lidar com estes fenômenos, da seguinte maneira: (I) Delimita o conjunto de variáveis que levam as estruturas aos esforços máximos e (II) E delimita outro conjunto de variáveis que provoca a flecha máxima (que determina a distancia fase – terra dos condutores). Estas duas condições são os assim chamados ESTADOS extremos de um cabo suspenso numa linha de transmissão.

As variáveis que levam os cabos aos esforços máximos são: Vento muito forte e Temperatura muito baixa. Este seria o ESTADO (termodinâmico) inicial do cabo suspenso – O ESTADO de maior tensão do cabo (e das estruturas) e tem sido tratado com a equação;

$$f = \frac{H}{w} \left(\frac{a^2}{8} \right) \text{ eq. (1)}$$

a Comprimento do vão

f Flecha máxima no vão plano

H Força de tração horizontal

w Peso linear do cabo

As variáveis que levam a flecha máxima são: Vento muito baixo (ou ausência de vento) e temperatura muito alta. Este corresponderia ao ESTADO mais relaxado da linha elástica e também aquele de flecha máxima. O leitor deve ter percebido que não falamos da camada de gelo. Neste País ela praticamente não comparece nos invernos e transições de estações climáticas. O fogo é um problema decorrente das queimadas perto das linhas de transmissão.

O ESTADO mais relaxado é tratado com a equação de variação de estados.

$$T_2 - a^2 P_2^2 \frac{ES}{24T_2^2} = T_1 - a^2 P_1^2 \frac{ES}{24T_1^2} - \alpha(t_1 - t_2) \text{ eq. (2)}$$

T_1 Força de tração no estado 1

T_2 Força de tração do estado 2

P_1 Peso linear no estado 1

P_2 Peso linear no estado 2

E Módulo d elasticidade do cabo

S Área da seção circular do cabo

t_1 Temperatura no estado 1

t_2 Temperatura no estado 2

α Coeficiente de dilatação linear

O critério de operação modelado como se a linha fosse uma máquina térmica é governado pela seguinte equação;

$$C_{total}^{anual} = 10^{-6} 8760 \frac{\rho}{S} I^2 \cos \varphi C_{MWh}^{\$} + JSd C_{kg}^{\$} + JSd(g) \frac{C_{estrutura}^{\$}}{8\zeta\kappa C_{rup}} \text{ eq. (3)}$$

ρ Resistividade elétrica do condutor

d Densidade do cabo

C_{rup} Carga de ruptura do cabo

k Relação flecha/vão

ζ Relação H/C_{rup}

I Corrente circulante

Que quando se busca a máxima eficiência, consiste em minimizar o custo anual de perdas [08].

METAIS CONDUTORES E ESTRUTURAIS

Após a digressão de equações, os materiais úteis na construção de linhas de transmissão são: Cobre, Alumínio, Aço e os Nano Materiais de alto desempenho mecânico. No alumínio é necessário fazer uma consideração. Este metal é obtido através de minerais encontrados na crosta terrestre. O principal é a bauxita. A bauxita purificada para transformar em alumínio, é feita por processo eletroquímico muito custoso. Esta metalurgia é denominada ELETRO INTENSIVA (cerca de 70% do preço dos alumínios comerciais é devido ao custo da energia usada no processo metalúrgico para sua obtenção). Daí está o fato de alumínio comercial são todos os alumínios com mais de 99% de pureza (alumínio contido). Por isso os alumínios comerciais são todos denominados LIGAS DE ALUMÍNIO.

METAIS		PARÂMETROS PRIMÁRIOS				
		FIO ALUMINIO 1350-H19	FIO COBRE COMERCIAL	FIO COBRE RECOZIDO	FIO AÇO ZINCADO	FIO AÇO ARAME
		MASSA ESPECÍFICA	g/cm ³	2,705	8,89	8,89
RESISTIVIDADE A 20°C	Ω/mm ² km	28,2639	17,7742	17,2410	215,5125	215,5125
CONDUTIVIDADE	%IACS	61	97	100	8	8
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DA RESISTENCIA A 20°C	1/°C	4,0300E-03	3,8100E-03	3,9300E-03	3,8100E-03	3,8100E-03
COEFICIENTE DE DILATAÇÃO LINEAR	1/°C	2,3000E-05	1,6920E-05	1,6920E-05	1,1520E-05	1,1520E-05
CALOR ESPECÍFICO	J/Km ³	3280000	3358000	3358000	3800000	3800000
CONDUTIVIDADE TÉRMICA	W/mK	202,73	388,74	388,74	62,7	62,7
MÓDULO DE ELASTICIDADE	GPa	69	118		196	196
PONTO DE FUSÃO	°C	660	1084	1084	1320	1320

TABELA I

PROPRIEDADES FÍSICAS DE ALGUNS METAIS

Na tabela I conseguimos os valores da maioria dos parâmetros que são necessários nas equações de estados extremos e custo anual de operação: S seção do cabo, E Módulo de elasticidade, P Peso linear P Peso linear α Coef. dilat. Linear, t Temperatura em °C, d Densidade do cabo, ρ Resistividade do condutor

Das equações estão fora da tabela I: H e C_{rup} , que são os parâmetros que dependem além da estrutura do material, do encordoamento e da conjugação com mais de um material formador do cabo.

H é a força horizontal Que estica o cabo entre as estruturas e C_{rup} é a carga de ruptura do material do cabo quando este é solicitado longitudinalmente.

Na engenharia clássica [03] H e C_{rup} São linearmente dependente através de um fator denominado EDS (Every Day Stress), um fator muito familiar para aqueles que militam na engenharia de transmissão aérea.

USO DOS MATERIAIS NO PROJETO

A quantidade de material condutor no cabo será dimensionada em princípio através do modo termodinâmico de transferência de calor [03] [09]. Deste dimensionamento resultarão em principio os parâmetros de linha (vão e flecha) no estado mais relaxado de linha elástica (quente e sem vento). No modo termodinâmico, a solução da seção transversal do condutor, será aquela em que as perdas geradas pela circulação de corrente, conseguem ser dissipadas por convecção e radiação no ar.

A quantidade (e qualidade) do material resistente mecanicamente na linha elástica será determinada com conhecimento empírico.

Na figura [1] a seguir está ilustrado como compatibilizar as equações anteriores com o conhecimento empírico dos ensaios tensão – deformação – creep da ALUMINUM ASSOCIATION OF AMERICA [10] [11] e que são usados desde 1950 no dimensionamento de vãos e flechas em linhas aéreas de transmissão de energia elétrica.

Na figura adiante, as curvas de ensaios (empíricas) são usadas para delimitar o uso dos materiais resistentes mecanicamente. O VÃO DE VENTO na temperatura mais fria determina um ESTADO de maior tensão no cabo (e nos extremos nas estruturas) que em função da carga e ruptura do cabo e da força horizontal H um EDS max que faremos coincidir com o joelho da curva (Final do cabo completo e final da alma de aço). Neste “joelho”, na posição mais tensa do cabo, apenas o aço responde como material resistente e isto é o “approach” mais conservador num projeto. No estado mais relaxado apenas o aço continua respondendo, mas neste estado a variável a ser controlada é a FLECHA MÁXIMA

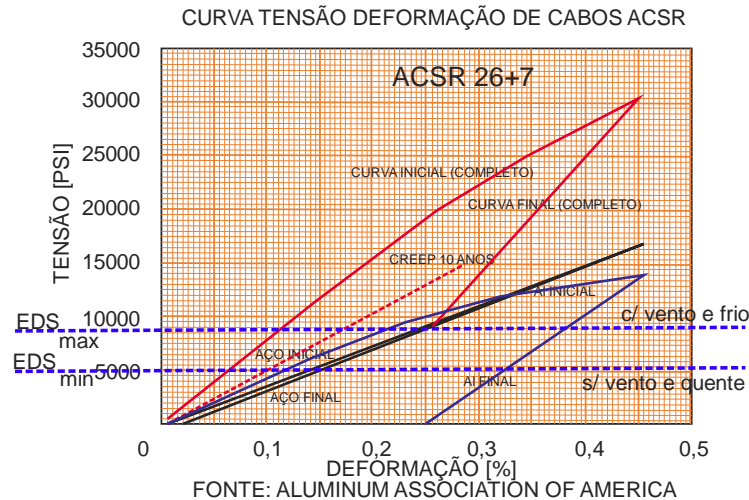


FIGURA I

TENSÃO DEFORMAÇÃO-FLUÊNCIA

Numa linha de transmissão com condutores ACSR bem dimensionado e num approach clássico [03], apenas o AÇO trabalha como material mecanicamente resistente.

MATERIAIS-LIGAS DE ALUMÍNIO

As ligas de alumínio mais conhecidas e usadas como materiais condutores e mecanicamente resistentes são três: Liga EC 1350, Liga 6201 e/ou 6202 e liga 1120 [01]. Estas ligas são aquelas economicamente viáveis no processo de metalúrgica de purificação dos minérios em alumínio com um resíduo de contaminantes.

ELEMENTOS		LIGAS			
		1350	6201	6101	1120
SILÍCIO	MAX	0,10	0,5↔0,9	0,4 ↔ 0,7	0,10
FERRO	MAX	0,40	0,50	0,50	0,40
COBRE	MAX	0,05	0,10	0,10	0,05 ↔ 0,35
MANGANES	MAX	0,01	0,03	0,03	0,01
MAGNÉSIO	MAX		0,6↔0,9	0,4 ↔ 0,7	0,20
CROMO	MAX	0,01	0,03	0,03	0,01
ZINCO	MAX	0,05	0,10	0,10	0,05
BORO	MAX	0,05	0,06	0,06	0,05
GALIO	MAX	0,03			0,03
TITANIO E TITANIO	MAX	0,02			0,02
E OUTROS ELEMENTOS CADA	MAX	0,03	0,03	0,03	0,03
OUTROS ELEMENTOS TOTAL	MAX	0,01	0,01	0,10	0,10
ALUMÍNIO	MIN	99,50	Restante	Restante	99,20

TABELA II

CONSTITUIÇÃO QUÍMICA DAS LIGAS DE ALUMÍNIO

Para um metalurgista experiente, as ligas de alumínio viáveis economicamente na purificação são aquelas que deixam um resíduo de metais diferentes semelhante ao resíduo de carbono nos aços estruturais.

No diagrama de equilíbrio Ferro Cementita [FIGURA - II] anterior, aços estruturas vão até o domínio 0,76% de carbono (Ponto Eutectoide). As ligas de alumínio viáveis reclamam até 1% de resíduos contaminantes (veja TABELA II) anterior.

Todavia, o mesmo metalurgista experiente verá que a contaminação de carbono nos aços estruturais se faz com CEMENTITA que na realidade é uma cerâmica muito dura.

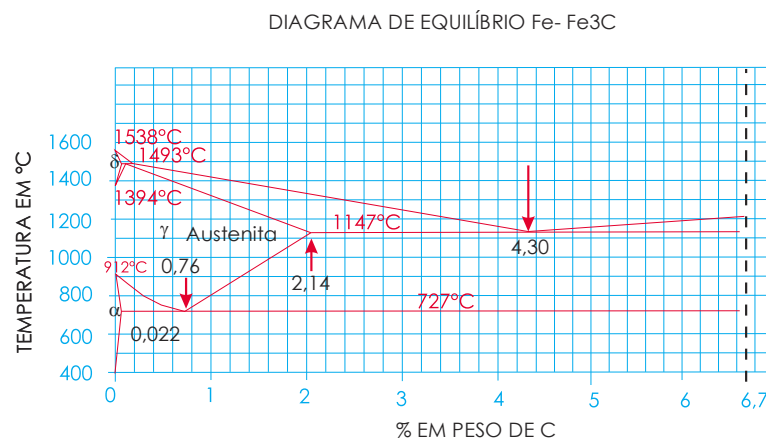


FIGURA II

DIAGRAMA DE FASE Fe₃C

A quantidade de cementita confere ao ferro um aumento substancial na carga de ruptura, reduzindo em contra partida o alongamento à ruptura (Não existe o tal do almoço grátis). O análogo andamento de metalurgia mecânica acontece na obtenção de cargas elevadas nas ligas de alumínio extraforte. O aumento da carga de ruptura se faz com a eliminação da fase elástica do alumínio (O tal do almoço grátis não existe mesmo).

Nos casos das ligas de alumínio os resíduos contaminantes são metais não ferrosos (Silício e Cobre) os sais e óxidos destes metais. No caso do silício, que fragiliza o alumínio, o problema é mitigado com a inserção de magnésio na liga, No caso do cobre a mitigação é feita coma redução

do trabalho mecânico a frio inserido.

Toda ação de metalurgia para tornar os materiais como metais de engenharia de condução elétrica e material mecanicamente resistente resultam nas seguintes propriedades finais;

Na tabela [III] a seguir são apresentados os parâmetros ρ e C_{rup} das ligas de alumínio juntamente com o aço, de modo que seja comparado o resultado das diversas metalurgias sobre os elementos Ferro e Alumínio.

CARACTERÍSTICAS DAS LIGAS DE ALUMÍNIO					
		ρ			Crup
		% IACS			MPA
1350		61,0			160
1120		58,8			220
6201		52,5			280
AÇO		8,0			1400

TABELA III

PROPRIEDADES ELETRICAS E MECÂNICAS

A ESCOLHA OTIMIZADA DOS MATERIAIS

A escolha otimizada dos materiais condutores para um projeto de uma linha de transmissão é feita de forma a maximizar a eficiência de uma máquina térmica.

$$\eta = \frac{G}{H} = 1 - \frac{ST}{H} \text{ eq (4)}$$

η *Rendimento da máquina térmica (Linha)*

H *Potencia entregue no inicio da linha*

G *Potencia útil entregue no fim da linha*

ST *Entropia – Custo anual das perdas*

A equação [4] anterior é uma notável aplicação da equação de GIBBS [08] (Josiah Willard Gibbs 1839 – 1903), para qualquer sistema termodinâmico.

ST é a entropia da máquina No caso de uma linha de transmissão de energia elétrica é o custo de operação da linha. Assim, para a eficiência ser máxima, as perdas devem ser mínimas. Tratar o problema como maximização da eficiência de uma máquina térmica é o melhor algoritmo

para OTIMIZAR um problema de pesquisa não linear com múltiplas variáveis, como é o caso de operação de uma linha de transmissão, modelada com a equação (3) anterior.

Nesta equação ρ deve ser o menor possível, S deve ser o maior possível, d deve ser o menor possível e C_{rup} deve ser o maior possível, isto tudo para ficarmos apenas nos parâmetros físicos mensuráveis. Parâmetros de mercado e commodities são apenas negociáveis.

C_{rup} Ser o maior possível insere como solução os materiais: AÇO e LIGAS EXTRAFORTE de alumínio, Ao NANOSMATERIAIS compósitos, como os melhores materiais para desempenho mecânico de sustentação dos cabos.

A FADIGA CÍCLICA

As vibrações eólicas, fenômeno aperiódico e recorrente nos cabos suspensos de linhas de transmissão são simulados com ciclos de fadiga cíclica com amplitude e frequência pré-estabelecidas. Este modelamento tem mais de 150 anos e foi desenvolvido por Whöller [12] (August Wöhler 1819 – 1914) e de tão efetivo permanece até hoje. Os metais e construções de cabos para transmissão tem sido ensaiados com a metodologia SN e a despeito do enfoque empírico muitas assertivas tem sido construídas com este método.

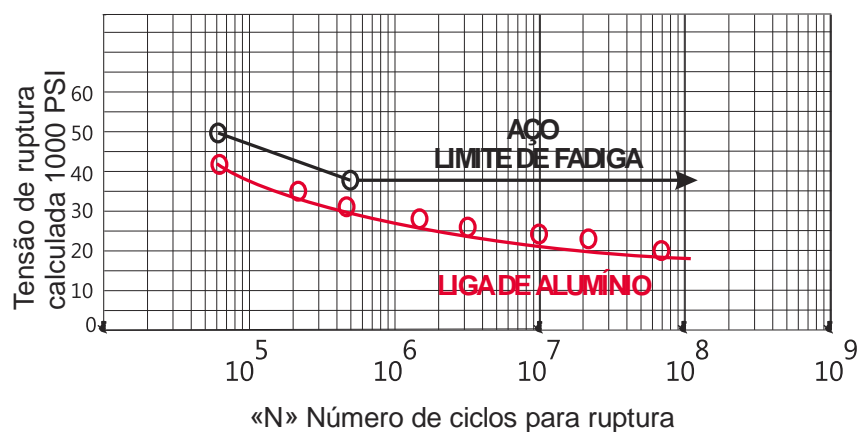


FIGURA III

DIAGRAMA SN PARA AÇO E ALUMÍNIO

Na figura [III] anterior observa-se que o comportamento do aço é fenomenologicamente diferente das ligas de alumínio. De modo geral as ligas de materiais não ferrosos tem um comportamento que não apresenta assíntota (Abaixo de uma determinada tensão mecânica os

materiais ferrosos apresentam um comportamento assintótico). Abaixo deste valor de tensão assintótica o número de ciclos de materiais ferrosos para ruptura tende para o infinito. Nas ligas e alumínio este comportamento não é observável e por isto criou-se o critério de 10^7 ciclos como aceitável como limite SN para a ruptura dos metais não ferrosos.

Deve-se observar que os pontos das linhas SN são os valores médios medidos sobre amostras. Portanto, quando se usar este critério, deve-se considerar que o ponto sobre a curva coincide com a média dos valores medidos e então considerar esta estatística como função densidade de probabilidade na avaliação da confiabilidade deste material.

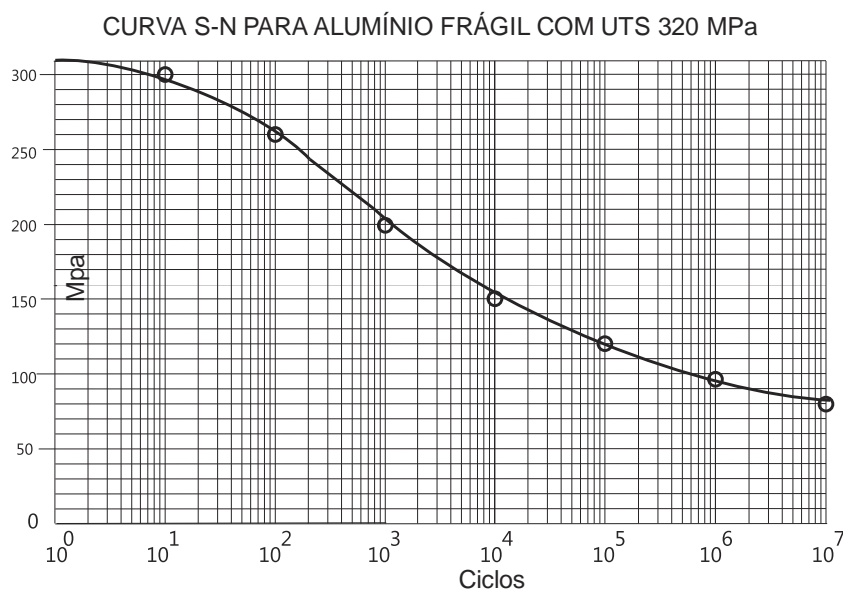


FIGURA IV

DIAGRAMA WÖHLER PARA ALUMÍNIO

O documento do CIGRE “Safe Border Line” utiliza este critério e a assertiva CIGRE é que todas as ligas de alumínio estão fora da “Safe Border Line” e portanto o comprador deve decidir qual liga deverá adquirir para a construção de seu cabo.

O critério SBL ou comete o erro estatístico tipo I (Todas as construções são idênticas quando o fenômeno é fadiga cíclica) ou está faltando complementá-lo com a teoria da CONFIABILIDADE (dos materiais).

Se o fenômeno de vibração eólica não provocasse dano permanente (ruptura dos fios de liga de alumínio), a decisão seria apenas de cunho econômico. Mas na realidade as rupturas

acontecem e economicamente elas devem ser avaliadas e consideradas no custo de operação da linha.

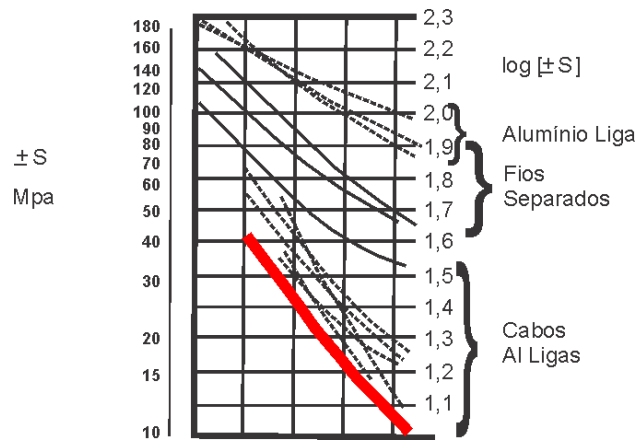
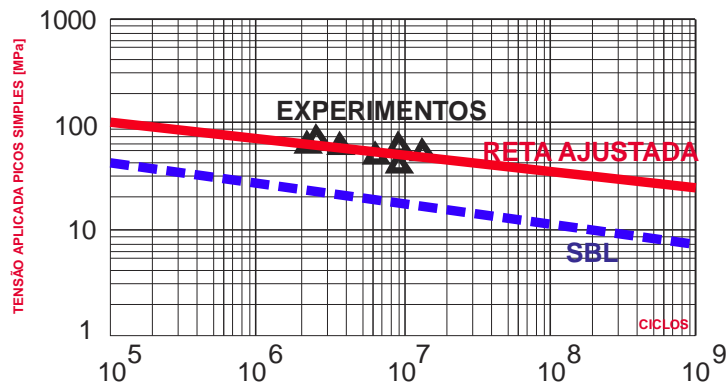


FIGURA V

SAFE BORDER LINE -CIGRE

No documento [13] conduzido na dissertação de mestrado por Márcio Tonetti. As experimentações foram definitivas. O horizonte extremo de ciclos a fadiga do cabo ACSR é da ordem de 10^9 , enquanto que o horizonte extremo de ciclos a ruptura no cabo equivalente, mas construído com liga de alumínio 1120 é da ordem de 10^7 .



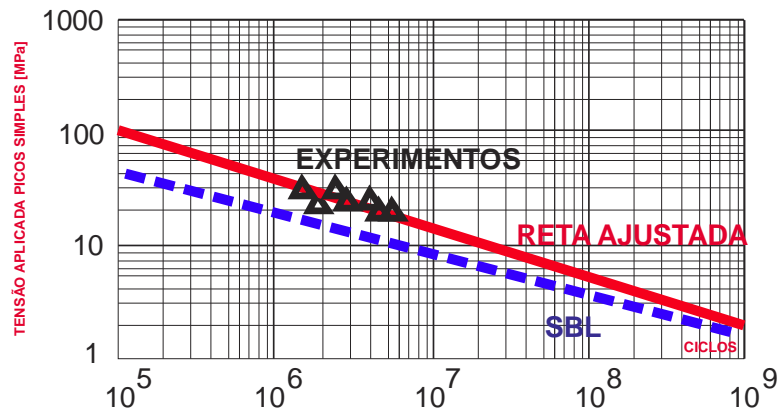
CURVA [SBL] DO CIGRE E A CURVA S/N AJUSTADA A PARTIR DOS DADOS DOS EXPERIMENTO PARA O CABO ACSR TERN 795 MCM -REF [13]

FIGURA VI

FADIGA CÍCLICA ACSR TERN

Assim, mesmo que o critério SBL (Safe Border Line) do Cigre exiba um critério pouco útil na aceitação ou rejeição dos cabos quanto ao desempenho em fadiga cíclica, ele pode classificar as

construções como mais ou menos resistente a fadiga cíclica. Neste experimento a construção ACSR foi muito mais efetiva que a construção 1120 no critério Wöhler [12] de comportamento à fadiga dos materiais.



CURVA [SBL] DO CIGRE E A CURVA S/N AJUSTADA A PARTIR DOS DADOS DOS EXPERIMENTOS PARA O CABO ALL 1120 EQUIVALENTE ACSR TERN 795 MCM -REF [13]

FIGURA VII

FADIGA CÍCLICA ALL 1120

Desde os anos 20 do século passado STOCKBRIDGE desenvolveu uma maneira de mitigar os efeitos das vibrações eólicas sobre os cabos condutores [14]. Esta mitigação vem através da técnica de colocar amortecedores (que leva o nome do inventor) em posições onde concentram a grande maioria das rupturas dos fios. O desenho do amortecedor é feito de modo que duas massas diferentes possam atenuar a amplitude das frequências de ressonâncias estimadas mais perigosas.

Todavia, esta técnica, a despeito de sua efetividade para duas frequências, não conseguem atenuar as demais frequências que se originam no espectro das vibrações eólicas.

A figura VIII a seguir extraída de [14] evidencia a eficiência do amortecimento em ensaios clássicos de fadiga cíclica (Método S/N de Wöhler), onde apenas duas frequências (ressonância das massas dos amortecedores) são de alguma forma beneficiada. A técnica de uso de amortecedores mitiga as amplitudes de frequências de ressonância e sobretons, mas o fenômeno de fadiga persiste.

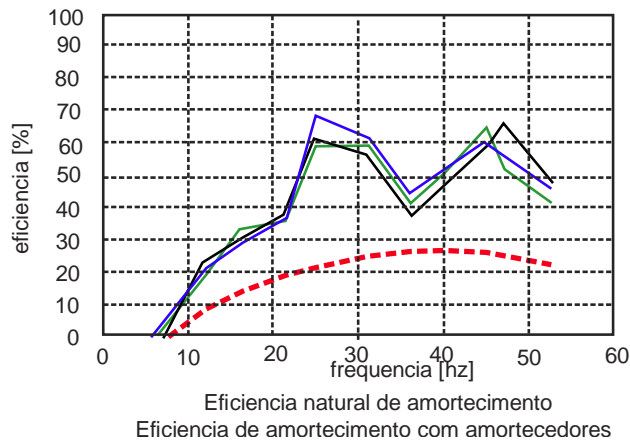


FIGURA VIII
 Eficiência natural de amortecimento
 Eficiência de amortecimento com amortecedores

FADIGA CÍCLICA ACSR TERN

O CUSTO ANUAL DE OPERAÇÃO

O custo anual de operação da linha de transmissão tem na terceira parcela da equação (3) anterior o parâmetro C_{rup} .

$$C_{total}^{anual} = 10^{-6} 8760 \frac{\rho}{S} I^2 \cos \varphi C_{MWh} + JSd C_{kg} + JSd(g) \frac{C_{estrutura}^{\$}}{8\zeta\kappa C_{rup}} eq(3)$$

Este parâmetro não é ∞ de forma que poderíamos desprezar a componente do custo das estruturas no custo de operação da linha, nem é constante no tempo. C_{rup} varia no tempo, mas ainda não temos modelo de mecânica do meio contínuo que possa considerar esta variação.

Esta variação pode ser observável empiricamente observando a figura (I) anterior do ensaio tensão- deformação-creep, onde a linha de creep a 10 anos inclina na direção da linha inicial do aço. A leitura desta inclinação é que num tempo mensurável toda a carga de sustentação do cabo será respondida apenas pelo aço.

O parâmetro C_{rup} deve ser considerado no custo da operação da linha. Se o custo deste parâmetro for negligenciado, ele vai para a caixa dos riscos, onde além da ruptura do condutor (Ligas de alumínio não possuem aço na alma), o operador da linha deve contar também com multas e lucros cessantes com a indisponibilidade da mesma. Tudo isto sem contar com a possibilidade de derrubada do sistema, se a linha tiver um o peso muito grande na estabilidade da malha de transmissão.

DISCUSSÕES

O capítulo de discussões será especialmente dedicado à história das ligas de alumínio e sua evolução. A obtenção do elemento metal alumínio é um processo eletro intensivo com elevado gasto de energia elétrica. Deste modo a purificação do metal é levada até o ponto em que o uso da energia elétrica é ainda economicamente viável em termos do custo do metal puro obtido. Assim, encontramos no mercado as ligas:

1350 Que contem 99,50% de alumínio

1120 Que contem 99,20% de alumínio

6201 Que contem 99,00% de alumínio

O número 1 no começo do código significa que o metal base é alumínio e tudo mais na composição podem ser consideradas contaminações que não são economicamente viáveis sua separação do metal alumínio. O número 6 no início do código indica que o metal base é ainda alumínio, mas um dos contaminantes é o silício. Os dois algarismos finais indica o nível de pureza final da composição da liga.

A liga 1350 é a realmente mais pura e rotulada, para aplicações elétricas, e é mais produzida no mundo, sua condutividade na tempera T19 é 61% IACS (International Annealed Copper Standard). As demais ligas 6201 e 1120 nasceram respectivamente na França e na Austrália.

A liga 6202 nasceu em 1939, mas com o início da segunda guerra mundial, todos os esforços tecnológicos ficaram voltados para a guerra e seu desenvolvimento foi retomado apenas em 1950.

As ligas a base de silício necessitam de adição de magnésio na composição para solubilizar o silício criando grãos na matriz de alumínio. Quando estes grãos são trabalhados mecanicamente a frio a liga adquire uma elevadíssima carga de ruptura, pois os grãos de silício faz papel semelhante ao da cementita nas ligas de aço. O metal trefilado, no seu estado final fica com uma carga de ruptura semelhante a do aço, mas com uma densidade igual a do alumínio. Se este material não perdesse tanta condutividade elétrica seria o sonho do engenheiro projetista de linha de transmissão. A perda de condutividade exige o aumento da seção condutora e o material perde muito de sua atratividade.

Os engenheiros eletricitistas de materiais, todavia encontraram um modo de usar esta liga para fins elétricos. Eles identificaram a possibilidade de substituir a alma de aço das formações ACSR 26/7, construindo o cabo todo em liga 6201, assim o que se perdia de condutividade era recuperado com a massa adicional de liga de alumínio no lugar da alma de aço. A “inovação funcionava bem para as formações em AWG (6/1), mas quando os diâmetros dos cabos atingiam 1” (25,4 mm), como nas formações ACSR 26/7, os cabos ficavam muito sensíveis à vibrações eólicas e rompiam por fadiga cíclica. Deste modo esta liga teve sua aplicação restrita aos sistemas de distribuição, que de certa forma estão imunes ao fenômeno de vibração eólica.

Apesar das estatísticas que ressoam pelo mundo, a maioria dos catálogos de bons fabricantes de cabos com liga de alumínio oferecem cabos com 19, 37 e 61 fios.

As ligas de alumínio 1120 nasceram na Austrália. Ali o contaminante que não era economicamente viável ser ulteriormente purificado era o cobre. O cobre não necessitava de um solubilizador para incorporar a matriz de alumínio, mas não podia receber o mesmo trabalho mecânico a frio. Deste modo sua carga de ruptura é alguma coisa menor que a liga 6201, mas em compensação a condutividade elétrica é muito melhor 58,8% IACS. O sonho do projetista de linha de transmissão voltou, mas agora os engenheiros de materiais tiveram que negociar a carga de ruptura.

A fenomenologia de fadiga cíclica devido a diâmetro superior a 25 mm também está aqui presente e também no cabos ACSR, porem em menor intensidade.

O leitor deve estar lembrado que a carga de ruptura é a variável determinante no custo anual das perdas devido às estruturas. Assim, continua valendo, como disparou Tanstaafl no século XVII na Inglaterra; *“There ain't no such thing as a free lunch”*; (Não existe coisa tal como almoço grátis!) *“in A Plan for a new Economic World Order”*.

As ligas 1350 são trabalhadas mecanicamente a frio durante a trefilação e encordoamento, e consomem cerca de 40% a 60% da fase elástica do material, Talvez por isso elas tenham um melhor desempenho quanto a fadiga cíclica, durante os primeiros 10 anos de uso.

Resumindo: O problema das ligas de alumínio, em cabos para linhas de transmissão é a fadiga cíclica devido às vibrações eólicas, inerentes a este tipo de cabos suspensos.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foi feita uma longa recensão sobre os cabos e materiais usados em linhas de transmissão de energia elétrica com ênfase ao desempenho frente à fadiga cíclica de onde, com base nas teorias e experimentos poderíamos avançar algumas conclusões e recomendações práticas:

1-Todas as ligas de alumínio estão fora da linha da fronteira de segurança para fadiga cíclica – Safe Border Line do CIGRE.

2-Algumas ligas apresentam melhor desempenho quanto a fadiga cíclica que as outras [13]

3-Os projetos de linhas de transmissão hoje guiados pela NBR 5422, não oferecem modelo de CONFIABILIDADE para determinar o MTTF (Mean Time To Failure) e a probabilidade de falhar antes do MTTF o material usado como cabos condutor.

4-Em leilões de transmissão para concessão por trinta anos, o MTTF deveria ser de 30 anos e o concessionário deveria reconduzir a linha antes de devolver a concessão.

AGRADECIMENTOS

O autor, consultor do Grupo INTELLI, agradece a permissão para publicar este trabalho.

REFERENCIAS

[00] F. R. Thrash, Jr - Bare Overhead Transmission Conductor Selection and Application
IEEE Tutorial Jan 2006 NM USA.

[02] “PROJETOS MECÂNICOS DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO”- Paulo Roberto Labegalini , José Ayrton Labegalini , Rubens Dario Fuchs ,Márcio Tadeu de Almeida- **Editora Blucher**.

[03] OVERHEAD POWER LINES – F.KIESSLING, P. NEFSGER, J.F. NOLASCO, U KAINZKYK –
SPRINGER 2002

[04] Peter Catchpole - Buck Fife “Structural Engineering of Transmission Lines” ICE
PUBLISHING

[05] PLS-CADD™ (Power Line Systems - Computer Aided Design and Drafting)

[06] F. R. N. NABARRO and H.L. de WILIERS – Physics of Creep and Creep-Resistant Alloys –

CRC PRESS

[07] NBR 7303 - ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas – Condutores elétricos de alumínio – Fluência em condutores de alumínio – MÉTODO DE ENSAIO

[08] Gibbs, Josiah Willard (1902). Elementary Principles in Statistical Mechanics NY USA Charles Scribner's Sons.

[09] John H. Lienhard HEAT TRANSFER TEXTBOOK –MIT Cambridge MA USA

[10] **AAA (ALUMINUM ASSOCIATION OF AMERICA)** – Stress-Strain-Creep curves for Aluminum Overhead Electrical Conductors. ***A technical report for aluminum association's Electrical Technical Committee.***

[11] NBR 7306 – ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas – Condutores elétricos de alumínio – Tensão e deformação em condutores de alumínio – MÉTODO DE ENSAIO.

[12] August Wöhler - Wöhler's experiments on the strength of metals
(1867) *Engineering* vol. 4 pp160-161

[13] Márcio Tonetti –Dissertação de Mestrado - **Modelo de análise da resistência à fadiga sob o efeito de Tensionamento acima do nível EDS para cabo condutor em liga De alumínio para linhas de transmissão – PARANÁ – BRASIL**

[14] Sarah Chao Sun - Joe Yung “Vibration Damping for Transmission Line Conductors” - Sun SC, A Model of Transmission Line Vibration, PhD Thesis, The University of Queensland, Australia, 1999.