Por Geraldo R. de Almeida *

Capítulo I

Revisitando o conceito de EDS para cabos

Resumo

Na metade do século XIX (1850), os engenheiros começaram a fazer cálculos sobre a resistência de estruturas importantes, tais como pontes. Eles calcularam a maior e provável tensão de solicitação na estrutura pelos métodos de então, e eles viram que tais solicitações eram menores que a tensão máxima de solicitação dos materiais. Para ter bastante certeza, eles fizeram que as mais elevadas tensões de trabalho nas estruturas fossem muito menores – três, quatro, ou mesmo sete ou oito vezes – que a tensão do material conforme determinado por ruptura simples, em teste suave e paralelamente, executado sobre amostra. Daí determinava o denominado "fator de segurança aplicável". Qualquer tentativa de economizar peso da estrutura com redução de custo com mudança no fator de segurança era muito provável levar ao desastre. (J.E. Gordon, 1978, p 64)

O projeto clássico [01] de um cabo suspenso entre estruturas de uma linha de transmissão também usou o mesmo conceito dos antigos projetistas de pontes. Se para uma ponte pênsil o projeto clássico recomendava uma tensão máxima de 25% (EDS – Every Day Stress) da tensão de ruptura, os cabos com alma de aço (ACSR – Aluminum Conductor Steel Reinforced) também seriam capaz de suportar o mesmo STRESS.

No projeto clássico de uma linha aérea de transmissão de energia elétrica, as cargas mecânicas que os cabos deveriam suportam seriam: (i) seu próprio peso; (ii) carga lateral do vento; (iii) sobre peso de uma camada de gelo e (iv) variação da temperatura. Estes esforços comparados aos esforços mecânicos numa ponte pênsil seriam risíveis.

Todavia, ao longo da experiência em escala real, os engenheiros projetistas e construtores foram observando que, após alguns anos de uso, os fios de alumínio dos cabos ACSR se rompiam por fadiga cíclica e a primeira medida para mitigar o fenômeno foi reduzir o EDS dos cabos, pois o encordoamento mais "frouxo" serviria de amortecimento (por fricção de Poisson) e assim o EDS dos cabos ACSR foi reduzido para 18%. Entretanto, a quebra dos fios de alumínio teve uma melhora, mas no tempo de vida esperada (50 anos) ainda continuava incidindo numa menor frequência.

Várias construções novas de cabos foram aparecendo, sempre explorando o conceito derivado de auto amortecimento [02]. Porém, além de trazerem novos custos para os condutores, o problema de ruptura por fadiga cíclica, devido a vibrações eólicas, permanecia. Tudo indicava que o EDS não era a única variável que controlaria o fenômeno e nem que a solução estava na forma de acomodar os materiais sobre o cabo.

Este trabalho revisita o conceito EDS, desde o projeto clássico, até a concepção de novos materiais que foram trazidos com a nano tecnologia.

O projeto clássico

Uma linha de transmissão começou a ter uma engenharia mecânica aplicada muito mais elaborada a partir de 1920, quando os condutores de alumínio substituíram definitivamente os condutores de cobre.

Na ausência de calculadoras e outras ferramentas modernas, o projeto clássico [01] era em grande parte dependente de experiência e muita heurística. Para definir localização de torres de suspensão dos condutores construíam-se gabaritos para conformar as "parábolas" dos cabos suspensos entre as torres. Considerando que o cabo suspenso trabalhava sempre no estado mais relaxado, a busca da conformação da linha elástica era de determinar o estado mais

tracionado e o estado menos tracionado para os cabos.

O ESTADO mais tracionado dos cabos era construído com as seguintes hipóteses: temperatura ambiente extremamente FRIA; corrente circulante nos cabos MÍNIMA; vento lateral sobre os condutores MÁXIMO. Em países com inverno rigoroso, adicionava ainda a camada de GELO sobre os cabos.

O estado mais tracionado é calculado com a equação;

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

f *Flecha do cabo*
H *Esforço de tração longitudinal*
w *Peso linear do cabo*
a *Vão entre as estruturas*

O ESTADO mais menos tracionado dos cabos (flecha máxima) era construído com as seguintes hipóteses: temperatura ambiente MÁXIMA, corrente circulante nos cabos MÁXIMA, vento lateral sobre os condutores mínimo (ou inexistente).

O estado menos tracionado, assim como os demais estados, são calculados com a equação;

$$T_2 - a^2 P_2^2 \frac{ES}{24T_2^2} = T_1 - a^2 P_1^2 \frac{ES}{24T_1^2} - \alpha(T_1 - T_2)$$

Todos os demais estados dos cabos suspensos deveriam estar contidos entre estes estados extremos. Isto permitia construir uma tabela de valores de vãos e flechas que era usada para construção de um gabarito de parábolas para um determinado cabo e este gabarito era usado para verificar vão a vão a distância de segurança (elétrica) entre os condutores e a terra. Além disso, a tabela de vão e flecha era usada para calibrar a flecha do cabo, num determinado vão, antes que a linha começasse a ser percorrida por corrente.

A aplicação a seguir é um exemplo singelo, mas real, da construção de um vão de 400 metros de uma linha classe de tensão 138 kV, no canal de BERTIOGA, em Guarujá (SP). Por motivos de corrosão devido ao ambiente muito agressivo (corrosão marinha), os condutores eram 2/0 AWG de cobre, que sistematicamente eram furtados (COBRE!).

Além disso, o vão anterior era de 200 metros com uma estrutura auxiliar no meio do canal, cujos materiais sofriam de intensa corrosão marinha. No projeto novo era necessário colocar um novo material que fosse não furtável e que fosse eliminada a estrutura intermediária.

A solução encontrada foi usar um condutor COPPERSTEEL (aço recoberto por uma espessura de cobre aplicada por caldeamento contínuo) de seção condutora compatível com a seção de cobre anterior e com as características NÃO FURTÁVEL. Material CCS (Copper Clad Steel) garante ser não furtável, pois não se consegue, com metalurgia secundária, remover o cobre do aço.

Com o "approach" clássico, a solução ficou assim.

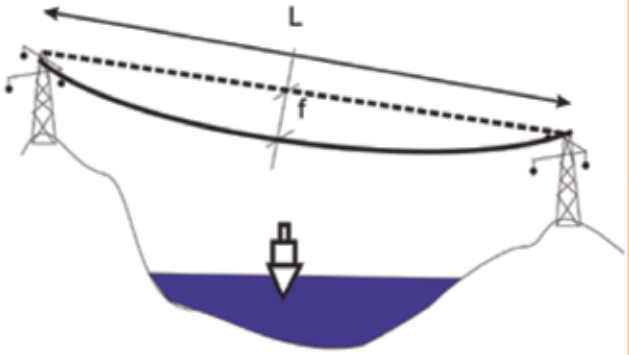


TABELA DE TENSÃO E FLECHAMENTO

	t2	t1	T2	f
CONDIÇÃO INICIAL	5	5	672,682	24,54
	10	5	668,682	24,69
	15	5	664,682	24,84
	20	5	660,682	24,99
	25	5	656,682	25,14
	30	5	653,682	25,26
	35	5	649,682	25,41
	40	5	645,682	25,57
	45	5	641,682	25,73
	50	5	638,682	25,85
	75	5	621,682	26,56

Os materiais

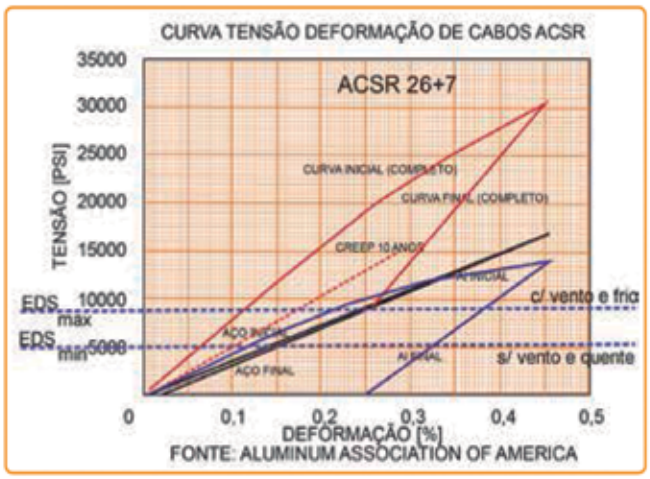
Nenhum projeto de linha de transmissão pode prescindir de materiais [03] e materiais que durem pelo menos o tempo de concessão de uma linha. Numa linha de transmissão, os cabos são os componentes em que os materiais são mais provados mecanicamente (eletricamente estes materiais conduzem elétrons que não pesam: seja em AC que em DC). Mas numa linha de transmissão, os materiais sofrem esforços internos e externos e estes materiais devem ser capazes de suportar estes esforços pelo tempo esperado da concessão.

A despeito de todo esforço que se tem feito, o critério para decidir sobre o carregamento dos condutores ainda continua sendo o EDS. No projeto clássico [01], apenas o ensaio de TENSÃO E DEFORMAÇÃO [04] é suficiente para decidir qual o valor de carregamento pode-se admitir sobre um cabo.

A seguir é apresentado como decidir sobre qual EDS num cabo do tipo ACSR.

Na figura a seguir está ilustrado como compatibilizar as equações anteriores com o conhecimento empírico dos ensaios tensão – deformação (AAA) [05] e que são usados desde 1950 no dimensionamento de vãos e flechas em linhas aéreas de transmissão de energia elétrica.

Na figura a seguir, 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, um EDS max que faremos coincidir



FONTE: ALUMINUM ASSOCIATION OF AMERICA

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 menos tenso, apenas o aço continua respondendo, mas neste estado a variável a ser controlada é a FLECHA MÁXIMA.

Numa linha de transmissão com condutores ACSR bem dimensionado e num approach clássico [01], apenas o AÇO trabalha como material mecanicamente resistente.

Desde 1970 algumas linhas de transmissão têm sido construídas com cabos denominados ligas [06] (fortes) de alumínio. O termo forte é da lavra do autor para diferir da liga de alumínio EC1350, considerada MOLE (com fase elástica pronunciada).

Entre as ligas de alumínio forte merecem ser mencionadas as ligas denominadas 6201 com forte contribuição de silício e as ligas 1120 com forte contribuição de cobre. A primeira possui elevada tensão de ruptura, mas baixa condutividade elétrica (52,5% IACS – International Annealed Copper Standard). A segunda possui menor tensão de ruptura, mas uma condutividade elétrica muito melhor (58% IACS).

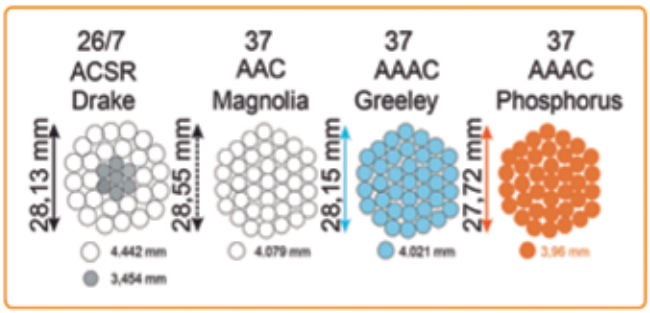
A tabela a seguir ilustra e resume o quanto dito.

CARACTERÍSTICAS DAS LIGAS DE ALUMÍNIO

	ρ % IACS	Crup MPA
COBRE	100	350
1350	61,0	160
1120	58,8	220
6201	52,5	280
AÇO	8,0	1400

Para a compreensão do conceito de EDS, o melhor é apreciar como os valores desta partição de tensão atuam sobre os diversos tipos de cabos em ligas de alumínio (1350, 6201 e 1120).

Na figura a seguir são apresentadas 4 construções de cabos, apresentando os diâmetros do cabo completo e os diâmetros dos fios elementares.



A escolha de formações com diâmetros equivalentes está ligada a uma avaliação de campo em que as rupturas por fadiga cíclica têm alguma correlação com estes diâmetros.

Para os cabos com material homogêneo, a tensão atuante sobre a área da seção transversal é dada por;

$$\tau = \frac{H}{S}$$

No caso de cabos com materiais não homogêneos como o caso dos ACSR, atenção se distribui sobre os materiais conforme a área de cada material e seu respectivo modulam de elasticidade, como;

$$F_{aço} = F\frac{S_{aço}E_{aço}}{S_aE_a + S_{aço}E_{aço}}$$

$$F_{alum} = F\frac{S_{alum}E_{alum}}{S_aE_a + S_{aço}E_{aço}}$$

Feitas estas considerações é possível calcular a tensão mecânica em cada tento dos cabos da figura anterior.

SEQUENCIA DE RUPTURA ESPERADA PARA OS FIOS DE ALUMÍNIO

	MODULO		CARGA				TENSÕES	
	AÇO	ALUM	C.R.	ÁREA (AL)	ÁREA (AÇO)	EDS	FIO (AL)	FIO (AÇO)
	GPA	GPA	DaN	mm²	mm²	%	MPA	MPA
GREELEY		70	14089	470		25	75,0	
DRAKE	210	70	14542	403	66	33	80,0	240
MAGNOLIA		70	7546	484		25	39,0	
PHOSPHORUS		70	10390	455		25	57,1	

O EDS de 33% para os cabos ACSR de formação 26/7 é o valor que coincide com o limite de joelho da curva final cabo completo e curva final do aço.

O EDS de 25% para as ligas de alumínio ALL é a forma de encontrar o melhor valor de EDS para que os vãos e flechas das duas alternativas sejam iguais. Isto permite concluir que o número de torres seja o mesmo para qualquer escolha, jogando a competitividade para o preço de cada alternativa. Assim, as ligas ficam imbatíveis, devido a serem mais leves que a solução ACSR (d=2,7 g/cm³ e 3,5 g/cm³ respectivamente).

Na figura anterior extraída do documento AAA [05], formação de 37 fios de um cabo com a liga 6201 (possivelmente o Greeley), a primeira vista tem a mesma conformação da curva inicial e final do cabo completo ACSR 26/7 (possivelmente o DRAKE). Isto acontece devido à subtração da fase elástica do alumínio. Do ponto de vista químico, o material continua sendo o ALUMÍNIO (no quadro periódico, o alumínio é o elemento do grupo 13, período (IIIA) e do bloco 3p). Mas depois da subtração da fase elástica este novo alumínio é fisicamente um novo MATERIAL. A questão que se coloca agora é se este novo material é fisicamente um contra tipo do AÇO.

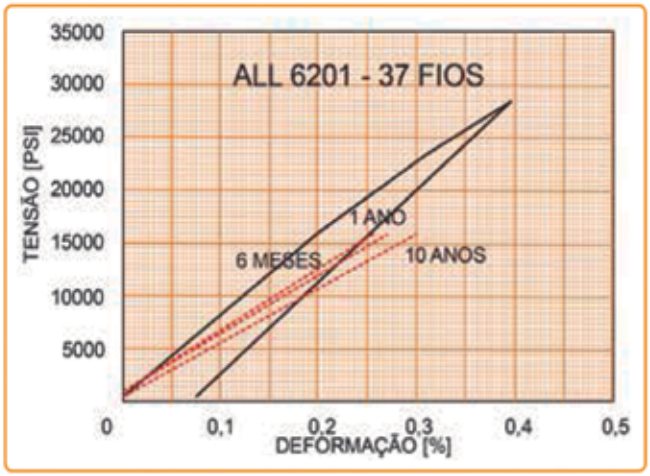
A METALURGIA FÍSICA E MECÂNICA

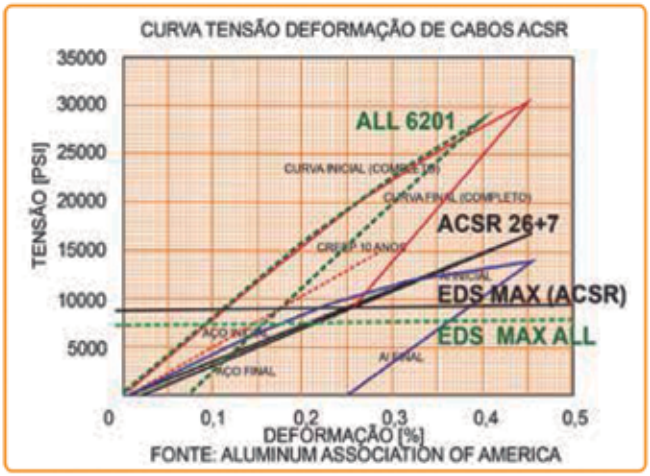
A primeira análise dos dois materiais cabo Greeley e Cabo ACSR 26/7 Drake será feita no próprio resultado do ensaio tensão deformação [04]. Para facilitar esta análise, faremos a superposição dos ensaios dos cabos mencionados, conforme ilustra a figura a seguir.

Nesta figura traçada a cores: Preto é a contribuição do aço, Vermelho é a contribuição da liga 1350 (alumínio com 99,5% de pureza, condutividade 61% IACS), estas duas referentes ao cabo 26/7 Drake. A cor Verde refere-se apenas ao comportamento do cabo Greeley 37 fios. Na figura a seguir, a curva inicial do cabo completo Drake coincide com a curva inicial do cabo Greeley. Esta é a evidência que quando tracionado os dois materiais são exatamente os mesmos (Termodinamicamente – Fisicamente). Todavia, o estado do cabo relaxado, correspondente a curva final: (i) composta no caso do cabo ACSR [Drake] e (ii) reta simples no caso do ALL 6201 Greeley, os dois comportamento mostram dois materiais totalmente diferentes.

No cabo DRAKE existe um joelho de mudança da curva que é a passagem do material alumínio para aço, enquanto no cabo GREELEY o material continua sendo simplesmente o alumínio.

Se a linha de transmissão operasse continuamente sobre a curva





inicial, os dois materiais (Drake e Greeley) poderiam ser usados mecanicamente de modo indiferente, pois apenas o alumínio responderia pelos esforços. Todavia, um cabo suspenso entre estruturas de uma linha de transmissão opera continuamente sob a conformação da curva final (Estado mais relaxado), então, neste caso, Drake e Greely são dos materiais diferentes e como tal devem ser tratados especialmente quanto as suas diferenças.

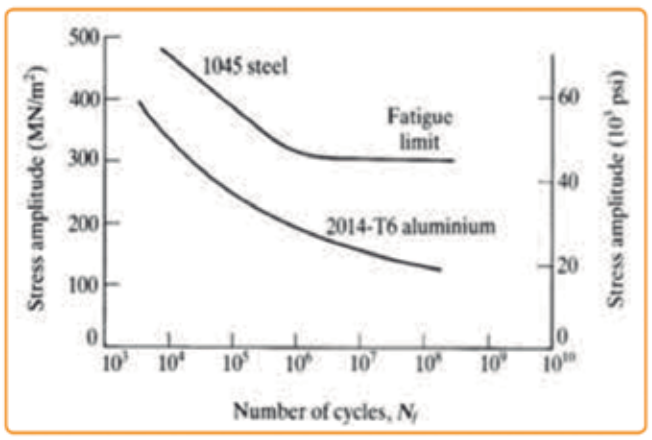
Um metalurgista experiente consegue ainda ver outras peculiaridades no gráfico anterior. A primeira está no eixo das abscissas (deformação). Neste eixo pode-se verificar por simples inspeção visual, comparando a curva Greeley com a curva inicial e final do alumínio, que a deformação elástica (0,2%) do alumínio do Greeley foi subtraída. A segunda peculiaridade está no EDS dos dois cabos. Seja o Greeley seja o Drake operam com aparentemente o mesmo valor (na realidade ligeiramente diferente).

A peculiaridade do EDS dos dois cabos pode ser lida da seguinte forma: (i) no cabo Drake, o EDS é estabelecido por um critério científico de materiais (transição alumínio 1350 para AÇO). No caso do cabo Greeley, o valor de EDS resulta apenas como manutenção da competitividade quanto a vão e flecha igual para os dois materiais.

O mesmo metalurgista experiente continua procurando argumentos (científicos) objetivos para explicar um EDS de aço aplicado em ALUMÍNIO.

Quando a análise é feita com a metalurgia física [07], as diferenças ficam muito mais relevantes. O módulo de elasticidade dos dois materiais são 210 GPA e 70 GPa para o aço e alumínio respectivamente. Este módulo é a componente fundamental da viscosidade [MPa S] Unidade da viscosidade dinâmica. Grosseiramente, o aço é um material com uma hiperviscosidade 3 vezes aquela do alumínio. Esta peculiaridade é aquela que explica a enorme diferença de comportamento dos dois materiais em relação à fadiga cíclica [08]. O AÇO é um material que possui no ensaio S-N de Wöhler uma assíntota [t→∞] para tensões de cisalhamento abaixo de 300 Mpa.

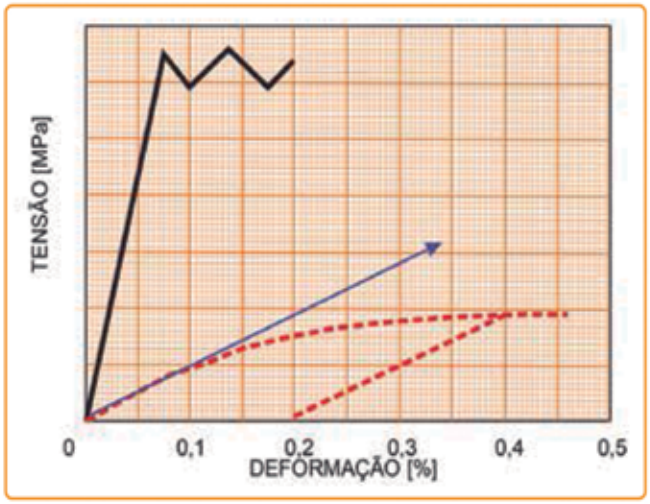
Por outro lado, as ligas de alumínio, o comportamento S-N, a tensão decresce monotonamente com o aumento do número de ciclos para ruptura. Quando o material resistente (a fadiga) é o



alumínio (liga), o critério de engenharia é aquele de 10^7 ciclos. Na ilustração acima, a linha de comportamento refere-se a uma média de valores medidos.

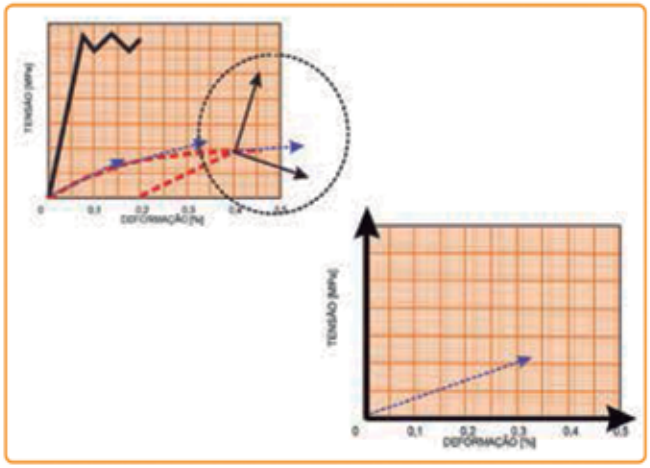
Na mecânica do meio contínuo, existe também uma leitura para o fato o material alumínio mudar de comportamento quando lhe é retirada a fase elástica.

Na figura a seguir está apresentado um gráfico de um ensaio tensão e deformação sob corpos de prova cilíndricos construídos com aço e alumínio.



A linha contínua preta representa o comportamento tensão deformação de um aço. A linha vermelha tracejada representa o alumínio. A linha azul é uma tangente a tracejada vermelha e representa o módulo de elasticidade inicial do alumínio.

Quando o alumínio é trabalhado a frio, o vetor azul (tangente) desloca sem mudar de intensidade sobre a curva vermelha. No caso de ligas fortes, esta deformação evolui até o valor de 0,2% de deformação. Como a propriedade do material é invariante com a transformação, tudo se apresenta como uma rotação e translação de eixo, conforme ilustrado na figura a seguir, mas o material continua com sua estrutura original quimicamente, apenas modificada em sua subestrutura de orientação.



A eliminação da fase elástica nas ligas de alumínio não altera o módulo de elasticidade do material (ele continua sendo alumínio), subtrai 0,2% de deformação, diminui a evolução da fluência, mas torna o material de comportamento frágil. Um EDS de 25%

numa liga de alumínio não é sustentável nem teoricamente, nem empiricamente. O material apresenta uma fluência pronunciada pelo seu baixo modulo de elasticidade.

Conclusões

O conceito de EDS para alocar esforços num cabo suspenso de uma linha de transmissão foi revisitado e resumem-se aqui as principais conclusões:

1) o EDS continua sendo o conceito mais simples para um projetista alocar esforços sobre materiais de construção mecânica em linhas de transmissão de energia elétrica;
2) o EDS sobre os materiais deve levar em conta a confiabilidade do material sobre um determinado esforço. No passado, quando ainda não havia uma teoria formal de confiabilidade aplicada a materiais em missão de engenharia era tolerado o conceito FATOR DE SEGURANÇA APLICADO. Hoje, este fator foi substituído pelo MTTF do material;
3) o EDS em materiais conjugados (como cabos ACSR) deve ser escolhido de sorte que todos os esforços sejam suportados pelo AÇO;
4) o EDS para materiais não ferrosos deve ser dimensionado pela teoria da confiabilidade com o parâmetro MTTF mais a probabilidade de falhar antes do MTTF;
5) o EDS para cabos de linhas de transmissão para conseção de 30 anos torna-se um parâmetro de suprema importância no custo anual das perdas e na disponibilidade da linha.

Agradecimentos

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

Referências

[01] "PROJETOS MECÂNICOS DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO"- Paulo Roberto Labegalini , José Ayrton Labegalini , Rubens Dario Fuchs ,Márcio Tadeu de Almeida- Editora Blucher
[02] 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.
[03] Callister Jr W. D. Materials Science and Technology: An Introduction John Wiley and Sons 2000
[04] NBR 7306 – ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas – Condutores elétricos de alumínio – Tensão e deformação em condutores de alumínio – MÉTODO DE ENSAIO.
[05] AAA (ALUMINUM ASSOCIATION OF AMERICA) – Stress-Strain-Creep curves for Aluminum Overhead Electrical Conductors. A technical report for aluminum association's Electrical Technical Commitee.
[06] J Gilbert Kalfman - Aluminum Alloys and Tempers ASM International 2000 258 pp
[07] Avner S H Introduction to Physical Metallurgy Mc Graw Hill 1974.
[08] Dieter G E Metalurgia Mecânica Guanabara Koogan AS

GERALDO R. DE ALMEIDA é Engenheiro Eletricista da INTELLI – Terminais e Conectores.

CONTINUA NA PRÓXIMA EDIÇÃO
Acompanhe todos os artigos deste fascículo em www.osetoreletrico.com.br
Dúvidas, sugestões e outros comentários podem ser encaminhados para redacao@atitudeeditorial.com.br