

Capítulo IV

Cabos aéreos para linhas de transmissão de energia elétrica

DESEMPENHO MECÂNICO DE CABOS EM LIGAS DE ALUMÍNIO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

RESUMO

Alumínio é um elemento químico de nº atômico 13. Ocupa no quadro periódico a coluna do elemento Boro, está no terceiro período e compartilha 8% dos elementos totais na crosta terrestre. É o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, atrás apenas do oxigênio e silício. Por ser considerado elemento abundante (preço baixo), ser excelente condutor de calor e eletricidade e possuir baixa densidade ($2,703 \text{ g/cm}^3$) e ter propriedades mecânicas razoáveis, o alumínio tem muitas aplicações como material de engenharia mecânica e elétrica. O principal minério da crosta que permite a extração do alumínio é a bauxita. A extração é feita pelo processo Hall-Héroult e considerado eletro-intensivo. Aproximadamente 70% do preço da commodity alumínio é energia elétrica. O minério do alumínio é contaminado por vários elementos do segundo, terceiro e quarto períodos (quadro periódico) e o processo de purificação é caro. Assim, o alumínio puro não é explorável comercialmente. O que a tecnologia disponibiliza para a comercialização como material de engenharia são ligas de alumínio, com nível de pureza de até 99,5% de alumínio contido. Todavia, existem no planeta Terra minérios de alumínio com contaminações variadas: silício, ferro, cobre, manganês etc. Isto tem propiciado a existência de várias ligas de alumínio dependendo da contaminação dos minérios e dos custos necessários para purificá-los. As ligas 1350, 1120 e 6201 são apresentadas nas suas composições químicas e propriedades física e mecânica. São apresentadas uma breve análise sobre o papel dos componentes de ligas, bem como o diagrama de fase destas. São enunciadas as razões para uso e as razões para não uso das ligas em análise. Considerando todos os pontos são apresentadas algumas proposições de caráter prático.

INTRODUÇÃO

Diferentemente do elemento químico alumínio, o material alumínio é o material de engenharia mais usado pela tecnologia, depois do ferro (aço). Devido a sua baixa densidade, um grande volume de material pesa muito pouco e considerando sua abundância na crosta terrestre é fácil entender sua utilidade.

Na tabela 1 encontramos os principais parâmetros físico-mecânico de diversos materiais que apresentam grande interesse como material de engenharia; seja para uso mecânico estrutural, seja como condutor elétrico.

Como material para uso elétrico, os parâmetros mais importantes são a resistividade elétrica e o coeficiente de variação da resistividade com a variação da temperatura.

Como material para construção mecânica, especialmente como cabo suspenso para distribuição e transmissão de energia elétrica, Os parâmetros Módulo de elasticidade, Coeficiente de dilatação linear, Tensão máxima de ruptura são os mais importantes.

A tensão máxima de ruptura depende muito da modalidade de ensaio. A modalidade mais difundida no mundo é aquela denominada ensaio de tensão e deformação (veja figura 1) e que foi analisada no artigo [01] anterior.

Na ausência de informações mais robustas, todas as ligas de alumínio terão seus desempenhos comparados usando a experiência disponível dos ensaios tensão e deformação mais o ensaio de fluência desenvolvido pela AAA (Aluminum Association of America), disponíveis desde 1950.

LIGA 1350

A liga de alumínio EC 1350 é a mais conhecida e mais usada

TABELA 1 - PROPRIEDADES FÍSICAS DE ALGUNS METAIS

METAIS		PARÂMETROS PRIMÁRIOS				
		FIO ALUMINIO	FIO COBRE	FIO COBRE	FIO AÇO	FIO AÇO
		1350-H19	COMERCIAL	RECOZIDO	ZINCADO	ARAME
MASSA ESPECÍFICA	g/cm³	2,705	8,89	8,89	7,78	7,78
RESISTIVIDADE A 20°C	Ω/mm²km	28,2639	17,7742	17,2410	215,5125	215,5125
CONDUTIVIDADE	% IACS	61	97	100	8	8
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA 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/Km³	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



Figura 1 - Tensão deformação-fluência

em todo o mundo. Sua composição com todos os contaminantes fornece uma pureza de 99,5% com uma contribuição de outros elementos são:

“Na tempera H19, o vergalhão 3/8” apresenta os seguintes parâmetros;

TABELA 2 - PARÂMETROS MECÂNICOS DA EC 1350

ALUMÍNIO EC 1350 TEMPERA H 19								
DUREZA BRINEL	ALONG RUPTURA %	COEF POISSON	RESIST		MOD ELASTIC Mpa	RESIST FADIGA Mpa	MOD CISALHAM Mpa	TENSÃO RUPTURA Mpa
			CISALHAM Mpa	TENSÃO Mpa				
45	1,4	0,33	110	170	68	50	26	180

“Ainda na mesma têmpera o vergalhão 3/8” apresenta os seguintes parâmetros físicos e elétricos:

TABELA 3 - PARÂMETROS TÉRMICOS E ELÉTRICOS DA EC 1350

ALUMÍNIO EC 1350 TEMPERA H 19						
TEMP FUSÃO	TEMP AMOLEC	CALOR ESPEC	COND TERMICA	COEF DILAT	COND ELETTRIC	COND ELETTRIC
�C	�C	J/kg-K	W/m-K	�m/m-K	% IACS	% IACS
660	650	900	230	24	61	200

Se não houvessem perdas mecânicas, o ganho de condutividade IACS (por massa) seria definitivo para elei o do alumínio como o material elétrico ÓTIMO como cabos suspensos para linhas de transmissão e distribui o de energia elétrica.

TABELA 4 - LIMITES QUÍMICO T PICO

ELEMENTOS		LIGAS			
		1350	6201	6101	1120
SILICIO	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

Na tabela 4 estão mostrados os limites químicos das principais ligas de alumínio usadas como condutores de linhas de transmissão.

A diferença entre as ligas decorre de elementos contaminantes do alumínio puro. As ligas especiais muito duras (com contamina o de silício) foram as primeiras a serem aplicadas na França em 1939. Com a guerra, o desenvolvimento foi suspenso e retomado em 1950. O silício é um “não metal” muito abundante na crosta terrestre (2 , atrás apenas do oxig nio), muito próximo ao elemento alumínio no quadro periódico e, por isso, naturalmente presente nos minérios de bauxita.

LIGA 6201

O problema da presença do silício no minério de alumínio está na dificuldade de sua remo o. No processo Hall-Héroult, a purifica o para por decisão econ mica. Assim, minérios que possuem muito silício levam a desenvolvimento de ligas. A Aluminum Association classifica as ligas com base em silício rotulando sua numera o por {6}, da  as ligas 6201 e 6202 serem de base silício.

A dificuldade do alumínio e o silício conviverem em liga está nas temperaturas de fusão dos elementos químicos, muito distante uma da outra. Para melhor observar esta dificuldade, uma olhada direta no diagrama de fase dos dois materiais torna-se necessário.

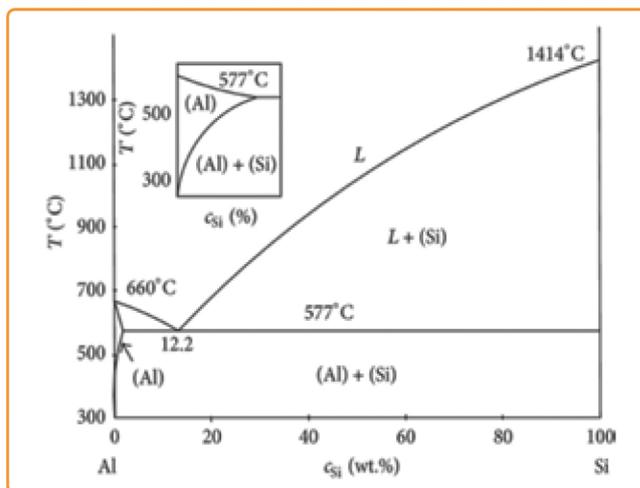


Figura 2 - Diagrama de fase Al - Si

No diagrama de fase (algumas vezes também denominado diagrama de equilíbrio de fase), o eixo das abscissas indica a propor o de elemento de liga presente (Al 100% deste elemento – Si 100% deste elemento), No diagrama da figura 2, o eixo das ordenadas indicam Temperatura (no caso em questão  C). Toda a linha (retas e curva) delimita a região de transi o de fase: líquido sólido, ou fase de intermetálicos que podem conviver em grãos sólidos com fase liquida.

Esta convivência de grãos sólidos de um elemento com fase liquida do outro é muito frequente em diagramas de fase onde o ponto de fusão dos elementos é muito diferente entre si. No caso alumínio (660 C) e silício (1414 C).

Como no caso em questão, o silício é um contaminante (baixa propor o na liga), olharemos apenas para o lado esquerdo do diagrama (alumínio tem alta propor o e silício baixa). Em temperaturas na faixa de fusão do alumínio é natural existir grãos de silício na liga. Como o grão de silício é muito mais duro que o alumínio fundido, torna-se necessário alguma opera o de metalurgia para agregar este grão   massa de alumínio.

Esta opera o metalúrgica   feira com o elemento magnésio (alcalino terroso – está à esquerda do quadro periódico –   eletro positivo – ponto de fusão 650 C, muito próximo ao ponto de fusão do alumínio) que por suas características físico-químicas envolve o silício. Esta opera o geralmente é feita no próprio forno de fusão da liga e o envolvimento do silício é denominado metalurgicamente de Solubiliza o.

Este conjunto possui um tempo de validade denominado Shelf Life. Neste tempo de validade, que varia para cada fabricante de liga, pois depende da tecnologia de quem executa, o material deve ser trefilado para que o conjunto ganhe tensão de ruptura. Os grãos de silício solubilizados e trefilados simulam o mesmo papel da Cementita nas ligas de Ferro-Carbono (AÇO).

LIGA 1120

A liga 1120, assim como a liga 1350 que iniciam por {1}, é rotulada como liga de alumínio (elemento dominante). Mas a liga 1120 possui

as razões fundamentais para o uso de ligas. A razão para o uso das ligas duras de alumínio está nas bitolas AWG em circuitos primários de distribuição ou em cabos neutro mensageiro, quando o ganho de peso (e preço) é apreciável e estes circuitos não estão submetidos à fadiga cíclica. Assim, a maior razão confina o uso em circuitos de distribuição.

RAZÕES PARA NÃO USO DAS LIGAS

A caracterização de um material condutor do ponto de vista elétrico é a resistividade elétrica específica do material. Do ponto de vista mecânico é seu módulo de elasticidade.

A resistividade (condutividade) é a capacidade de um material de conduzir elétrons, seja termicamente, seja eletricamente. Os materiais mais condutores são os metais de sub orbitais {f} mais centrados no quadro periódico: platina, prata, cobre. Alumínio está entre estes metais (o alumínio está na região de sub orbital {p}).

O módulo de elasticidade é a capacidade de um material resistir ao escoamento sobre tração. Este conceito é muito parecido com a viscosidade. Se o módulo estiver afetado pelo tempo de aplicação de um esforço ($E\delta t$) tem a mesma unidade de viscosidade {hiper} (MPa.S).

Outros parâmetros como: Coeficiente de variação da resistividade com a temperatura, Coeficiente de variação linear com a temperatura, Tensão de ruptura são derivativos dos parâmetros anteriores.

Especificamente a tensão de ruptura pode ser manejada com adição de agregados na matriz do metal, provocando variação em outras propriedades no metal.

O exemplo clássico do manejo da carga de ruptura é aquela do aço, onde o conteúdo de carbono na liga (ferro – cementita) é apresentado na figura 6.

A informação mais evidente da figura anterior é a variação inversa do alongamento à ruptura com o aumento da carga de ruptura. Este andamento é comum a todas as ligas onde um acréscimo da carga de ruptura é pago com a redução da elasticidade do material.

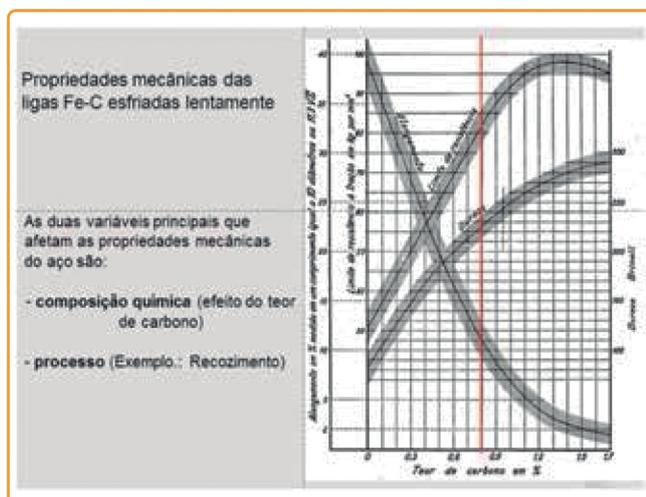


Figura 6 - Influência do teor de carbono no aço.

O trabalho a frio (Cold Work) é uma tecnologia (metalurgia mecânica) para modificar a estrutura do material com a orientação dos grãos. Esta tecnologia promove um aumento da tensão de ruptura e uma redução do alongamento. A figura 6 apresenta de modo lúdico o que acontece com a subestrutura do material.

Este tipo de tecnologia é de uso geral para todos os materiais, especialmente as ligas de alumínio. No caso das ligas de silício, os grãos ficam protegidos (no contorno de grão) pelo magnésio. No caso das ligas com cobre, os intermetálicos são protegidos pelo mesmo cobre. Isto confere uma condutividade elétrica muito melhor que aquela das ligas de silício (58% IACS).

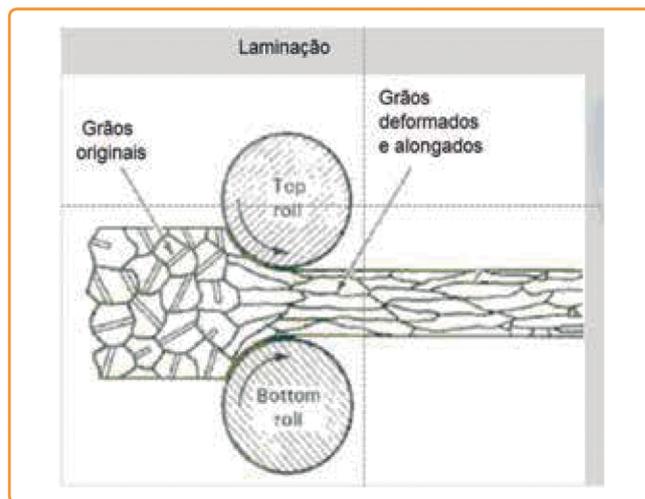


Figura 7 - Influência do trabalho a frio

A razão, para não uso de ligas, vem da metalurgia mecânica, algumas vezes denominada trabalho (deformação a frio) mecânico de conformação. Na figura anterior está ilustrado em grande dimensão o que acontece com os “grãos” da liga duramente a deformação. O trabalho a frio (cold work) provoca uma notável deformação dos grãos de liga, eliminando a fase plástica, do material dúctil, deixando apenas a fase elástica. Este trabalho a frio não muda o módulo de elasticidade do metal, mas confere um aumento notável de tensão de ruptura. O preço a pagar por isto é uma redução apreciável de resistência à fadiga cíclica. Deste modo, em linhas de transmissão longas e sujeitas a vibrações eólicas, não se recomenda uso de condutores ligas. Se um cabo com alma de aço romper algum fio de alumínio, o cabo não cai por possui aço na alma. Os cabos de apenas alumínio liga não possuem este predicado.

A figura 8 é uma animação útil para exibir o efeito do trabalho a frio sobre os materiais. O módulo de elasticidade é mantido inalterado, enquanto que a tensão de ruptura aumenta em prejuízo do alongamento.

As ligas de silício (série 6) são materiais intensamente encruados, enquanto que a liga 1120 (série 1) é um material moderadamente encruado. As ligas 1350 são materiais com cerca de 40%-50% de encruamento.

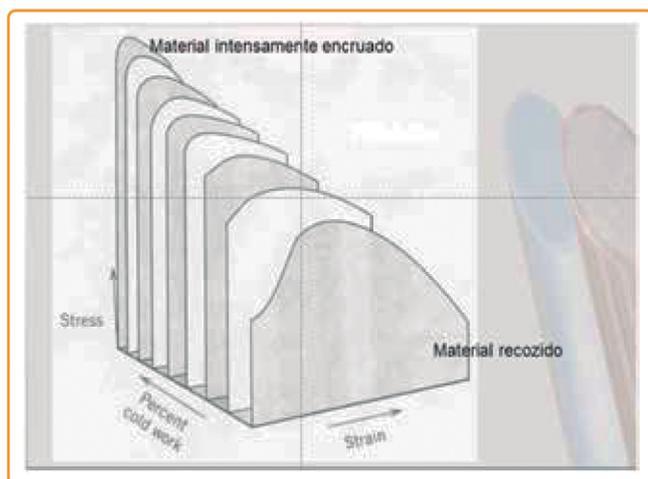


Figura 8 - Incruamento no trabalho a frio

VIBRAÇÕES EÓLICAS E FADIGA CÍCLICA

As vibrações eólicas, naturais em linhas de transmissão, por sua natureza oscilatória, induzem fadiga cíclica nos materiais componentes dos cabos. A fadiga cíclica é mais sentida em cabos com diâmetros superiores a 25 mm, mas é de modo especial sentida em cabos com fios de encordoamento muito encruados.

Vibrações eólicas são enfrentadas com soluções tópicas (locais sobre os cabos) ou soluções com materiais. As soluções tópicas são geralmente uso de amortecedores (o mais comum o Stockbrige). As soluções com materiais manejam a metalurgia física e a metalurgia mecânica dos materiais. Este trabalho analisa apenas as soluções com materiais.

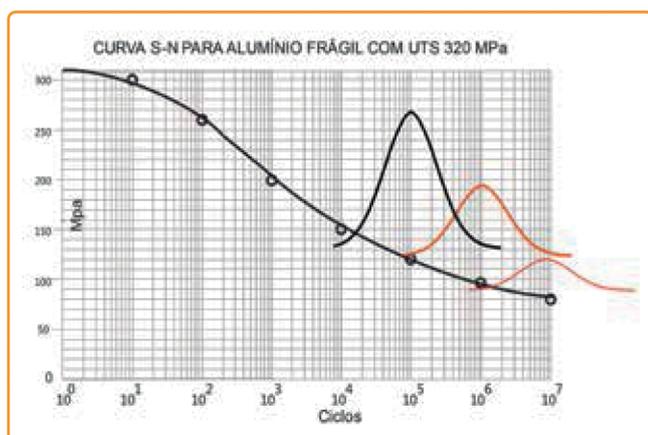


Figura 9 - Curva S-N de WÖHLER para ligas de alumínio.

A figura 9 apresenta o valor médio do número de ciclos a ruptura para um determinado estado de tensão. Quando a liga é a EC 1350, existe um consenso de que este valor médio deve ser de 10^7 ciclos para uma tensão de 80 Mpa. Para ligas 1120 e 6201 ainda são desconhecidos.

CONCLUSÕES

Foram apresentadas as razões para uso e para não uso de cabos aéreos construídos com ligas de alumínio, considerando os aspectos de metais contidos nas ligas e o trabalho mecânico a frio para trefilação e encordoamento dos cabos. De todo conhecimento dentro das tecnologias

usadas pode-se avançar que:

- 1 - ligas duras do tipo 6201 são competitivas (leves e de menor preço) para uso como cabos de fase em sistemas de distribuição primária urbana e suburbano, nas bitolas AWG, onde edificações e árvores protegem os cabos contra vibrações eólicas. As mesmas ligas podem ser usadas como neutro mensageiro de circuitos primários e secundários (ambos isolados);
- 2 - ligas duras do tipo 6201 até o diâmetro de 25 mm podem ser usadas como fases em linhas de transmissão, desde que os vãos permitam apenas oscilações moderadas dos condutores. Este protocolo tem sido usado em transmissão como alternativa às formações ACSR 26/7;
- 3 - ligas duras do tipo 6201 são alternativas aceitáveis a (1) e (2), observando em (2) sempre os aspectos de oscilações moderadas. As oscilações moderadas são aquelas de vão de vento máximo, recorrente diário, de manhãs frias;
- 4 - as ligas suaves do tipo 1350 em qualquer diâmetro podem ser usadas em secundário aéreo de distribuição (vão muito curto e protegida de vento);
- 5 - as ligas suaves do tipo 1350 em qualquer diâmetro podem ser usadas como metal condutor em cabos do tipo ACSR;
- 6 - todas as ligas duras ou suaves são sensíveis a fadiga cíclica devido a vibrações eólicas num crescendo: (i) 1350, (ii) 1120 e (iii) 6201;
- 7 - nos cabos ACSR, o condutor não rompe porque o cabo tem aço na alma.

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 Committee.
- [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