

ESTUDO ELÉTRICO E MECÂNICO DE EMENDAS DE CABOS DE ALUMÍNIO PARA LINHAS DE ELETRIFICAÇÃO RURAL

Cezar Piedade Jr.*
Sérgio H. Benez**
Wesley J. Freire**

RESUMO

O presente trabalho, parte de tese de Livre Docência do primeiro autor, resume uma série de ensaios mecânicos e elétricos conduzidos com condutores de alumínio tipo CAA, unidos com 3 (três) tipos de emendas: preformadas, torção e compressão.

Procurou-se definir o comportamento de cada emenda típica, no que tange às cargas de ruptura, escorregamento, efeitos técnicos e de materiais.

Os ensaios mecânicos demonstraram que as emendas preformadas e de compressão não apresentam carga de escorregamento e as suas cargas de ruptura são compatíveis com as exigências da norma brasileira. As funções ajustadas para a carga de ruptura contra a seção do condutor demonstram para as emendas preformadas que elas seguem uma hipérbole.

As emendas tipo torção completas são bastante deformáveis, apresentam cargas de escorregamento definidas e as suas rupturas ocorrem com cargas inferiores às estabelecidas em normas. As funções que relacionam as seções dos condutores com as duas cargas consideradas, indicam curvas hiperbólicas. Essas funções obtidas para o confronto com o número de torções, em emendas incompletas, mostraram que as mesmas seguem regressões exponenciais.

As elevações de temperatura obtidas nas emendas em testes padronizados estão de acordo com as exigências de normas.

SUMMARY

The research was carried out using several kinds of usual conductor connections in overhead line construction for country areas in São Paulo - Brazil. This paper only examines aluminum conductors steel-reinforced, for power transmission. It was an attempt to study the behavior of the functions $P = f(x)$ or $P_r = f(Y)$, where P is the initial strain load in the connections, P_r the rupture stress, and x and Y set characteristics.

Another kind of research was designed to establish the behavior the connections in temperature measurement.

The comparison between the two functions led to conclusions: to connections with preformation the functions are hyperboles and to torsion connections are parabolas. The temperature measurement determined by the test led to the numbers in accordance with the standards.

-
- (*) Prof. Livre Docente do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrônômicas do Campus de Botucatu - SP - UNESP.
(**) Professores Assistentes Doutores do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrônômicas do Campus de Botucatu - SP - UNESP.

MATERIAIS E MÉTODOS

Na Europa, após a Segunda Guerra Mundial, em diversos países se iniciou a construção de linhas com condutores de alumínio, conforme ressaltam PETIT & HERMANS (1971). O objetivo era dotar as regiões rurais de energia elétrica com serviços seguros e que reduzissem o valor do investimento por quilômetro.

No Brasil, as grandes jazidas de minério exigiram o uso de alumínio nas redes de transmissão e distribuição de energia elétrica. A ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1972a) estabeleceu, para os cabos de alumínio, a designação CA e, para os cabos de alumínio com alma de aço, a designação CAA.

A necessidade de emendar condutores de redes aéreas decorre das limitações impostas pelos comprimentos máximos de fabricação e dos serviços de manutenção, em casos de rompimento. Trata-se de operação que deve ser efetuada com técnica, obedecendo as normas de execução e com ferramentas adequadas.

No mercado nacional há um grande número de emendas disponíveis que se diferenciam pelo tipo, procedência, preço e especificações para montagem. Essas emendas geralmente exigem para sua montagem, uma ferramenta onde se instala um par de matrizes, de acordo com o número do condutor.

Todos os ensaios mecânicos e elétricos das emendas dos condutores foram executados de forma a permitir o estabelecimento de seu comportamento em condições normais e onde ocorresse influência da mão-de-obra, pois esta última tem sido um grande problema na execução de linhas rurais no Brasil.

Todos os corpos de prova foram executados na Companhia Paulista de Força e Luz, em Botucatu. A aquisição dos materiais, tais como cabos, emendas e pasta anti-oxidante, foi providenciada pela Faculdade de Ciências Agrônomicas, mediante concorrência normal de compra de materiais de consumo.

Todos os ensaios relativos às emendas de condutores elétricos foram executados no Laboratório de Controle de Qualidade da Burndy do Brasil Conectores S/A em Santo Amaro, cujos equipamentos são periodicamente aferidos pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo e onde é realizada a maioria dos ensaios de conectores para as principais empresas de eletricidade do Brasil.

A máquina empregada nos ensaios mecânicos é do tipo tração horizontal, com um curso de 7 metros e capacidade de cerca de 30 toneladas. A ancoragem dos cabos foi efetuada com grampos de dimensões suficientes para evitar a concentração de tensões. Esses grampos tinham os seus parafusos apertados com um torqueímetro marca Belzer, de capacidade 20 kgf.m e obedecendo aos torques especificados pela ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE FABRICANTES ELÉTRICOS (1962).

Procurou-se manter uma velocidade de carregamento uniforme que facultasse a leitura dos acréscimos de carga. Esse procedimento permitiu que cada ensaio fosse realizado num período de 3 a 5 minutos. Além do registro do painel de controle da máquina, foi instalado um dinamômetro, marca Dillon, de procedência americana com 5000 libras de capacidade de carga e divisões de 50 em 50 libras. Na extremidade das emendas e nos pontos de ancoragem foram instaladas marcas de referência, com fita isolante branca, que permitiram estabelecer a carga que ocasionava o escorregamento entre as extremidades do cabo, a emenda e a ancoragem do cabo.

Foram ensaiadas emendas tipo preformadas e tipo torção para os condutores n.ºs. 4,2 e 1/0, sendo os corpos de prova executados com quatro repetições.

Para as emendas tipo torção foi confeccionado, também, um conjunto de corpos de prova para o condutor n.º 4 AWG, com 1; 2 e 2,5 torções, com quatro repetições para cada corpo de prova.

Para as emendas tipo compressão foram ensaiados quatro corpos de prova completos, executados em condutor n.º 4 AWG.

Os ensaios elétricos relativos à determinação da resistência elétrica foram conduzidos em emendas semelhantes às empregadas nos ensaios mecânicos. Foram

realizados testes de resistência elétrica e de aquecimento numa máquina especial com capacidade de 2000 ampères e seguiu-se a metodologia estabelecida pelo UNDERWRITER'S LABORATORIES (1954).

Amostras das emendas foram ensaiadas num aparelho marca Sigmatest de procedência alemã, para verificação da condutividade elétrica do alumínio empregado

Para os dados obtidos nos ensaios de emendas de cabos condutores foram elaborados gráficos preliminares para se prever a tendência da ajustagem. Foram pesquisados quatro tipos de regressão:

$$\text{Exponencial: } Y = A \cdot B^X \quad (1)$$

$$\text{Linear: } Y = A + Bx \quad (2)$$

$$\text{Hiperbólica: } Y = A/x^B \quad (3)$$

$$\text{Quadrática: } Y = A + Bx + Cx^2 \quad (4)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados obtidos nos ensaios de laboratório estão apresentados nos Quadros de 1 a 6, onde são adotadas as seguintes abreviações:

P_e = Carga de escorregamento em kgf

P_r = Carga de ruptura em kgf

t_α e t_β = Temperatura do cabo, tomada fora da emenda

t_γ = Temperatura sobre a emenda

QUADRO 1 - Bitolas e Esforços para os Ensaios de Tração de Cabos de Alumínio Tipo CAA com Emendas de Torção com um Número Variável de Torções.

CONDUTOR Nº	Preformadas		Torção	
	P_e (kgf)	P_r (kgf)	P_e (kgf)	P_r (kgf)
4	680,40	680,40	385,56	521,64
	680,40	680,40	385,56	389,68
	567,00	567,00	385,56	521,64
	635,04	635,04	385,56	567,00
2	1383,48	1383,48	589,68	816,48
	1134,00	1134,00	725,76	884,52
	1292,76	1292,76	612,36	793,80
	1134,00	1134,00	657,72	839,16
1/0	1292,76	1292,76	589,68	997,92
	1474,20	1474,20	793,80	1134,00
	1156,68	1156,68	725,76	1111,32
	1451,52	1451,52	748,44	1134,00

QUADRO 2 - Bitolas e Esforços para os Ensaios de Tração de Cabos de Alumínio Tipo CAA com Emendas de Torção com um Número Variável de Torções

Condutor Nº	Torções Nº	P_e (kgf)	P_r (kgf)	Repetições nº
4	1	45,60	181,44	4
		113,40	340,20	
		113,40	340,20	
		45,60	181,44	
4	2	136,08	340,20	4
		136,08	362,88	
		136,08	362,88	
		136,08	340,20	
4	2,5	385,56	521,64	4
		385,56	589,68	
		385,56	521,64	
		385,56	567,00	

QUADRO 3 - Bitolas e Esforços para os Ensaios de Tração de Cabos tipo CAA, unidos com diversos tipos de Emendas

Condutor Nº	Emenda (Tipo)	P_e (kgf)	P_r (kgf)	Repetições Nº
4	Preformada	635,04	635,04	4
		680,40	680,40	
		680,40	680,40	
		567,00	567,00	
4	Torção	385,56	521,64	4
		385,56	589,68	
		385,56	521,64	
		385,56	567,00	
4	Compressão	702,95	702,95	4
		544,22	544,22	
		566,89	566,89	
		839,00	839,00	

QUADRO 4 - Ensaio de Aquecimento para Emendas de Cabos Condutores tipo CAA

Tipo de Emenda	Condutor	Temperatura (°C)			Temperatura Corrente	Temperatura Ambiente (°C)
		t α	t γ	t β		
Torção	CAA n° 2	35,5	31,7	35,5	85	25,0
Compressão	CAA n° 2	36,2	34,2	36,2	60	26,5
Compressão	Cobre n° 6	37,0	37,0	37,0	60	27,0
Compressão	CAA n° 2	37,2	36,9	37,2	85	26,0
Compressão	CA n° 2	39,1	38,2	39,1	85	25,0
Preformada	CAA n° 2	42,0	42,1	42,0	60	25,0

QUADRO 5 - Ensaio de Determinação da Queda de Voltagem em Condutores tipo CAA simples e com Emendas

Condutor e Emenda (Tipo)	Corrente A	Δv (mV)	Resistência (Ω mm ² /m)	l (cm)	Temperatura (°C)
CA n° 4	60	49	0,0013620	60	27
Compressão		45	0,0012500		
CAA n° 4	60	48	0,0013333	60	23
Compressão		35	0,0009722		
CAA n° 2	85	45	0,00088235	60	25
Torção		35	0,00068627		
CAA n° 1/0	110	59	0,00053640	100	25
Preformada		58	0,00052730		
Cobre n° 6	60	49	0,0013611	60	26
Compressão		45	0,0012500		

QUADRO 6 - Ensaio de Condutividade Elétrica para as Emendas de Alumínio

Tipo de Emenda	Condutor (AWG)	Condutividade IACS (%)
Torção	CAA n° 4	48
Torção	CAA n° 2	58
Torção	CAA n° 1/0	38
Preformada	CAA n° 1/0	48
Compressão	CAA n° 4	57

Como as amostras de cabos de alumínio com alma de aço de números 4,2 e 1/0 apresentaram, respectivamente, as cargas de ruptura média de 780, 1150 e de

1650 kgf, considerou-se as recomendações mínimas de segurança impostas pela ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1971a) que recomenda, para todos os condutores, emendas tipo compressão, sendo permitidos outros tipos, desde que resistam a pelo menos 90% da tensão de ruptura do condutor correspondente.

Na Figura 1 estão apresentadas as curvas obtidas para os diversos ensaios conduzidos, mostrando que apenas a emenda preformada suporta cargas compatíveis com 90% da carga de ruptura do condutor correspondente. Esse tipo de emenda não apresentou carga de escorregamento.

As emendas tipo torção apresentaram cargas de escorregamento bem pronunciadas. A diferença de carga de escorregamento sobre a carga de ruptura, nas luvas de torção, é diretamente proporcional à área do condutor, fato que talvez possa ser justificado pelo dimensionamento desproporcional da luva para os cabos maiores, onde a relação entre as seções de aço e alumínio ocasionam separações entre os fios trançados, gerando distribuições de tensões diferenciadas. Essas luvas não suportaram a carga de 90% da carga de ruptura nominal do cabo sem emenda.

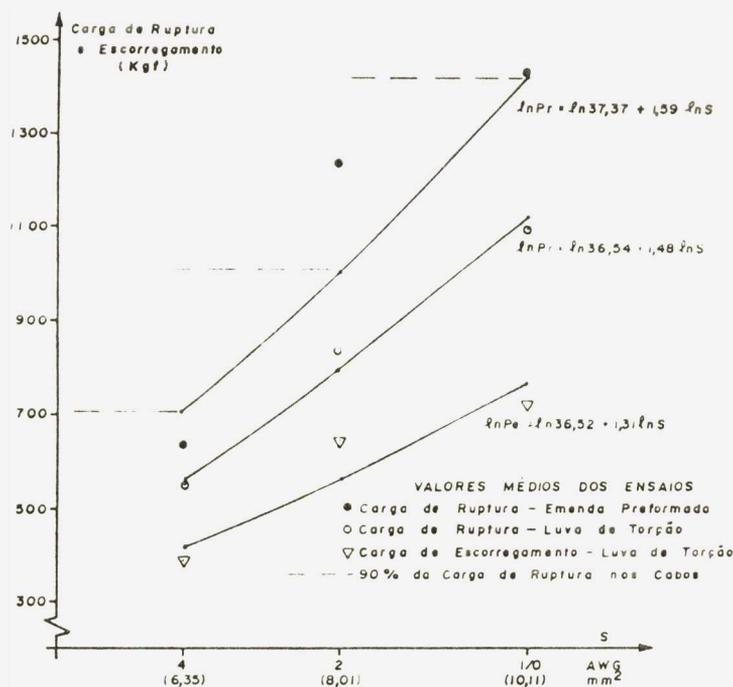


FIGURA 1 - Variação da função carga de ensaios contra seção do condutor para cabos CAA unidos com luvas de torção ou emendas preformadas.

Os ensaios mecânicos das luvas de torção para cabos CAA nº 4 AWG, com um número variável de torções resultaram também em equações ajustadas cujos valores de teste t , de r^2 e de CV indicam que a carga de ruptura isolada contra o número de torções $|P_r = f(t)|$ e em conjunto com a carga de escorregamento contra o número de torções $|P = f(t)|$, seguem duas funções exponenciais. Essa relação permite observar que o número de torções aplicadas nas luvas influencia as duas funções estudadas, mantendo entre ambas uma diferença praticamente constante.

Os ensaios complementares das emendas de cabos condutores mostraram que as elevações de temperatura foram compatíveis com as exigências dos ensaios pois as temperaturas de estabilização foram sempre mais elevadas nas extremidades do cabo do que na superfície da emenda. Os resultados observados se justificam, em

parte, pela tendência de superdimensionamento de alguns tipos de emendas, como é o caso das preformadas ou pela existência de dois condutores, em paralelo, da seção do condutor dentro da luva.

As ligações completas de cabo CAA com luvas de torções são bastante deformáveis. As funções $P_e = |f(S)|$ e $P_r = |f(S)|$ seguem funções hiperbólicas. Apresentaram carga de escorregamento bastante definidas e suas cargas de ruptura são inferiores a 90% da carga de ruptura do condutor correspondente.

As ligações efetuadas com um número incompleto de torções demonstraram que o número de torções aplicadas influencia as funções exponenciais $|P_e = f(t)|$ e $|P_r = f(t)|$, mantendo entre elas uma diferença praticamente constante.

As emendas tipo compressão efetuadas em condutores nº 4 AWG, demonstraram capacidade de suportar 90% da carga de ruptura do condutor correspondente e a ausência de carga de escorregamento.

CONCLUSÕES

Os ensaios conduzidos com os diversos tipos de emendas de condutores tipo CAA mostraram que:

- As emendas preformadas apresentaram carga de ruptura brusca, não apresentando carga de escorregamento. A carga de ruptura é compatível com 90% da carga de ruptura nominal do condutor correspondente. A função $|P_r = f(S)|$ segue curva hiperbólica.

- As ligações completas de cabos CAA com luvas de torções são bastante deformáveis, apresentam carga de escorregamento bastante definidas e suas cargas de ruptura são inferiores a 90% da carga de ruptura do condutor correspondente. As funções $P_e = |f(S)|$ e $P_r = |f(S)|$ seguem funções hiperbólicas.

- As ligações efetuadas com um número incompleto de torções demonstraram que o número de torções aplicadas influencia as funções exponenciais $|P_e = f(t)|$ e $|P_r = f(t)|$, mantendo entre elas uma diferença praticamente constante.

- As emendas tipo compressão efetuadas em condutores nº 4 AWG, demonstraram capacidade de suportar 90% da carga de ruptura do condutor correspondente e a ausência da carga de escorregamento.

As elevações de temperatura foram compatíveis com as exigências dos ensaios, pois as temperaturas de estabilização foram sempre mais elevadas nas extremidades do cabo do que na superfície da emenda. Os resultados observados se justificam, em parte, pela tendência de superdimensionamento de alguns tipos de emendas, como é o caso das preformadas, pela existência de dois condutores, em paralelo, nas emendas tipo torção e pela melhor condutividade do alumínio empregado nas luvas tipo compressão.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com auxílio financeiro fornecido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. Processo FAPESP 75/887.

LITERATURA CITADA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro. *EB-293*: cabos de alumínio (CA) e cabos de alumínio com alma de aço (CAA) para fins elétricos. Rio de Janeiro. 1972. 17 p.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE FABRICANTES ELÉTRICOS: New York. *Norma Nema SG k4. 10 - 1962*: conectores para redes aéreas com condutores de alumínio. New York, 1962. 11 p. (Publicação E.E.I - T.D.J., 162)
- CONDUTORES DE ALUMÍNIO PARA INSTALAÇÕES PREDIAIS E CONECTORES. *Boletim de Pesquisas. Underwriter's Laboratories Inc.* (48): 1-30, 1954.
- PETIT, K.L. & HERMANS, R. Caracteristique actuelles de l' eletrification rurale. *Elect. belge*, (146): 17-36, 1971.