



**GRUPO III
GRUPO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO (GLT)**

**ENSAIOS MECÂNICOS EM CABOS CONDUTORES DE
LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Oswaldo Honorato de Souza Jr.*

LACTEC / PUC / CEFET-PR

Nilson Barbieri

PUC-PR

Walter A. Kapp

LACTEC

RESUMO

O presente trabalho descreve sucintamente sobre a bancada de ensaios mecânicos automatizados de cabos condutores de linhas de transmissão, a qual foi instalada no Instituto Tecnológico do Laboratório Central de Pesquisa e Desenvolvimento - LACTEC – uma fundação civil sem fins lucrativos.

São apresentados na seqüência, uma metodologia de ensaio de fluência em cabos condutores comparando resultados com modelos existentes na literatura, bem como apresenta resultados de ensaios de tensão-deformação que, da mesma forma do que na fluência, poderão ser realizados na temperatura ambiente (conforme inclusive previsto na norma ABNT) e também em altas temperaturas com até 200°C.

PALAVRAS-CHAVE

Ensaio Mecânico, Cabos Condutores, Linhas de transmissão.

1.0 - INTRODUÇÃO

O fenômeno da fluência (creep) segundo (Evans e Wilshire (1)) ocorre “quando os metais ou ligas são submetidos a tensões mecânicas, sendo que o material deve continuar a se deformar de uma maneira dependente do tempo e pode eventualmente falhar. Esta deformação dependente do tempo é conhecida como fluência, e pode ocorrer em todas as temperaturas acima do zero absoluto”. Para os cabos de transmissão especificamente, segundo (Harvey (2)), os modelos de fluência a elevadas temperaturas indicam que não há fluência significativa a 0°C, e que ensaios deverão ser realizados a temperaturas acima de 25°C. Quando se refere a altas temperatura em cabos de

transmissão, significa se referir à temperaturas na faixa de 25°C a 150°C. Atualmente este limite situa-se na faixa de 200°C em cabos especiais chamados de termoresistentes. Entretanto, o problema principal se refere às deformações permanentes nesses cabos ao longo da vida da linha de transmissão, face as tensões mecânicas estarem abaixo da tensão limite de escoamento do material. A determinação dessas curvas a partir de ensaios experimentais é uma tarefa que requer todo um aparato, construído e denominado de Bancada Automatizada de Ensaio em Cabos Condutores, bancada essa que não só realiza ensaios de fluência, mas também ensaios de tensão-deformação (stress-strain), ensaios de dilatação térmica e ruptura, ou seja, principalmente ensaios previstos pela ABNT. Apesar das normas não preverem esses ensaios a altas temperaturas, tornou-se necessário a pesquisa da fluência em temperaturas mais elevadas (principalmente na EDS), sendo que da mesma forma, os ensaios de tensão-deformação estão também sendo realizados nessas temperaturas.

Poderão ser realizados também ensaios e simulações especiais conforme a necessidade dos clientes, tendo em vista que se pode controlar a temperatura ambiente e confinada, tração e corrente no cabo.

**2.0 – BANCADA AUTOMATIZADA DE
ENSAIOS EM CABOS CONDUTORES**

No projeto da bancada, foi portanto necessário desenvolver um sistema que atendesse às condições que não estavam até então previstas pela norma, já que a mesma prevê os ensaios de fluência à temperatura ambiente, e o objetivo era de executar ensaios com temperaturas desde a ambiente até temperaturas máximas de 200°C, visando ensaios em cabos termoresistentes que podem trabalhar com estas temperaturas mais elevadas.

As principais premissas para o projeto foram as seguintes:

- um sistema de fixação nas extremidades que permita, de um lado fazer o carregamento do cabo até 200kN e controlar este carregamento com uma faixa de precisão de $\pm 2\%$ conforme recomendação (NBR 7303 (3)), e de outro lado um sistema com moto-reductor para fazer o pré-carregamento com até 5%;
- um sistema de aquecimento que mantenha constante automaticamente a temperatura da amostra de ensaio, dentro de uma tolerância de $\pm 2^\circ\text{C}$ para temperaturas mais elevadas, tendo em vista que a norma recomenda $\pm 1.4^\circ\text{C}$;
- medição da variação do comprimento L , em intervalos de tempo previamente especificados, de forma a detectar as deformações elásticas e plásticas ocorridas, com precisão recomendada de 10mm em 1km o que corresponde a 0.001% ou $10E^{-5}$ m/m.
- o vão para ensaios deverá ser superior a 8m pela norma, sendo que o vão desejável é de 12m, conforme recomendado (Aluminium Association (4));
- um sistema de proteção (no break) trifásico, que sustentasse os ensaios por um período de no mínimo 24 horas;
- controle de temperatura ambiente implementado, visando a manutenção no intervalo de 20 a 30°C com $\pm 2\%$ de desvio, conforme norma;
- sistema com transformador de corrente que injete corrente de até 2000A no cabo para o vão de 12m, elevando a temperatura em até 200°C ;
- um sistema de controle de carga, que funcione em regime permanente sem aquecimento excessivo, não ultrapassando os limites especificados de temperatura dos servocontroladores, visando os ensaios de longa duração;

A Figura 1 e 2 mostram duas fotos do mecanismo esticador e sistema de tração.

3.0 – MODELO DE FLUÊNCIA

Em 1964 Comellini(5) foi o primeiro que procurou estudar teoricamente o fenômeno da fluência para o caso específico de cabos condutores elétricos. Ele analisou as características próprias do cabo condutor como elemento mecânico, procurando obter um modelo matemático simples, porém com suficiente precisão para a previsão do fenômeno. As características peculiares da fluência dos cabos condutores levantados por Comellini foram: a variação relativamente pequena da temperatura do cabo em torno do valor da temperatura ambiente, e a variação relativamente lenta da carga. Essas características diferenciam a fluência dos cabos condutores em relação a outros componentes mecânicos que trabalham em temperaturas elevadas, não se verificando modificações profundas na estrutura dos metais que não seja o envelhecimento natural.

Segundo Comellini, a deformação total de um fio ou de qualquer corpo homogêneo submetido a esforço de tração constante é função da sollicitação, quando não considera-se o fenômeno da fluência. Porém, quando se verifica a existência da fluência, com o tempo tendo influência no valor da deformação, teremos a seguinte equação:

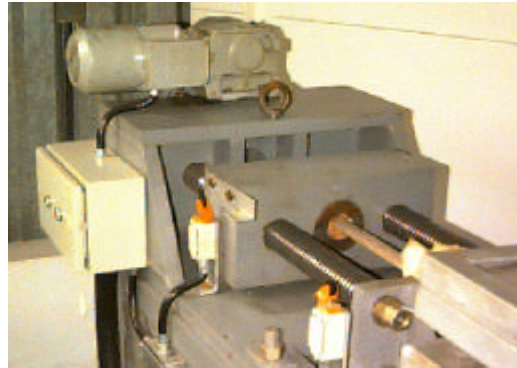


FIGURA 1 – Mecanismo Esticador



FIGURA 2 – Sistema de Tração

$$e = e(s, t) \quad (1)$$

A partir de ensaios realizados em condutores, os resultados obtidos foram tratados, sendo possível chegar em equações para a verificação do alongamento inelástico dos condutores, em que dois componentes

e_c e e_s puderam ser calculados. Portanto, o valor do alongamento total será a soma do assentamento geométrico (e_s) que ocorre durante os primeiros instantes mais a fluência metalúrgica (e_c) que ocorre ao longo do tempo

Apresentam-se a seguir as equações para as diversas composições de cabos condutores:

Equação geral:

$$e_c + e_s = K.e^{f.t} . s^a . t^d \quad (2)$$

onde:

K = constante que depende do material;

t = temperatura do condutor($^\circ\text{C}$);

S = tensão média do condutor (kg/mm x mm)

t = tempo (h)

f, a, m, d = coeficientes empíricos;

Esta equação é aplicada para condutores de todos os tipos, totalmente em alumínio ou ligas de alumínio, ou ACSR(condutores de alumínio com alma de aço).

A equação abaixo, apresenta o cálculo da fluência para condutores especificamente de alumínio com alma de aço (ACSR) e também deve ser aplicada para temperaturas iguais ou superiores a 15°C.

$$e_c + e_s = K(100.S/S_{ult})^a . t^f . t^m \quad (3)$$

onde:

S_{ult} = tensão de ruptura(kg/mm x mm)

4.0 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE MEDIÇÃO DE FLUÊNCIA E TENSÃO-DEFORMAÇÃO EM CABOS DE ALUMÍNIO, COM ALMA DE AÇO - ACSR

Diversos ensaios foram realizados na bancada automatizada descrita anteriormente. Apresenta-se a seguir os principais resultados destes ensaios, alguns comentários e conclusões.

4.1 Ensaio de fluência em cabo de alumínio com alma de aço - ACSR

. Tipo do cabo: ACSR 2 AWG

A determinação da curva de fluência foi realizada também com temperaturas entre 20°C e 30°C conforme solicitação do cliente, e conforme norma NBR 7303.

O ensaio foi realizado em uma amostra do cabo ACSR, cuja carga de ruptura é de 1293kgf. Para este ensaio foi também considerado o valor de carga para fluência de 30%, ou seja, o último estape previsto pela norma. Com isto, a carga de controle foi de 387,9kgf. Os valores de carga durante todo o período do ensaio é apresentado na Figura 3. A temperatura de realização do ensaio foi de 29°C dentro do intervalo previsto.

A curva de fluência é mostrada na Figura 4, em diagrama logarítmico, onde a reta representa a fluência interpolada a partir dos dados do ensaio e extrapolada para 100.000 horas conforme solicita a norma NBR 7303.

Os resultados apresentados na tabela 1, foram considerados satisfatórios, tendo em vista que a determinação da fluência foi realizada com baixa temperatura o que leva o cabo a fluir com valores relativamente pequenos. Veja que para uma extrapolação de 100.000 horas a fluência esteve na casa de 1360 µm/m.

TABELA 1 – Resultados da fluência – ACSR

Erro! Vínculo não válido.

A reta de fluência interpolada em horas com uma incerteza de 0.0072% para o coeficiente a e 0.0094% para o coeficiente b .

4.1.1 Resultados e Análises para cabo ACSR

Comparando-se os resultados obtidos através da experiência realizada com resultado levantado a partir das equações existentes na literatura, observa-se que o resultado levantado a partir da equação 3 com dados dos coeficientes da tabela 2 e a partir de dados dos cabos, apresenta para este caso, valores superiores de fluência em relação às medições efetuadas. A Figura 5 mostra o resultado da fluência levantada para o cabo ACSR 2 AWG a partir da equação de predição, onde verifica-se valores diferenciados aos valores levantados no campo. A fluência calculada para 120 horas por exemplo, está em torno de 250µm/m, sendo que os valores reais para este tempo estão em torno de 150µm/m. A curva mostra portanto, valores inferiores aos calculados em aproximadamente 50 a 70%.

4.2 Ensaio de Tensão Deformação em cabo de alumínio com alma de aço - ACSR

. Tipo do cabo: ACSR 2 AWG.

O ensaio foi realizado conforme a norma NBR 7302 (6), na mesma bancada automatizada, porém agora utilizando-se para este ensaio, do controle de carga, da aquisição de deslocamento através dos transdutores indutivos e aquisição de sinais via microcomputador.

Utilizou-se de uma amostra de cabo composto em referência, cuja carga de ruptura (fornecida pelo fabricante) é de 1293kgf. Também foi realizado ensaio de tensão deformação na alma de aço do referido cabo visando em seguida o levantamento da curva virtual do alumínio.

4.2.1 Resultados e Análises para cabo ACSR

As curvas de tensão-deformação do cabo composto, da alma de aço e a curva final conforme norma, são apresentadas respectivamente na Figura 6, Figura 7 e Figura 8, bem como um quadro resumo dos resultados do ensaio é apresentado na Tabela 3.

Os resultados apresentam-se muito satisfatórios, tendo em vista que o aspectos das curvas identifica-se muito bem com as apresentadas pela norma, bem como os valores estão bem coerentes, principalmente no que diz respeito ao módulo de elasticidade da alma de aço e do alumínio.

4.0 - CONCLUSÕES

Os resultados das medições efetuadas nos cabos condutores, mostraram-se satisfatórios, tendo em vista os problemas iniciais enfrentados de variação de temperatura ambiente devido às variações bruscas de temperatura na região sul durante o dia. Por outro lado, apesar dessas variações verificou-se claramente a tendência das curvas de fluência, ajustando-se as mesmas e extrapolando dos resultados. Obviamente que com o controle de temperatura ambiente, o qual está sendo implementado, os resultados serão ainda melhores, não dando margem às pequenas variações no corpo da bancada. Note-se que a temperatura confinada e a carga do cabo estão perfeitamente controladas dentro dos padrões normalizados.

Os modelos encontrados na literatura, apresentam as equações de predição de fluência, levantadas a partir de experiências realizadas em diversos fabricantes e instituições por todo o mundo. Pelo que se observa nas

avaliações feitas, além de não se ter com precisão os parâmetros de fabricação de cada um destes cabos atuais (apesar de que isto é possível se conseguir junto aos fabricantes), as equações foram também levantadas a partir de diversos tipos de cabos, cujos parâmetros de fabricação foram sem dúvida alterando-se ao longo do tempo.

Recomenda-se portanto, que a partir de outros ensaios realizados em diversas categorias de cabos condutores mais utilizados no país, se possa melhor compará-los com as equações de predição da literatura, e promover a partir disso, ajustes nos coeficientes empíricos dessas equações, dando condições à extrapolações mais precisas principalmente para os cabos mais utilizados atualmente nos projetos de linhas de transmissão. Outros trabalhos de pesquisas e desenvolvimento, teses de mestrado ou doutorado poderão ser realizadas sobre o tema no sentido de ampliar os conhecimentos a respeito de cabos condutores de linhas de transmissão.

TABELA 2 – Coeficientes para a Equação 3 – Cabos ACSR

Processo industrial do fio de alumínio	Valores do Coeficientes							
	K		ϕ		α		μ	
	m<13	m>13	m<13	m>13	m<13	m>13	m<13	m>13
Laminação a quente	2.4	.24	0	1	1.3	1	.16	.16
Extrusão ou Properzi	1.4	.24	0	1	1.3	1	.16	.16

m= área de alumínio/área total

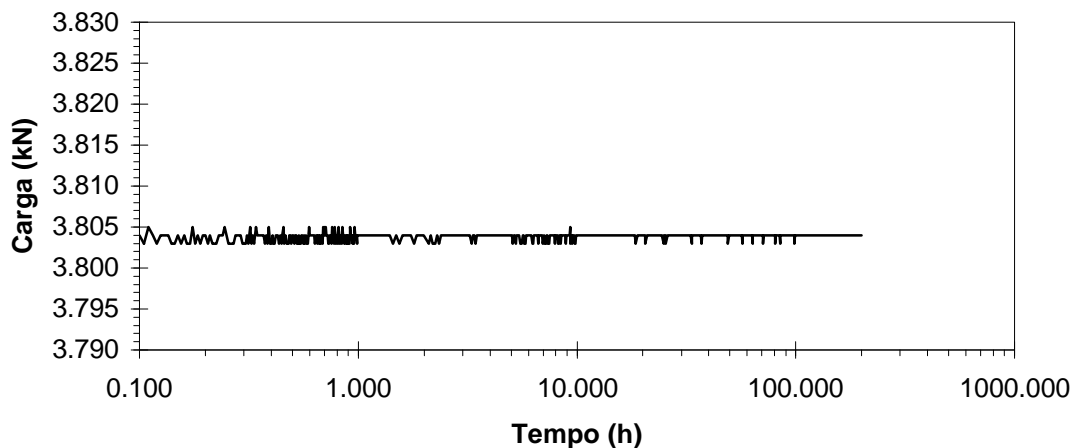


FIGURA 3 – Controle de Carga x tempo

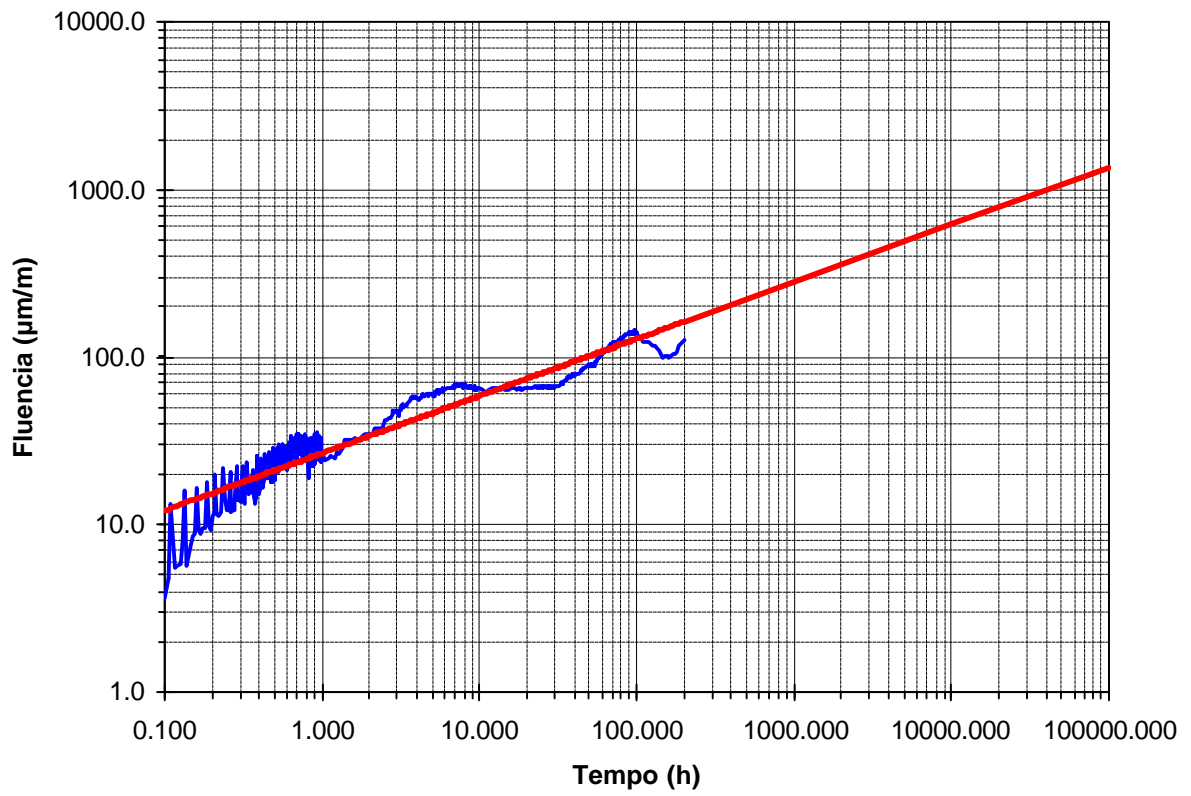


FIGURA 4 – Curva de fluência até 200 horas e extrapolação para 100000h

FIGURA 5 – Resultados calculados – cabo ACSR 2 AWG

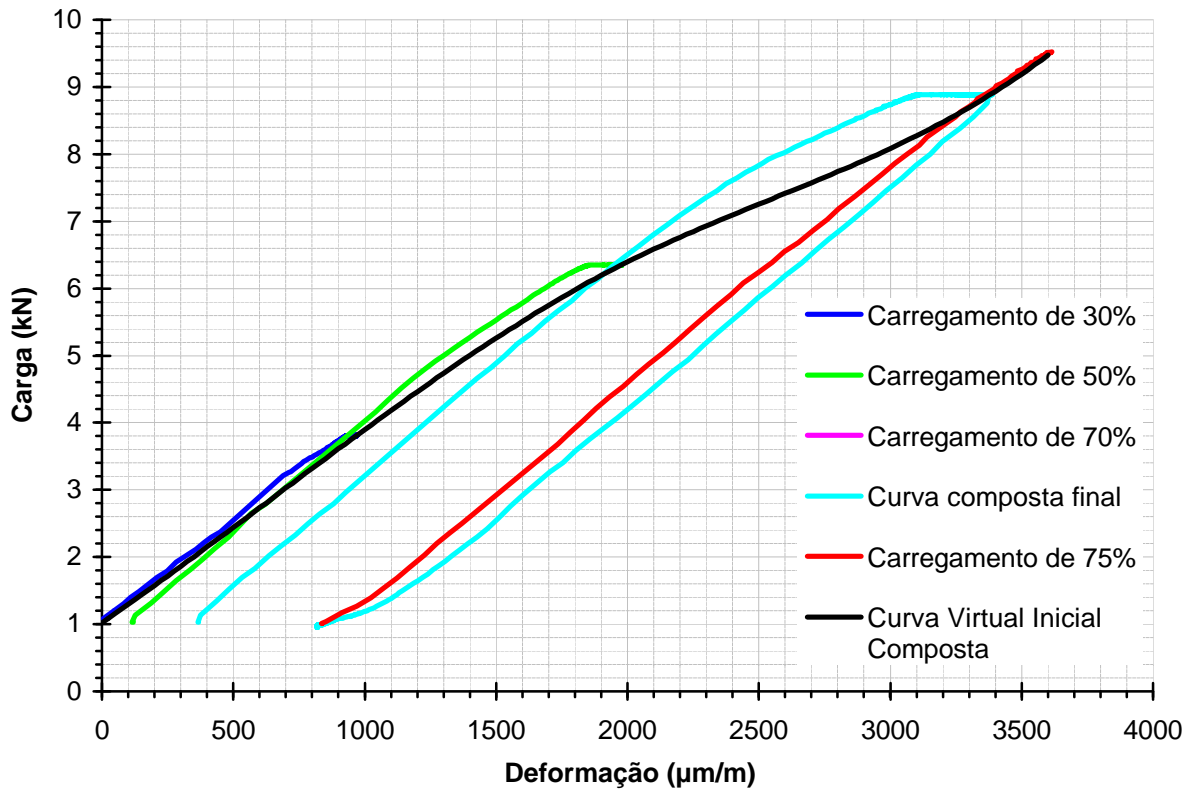


FIGURA 6 - Curvas de Tensão Deformação do Cabo Composto

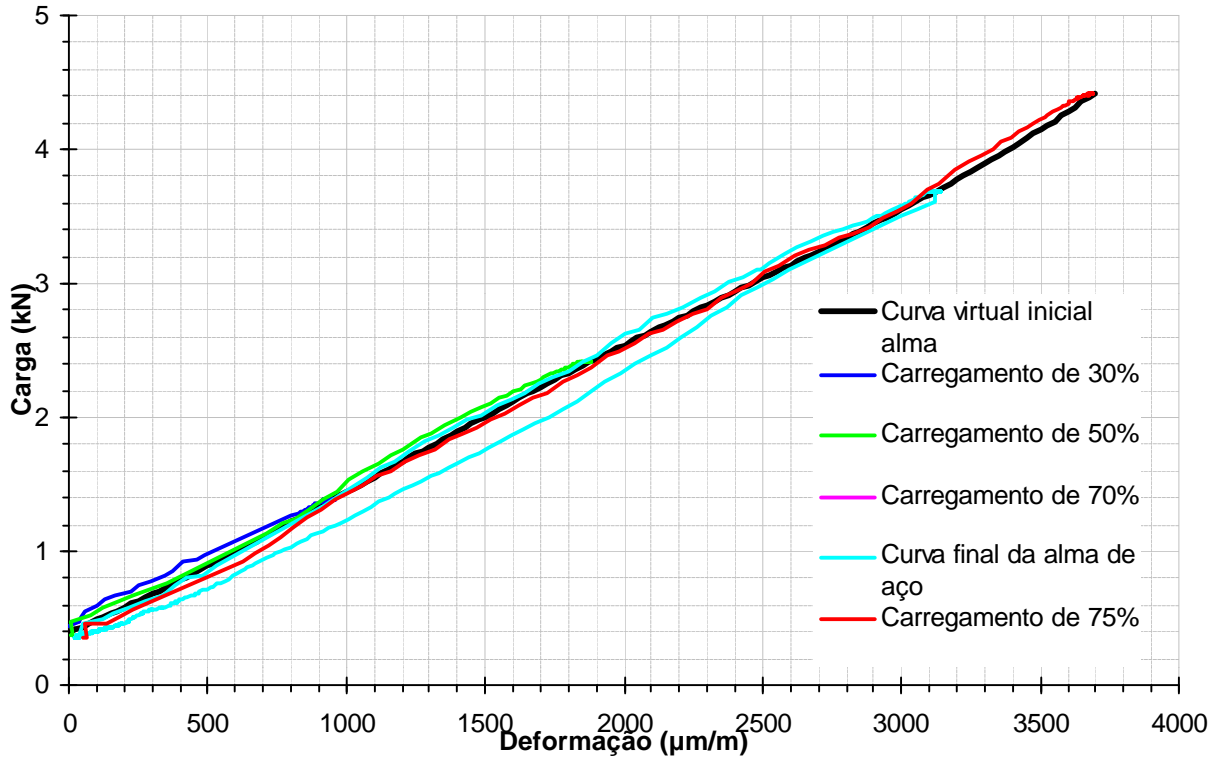


FIGURA 7- Curvas de Tensão Deformação da Alma de Aço

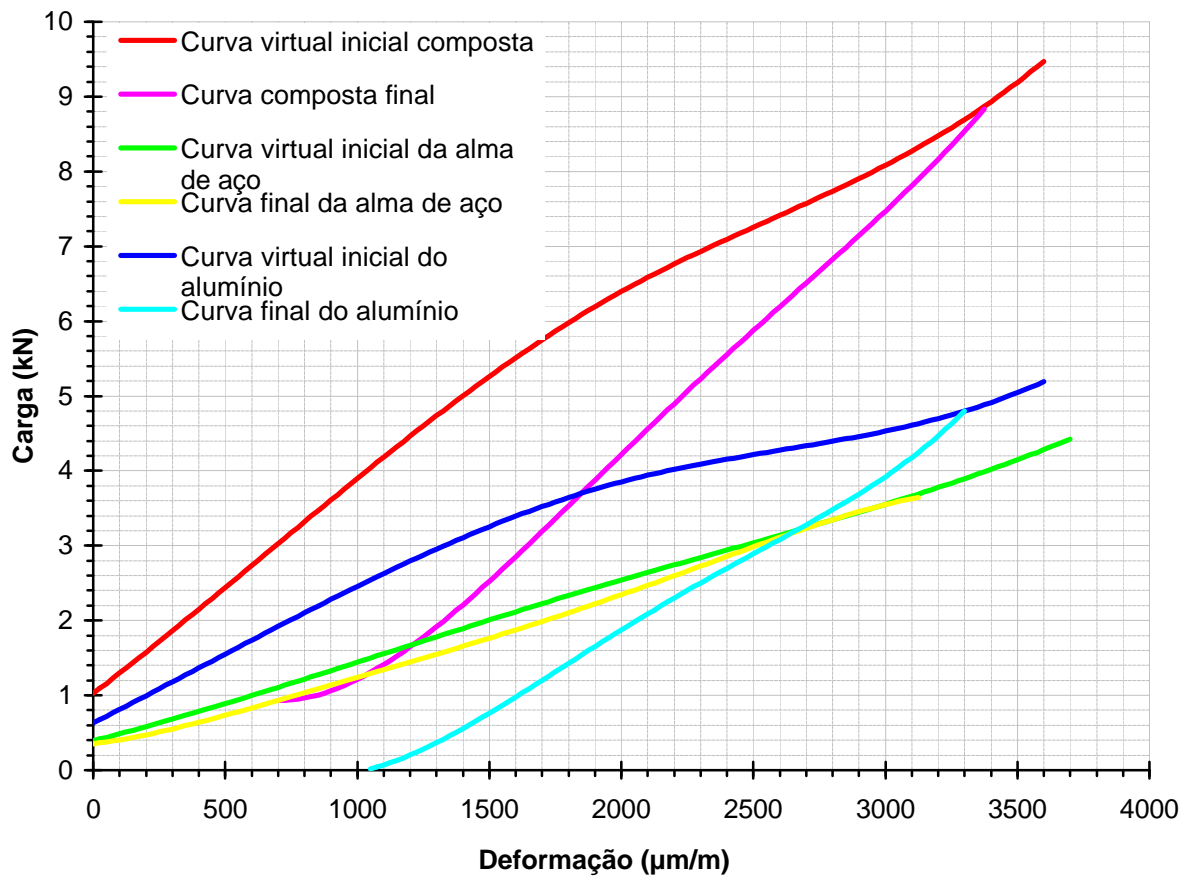


FIGURA 8 - Curvas Finais do Cabo Composto e Alma de Aço

TABELA 3 – Quadro Resumo dos Resultados do Ensaio

Nome do Condutor	Sparrow	
Tipo de condutor	ACSR	
Bitola do condutor	2	AWG
Ø dos fios	2.67	mm
n.º de fios do cabo	7	
n. de fios da alma	1	
Área nominal do condutor	39.2	mm ²
Área nominal do alma	5.6	mm ²
Área nominal de alumínio	33.6	mm ²
Comprimento inicial do cabo:	12.117	m
Comprimento inicial do alma:	12.115	m
Carga de ruptura do cabo	12697	N
Carga de ruptura da alma de aço	8508	N
Módulo de elasticidade médio inicial Inferior (pré-carga - 30%)	74.2	GPa
Módulo de elasticidade médio inicial Superior (35% - 50%)	61.1	GPa
Módulo de elasticidade médio final composto	84.5	GPa
Módulo de elasticidade médio final do Aço	201.2	GPa
Módulo de elasticidade médio final do Alumínio	64.7	GPa
Temperatura ambiente média	23	°C