



XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Metodologia para caracterização e avaliação de cabos submarinos instalados no litoral paranaense.

Guilherme Cunha da Silva	Marilda Munaro	Fernando Piazza
LACTEC	LACTEC	LACTEC
cunha@lactec.org.br	marilda@lactec.org.br	piazza@lactec.org.br
Vitoldo Swinka Filho	Rafael Pires Machado	Fernando Araújo Azevedo
LACTEC	LACTEC	COPEL
vitoldo@lactec.org.br	rafael.machado@lactec.org.br	fernando.azevedo@copel.com

Palavras-chave: cabo submarino, ensaios físico-químicos, ensaios elétricos, materiais metálicos, materiais isolantes.

Resumo

Este trabalho apresenta uma metodologia para caracterização e avaliação de desempenho de materiais constituintes de um cabo submarino utilizado no litoral paranaense. Para tal fim foram realizados ensaios físico-químicos – análise dinâmico-mecânica, análise termogravimétrica e teste de corrosão – e ensaios elétricos – resistência de isolamento e corrente de fuga – nos materiais metálicos e poliméricos do cabo submarino. Os ensaios físico-químicos demonstraram ser importantes para identificação das transições de fase do material polimérico e identificação dos elementos constituintes. Os ensaios elétricos mostraram-se eficazes para avaliar a integridade da isolação e o ensaio de corrosão demonstrou o excelente desempenho do material da armadura.

1. Introdução

Nas últimas décadas tem ocorrido um aumento considerável na utilização de cabos submarinos em sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica [1]. As mais comuns aplicações de cabos submarinos nestes sistemas são:

- alimentação de ilhas, onde a geração é realizada na ilha principal ou na maior ilha de um arquipélago. Este tipo de utilização do cabo submarino tem sido realizado há muitos anos e o número de instalações deste tipo é muito alto;
- transferência de potência gerada em ilhas naturais ou artificiais (fazendo uso de fontes de energia locais) para a ilha principal;
- travessia de mar e rios;
- conexão entre plantas petroquímicas.

Quando em operação o cabo submarino fica submetido a diversos estresses, entre os quais: campo elétrico, esforços mecânicos e fatores ambientais tais como temperatura, salinidade e umidade. A atuação individual ou combinada destes estresses pode levar ao envelhecimento e degradação dos materiais constituintes do cabo submarino [2, 3]. Mecanismos de envelhecimento e degradação, tais

como a iniciação e crescimento de arborescências na isolação, o rasgamento da capa por algum agente externo e a corrosão da armadura ou blindagem podem vir a afetar a vida útil deste sistema de cabos.

A COPEL tem instalado no litoral paranaense, desde novembro de 1998, um sistema de cabos submarinos que interliga Pontal do Paraná com as seguintes ilhas: Ilha do Mel, Ilha das Peças e Ilha de Superagui. Este sistema é constituído de um cabo elétrico tripolar, com condutores de cobre de seção nominal de 70mm^2 , isolação de EPR, blindagem de fios de cobre e armação de fios retangulares de aço galvanizado. O circuito tem aproximadamente 6,2 km. O sistema foi projetado para regime de trabalho em 34,5 kV, mas está operando em 13,8 kV. Além do cabo submarino instalado no litoral paranaense a COPEL possui em seu almoxarifado um trecho de aproximadamente 50 m de comprimento.

Tendo em vista a importância deste sistema de cabos para o fornecimento de energia elétrica para as ilhas supracitadas e o tempo de instalação do mesmo foi iniciado um estudo para avaliar o cabo que está instalado no litoral. Neste primeiro momento foi desenvolvida uma metodologia para caracterização e avaliação de desempenho dos materiais do cabo submarino. Tal metodologia consiste na seleção e realização de ensaios físico-químicos e elétricos que permitam inferir sobre a condição destes materiais.

2. Metodologia experimental

Para caracterização e avaliação do desempenho dos materiais do cabo submarino foram selecionados e realizados os seguintes ensaios físico-químicos e elétricos:

- inspeção visual com documentação fotográfica;
- análise dinâmico-mecânica (DMA) da semicondutora e da isolação;
- análise termogravimétrica (TGA) da isolação, semicondutora e cobertura externa;
- ensaio de resistência de isolamento;
- ensaio de corrente de fuga;
- ensaio de corrosão da armadura do cabo.

Os ensaios foram realizados em amostra de cabo submarino retirada do almoxarifado da COPEL. Vale observar que desde sua aquisição este cabo não foi colocado em serviço.

A. Inspeção visual

A inspeção visual permite avaliar: (a) a característica construtiva do cabo, (b) a presença de possíveis defeitos de processo (no cabo novo) e (c) alterações na superfície do cabo, tais como corrosão da armadura.

B. Análise dinâmico-mecânica (DMA) da isolação e da semicondutora

Por meio da análise dinâmico-mecânica (DMA) as características viscoelásticas do material em função da temperatura são descritas graficamente em termos da energia armazenada ou característica elástica (módulo de elasticidade, E'), da energia dissipada ou característica viscosa (módulo de perda, E'' e da taxa de fluência ($d\Delta L/dT$). Através destas curvas poderão ser identificadas as relaxações mecânicas ou mudanças de fase que ocorrem no material, tais como a transição vítrea (T_g), mudanças na estrutura do material, degradação, composição das formulações e outros.

O equipamento utilizado foi um DMA Netzsch, modelo 242. O ensaio foi realizado segundo a norma ASTM D5026 [4] no modo tração e nas seguintes condições:

- frequência da força dinâmica: 1 Hz
- atmosfera do forno: fluxo de $\text{N}_2 = 50\text{ ml/min}$
- taxa de aquecimento do forno: 3°C/min
- comprimento da amostra a 20°C : 10 mm

Os corpos-de-prova foram obtidos por meio de corte da semicondutora e da isolamento do cabo, com micrótomo, no sentido longitudinal, tendo espessura aproximada de 200 μm .

C. Análise termogravimétrica (TGA) da isolamento, semicondutora e capa externa

Na análise termogravimétrica uma balança acoplada a um forno é usada para medir as alterações de peso da amostra em função da temperatura. Esta técnica é aplicada na avaliação da estabilidade térmica, temperatura de decomposição e determinação da quantidade de cargas minerais, plastificantes e componentes voláteis como umidade e solventes.

O ensaio foi realizado em balança termogravimétrica TG 209 Netzsch, tendo como base a norma ASTM D6370 [5]. Foram pesados, aproximadamente, 16 mg de amostra e aquecidos a partir de 20°C, em atmosfera de nitrogênio (inerte), a uma taxa de 20°C/min, até atingir 550°C para que todo polímero seja pirolisado. A seguir, foi introduzida atmosfera de oxigênio, com a mesma taxa de aquecimento adotada anteriormente e a temperatura foi elevada até 900°C, promovendo a decomposição do negro de carbono, o qual é totalmente eliminado, permanecendo somente as cinzas (material inorgânico). Pela perda de massa, na faixa de temperatura de 570°C até 900°C, calcula-se o teor de negro de carbono na amostra. O valor do teor de cinzas é obtido da porcentagem do resíduo final da queima.

D. Ensaio de resistência de isolamento

A medida de resistência de isolamento tem por finalidade verificar a integridade da isolamento do cabo submarino. Para medida de resistência de isolamento foi, primeiramente, realizada a preparação das pontas das três fases do cabo. O trecho do cabo completo sob teste tem 6m de comprimento. Depois de concluída a preparação das pontas do cabo as fases foram devidamente identificadas para realização do ensaio. A Figura 1 mostra o arranjo utilizado para medida de resistência de isolamento nas três fases do cabo submarino.

O equipamento utilizado na medida de resistência de isolamento foi um medidor de altas resistências HP 4339 A. Foi aplicada tensão elétrica de 500 V DC em cada uma das fases durante 60 segundos. Decorrido este tempo a leitura da resistência de isolamento é realizada automaticamente. Para cada uma das fases foram realizadas 5 medidas de resistência de isolamento e calculado o valor médio.



Figura 1. Arranjo experimental para medida de resistência de isolamento.

E. Ensaio de corrente de fuga

O ensaio de corrente de fuga é utilizado para verificar a integridade da isolamento de cabos de potência extrudados. Também é capaz de detectar, mas não discriminar, defeitos na isolamento.

Este ensaio é realizado em duas etapas:

- ensaio de corrente de fuga x tensão;

- ensaio de corrente de fuga x tempo.

O equipamento utilizado para a realização do ensaio de corrente de fuga foi um Hi-Pot Biddle (0-80 kV DC). No ensaio de corrente de fuga x tensão, a tensão é elevada vagarosamente em degraus de 10 kV, de 15 kV até 45 kV. A tensão aplicada é mantida em cada degrau por 1 minuto e, decorrido este período, a corrente de fuga é registrada para cada patamar de tensão (ensaio de corrente de fuga x tempo). Na Figura 2 é mostrada uma representação esquemática do circuito de teste.

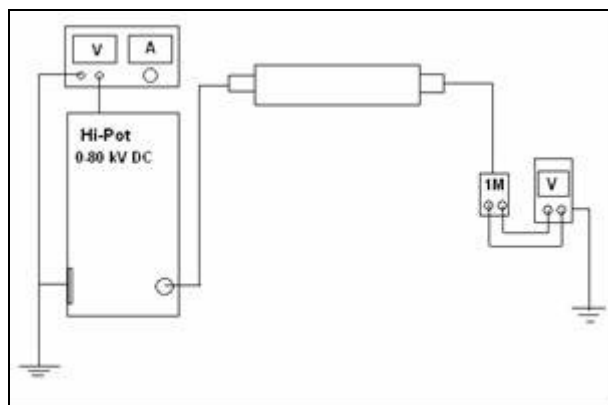


Figura 2. Representação esquemática do ensaio de corrente de fuga.

F. Ensaio de corrosão da armadura do cabo

Para caracterizar o desempenho da armadura do cabo frente à agressividade do ambiente em que o cabo está instalado foi realizado um ensaio de corrosão acelerada em câmara de névoa salina.

A partir da armadura dos cabos submarinos foram preparados 20 corpos-de-prova. Após tratamento químico para remoção dos óxidos presentes os corpos-de-prova foram separados em 4 conjuntos, contendo 5 amostras cada, para realização do ensaio de corrosão em névoa salina. Um dos conjuntos não foi colocado no ensaio, sendo considerado como material de referência. Dos três conjuntos colocados na câmara de névoa salina, um foi retirado para avaliação após 168 horas, outro após 336 horas e o último após 720 horas. Foram avaliados dois parâmetros: taxa de corrosão e resistência à tração. Na câmara de névoa salina as condições de ensaio estabelecidas, de acordo com a norma NBR 8094 [6], foram: temperatura de 40°C e aspersão constante de solução de 5% em massa de cloreto de sódio.

Terminado o ensaio dois corpos-de-prova de cada conjunto foram escolhidos aleatoriamente para realização do ensaio de perda de massa e os outros três corpos-de-prova de cada conjunto foram utilizados para realização do ensaio de tração. Para tal fim as amostras foram limpas em uma solução de hidróxido de amônia, a qual foi preparada com 150 ml de hidróxido de amônia e 1 L de água destilada durante o período de 10 minutos [7].

A taxa de corrosão expressa o desgaste verificado na superfície metálica. A avaliação correta da taxa de corrosão é de grande importância na determinação da vida útil de uma estrutura metálica [8]. O método de determinação da taxa de corrosão consiste em preparar, limpar e medir a massa de corpos-de-prova, antes e após o ensaio [6]. A diferença de massa define a taxa de corrosão, conforme a relação (1):

$$Q = K \cdot \frac{\Delta m}{\rho \cdot A \cdot \Delta t} \quad (1)$$

onde:

Q = taxa de corrosão;

K = uma constante de proporcionalidade. Esta vale $2,6 \times 10^6 \rho$ para a taxa de corrosão e é expressa em (mg/dm².dia). Esta unidade é comumente chamada de mdd [6];

ρ = massa específica, em (g/cm³);

A = área inicial das amostras, em (cm²);

Δm = perda de massa das amostras, isto é, a diferença entre a massa inicial e a final, em (g);

Δt = intervalo de tempo de duração do ensaio, em (h).

Os metais podem ser classificados segundo sua taxa de corrosão [8, 9]:

- taxa de corrosão maior que 300 mdd: o metal sofre alta taxa de corrosão, não sendo recomendável seu uso em locais de alta agressividade;
- taxa de corrosão entre 25 mdd e 300 mdd: o metal sofre corrosão moderada;
- taxa de corrosão menor que 25 mdd: o metal é altamente resistente a corrosão.

3. Resultados

A. Inspeção visual

O cabo submarino instalado no litoral paranaense possui três condutores. Na Figura 3 é mostrado um corte transversal do cabo, onde são indicados os elementos constituintes do cabo submarino em estudo.

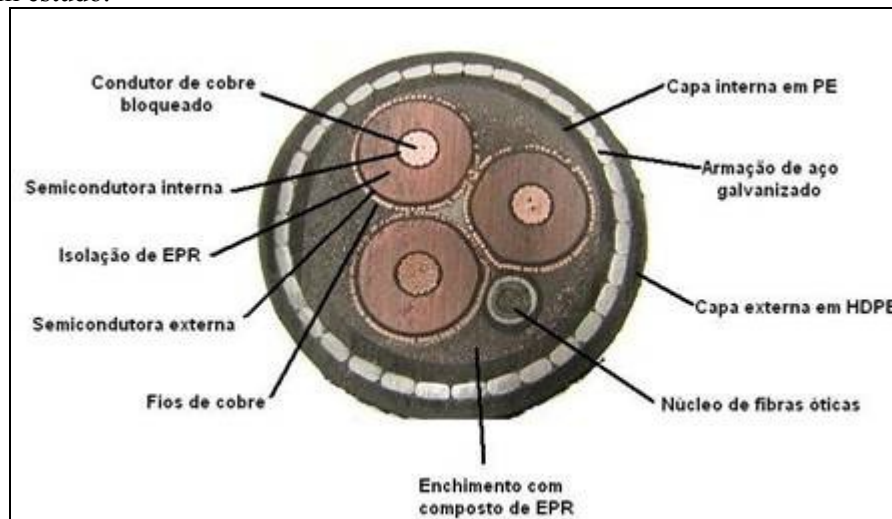


Figura 3. Elementos componentes do cabo submarino.

Na sequência, da parte externa para a interna, tem-se:

- cobertura em HDPE, na cor preta, espessura nominal = 4,0 mm;
- armação metálica, constituída de fios retangulares de aço galvanizado, espessura = 4 mm;
- capa interna em polietileno, na cor preta, espessura nominal = 3,0 mm;
- enchimento de um composto à base de EPR, espessura nominal = 1,0 mm;
- blindagem do condutor, de fios de cobre estanhado, diâmetro nominal do fio = 1,02 mm;
- semicondutora externa, diâmetro nominal = 0,8 mm;
- isolação em EPR, espessura nominal = 8,8 mm;
- semicondutora interna, espessura nominal = 0,8 mm;
- condutor de fios de cobre estanhado, diâmetro nominal = 10 mm.

Nas Figuras 4, 5 e 6 estão apresentados: cobertura, armadura, capa interna, enchimento e cabos isolados. A Figura 5 mostra o enchimento do cabo e detalhe da blindagem (fita e fios metálicos). Ao redor da armadura há uma espécie de fita que tem como finalidade proteger o metal da armadura (aço galvanizado) contra a penetração de umidade. Maiores detalhes da armadura podem ser visualizados na Figura 6.



(a)

(b)

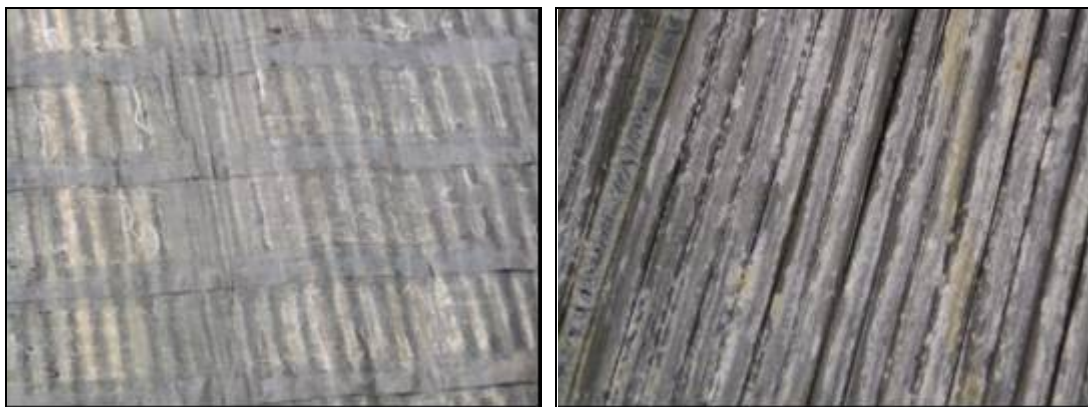
Figura 4. Detalhes do cabo submarino: (a) cobertura, armadura e capa interna; (b) enchimento e cabos isolados.



(a)

(b)

Figura 5. Detalhes do cabo submarino: (a) enchimento; (b) blindagem (fita e fios metálicos).



(a)

(b)

Figura 6. Armadura: (a) parte externa e (b) parte interna.

B. Análise dinâmico-mecânica (DMA) da isolamento e semicondutora

A Figura 7 apresenta o resultado do ensaio realizado no material da isolamento. Pode ser visto que o material apresenta duas transições: uma próxima de -50°C , que corresponde a transição do estado vítreo para borrachoso e outra próxima de 35°C . O ensaio foi realizado em três corpos-de-prova, sendo o primeiro do material obtido logo após a desmontagem do cabo; o segundo dois dias após os corpos-de-prova serem cortadas e o terceiro uma semana após a abertura do cabo. Nota-se que, tanto a primeira quanto a segunda transição sofrem alterações. É provável que isto se deva ao contato com o oxigênio e/ou saída dos subprodutos do agente de cura.

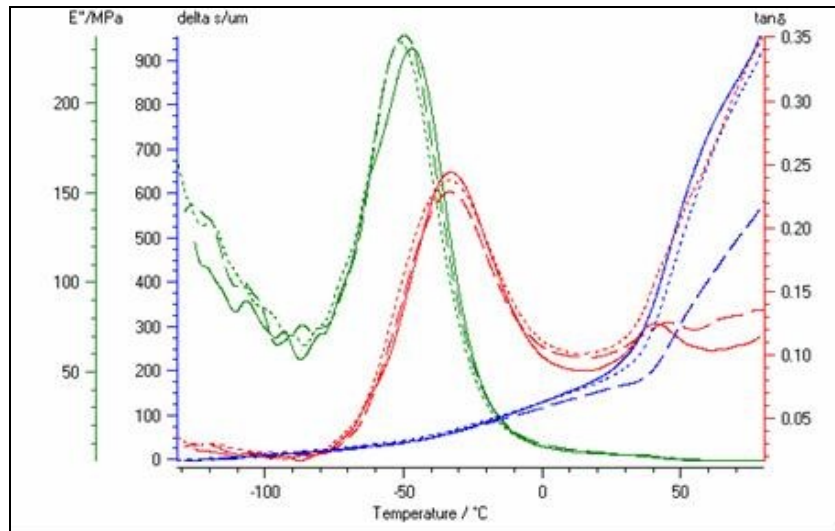


Figura 7. Curvas obtidas do ensaio de DMA no material da isolamento: (___) 1º corpo-de-prova, (.....) 2º corpo-de-prova e (---) 3º corpo-de-prova.

Na Figura 8 são apresentados os resultados de DMA do material da semicondutora. Aqui também são visíveis duas transições, sendo a primeira próxima a -50°C e a outra em 48°C .

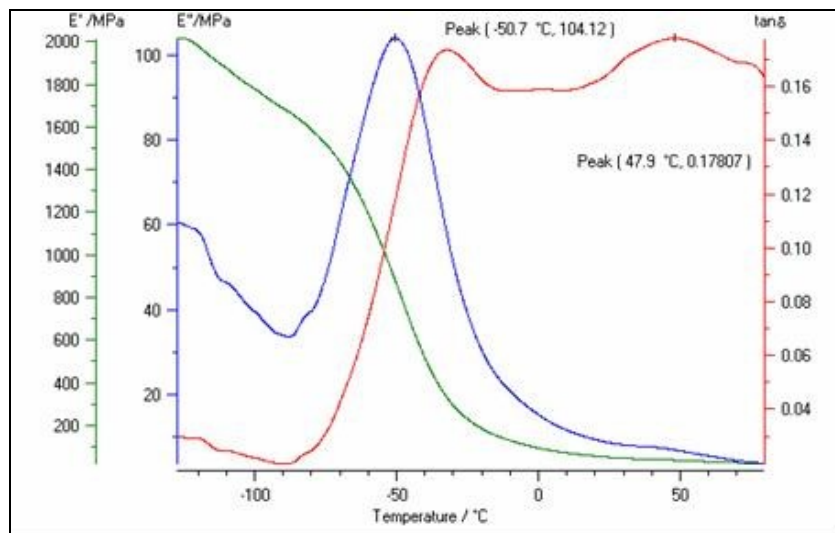


Figura 8. Curvas obtidas do ensaio de DMA para o material da semicondutora.

C. Análise termogravimétrica (TGA) da isolamento, semicondutora e capa

Os resultados de perda de massa por termogravimetria estão apresentados na Tabela 1.

O negro de carbono é usado na semicondutora para conferir qualidades condutivas ao polímero. A semicondutora tem como objetivo homogeneizar o campo elétrico da superfície metálica do condutor e da blindagem.

O teor de cinzas obtido corresponde à quantidade de cargas inorgânicas incorporadas ao elastômero. Para a isolamento utiliza-se a argila calcinada como carga, não só como reforço mecânico, mas para diminuir a absorção de umidade. Alguns óxidos, como o de zinco, são incorporados como acelerador do processo de cura. Ainda, são usados óleos na composição do elastômero para facilitar o processamento do material.

As capas, externa e interna, apresentaram o mesmo comportamento no ensaio de termogravimetria indicando possuírem composições semelhantes. O material da capa é o polietileno de alta densidade (HDPE).

Amostra	Óleo (agente de processo) e/ou plastificante (%)	Material polimérico (%)	Negro de carbono (%)	Teor de cinzas (%)
Isolação	3,82	58,27	-	38,09
Semicondutora	-	60,40	37,58	2,00
Capa protetora externa	-	97,13	2,69	-
Capa protetora interna	-	96,51	2,87	-

D. Resistência de isolamento

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos no ensaio de resistência de isolamento. Pode ser observado que as três fases apresentam valores similares, na faixa de $10^8 \Omega$, indicando a integridade da isolação.

Medida	Resistência em isolamento, R_{iso} (Ω)		
	Fase A	Fase B	Fase C
1	$4,11 \times 10^8$	$3,22 \times 10^8$	$6,21 \times 10^7$
2	$1,00 \times 10^8$	$4,13 \times 10^7$	$4,61 \times 10^7$
3	$6,30 \times 10^7$	$3,61 \times 10^7$	$4,43 \times 10^7$
4	$9,17 \times 10^7$	$4,33 \times 10^7$	$9,45 \times 10^7$
5	$4,96 \times 10^7$	$8,04 \times 10^7$	$9,88 \times 10^7$
Média	$1,43 \times 10^8$	$1,05 \times 10^8$	$6,92 \times 10^7$

E. Corrente de fuga

Pode ser observado que as fases A e B apresentaram comportamento linear com o aumento da tensão, indicando o bom estado do isolamento nestas duas fases. A fase C continha um rasgo na isolação, ocorrido durante a preparação da ponta do cabo. Este rasgo involuntário acabou servindo para simular a existência de um defeito na isolação da fase C. Durante a aplicação de tensão foi observado que a corrente subiu muito rapidamente, atuando a proteção do equipamento e não habilitando mais a elevação da tensão e a continuidade do teste. Este fato comprova a existência de falha na isolação desta fase e, ainda, a eficiência deste teste para detecção de defeitos na isolação de cabos de potência extrudados.

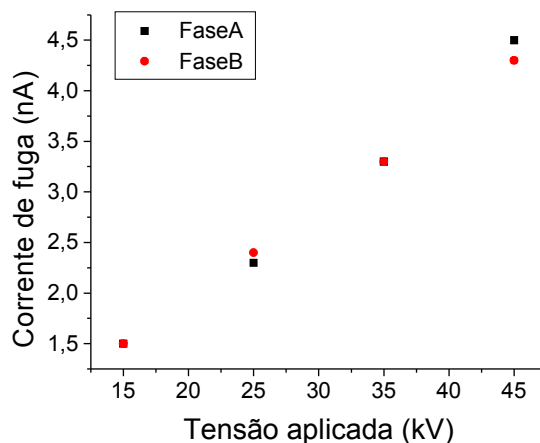


Figura 12. Ensaio de corrente de fuga x tensão.

Imediatamente após ser atingida a tensão de 45 kV, foi efetuada a leitura da corrente. Neste momento é iniciado o ensaio de corrente de fuga x tempo. A tensão aplicada foi mantida fixa e a cada minuto foi realizada leitura da corrente, até completar 10 minutos. Os valores de corrente de fuga registrados estão mostrados na Figura 13. Pode ser notado que, após um leve aumento no valor da corrente, esta se manteve praticamente constante ao longo do tempo, confirmando o bom estado das fases A e B. Vale observar que a corrente medida é muito pequena, na ordem de nanoamperes, justificando a flutuação observada durante as medições.

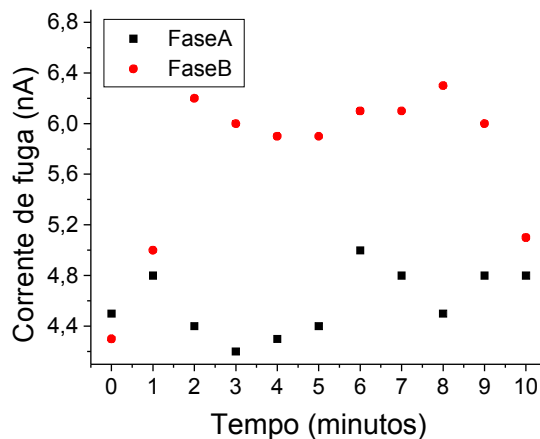


Figura 13. Ensaio de corrente de fuga x tempo.

F. Ensaio de corrosão da armadura do cabo

A Figura 14 apresenta a evolução da corrosão na armadura do cabo. Antes do ensaio os corpos-de-prova apresentavam coloração cinza escuro, padrão característico de tratamento por zincagem e resíduos de coloração branco-amarelada, os quais são parte do adesivo utilizado pelo fabricante para fixação da armadura na capa externa. Com 168 horas de ensaio as amostras apresentaram uma camada de corrosão branca generalizada, aderente ao substrato, sendo justificada como corrosão da camada passiva de zinco. Decorridas 336 horas de ensaio a camada de corrosão branca generalizada não está mais aderente e em alguns pontos deixa o substrato aparente. A corrosão branca indica completa degradação da camada protetora de zinco e início de ataque ao substrato de aço. Após 720 horas a amostra apresenta pontos de corrosão vermelha, a qual é mais agressiva do que a corrosão branca. Este tipo de corrosão pode afetar a estrutura mecânica do material e é um indicativo de uma corrosão severa do aço.

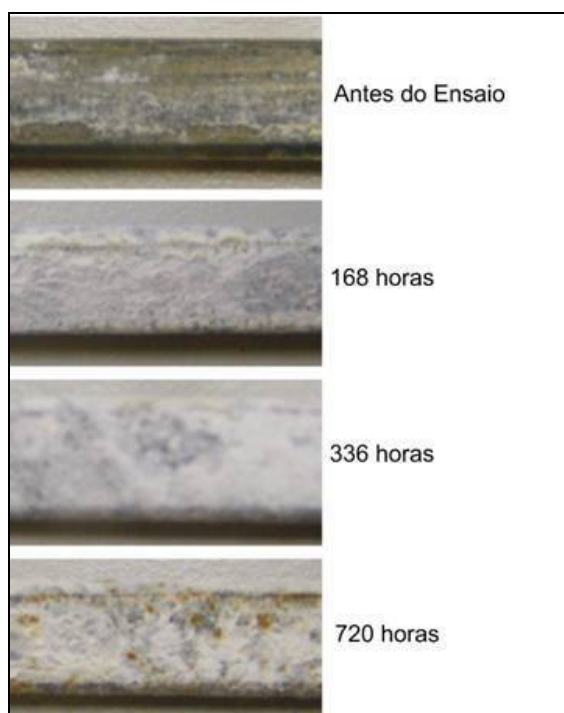


Figura 14. Amostras de aço, antes e após ensaio de névoa salina.

O resultado do ensaio para avaliação da taxa de corrosão é mostrado na Figura 15.

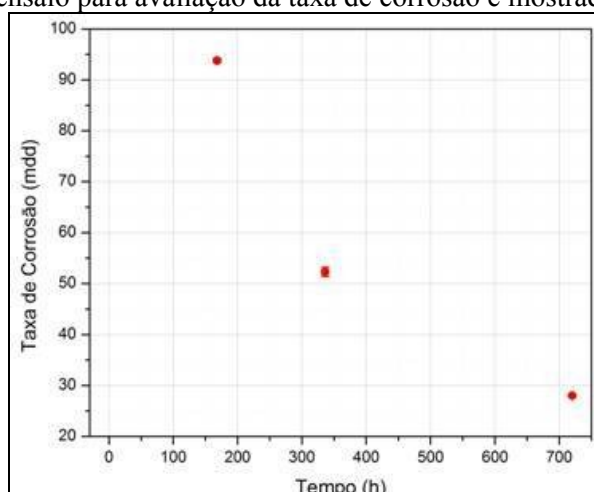


Figura 15. Taxa de corrosão.

Pode ser observado que no início do ensaio as amostras apresentaram corrosão moderada. Em 720 h as amostras passam a ser classificadas como tendo alta resistência à corrosão. Isto se deve a camada de óxido formada durante o processo, a qual faz com que a taxa de corrosão seja menor. Com base nesses dados pode-se afirmar que o material apresenta taxa de corrosão moderada-baixa para o ambiente marinho.

Os resultados do ensaio de resistência à tração estão apresentados na Figura 16.

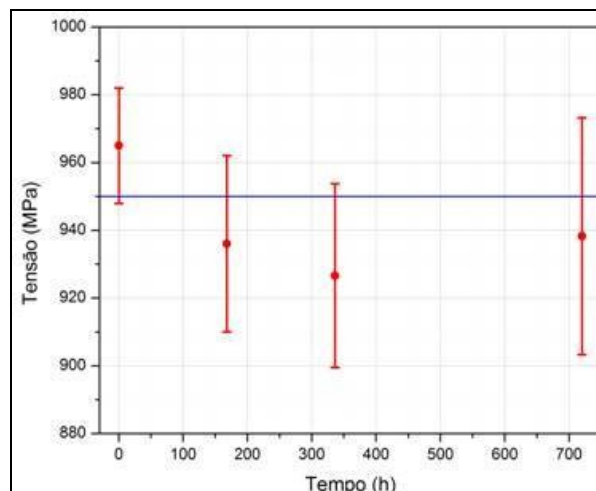


Figura 16. Resistência à tração.

Pode ser observado que os corpos-de-prova não apresentaram diferença significativa na resistência à tração. Este fato fica evidente na linha guia (em azul), a qual mostra que todas as tensões suportadas pelas amostras são similares quando considerado o desvio padrão do ensaio. O valor estimado de resistência à tração é de 950 MPa. Desta forma, apesar da corrosão vermelha constatada na inspeção visual, a qual pode levar a redução das propriedades mecânicas, o material apresenta taxa de corrosão moderada-baixa para o ambiente marinho e manteve a sua resistência à tração praticamente constante ao longo do tempo sendo um indício de que o material que compõem a armadura deste cabo é um material de alta qualidade e alto desempenho.

3. Conclusões

Na inspeção visual foram identificados os elementos constituintes do cabo e nenhuma avaria significativa foi detectada. Na análise dinâmico-mecânica (DMA) foram observadas as transições de fase presentes nos materiais da isolação e semicondutora. A análise termogravimétrica permitiu identificar os elementos constituintes dos materiais da isolação, semicondutora e capa protetora. O ensaio de resistência de isolamento demonstrou a integridade da isolação das três fases do cabo submarino. Tal fato é corroborado no ensaio de corrente de fuga. O ensaio de corrosão na armadura mostrou que, apesar da presença da corrosão vermelha no aço galvanizado a armadura manteve sua resistência à tração praticamente constante. A metodologia apresentada permitiu caracterizar e avaliar os materiais constituintes do cabo submarino testado.

4. Referências bibliográficas

- [1] BARTNIKAS, R.; SRIVASTAVA, K. D.; **Power and communication cables: theory and applications**, IEEE Press 1999.
- [2] MONTANARI, G. C.; SIMONI, L. Aging Phenomenology and Modeling. **IEEE TEI**, vol. 28, n. 5, p. 775-776, 1993.
- [3] DENSLEY, R. J.; BARTNIKAS, R.; BERNSTEIN, B. Multiple Stress Aging of Solid Dielectric Extruded Dry-cured Insulation Systems for Power Transmission Cables. **IEEE Trans. Power Delivery**, vol. 9, n. 1, p. 559-571, 1994.
- [4] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; Standard Test Method for Plastics: DYNAMIC MECHANICAL Properties: In Tension, **ASTM D5026**, 2001.

- [5] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Rubber-Compositional Analysis by Thermogravimetry (TGA). **ASTM D6370**, 1999.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Material metálico revestido e não-revestido - Corrosão por exposição à névoa salina. **NBR 8094**, 1983.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Preparo, limpeza e avaliação da taxa de corrosão de corpos-de-prova em ensaios de corrosão atmosférica – procedimento. **NBR 6210**, 1982.
- [8] FONTANA, M.G.; GREENE, N.D. **Corrosion Engineering**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, p.297-346.
- [9] GENTIL, V. **Corrosão**. Rio de Janeiro: LTC, 3. ed., 1996.