

Avaliação de Sistemas Submarinos de Distribuição de Energia

R. B. Boszczowski, LACTEC, F. Piazza, LACTEC, M. Munaro, LACTEC, R. Mayerle, University of Kiel e A. C. M. Kormann, UFPR E. B. Silva, INTEE e J. E. P. Barbosa, INTEE

RESUMO

Este artigo descreve uma pesquisa multidisciplinar sobre cabos submarinos de distribuição de energia. O estudo envolve aspectos geológico-geotécnicos, incluindo o desenvolvimento de ferramentas de investigação geotécnica para a obtenção de parâmetros de projeto. Em outra etapa, condicionantes hidrodinâmicas são analisadas numericamente, para a verificação da estabilidade do material do fundo do mar, nas vizinhanças de cabos submarinos. Apresenta-se o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação do estado de conservação de cabos submarinos existentes, através da caracterização físico-químicas dos materiais utilizados, buscando-se identificar possíveis parâmetros indicadores do estado de degradação. São estudadas propriedades elétricas e dielétricas, bem como a verificação da suportabilidade elétrica de cabos retirados de linha em uso. A pesquisa contempla um estudo de caso – o sistema de cabos submarinos Angra dos Reis – Ilha Grande, da CERJ.

PALAVRAS-CHAVE

cabos submarinos – degradação – geologia – geotecnia – hidrodinâmica.

I. INTRODUÇÃO

A rápida e crescente ocupação dos espaços territoriais remotos vêm exigindo a ampliação das linhas elétricas existentes e a construção de novas conexões submarinas e submersas, para distribuição de energia em ilhas e regiões limítrofes a mares, rios e lagos. Assim, torna-se necessário evoluir e buscar inovações nas técnicas de estudo, projeto e construção desses sistemas. Da mesma forma, é preciso aperfeiçoar os métodos de avaliação das condições de degradação das linhas submarinas e submersas já existentes, buscando a qualidade e a redução dos custos e das dificuldades com sua manutenção.

Apesar do uso de cabos submarinos ser uma prática relativamente corrente, dificuldades associadas ao projeto, execução e operação desses sistemas não dei-

xam de se fazer presentes. Um dos grandes desafios é a garantia da integridade estrutural dos cabos, que pode ser prejudicada pelo fato do ambiente marinho se constituir em um meio instável e agressivo. Em trechos menos profundos, o impacto de embarcações também pode acarretar danos aos cabos.

A presente pesquisa, ainda em curso, possui os seguintes objetivos:

- Desenvolver um sistema de proteção a cabos submarinos, considerando a geotecnia do leito, as ações de correntes e marés, a degradação e risco de acidentes com embarcações e outras causas eventualmente identificadas;
- Identificar possíveis parâmetros físico-químicos indicadores do estado de degradação de um cabo e determinação das propriedades dielétricas de cabos retirados de linha já em uso;
- Recomendar técnicas de lançamento de cabos submarinos, incluindo o sistema de caracterização e análise *in situ* de resistência de materiais do leito, com base no estudo de uma área modelo com informações geológicas, geotécnicas e hidráulicas, que fornecerão dados para a avaliação dos esforços atuantes nos cabos e do comportamento dos substratos;
- Determinar as condições de fluxo hidrodinâmico e de sedimentos na região de instalação de cabos submersos;
- Desenvolver metodologia para permitir a avaliação do estado de conservação de cabos submarinos existentes em redes de distribuição de energia elétrica, através da caracterização física e química dos materiais utilizados;
- Elaborar a modelagem matemática de um sistema de distribuição submarino, que permita avaliar tensões atuantes e comportamento solo-cabo.

A metodologia proposta para o projeto contempla o estudo das características físicas do ambiente onde estão instalados os cabos submarinos, de modo a se avaliar a intensidade com que este meio atua no sistema elétrico de distribuição. Foi prevista a seleção de uma área modelo, com vistas à validação das metodologias em estudo.

Para tanto, foi escolhido o sistema pioneiro de cabos submarinos Angra dos Reis – Ilha Grande, da CERJ, que consiste em uma linha de distribuição de energia entre o continente e uma ilha oceânica, em funcionamento já há mais de duas décadas.

R. B. Boszczowski trabalha no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (e-mail: roberta.bomfim@lactec.org.br).

F. Piazza trabalha no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. (e-mail: piazza@lactec.org.br).

M. Munaro trabalha no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (e-mail: marildam@lactec.org.br).

R. Mayerle trabalha na University of Kiel (e-mail: rmayerle@corelab.unikiel.de).

A. C. M. Kormann trabalha na Universidade Federal do Paraná (e-mail: aless@cesec.ufpr.br).

II. OBRAS NO MAR E CABOS SUBMERSOS:

Aspectos geológicos e geotécnicos

Durante muito tempo, os cabos submarinos foram simplesmente lançados no leito oceânico, sem uma adequada consideração dos aspectos geológico-geotécnicos envolvidos. Para o projeto de assentamento de linhas submarinas de transmissão de energia elétrica, de acordo com o *U.S. Army Corps of Engineers*, faz-se necessária a completa caracterização do leito marinho. Embora uma parte essencial do processo de planejamento de linhas submarinas seja o entendimento da geologia do leito marinho e seus problemas geotécnicos associados [1], no Brasil ainda não existem regulamentações específicas sobre o assunto.

Boa parte dos danos causados a tubulações e cabos submarinos é devida à erosão ao seu redor, que é provocada pela interação entre o leito marinho e as correntes fluidas (ou ação de ondas). Uma vez que a erosão ocorre, o cabo é submetido a derivas e deformações, que podem conduzir a uma ruptura estrutural. Como resultado da ação erosiva, o cabo pode ficar suspenso em apoios distanciados. As deformações e oscilações produzidas pelas correntes podem conduzir a uma ruptura do cabo.

Na seleção do traçado de instalação de cabos, deve-se procurar identificar riscos associados a deslizamentos de taludes submarinos, vulcões submarinos, afloramentos rochosos, fundos móveis, bancos sedimentares submersos, falhas e fraturas geológicas. Essas feições trazem sérios riscos de fadiga e de deslocamentos indesejáveis em estruturas submarinas de um modo geral, tais como oleodutos, gasodutos e cabos de distribuição e transmissão de energia elétrica, acarretando variações não previstas nas tensões, empuxos em leitos lamosos e abrasão em solos granulares.

A figura 1 traz uma representação esquemática da área em estudo.

As referências [2] e [3] descrevem o traçado da textura de fundo da Baía de Ilha Grande e a distribuição percentual de biodetritos carbonáticos. Pode-se identificar na Baía da Ilha Grande diferentes fácies granulométricas, tais como areias grossas e médias na face leste da baía e na plataforma interna até a isóbata de 50 m; areias muito finas a finas na face oeste da baía e amplamente distribuídas na plataforma interna próxima, e lamas em regiões de mais baixa energia, no canal central e em enseadas abrigadas, como a Baía de Angra dos Reis. No interior da baía de Ilha Grande, a oeste do canal central, a fração grossa em sua maior parte é constituída de partículas sub-angulares de quartzo, associada a micas e minerais pesados [4]. Há ainda fragmentos de bioclastos retrabalhados em ambiente de mais alta energia, concentrados a uma profundidade de 20 m. Carapaças de foraminíferos de origem recente são comuns nesta área, assim como sedimentos bioclásticos com teores de carbonato de cálcio que predominam entre 10 a 25 % [5].

A região nordeste da área central da baía apresenta pe-

quena concentração de carbonato de cálcio, com teores inferiores a 10 %. No restante da área, os teores de CaCO_3 situam-se entre 10 e 25 %, e somente nas proximidades da Ponta da Espia as porcentagens de CaCO_3 ultrapassam 90 %.



FIGURA 1 - Magnetização como uma função do campo aplicado.

A área do sistema de cabos submarinos Angra dos Reis – Ilha Grande foi pesquisada com técnicas de batimetria, sonografia e magnetometria, para localização dos cabos e identificação da natureza dos solos ao longo dos mesmos. A figura 2 ilustra uma das imagens sonográficas obtidas.

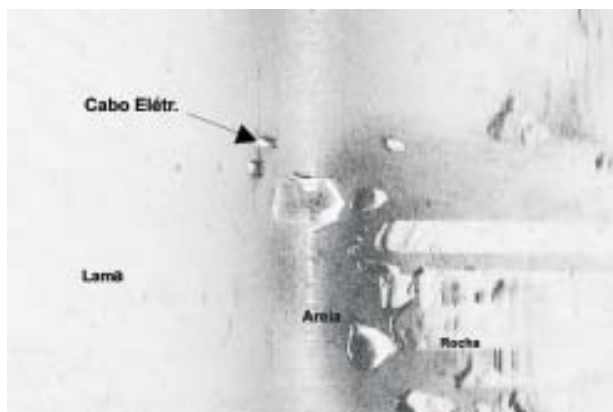


FIGURA 2 - Exemplo de imagem sonográfica do leito marinho.

A presente pesquisa contemplou o desenvolvimento de equipamentos para a investigação geotécnica de linhas de cabos submarinos. Para tanto, foi selecionado um penetrômetro dinâmico – o *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) –, o qual foi adaptado para uso submerso.

Foram efetuados testes iniciais em laboratório, simulando as condições que poderiam ocorrer em campo. Para tanto, foram coletadas 3 amostras da área onde estão assentados os cabos submarinos do sistema Angra dos Reis – Ilha Grande. Os ensaios foram realizados em um tambor de 50 cm de diâmetro e 90 cm de altura, preenchido com material em diferentes condições de compactidade. Em uma segunda etapa, o ensaio foi realizado no mar, na região da Ilha dos Currais (litoral do Paraná), tendo-se coletado também amostras do solo deste local.

A figura 3 ilustra o equipamento desenvolvido, o qual é acionado manualmente por mergulhadores. O número de golpes de um peso, necessários para cravar 55

cm do conjunto de hastes é registrado. Essa resistência à penetração medida em campo pode ser correlacionada com parâmetros geotécnicos, úteis ao projeto geológico-geotécnico de um sistema de cabos submersos.



FIGURA 3 - Penetrômetro dinâmico adaptado para uso submerso.

III. MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Neste item, são resumidos os resultados obtidos em um estudo de verificação da estabilidade do material do fundo do mar, nas vizinhanças de cabos submarinos. A aplicação do modelo contemplou a região entre a costa do estado do Rio de Janeiro e a Ilha Grande. As condições de fluxo são determinadas principalmente pelas marés, vento e diferenças de densidades.

A pesquisa envolveu o desenvolvimento, validação e aplicação de modelos numéricos para a simulação do campo de velocidades e das tensões de cisalhamento nas proximidades do cabo. Foram desenvolvidos modelos numéricos transientes hidrodinâmicos bidimensional e tridimensional. Comparações entre velocidades e níveis de água medidos e modelados mostraram a capacidade do modelo em capturar as condições de fluxo na área, em boa concordância com os valores observados.

A verificação da estabilidade do material do fundo nas proximidades do cabo submarino foi realizada para diversas condições em termos de marés, ventos e densidades. Os resultados indicaram que os ventos de sudoeste tem um efeito bastante importante no campo de velocidades na região dos cabos submarinos. De acordo com os resultados, é esperado que o material do fundo seja bastante estável. A máxima ten-

são de cisalhamento no fundo resultou em torno de $1,2 \text{ N/m}^2$, para um período de maré de quadratura e vento de sudoeste de 14 m/s . Considerando-se um solo argiloso solto e condição solta em termos de compactação, a tensão de cisalhamento requerida para o transporte do sedimento é estimada em cerca de $1,5 \text{ N/m}^2$. Pode-se concluir que apenas sob condições bastante extremas de ventos por curtos períodos de tempo espera-se que o material do leito seja movimentado. Estima-se que a profundidade da erosão sob cabo submarino seja consideravelmente pequena.

A fim de melhorar a estimativa das velocidades e tensões de fundo na área, medições abrangentes de níveis de água, de velocidades de correntes e das distribuições de salinidade e de temperatura devem ser realizadas. Um aninhamento de modelos numéricos na região dos cabos com malha bastante refinada deve melhorar as estimativas de correntes e tensões de fundo. Além disso, os estudos evidenciaram que amostras de sedimento de fundo são necessárias para obter informações detalhadas sobre as características dos materiais e tensão de cisalhamento requerida para o transporte. O modelo numérico tridimensional pode ser também utilizado na definição do método de proteção dos cabos, bem como na otimização da região de lançamento destes.

IV. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DO CABO

Os cabos submarinos do sistema de Angra dos Reis – Ilha Grande são de fabricação Pirelli, unipolares, com condutores de cobre na bitola de $2/0 \text{ AWG}$, com 4 lances totalizando o comprimento de $20,4 \text{ km}$. A isolamento é em EPR, para utilização na tensão de $34,5 \text{ kV}$ entre fases, porém operando em $13,8 \text{ kV}$.

Os cabos têm seu sistema isolante constituído por materiais poliméricos que estão sujeitos a solicitações múltiplas, tais como variações de temperatura, variações do campo elétrico, solicitações mecânicas e influência do meio ambiente. O sinergismo desses fatores degrada os materiais poliméricos e pode acarretar ao sistema isolante a perda dos requisitos mínimos para continuidade de operação [6,7,8].

A metodologia experimental contemplou a execução dos seguintes ensaios: a) Inspeção visual; b) Identificação do polímero por espectroscopia de infravermelho (FTIR); c) Análise termogravimétrica (TGA) do polímero; d) Análise dinâmico mecânica (DMA) do polímero; e) Caracterização da armadura metálica; f) Resistividade volumétrica das camadas semicondutoras; g) Resistência elétrica de isolamento à temperatura de 90° C ; h) Fator de dissipação no dielétrico; I) Tensão elétrica de impulso; J) Tensão elétrica de *screening*.

Nos ensaios de termogravimetria e análise dinâmico mecânica na semicondutora e no isolamento pôde-se notar que a composição das formulações das borrachas utilizadas nos cabos estudados são diferentes.

As variações de estabilidade térmica entre os isola

mentos dos cabos, observadas no ensaio de TGA, podem ocorrer devido aos seguintes fatores: degradação do polímero, diferenças na composição química e consumo de aditivos de estabilização.

As diferenças no comportamento viscoelástico encontradas nos materiais estudados, detectadas pelo ensaio de DMA, são conseqüências das diferenças de composição química dos elastômeros, das variáveis de processo de fabricação e/ou efeitos da degradação do polímero.

Os valores de fator de dissipação do sistema isolante apresentam valores próximos aos citados na literatura para o EPM (0,0079 a 1kHz) e EPDM (0,004 a 60Hz) [9]. Os baixos incrementos no fator de dissipação ao se aplicar diferentes gradientes máximos no condutor são indicativos da inexistência de vazios ou imperfeições nos trechos analisados.

A suportabilidade do sistema isolante às solicitações de tensão elétrica aplicada é indicativa de que o sistema isolante do cabo submarino em estudo esta em boas condições. Adicionalmente ao observado nos ensaios, salienta-se que o sistema isolante foi concebido para utilização em 34,5 kV e esta sendo utilizado em 15,0 kV.

A armadura metálica apresentou consumo do galvanizado que protege o aço da corrosão e, em algumas partes, já apresenta corrosão no aço, fato este que merece atenção por ser esta parte justamente a que dá sustentação e proteção mecânica ao cabo. O acompanhamento da evolução desta corrosão seria importante para garantir o bom desempenho do cabo.

V. CONCLUSÕES

Embora a presente pesquisa ainda esteja em andamento, a abordagem multidisciplinar desenvolvida já permite que algumas conclusões sejam delineadas, contemplando-se aspectos geotécnicos, hidrodinâmicos e dos materiais de cabos submarinos de transmissão de energia.

A revisão dos fatores geológicos e geotécnicos intervenientes no projeto de um sistema de cabos submersos evidencia a importância de um adequado estudo do leito marinho. O trabalho aqui desenvolvido indica que, no caso de investigações para cabos submarinos, ainda há espaço para um simples penetrômetro, especialmente durante a fase exploratória de uma investigação. A possibilidade do aproveitamento de correlações existentes para o DCP pode permitir que parâmetros geotécnicos úteis sejam obtidos de uma forma prática, com vistas ao projeto do traçado de sistemas de cabos submarinos.

A pesquisa mostrou resultados do desenvolvimento e da aplicação de modelos numéricos hidrodinâmicos 2DH e 3D, para estimativas das condições de estabilidade do material do fundo do mar na região de cabos submarinos. Análises de sensibilidade abrangentes foram realizadas para identificar as mais importantes forças atuantes e definir

condições adversas, relativamente à estabilidade do fundo do mar na área estudada (sistema Angra dos Reis – Ilha Grande). Comparações das tensões de cisalhamento atuantes e resistentes, para várias condições, mostraram que o leito do fundo junto à região dos cabos submarinos deve ser bastante estável, mesmo para circunstâncias extremas. No caso em questão, estima-se que a profundidade da erosão sob os cabos submarinos seja consideravelmente pequena e inferior ao diâmetro dos cabos.

Na metodologia de caracterização de materiais e equipamentos utilizadas neste trabalho, algumas técnicas apresentam maior potencial para acompanhamento do estado de conservação de cabos submarinos. Dentre elas estão a técnica de análise dinâmico mecânica; os ensaios de perdas dielétricas e estabilidade térmica medida por termogravimetria. Tais técnicas podem fornecer parâmetros indicadores da evolução da degradação de cabos com configuração semelhante à analisada.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de registrar que o presente trabalho foi desenvolvido em conjunto com a Companhia de Eletricidade do Rio de Janeiro – CERJ, agradecendo ao apoio recebido.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P.G. Allan, "Geotechnical aspects of submarine cables". In: IBC Conference on Subsea Geotechnics, Proceedings, Aberdeen, Novembro, 1998.
- [2] M.M. Mahiques, "Considerações sobre os sedimentos de superfície de fundo da baía da Ilha Grande Estado do Rio de Janeiro", Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987, 139 p.
- [3] G.T.M. Dias, M.A.A. Pereira e I.M. Dias "Mapa geológico – geomorfológico da Baía da Ilha Grande e Zona Costeira adjacente, esc. 1:80000", Relatório Interno LAGEMAR, Universidade Federal Fluminense, 1990, *não publicado*.
- [4] W. C. Belo, "Estudos integrados do fundo marinho da baía da Ilha Grande, RJ", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2001, 100 p.
- [5] I. C. S. Corrêa, C. A. M. Marchiori, A. R. D. Elias, M. D. Avila. "Sedimentologia da parte central da baía da Ilha Grande estado do Rio de Janeiro – Brasil", CECO/IG/UFRGS, Notas Técnicas, 1997, 10: 61-71.
- [6] G. C. Montanari, L. Simoni, "Aging Phenomenology and Modeling". IEEE Trans. Elect. Insul., vol. 28, n. 5, Oct. 1993, p. 775-776.
- [7] R. Robert, "Envelhecimento de materiais sólidos: Notas de aula do curso de Física dos Dielétricos - PIPE", 1997, 4f. Apostila.
- [8] R. J. Densley, R. Bartnikas, B. Bernstein, "Multiple Stress Aging of Solid Dielectric Extruded Dry-cured Insulation Systems for Power Transmission Cables", IEEE Trans. Power Del., vol. 9, n. 1, p. 559-571, Jan. 1994.
- [9] R. Bartnikas, K. D. Srivastava, "Power Communication Cables: Theory and Applications", IEEE Press, 1999.