

Grupo de Estudo de Linhas de Transmissão-GLT

Escolha de Materiais e Dimensionamento de Backfill em Linhas de Transmissão Subterrânea

**GERALDO ROBERTO DE ALMEIDA(1); ROGERIO BIMBATO(2); ARNALDO G. KANASHIRO(3);
TAG(1); ENEL SP(2); IEE(3);**

RESUMO

Este trabalho apresenta ferramentas de engenharia para dimensionamento e escolha de materiais para backfill em linhas de transmissão subterrânea diretamente enterrada. O backfill (reaterro – na melhor tradução) em linhas de transmissão subterrânea somente se apresentou como problema, a ser estudado e resolvido, na Inglaterra em 1960. Até esta data o material usado para reenterrar os cabos diretamente era o próprio solo retirado da trincheira escavada. As linhas de transmissão subterrânea iniciaram de modo efetivo desde 1923 com a instalação do primeiro anel de 230 kV na cidade de Paris. Desde então esta modalidade de linha de transmissão teve um impulso muito grande nos subterrâneos das cidades de Nova York e Chicago nos USA. No Brasil as primeiras linhas de transmissão subterrâneas foram instaladas no Rio de Janeiro e São Paulo em meados dos anos 50. Até 1960 as temperaturas dos condutores de linhas de transmissão subterrâneas subiram de 60°C para 75°C chegando a 85°C e em alguns casos 90°C. Com temperaturas elevadas (85°C) algumas linhas subterrâneas em Londres foram a falha elétrica, devido aos cabos terem entrado em instabilidade térmica (Thermal Runaway) e estes eventos levaram as autoridades elétricas daquele País reconsiderarem o dimensionamento e escolha dos materiais de reaterro dos cabos diretamente enterrados. Na Inglaterra após 1960 o então CEBG recomendou como material para backfill o “CEMENT MORTAR” também denominado argamassa CBS (Cement Bound Sand). Todavia a resistividade térmica deste material quando seco era 1,2 mK/W, considerada alta para o dimensionamento das seções dos condutores. Na Europa Continental uma grande quantidade de Países recomendava areias selecionadas (Selected Sands) com uma granulometria específica que reivindicava uma resistividade térmica a seco de 1,0 mK/W. Neste País Desde 1960 o material de BACKFILL usado tem sido as areias selecionadas. Todavia, a partir de 1980 as areias selecionadas entraram em exaurimento nas cidades do Rio de Janeiro e São Paulo, provavelmente devido ao uso na construção civil. Desde então as areias foram substituídas por Pedra Moída (Granito ou Basalto) numa granulometria pré-estabelecida. Este trabalho tratará apenas dos backfill após exaurimento das areias selecionadas, enfocando aspectos de melhoria no desempenho térmico dos cabos diretamente enterrados. Todo universo ao redor do cabo responde por cerca de 60% de toda resistência térmica que a potência térmica dissipada pelo condutor (devido a passagem de corrente elétrica) deve passar até o poço termodinâmico frio. Pelo menos a metade do valor da resistência térmica externa é devida ao desempenho do Backfill. O Dimensionamento (Geométrico) do backfill inserido dentro dos demais materiais que rodeia os cabos será conduzido com a ferramenta da TRANSFORMADA CONFORME que permite trazer todo universo em torno dos cabos para uma geometria confinada de fácil tratamento matemático. O backfill atual não mais é apenas pedra moída, pois na existência de cerâmicas termicamente condutoras os materiais clássicos tem sido melhorados com adição de materiais termicamente mais condutivos. A escolha dos materiais agora pode ser escolhida como uma “BLEND” de materiais condutivos otimizada com programação linear SIMPLEX. As restrições backfill serão condicionadas pela resistividade térmica que um projeto ótimo (função objetivo) determinar.

PALAVRAS-CHAVE

Linhas de Transmissão Subterrânea, Capacidade de Corrente, Resistência Térmica Externa, Backfill, Materiais para Backfill.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os materiais para backfill possuem três períodos distintos na linha do tempo: (i) O solo natural retirado da própria vala, (ii) Areias Selecionadas em cavas ou leito de Rios e (iii) Rochas metamórficas ou magmáticas. Neste País o primeiro período não aconteceu. Aqui se experimentou apenas o segundo e o terceiro período. O segundo período exauriu-se nas grandes cidades por sobre uso das areias pela atividade da construção civil. Agora, as concessionárias das grandes cidades estão constrangidas a usarem os materiais do terceiro período.

Este trabalho explora de forma completa todo o caminho trilhado no terceiro período, que neste País começa em 20 de agosto de 1987 [01]. Na pesquisa [02] que derivou a patente brasileira do BACKFILL BI MODAL foi feito um inventário completo de toda a literatura disponível até então.

O BACKFILL bimodal foi na época um grande “insight” em matérias que atendia o critério de transferência de calor e massa em meio poroso. Este trabalho atendia as recomendações de DONAZZI [03] de BRACKELMANN [04] e de BILL BLACK and JOE HARTLEY da GEORGIA TECH [05].

Entretanto o Backfill bi modal é um material compactado mecanicamente, e isto é uma limitação para as obras civis de construção de linhas de transmissão subterrânea. As autoridades Municipais não mais permitem valas abertas por muito tempo dentro das grandes cidades.

Os AMERICANOS já haviam enfrentado este problema como restrição das autoridades municipais, e lá ELES equacionaram e resolveram o problema abandonando a compactação mecânica por um despejo (SLUMP) de material dentro da vala, sem compactação ulterior, com o material sendo auto adensante como um concreto de construção civil.

Este trabalho apresenta a metodologia para selecionar materiais e dimensionar backfill para as linhas de transmissão subterrâneas.

2.0 - BACKFILL

O backfill é o material usado nas circunstâncias imediatas dos cabos de potencia diretamente enterrados. Na figura (01) está ilustrado um corte típico de vala de enterramento de cabos em linhas de transmissão subterrânea.

Uma vala de cabos é talvez a obra civil mais simples e mais antiga da humanidade. Mas a vala para enterramento (“backfilling”) de cabos tem algumas peculiaridades:

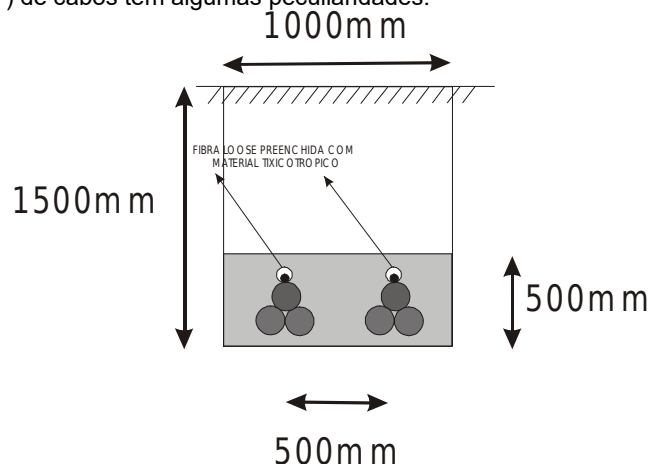


FIGURA 1 – Corte típico de vala – Cabos em trevo

- (i) Deve ter abertura mínima por razões econômicas;
- (ii) Deve ter profundidade compatível com as interferências com outros serviços subterrâneos;
- (iii) Deve ser preenchida com material bom condutor de calor na região de contorno dos cabos;
- (iv) Deve ser preenchida (acima do backfill) com material bom condutor térmico e aceito pelas autoridades
- (v) Compactar mecanicamente ou fazer SLUMP é uma decisão baseada em possibilidade e projeto.

Para soluções compactadas, o problema já foi equacionado e resolvido [06 COBEM]. Este trabalho abordará apenas o backfill fluidizado conforme concepção AMERICANA.

Independente da modalidade de aplicação do backfill (Compactado ou Fluidizado), se o material for confeccionado com ROCHAS MAGMÁTICAS (Neste País GRANITO ou BASALTO), o material final para backfill fluidizado deve possuir as seguintes características:

1-A densidade do grão (pedra) deve ser $\geq 2,50 \text{ g/cm}^3$

2-A densidade do aglomerado granulado deve ser $\geq 1,85 \text{ g/cm}^3$

3-A porosidade deve ser $\leq 30 \% \text{ em volume}$

4-A resistividade do material saturado com água deve ser $\rho_{sat} \leq 0,5 \text{ mK/W}$

5-A resistividade do material a seco deve ser $\rho_{seco} \leq 1,0 \text{ mK/W}$

Para o backfill fluidizado é sempre necessário adicionar ao aglomerado algum volume de cimento PORTLAND e finos do tipo fly ash ou equivalente.

Neste trabalho serão apresentados os ensaios para classificar os materiais de uma receita de backfill.

3.0 - ENSAIOS

3.1 Densidade

As densidades (relação massa volume) podem ser feita com qualquer método recomendado para construção de estradas [06] [07]:

A-ASSHTO T 100-86 Specific Gravity of Soils

B-ASTM D 854-83 Specific Gravity of Soils

C-DNER-ME 093/64 Densidade Real dos Solos

Todavia para uso de backfill, o procedimento mínimo de medida de densidade é.

Tomar um frasco graduado e secá-lo em estufa a 75°C durante pelo menos 15 minutos.

Pesar o frasco graduado a seco (P1)

Colocar no frasco graduado um volume (V) do material que se quer medir a densidade

Pesar o conjunto (c) anotando (P2)

A densidade será $d = (P1 - P2) / V$

As densidades de aglomerados saturados e secos, os métodos dos construtores de estradas também podem ser usados.

Para medir densidade de backfill saturado (de água) pode-se usar o mesmo procedimento. O Controle agora deve estar na saturação de água no aglomerado. Este controle pode ser feito com um frasco com um tubo em U acoplado do lado de fora do frasco, O procedimento será como o anterior.

Para medir a densidade do material seco o procedimento é inteiramente semelhante. Apenas o material deve ser seco previamente em estufa ou fogo direto. O controle de secagem é feito pelo acompanhamento de estabilidade do peso em balança.

3.2 Granulometria

Métodos dos construtores de estradas também podem ser usados, mas neste caso existe uma preferencia para normas brasileiras ou MERCOSUL [08].

O procedimento para medição da granulometria de um agregado moído de rochas magmáticas é inteiramente análogo à medição granulométrica de agregado para concreto de construção civil.

3.3 Porosidade

A porosidade é a relação entre a densidade a seco material e sua densidade na condição saturada. Este parâmetro fornece uma indicação da quantidade de vazios que possui o meio.

3.4 Friabilidade

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

A friabilidade é um ensaio não padronizado. Esta qualidade é uma medida da capacidade de um concreto resistir golpes de uma ponteira que simule uma pequena maretta de obreiro de construção civil.



FIGURA 2 – Ensaio de Friabilidade – CP íntegros e CP testados

A seguir a figura mostra uma visão completa do dispositivo construído para esta medição. Um peso (1 ou 2) quilos é colocado numa extremidade e deixada cair sobre um corpo de prova. É medida a quantidade de golpes necessários para sua ruptura. O ensaio é sempre comparativo, misturas mais friáveis e menos friáveis são usadas como referências.

A qualidade FRIABILIDADE é vista por comparação de materiais. Com 2 ou mais materiais, pelo menos dois corpos de prova são colocados no final de curso da ponteira e deixado cair. O observador deve medir quantos golpes são necessários para que o corpo de prova se rompa. A friabilidade é um critério comparativo entre os materiais através do número de golpes necessários para a ruptura completa. Este critério foi desenvolvido pelo CEGB (Central Electricity Generating Board - ENGLAND) nos anos 60, quando o concreto magro começou a ser usado backfill.

3.4 Resistividade Térmica

Este ensaio não possui norma brasileira. Neste trabalho foi dada uma preferência para a norma IEEE 442. Como este parâmetro é de suprema importância para classificação do BACKFILL será apresentado a seguir como é sua modelagem de origem e como foi construída a sonda térmica para sua realização.

4.0 – SONDA TÉRMICA



FIGURA 3 – Sondas de Laboratório – Inspeção com Infra Vermelho

A equação de condução de calor num meio contínuo em coordenadas cilíndricas para uma fonte térmica filamentar de comprimento infinito é;

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \text{ para } r > 0 \text{ e } t > 0$$

Com as seguintes condições iniciais

$$T = T_0 \text{ para } r \geq 0, t = 0$$

$$T = T_0 \text{ para } r \rightarrow \infty, t > 0$$

$$2\pi k r \frac{\partial T}{\partial r} = Q(\text{cte}) \text{ para } r \rightarrow 0, t > 0$$

Onde α e k são respectivamente a difusividade térmica e a condutividade térmica do material de prova. Q é a potência dissipada por unidade de comprimento da fonte linear, suposta constante. Assim, a solução da equação anterior é dada (Leonard Euler) por:

$$T - T_0 = \frac{Q}{4\pi k} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du$$

Onde $u = \frac{r^2}{4\alpha t}$ Fazendo o uso da expansão em série da integral exponencial

$$E_i(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \text{ com } E_i(u) = -\gamma - \ln(u) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} u^n}{n \cdot n!}$$

Onde $\gamma = 0,5772156649$ substituindo nas equações anteriores vem;

$$T - T_0 = \frac{Q}{4\pi k} \left[-\gamma - \ln \frac{r^2}{4\alpha t} + \frac{r^2}{4\alpha t} - \frac{1}{4} \left(\frac{r^2}{4\alpha t} \right)^2 + 0 \left(\frac{r^2}{4\alpha t} \right)^3 - \dots \right]$$

Em seguida. Utilizando a hipótese de períodos longos, isto é;

$$t \gg \frac{r^2}{4\alpha t} \text{ e desprezando os termos de ordem igual e superior a 1, resulta}$$

$$T - T_0 = \frac{Q}{4\pi k} \left[-\gamma - \ln \frac{r^2}{4\alpha t} \right]$$

Para a superfície da sonda onde $r = a$ a equação torna

$$\Delta T_{(a,t)} = T_{(a,t)} - T_0 \cong \frac{Q}{4\pi k} \left[\ln(t) - \gamma - \ln \frac{r^2}{4\alpha t} \right]$$

Assim, em um gráfico $\Delta T_{(a,t)}$ em função de $\ln(t)$, após períodos relativamente longos tem-se uma região linear cujo coeficiente angular é $m = Q/4\pi k$. Logo, a condutividade térmica do meio pode ser determinada a partir deste coeficiente como;

$$k = \frac{Q}{4\pi m}$$

4.1. Construção de uma Sonda Térmica

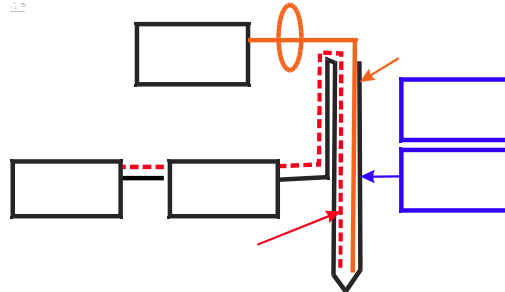


FIGURA 4 – Sonda Agiforme – Diagrama Construtivo

A ENGENHARIA BÁSICA de uma sonda térmica impõe com as devidas simplificações a equação;

$$\Delta T_{(a,t)} = T_{(a,t)} - T_0 \cong \frac{Q}{4\pi k} \left[\ln(t) - \gamma - \ln \frac{r^2}{4\alpha t} \right] \text{ ou } \Delta T_{(a,t)} = m \left[\ln(t) - \gamma - \ln \frac{r^2}{4\alpha t} \right] \text{ ou } \Delta T_{(a,t)} \cong m [\ln(t)]$$

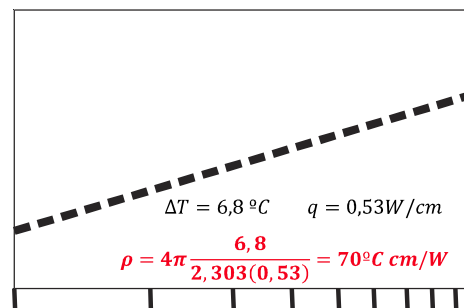
Com

$$m = \frac{Q}{4\pi k} \text{ com } Q = RI^2 \text{ e } R \text{ é resistência por unidade de comprimento e } I \text{ a corrente em Amperes}$$

Quando a sonda é aberta (Mede-se a Voltagem, Corrente de uma sonda com componentes)



$$\rho = 4\pi \frac{(T_2 - T_1)}{2,303q \log \left(\frac{t_2}{t_1} \right)}$$



$$\rho = 4\pi \frac{(T_2 - T_1)}{2,303q}$$

FIGURA 5 – Sonda Agiforme – Resultado de ensaio

5.0 - MATERIAIS

O material, rocha magmática moída e granulada, recomendado deve estar contido no limite granulométrico da figura (02).

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

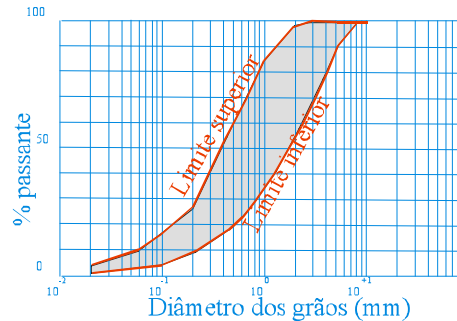


FIGURA 6 – Limites Granulométricos

A composição dos granitos e basaltos de lava próxima à região da grande São Paulo são:

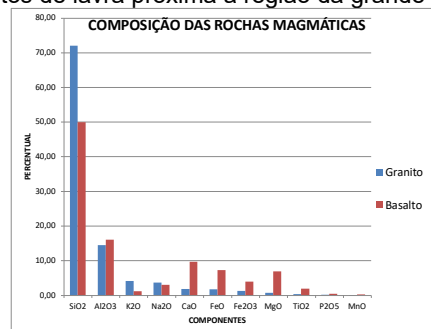


FIGURA 7 – Composição do Granito

Nesta composição existe a predominância de óxidos de silício e alumínio. Esta realidade decorre da composição do magma, água e ar do planeta terra. Nesta composição predomina.

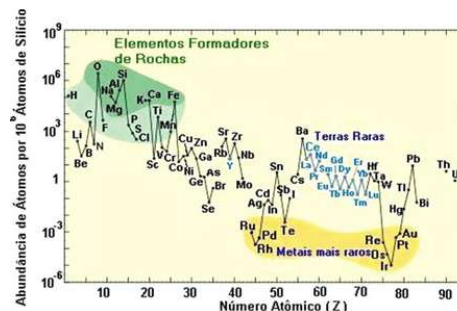


FIGURA 8 – Abundância dos Elementos Químicos

A figura anterior apresenta na área superior do gráfico a abundância dos elementos químicos (O₂, Si, Al, Na, K, Mg, Ca e Fe) que são aqueles presentes nas rochas magmáticas.

A diferença geológica entre O Basalto e o Granito vem da era do vulcanismo do planeta. O basalto é uma rocha formada por derramamento do magma da superfície do planeta. De modo geral basalto possui uma grande micro porosidade porque quando do seu derramamento este material era percorrido por grande quantidade de gases (N₂, CO₂ ETC). Por outro lado o Granito é uma rocha INTRUSIVA, Quase sempre ele não conseguia derramar sobre o planeta, formando assim uma concentração e dureza diferenciada.

O material, FLY ASH ou equivalente, é usado como fino para economizar cimento. Os romanos já faziam isto Há 2000 anos atrás. Então "o barro" de vulcão (Vesúvio) perto da cidade de Pozzuoli era o mais adequando para isto. Dai o nome de POZZOLANAS ASH para este tipo de material alternativo, mas complementar. Modernamente o Fly Ash vem da queima do carvão mineral em altos fornos de aciarias ou centrais térmicas.

A composição básica dos Fly Ash industriais é;

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

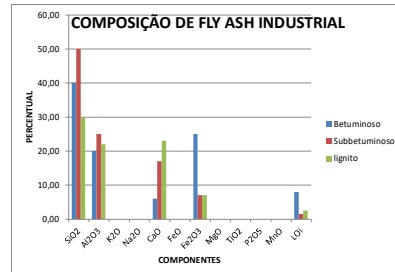


FIGURA 9 – Composição Fly Ash

O CIMENTO TIPO PORTLAND, mais usado é o do tipo 2 (II). O cimento possui uma influencia na resistividade a seco do material para backfill. Maior é a quantidade de cimento, menor é a resistividade térmica. O problema desta escolha deságua na escolha da modalidade de instalação dos cabos enterrados. Se a modalidade for diretamente enterrada, o BACKFILL deve ser FRIÁVEL, ou seja, fácil de desmoronar quando for preciso reentrar nos cabos. Se a modalidade for instalação em dutos o BACKFILL pode ser de concreto muito duro e com resistividade baixa.

A ÁGUA para a confecção do cimento é uma água indústria (limpa) normal.

DIMENSIONAMENTO DO BACKFILL

O dimensionamento do backfill é em última análise o dimensionamento de um cabo diretamente enterrado. A IEC 60287 [09] nas três partes deste documento fornece o melhor caminho para este dimensionamento.

$$I = \sqrt{\frac{(\theta_c - \theta_a) - W_d [0,5 T_1 + n(T_2 + T_3 + v T_4) + (v-1) \Delta \theta_x]}{R [T_1 + n(1 + \lambda_1) T_2 + n(1 + \lambda_1 + \lambda_2) (T_3 + v T_4)]}}$$

O parâmetro $T_4 = \frac{\rho_4}{2\pi} \ln \left\{ \left[\frac{4L}{D_e} \right] \prod_{i=1}^k \left(\frac{L_i}{S_i^j} \right) \right\}$ possui todas as medidas necessárias para o cálculo, inclusive

resistividade térmica de todo o material em torno do cabo i de referencia. Mas em todo o material externo ao cabo de referencia, está também o material de cobertura do backfill e todo solo em volta da vala que será instalado o cabo.

O modelo usado para ter em conta todos os materiais é MATEMÁTICA denominada Transformada [10] Conforme.

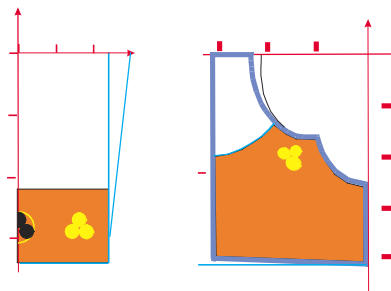


FIGURA 10 – Mapa Real – Transformação Conforme

O mapa transformado mostra a importância do backfill. Para um primeiro cálculo “expedito” pode arbitrar um percentual de valor para cada área do mapa transformado. Em seguida usar os valores de cada parte

0,5 para o backfill + 1/3 para o solo natural e 1/6 para o reterro

Do material corresponde ao entorno do cabo e calcular uma resistividade equivalente. Esta é uma aproximação grosseira, mas é rápida e serve de indicativo para a capacidade de condução de corrente dos cabos. O documento ELECTRA [11] é de muita ajuda para quem quiser usar este enfoque.

Um cabo diretamente enterrado, quando percorrido por corrente elétrica dissipa calor e esquenta. O calor dissipado deve atravessar todo o backfill e o seca parcialmente, modificando o valor de T_4 . O método mais

avanzado manda considerar uma porção do material em torno ao cabo como parcialmente seca. Neste caso a transformada conforme é mandatória para calcular a resistência térmica externa ao cabo. O cálculo preciso pode ser apreciado em [12]

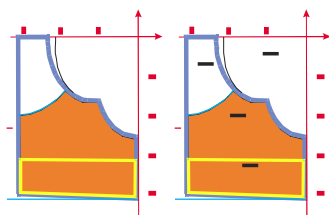


FIGURA 11 – Transformação Conforme – Separação dos Domínios

O objetivo do projeto ENEL é desenvolver materiais que tem melhor desempenho parcialmente seco.

6.0 - CONCLUSÃO

Foram apresentados os ensaios para caracterização de um backfill usado para enterrar cabos numa vala aberta em vias públicas, com ênfase na modalidade FLUIDIZADA. Efetivamente a parte essencial da caracterização é a medição da resistividade térmica do material. Para o efetivo uso do método que inclui o dimensionamento do backfill é necessário também caracterizar o material de reaterro e TODA LATERAL DA VALA ao longo do caminho de instalação dos cabos.

7.0 - AGRADECIMENTOS

Este trabalho vem sendo conduzido dentro dos programas de P&D ANEEL sob administração da ENEL São Paulo. Os Autores agradecem a estas entidades pelo apoio financeiro e a permissão para publicar este trabalho.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) J.R BARTOLI. e G.R. de ALMEIDA PATENTE BRASILEIRA PI 8705084-6 DEPÓSITO EM 20-08-1987 (In Portuguese).
- (2) J. R. BARTOLI AND G. R. DE ALMEIDA “ Cabos de Potencia em Solos Parcialmente Seco – Experimentação Sobre Modelos Estacionários “ ANAIS COBEM 07 – FLORIANÓPOLIS 1987 pp 105-108,
- (3) DONAZZI,F.; OCCHINI,E; SEPPI, A. Soil thermal and hydrological characteristics in designing underground cables. Proc. IEE, v. 126, n.6, 1979.
- (4) H. BRACKELMANN Physical Principles and Calculation Methods of Moisture and heat Transfer in Cable Trenches, BERLIM, 1984 (VDE-VERLAG ETZ report 19).
- (5) HARTLEY, J.G.; BLACK, W.Z. Transient simultaneous heat and mass transfer in moist unsaturated soils. ASME Transactions, v. 103, p. 376-382, 1981.
- (6) ASTM D2937, Standard Test Method for Density of Soil in Place by the Drive-Cylinder Method, 2010.
- (7) ASTM D1556, Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by the Sand-Cone Method, 2007.
- (8) MNR 7181:2016 – SOLOS – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA
- (9) IEC Standard 60287 (1969, 1982, 1994) Calculation of the Continuous Current rating of Cables (100% load factor). 1st edition 1969, 2nd edition 1982, 3rd edition 1994-1995.
- (10) LUONI G. MORELLO A. HOLDUP W. – Calculation of external thermal resistance of buried cable through Conformal Transformation – Proc IEE Vol 119 nº 5 May 1972 pp 575-586.

- (11) P. Gazzana Priaroggia The Calculation of Effective External Thermal Resistance of Cables Laid in Materials Having Different Thermal Resistivities — ELECTRA Vol 98 pp 19-42
- (12) G.R. de Almeida - Tecnologia para linhas de transmissão instaladas diretamente enterradas em solos sujeitos a instabilidade térmica e hidrológica. (*Novos Materiais Para Backfill e Sistema de Controle de Temperatura*) – DSc Thesis presented to Polytechnical Engineering School of University of São Paulo (In Portuguese).
- (13) G.R. de Almeida L.C.Zanetta Jr. C. D. Peixoto e A. Macedo – Backfill Replacement Saves Underground Transmission Cost and Postpones Investments – JICABLE 11 – Paper to be present in the next JICABLE MEETING June 2011 in Versailles Fr

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

