

## Transferência de Calor e Migração de Umidade em Solos Úmidos

Ligia Silva Damasceno Ferreira  
Departamento de Engenharia Química - UFRGS  
Álvaro Toubes Prata  
Departamento de Engenharia Mecânica - UFSC

### RESUMO

*O presente trabalho investiga numericamente o fenômeno da transferência de calor e migração de umidade nas vizinhanças de um cabo elétrico aterrado. A geometria do cabo é simulada utilizando coordenadas bicilíndricas e as equações diferenciais da conservação da massa e da energia são resolvidas utilizando o método dos volumes finitos. Os resultados são apresentados com o objetivo de se comparar o efeito da dissipação do calor para os dois solos utilizados, um natural e outro artificial.*

### ABSTRACT

*The heat transfer and moisture migration phenomena in the neighbourhood of an electrical cable is numerically investigated. The cable geometry is simulated using bicylindrical coordinates. The equations of conservation of mass and energy are solved using the finite volume method. The results are presented in order to compare the heat dissipation for two different soils, one natural and other artificial.*

### INTRODUÇÃO

Os processos de transferência de calor e umidade em solos que envolvem cabos de potência aterrados somente nas duas últimas décadas mereceram a atenção de pesquisadores. Com efeito, durante muitos anos as empresas fabricantes utilizavam no aterramento de seus cabos o mesmo solo que originalmente era retirado para a formação da vala. No início da década de setenta começaram a surgir os primeiros problemas de rompimento de cabos devido a problemas de super aquecimento. A partir de então a análise dos processos de migração de umidade que efetivamente ocorrem nas vizinhanças de cabos de potência aterrados passaram a influir consideravelmente no projeto destes cabos. A passagem de corrente elétrica no interior dos cabos de potência gera calor que induz temperaturas altas na superfície dos cabos. A umidade presente nos espaços vazios do solo começa então a migrar na forma de vapor, diminuindo gradativamente o conteúdo de umidade no solo próximo ao cabo, e aumentando consideravelmente a resistividade térmica do solo. Como consequência, o solo, que deveria atuar como um dissipador de calor, passa a atuar como um isolante térmico. A temperatura superficial do cabo atinge, assim, elevados valores que eventualmente podem ocasionar o rompimento do isolamento do cabo. A solução para o problema recai na escolha de um material, natural ou artificial, que, embora com baixo conteúdo de umidade, seja capaz de dissipar uma quantidade razoável de calor. O objetivo deste trabalho é investigar o processo de dissipação de calor para dois materiais de aterramento, um natural e outro artificial, para diferentes potências dissipadas pelo cabo.

### EQUAÇÕES DE TRANSPORTE E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Em um meio poroso não saturado, calor e umidade (na forma líquida ou na forma vapor) são transportados simultaneamente e em decorrência da influência combinada de gradientes de temperatura e de conteúdo de umidade. O modelo de Philip e de Vries [1] para a análise do transporte simultâneo de calor e massa em meios porosos não saturados é utilizado no presente trabalho. Neste modelo, as leis fenomenológicas da difusão de massa (Lei de Darcy para a fase líquida e Lei de Fick para a fase vapor) e calor (Lei de Fourier) são utilizadas nas equações de balanço de massa e energia. Obtém-se desta forma expressões que trazem explicitamente as influências dos gradientes de temperatura e conteúdo de umidade nos processos de transporte de calor e massa, através de difusividades associadas a estes gradientes. As propriedades difusivas e termo físicas do meio são consideradas variáveis com a temperatura e o conteúdo de umidade. A geometria do problema a ser investigado no presente trabalho está apresentada na Fig. 1. O sistema de coordenadas bicilíndrico utilizado na simulação do cabo aterrado está representado pelas linhas coordenadas  $\eta$  e  $\psi$ . A área hachurada corresponde ao domínio de solução do problema, simplificado devido à simetria.



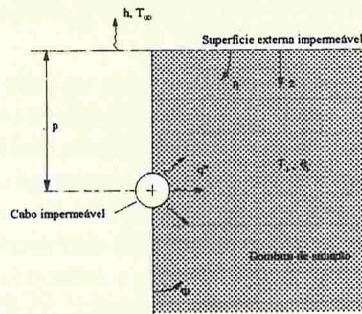


Fig. 1 - Geometria do problema.

O transporte de calor é governado pela equação da conservação de energia que, para meios porosos insaturados, é escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial(\sqrt{g}CT)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \eta} \left[ (k_* + \rho h D_{Tv}) \frac{\sqrt{g}}{g_\eta} \frac{\partial T}{\partial \eta} + \rho h D_{\theta v} \frac{\sqrt{g}}{g_\eta} \frac{\partial \theta}{\partial \eta} \right] + \frac{\partial}{\partial \psi} \left[ (k_* + \rho h D_{Tv}) \frac{\sqrt{g}}{g_\psi} \frac{\partial T}{\partial \psi} + \rho h D_{\theta v} \frac{\sqrt{g}}{g_\psi} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \right] \quad (1)$$

onde  $T$  é a temperatura e  $\theta$  é o conteúdo de umidade (razão entre o volume de líquido e o volume total do meio);  $C$  é a capacidade volumétrica do meio e  $k_*$  é a condutividade térmica efetiva para o caso hipotético de não haver migração de umidade, conforme discutido em [2];  $\rho$  é a massa específica do líquido  $h$  é o calor latente de vaporização;  $D_{Tv}$  e  $D_{\theta v}$  são as difusividades do vapor associadas aos gradientes de temperatura e conteúdo de umidade, respectivamente;  $t$  é a coordenada temporal e  $\eta$  e  $\psi$  são as coordenadas espaciais. As variáveis  $g_\eta$  e  $g_\psi$  (sendo que  $g = g_\eta g_\psi$ ) são os coeficientes métricos do mapeamento que transforma o sistema de coordenadas bicilíndrico no sistema cartesiano, conforme discutido com maiores detalhes em [3]. O transporte de umidade é governado pela equação da conservação de massa que, para meios porosos insaturados, é escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial(\sqrt{g}\theta)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \eta} \left[ (D_T) \frac{\sqrt{g}}{g_\eta} \frac{\partial T}{\partial \eta} + (D_\theta) \frac{\sqrt{g}}{g_\eta} \frac{\partial \theta}{\partial \eta} - \sqrt{g_\eta} k_{Hz} \right] + \frac{\partial}{\partial \psi} \left[ (D_T) \frac{\sqrt{g}}{g_\psi} \frac{\partial T}{\partial \psi} + (D_\theta) \frac{\sqrt{g}}{g_\psi} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} - \sqrt{g_\psi} k_{Hz} \right] \quad (2)$$

onde  $D_T = D_{Tv} + D_{Tl}$  e  $D_\theta = D_{\theta v} + D_{\theta l}$  e  $D_{Tl}$  e  $D_{\theta l}$  são as difusividades do líquido associadas aos gradientes de temperatura e conteúdo de umidade, respectivamente, e  $K_H$  é a condutividade hidráulica do meio poroso. O terceiro e o sexto termo do lado direito da equação acima representam a contribuição da ação da gravidade no transporte de umidade.

As condições iniciais e de contorno que devem ser satisfeitas pelas equações (1) e (2) são apresentadas a seguir, tendo como base novamente a Fig. 1. No início do processo todo o meio está a uma temperatura e um conteúdo de umidade constante e igual a  $T_i$  e  $\theta_i$ , respectivamente. Na superfície externa, tem-se troca de calor por convecção e assume-se tal superfície impermeável ao fluxo de massa. Na superfície do cabo, também impermeável ao fluxo de massa, há um fluxo de calor prescrito.

#### METODOLOGIA DE SOLUÇÃO

As equações diferenciais governantes do problema, equações (1) e (2), foram resolvidas numericamente utilizando o método dos volumes finitos [4] utilizando um esquema implícito para a integração temporal. Na discretização do domínio de solução foram utilizados 100 volumes de controle na direção  $\eta$ , com refino de malha na região próxima ao cabo, e 30 na direção  $\psi$ . O intervalo de tempo escolhido era igual a 10 s no início do processo, sendo que o seu valor era aumentado a cada iteração, até um máximo de 1 hora, aproximadamente. A escolha tanto do número de volumes de controle quanto do in-



tervalo de tempo levaram em conta o compromisso entre a precisão da solução numérica e o tempo computacional.

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise do processo de dissipação de calor nas vizinhanças de um cabo aterrado é investigado para dois materiais de reaterramento. O conteúdo inicial de umidade do solo natural, agora chamado de aluvião arenoso, foi mantido em 0,15 e para o solo artificial, denominado de backfill, em 0,06. A temperatura inicial do solo e a temperatura ambiente também são mantidas constantes e iguais a 20 °C; o coeficiente de transferência de calor convectivo na superfície ambiente é tomado ser 15 W/m<sup>2</sup>.s. Considerando a situação real no aterramento de cabos elétricos, a profundidade aterramento do cabo foi mantida em 1 m e o valor do raio cabo igual a 0,05 m. A fim de se investigar a influência da potência dissipada pelo cabo no processo de secagem, três valores de potência foram utilizados, 20, 40 e 80 W/m.

A Fig. 2 apresentam os valores da temperatura junto à superfície do cabo como função do tempo. O parâmetro de curva é a potência dissipada pelo cabo e a linha tracejada representa a situação inicial. Neste gráfico estão plotados as curvas correspondentes ao solo aluvião arenoso, linhas cheias, e ao backfill, linhas pontilhadas. A comparação entre as curvas de mesma potência e diferentes materiais de reaterramento indica que o solo artificial efetivamente inibe o processo de aquecimento. Enquanto que, para a potência de 80 W/m, caso de aquecimento mais crítico, o solo aluvião arenoso atinge uma temperatura da ordem de 130 °C, o solo backfill não ultrapassa a temperatura de 50 °C.

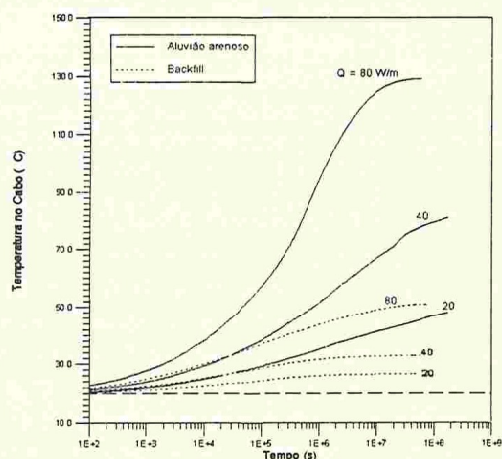


Fig.2-Temperatura no cabo

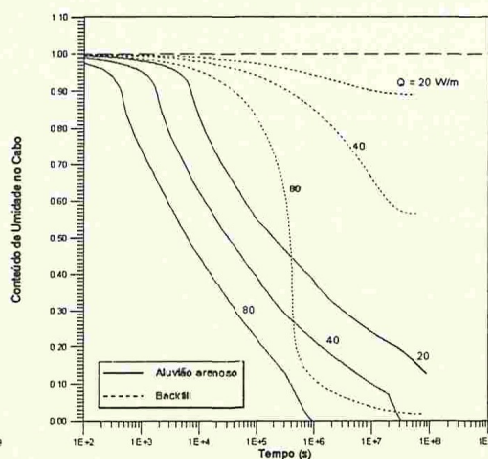


Fig. 3 - Conteúdo de umidade no cabo

A Fig. 3 apresenta os valores do conteúdo de umidade, adimensionalizado em relação ao conteúdo inicial, na superfície junto ao cabo como função do tempo para as diferentes potências dissipadas. A análise das figuras revela que, para o solo aluvião arenoso, a secagem total do solo no período de 3 anos somente não ocorre quando a potência dissipada é igual a 20 W/m, indicando que este material de reaterramento mostra-se pouco eficiente para potências dissipadas mais altas. Para o backfill, a secagem quase completa do solo ocorre somente para o caso mais crítico, potência dissipada igual a 80 W/m. Para os demais casos, o processo de secagem é pouco intenso indicando a eficiência deste material de reaterramento.

As Figs. 4 e 5 apresentam as distribuições de temperatura e conteúdo de umidade, respectivamente, em função do tempo, ao longo de uma linha traçada na altura da profundidade para a potência dissipada pelo cabo de 40 W/m. Esta linha está indicada na Fig.1. Para as distribuições de temperatura observa-se a ocorrência de uma variação na inclinação das curvas em uma determinada posição. Para as distribuições de umidade nota-se que a partir de um determinado valor de umidade ocorre uma secagem intensa do solo. Isto ocorre porque o deixa de existir continuidade na fase líquida. O processo de secagem, que antes era governado pelo coeficiente  $D_{TL}$ , uma vez que existia continuidade da fase líquida, passa a ser governado pelo coeficiente  $D_{TV}$ , devido à presença de vapor nos poros, cujo valor, nesta região de conteúdo de umidade, é relativamente maior propiciando, assim, uma secagem mais intensa. Este ponto é exatamente o mesmo onde ocorre a variação nas inclinações das curvas de distribuição de



temperatura, ou seja, a diferença de inclinação ocorre devido à grande variação das propriedades na região de transição. Outra característica que pode ser observada nas curvas de umidade é o aumento dos conteúdos de umidade além do conteúdo inicial. No início do processo a água presente nos poros da região próxima ao cabo evapora e começa a migrar para longe do cabo; encontra regiões mais frias e condensa-se, aumentando o conteúdo de umidade. Nestes casos, longe do cabo tem-se ainda o conteúdo de umidade igual ao inicial. À medida que o processo evolui, para altos tempos, o conteúdo de umidade nas regiões mais afastadas do cabo aumenta além do conteúdo inicial devido ao acúmulo de umidade proveniente da condensação do vapor nas regiões frias.

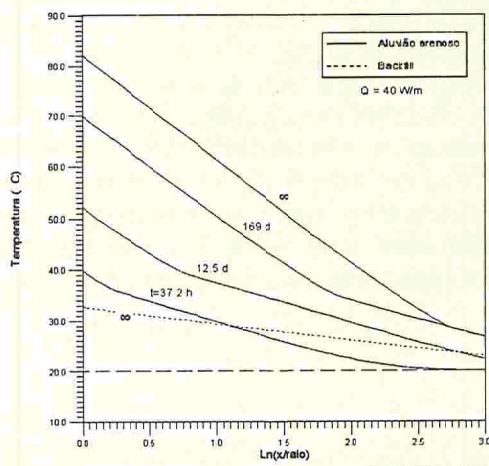


Fig. 4 - Distribuição de Temperatura

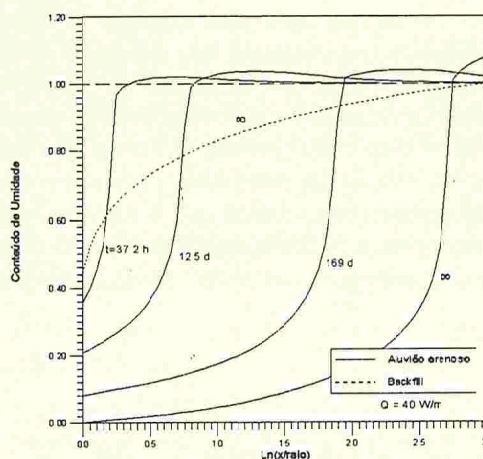


Fig. 5 - Distribuição de Conteúdo de Umidade

A análise das distribuições de umidade indica também que ocorre para o solo aluvião arenoso secagem completa do solo na região próxima ao cabo para valores de tempo elevados. A frente de secagem avança uma pequena distância do cabo tornando o solo nesta região completamente seco. A comparação entre as curvas para estado estacionário para os dois solos revela, mais uma vez, que o material natural é mais eficiente sob o ponto de vista de dissipação do calor nas vizinhanças de cabos aterrados.

### CONCLUSÕES

O presente trabalho analisou o fenômeno da transferência simultânea de calor com migração de umidade em solos que envolvem cabos de potência aterrados. A análise deste fenômeno é de fundamental importância para o projeto destes cabos, pois é através dela que se prevê os processos de secagem evitando assim o eventual rompimento do isolamento do cabo, caso a temperatura do solo atinja um determinado valor limite. Através da análise apresentada conclui-se que o solo natural sofre um processo de aquecimento muito intenso, não sendo recomendado para o aterramento de cabos para o caso de altas potências dissipadas pelo cabo.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Philip, J.R.; De Vries, D.A., "Water movement in Porous Media under Temperature Gradients", Trans. Am. GeophysUnion, vol. 29, pp. 222-232, 1957.
- [2] De Vries, D.A., "Heat Transfer in Soils", Heat and Mass Transfer in Biospherem, pp.5-28, Scripta, Washington, 1975.
- [3] Damasceno Ferreira, L.S., "Transferência de Calor e Migração de Umidade em Solos que Envolvem Cabos de Potência Aterrados", Tese de Doutorado, UFSC, 1993.
- [4] Patankar, S.V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere, Washington, 1980.