



## INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE DE ATERRAMENTO NO PROCESSO DE SECAGEM DE SOLOS QUE ENVOLVEM CABOS DE POTÊNCIA SUBTERRÂNEOS

Ligia Damasceno Ferreira Marczak  
Departamento de Engenharia Química - UFRGS  
Rua Luiz Englert s/nº  
90040-040 Porto Alegre, RS



### RESUMO

*O processo de secagem envolvendo a transferência simultânea de calor e massa em solos nas vizinhanças de cabos elétricos de potência aterrados é investigado numericamente no presente trabalho. A análise é feita para dois tipos de solos, um natural e outro artificial, variando-se a profundidade de aterramento do cabo. São utilizadas coordenadas bicilíndricas e os resultados são apresentados na forma de perfis de temperatura e conteúdo de umidade em função do tempo.*

### INTRODUÇÃO

O processo da transferência simultânea de calor e massa em meios porosos insaturados está presente em diversas áreas da engenharia. Exemplos incluem processos químicos de secagem e umidificação, na engenharia petroquímica, na produção e exploração de petróleo e gás natural, em edificações, no estudo do conforto térmico, na utilização do solo como isolante ou dissipador de energia em linhas de vapor ou cabos elétricos de potência aterrados, entre outros. Este último exemplo é a aplicação da análise desenvolvida no presente trabalho. Fundamentalmente, a passagem de corrente elétrica no interior dos cabos de potência gera calor que necessita ser dissipado pelo meio que o envolve sob pena de danificá-lo por superaquecimento. Este calor gerado induz temperaturas altas na superfície dos cabos criando um gradiente térmico entre esta e o meio ambiente externo. Devido ao aquecimento junto ao cabo a umidade presente nos espaços vazios do solo começa a migrar diminuindo gradativamente o conteúdo de umidade no solo nesta região; como consequência, a resistividade térmica do solo próximo ao cabo aumenta consideravelmente e o mesmo passa a atuar como um isolante térmico. A temperatura superficial do cabo atinge, assim, valores elevados que eventualmente podem ocasionar o rompimento do isolamento do cabo. Usualmente, a temperatura máxima permitida na superfície de um cabo é em torno de 90 °C.

Até o início da década de setenta, as empresas fabricantes de cabos elétricos utilizavam no aterramento de seus cabos o mesmo solo que originalmente era retirado para a formação da vala e diversos problemas de rompimento de cabos devido a problemas de superaquecimento foram verificados. A partir de então a análise dos processos de secagem devido à migração de umidade, que efetivamente ocorrem nas vizinhanças de cabos de potência aterrados, passou a influir consideravelmente no projeto destes cabos.

Alterações nas especificações do cabo, tais como a troca do material de isolamento ou aumento de sua espessura, são soluções teoricamente possíveis para o problema, embora economicamente inviáveis. A solução para o problema recai então na escolha de um material, natural ou artificial, que, mesmo com baixo conteúdo de umidade, seja capaz de dissipar uma quantidade razoável de calor; estes materiais são usualmente denominados de backfill. O objetivo deste trabalho é investigar o processo de dissipação de calor junto a um cabo utilizando dois materiais de reaterramento, um natural e outro artificial, e variando-se a profundidade de aterramento do cabo.

A correta análise dos fenômenos de transferência que ocorrem nos materiais de reaterramento é uma tarefa extremamente difícil em decorrência de diversos fatores. O primeiro deles relaciona-se à própria estrutura do meio, composto por uma complexa matriz sólida e uma distribuição aleatória de espaços vazios. Nestes espaços vazios, denominados poros, coexistem ar, vapor d'água e água na forma líquida. Outro fator dificultante está associado à grande dependência das propriedades difusivas e termofísicas do meio com a temperatura e o conteúdo de umidade. Finalmente existe o fato de que todos os processos de transferência, tanto de calor quanto de umidade (na forma líquida ou na forma vapor) são decorrentes de ambos os gradientes, térmico e mássico.

O modelo contínuo, discutido por Whitaker (1977) e Bories (1991), associado principalmente a Philip e de Vries (1957) para a análise do transporte simultâneo de calor e massa em meios porosos insaturados, é utilizado no presente trabalho. Neste modelo as equações da conservação da massa e da energia são obtidas utilizando-se 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). As equações assim obtidas trazem explicitamente as influências combinadas dos gradientes de temperatura e conteúdo de umidade nos processos de transporte de calor e massa, através de difusividades associadas a estes gradientes.

Para a análise dos resultados apresentados, dois materiais de reaterramento foram utilizados; um solo natural, denominado de aluvião arenoso e outro solo artificial, doravante chamado apenas de backfill. Estes dois solos são efetivamente utilizados no reaterramento de cabos de potência. No modelo utilizado neste trabalho todas as propriedades difusivas e termofísicas dos materiais são consideradas variáveis com a temperatura e a umidade. Para o aluvião arenoso, as expressões analíticas das propriedades foram obtidas experimentalmente por Hartley et al (1982), Hartley e Couvillion (1986) e Hartley (1987); para o backfill as expressões analíticas das propriedades foram obtidas por Oliveira Jr. (1993) e Damasceno Ferreira (1993). As equações diferenciais governantes são resolvidas numericamente e de forma iterativa utilizando o método dos volumes finitos. A geometria do cabo aterrado é simulada utilizando coordenadas bicilíndricas. A análise do problema transiente de transporte de calor e umidade é feita apresentando perfis de temperatura e umidade para vários tempos bem como seus valores junto à superfície do cabo para diferentes profundidades de aterramento do cabo.

## EQUAÇÕES DE TRANSPORTE E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O mecanismo físico de transporte de calor e umidade em um meio poroso insaturado será discutido sucintamente a seguir. Tanto calor quanto umidade (na forma líquida ou na forma vapor) são transportados simultaneamente em decorrência da influência combinada de gradientes de temperatura e de conteúdo de umidade. Calor migra essencialmente por condução através das partes sólidas (grãos) e também através dos poros preenchidos com líquido. Nos poros preenchidos com ar, a migração de calor é predominantemente devido ao transporte de calor latente pelo vapor. Os mecanismos responsáveis pelo transporte de líquido e vapor por sua vez dependem essencialmente da quantidade de água presente no meio. Para um solo relativamente seco onde não existe continuidade na fase líquida a água presente encontra-se somente absorvida nas paredes dos grãos; este é o chamado estado pendular de um meio poroso. A transferência de umidade dá-se através da migração de vapor, que ocorre por difusão no ar, de regiões onde a sua pressão parcial é mais alta para regiões onde sua pressão parcial é mais baixa. Quando se aumenta a quantidade de água nos poros começa a existir pequenas pontes ou ilhas de líquido e quando estas pontes unem-se umas às outras passa a existir continuidade na fase líquida, ainda que exista presença de vapor. Neste caso o líquido é transportado devido ao gradiente do potencial capilar, ou seja, por capilaridade e diz-se que o meio poroso está em estado fúncular. Para um aumento adicional do conteúdo de umidade todos os poros estão preenchidos com água, levando à condição de meio poroso saturado. Não existe mais vapor e, neste caso, líquido somente pode ser transportado devido à diferença de pressão hidrostática ou por efeitos de convecção natural.

Os mecanismos de transporte descritos acima são dependentes basicamente de três propriedades que necessitam ser obtidas experimentalmente a fim de caracterizar um material poroso. Estas propriedades são a condutividade térmica efetiva, o potencial de sucção e a permeabilidade relativa. A condutividade térmica efetiva leva em conta no processo de condução de calor a existência de diferentes fases. O potencial de sucção está relacionado à energia potencial da água presente nos interstícios da matriz sólida, sendo que o seu gradiente é o responsável pela tendência da água escoar no interior de um material poroso. A permeabilidade relativa está associada ao efeito da presença de mais de um fluido nos interstícios da matriz, fazendo com que o escoamento de um fluido seja intimamente influenciado pela presença do outro fluido.

A seguir será apresentada a obtenção das equações diferenciais governantes do fenômeno, onde as seguintes hipóteses simplificativas são assumidas:

1. A massa de vapor d'água presente nos poros é negligenciável comparada à massa de líquido.
2. O vapor e o ar contidos nos poros comportam-se como gases ideais.
3. Não há influência do efeito de histerese.
4. O efeito da presença de solutos na água é desprezado.
5. O meio poroso é isotrópico.
6. A fase sólida é uma matriz rígida e fixa.

A equação para o transporte de umidade é obtida partindo-se da expressão da conservação da massa que estabelece que:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla \cdot \left( \frac{j_v + j_l}{\rho} \right) \quad (1)$$

onde  $j_v$  é o fluxo de vapor,  $j_l$  é o fluxo de líquido,  $\rho$  é a massa específica do líquido e  $\theta$  é o conteúdo volumétrico de umidade, definido como a razão entre o volume de líquido e o volume total, que inclui o volume de vazios e o volume de grãos do meio poroso. Vale notar que, conforme estabelecido anteriormente

(hipótese 1), a massa de vapor foi ignorada em presença da massa de líquido.

O lado esquerdo da equação (1) representa o acúmulo de umidade em um volume infinitesimal de meio poroso. O fluxo de vapor  $j_v$  é obtido a partir da Lei de Fick para a difusão de vapor d'água no ar, modificando-a para incluir os efeitos da dependência da taxa de difusão com a porosidade, conforme é discutido por Philip e de Vries (1957). São incluídos assim variáveis relacionadas à tortuosidade do meio poroso e à redução da seção de passagem do vapor devido à presença do líquido. A expressão final obtida tem a seguinte forma:

$$\frac{j_v}{\rho} = -(D_{Tv} \nabla T + D_{\theta v} \nabla \theta) \quad (2)$$

onde  $D_{Tv}$  e  $D_{\theta v}$  são as difusividades do vapor associadas aos gradientes de temperatura e conteúdo de umidade, respectivamente. Vale notar que o fluxo de vapor  $j_v$  está escrito como uma soma de duas componentes, uma devido ao gradiente térmico e outra devido ao gradiente de umidade.

O fluxo de líquido  $j_l$  pode ser obtido utilizando-se a lei de Darcy modificada para ser aplicável a fluxos viscosos em sistemas porosos não saturados, conforme discutido por Childs e Collins-George (1950); a expressão obtida é:

$$\frac{j_l}{\rho} = -(D_{Tl} \nabla T + D_{\theta l} \nabla \theta - K_H \nabla z) \quad (3)$$

onde  $D_{Tl}$  e  $D_{\theta l}$  são as difusividades do líquido associadas aos gradientes de temperatura e umidade, respectivamente e  $K_H$  é a condutividade hidráulica do meio poroso. O último termo do lado direito da equação (3) corresponde à contribuição da ação da gravidade sobre o escoamento de líquido. Neste caso, também o fluxo de líquido é escrito como uma soma de duas componentes, uma devido ao gradiente de temperatura e outra decorrente do gradiente de umidade; a incorporação explícita destes efeitos individuais nos fluxos de líquido e vapor constitui a grande contribuição do modelo fenomenológico de Philip e de Vries.

A equação de conservação de energia em um meio poroso não saturado, incluindo o transporte de calor por difusão térmica e o calor transportado pelo líquido e vapor, pode ser escrito da seguinte forma:

$$\frac{\partial (CT)}{\partial t} = \nabla \cdot [k_* \nabla T + (h_l + h_{lv}) j_v + h_l j_l] \quad (4)$$

onde  $T$  é a temperatura,  $C$  é a capacidade calorífica do solo, que contém uma contribuição ponderada da capacidade calorífica das diversas fases (de Vries 1975);  $k_*$  é a condutividade térmica para o caso hipotético de não existir fluxo de líquido ou vapor;  $h_l$  é a entalpia do líquido e  $h_{lv}$  é a entalpia de vaporização.

O lado esquerdo da equação (4) representa o acúmulo de energia em um volume infinitesimal do meio poroso. O primeiro termo do lado direito representa o calor transportado por condução térmica. O segundo termo indica a energia transportada pelo vapor na forma de calor sensível e latente enquanto que a energia transportada pelo líquido na forma de calor sensível está representada pelo terceiro termo. A equação (4) pode ser simplificada considerando que a entalpia de vaporização  $h_{lv}$  é muito maior que a entalpia do líquido e que os fluxos de líquido e vapor têm sentidos opostos; o resultado obtido é soma dos efeitos de transporte de calor difusivo e transporte de calor latente pelo vapor:

$$\frac{\partial (CT)}{\partial t} = \nabla \cdot (k_* \nabla T + h_{lv} j_v) \quad (5)$$

As equações da conservação da massa e da energia para o problema são obtidas substituindo-se as equações para os fluxos de vapor e líquido, equações (2) e (3), respectivamente, nas equações (1) e (5). Maiores detalhes sobre a obtenção das equações governantes e das difusividades podem ser encontradas em Damasceno Ferreira (1993). As expressões finais serão apresentadas considerando o sistema de coordenadas utilizado no presente trabalho e serão mostradas logo a seguir.

A geometria do problema está esquematizada na Fig. 1 onde 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 do mesmo.

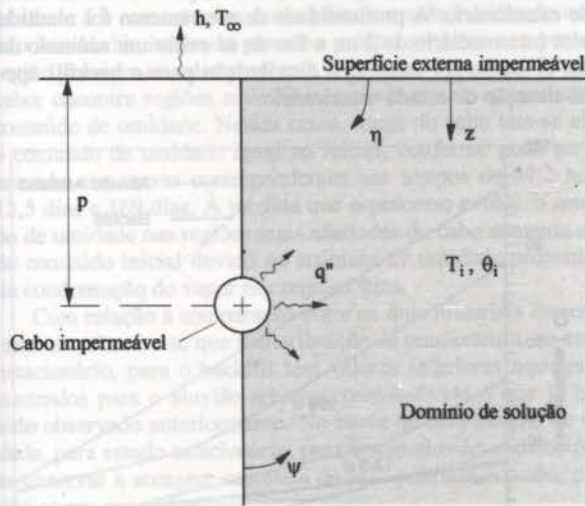


Fig. 1 - Geometria do problema.

Considerando os eixos coordenados utilizados, a equação da conservação da massa é escrita finalmente como sendo:

$$\frac{\partial(\sqrt{g}\theta)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \eta} \left[ (D_T) \frac{\sqrt{g}}{g_\eta} \frac{\partial T}{\partial \eta} + (D_\theta) \frac{\sqrt{g}}{g_\eta} \frac{\partial \theta}{\partial \eta} - \sqrt{g} K_H z \right] + \frac{\partial}{\partial \psi} \left[ (D_T) \frac{\sqrt{g}}{g_\psi} \frac{\partial T}{\partial \psi} + (D_\theta) \frac{\sqrt{g}}{g_\psi} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} - \sqrt{g} K_H z \right] \quad (6)$$

onde  $D_T$  é a difusividade térmica total ( $D_{Tv} + D_{Tl}$ ) e  $D_\theta$  é difusividade isotérmica total ( $D_{\theta v} + D_{\theta l}$ ). As variáveis  $g_\eta$  e  $g_\psi$  (sendo que  $g = g_\eta \cdot g_\psi$ ) são os coeficientes métricos do mapeamento que transforma o sistema de coordenadas bicilíndrico no sistema cartesiano, conforme discutido com maiores detalhes por Damasceno Ferreira (1993).

A equação da conservação da energia tem finalmente a seguinte forma:

$$\frac{\partial(\sqrt{g}CT)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \eta} \left[ (k_* + \rho h_{iv} D_{Tv}) \frac{\sqrt{g}}{g_\eta} \frac{\partial T}{\partial \eta} + \rho h_{iv} D_{\theta v} \frac{\sqrt{g}}{g_\eta} \frac{\partial \theta}{\partial \eta} \right] + \frac{\partial}{\partial \psi} \left[ (k_* + \rho h_{iv} D_{Tv}) \frac{\sqrt{g}}{g_\psi} \frac{\partial T}{\partial \psi} + \rho h_{iv} D_{\theta v} \frac{\sqrt{g}}{g_\psi} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \right] \quad (7)$$

As condições iniciais e de contorno que devem ser satisfeitas pelas equações (6) e (7) podem ser visualizadas na 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 (6) e (7), foram resolvidas numericamente utilizando o método dos volumes finitos (Patankar, 1980), com a integração temporal utilizando um esquema implícito. Na discretização do domínio de solução, mostrado na Fig. 1, foram utilizados 100 volumes de controle na direção  $\eta$ , com refino de malha na região próxima ao cabo, e 30 volumes de controle 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 intervalo 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 secagem de solos que envolvem cabos de potência aterrados é feita considerando como material de reatamento dois solos, um natural e outro artificial. O conteúdo inicial de umidade do solo foi mantido em 0,15 para o aluvião arenoso e 0,06 para o backfill. Estes valores foram escolhidos por estarem um pouco acima do ponto correspondente à transição entre os estados funicular e pendular destes materiais (0,13 e 0,04 para o aluvião arenoso e para o backfill, respectivamente). Como será discutido mais adiante é exatamente nas proximidades deste valor de conteúdo de umidade que o meio passa a sofrer um processo mais intenso de secagem.

A temperatura inicial do solo e a temperatura ambiente são mantidas constantes e iguais a 20 °C; o coeficiente de transferência de calor convectivo na superfície ambiente é mantido em 15 W/m<sup>2</sup>.s, simulando a existência de uma corrente de ar nesta superfície. Os resultados apresentados foram obtidos considerando o raio cabo é igual a 0,05 m e a potência dissipada pelo mesmo de 40 W/m. A fim de se avaliar a influência da profundidade de aterramento do cabo nos processos de secagem foram feitas simulações considerando que o cabo está aterrado a 1, 2 e 100 m da superfície.

A Fig. 2 apresentam os valores da temperatura junto à superfície do cabo como função do tempo. O parâmetro de curva é a profundidade de aterramento do cabo; as linhas mais finas correspondem ao aluvião arenoso, as linhas mais grossas ao backfill, e as linhas tracejadas à situação inicial.

A análise desta figura revela o intenso aquecimento que ocorre para o solo natural (aluvião arenoso) em comparação com o solo artificial (backfill). Para as três profundidades de aterramento mostradas, a temperatura na superfície do cabo ultrapassa a de 70 °C mostrando que, sob o ponto de vista térmico, o solo aluvião arenoso não é efetivamente recomendado para uso no aterramento de cabos de potência. Para as curvas correspondentes ao backfill e para as profundidades de aterramento de 1 e 2 m, observa-se a existência de patamares indicando que o estado estacionário foi atingido. Estes patamares não se formam para o solo aluvião arenoso, indicando um processo contínuo de aquecimento, mesmo para tempos muito altos. Vale salientar que a simulação mostrada corresponde a um tempo real de mais de três anos.

Com relação à profundidade de aterramento, observa-se que para tempos pequenos não há influência da profundidade no processo de aquecimento; à medida que o tempo passa, contudo, tem-se um aumento na temperatura do cabo que é tanto maior

quanto maior a profundidade. Com efeito, no início do processo de aquecimento, a presença da fronteira relativa à superfície do meio ambiente não é "sentida" pela região mais próxima ao cabo. Para tempos maiores, a frente de aquecimento avança para longe do cabo e passa a sofrer a influência do contorno externo. Para o caso da profundidade igual a 100 m, pode-se considerar que não há fronteira externa e a temperatura no cabo aumenta indefinidamente. Para a profundidade igual a 2 m, entretanto, observa-se a existência de um patamar indicando que o regime estacionário foi atingido; além disto, a temperatura no cabo é maior do que aquela correspondente à profundidade de 1 m.

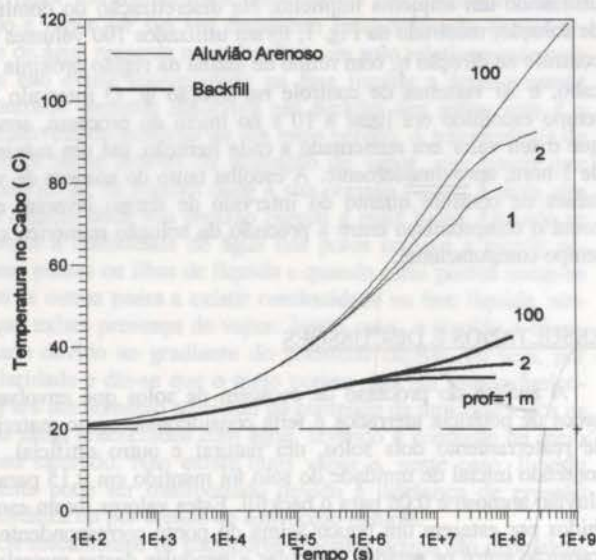


Fig. 2 - Temperatura no cabo

A Fig. 3 apresenta os valores do conteúdo de umidade, adimensionalizado em relação ao conteúdo inicial de umidade, junto à superfície adjacente ao cabo. Tais conteúdos de umidade estão em função do tempo para os dois materiais e para as três profundidades.

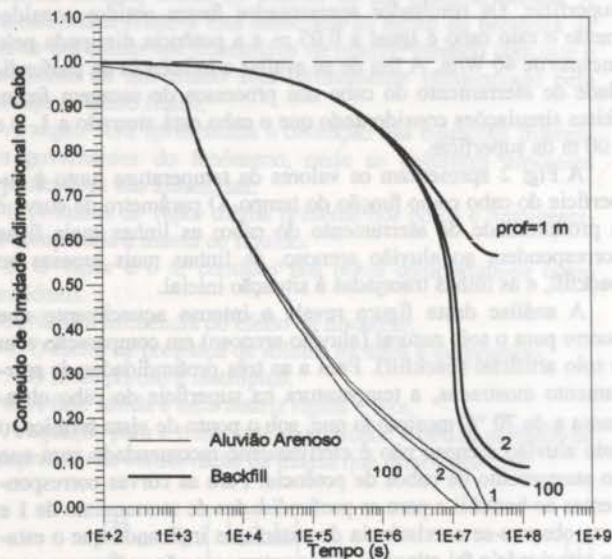


Fig. 3 - Conteúdo de umidade adimensional no cabo

As curvas correspondentes ao solo aluvião arenoso mostram um processo intenso de secagem, atingindo inclusive a situação de secagem total; para o backfill, tem-se curvas que mostram a secagem relativamente intensa do solo, e também a tendência de que o estado estacionário seja atingido sem que o solo seque

completamente. Para as curvas do solo aluvião arenoso, observa-se que ocorre uma pequena diferença entre elas, para tempos maiores, fazendo com que o solo que envolve o cabo que tem maior profundidade atinja a secagem total com menor tempo. Isto ocorre pelas mesmas razões discutidas anteriormente. Para as curvas do backfill, observa-se um decaimento que é tanto mais acentuado quanto maior a profundidades de aterramento indicando que o solo atinge um ponto onde a variação das propriedades pode ocasionar um processo mais efetivo de secagem.

As Figs. 4 e 5 apresentam as distribuições de temperatura e conteúdo de umidade adimensional, respectivamente, ao longo de uma linha horizontal traçada na altura da profundidade. Neste caso, o parâmetro de curva é o tempo que varia de valores próximos ao início do processo até tempos onde assume-se estado estacionário. A profundidade de aterramento foi mantida no valor intermediário de 2 m; a fim de se evitar um acúmulo de curvas, optou-se por mostrar a distribuição para o backfill apenas na situação de estado estacionário.

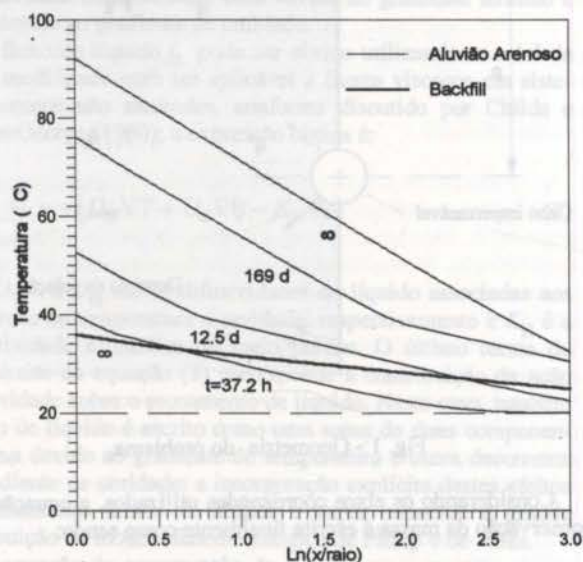


Fig. 4 - Distribuições de temperatura

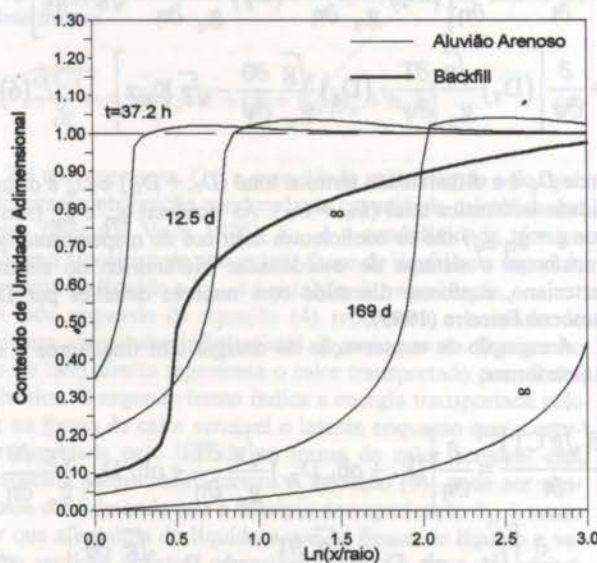


Fig. 5 - Distribuições de umidade adimensional

As distribuições de temperatura e de umidade mostram os avanços das frentes de aquecimento e de secagem à medida que o tempo evolui. Observa-se ainda que ocorre uma variação na inclinação das curvas de temperatura e um decaimento brusco

nas curvas de umidade para uma determinada posição (note que esta posição é a mesma nos dois gráficos). Quando a umidade atinge o ponto de transição entre os estados funicular e pendular,  $\theta$  aproximadamente igual a 0,13 para o aluvião arenoso e aproximadamente igual a 0,04 para o backfill, ocorre uma secagem intensa do solo. 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. A grande variação das propriedades nesta região de transição é a responsável pela ocorrência das variações nas inclinações das curvas de distribuição de temperatura.

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, conforme pode ser observado nas curvas correspondentes aos tempos de 37,2 horas, 12,5 dias e 169 dias. À medida que o processo evolui, 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.

Com relação à comparação entre os dois materiais de reateramento, observa-se que a distribuição de temperatura, no estado estacionário, para o backfill tem valores inferiores aqueles encontrados para o aluvião arenoso, corroborando o que já havia sido observado anteriormente. Na curva de distribuição de umidade, para estado estacionário, para o solo aluvião arenoso pode-se observar a secagem completa do solo próximo ao cabo, o que não ocorre para o backfill.

As Figs. 5 e 6 apresentam as distribuições de temperatura e conteúdo de umidade adimensional, para o estado estacionário, para os dois materiais tendo a profundidade de aterramento como parâmetro de curva.

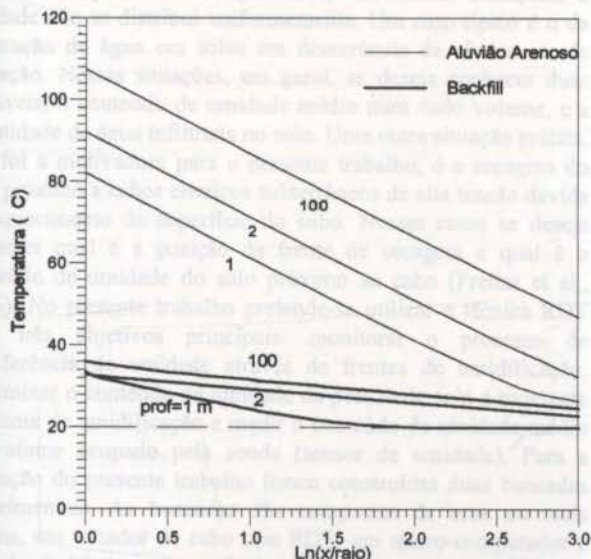


Fig. 5 - Distribuições de temperatura para estado estacionário

As mesmas características comentadas anteriormente a respeito da passagem pelo ponto de transição dos estados pendular e funicular podem ser observadas nestas figuras, especialmente nas curvas do backfill; ocorre uma variação nas inclinações das curvas de temperatura e um decaimento brusco nas curvas de umidade. Com relação à comparação entre os dois materiais observa-se novamente que os valores de temperatura atingidos pelo backfill são muito inferiores aos valores correspondentes ao

aluvião arenoso e que a secagem total do solo somente ocorre para este último, indicando, mais uma vez, que o solo artificial (backfill) é um material efetivamente mais eficiente sob o ponto de vista de dissipação térmica.

A comparação entre as curvas para as diferentes profundidades de aterramento mostra que, conforme o esperado, quanto maior a profundidade de aterramento mais intenso é o processo de aquecimento e de secagem do solo. Com efeito, a presença da fronteira externa relativa ao meio ambiente mais próxima ao cabo tende a minimizar o processo de aquecimento pois possibilita uma maior troca térmica entre o solo e o meio externo. À medida que a profundidade de aterramento aumenta esta fronteira se distancia do cabo fazendo com que a temperatura no solo aumente propiciando também uma maior secagem do solo.

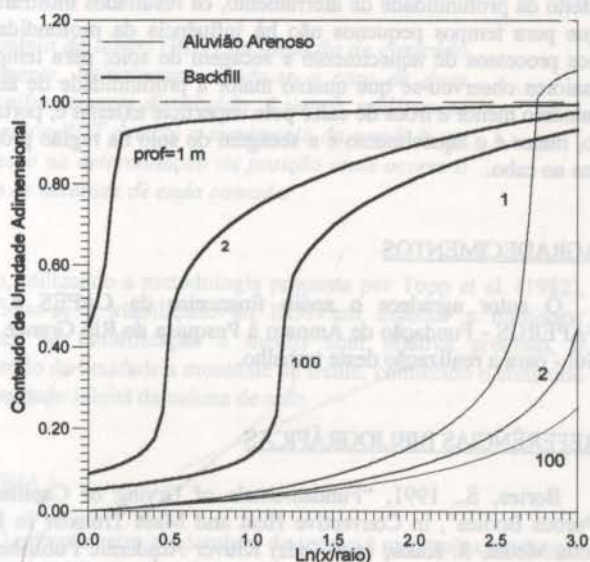


Fig. 6 - Distribuições de umidade adimensional para estado estacionário

## CONCLUSÕES

O presente trabalho analisou o fenômeno da transferência simultânea de calor e massa 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.

Este processo envolve fundamentalmente o transporte de calor e umidade (na forma líquida e na forma vapor) em meios porosos insaturados e foi descrito matematicamente utilizando o modelo contínuo primeiramente apresentado por Philip de Vries (1957). Neste modelo as leis fenomenológicas de Fick, Darcy e Fourier são utilizadas nas equações de conservação de massa e energia e as equações resultantes trazem explicitamente as influências combinadas dos gradientes de temperatura e conteúdo de umidade em ambos os processos de transferência de calor e de massa. O objetivo deste trabalho foi investigar o processo de secagem que ocorre em dois materiais de reateramento distintos, um natural e outro artificial, variando-se a profundidade de reateramento do cabo. Todas as propriedades de transporte utilizadas no modelo matemático foram consideradas variáveis com a temperatura e o conteúdo de umidade. As equações diferenciais governantes do problema, equações da conservação da energia e da massa, foram resolvidas numericamente utilizando a técnica dos volumes finitos. A simulação da situação real de aterramento de um cabo de potência foi feita utilizando coordenadas bicilíndricas.

Os resultados obtidos da comparação entre os dois materiais de aterramento revelou que o material artificial (backfill) é mais eficiente sob o ponto de vista de dissipação térmica quando comparado ao material natural (aluvião arenoso). Em todas os casos vistos a temperatura na região próxima ao cabo para o backfill é muito inferior do que a temperatura para o solo aluvião arenoso. Nas curvas de umidade, este efeito é verificado através do atenuamento do processo de secagem. Nas curvas correspondentes às distribuições de temperatura e de conteúdo de umidade adimensional observa-se claramente o avanço das frentes de aquecimento e de secagem; também pode-se notar a passagem pelo ponto de conteúdo de umidade onde deixa de existir continuidade na fase líquida, ou seja, quando o meio passa do estado funicular para o estado pendular. Com relação ao efeito da profundidade de aterramento, os resultados mostraram que para tempos pequenos não há influência da profundidade nos processos de aquecimento e secagem do solo; para tempos maiores observou-se que quanto maior a profundidade de aterramento menor a troca de calor pela superfície externa e, portanto, maior é o aquecimento e a secagem do solo na região próxima ao cabo.

**AGRADECIMENTOS**

O autor agradece o apoio financeiro da CAPES e da FAPERGS - Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio Grande do Sul - para a realização deste trabalho.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Bories, S., 1991, "Fundamentals of Drying of Capillary-Porous Bodies", in *Convective Heat and Mass Transfer in Porous Media*, S. Kakaç et al (eds) Kluwer Academic Publishers, pp. 391-434.

Damasceno Ferreira, L.S., 1993, "Transferência de Calor e Migração de Umidade em Solos que Envolvem Cabos de Potência Aterrados", Tese de Doutorado, UFSC.

De Vries, D.A., 1975, "Heat Transfer in Soils", *Heat and Mass Transfer in Biosphere*, pp. 5-28, Scripta, Washington.

Hartley, J.G., 1987, "Coupled Heat and Moisture Migration in Soils: A Review", Chapter 4 in *Advances in Drying*, A.S. Mujumdar (ed), Hemisphere, Washington.

Hartley, J.G., Couvillion, R.J., 1981, "Drying Front Movement Near Low-Intensity, Impermeable Underground Heat Sources", *J. Heat Transfer*, vol. 108, pp. 182-189.

Hartley, J.G.; Black, W.; Bush, R.A.; Martin Jr, M.A., 1982, "Thermal Stability of Soils Adjacent to Underground Transmission Power Cables", Technical Report of Georgia, Institute of Technology for EPRI.

Oliveira Jr., A.A.M., 1993, "Caracterização das Propriedades Termo-Hidráulicas de Materiais Artificiais para Reaterro de Cabos Elétricos de Potência", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina.

Patankar, S.V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere, Washington.

Phillip, J.R.; De Vries, D.A., 1957, "Water movement in Porous Media under Temperature Gradients", *Trans. Am. Geophys. Union*, vol. 29, pp. 222-232.

Childs, E.C.; Collis-George, N. (1950), "The Permeability of Porous Materials", *Proc. Roy. Soc.*, vol. 201A, pp. 392-405.

Whitaker, S. (1977), "Simultaneous Heat Massa and Momentum Transfer in Porous Media", *Drying Technology*, vol. 1, pp. 3-33.

**ABSTRACT**

The present work deals with the drying process that involves simultaneous heat and mass transfer in soils surrounding underground electric power cables. A numerical analysis is performed using a control volume method in conjunction with a bicylindrical coordinate system to simulate the buried cable. Two different soils are investigated as burying material, one natural and other artificial. The results are presented in the form of temperature and nondimensional moisture content profiles as a function of time, for different burying depths of the cable.

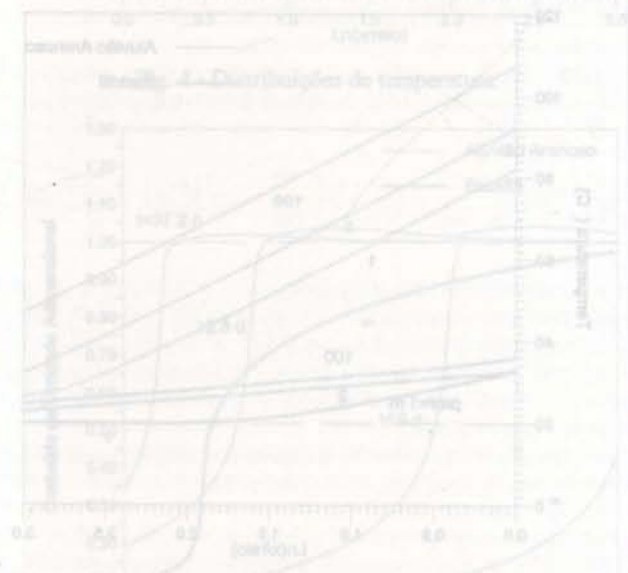


Fig. 2 - Distribuição de temperatura para diferentes profundidades de aterramento.