

GSE/018

21 a 26 de Outubro de 2001  
Campinas - São Paulo - Brasil

## GRUPO VIII

### GRUPO DE ESTUDOS DE SUBESTAÇÕES, EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E MATERIAIS - GSE

#### O FENÔMENO DA ELETROSMOSE E SUA INFLUÊNCIA NA OPERAÇÃO SEGURA DE ELETRODOS DE TERRA DE CCAT

José Eduardo Telles Villas, DSc

Carlos Medeiros Portela, DSc

MARTE ENGENHARIA, UERJ  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

COPPE, UFRJ  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

#### RESUMO

O presente artigo apresenta a formulação teórica de um modelo, aplicável a configurações genéricas de engenharia (eletrodos em anel, hastes verticais, etc.) e meios solos homogêneos ou não homogêneos, que permite considerar os principais mecanismos de interesse (térmicos, hidráulicos e eletrosmóticos, dentre outros) que interagem no fenômeno de aquecimento do solo quando da operação prolongada de um sistema CCAT usando a terra.

Especial atenção é dada ao fenômeno da eletrosmose assim como a influência da componente da pressão de vapor de água na velocidade de migração da água presente no meio, afetando de forma bastante significativa os parâmetros do solo (resistividade elétrica, condutividade térmica, etc.).

#### PALAVRAS-CHAVE:

Eletrosmose, aquecimento do solo, eletrodo de terra.

#### 1.0 INTRODUÇÃO

O artigo [1] assinala as principais razões que conduziram a inexatidões nos artigos [3], [4], [5] de renomados autores/pesquisadores, destacando-se dentre elas, a omissão nas equações clássicas de calor, da componente de transferência do solo para o ar por convecção, para efeito de cálculo das temperaturas ao redor de um eletrodo de terra e a evolução dessas temperaturas (aquecimento) função da operação contínua do eletrodo.

Destarte, das metodologias disponíveis na literatura especializada, assinala-se que o fenômeno da eletrosmose não é levado em consideração. Sua inclusão é fundamental para a correta interação com os outros fenômenos envolvidos, em face do real risco de vitrificação do solo ao redor do eletrodo devido a elevadas temperaturas que podem resultar no solo. A relevância do tema se traduz pela possibilidade de

perda irreversível do eletrodo e a necessidade premente de se construir um outro, em que pese o período de tempo necessário (2 anos), visando a operação do sistema de CCAT. Ressalta-se ainda, a ocorrência desse fenômeno em três instalações, dentre as que se acham em operação no mundo.

#### 2.0 PRINCIPAIS VARIÁVEIS DO FENÔMENO EM ANÁLISE

O solo representa um papel primordial quanto ao desempenho dos eletrodos, pelo fato de uma corrente estar continuamente circulando por ele. Como o solo não se comporta como um material bem definido, é necessário considerar-se um grande número de aspectos e parâmetros, como os indicados no QUADRO 1 [2,6], com maior ou menor importância consoante o caso, assim como a análise de suas características não somente a elevadas distâncias do eletrodo como a expressivas profundidades.

#### QUADRO 1 – Parâmetros do Solo que influenciam o desempenho e Projeto dos Eletrodos de Terra.

- resistividade elétrica; condutividade térmica; calor específico; estrutura e índices físicos; dependência dos parâmetros com a umidade, temperatura e frequência; grau de umidade e substâncias na água; heterogeneidade dos parâmetros e sua variação com o tempo (climáticas e meteorológicas); temperaturas ambientes do solo e ar; parâmetros de movimentos dos fluidos; pH; curva de polarização; lençol freático; estabilidade mecânica; restrições devido a erosão;
--

A TABELA 1 mostra os fenômenos envolvidos que podem ocorrer em um solo úmido (a níveis microscópicos/macrocópicos) de fluxos hidráulicos, elétricos, térmicos e químicos devido as interações das forças responsáveis por eles, e correlaciona os fluxos acoplados resultantes das ações de um dado gradiente de fluxo sobre os demais. Dos 12 fluxos acoplados, apenas os em negrito são significativos para o assunto em análise, em adição aos 4 fluxos diretos.

TABELA 1 - Fluxos Diretos e Acoplados

	Gradiente			
Fluxo	Hidráulico	Térmico	Elétrico	Químico
Fluido	Lei de Darcy	Termoosmose	Eletroosmose	Osmose Química
Calor	Transferência de Calor	Lei de Fourier	Efeito Peltier	Efeito Dufour
Corrente	Correntes Elétricas	Efeito Seebeck	Lei de Ohm	Difusão
Íon	Correntes Iônicas	Efeito Soret	Eletroporose	Lei de Fick

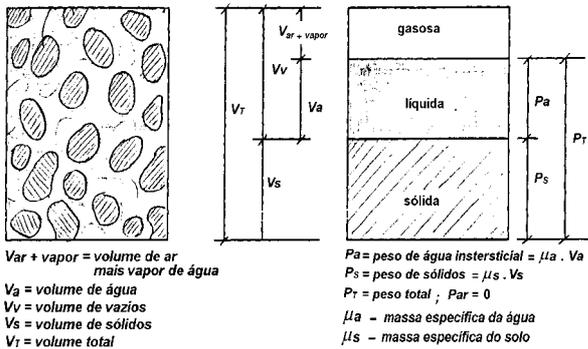


FIGURA 1 – Relação entre as Fases do Solo.	
Porosidade ( $\pi$ ): $\delta(\%) = (V_v / V_T) \cdot 100$	Índice de Vazio ( $I_v$ ): $I_v = (V_v / V_s)$
Grau de Saturação ( $G_s$ ): $G_s(\%) = (V_a / V_v) \cdot 100$	Umidade ( $u$ ): $u(\%) = (P_a / P_s) \cdot 100$

A FIGURA 1 mostra os índices físicos para as três fases que compõem o solo: partículas sólidas, água e ar. Para uma dada amostra do solo, tendo um volume total  $V_T$ , os volumes  $V_a$  e  $V_{ar}$  são, respectivamente, relacionados aos conteúdos de água e ar (inclusive nesse o volume de vapor de água). O peso total dos sólidos é  $P_s$ , sendo  $P_a$  para a água e o peso do ar  $P_{ar}$  é suposto nulo.

### 3.0 FORMULAÇÃO FÍSICO-MATEMÁTICA SIMPLIFICADA DA ELETROOSMOSE

Visando uma interpretação dos efeitos resultantes do fenômeno da eletroosmose, em [2] é apresentada uma formulação simplificada em regime estabilizado, aplicada a um eletrodo toroidal. Assim, para uma distância qualquer  $r$ , tal que  $r_0 \leq r \leq r_1$  e uma corrente  $i$  por unidade de comprimento injetada no eletrodo e difundindo-se para o solo, são válidas as expressões (ver FIGURA 2):

- Velocidade da água no solo estando o solo em presença de termodifusão e eletroosmose:

$$v = -k_h \cdot \tilde{n}_O \cdot (\text{grad } u + \tilde{a}_T \cdot \text{grad } T - \frac{Ke}{k_h \cdot \tilde{n}_O} \cdot E) \quad \dots(1)$$

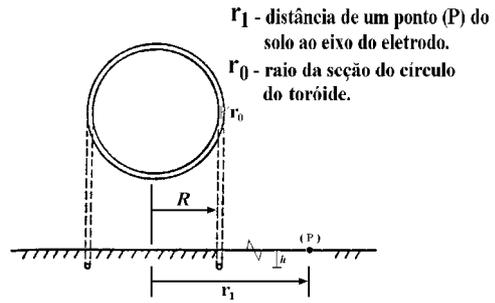


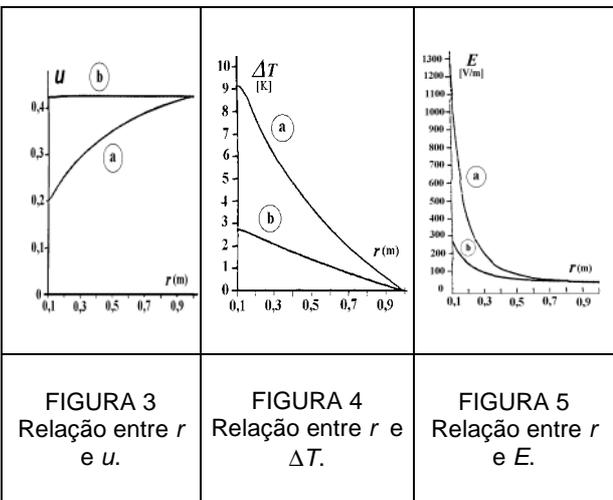
FIGURA 2 - Representação esquemática da disposição de um eletrodo em anel [2].

Como a análise efetuada retrata as condições em que as forças que interagem no fenômeno acham-se estabilizadas, não há portanto arrastamento de fluxo de água ( $v=0$ ). Logo, dada a condição de simetria cilíndrica do eletrodo em estudo, tem-se:

$$\frac{du}{dr} = -\tilde{a}_T \cdot \frac{dT}{dr} + \frac{Ke}{k_h \cdot \tilde{n}_O} \cdot E \quad \dots(2)$$

$$\frac{dT}{dr} = -\frac{i^2}{4 \cdot \delta^2} \cdot \frac{\tilde{n}_T}{r} \cdot \int_{r_0}^r \frac{\tilde{n}}{r} \cdot dr \quad \dots(3)$$

Com base nos resultados indicados em [2] e [3], tem-se os efeitos de termodifusão e eletroosmose no cálculo do campo eletromagnético e parâmetros correlatos e expressos nas FIGURAS 3, 4 e 5, representando, respectivamente, a umidade ( $u$ ), a variação da temperatura ( $\Delta T$ ) e o campo elétrico ( $E$ ) em função de  $r$ , para umidade do solo  $u_0$  junto ao eletrodo ( $r = r_0$ ) igual a 0,2. As curvas *a* incluem os efeitos citados, e as curvas *b*, a hipótese de se desprezar esses efeitos na umidade do solo. Do exposto, constata-se ser essencial considerar-se a termodifusão e a eletroosmose, sendo inadequado desprezar-se a variação da umidade e sua influência nos demais parâmetros do solo (resistividades elétrica e térmica, permeabilidade, entre outros).



#### 4.0 FORMULAÇÃO FÍSICO-MATEMÁTICA PROPOSTA PARA A ELETROOSMOSE

Os aspectos mencionados são incluídos na formulação abaixo:

a - Caracterização da Região de Influência de Provável Ocorrência da Eletroosmose ( $N_{XZ}$ ):

A região suposta para provável ocorrência do fenômeno de eletroosmose situa-se, conforme literatura especializada, no entorno do eletrodo, a uma distância não superior a 1 m. Dada a simetria existente normalmente para os eletrodos (no caso em anel com seção toroidal), será avaliada apenas uma seção transversal deste. Assim, essa região, situada no plano X-Z, pode ser traduzida pelo número total de nós existentes  $N_{XZ}$ , o qual é função do reticulado ("grid") adotado para a área correspondente no Método de Diferenças Finitas.

b - Volume de água Existente por Unidade de Comprimento do Eletrodo na Região de Influência ( $W_{XZ}$ ) – ver FIGURA 6:

Esse volume por unidade de comprimento do eletrodo é função da umidade inicial do solo (sendo ainda nula a corrente no eletrodo de terra) e expresso por:

$$W_{XZ} = \frac{V_r - V_e}{2 \cdot \delta \cdot R} \cdot u_{(0)} \cdot \frac{\dot{z}_s}{\dot{z}_a} = \delta \cdot (R_2^2 - R_1^2) \cdot u_{(0)} \cdot \frac{\dot{z}_s}{\dot{z}_a} \quad \dots(4)$$

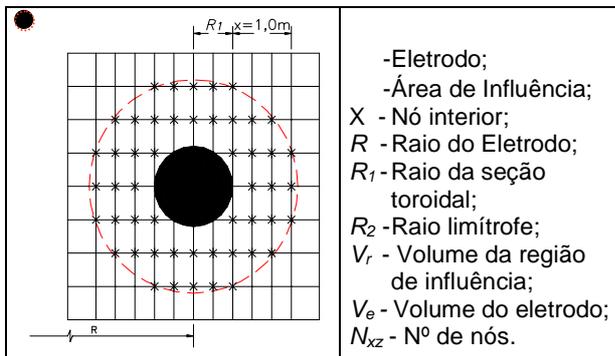


FIGURA 6 - Região de interesse para cálculo da Eletroosmose

c - Volume de água por Unidade de Comprimento do Eletrodo em cada Domínio de nó P da Região de Influência  $W_P(t=0+)$  no instante  $t=0+$ :

Visto os fenômenos envolvidos serem "lentos", apresentando constantes de tempo elevadas (ordem de semanas), esse volume por unidade de comprimento do eletrodo é calculado dividindo-se o volume total de água  $W_{XZ}$  existente pelo número de nós  $N_{XZ}$  nessa região.

$$W_P(t=0+) = W_{XZ}/N_{XZ} \quad \dots(5)$$

d - Volume de água por Unidade de Comprimento do Eletrodo em cada Domínio de nó P da Região de Influência  $W_P(t)$  em um dado instante  $t$ :

Esse volume é calculado pela equação de velocidade do fluxo de água  $v_P(t)$ , que considera:

- os fenômenos hidráulicos/termodifusão como resultados de diferenças de umidades (pressões)/temperaturas entre os nós (distribuição espacial);
- a ação da eletroosmose no nó em questão (arrastamento das moléculas de água pela passagem da corrente elétrica);
- a força exercida por unidade diferencial de área na coluna de água entre nós consecutivos (distribuição espacial) como resultado da diferença de pressão de vapor de água entre esses nós, face ao processo gradativo de evaporação da água no solo por aumento de temperatura do meio.

$$v_P(t) = -k_h \cdot \frac{\partial u(t)}{\partial x} - k_h \cdot \ddot{a}_T \cdot \ddot{a}_O \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + Ke \cdot E + \frac{v_c}{v_d} \cdot \frac{1}{W_P(t)} \cdot \frac{\partial P_{vapor}(t)}{\partial x} \cdot A \quad \dots(6)$$

Entretanto, como não se conhece "a priori" o valor da umidade  $u(t)$  para o nó em estudo no instante de tempo desejado ( $t = i \cdot \Delta t$ ), supõe-se inicialmente esse igual ao instante anterior ( $t = (i-1) \cdot \Delta t$ ) e calcula-se um valor de velocidade inicial de migração da água. A partir desse valor, pode-se obter a correspondente vazão de água por unidade de comprimento do eletrodo  $Q_{hP}(t)$ , multiplicando-se a velocidade do fluxo obtida pela área diferencial  $dS$  do domínio do nó em estudo expressa em (7), e determinar-se o volume de água perdido por unidade de comprimento do eletrodo  $\Delta W_P(t)$  nesse domínio de nó, por migração das moléculas de água no intervalo de tempo  $\Delta t$  considerado. A TABELA 2 sumariza as expressões pertinentes:

TABELA 2 – Expressões Aplicáveis	
$dS = \delta \cdot [(R_2^2 - R_1^2) / NXZ]$	... (7)
$Q_{hP}(t) = v_P(t) \cdot [dS / (2 \cdot \delta \cdot R)]$	... (8)
$\Delta W_P(t) = Q_{hP}(t) \cdot \Delta t$	... (9)
$W_P(t) = W_P(t=0+) - \Delta W_P(t)$	... (10)
$u(t) = \frac{W_P(t)}{\dot{z}_s \cdot V_s} = \frac{W_P(t)}{W_P(t=0+)} \cdot u(0)$	... (11)

A partir do volume de água perdido por unidade de comprimento do eletrodo, obtém-se um novo valor tanto para a água remanescente  $W_P(t)$  como de umidade  $u(t)$  no domínio do nó em estudo. Efetua-se, então, as correções nos parâmetros das resistividades elétrica e térmica, permeabilidade e na relação entre os coeficientes de termodifusão e de difusão (hidraulicidade) do fluido  $\delta_T$ , em função tanto da umidade como da temperatura resultantes, face a dependência desses parâmetros a essas grandezas.

Um processo iterativo permite calcular a velocidade de migração da água  $v_P(t)$  no nó em estudo para o intervalo de tempo em questão até que o valor de

tolerância definido pelo usuário entre as velocidades obtidas entre a última iteração e a imediatamente anterior seja satisfeito. Atendido o critério adotado para a tolerância, com o valor da velocidade de migração da água resultante no nó para o intervalo de tempo considerado, pode-se calcular o volume de água perdido por unidade de comprimento do eletrodo e o valor de umidade resultante no domínio desse nó.

e - Curvas Temporais de Distribuições Espaciais da Umidade:

Na FIGURA 7, tem-se, de forma esquemática, curvas temporais de distribuições espaciais da umidade junto a um eletrodo. No instante inicial  $t = 0$ , a umidade no solo é suposta constante e igual a  $u(0)=U_0$ . A partir de  $t = 0+$ , injeta-se uma corrente  $I$  no eletrodo, podendo-se observar uma idealização da evolução temporal da umidade  $u(t)$  desde  $t = 0$  até  $t = \infty$ , onde supõe-se atingido um estado de “equilíbrio” térmico e de umidade, com anulamento do movimento de umidade. Essas curvas permitem detectar se a condição operativa imposta ao eletrodo, tanto do ponto de vista de corrente máxima admissível como de duração (tempo de operação), pode propiciar condições que ponham em risco à integridade da instalação (“secagem” quase total da umidade do solo na vizinhança do eletrodo de terra e “colapso” do mesmo por aquecimento).

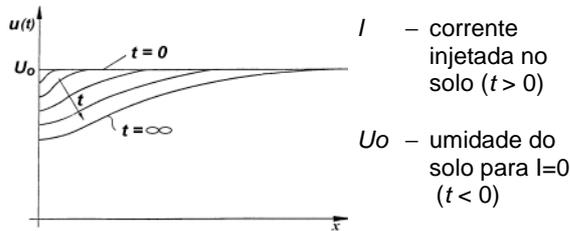


FIGURA 7 - Umidade  $u$  no solo junto ao eletrodo em função da distância  $x$  à sua superfície.

f - Ajustes dos Parâmetros do Solo função da Umidade e da Temperatura em cada Nó:

Os parâmetros do solo como resistividades elétrica ( $\rho$ ) e térmica ( $\rho_T$ ) e a permeabilidade ( $k_h$ ) dependem tanto da umidade como da temperatura. Uma vez calculados os valores de umidade e de temperatura em cada nó em estudo, os parâmetros do solo acima são ajustados a cada novo intervalo de tempo de processamento. Para o caso particular do coeficiente de hidráulica (permeabilidade)  $k_h$ , tem-se ainda a dependência desse parâmetro com os índices físicos representativos do solo em questão (índice de vazios e o grau de saturação). A variação deste coeficiente com a umidade é obtida a partir da equação de Koseny - Craman [6]:

$$k_h = C \cdot D_S^2 \cdot \frac{\tilde{\alpha}_p}{\varphi} \cdot \frac{I_V^3}{(1 + I_V)} \cdot G_S^3 \quad \dots(12)$$

Assim, para cada domínio do nó da região de interesse, pode-se determinar a variação do volume de

água existente, a partir do volume de água perdido. Dessa variação, tem-se o novo grau de saturação resultante (o índice de vazios não se altera) para cada intervalo de tempo e a variação desse parâmetro com a umidade. Do mesmo modo, a influência da variação da viscosidade de água ( $\eta$ ) com a temperatura  $T$  (em °C) na permeabilidade, é levada em conta através da fórmula de Poiseuille e Reynolds dada abaixo.

$$\varphi = \frac{0,0001814}{1 + 0,03368 T + 0,000221 T^2} \quad \dots(13)$$

g - Influência da Componente de Pressão de Vapor de água na Velocidade de Migração da Água:

A FIGURA 8 mostra os fundamentos para inclusão na equação da velocidade de migração da água da componente de pressão de vapor. Essa componente exerce uma influência significativa, visto acelerar o processo de migração da umidade no entorno do eletrodo (secagem mais rápida do meio solo). Em um instante  $t_1$ , tem-se para dois nós consecutivos (i) e (i+1):

Nó (i):	Temperatura $T_1$	Nó (i+1):	Temperatura $T_2$
	Pressão $P_1$		Pressão $P_2$
	Umidade $u_1$		Umidade $u_2$

sendo:  $T_1 > T_2$ ,  $P_1 > P_2$  e  $u_1 > u_2$

Numa amostra infinitesimal do solo (ver FIGURA 1), pode-se considerar esse tipo de ambiente como sendo fechado. Nesse caso, o volume de água presente nessa amostra vai se evaporando até que o ar fique totalmente saturado (o número de moléculas de água que deixa a superfície da água é igual ao que entram nela - ver FIGURA 9). Com o aumento contínuo da temperatura do solo devido a dissipação de corrente pelo eletrodo, não se tem mais uma situação de equilíbrio. Assim, gradativamente, vai aumentando a quantidade de água sendo evaporada, tendo-se uma maior pressão de vapor de água presente nessa amostra (ver FIGURA 10). Essa pressão ( $p$ ) se traduz, por uma força ( $F$ ) exercida sobre uma unidade infinitesimal de área ( $S$ ), conduzindo a uma alteração na velocidade de secagem do solo junto ao eletrodo. As equações a seguir expressam o conceito exposto:

$$\ddot{A}_p = \frac{F}{S} = \frac{m_a(t) \cdot a}{S} = \frac{m_a(t)}{S} \cdot \frac{v}{t} \quad \dots(14)$$

$$v = \frac{\ddot{A}_p \cdot S \cdot t}{m_a(t)} = \frac{\ddot{A}_p \cdot S \cdot t}{\tilde{i}_a \cdot V_a(t)} = \frac{\ddot{A}_p \cdot S \cdot t}{\frac{v_d}{v_c} \cdot V_a(t)} \quad \dots(15)$$

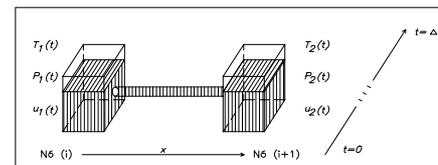


FIGURA 8 - Elementos infinitesimais de amostras do solo.

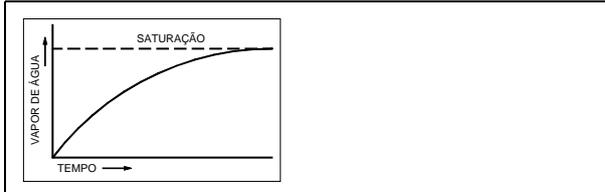
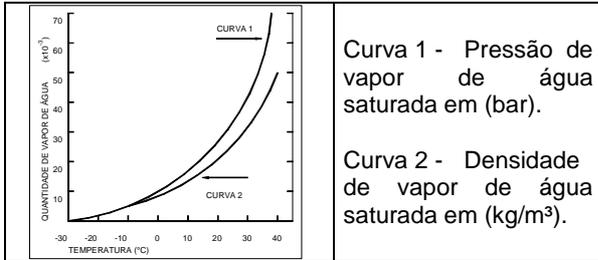


FIGURA 9 – Quantidade de vapor de água escoada com o tempo num ambiente fechado [7].



Curva 1 - Pressão de vapor de água saturada em (bar).

Curva 2 - Densidade de vapor de água saturada em (kg/m<sup>3</sup>).

FIGURA 10 - Pressão de vapor de água e densidade de vapor versus temperatura [7].

5.0 RESULTADOS OBTIDOS

Resultados computacionais do modelo são apresentados para um caso concreto de uma instalação de eletrodo em anel com formato toroidal de 300 m de raio e 0,6 m para o diâmetro da seção circular do condutor, operando de forma contínua (9600 h). Curvas de tempo indicando sensibilidade aos parâmetros  $k_T$  e  $\alpha$  são apresentadas (FIGURAS 11 e 12). Resultados de variações da umidade, temperatura, permeabilidade e resistividade elétrica com o tempo de operação do eletrodo são indicados nas FIGURAS 14 a 17, para os valores de  $k_n$  e  $K_e$  indicados. A FIGURA 13 indica a discrepância da metodologia clássica [8] e a ora proposta. Particular interesse são os gráficos assinalando a distribuição temporal da umidade (FIGURA 18) e os das distribuições de tempo de operação do eletrodo versus densidades máximas de corrente injetadas no eletrodo em função dos valores supostos para a permeabilidade do solo  $k_n$  e da constante eletrosmótica  $K_e$  (FIGURA 19), que assegurem a não ocorrência do fenômeno de eletrosmose e conseqüente ressecamento do solo.

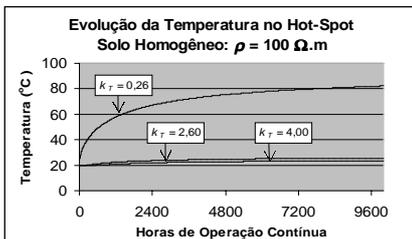


FIGURA 11 - Variação da Condutividade Térmica ( $k_T$ ).

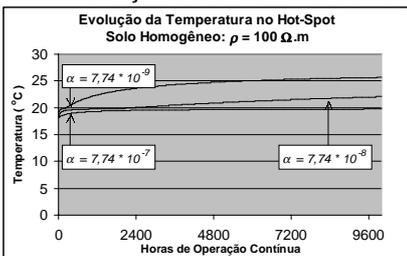


FIGURA 12 - Influência da Difusividade Térmica ( $\alpha$ ).

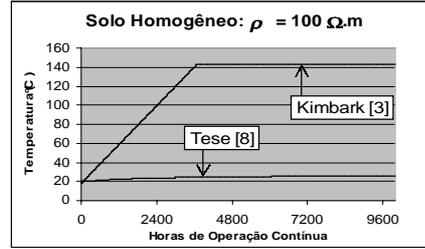


FIGURA 13- Metodologias-Transmissão de Calor Solo-Ar.

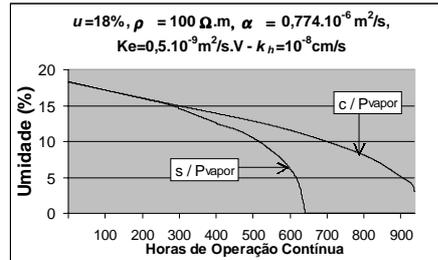


FIGURA 14 - Variação da Umidade - Eletrosmose, Solo Homogêneo – Ponto mais Quente.

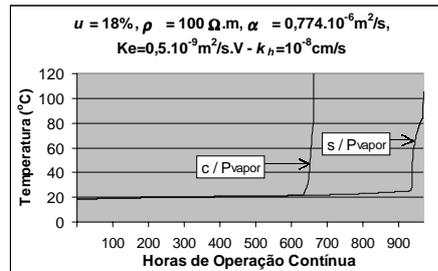


FIGURA 15 - Variação da Temperatura - Eletrosmose, Solo Homogêneo – Ponto mais Quente.

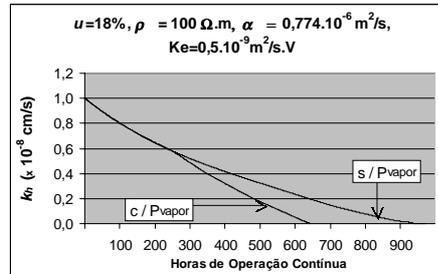


FIGURA 16 - Variação do Coeficiente de Permeabilidade ( $k_n$ ) - Eletrosmose, Solo Homogêneo – Ponto mais Quente.

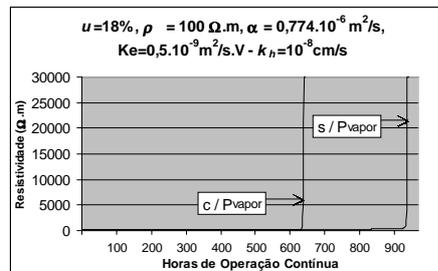


FIGURA 17 - Variação da Resistividade Elétrica - Eletrosmose, Solo Homogêneo – Ponto mais Quente.

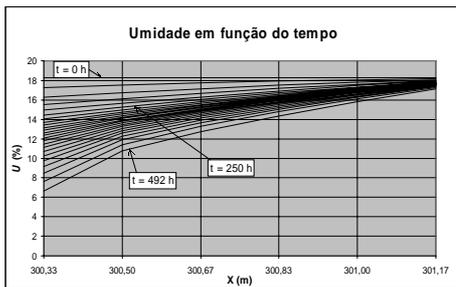


FIGURA 18 - Variação da Umidade na Região de Influência.

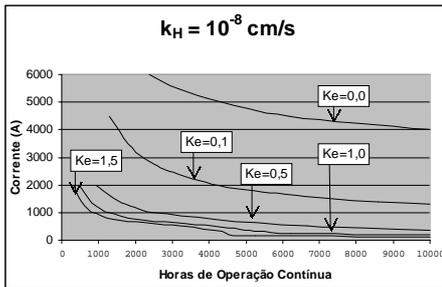


FIGURA 19 - Corrente Máxima Admissível versus Constante Electrosmótica  $K_e$ .

## 6.0 CONCLUSÕES

Para o eletrodo simulado, tem-se:

- Quando de correntes intensas por longos períodos, difundindo-se para o solo através do eletrodo, limitações no valor dessa corrente existem devido aos fenômenos de aquecimento, termodifusão da umidade e eletrosmose. Caso sejam violadas essas limitações, podem ocorrer fenômenos de instabilidade, com "colapso" do eletrodo, eventualmente a temperaturas inferiores a 100 °C.
- A umidade do solo, mesmo à parte eletrosmose, é parâmetro essencial no comportamento dos eletrodos. A limitação de corrente depende muito acentuadamente das condições de arrefecimento e mecanismo de convecção e como se processa a umidificação do solo (natural ou forçada).
- A condutividade térmica do solo ( $k_T$ ) é parâmetro essencial no aquecimento do solo e resultados finais de valores de temperaturas no meio.
- De igual relevância, a permeabilidade ( $k_h$ ) do solo é fundamental no processo da eletrosmose, sendo essencial considerar-se sua variação com a temperatura e a umidade.
- O coeficiente electrosmótico ( $K_e$ ) é importante nos resultados de temperaturas do solo e no processo de aceleração da secagem do mesmo.
- No processo de secagem da umidade do solo, é relevante a influência que exerce a pressão de vapor ( $P_{vapor}$ ) na migração da quantidade de água existente no meio, sendo maior à medida que se eleva a temperatura do solo.
- Não são relevantes para o aquecimento do solo as influências de radiação solar e irradiação.
- Para fenômenos de eletrosmose e termodifusão, uma análise da interação entre os fenômenos

elétricos pode ser feita na vizinhança imediata dos eletrodos (distâncias da ordem de  $10^0$  a  $10^2$  m).

- Nas regiões próximas dos eletrodos, quando da existência de simetrias em suas geometrias, é aconselhável o uso de aproximações bidimensionais.
- O Método de Diferenças Finitas mostrou-se totalmente aplicável, face a multiplicidade de parâmetros e o volume de cálculo envolvido.
- O uso de estilizações como o apresentado no item 3 [2], quanto à influência dos diversos parâmetros e determinações de alguns condicionamentos críticos, é interessante e desejado, permitindo uma análise de sensibilidade dos fenômenos em causa.
- Algumas das metodologias publicadas [3, 4 e 5] e de uso frequente no cálculo de eletrodos são inadequadas, visto desprezarem no cálculo de aquecimento do solo, o mecanismo de convecção, e não considerarem os fenômenos hidráulicos e electrosmóticos com suas influências nos parâmetros do solo, podendo conduzir a erros grosseiros e projetos não seguros de instalações.
- O método em questão apresenta resultados coerentes com o sentido físico do assunto em causa.

## 7.0 BIBLIOGRAFIA

- [1] Portela C. – Discussion of Paper 89 SM 794-9 PWRD - Heat Dissipation Computations of a HVDC Ground Electrode Using a Supercomputer – COPPE/UFRJ, Brazil.
- [2] Portela, C. – Interação entre Fenômenos Elétricos, Térmicos e Electrosmóticos em Eletrodos de Sistemas de Corrente Contínua – II Simpósio Franco-Brasileiro – São Paulo, 1989.
- [3] E W. Kimbark, "Direct Current Transmission" (Book), John Wiley & Sons, New York, 1971, pp. 450-455.
- [4] EPRI EL-2020, Project 1467-1 - HVDC Ground Electrode Design, IEC, San Francisco, 1981, pp. 4.1-4.6.
- [5] H. Greiss, D. Mukhedbar – Heat Dissipation Computations of a HVDC Ground Electrode Using a Supercomputer – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, n° 4, November 1990.
- [6] Mitchell, J. K. – Fundamentals of Soil Behavior – J. Wiley 1976.
- [7] Louis J. B., Fundamentals of Meteorology – Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J. – 1979.
- [8] Villas, J.E.T. – Tese de Doutorado – COPPE Outubro/2000 – Aquecimento do Solo na Vizinhança de um Eletrodo de Terra de um Sistema de CCAT Considerando a Interação entre Fenômenos Elétricos, Térmicos e Electrosmóticos.

## ANEXO I - SIMBOLOGIA

- $\rho_o$  - densidade absoluta de massa da parte sólida (fixa) do meio;
- $\nu_c / \nu_d$  - relação entre a viscosidade cinemática e a viscosidade dinâmica no nó;
- $a$  - aceleração da migração da água,;
- $C$  - fator de forma,;
- $D_s$  - diâmetro efetivo das partículas,;
- $\gamma_p$  - peso específico do fluido.