

*UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA*

***DESEMPENHO TÉRMICO DE CABOS DE POTÊNCIA SUBTERRÂNEOS,
INCLUINDO MIGRAÇÃO DE UMIDADE NO SOLO E EFEITOS
TRANSIENTES***

*TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SANTA CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA*

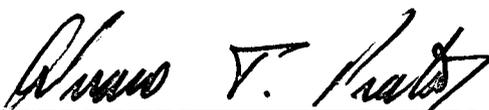
Daniel Santana de Freitas

Florianópolis, junho de 1995.

**DESEMPENHO TÉRMICO DE CABOS DE POTÊNCIA SUBTERRÂNEOS,
INCLUINDO MIGRAÇÃO DE UMIDADE NO SOLO E EFEITOS TRANSIENTES**

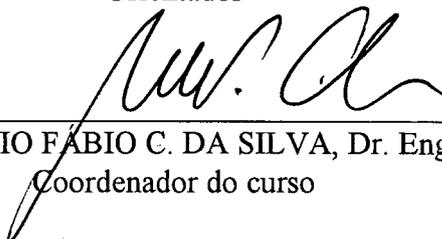
DANIEL SANTANA DE FREITAS

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA, ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO FLUIDOS, APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA.



Prof. ÁLVARO T. PRATA, Ph. D.

Orientador



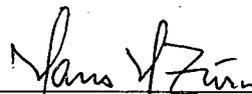
Prof. ANTÔNIO FÁBIO C. DA SILVA, Dr. Eng. Mec.

Coordenador do curso

BANCA EXAMINADORA:



Prof. ÁLVARO T. PRATA, Ph. D. - Presidente



Prof. HANS HELMUT ZÜRN, Ph. D.



Prof. JOSÉ ANTÔNIO BELLINI DA CUNHA NETO, Dr.



Prof. JÚLIO ROBERTO BARTOLI, Ph. D.



Prof. NELSON HENRIQUE SANTIAGO, D. Sc.



Prof. PAULO CÉSAR PHILIPPI, Dr. Ing.

RESUMO

A presente tese trata da simulação do problema transiente de transferência de calor e migração de umidade em solos úmidos em torno de cabos elétricos de potência em instalação subterrânea. As equações governantes, resultantes da aplicação da teoria do contínuo, são discretizadas pelo método de volumes finitos e sua solução é otimizada de modo a evitar os longos tempos computacionais normalmente associados a este tipo de simulação, permitindo a obtenção de resultados completos em computadores de pequeno porte. Para aproximar a solução obtida das necessidades reais dos projetistas de cabos elétricos, que necessitam a temperatura no núcleo do cabo, o interior do cabo também é modelado pelo método de volumes finitos.

O modelo físico do solo é o mais completo possível, dentro dos limites impostos pelo tempo computacional, e inclui a dependência de todas as propriedades com umidade e temperatura, além de fatores adicionais como o efeito de gravidade sobre a umidade do solo e um modelo simplificado para o efeito de histerese das curvas que descrevem as propriedades termo-hidráulicas do solo.

O procedimento numérico deste trabalho é validado com resultados obtidos por outros autores e com o programa atualmente empregado pela divisão de cabos da indústria Pirelli S.A. no projeto de seus cabos. Em seguida, o método numérico é aplicado à análise de um problema semelhante a um caso real, de modo a determinar a importância de diversos parâmetros físicos para o projeto. Inicialmente é realizada uma análise em regime permanente, em que cada parâmetro é avaliado em função da sua influência sobre a temperatura máxima do condutor do cabo central da linha, que é o parâmetro que define o modelo de cabo a ser usado. Conclui-se, por exemplo, que aproximadamente a cada 10°C de aumento na temperatura ambiente, a temperatura de equilíbrio do condutor do cabo central sofre um aumento de 5°C . Os resultados obtidos em regime permanente permitem também determinar os casos críticos, em que ocorre secagem parcial do solo circundante aos cabos. Para estes casos, é avaliada a influência da adição de solo especial em torno dos cabos e qual a quantidade ótima a acrescentar. Conclui-se, de uma maneira geral, que a adição de backfill faz muita diferença para a quantidade de calor dissipado, mas também que, desde que os cabos fiquem completamente envoltos por uma camada de backfill, a quantidade a ser acrescentada é um parâmetro secundário.

É realizada a seguir uma análise transiente, em que a temperatura do condutor do cabo central é acompanhada desde o momento em que a geração de calor é iniciada. Durante esta análise foi avaliada a eficiência do modelo de duas fases, no qual se assume que a fronteira entre solo seco e úmido coincide com uma isoterma crítica e que o solo úmido tem condutividade térmica uniforme. A conclusão principal é de que o modelo de duas fases leva a resultados bons apenas quando a umidade natural do solo da região já é baixa. Quando o solo da região apresenta uma umidade natural alta, é melhor assumir que a umidade é uniforme em todo o domínio de solução e igual à umidade natural durante toda a simulação.

ABSTRACT

A numerical methodology for thermal analysis of buried power cables in presence of heat and moisture migration in the surrounding soil is presented. The soil around the cables is modelled as a continuum and the governing equations resulting from this approach are solved via a finite volume methodology. The resulting numerical code is optimized to reduce computational times and it is implemented on a personal computer. As the most relevant parameter in a cable design is its conductor temperature, both the soil and the cable are incorporated in the problem formulation. The soil modelling is as complete as possible, including all dependencies with moisture and temperature, as well as additional effects like the influence of gravity and the hysteresis effect.

Program validation is accomplished by direct comparison against other authors and against the software that is presently used for cable designing by the Cable Division of Pirelli Inc.. The validated procedure is then applied to the analysis of a situation very similar to a real one. Initially, a steady state analysis is performed, in which each physical parameter is evaluated considering its influence over the maximum conductor temperature. For example, each raising of 10°C in the ambient temperature leads to a raising of nearly 5°C in the conductor temperature. The steady state analysis also determines the critical cases, in which a dry-out zone in the surrounding soil occurs, as a consequence of moisture migration away from the cables. In this cases, the addition of a special soil is evaluated and the optimum amount is determined. A general conclusion is that the presence of a special backfill completely covering the cables makes a lot of difference on the ability of the surrounding medium in dissipating the heat generated in the cables, but also that the exact amount to be added is not a critical parameter.

In the transient analysis performed next, the conductor temperature is computed for each time interval since the start of the heat generation. For comparison, results are obtained with the two-zone model, in which the boundary between dry and moist soil is assumed to coincide with a stated critical isotherm. The two-zone model leads to good results only when the moisture of the natural soil is already low without the interference of the cables. When the moisture of the natural soil is high, it is better to assume uniform moisture content and no dry zone present.

SUMÁRIO

Notação, vi

Lista de figuras, viii

Lista de tabelas, xi

1 Introdução, 1

2 Cabos elétricos de potência subterrâneos, 7

2.1 Estrutura interna, 7

2.1.1 Condutor, 8

2.1.2 Isolamento elétrico, 9

2.1.3 Blindagem interna, 10

2.1.4 Blindagem sobre o isolamento, 10

2.1.5 Proteção externa, 11

2.2 Cabos a óleo fluido, 12

2.3 Origem das perdas de calor, 13

2.3.1 Perdas no condutor, 13

2.3.2 Perdas no dielétrico, 14

2.3.3 Perdas na blindagem, 15

2.3.4 Perdas em armaduras e tiras de reforço, 16

2.4 Representação do problema térmico como um circuito elétrico, 16

3 O projeto de cabos elétricos, 19

3.1 Curvas de carga, 21

3.2 Definição de Ampacidade, 22

3.3 Métodos de cálculo adotados pelos fabricantes de cabos, 22

3.3.1 Carga contínua e solo uniforme, 23

3.3.2 Carga cíclica e solo uniforme, 24

3.3.3 Carga contínua e solo especial próximo ao cabo, 31

3.3.4 Carga contínua e solo alterado pela migração de umidade, 33

3.3.5 Carga cíclica e solo alterado pela migração de umidade, 35

3.4 Solução do problema completo, 37

4 Caracterização do solo circundante ao cabo, 38

4.1 Descrição dos fenômenos físicos, 39

4.2 Conceitos e parâmetros fundamentais, 40

4.2.1 Unidade elementar fundamental de meios porosos, 40

4.2.2 Porosidade, conteúdo de umidade e saturação do solo, 41

4.2.3 Temperatura de um ponto no meio poroso, 41

4.2.4 Potencial de sucção, permeabilidade relativa e condutividade térmica efetiva, 42

4.3 O modelo de Philip e de Vries, 45

4.3.1 Coeficiente de transporte do líquido devido a gradientes de umidade, 48

4.3.2 Coeficiente de transporte do líquido devido a gradientes de temperatura, 48

4.3.3 Coeficiente de transporte do vapor devido a gradientes de umidade, 49

4.3.4 Coeficiente de transporte do vapor devido a gradientes de temperatura, 51

4.3.5 Efeito da gravidade, 52

4.4 Fluxos de calor e umidade no solo próximo a uma fonte térmica, 53

4.5 Instabilidade termo-hidrológica dos solos de aterro, 56

4.6 O efeito de histerese nos coeficientes fenomenológicos, 60

5 Controle do ambiente térmico dos cabos, 65

- 5.1 Alternativas utilizadas atualmente, 65
- 5.2 O uso de backfill, 67
- 5.3 Solos artificiais, 67
 - 5.3.1 Condutividade térmica efetiva, 68
 - 5.3.2 O modelo de van Genuchten & Couvillion, 68
 - 5.3.3 Os parâmetros de Van Genuchten, 72

6 Simulação Computacional, 74

- 6.1 Transiente no solo circundante, 74
 - 6.1.1 Definição do problema matemático, 75
 - 6.1.2 Discretização numérica, 77
 - 6.1.3 Sistemas de equações algébricas, 78
 - 6.1.4 Implementação computacional dos coeficientes fenomenológicos, 80
- 6.2 Transiente no interior do cabo, 81
- 6.3 Acoplamento entre os dois problemas, 83
- 6.4 Descrição do programa utilizado, 83
- 6.5 Validação numérica, 83
 - 6.5.1 Comparação com resultados de Mitchell, 84
 - 6.5.2 Validação com resultados do software Cymcap, 86
- 6.6 Comparação com resultados experimentais, 87

7 Resultados, 88

- 7.1 Descrição do problema para análise, 88
- 7.2 Análise em regime permanente, 91
 - 7.2.1 Influência da umidade natural do solo da região, 91
 - 7.2.2. Quantidade ótima de backfill, 94
 - 7.2.3. Influência dos parâmetros físicos, 97
- 7.3 Análise transiente, 99
 - 7.3.1 Transiente do cabo, 99
 - 7.3.2. Transiente do solo, 102
- 7.4 Carregamento variável, 110
- 7.5 Resultados adicionais, 112
 - 7.5.1 Temperatura radial, 112
 - 7.5.2 Influência da inclusão do efeito de histerese, 116
 - 7.5.3 Comparação com resultados obtidos com o software Cymcap, 117

8 Conclusão, 118

9 Referências Bibliográficas, 120

Apêndice A Geração dos arquivos de difusividades, 124

Apêndice B Análise do interior do cabo, 132

Apêndice C Descrição do programa utilizado, 140

NOTAÇÃO

c	calor específico, (J/kg/K)
C	capacidade térmica volumétrica, (J/m ³ K)
D_0	difusividade molecular do vapor no ar, (m ² /s)
D_{va}	difusividade efetiva do vapor no ar, (m ² /s)
D_T	difusividade térmica, (m ² /s/K)
D_θ	difusividade isotérmica, (m ² /s)
h	entalpia, (J/kg)
I	corrente elétrica, (A)
j	fluxo mássico de umidade, (kg/m ² /s)
k	condutividade térmica, (W/m/K)
k_*	condutividade térmica aparente, (W/m/K)
k_{rl}	permeabilidade relativa, (adimensional)
K_{sat}	permeabilidade de saturação, (m ²)
K_g	condutividade hidráulica, (m/s)
P	pressão, (N/m ²)
q'	geração de calor por unidade de comprimento do cabo, (W/m)
q''	fluxo de calor, (W/m ²)
q'''	geração de calor por unidade de volume do cabo, (W/m ³)
R	constante para a lei dos gases perfeitos, (J/kg/K)
S	grau de saturação (m ³ /m ³)
t	tempo, (s)
T	temperatura, (K)
V	volume elementar representativo (m ³)
x	coordenada horizontal, (m)
y	coordenada vertical, (m)

SÍMBOLOS GREGOS

ε	porosidade do solo, (m ³ /m ³)
θ	conteúdo de umidade volumétrico, (m ³ /m ³)
ρ	massa específica, (kg/m ³)
ρ	resistividade térmica, (mK/W)
ψ	potencial para migração de umidade, (J/kg)
τ	tortuosidade, (adimensional)
ζ	fator de intensificação térmica, (adimensional)

ÍNDICES

a	referente ao ar no interior dos poros
d	referente ao solo seco
ef	propriedade efetiva
g	referente à mistura gasosa (ar + vapor)
l	referente ao líquido
o	valor de referência
r	valor residual
s	referente ao sólido
T	térmico, relativo à temperatura
θ	mássico, relativo à umidade
v	referente ao vapor
w	referente à umidade total (vapor + líquido)
∞	não influenciado pelo cabo

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1:

Figura 1-1. Esquema geral de transmissão em corrente alternada.

Capítulo 2:

Figura 2-1. Cabo elétrico para alta tensão, com 3 condutores.

Figura 2-2. Linhas de campo elétrico no dielétrico do cabo.

Figura 2-3. Linhas de campo elétrico no interior do cabo.

Figura 2-4. Configuração típica de cabo com isolamento a óleo fluido.

Figura 2-5. Diagrama de fases típico de um capacitor real.

Figura 2-6. Ligação periódica de blindagens em cabos de alta tensão.

Figura 2-7. Ligação cruzada em cabos de alta tensão.

Figura 2-8. Resistências térmicas à dissipação do calor gerado no cabo.

Figura 2-9. Circuito elétrico equivalente ao térmico para a avaliação de regime permanente de um cabo genérico, com n condutores.

Capítulo 3:

Figura 3-1. Ciclo de carga típico.

Figura 3-2. Curva de carga do tipo *flat top*.

Figura 3-3. Circuito elétrico para análise do problema térmico em regime permanente.

Figura 3-4. Tratamento da curva de perdas de energia.

Figura 3-5. Função degrau de perdas de calor.

Figura 3-6. Transiente da temperatura do condutor em cabo típico, submetido a carga constante.

Figura 3-7. Problema transiente resolvido pela norma IEC 853-2.

Figura 3-8. Circuito elétrico equivalente para o cálculo de respostas transientes no interior do cabo.

Figura 3-9. Não-uniformidade "geométrica" do solo.

Figura 3-10. Mapeamento conforme para um cabo isolado em solo uniforme.

Figura 3-11. Transformação conforme para três cabos em trincheira de backfill.

Figura 3-12. Formação de uma região seca no solo em torno do cabo.

Figura 3-13. Parcela das perdas responsável pela elevação até a temperatura máxima.

Capítulo 4:

- Figura 4-1. Situação esquemática de um cabo em funcionamento
- Figura 4-2. Volume Elementar Representativo em meio poroso insaturado.
- Figura 4-3. Curva típica de potencial de sucção em função da umidade.
- Figura 4-4. Variação de k_{ef} com a umidade para solo silto-arenoso (Couvillion, 1981).
- Figura 4-5. Coeficientes fenomenológicos para solo silto-arenoso (Couvillion, 1981).
- Figura 4-6. "Difusividades" de Philip e De Vries para solos.
- Figura 4-7. Mecanismo de aumento do transporte de vapor nas pontes de líquido.
- Figura 4-8. Propriedades difusivas para um solo de textura fina (Hartley, 1977).
- Figura 4-9. Equilíbrio hidrológico em solo úmido sujeito a gradiente de temperatura.
- Figura 4-10. Definição qualitativa do grau de saturação crítico.
- Figura 4-11. Efeito de histerese sobre a curva de potencial de sucção.
- Figura 4-12. Efeito de histerese sobre a curva de $D_{\theta 1}$ para backfill bimodal.
- Figura 4-13. Curva secundária entre as curvas de embebição e drenagem.

Capítulo 5:

- Figura 5-1. Arranjos viáveis de refrigeração forçada.
- Figura 5-2. Curvas granulométricas para os solos utilizados.
- Figura 5-3. Influência dos parâmetros α e β nas curvas de potencial de sucção.

Capítulo 6:

- Figura 6-1. Modelo numérico empregado.
- Figura 6-2. Malha típica para a solução do problema computacional.
- Figura 6-3. Volume genérico do esquema computacional.
- Figura 6-4. Domínio de solução utilizado por Mitchell et al. (1977).
- Figura 6-5. Máxima geração de calor admissível para limitar a temperatura da superfície do cabo em 90°C.
- Figura 6-6. Tempo requerido para alcançar temperatura crítica, em função da taxa de geração de calor.

Capítulo 7:

- Figura 7-1. Representação esquemática da instalação no terreno.
- Figura 7-2. Influência da umidade natural do solo da região sobre a capacidade de transmissão de potência do circuito.
- Figura 7-3. Influência da umidade natural do solo da região sobre o estado final de umidade do solo próximo aos cabos.
- Figura 7-4. Influência da largura da trincheira de backfill.
- Figura 7-5. Influência da altura da trincheira de backfill.
- Figura 7-6. Influência da extensão da profundidade da camada de backfill sobre a temperatura de regime permanente do condutor.
- Figura 7-7. Influência da extensão da profundidade da camada de backfill sobre a umidade do solo próximo aos cabos.

- Figura 7-8. Influência da temperatura do ar ambiente.
- Figura 7-9. Influência da temperatura natural do solo da região.
- Figura 7-10. Influência da velocidade do vento.
- Figura 7-11. Transiente do condutor do cabo central para solo de aluvião arenoso com $S_i = 0,35$, de acordo com 4 modelos distintos.
- Figura 7-12. Transiente do condutor do cabo central, para solo de aluvião arenoso com $S_i = 0,40$, de acordo com 4 modelos distintos.
- Figura 7-13. Transiente da umidade do solo próximo ao cabo, para solo de aluvião arenoso, de acordo com o modelo de Phillip e de Vries.
- Figura 7-14. Campo de temperaturas para solo de aluvião, 1 semana após o início do transiente.
- Figura 7-15. Campo de temperaturas para solo de aluvião, 2 meses após o início do transiente.
- Figura 7-16. Campo de temperaturas para solo de aluvião, 1 ano após o início do transiente.
- Figura 7-17. Campo de temperaturas para solo de aluvião com trincheira de backfill, 1 semana após o início do transiente.
- Figura 7-18. Campo de temperaturas para solo de aluvião com trincheira de backfill, 2 meses após o início do transiente.
- Figura 7-19. Campo de temperaturas para solo de aluvião com trincheira de backfill, 1 ano após o início do transiente.
- Figura 7-20. Campo de umidades para solo de aluvião, em regime permanente.
- Figura 7-21. Campo de umidades para solo de aluvião com trincheira de backfill, em regime permanente.
- Figura 7-22. Campo de resistividades para solo de aluvião, em regime permanente.
- Figura 7-23. Campo de resistividades para solo de aluvião com trincheira de backfill, em regime permanente.
- Figura 7-24. Transiente no condutor para carga cíclica uniforme e para carregamento progressivo.
- Figura 7-25. Transiente da umidade próximo ao cabo central, para carga cíclica uniforme e para carregamento progressivo.
- Figura 7-26. Perfil de temperaturas do solo em uma linha horizontal passando pelo centro do cabo, para solo de aluvião com $S_i = 0,30$.
- Figura 7-27. Perfil de umidades do solo em uma linha horizontal passando pelo centro do cabo, para solo de aluvião com $S_i = 0,30$.
- Figura 7-28. Perfil de temperaturas do solo em uma linha horizontal passando pelo centro do cabo, para solo de aluvião com $S_i = 0,30$ e com backfill.
- Figura 7-29. Perfil de umidades do solo em uma linha horizontal passando pelo centro do cabo, para solo de aluvião com $S_i = 0,30$ e com backfill.
- Figura 7-30. Efeito da histerese sobre a temperatura do condutor do cabo central em regime permanente.
- Figura 7-31. Efeito da histerese sobre a umidade próximo ao cabo central em regime permanente.

LISTA DE TABELAS

Capítulo 2:

Tabela 2.1. Perdas em um sistema trifásico a plena carga, lançado diretamente no solo, expressas como uma porcentagem da perda total (King e Halfter, 1982).

Tabela 2.2. Equivalência entre os circuitos térmico e elétrico.

Capítulo 3:

Tabela 3-1. Aplicação das normas para projeto de cabos.

Capítulo 5:

Tabela 5-1. Parâmetros de ajuste das curvas de condutividade térmica efetiva.

Tabela 5-2. Características físicas dos solos utilizados.

Tabela 5-3. Parâmetros de ajuste das curvas de ψ e k_{t1} .

Capítulo 6:

Tabela 6-1. Descrição do cabo utilizado para comparação com Cymcap.

Tabela 6-2. Temperatura no condutor do cabo central.

Tabela 6-3. Temperatura na superfície do cabo central.

Capítulo 7:

Tabela 7-1. Dimensões internas do cabo empregado nas simulações.

Tabela 7-2. Condição do solo examinado pelo IPT-SP (1987) na região de Osasco (SP).

1 INTRODUÇÃO

A transmissão de energia elétrica desde as usinas geradoras até os centros consumidores envolve uma grande extensão de cabos metálicos. Por razões técnico-econômicas e de impacto ambiental, ao longo da transmissão podem ser encontrados diferentes níveis de tensão. A demanda de potência imposta sobre o cabo determina, de acordo com a tensão nominal de transmissão, a passagem de uma corrente pelo seu núcleo, levando a uma inevitável geração de calor por efeito Joule. No caso de cabos elétricos de potência, além de representar uma perda, esta geração de calor pode levar a temperatura do cabo elétrico a níveis inseguros.

A transmissão de energia elétrica de longa distância é feita a níveis altos de tensão. Na determinação do valor da tensão de transmissão deve-se considerar as perdas de energia e o investimento necessário para elevar a tensão. De uma maneira geral, quanto mais alta a tensão de transmissão, maior o investimento inicial. Por outro lado, como a potência elétrica é dada pelo produto da tensão pela corrente, a transmissão de altas potências deve ser realizada (do ponto de vista de perdas de energia) com a mais alta tensão possível, para que a corrente pelo condutor seja a menor possível e as perdas minimizadas. Confrontando-se estes dois fatores, chega-se a um valor ótimo da tensão de transmissão.

Antes de serem definidos os valores de tensão, deve ser decidido se a transmissão será feita em corrente contínua (CC) ou alternada (CA). A geração é feita em corrente alternada e se fosse transmitida desta forma não necessitaria de equipamentos especiais após o gerador. Transmissão em corrente contínua leva a perdas menores por metro de cabo mas exige investimento inicial maior, pois neste caso é necessário retificar a tensão de geração. Em geral, a decisão final dependerá da distância que se quer cobrir: se a distância for muito grande e a demanda de potência muito alta, é melhor transmitir em CC. Talvez por exigir menor investimento inicial, a maioria das transmissões é feita diretamente em CA.

Definido o modo de transmissão, são definidas as tensões para cada etapa da transmissão. A figura 1-1 mostra um sistema de transmissão típico para CA. Após uma geração em média tensão (13,8 kV), a tensão é elevada para níveis muito altos, para a transmissão de longa distância (230 kV). Com isto se consegue suprir a demanda com correntes baixas passando no condutor e gerando, portanto, perdas baixas por efeito Joule. No início da transmissão, os cabos estão passando por zonas rurais, onde há bastante espaço livre, o que permite que a transmissão seja realizada por meio de instalações aéreas. Nas instalações aéreas os cabos são suportados por torres metálicas e ficam expostos ao ar ambiente. Quando a linha de transmissão atinge o limite urbano dos centros consumidores a que serve, a tensão sofre um abaixamento para um nível menos alto de tensão (138 kV). Nesta etapa, chamada de sub-transmissão, em alguns casos já não é mais possível continuar a usar linhas aéreas por problemas de espaço e de segurança, e as linhas de transmissão devem ser enterradas. A linha subterrânea segue até as regiões de

distribuição, onde a tensão baixa para um nível médio (13,8 kV). Daí os cabos seguem por postes até os transformadores de rua, onde a tensão atinge finalmente um valor normal de uso (220 V).

A nível de longa distância e sub-transmissão, a potência transmitida é muito alta, pois corresponde à demanda de muitos consumidores. O calor gerado por efeito Joule pelos cabos nestes níveis é muito intenso e eleva muito a sua temperatura. Os componentes dos cabos têm limites de temperatura que garantem seu funcionamento e são exatamente estes limites que terminam por estabelecer a máxima corrente que pode lhes percorrer e, uma vez que a tensão de transmissão é fixa, a máxima demanda de potência que pode ser atendida.

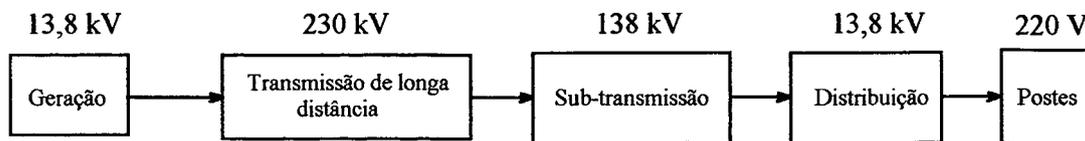


Figura 1-1. Esquema geral de transmissão em corrente alternada.

A principal razão para o uso de linhas aéreas de transmissão é a capacidade de isolamento elétrico do ar, que permite o uso de condutores sem o isolamento e as proteções necessárias para cabos subterrâneos (King e Halfter, 1982). Os cabos subterrâneos necessitam de isolamento porque o campo elétrico gerado pela transmissão de corrente no seu condutor não pode em hipótese alguma ser transmitido ao solo, por questões de segurança. Este isolamento por sua vez é vulnerável à ação do solo e necessita de proteção especial. Tais exigências de fabricação, aliadas a uma instalação difícil e trabalhosa, fazem com que o custo de cabos subterrâneos chegue a ser várias vezes maior do que o de linhas aéreas. Por outro lado, os cabos subterrâneos ficam mais protegidos e evitam a poluição visual característica das torres de alta tensão. Levando em consideração apenas o impacto ambiental, deve-se instalar a maior extensão possível das linhas de transmissão sob o solo.

Mas, independente de seu custo elevado, a instalação de cabos subterrâneos ainda apresenta sérios problemas tecnológicos a serem resolvidos. Em instalações aéreas a troca de calor com o vento é bastante eficiente e o calor gerado é facilmente dissipado. Quando os cabos estão enterrados, o responsável pela manutenção da sua temperatura a níveis seguros passa a ser o solo de aterro, o qual corresponde, sempre que possível, ao próprio solo do local aonde é feita a instalação. Se este solo não consegue dissipar calor na taxa necessária, a temperatura no condutor metálico sobe, danificando o isolamento elétrico e permitindo que o seu campo elétrico tenha acesso ao ambiente. Enquanto que no projeto de linhas aéreas prevalecem as restrições de caráter elétrico, considerações de caráter térmico ligadas à dissipação do calor gerado por efeito Joule nos componentes metálicos é que definem o projeto de cabos subterrâneos.

A temperatura que o cabo vai atingir em funcionamento deve ser verificada tanto em instalações aéreas como subterrâneas. O que torna complicada a avaliação do desempenho térmico do cabo subterrâneo é a estrutura porosa do solo. O solo possui uma estrutura complexa que envolve uma matriz sólida composta de grãos de algum material rochoso e poros. Nestes poros sempre estão presentes pelo menos três componentes: água no estado líquido, água no estado de vapor e ar. A maioria dos problemas tecnológicos relacionados à dissipação de calor em materiais contínuos (sem poros na sua estrutura) já está resolvida e pode ser encontrada na literatura. Para materiais porosos como o solo, as melhores teorias disponíveis atualmente dependem em grande parte de dados experimentais e levam a equações altamente não-lineares, de difícil implementação computacional.

Em resumo, para chegar ao valor da máxima corrente que pode ser transmitida por um cabo de potência (também chamada de *ampacidade*), é preciso conhecer o solo que o circunda. É preciso saber, por exemplo, qual a quantidade de umidade que este solo carrega. É intuitivo que

uma porção de solo seco apresenta uma alta resistência à dissipação de calor e que, à medida que o ar no interior dos seus poros vai sendo substituído por umidade, a transferência de calor através deste solo vai sendo facilitada. Por esta razão, é desejável que os solos utilizados em aterros de cabos de potência tenham grande capacidade de reter umidade em seus poros. Solos que dissipam eficientemente o calor e que retêm umidade com facilidade são ditos "termicamente favoráveis" para serem usados como aterro. Quando o solo da região não tem condições de dissipar o calor gerado pelo cabo, deve-se optar entre dimensionar um cabo maior ou substituir o solo do local por solos especiais. O solo especial, denominado de *backfill*, pode ser um solo natural já conhecido ou pode ser fabricado. As areias naturais encontradas no Brasil normalmente não se prestam para este fim porque, conforme Bartoli e Almeida (1987a), ora lhes faltam grãos finos (areias "lavadas"), ora possuem granulometria muito uniforme. Um modo de fabricar o *backfill* é a partir da combinação de areias de granulometrias diferentes, resultando em um material com menos espaço para o ar em sua constituição. Bartoli e Almeida (1987a) comparam experimentalmente alguns solos especiais utilizados como *backfill*.

O problema de cabos elétricos dissipando calor em solos pode ser abordado de diversas formas e com diversos níveis de caracterização dos fenômenos físicos envolvidos. Os fabricantes de cabos elétricos europeus seguem atualmente as normas da IEC (International Electrotechnical Commission), que estabelecem soluções para o dimensionamento de cabos subterrâneos que incluem a variação diária de demanda e um modelo simples para a secagem parcial do solo.

O caso mais simples, calculado de acordo com a norma IEC-287 (1982), é o de uma corrente elétrica constante e ininterrupta, no valor máximo esperado para o cabo ao longo de toda a sua vida útil. Isto significa que o cabo é projetado como se o pico diário máximo de demanda durasse as 24 horas do dia. O solo é uniforme e suas propriedades não variam no espaço e no tempo. Este método de dimensionamento está a favor da segurança em relação à carga porque na realidade o pico máximo de corrente ocorre por pouco tempo durante um dia. Normalmente, o consumo de energia elétrica é baixo durante a noite e só atinge valores críticos uma vez no turno da manhã e uma à tarde e não há necessidade de exigir que o cabo esteja preparado para transmitir a corrente máxima ininterruptamente. Esta variação cíclica da carga pode ser modelada de acordo com a norma IEC 853-2 (1989).

Está prevista também a possibilidade de secagem parcial do solo devido a desequilíbrios termo-hidráulicos que surjam em consequência da longa exposição a um aquecimento intenso. Para isto, a norma IEC 287-2 (1991) emprega um modelo simplificado que assume que todo o solo acima de uma temperatura crítica está seco e todo o solo abaixo desta temperatura não é afetado pelo cabo e conserva a sua umidade natural (modelo de duas fases). Para o caso de substituição do solo da região por solos especiais, está disponível uma recomendação do comitê internacional encarregado da regulamentação do projeto de cabos elétricos (CIGRE), mas ainda não há uma norma a respeito.

Os métodos propostos pelas normas são de fácil implementação mas estão limitados por um grande número de hipóteses simplificativas em relação à modelagem do solo. Com tal nível de simplificação, não há como evitar o superdimensionamento. Muito embora estas normas representem as técnicas mais comumente aplicadas para o cálculo de capacidade de cabos de potência, o alto custo da instalação de cabos subterrâneos justifica a adoção de métodos mais precisos.

Uma abordagem teórica mais precisa para a análise de fenômenos de transporte em solos exige que suas peculiaridades sejam levadas em consideração. Do ponto de vista teórico, trata-se de um problema de transporte de calor e massa em meios porosos insaturados, envolvendo aquecimento do solo circundante aos cabos e secagem nos pequenos poros que o compõem. Devido à complexidade da estrutura porosa no interior de solos, sua modelagem é comumente feita por meio de modelos fenomenológicos, como o modelo de Philip e de Vries (1957). Tais modelos seguem um procedimento padrão, que consiste em empregar versões generalizadas das

equações das leis de Fourier, de Darcy e de Fick para chegar às equações da conservação da energia e da umidade. As equações governantes assim obtidas ficam dependendo de informações que devem ser obtidas diretamente do solo em estudo por meio de experimentos adequados. Bories (1991) apresenta uma extensa discussão sobre a aplicação dos modelos fenomenológicos à secagem de meios porosos.

A modelagem teórica deve prever a possibilidade de secagem parcial do solo adjacente aos cabos. É preciso saber se a geração de calor nos cabos é suficiente para secar o solo circundante e em que medida isto ocorre. Em regime permanente, o fluxo de vapor para longe dos cabos resultante da existência do gradiente de temperaturas deve ser contrabalançado pelo fluxo de líquido que é trazido para perto dos cabos por capilaridade. Equacionando tais fluxos, e com base no modelo fenomenológico de Philip e de Vries (1957), Ewen (1990) propõe que a suscetibilidade dos solos a secagem seja medida por uma propriedade do solo chamada de diferença de temperaturas crítica. Segundo ele, se entre quaisquer dois pontos do solo uma diferença de temperaturas maior do que a crítica for mantida, este solo tenderá a secar.

Hartley e Black (1984) propõem o conceito de "instabilidade termo-hidrológica do solo" para levar a umidade em consideração. Seu conceito parte do princípio de que a geração de calor tem efeito rápido sobre o campo de temperaturas do solo mas o campo de umidades demora muito a se modificar. Isto significa que, mesmo estando enterrado em uma região que mantenha níveis estáveis de temperatura durante meses, um cabo pode vir ao colapso em consequência de uma secagem repentina do solo que o rodeia. Esta "instabilidade" é consequência de uma quebra no delicado equilíbrio hidrológico dos mecanismos naturais de migração de líquido e vapor no solo. De seus resultados, estes autores foram capazes de prever a instabilidade térmica do solo, correlacionando, para um dado solo (porosidade e conteúdo inicial de umidade especificados), a transferência de calor superficial por unidade de comprimento com o início da secagem na região próxima à fonte de calor. Eles mostraram que os tempos para as secagens dos solos circundantes a fontes cilíndricas, sujeitos às mesmas condições, estavam relacionados com os quadrados dos diâmetros dos cilindros. Mitchell et al. (1984) apresentam uma série de testes de campo que corroboram a teoria de Hartley e Black e que sugerem que a temperatura em que tal instabilidade ocorre depende apenas do solo em que o cabo é enterrado.

Os modelos fenomenológicos levam a um conjunto de equações que permite a simulação do que ocorre no solo devido à interferência dos cabos, instante por instante após o início da geração de calor. A complexidade da topologia e da morfologia do solo impede que uma solução analítica geral para os campos de temperatura e umidade seja obtida a partir destas equações. Elas têm que ser submetidas a um dos diversos métodos numéricos disponíveis atualmente.

Uma maior precisão na modelagem deste problema pode ser atingida tanto pela adoção de modelos mais precisos do que os utilizados pelas normas para tratar da transferência de calor e a migração de umidade que surgem com o aquecimento do solo, como pela solução das equações representativas destes modelos por métodos numéricos eficientes, sem desprezar termos que possam vir a ser fundamentais em uma simulação de longo prazo. Partindo do princípio de que uma análise mais rigorosa do solo circundante ao cabo leva ao dimensionamento de cabos menores, as abordagens numéricas tendem a ser cada vez mais difundidas, por causa da sua versatilidade em lidar com solos diferentes simultaneamente e com quaisquer condições de contorno. Uma solução numérica permite lidar com naturalidade, por exemplo, com o efeito de gravidade, normalmente desprezado nas análises teóricas. Para alguns solos, o movimento de umidade das regiões quentes para as regiões frias pode vir a ser irreversível (pode não haver reabastecimento por capilaridade) nos pontos em que o gradiente térmico está alinhado com a gravidade (Bartoli e Almeida, 1987b).

Pode-se encontrar atualmente na literatura aplicações dos principais métodos numéricos utilizados na análise de fenômenos de transporte: diferenças finitas, elementos finitos e volumes finitos. Todos os três métodos têm em comum o fato de proporem funções aproximadas como

tentativa de solução das equações diferenciais parciais governantes. Se estas funções tentativa são substituídas na equação diferencial, produzem necessariamente um erro residual. Este erro pode ser definido matematicamente de diversas maneiras e é esta definição que caracteriza cada método.

Como exemplo de aplicação do método de diferenças finitas para resolver o problema de transferência de calor acoplado com a migração de umidade em solos, pode-se citar os trabalhos de Radhakrishna et al. (1984) e Hartley (1977). Com base em extensivos estudos sobre instabilidade térmica, Hartley (1977) propõe um método indireto de projeto baseado no tempo até a ocorrência deste fenômeno. Este método, mais tarde testado por Brandon et al. (1989), pode ser usado para o projeto de cabos elétricos, pela escolha de diâmetros de cabos e ampacidades tais que o tempo até a instabilidade térmica não exceda a estação de secas do local de instalação. Conforme os resultados de Brandon et al., o método de Hartley é válido mesmo que a carga seja cíclica.

Também utilizando diferenças finitas, Hanna et al. (1993) tentam simular o caso em que o solo próximo ao cabo teve que ser substituído por solo especial. No entanto, sua compreensão do problema físico real é excessivamente simplificada. Seu modelo fornece soluções em regime permanente quando o caso mais importante do ponto de vista prático é o regime transiente, após a aplicação de uma carga cíclica. Além disto, os autores nem mencionam a migração de umidade do solo, fenômeno que pode mudar completamente (*durante* a simulação do processo) o cenário por eles modelado.

Alguns autores preferem o método de elementos finitos, muito mais preciso e flexível do que o de diferenças finitas. Nesta linha aparecem os trabalhos de Anders et al. (1987), Flatabo (1973) e Anders e Radhakrishna (1988). Destes trabalhos, o mais significativo é o de Anders e Radhakrishna (1988), que resolvem o problema transiente no solo com base no modelo completo de Philip e De Vries (1957), que é o modelo mais aceito atualmente para a modelagem de transferência de calor e migração de umidade em solos. Apesar de bastante completa a sua modelagem, os autores não discutem aspectos físicos do problema e não mostram resultados em situações de carga variável ou em que aconteça secagem parcial do solo. Não fica claro, por exemplo, se o método de elementos finitos, tão poderoso para lidar com geometrias arbitrárias, modela com naturalidade as enormes variações com umidade, características dos coeficientes das equações governantes.

Em uma linha semelhante, há a tentativa de Gela e Dai (1988) de aplicar a teoria de elementos de contorno ao problema do cabo elétrico. Seu modelo, no entanto, fica distante da realidade porque modela apenas regime permanente e solo uniforme, sem migração de umidade. Na aplicação deste método o domínio não precisa ser truncado em função das fronteiras não perturbadas pelo cabo (localizadas a uma distância teoricamente infinita do seu centro), como é o caso dos métodos numéricos tradicionais. Por outro lado, no caso real as propriedades variam com a umidade, que varia localmente no interior do domínio, o que torna complicada a modelagem do caso real por elementos de contorno. Apesar das limitações, o modelo de Gela e Dai serviu para mostrar a influência do truncamento do domínio: as isotermas próximas à fronteira ficam deformadas. Este efeito é interessante mas não ajuda do ponto de vista prático, pois a região que define o problema realmente, por conter os maiores gradientes, é a região próxima ao cabo.

Em todos estes trabalhos, é feita uma modelagem bi-dimensional do problema, o que corresponde a uma seção transversal do cabo. Como as instalações subterrâneas podem chegar a dezenas de quilômetros, o cálculo de ampacidade deverá corresponder à seção mais desfavorável de todo o comprimento do cabo.

Recentemente o método de volumes finitos começou a ser aplicado a este problema. No trabalho de Ferreira (1993), as equações de Philip e De Vries (1957) são aplicadas a uma análise bi-dimensional de um cabo dissipando calor no solo. A solução é obtida pelo método de volumes

finitos, para um sistema de coordenadas bi-cilíndrico. O sistema bi-cilíndrico adapta-se naturalmente à geometria do problema e com isto o domínio assume a forma retangular. Uma outra vantagem deste sistema é que as fronteiras não afetadas pelo cabo transformam-se em pontos e não precisam ser modeladas.

No presente trabalho, as equações fenomenológicas do modelo de Philip e de Vries (1957), conforme dedução e simplificações de Hartley (1987), são aplicadas ao problema de transferência de calor e umidade resultante da geração de calor em cabos de potência subterrâneos. Para aproximar a solução acadêmica do problema real enfrentado pelos fabricantes de cabos de potência, as equações de Philip e De Vries são resolvidas para uma situação de três cabos (os três cabos fases de uma transmissão) em uma trincheira de solo especial que pode ser diferente do solo da região de instalação. O interior do cabo é modelado também, de forma a permitir a caracterização completa do projeto de cabos elétricos sob o ponto de vista do fabricante. As equações são adaptadas ao sistema de coordenadas cartesiano e resolvidas pelo método de volumes finitos. Coordenadas cartesianas adaptam-se naturalmente à geometria do problema e deixam as equações governantes na sua forma mais simples possível, sem os termos extras que aparecem com sistemas de coordenadas mais complicados. O interior dos cabos é resolvido separadamente, mas esta informação é passada ao problema do solo após cada iteração. Desta forma, eliminadas as dificuldades em relação à geometria do problema, o enfoque principal do trabalho recaiu sobre o comportamento numérico das equações de Philip e De Vries na modelagem deste tipo de problema.

As propriedades do solo variam enormemente durante o aquecimento do cabo e por isto o ideal é aplicar um modelo que acompanhe passo-a-passo a evolução *real* das temperaturas do sistema desde o momento em que é aplicada a carga, pois uma situação favorável em regime estacionário depende de como as propriedades básicas do solo evoluíram ao longo do tempo. A possibilidade de secagem do solo está embutida no modelo e aparece naturalmente a partir das equações de Philip e De Vries. A solução é obtida passo-a-passo para cada instante de tempo após a aplicação inicial da carga (ligação inicial do cabo). As propriedades do solo artificial modelado foram extraídas do trabalho de Oliveira (1993), que analisou experimentalmente um solo denominado backfill bimodal, utilizado como aterro especial pela divisão de cabos da indústria Pirelli S.A.. As propriedades dos demais solos utilizados foram obtidas da literatura e de um trabalho sobre propriedades de solos de Oliveira et al. (1994).

A comparação dos resultados teóricos obtidos a partir do modelo empregado com resultados experimentais para temperatura e umidade em torno de um cabo efetivamente enterrado em uma porção de solo cujas propriedades sejam bem conhecidas está sendo realizada por Moya (1994), para uma fonte de calor enterrada em uma porção de backfill bimodal.

No modelo de Philip e De Vries é incluído o efeito de histerese no solo, com base em um modelo sugerido por Groenveld (1984). As equações governantes são discretizadas pelo método de volumes finitos descrito por Patankar (1980). O método de volumes finitos será preferido ao longo deste trabalho porque as equações que são obtidas com o seu processo de discretização nada mais são do que *balanços de conservação* sobre os volumes elementares. O método de elementos finitos também fornece resultados precisos mas não carrega a forte componente física dos volumes finitos.

2 CABOS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA SUBTERRÂNEOS

De acordo com a tensão a que estão submetidos, os cabos elétricos de potência são classificados em:

- cabos para baixa tensão, para aplicações de até 1 kV;
- cabos para média tensão, de 2 a 35 kV;
- cabos para alta tensão, de 36 a 138 kV;
- cabos para tensão muito alta, acima de 138 kV.

Para trabalhar com tensões altas em contato com o solo, é necessário que o cabo elétrico seja adequadamente preparado. Além do condutor metálico, ele deve ser composto de uma camada de isolamento elétrico, uma blindagem e uma proteção externa. Teoricamente, o isolamento elétrico deve ser tal que o campo elétrico imposto pela alta tensão fique totalmente confinado entre o condutor e a blindagem. Uma eventual descarga para o solo traria perdas enormes e colocaria em risco a população em áreas próximas ao cabo. A proteção externa deve garantir que o cabo não seja danificado como consequência do contato com o solo.

Neste capítulo é apresentada a estrutura interna dos cabos elétricos para aplicações subterrâneas, levando em conta exigências do projeto elétrico. O conhecimento desta estrutura é fundamental para o projeto térmico, para que a temperatura na superfície do cabo (obtida da simulação para o solo) possa ser relacionada com a temperatura no condutor (parâmetro limitante do ponto de vista térmico). São descritas, ainda, as perdas de energia que dão origem à geração de calor que aquece o cabo. Ao final, é apresentado o circuito elétrico que foi empregado para modelar a transferência de calor no interior do cabo, com base na analogia clássica entre fluxo de calor e fluxo de corrente elétrica.

2.1 Estrutura interna

Como mostra esquematicamente a figura 2-1, os cabos elétricos para transmissão de alta potência são essencialmente constituídos de:

- um ou mais condutores metálicos;
- uma camada de dielétrico;
- blindagem e
- proteção externa, incluindo armadura e material sintético de proteção.

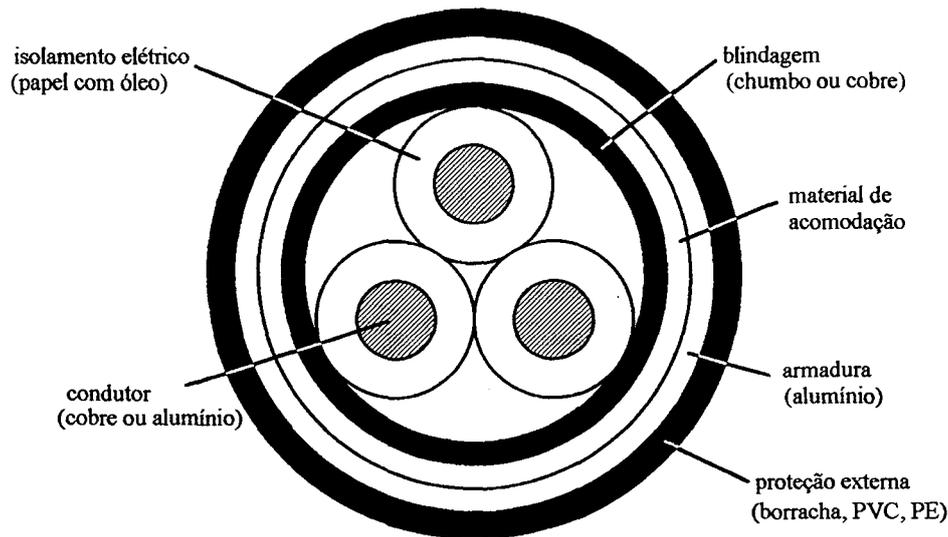


Figura 2-1. Cabo elétrico para alta tensão, com 3 condutores.

2.1.1 Condutor

Quando um condutor é projetado, devem ser determinados o material de que ele será composto e a forma geométrica da sua seção transversal.

Os materiais normalmente utilizados na fabricação dos condutores de cabos elétricos são o cobre e o alumínio. Considerando apenas a resistência ôhmica na capacidade de condução de corrente dos cabos, para o transporte de uma mesma corrente o condutor de alumínio teria diâmetro 28% maior do que o de cobre, mas teria cerca da metade do peso. A maior limitação ao uso do alumínio como condutor elétrico vinha sendo a confecção de acessórios, em face da rápida oxidação do metal em contato com o ar e da deterioração de suas propriedades mecânicas quando deformado. Estes problemas estão hoje resolvidos, com o desenvolvimento de novas técnicas de trabalho e acessórios especiais.

De acordo com a aplicação, a forma do núcleo pode variar bastante. As estruturas mais comuns são:

- redondo sólido: ideal do ponto de vista econômico, mas pouco flexível (na prática, limitado a $\phi < 4,11$ mm);
- redondo normal: constituído de um fio longitudinal, em torno do qual são colocadas uma ou mais coroas de fios de mesmo diâmetro do fio central. Com isto, o cabo adquire uma boa flexibilidade;
- redondo compacto: semelhante ao redondo normal, mas sofre um processo de compactação que elimina os espaços vazios na periferia e no interior do condutor. Este processo deixa a superfície externa do condutor mais uniforme, mas a flexibilidade é diminuída;
- setorial compacto: semelhante ao redondo compacto. Neste caso, um condutor redondo normal é compactado e deformado, de forma a adquirir um perfil setorial adequado à sua utilização nos cabos múltiplos. Este processo permite uma economia de materiais de enchimento e proteção;
- flexíveis: resultantes do encordoamento de um grande número de fios de diâmetro reduzido;
- concí: condutor anular, usado em cabos com isolamento de papel impregnado com óleo, cujo núcleo oco forma um canal para o óleo impregnante.

Além destas, há outras estruturas, para uso específico, como, por exemplo:

- condutor segmentado: dividido em 3 ou 4 setores de círculo, separados por uma parede isolante. Estrutura empregada quando o cabo tem um condutor apenas, com seção maior do que 500 mm², caso em que é sensível um efeito pelicular e altas correntes de Foucault;
- condutor anular: fios encordoados em redor de um núcleo central de corda têxtil.

Cada cabo pode conter um condutor apenas (núcleo simples) ou pode conter mais de um condutor (núcleo múltiplo). Em geral, no caso de tensões muito altas o sistema trifásico é composto por três cabos de núcleos simples.

2.1.2 Isolamento elétrico

O material isolante é escolhido de acordo com a tensão a que o cabo será submetido. Quanto maior a probabilidade de o isolante apresentar falhas, menor a tensão admissível sobre o mesmo. As falhas aparecem também por um processo de "envelhecimento" do cabo, que é a perda da sua característica isolante devido a uma exposição contínua a um gradiente excessivamente elevado de tensão. Alguns materiais apresentam uma longa vida útil quando submetidos a tensões médias, mas envelhecem muito rapidamente sob tensões altas. De uma maneira geral, os materiais sintéticos são utilizados para médias tensões e o papel impregnado com óleo é o único com comportamento garantido para tensões muito altas.

Os materiais normalmente utilizados como isolamento dos cabos de energia são:

- sólidos (extrudados):
 - termoplásticos, que amolecem com o aumento de temperatura, como PVC, polietileno e HDPE (ou PEAD: polietileno de alta densidade);
 - termofixos, que não amolecem com o aumento de temperatura, como XLPE (polietileno reticulado), EPR (borracha etileno-propileno).
- estratificados:
 - papel impregnado com óleo em massa;
 - papel impregnado com óleo fluido sob pressão.

No caso de emprego de isolamento termoplástico, é importante não chegar próximo à temperatura de fusão do material isolante, enquanto que para isolamento baseado em papel, a maior preocupação do projetista deve ser evitar temperaturas nas quais as tiras de papel possam se tornar quebradiças.

Os dielétricos extrudados ou dielétricos sólidos propriamente ditos são aplicados através de um processo de extrusão contínua, quase sempre seguida de um processo de vulcanização. Os dielétricos em papel impregnado são obtidos através de um enfaixamento de papel de diferentes espessuras e pesos, seguido de um processo de secagem e impregnação. As impurezas do óleo que impregna o papel são eliminadas através de tratamento especial com terras raras, filtragem e desgaseificação. Se uma pequena impureza, ou mesmo resíduo de gás, permanecer no óleo, não ficará concentrada em um único ponto, devido ao movimento da massa líquida com a temperatura. Além disto, o óleo impregnante tem grande capacidade de absorção de gases.

Vazios ou impurezas localizadas no interior do isolamento constituem-se em sedes de ionização que podem danificar o dielétrico. O método de aplicação de isolamento estratificado evita o aparecimento de vazios no meio do isolamento, enquanto que o processo de preparação e aplicação de dielétricos sólidos torna quase impossível evitar a presença destes vazios. Por isto, os isolantes sólidos são mais utilizados nos cabos de baixa e média tensão.

Um dos parâmetros considerados na seleção de um isolante elétrico é a sua resistência à ionização, que é o tempo necessário ao aparecimento de fissuras em amostras do material isolante colocadas em célula especial de provas, onde são submetidas a descargas parciais com ionizações intensas. Além disto, deve ser considerada a rigidez dielétrica do material, que é o gradiente de tensão capaz de perfurar o dielétrico (dado em kV/mm). Os isolantes estratificados, pela sua construção característica, possibilitam uma boa uniformidade de rigidez dielétrica ao longo do cabo. Como consequência, o papel impregnado é o que apresenta menor probabilidade de falhas sob tensões altas.

O isolamento elétrico determina a classificação dos cabos. Atualmente, os tipos de cabos CA (corrente alternada) para alta tensão mais empregados pela indústria de cabos elétricos são:

- cabos "self-contained oil-filled", SCOF, em que o isolante é papel com óleo impregnado em massa;
- cabos "pipe-type high-pressure oil-filled", HPOF, em que o isolante é papel impregnado com óleo sob pressão;
- cabos com isolamento extrudado: EPR, XLPE e HDPE.

2.1.3 Blindagem interna

Consta de uma camada semicondutora interposta entre o condutor e o isolamento, de forma a uniformizar o campo elétrico formado no isolamento. Sem esta proteção, o campo elétrico assume uma forma distorcida, acompanhando as irregularidades da superfície do condutor e provocando concentração de esforços elétricos, como mostra a figura 2-2.

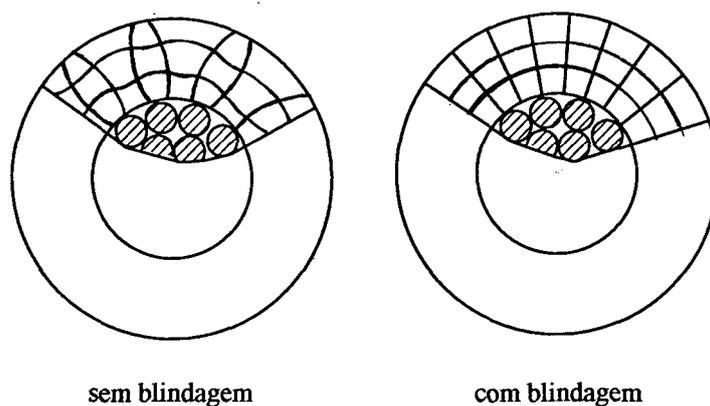


Figura 2-2. Linhas de campo elétrico no dielétrico do cabo.

2.1.4 Blindagem sobre o isolamento

Consiste de uma camada de material semicondutor e também de uma camada de material condutor aplicados sobre a superfície do isolamento. Sua principal finalidade é confinar o campo elétrico dentro do cabo isolado. Da mesma forma que para a blindagem interna, não podem sobrar espaços vazios entre a blindagem externa e a superfície do isolamento.

O cabo sem blindagem mostrado na figura 2-3, denominado "a campo não-radial" apresenta distribuição irregular do campo elétrico, enquanto que no bloco blindado, denominado "a campo radial", o campo elétrico se distribui de forma equilibrada, radialmente em relação ao condutor. O campo radial é importante principalmente em tensões mais elevadas, pois garante solicitações elétricas uniformes em cada camada isolante.

Logo após a camada semicondutora, há uma camada condutora. Nos cabos "secos" (sem óleo fluido), a camada condutora é constituída de fitas ou fios de cobre e fornece um caminho de baixa impedância para a condução de correntes induzidas em caso de curto-circuito. Quando se deseja uma capacidade de condução de corrente bem definida, a construção mais indicada é a de fios, cuja resistência ôhmica é praticamente constante ao longo da vida do cabo. No caso das fitas, a resistência ôhmica fica dependendo da condição de contato superficial em um eventual remonte das mesmas.

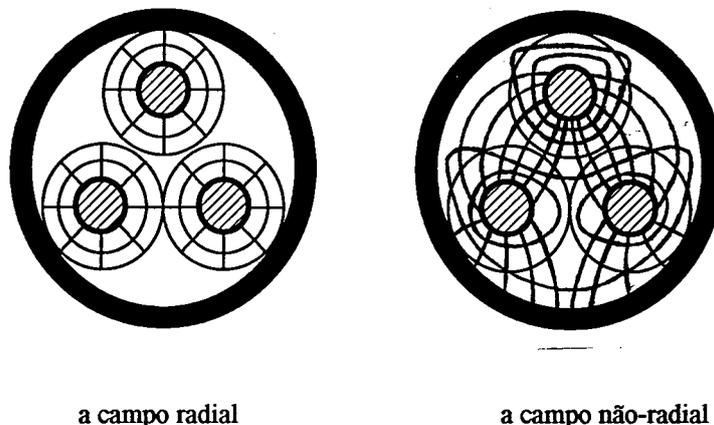


Figura 2-3. Linhas de campo elétrico no interior do cabo.

Para os cabos em papel, o elemento de baixa impedância é constituído por uma capa metálica do tipo contínuo, para assegurar a estanqueidade do núcleo. Emprega-se tradicionalmente o chumbo e, mais recentemente, o alumínio.

Além de conduzir uma eventual corrente de curto-circuito de volta à estação (a corrente de curto-circuito não pode ser injetada no terreno por questões de segurança), a blindagem externa serve para uniformizar as tensões na blindagem semicondutora longitudinalmente. Tensões altas tendem a diminuir a vida da camada semicondutora.

2.1.5 Proteção externa

Os cabos devem ser protegidos com uma capa não-metálica. Estas capas externas são normalmente feitas em PVC, polietileno ou neoprene, e sua escolha baseia-se na resistência a ações de natureza mecânica ou química. Recentemente, está sendo adicionada em alguns casos uma camada de um material resistente ao ataque de cupins.

Nos cabos isolados em papel, por exemplo, a blindagem metálica (em chumbo ou alumínio) tem que ser protegida contra corrosão por uma camada de PVC ou polietileno. Proteções metálicas adicionais, com função de armação, são empregadas nas instalações sujeitas a danos mecânicos. Os tipos mais usados são:

- armações planas, de fitas de aço, aplicadas helicoidalmente;
- armações de fita de aço ou alumínio, aplicadas transversalmente, corrugadas e intertravadas. É o tipo mais moderno, pois além de garantir maior resistência aos esforços radiais que o tipo tradicional a fitas planas, confere boa flexibilidade ao cabo;
- armações de fitas de aço, empregadas nos casos em que se deseja atribuir ao cabo resistência aos esforços de tração (cabos submarinos, por exemplo).

2.2 Cabos a óleo fluido

Entre os diversos tipos de cabo, o mais confiável para aplicação em tensões muito altas é o cabo com óleo fluido a alta pressão. Por isto mesmo é o cabo a óleo fluido que é encontrado nas situações mais críticas do ponto de vista térmico, ou seja, em situações de alta geração de calor.

Os cabos a óleo fluido são basicamente construídos com um condutor oco (na construção unipolar), de modo a prover um canal para o óleo impregnante. O mesmo condutor é formado por várias coroas anulares, que por sua vez são formadas por setores anulares encordoados helicoidalmente.

Sobre o condutor são aplicadas algumas fitas de papel carbono semiconductor. Diretamente sobre esta camada semicondutora é aplicado o isolamento propriamente dito. Sobre o isolamento é aplicada novamente uma camada de papel carbono semiconductor e uma tela de fibra de vidro metalizada, como mostra a figura 2-4.

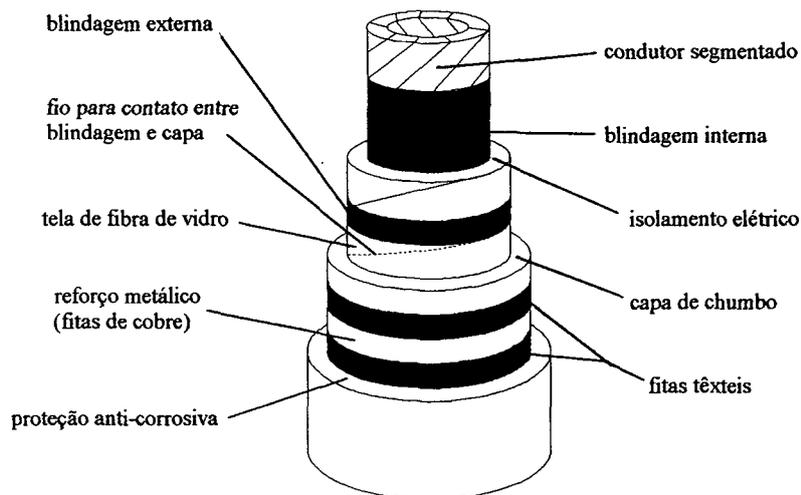


Figura 2-4. Configuração típica de cabo com isolamento a óleo fluido.

Durante a operação de enfaixamento, todas as fitas são aplicadas com tensão, largura e espessura especificados. Logo após, o condutor enfaixado é colocado em autoclave especial para ser submetido à operação de secagem e impregnação. Esta autoclave possui um sistema de aquecimento externo e bombas de vácuo de grande vazão e alto-vácuo. Toda a massa enfaixada é colocada nesta autoclave, o condutor é aquecido através de corrente contínua e as paredes externas são aquecidas. Esta mesma "massa" fica submetida a vácuo de alguns centésimos de mercúrio. Terminado o ciclo de secagem, o qual, dependendo do nível de tensão do cabo, pode durar dezenas de horas, é feita a impregnação de toda a massa com óleo fluido.

Após a operação é aplicada bainha metálica de alumínio ou chumbo e proteção anti-corrosiva de polietileno ou PVC. No caso da capa de chumbo é requerido um reforço metálico adicional e este é dado por fitas de cobre ou bronze aplicadas helicoidalmente sobre a bainha de chumbo, entre camadas de fitas têxteis.

Após a operação de impregnação, um dispositivo constituído por uma membrana mantém o cabo sempre a pressão interna de óleo, de modo que em qualquer ponto seja sempre garantida uma pressão mínima de 4 mco (metros de coluna de óleo)

2.3 Origem das perdas de calor

Nas linhas aéreas, a propriedade isolante do ar permite o uso de condutores sem proteção. Nos cabos subterrâneos, o isolamento, a blindagem e as armaduras constituem-se em fontes adicionais de geração de calor. A principal fonte de calor a ser dissipado provém do efeito Joule nos condutores, mas as perdas adicionais podem atingir níveis altos, principalmente para tensões elevadas, como mostra a tabela 2.1.

Tabela 2.1. Perdas em um sistema trifásico a plena carga, lançado diretamente no solo, expressas como uma porcentagem da perda total (King e Halfter, 1982).

Voltagem (kV)	Condutor	Dielétrico	Capa protetora
66	85.56	3.45	10.99
132	78.75	9.22	12.03
275	60.72	21.56	17.72
400	45.54	36.44	18.02

Assim, além da geração de calor no condutor, no caso de cabos elétricos subterrâneos devem ser consideradas gerações adicionais de calor devido a perdas no dielétrico, na capa protetora do isolamento elétrico (blindagem) e na armadura do cabo.

De uma maneira geral, as perdas são divididas em:

- perdas devidas à tensão, que são as perdas no dielétrico, dependentes apenas da tensão nominal do cabo;
- perdas associadas à corrente, que são as perdas por efeito Joule no condutor, na capa protetora (blindagem) e na armadura ou tiras de reforço, quando for o caso. Estas perdas dependem da carga (exigência de corrente) imposta ao cabo pelos consumidores e varia, portanto, ao longo do ano e até ao longo do dia.

2.3.1 Perdas no condutor

No condutor ocorre geração de calor por efeito Joule, de acordo com

$$W_{\text{cond}} = \mathcal{R}I^2 \quad (\text{W/m}) \quad (2-1)$$

Nesta expressão, a corrente I depende da demanda de carga imposta sobre a linha e \mathcal{R} é a resistência CA do condutor por unidade de comprimento, em que são levados em conta fatores como a temperatura do condutor, a forma de sua seção transversal e a interferência de cabos próximos, quando for o caso.

A corrente I pode variar ao longo de um dia e com a época do ano, acompanhando as oscilações de demanda. Quando não estão disponíveis informações detalhadas sobre a curva de carga, projeta-se o cabo para o máximo valor de corrente esperado.

A resistência ôhmica por unidade de comprimento do condutor pode ser calculada a partir de

$$\mathcal{R} = \mathcal{R}'(1 + y_s + y_p) \quad (\Omega/\text{m}) \quad (2-2)$$

onde

- R é a resistência ôhmica do condutor para corrente alternada, na máxima temperatura de operação;
- R' é a resistência ôhmica do condutor para corrente contínua, na máxima temperatura de operação (Ω/m);
- y_s é um fator para efeito de película, associado à forma da seção transversal do condutor;
- y_p é um fator para efeito de proximidade, para levar em consideração a influência de outros condutores próximos.

2.3.2 Perdas no dielétrico

Perdas que ocorrem no isolamento como resultado do campo elétrico. Para voltagens menores do que 22 kV, o aquecimento adicional devido a este efeito pode ser desprezado.

O isolante elétrico é na verdade um capacitor cilíndrico, cujo diagrama de fases típico está representado na figura 2-5. Como o capacitor real nunca é perfeito, sempre aparece uma corrente, cuja componente resistiva I_R , em fase com a tensão fase-terra U_0 vai ser a responsável pela geração de calor:

$$W_{diel} = U_0 I_R \quad (2-3)$$

A parcela resistiva depende do ângulo δ , característico do material do isolamento, que liga as componentes resistiva e capacitiva da corrente associada ao capacitor, ou seja,

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{I_R}{I_C} \quad (2-4)$$

de modo que a perda no dielétrico é dada por

$$W_{diel} = U_0 I_C \operatorname{tg}\delta$$

ou

$$W_{diel} = \omega C \operatorname{tg}\delta U_0^2 \quad (\text{W/m}) \quad (2-5)$$

que é a expressão encontrada na norma IEC 287 para o cálculo das perdas no dielétrico.

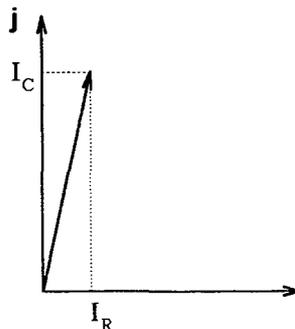


Figura 2-5. Diagrama de fases típico de um capacitor real.

2.3.3 Perdas na blindagem

Quando cabos de núcleo simples são usados em sistemas de corrente alternada, a presença de uma capa metálica em torno de cada condutor isolado tem um efeito importante sobre a corrente admissível do cabo (Barnes, 1966).

Além de fechar hermeticamente o núcleo do cabo, a blindagem é necessária devido à impossibilidade de fabricação de dielétricos perfeitos. Os dielétricos podem apresentar eventuais falhas de fabricação, que levam ao aparecimento de correntes a partir do condutor, e a blindagem representa um caminho de baixa impedância (preferencial à terra) para que estas correntes sejam conduzidas de volta a um ponto aterrado na estação de distribuição. Se, ao longo de uma linha de um sistema trifásico, as capas metálicas são unidas e/ou aterradas em um ponto apenas (somente na estação), o sistema formado pelas três blindagens com suas ligações forma um circuito aberto, com altos valores de voltagem induzidos por uma ação do tipo "transformador" entre os condutores e as capas sendo mantidos ao longo da linha. Para uniformizar as tensões induzidas pelo condutor, e também para garantir que a tensão no exterior de cada cabo seja nula, as blindagens devem ser periodicamente ligadas entre si e/ou aterradas. Desta forma, como mostra a figura 2-6, em cada trecho entre duas ligações (ou "seção elétrica"), as voltagens induzidas são colocadas em curto-circuito e ficam inócuas para o meio exterior.

Quando as blindagens são ligadas entre si periodicamente, o problema das tensões induzidas fica resolvido mas o circuito fechado resultante leva ao aparecimento de correntes ao longo da blindagem que dissipam energia como calor. Adicionalmente, devido a limitações de fabricação e de instalação, a disposição das capas metálicas em relação aos campos magnéticos nunca é perfeitamente simétrica, o que resulta no aparecimento de correntes de Foucault, estando as capas ligadas entre si ou não.

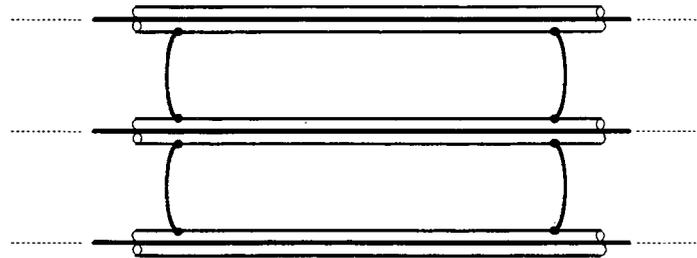


Figura 2-6. Ligação periódica de blindagens em cabos de alta tensão.

A geração de calor nas blindagens está, portanto, associada a perdas de dois tipos:

- perdas devido a correntes circulantes, apenas no caso de blindagens periodicamente unidas entre si;
- perdas devido a correntes de Foucault.

As perdas resultantes das correntes de Foucault geradas na capa são geralmente pequenas quando comparadas com as perdas por correntes circulantes e, em muitos casos, podem até ser desprezadas. Com a preocupação de manter as ligações em espaçamentos periódicos ao longo das linhas (muito importantes para a uniformização das tensões induzidas) e ao mesmo tempo minimizar as correntes "circulantes", foi desenvolvida uma técnica especial de ligação cruzada (cross-bonding) entre as blindagens. Os cabos continuam sendo ligados periodicamente mas, como mostra esquematicamente a figura 2-7, no momento da ligação entre as blindagens é feita

uma transposição entre os três cabos. Com as transposições, cada seção da blindagem fica sujeita à influência de tensões induzidas pelas três fases ao mesmo tempo e a tensão induzida resultante é nula. Além de eliminar as correntes circulantes, esta técnica minimiza as perdas inerentes à configuração plana, resultantes da assimetria dos campos magnéticos, pois em cada seção elétrica os três cabos passam pelas três posições relativas possíveis. Uma colocação dos cabos em triângulo ("trifólio") não tem problemas de assimetria mas é menos conveniente do ponto de vista de instalação.

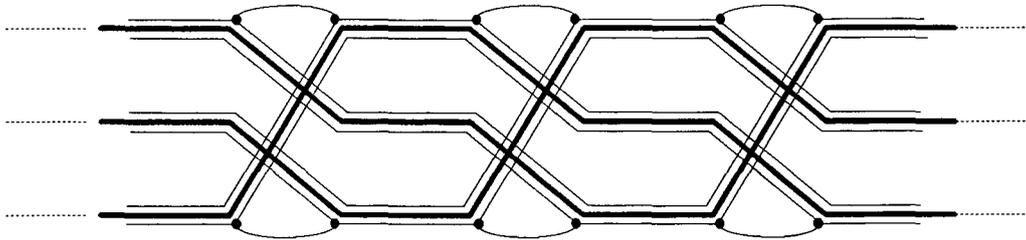


Figura 2-7. Ligação cruzada em cabos de alta tensão.

As perdas na blindagem podem ser determinadas a partir das características dos cabos e são dadas, na norma IEC 287, como uma fração (λ_1) das perdas nos condutores (ρI^2), ou seja,

$$W_{\text{capa}} = \lambda_1 \rho I^2 \quad (\text{W/m}) \quad (2-6)$$

2.3.4 Perdas em armaduras e tiras de reforço

Nos casos em que há uma armadura metálica protegendo o cabo contra danos mecânicos ou em que os cabos são acondicionados em tubos metálicos, uma perda adicional por efeitos indutivos deve ser considerada. Também esta perda é representada como uma fração (λ_2) da perda no condutor e é dada em função das características do elemento metálico, ou seja,

$$W_{\text{arm}} = \lambda_2 \rho I^2 \quad (\text{W/m}) \quad (2-7)$$

2.4 Representação do problema térmico como um circuito elétrico

Nem todas as camadas do cabo geram calor e nem todas as parcelas de calor gerado têm que atravessar todas as camadas. De acordo com a figura 2-1, as perdas no condutor produzem um fluxo de calor que tem que atravessar o dielétrico, a blindagem, as proteções e o solo circundante, antes de ser dissipado, enquanto que o fluxo de calor devido às perdas geradas na blindagem tem apenas que atravessar os dois últimos componentes do trajeto até o ambiente. Em princípio, uma representação adequada do interior do cabo teria que levar em conta estas peculiaridades.

A análise do interior do cabo exige apenas parâmetros globais, temperaturas em pontos, e não a distribuição detalhada de temperaturas, o que justifica um cálculo a parâmetros concentrados. Desta forma, a análise de circuitos térmicos globais por meio de circuitos elétricos

análogos é um modo natural de obter o comportamento térmico do interior do cabo. A analogia entre circuitos elétricos e térmicos implica na equivalência mostrada na tabela 2.2.

Tabela 2.2. Equivalência entre os circuitos térmico e elétrico.

• Circuito térmico:	• Circuito elétrico:
Q = fluxo de calor (W/m)	corrente (A)
T = temperatura (K)	tensão (V)
R = resistência térmica global (K/W/m)	resistência elétrica (Ω)
C = capacidade térmica global (J/K/m)	capacitância (F)

As gerações de calor resultantes das perdas nas diversas camadas do cabo são representadas como fontes de corrente no circuito elétrico. Como consequência das "correntes" (gerações de calor) impostas pelas fontes de corrente e das diversas "resistências" (resistividades térmicas globais, equivalentes a cada camada de material do cabo), pode-se determinar "potenciais" (temperaturas) em pontos escolhidos.

O problema de condução de calor no interior do cabo é axissimétrico e pode ser representado por uma rede elétrica unidimensional correspondente a uma linha radial típica, como indicado na figura 2-8. Em consequência desta representação, as resistividades de cada camada do cabo correspondem às resistências globais de anéis cilíndricos de raios r_{int} e r_{ext} , dadas por (Incropera, 1990):

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \ln \left(\frac{r_{ext}}{r_{int}} \right) \quad (2-8)$$

em que ρ é a resistividade térmica do material do anel cilíndrico. Como sugere a figura 2-8, as resistências térmicas das partes metálicas foram desprezadas, por serem muito menores do que as demais.

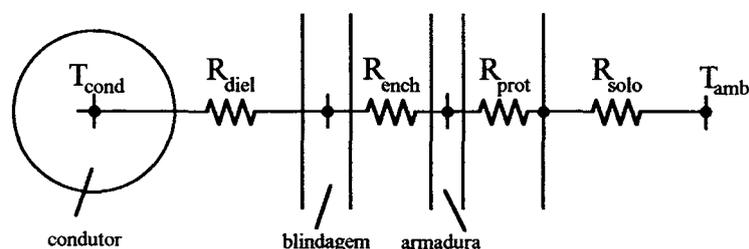


Figura 2-8. Resistências térmicas à dissipação do calor gerado no cabo.

O circuito elétrico adequado ao problema de condução de calor no cabo está mostrado na figura 2-9. A geração de calor do núcleo é atribuída ao seu centro e a geração de calor no dielétrico é modelada como se ocorresse totalmente em um ponto que divide a camada isolante em duas porções de mesma resistência térmica global. A solução deste circuito pode fornecer a variação da temperatura em qualquer nó da rede, ao longo do tempo. Em especial, é importante obter o potencial associado ao centro do condutor (T_{cond} na figura 2-9). Este potencial representa a temperatura do elemento mais quente que estará em contato com o isolamento térmico e é esta temperatura que irá determinar se a geração de calor decorrente da demanda de carga imposta ao cabo não impõe danos ao dielétrico, que é o elemento mais sensível ao calor de todo o conjunto.

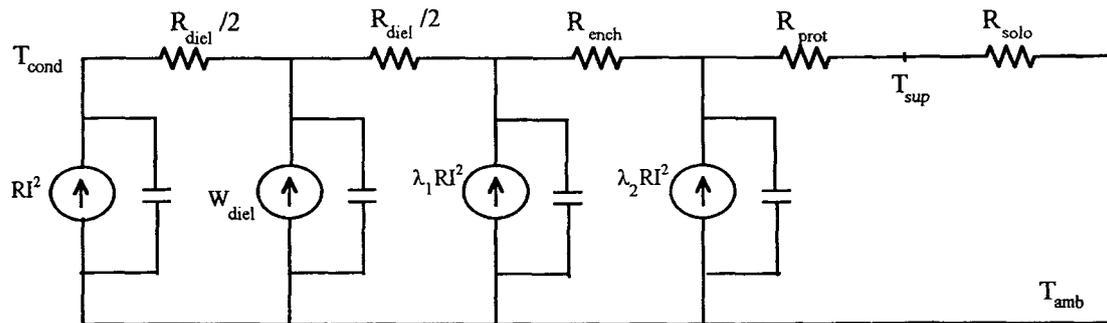


Figura 2-9. Circuito elétrico equivalente ao térmico para a avaliação de regime permanente de um cabo genérico.

Dependendo da aplicação, algumas camadas não são consideradas (como o enchimento, por exemplo) ou têm função diferenciada (em vez de armadura, podem aparecer tiras de reforço ou um tubo de aço, quando for o caso), mas a configuração mostrada inclui as possibilidades de fabricação atualmente disponíveis.

3 O PROJETO DE CABOS ELÉTRICOS

Neste capítulo são descritos os métodos de solução atualmente adotados como norma pela indústria de cabos elétricos. A partir destas descrições é possível determinar os pontos fracos da atual modelagem, que justificam a adoção de um modelo mais preciso, como o de Philip e de Vries, para os fenômenos de transferência de calor e migração de umidade no solo e a aplicação do método numérico de volumes finitos, descritos em capítulos subsequentes.

O projeto de um cabo elétrico é essencialmente uma seleção entre modelos e tamanhos padronizados, em um processo do tipo tentativa e erro. Com base em tabelas que fornecem valores de ampacidade em condições conhecidas de operação, como as apresentadas por Heinhold (1979), é feita uma primeira estimativa do tipo de cabo adequado e do diâmetro necessário. Em seguida são feitos os cálculos térmicos recomendados pelas normas, para verificar se durante o funcionamento deste cabo o seu condutor não atingirá um nível de temperatura que danifique o seu isolamento elétrico, ao longo de sua vida útil. Caso isto ocorra, ou caso o cabo escolhido esteja com folga demais, um novo cabo é escolhido e o processo é reiniciado.

Para os cabos mais comumente usados pela Pirelli, a temperatura máxima admissível para o condutor, em operação normal, é:

- SCOF, EPR, XLPE: 90°C;
- HPOF: 85°C;
- HDPE, até 80°C.

Além do dimensionamento em regime normal de operação, o cabo deve estar preparado para situações excepcionais, que perturbam o seu regime estacionário, tais como:

- condições de emergência: o cabo fica sobrecarregado temporariamente, de 10 min. a muitas horas, em vista de alguma emergência (o cabo, pode, por exemplo, ter que assumir a carga de outras linhas enquanto elas são submetidas a manutenção);
- curto-circuitos: sobrecargas com duração da ordem de 1 segundo.

Na análise de situações de emergência são toleradas temperaturas mais altas que as de operação normal, porque se supõe que o cabo será submetido a poucas situações de emergência ao longo de sua vida útil, e por pouco tempo. Não há recomendações internacionais para estas temperaturas. A Pirelli, baseada em sua experiência, adota:

- SCOF: 115°C por uma hora, 110°C por 6 a 8 horas, 105°C por mais de 12 horas. Em um ano, não pode haver mais de 100 horas em emergência e na vida toda do cabo, o total de períodos de emergência tem que ser menor do que 300 a 400 horas;
- HPOF: 105°C por 100 horas, 100°C por 300 horas. Apenas uma emergência por ano e média de 0,2 emergências na vida total do cabo;

- **EPR:** 130°C por qualquer duração. Valem as mesmas observações que para SCOF;
- **XLPE:** 105°C por qualquer duração. Valem as mesmas observações que para SCOF;
- **HDPE:** 90°C por qualquer duração. Valem as mesmas observações que para SCOF.

Apenas como referência, nas situações de curto-circuitos, a fim de manter as propriedades dielétricas do isolamento, o limite de temperaturas para os componentes condutores de corrente em contato com este isolamento é:

- 250°C para SCOF, HPOF, XLPE e EPR
- 180°C para HDPE

No presente estudo é dada ênfase à modelagem térmica do solo circundante aos cabos. O problema térmico acoplado entre solo e cabo é resolvido para regime permanente (para uma carga constante), em regime periódico (para cargas cíclicas) e transiente (quando a condição normal de funcionamento do cabo é subitamente modificada por uma emergência), casos em que o processo transiente do cabo dura tempo suficiente para atingir o solo. A análise de curto-circuito diz respeito somente aos elementos condutores de corrente no interior do cabo e dispensa, portanto, um modelo mais sofisticado para o solo.

A temperatura no condutor é a mais crítica, mas não é a única que deve ser verificada no projeto. Em condições de curto-circuito, é a temperatura da blindagem que atinge níveis elevados. Conforme IEC 986 (sec.6.2, 1989), as temperaturas máximas admissíveis para as blindagens e tiras metálicas, levando em conta as propriedades dos materiais de cobertura mais comuns, são:

- 200°C, se a cobertura protetora for PVC;
- 150°C, se for polietileno de baixa-densidade;
- 180°C, se for polietileno de alta-densidade;
- 150°C, se for polietileno ligado a folhas de alumínio;
- 160°C, se for PVC ligado a folhas de alumínio;
- 220°C, se for polietileno clorosulfurado;
- no caso de blindagens de ligas metálicas, a sua temperatura máxima é 200°C.

Resumindo, os dados necessários para executar um cálculo de ampacidade do ponto de vista térmico, de acordo com as normas são:

- temperatura de operação admissível dos condutores do cabo;
- as perdas dielétricas;
- as resistências ôhmicas longitudinais dos componentes condutores de corrente no cabo;
- resistências térmicas radiais dos componentes não-metálicos do cabo (resistências térmicas dos componentes metálicos são desprezadas);
- resistência térmica radial do meio envolvente;
- a temperatura ambiente, que na verdade é a temperatura em um ponto distante, não influenciado pelo cabo.

Um projeto completo deveria levar em consideração ainda uma avaliação econômica de custos, para determinar o valor presente do montante requerido para uma nova instalação. Dois fatores compõem este custo: o custo do investimento inicial e o custo das perdas ao longo da vida do cabo. Geralmente, a componente relativa ao investimento inicial aumenta à medida que a bitola do condutor aumenta. Por outro lado, as perdas geralmente diminuem com um aumento da bitola do condutor e, como o seu custo ao longo da vida útil do cabo é bastante significativo, a seleção de um condutor maior do que o requerido para satisfazer as exigências de carga pode

levar a um custo global menor. Na prática, o peso do investimento inicial acaba sendo determinante na escolha do cabo e a seleção é feita simplesmente com base no menor diâmetro de cabo capaz de assegurar condições de segurança na operação.

3.1 Curvas de carga

O dimensionamento de um cabo subterrâneo depende da quantidade de calor gerada no seu interior. O calor gerado, por sua vez, depende da *carga* imposta ao cabo, que é a demanda de corrente que ele terá que transmitir. Na realidade, esta demanda é variável ao longo de um ciclo diário: como mostra a figura (3-1), a carga é baixa no início e no fim do dia e tende a atingir picos apenas uma vez pela manhã e uma à tarde. Durante a noite, a carga é bem menor e o cabo esfria bastante até o dia seguinte, quando o ciclo se repete.

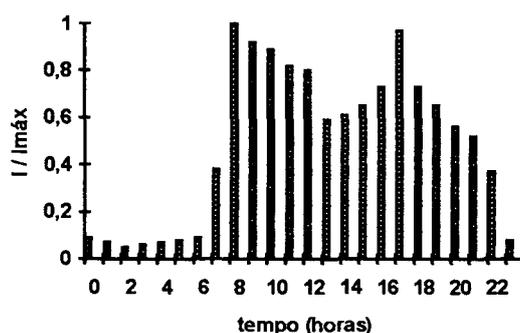


Figura 3-1. Ciclo de carga típico.

O parâmetro mais empregado para caracterizar a curva de carga é o chamado *fator de carga*, que é a relação entre a corrente média a que o cabo esteve submetido ao longo de cada ciclo diário e o valor de pico máximo. O fator de carga, f_c , é expresso em percentagem e indica quão próxima está a demanda de uma situação de carga constante ($f_c=100\%$).

A obtenção de uma curva de carga real é muito trabalhosa, pois exige que um acompanhamento diário de demanda na região que será atendida pelo cabo esteja cuidadosamente catalogado. Quando informações detalhadas não estão disponíveis, assume-se que o efeito da *forma* do ciclo é secundário, desde que sejam respeitados o valor máximo e a média da curva real, que serão fornecidos pelas concessionárias na forma de fator de carga. Em geral, as concessionárias não mantêm um acompanhamento diário da curva de carga, mas guardam o fator de carga.

Sendo secundária a forma da curva, assume-se a forma mais simples possível, que é a curva de carga do tipo *flat top*. No ciclo *flat top* a corrente máxima é mantida por um mínimo de 6 horas, sem nenhuma restrição em relação à forma do resto do ciclo, exceto que a temperatura máxima do condutor ocorra no fim das 6 horas.



Figura 3-2. Curva de carga do tipo *flat top*.

Na prática, a curva de carga simplificada assume a forma mostrada na figura 3-2, em que I_{\min} é dado por:

$$I_{\min} = I_{\max} \left[\frac{4(f_c/100) - 1}{3} \right] \quad (3-1)$$

Este procedimento é conveniente porque exige apenas o conhecimento da corrente máxima e do fator de carga, que são, em geral, informações mais fáceis de serem obtidas.

3.2 Definição de ampacidade

A *ampacidade* é o máximo valor de corrente (em *amperes*) que pode ser transmitido pelo cabo, em condições normais de operação (sem sobrecarga ou curto-circuito), sem que a geração de calor resultante desta transmissão leve o condutor a uma temperatura maior do que a admissível. O valor da ampacidade está ligado à estrutura interna do cabo e à curva de carga que lhe é imposta, mas depende, fundamentalmente, da eficiência do solo circundante em dissipar o calor gerado.

É a ampacidade que determina a escolha do cabo e até mesmo a escolha do aterro adequado para a trincheira aonde ele deverá ser colocado. Diferentes modelos de cabos e/ou tipos diversos de solos para aterro são comparados por meio da sua ampacidade, até que seja alcançada uma situação em que o cabo possa transmitir com segurança o valor de corrente especificado pelo usuário responsável pela transmissão de energia elétrica.

3.3 Métodos de cálculo adotados pelos fabricantes de cabos

Os primeiros modelos para o cálculo de ampacidade levavam em consideração apenas a corrente máxima que seria transmitida pelo cabo. Com o natural crescimento da demanda de energia elétrica, passou a ser necessário levar em consideração o efeito da variação cíclica diária de carga, mostrada na figura 3-1. Este efeito propicia uma estimativa mais real da temperatura de operação do cabo e leva ao dimensionamento de cabos menores do que com os modelos iniciais.

Paralelamente, novos tipos de cabos começaram a ser desenvolvidos, com um aumento significativo das temperaturas de operação admissíveis. Como consequência, a quantidade de calor transferida para o solo circundante em condições normais de operação aumentou, levando a uma intensa migração de umidade para longe do cabo. Tal migração pode eventualmente secar completamente o solo, deixando-o com uma resistividade térmica várias vezes maior do que a inicial.

A seguir são descritos os procedimentos de cálculo de ampacidade segundo as normas internacionais atualmente adotadas pelos fabricantes de cabos elétricos de alta potência e em especial pela empresa Pirelli S.A., em ordem crescente de detalhamento da curva de carga e das características do solo circundante. Alguns casos ainda estão em discussão pelo comitê internacional encarregado da regulamentação do projeto de cabos elétricos (CIGRÉ). Nos casos em que ainda não há uma norma internacional específica sobre o assunto, é discutida a recomendação da CIGRE a respeito ou o modo como este caso é tratado atualmente pelas normas internas da Pirelli (1987). A tabela 3-1 mostra um resumo das principais normas e sua aplicação.

Tabela 3-1. Aplicação das normas para projeto de cabos.

Situação do solo circundante:	Tipo de carga:	Norma empregada:
• uniforme	contínua	IEC 287 (1982)
• uniforme	cíclica	IEC 853-2 (1989)
• não-uniforme pela utilização de backfill	contínua	Recomendação CIGRÉ 21 (1985)
• não-uniforme pela utilização de backfill	cíclica	Norma Pirelli (1987) - em estudo pela CIGRÉ
• não-uniforme devido à migração de umidade	contínua	IEC 287 Amend. 2 (1991)
• não-uniforme devido à migração de umidade	cíclica	Norma Pirelli (1987) - em estudo pela CIGRÉ

3.3.1 Solo uniforme e carga contínua

Quando o fator de carga é muito próximo de 100%, ou quando não se têm dados confiáveis para o projeto, assume-se uma demanda de carga constante e ininterrupta, no valor máximo de corrente esperado para o cabo ao longo de toda a sua vida útil (assume-se um fator de carga de 100%). Neste caso é necessário conhecer apenas a solução em regime permanente, e é suficiente um circuito simples como o da figura 3-3, em que o efeito de capacitância das diversas camadas do cabo é desconsiderado. Este circuito elétrico equivale a uma configuração genérica, com n condutores em um cabo, mas, por simplicidade, está representado apenas um condutor com seu isolamento elétrico.

Para este caso, é empregada a norma IEC 287 (1982), que trata do cálculo da corrente admissível para cabos de potência em regime permanente. Equacionando o laço maior do circuito, obtém-se a fórmula de trabalho da norma, para um cabo com n condutores:

$$(\rho I)^2 = \frac{\Delta T_{\text{cond}} - W_{\text{diel}} \left[0,5R_{\text{diel}} + n(R_{\text{ench}} + R_{\text{prot}} + R_{\text{solo}}) \right]}{R_{\text{diel}} + n(1 + \lambda_1)R_{\text{ench}} + n(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(R_{\text{prot}} + R_{\text{solo}})} \quad (3-2)$$

em que:

- n é o número de núcleos condutores no cabo;
- ρ é a resistência ôhmica do condutor na sua máxima temperatura de operação, (Ω/m);
- T é a temperatura, ($^{\circ}\text{C}$);
- R é a resistência térmica, (K/W);
- W é a perda de calor, (W);
- λ_1 e λ_2 são coeficientes associados a perdas por efeito Joule resultantes de correntes induzidas.

Os diversos elementos são avaliados separadamente, levando em conta os detalhes de cada caso, e são discutidos no capítulo 2. O valor de I corresponde à *ampacidade* do cabo submetido a análise, para que a geração de calor decorrente da transmissão de potência não eleve a temperatura do seu condutor mais do que ΔT_{cond} graus centígrados acima da temperatura ambiente.

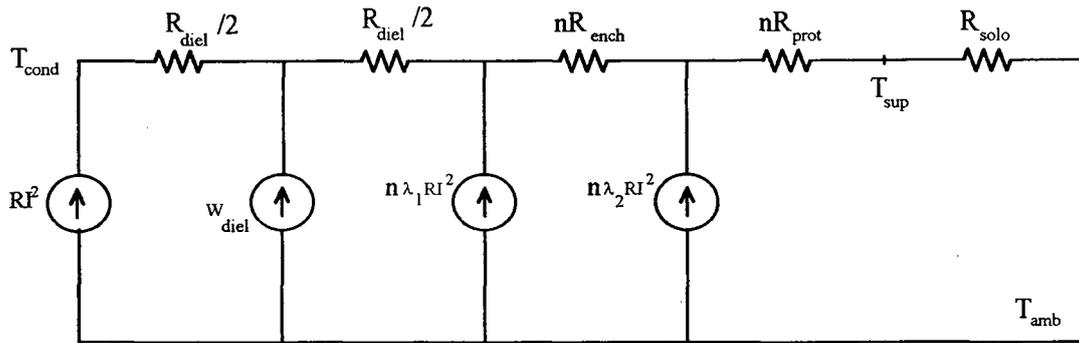


Figura 3-3. Circuito elétrico para análise do problema térmico em regime permanente.

3.3.2 Solo uniforme e carga cíclica

O valor de ampacidade tirado da equação (3-2) é bastante conservativo, pois, como indica a figura 3-1, o cabo não opera o dia inteiro com a máxima carga que pode suportar. Apesar disto, a definição de ampacidade continua sendo "a corrente máxima que pode ser admitida no condutor do cabo". Ora, se o cabo atinge a corrente máxima apenas uma ou duas vezes ao dia, a temperatura no seu condutor neste momento será menor do que aquela que seria atingida se esta corrente máxima circulasse no cabo ininterruptamente. A repetição cíclica da carga acaba por determinar um regime periódico para a temperatura do cabo, que fica a maior parte do dia abaixo de uma temperatura máxima.

O comportamento transiente dos cabos de tensão muito alta é considerado na norma IEC 853-2 (1989). Esta norma não descreve exatamente uma "evolução das temperaturas no tempo", mas sim o modo de calcular um fator M , pelo qual a corrente admissível correspondente a 100% de fator de carga pode ser multiplicada para fornecer a corrente de pico do ciclo de carga real, de modo que a temperatura de pico do condutor em regime periódico não exceda o valor de temperatura admissível usado no cálculo de regime permanente. O que esta norma calcula, portanto, é uma "folga" para a corrente máxima, por saber de antemão que ela só será atingida durante poucos minutos ao longo de um ciclo.

Cálculo do fator M

Primeiramente, o ciclo de corrente diário é expresso como uma proporção do seu valor máximo, e passa a ter valores entre 0 e 1. Este valor máximo deve ser a ampacidade para regime permanente, ou seja, quando o cálculo de carga cíclica é iniciado, o cálculo para carga constante já deverá estar pronto. O ciclo de perdas de energia do cabo é encontrado elevando-se todas as ordenadas desta curva adimensionalizada ao quadrado. São consideradas apenas as perdas por efeito Joule; as perdas no dielétrico não contribuem para o transiente térmico porque não dependem da corrente. Além disto, assume-se que o transiente de carga começa quando o transiente associado a perdas no dielétrico já está completo.

A curva de perdas de calor diária é então decomposta em 24 pulsos horários retangulares, cuja magnitude é denotada por $Y_0, Y_1, Y_2, \dots, Y_{23}$, onde Y_i é a medida de $(I/I_{\text{máx}})^2$ entre i e $(i+1)$ horas antes do horário esperado para a temperatura máxima do condutor. A hora " $i=0$ ", momento em que o condutor submetido a uma tal curva de perdas de energia deve atingir sua temperatura máxima, é encontrada por inspeção. A figura 3-4 mostra uma curva de perdas de calor típica tratada deste modo. Este processo deve ser cuidadoso porque, devido ao efeito

cumulativo do calor gerado, o máximo de temperatura pode não coincidir com o valor de corrente mais alto do ciclo, o que significa, ainda, que a magnitude de Y_0 não é necessariamente unitária. Está indicado também na figura 3-4 o fator de perda de carga μ , que é a média dos valores de Y .

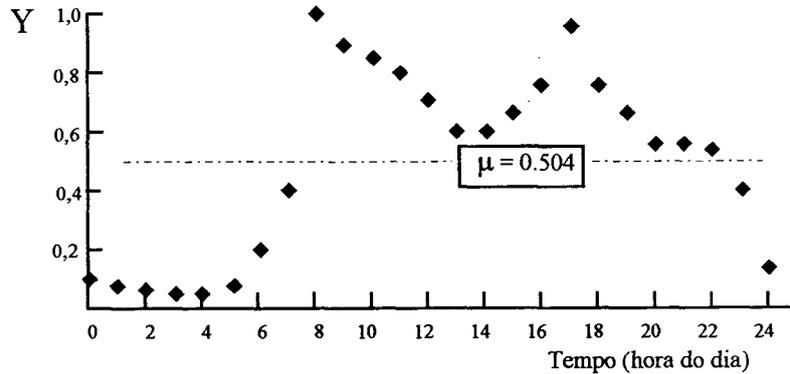


Figura 3-4. Tratamento da curva de perdas de energia.

Toda a análise matemática parte do cálculo do transiente da temperatura do condutor do cabo para uma corrente constante, ou seja, da resposta do sistema a uma função degrau de perdas de calor como a da figura 3-5, correspondente ao valor da corrente admissível (I_R) para fator de carga 100%. A elevação transiente da temperatura do condutor acima da temperatura ambiente para carga constante, $\Delta T_R(t)$, serve como ponto de partida para o cálculo da resposta da temperatura do cabo ao ciclo de perdas. O efeito de cada pulso horário de perda é considerado separadamente e a resposta total é a soma de todos os 24 transientes.

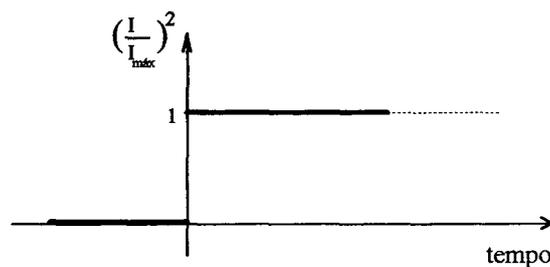


Figura 3-5. Função degrau de perdas de calor.

Como os diversos pulsos de perda são em geral menores do que o máximo, I_R , o seu efeito conjunto deve levar a uma temperatura máxima, T_m , menor do que a admissível para o condutor em regime permanente, $T_R(\infty)$, o que significa que o pico máximo da carga cíclica pode ser maior do que I_R . Esta folga é quantificada na forma de um fator $M > 1$, pelo qual a corrente calculada com 100% de fator de carga pode ser multiplicada. Matematicamente, a obtenção do fator M segue o seguinte raciocínio:

i) a partir da modelagem como circuito elétrico, vale afirmar que a elevação da temperatura máxima do condutor acima da temperatura ambiente, em carga cíclica, é proporcional ao pico de corrente máximo do ciclo, ou seja,

$$\Delta T_m \propto I_{\text{cicl}}^2 \quad (3-3)$$

ii) mas T_m é menor do que a temperatura admissível $T_R(\infty)$, de modo que um aumento no pico de corrente ainda é aceitável:

$$\Delta T_R \propto (MI_{\text{cicl}})^2 \quad (3-4)$$

iii) combinando as equações (3-3) e (3-4), vem

$$M = \sqrt{\frac{\Delta T_R(\infty)}{\Delta T_m}} \quad (3-5)$$

A temperatura admissível para o condutor é conhecida e a elevação máxima da temperatura de condutor submetido a carga cíclica, ΔT_m , depende da curva de perdas e do cálculo do transiente no interior do cabo. Seja a elevação da temperatura do condutor em um tempo de i horas após a aplicação inicial de uma carga constante dada por $\Delta T_R(i)$, com um crescimento exponencial do tipo mostrado na figura 3-6. Para um cabo típico, após 6 horas de transiente esta curva já atingiu regime permanente. A temperatura no condutor seguiria sempre esta curva se as perdas fossem sempre associadas à corrente máxima. Para calcular a elevação de temperatura do condutor com um ciclo real dado (Y_0, Y_1, Y_2, \dots conhecidos), a norma IEC 853-2 (1989) computa a elevação parcial de temperatura em cada uma das 6 horas que antecedem o regime permanente e *pondera* este valor com o fator de perdas Y_i correspondente.

Então, a elevação máxima da temperatura do condutor acima da ambiente para uma corrente com um ciclo diário de variação definido (e cujo valor de pico é a corrente para fator de carga 100%) é a soma das elevações parciais horárias ponderadas, ou seja,

$$\Delta T_m = Y_0 \Delta T_R(1) + Y_1 [\Delta T_R(2) - \Delta T_R(1)] + \dots + Y_5 [\Delta T_R(6) - \Delta T_R(5)] + \mu [\Delta T_R(\infty) - \Delta T_R(6)] \quad (3-6)$$

Na aplicação desta fórmula está implícito que é preciso conhecer o ciclo de perdas somente nas 6 horas que antecedem o momento em que a temperatura máxima é atingida. Assume-se que as perdas que se localizam a mais de 6 horas do pico têm pouca influência e que o seu efeito pode ser condensado na perda média, μ .

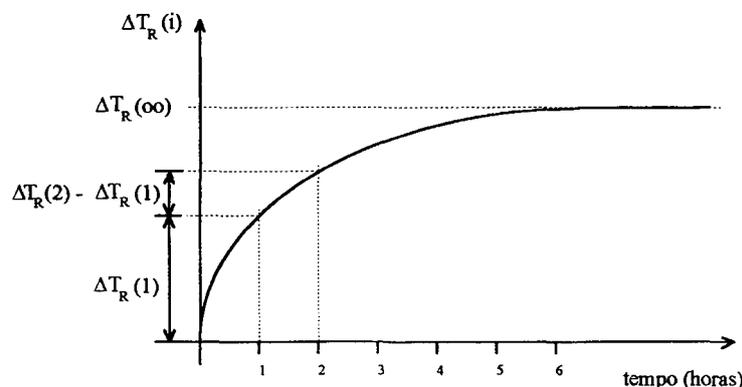


Figura 3-6. Transiente da temperatura do condutor em cabo típico, submetido a carga constante.

Esta é uma análise simplificada e a superposição de efeitos dos pulsos horários supõe um problema linear, tanto para o cabo como para o solo circundante. Esta hipótese será válida enquanto não houver variações muito acentuadas de umidade no solo, como é discutido nos capítulos seguintes.

Substituindo a equação (3-6) na equação (3-5), obtém-se a seguinte expressão geral para o fator M :

$$\frac{1}{M} = \sqrt{\left(\sum_0^5 Y_i \left[\frac{\Delta T_R(i+1)}{\Delta T_R(\infty)} - \frac{\Delta T_R(i)}{\Delta T_R(\infty)} \right] + \mu \left[1 - \frac{\Delta T_R(6)}{\Delta T_R(\infty)} \right] \right)} \quad (3-7)$$

em que $\Delta T_R(i)$ vem da avaliação do transiente do cabo após a aplicação de uma função degrau de carga, descrito a seguir.

Transiente no cabo após a aplicação de uma carga constante

A norma IEC 853-2 (1989) calcula a elevação transiente da temperatura do condutor *acima da ambiente*:

$$\Delta T_{\text{cond}}(t) = T_{\text{cond}}(t) - T_{\text{amb}} \quad (3-8)$$

como uma superposição das soluções de dois problemas independentes separados pela superfície do cabo, ou seja,

$$\Delta T_{\text{cond}}(t) = \Delta T_c(t) + a(t)\Delta T_e(t) + \Delta T_{\text{diel}} \quad (3-9)$$

onde:

- $\Delta T_c(t) = T_{\text{cond}}(t) - T_{\text{sup}}(t)$ é a elevação transiente da temperatura do condutor *acima da temperatura da sua superfície*, incluindo no circuito térmico apenas elementos internos ao cabo;
- $\Delta T_e(t) = T_{\text{sup}}(t) - T_{\text{amb}}$ é a elevação da temperatura da superfície do cabo *acima da temperatura ambiente*, incluindo apenas elementos externos ao cabo e assumindo durante todo o transiente que as perdas no interior do cabo já atingiram regime permanente;
- $a(t)$ = attainment factor, fator que indica o tempo que uma informação de aumento de temperatura na superfície do cabo leva para chegar ao condutor, responsável pela ligação entre os dois problemas.
- ΔT_{diel} é um incremento constante da temperatura do condutor associado às perdas no dielétrico, as quais não são consideradas nos cálculos de $\Delta T_c(t)$ e $\Delta T_e(t)$ porque dependem apenas da voltagem (constante no tempo) a que o cabo está submetido; como ΔT_{diel} não varia no tempo, ele pode ser calculado separadamente para ser adicionado ao final, como uma "correção" de $\Delta T_{\text{cond}}(t)$.

Este problema está mostrado esquematicamente na figura 3-7. Primeiro é calculada uma relação entre $T_{\text{cond}}(t)$ e $T_{\text{sup}}(t)$ que não leva em conta o ambiente em torno do cabo, dada por $\Delta T_c(t)$. Depois é verificada qual seria a elevação da temperatura da superfície do cabo ao longo do tempo, $\Delta T_e(t)$, se o cabo fosse tomado apenas como uma fonte, sem capacidade de armazenamento de calor. Estas duas partes são ligadas por meio de um fator que transfere a informação fornecida por $\Delta T_e(t)$ para o condutor.

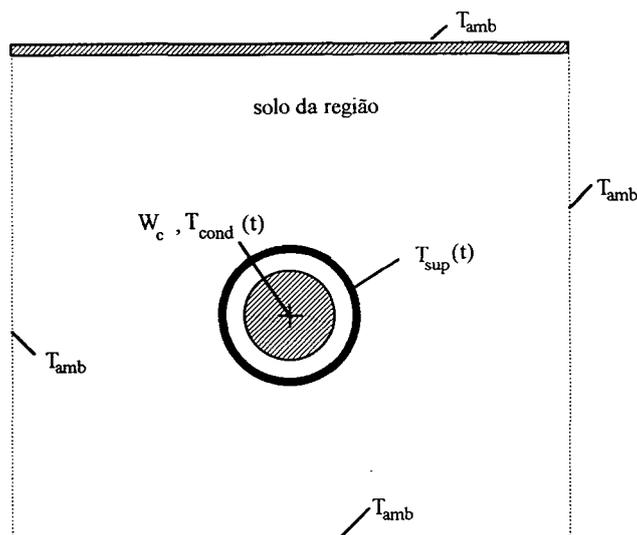


Figura 3-7. Problema transiente resolvido pela norma IEC 853-2.

Transiente da parte interna do cabo - cálculo de $\Delta T_c(t)$

Nos cálculos transientes deve ser considerado o circuito completo, com todas as capacitâncias térmicas, mostrado na figura 2-9. A solução deste circuito completo envolveria a solução de um sistema de equações diferenciais de primeira ordem para cada caso. Como os elementos distantes do núcleo do cabo têm pouca influência sobre o transiente do condutor, na norma 853-2 (1989) é apresentada a solução de um circuito equivalente simplificado. Assume-se que todas as configurações internas de cabos de alta potência podem ser reduzidas a um circuito com apenas duas resistividades e duas capacitâncias, como aquele mostrado na figura 3-8.

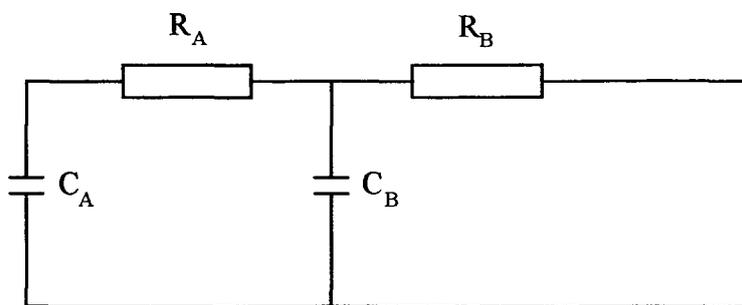


Figura 3-8. Circuito elétrico equivalente para o cálculo de respostas transientes no interior do cabo.

Para este circuito com os dois terminais à direita curto-circuitados, a resposta transiente resultante da aplicação de um degrau de carga como o da figura 3-5 é dada pela norma IEC 853-2 como

$$\Delta T_c(t) = W_c \left[R_a (1 - e^{-at}) + R_b (1 - e^{-bt}) \right] \quad (3-10)$$

onde W_c é a perda de calor no condutor por unidade de comprimento, baseada na máxima temperatura por ele atingida e as demais variáveis auxiliares são dadas por:

$$R_a = \frac{1}{a-b} \left[\frac{1}{C_A} - b(R_A + R_B) \right] \quad (3-11)$$

$$R_b = R_A + R_B - R_a \quad (3-12)$$

em que

$$a = \frac{M_0 + \sqrt{M_0^2 - N_0}}{N_0} \quad (3-13)$$

$$b = \frac{M_0 - \sqrt{M_0^2 - N_0}}{N_0} \quad (3-14)$$

e onde

$$M_0 = \frac{1}{2} [C_A (R_A + R_B) + C_B R_B] \quad (3-15)$$

$$N_0 = C_A R_A C_B R_B \quad (3-16)$$

Da equação (3-10), e por inspeção no circuito da figura (3-8), conclui-se que *em regime permanente* a diferença entre as temperaturas do condutor e da superfície do cabo é dada por

$$\Delta T_c(\infty) = W_c (R_A + R_B) \quad (3-17)$$

O fator de "attainment"

Matematicamente, o fator de "attainment" é definido como:

$$a(t) = \frac{\Delta T_c(t)}{\Delta T_c(\infty)} \quad (3-18)$$

ou seja, para cada instante de tempo t a partir do início do transiente no cabo, o fator $a(t)$ indica quão próximo o condutor está de entrar em regime permanente. Substituindo a equação (3-17) em (3-18), obtém-se a expressão final para o fator como:

$$a(t) = \frac{\Delta T_c(t)}{W_c (R_A + R_B)} \quad (3-19)$$

Transiente da parte externa do cabo - cálculo de $\Delta T_e(t)$

Para o cálculo da transferência de calor no solo, o cabo é tomado na norma IEC 853-2 (1989) como uma fonte linear com uma geração constante de calor, W_I , correspondente ao total de perdas por efeito Joule no cabo (as perdas no dielétrico são consideradas somente no final). A resposta transiente desta fonte de calor em relação ao ambiente que a circunda é obtida analiticamente com o método das imagens e a elevação da temperatura da sua superfície em relação à temperatura ambiente é dada por:

$$\Delta T_e(t) = \frac{\rho_T W_I}{4\pi} \left\{ \left[-\text{Ei}\left(\frac{-D_e^2}{16t\delta}\right) - \left[-\text{Ei}\left(\frac{-L^2}{t\delta}\right) \right] \right] + \sum_{k=1}^{N-1} \left[-\text{Ei}\left(\frac{-d_{pk}^2}{4t\delta}\right) - \left[-\text{Ei}\left(\frac{d'_{pk}{}^2}{4t\delta}\right) \right] \right] \right\} \quad (3-20)$$

para o cabo mais quente de um grupo de cabos igualmente carregados, onde:

- W_I = geração de calor associada ao total de perdas por efeito Joule por unidade de comprimento de cada cabo do grupo;
- $-\text{Ei}(-x)$ = a função exponencial integral;
- ρ_T = resistividade térmica do solo, considerada *constante* no tempo e no espaço;
- δ = difusividade térmica do solo, *constante*;
- t = tempo a partir da aplicação da carga;
- D_e = diâmetro da superfície externa do cabo;
- L = profundidade do eixo do cabo mais quente;
- d_{pk} = distância do centro do cabo k ao centro do cabo mais quente p ;
- d'_{pk} = distância da imagem do centro do cabo k ao centro do cabo mais quente p ;
- N = número de cabos;
- o somatório se estende sobre todos os cabos exceto o mais quente.

Contribuição constante do dielétrico - cálculo de ΔT_d

Em todos os cálculos feitos pelas normas está implícita a hipótese de que a carga de corrente só é aplicada após o transiente de voltagem. Como as perdas no dielétrico são devidas somente à tensão aplicada ao cabo, elas já terão atingido regime permanente antes do instante inicial de qualquer ciclo de perdas.

Se, no circuito da figura 3-3, a única fonte atuante fosse W_{diel} , o aumento de temperatura no condutor tenderia a se igualar a:

$$\Delta T_{\text{diel}} = W_{\text{diel}} \left[\frac{1}{2} R_{\text{diel}} + n(R_{\text{ench}} + R_{\text{prot}} + R_{\text{solo}}) \right] \quad (3-21)$$

que é o aumento de temperatura no ponto em que W_{diel} é gerado, transmitido integralmente para o condutor porque não passa corrente à esquerda deste ponto no circuito.

Ciclo de carga do tipo *flat top*

No caso particular do ciclo de cargas *flat top*, mostrado na figura 3-2, a expressão de cálculo do fator M fica reduzida a

$$\frac{1}{M} = \sqrt{\frac{\Delta T_R(6)}{\Delta T_R(\infty)} + \mu \left(1 - \frac{\Delta T_R(6)}{\Delta T_R(\infty)}\right)} \quad (3-22)$$

em que $\Delta T_R(6)$ é calculado da mesma forma que para a equação (3-7).

Efeito da variação das perdas no condutor com a temperatura

A mudança na temperatura do condutor durante o transiente implica em que as perdas no condutor sejam variáveis com o tempo: as perdas são menores no início e vão crescendo à medida que a temperatura do condutor vai aumentando. Normalmente este efeito é ignorado, levando a um erro a favor da segurança. Quando se deseja levar em consideração a "folga" que a variação das perdas do condutor com a temperatura proporciona, a norma IEC 853-2 prevê a seguinte correção para a temperatura do condutor:

$$\Delta T_a(t) = \frac{\Delta T_R(t)}{1 + a[\Delta T_R(\infty) - \Delta T_R(t)]} \quad (3-23)$$

onde:

- $\Delta T_R(t)$ = é a elevação transiente da temperatura do condutor acima da ambiente sem correção para a variação nas perdas no condutor, baseada na resistência ôhmica do condutor no final do transiente;
- $\Delta T_R(\infty)$ = é a elevação da temperatura do condutor acima da ambiente em regime permanente;
- a = é o coeficiente de variação com a temperatura da resistividade elétrica do material do condutor na temperatura de início do transiente.

3.3.3 Carga contínua e solo especial próximo ao cabo

Quando o solo da região de instalação do cabo apresenta valores de resistividade muito altos, ou tem uma forte tendência a secar, é necessário substituí-lo por um solo especial que apresente características térmicas mais favoráveis (backfill), pelo menos na porção mais próxima ao cabo. Com isto, a resistividade global do solo fica menor e o calor gerado no cabo é mais facilmente dissipado.

Como resultado desta combinação, as linhas de fluxo entre o cabo e a superfície do solo têm que atravessar regiões de diferentes resistividades. A parte do domínio correspondente ao solo, mostrada na figura 3-9, deixa de ser uniforme, e os procedimentos de cálculo descritos nos itens 3.3.1 e 3.3.2 não podem mais ser aplicados diretamente.

O solo nestas condições é dito não-uniforme "por razões geométricas". Para analisá-lo, os projetistas de cabos seguem uma recomendação da CIGRÉ 21, que descreve um procedimento para o cálculo de uma resistividade efetiva para o solo composto. Tal método é válido somente para regime permanente, assume que o backfill esteja completamente seco e não contempla a possibilidade de secagem parcial (instabilidade térmica) do solo da região (Pirelli S.A., 1987).

O problema é resolvido com o uso de uma transformação conforme, que mapeia o domínio semi-infinito dos cabos e do solo em um novo diagrama com fronteiras finitas

retangulares. Neste novo diagrama, a resistência térmica global é facilmente calculada, permitindo a determinação imediata da temperatura nas superfícies dos cabos.

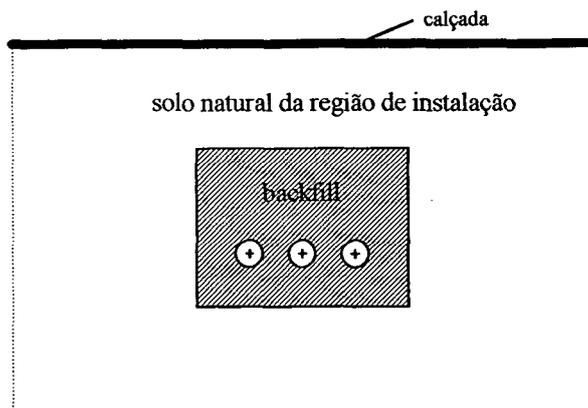


Figura 3-9. Não-uniformidade "geométrica" do solo.

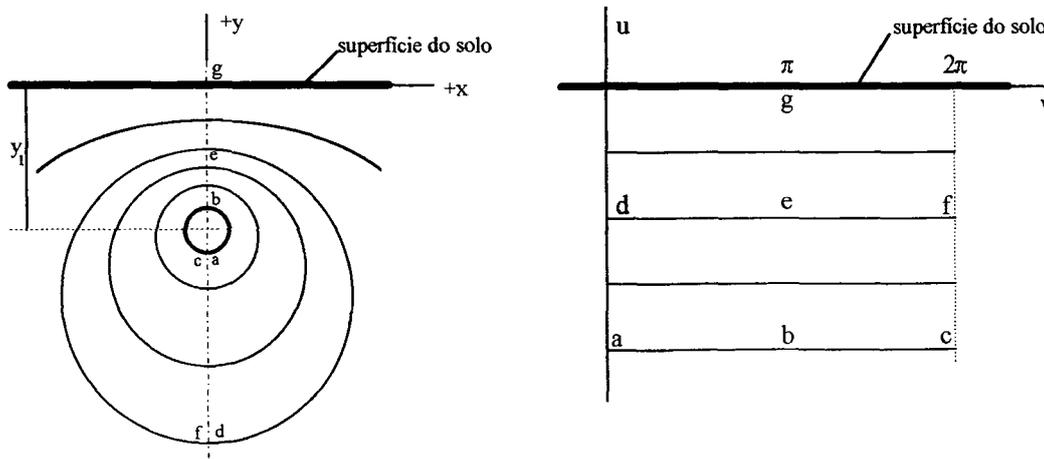
O conceito que envolve esta transformação pode ser exemplificado com o caso de um cabo isolado enterrado em solo uniforme. O campo térmico, mostrado na figura 3-10a pode ser mapeado no campo retangular finito da figura 3-10b, pela aplicação da seguinte função:

$$w = \Phi(z) = \ln \left[\frac{z + j|y_1|}{z - j|y_1|} \right] \tag{3-24}$$

onde

- y_1 é a coordenada do centro do cabo;
- $z = x + j.y$ são as coordenadas complexas de um ponto no plano original;
- $w = u + j.v$ são as coordenadas complexas do ponto correspondente no plano transformado

No plano transformado, as isothermas são linhas retas horizontais, paralelas à linha que representa a superfície do solo (considerada isotérmica). As fronteiras superior e inferior do plano transformado representam as superfícies do solo e do cabo, respectivamente. A resistência térmica ao longo das linhas de calor é a mesma em ambos os planos, mas pode ser prontamente computada apenas na geometria retangular do plano transformado.



(a) Campo térmico em torno de um cabo.

(b) Mesmo campo no plano transformado.

Figura 3-10. Mapeamento conforme para um cabo isolado em solo uniforme.

A elevação de temperatura da superfície externa do cabo acima da ambiente, e conseqüentemente sua resistência térmica externa, é dada diretamente pela ordenada "u" no plano transformado. Esta transformação está ligada apenas à *forma geométrica* das isothermas e linhas de fluxo, de modo que o valor de resistência térmica obtido é dado por unidade de geração de calor que atravessa a superfície do cabo (W/m^2) e por unidade de resistividade térmica do solo.

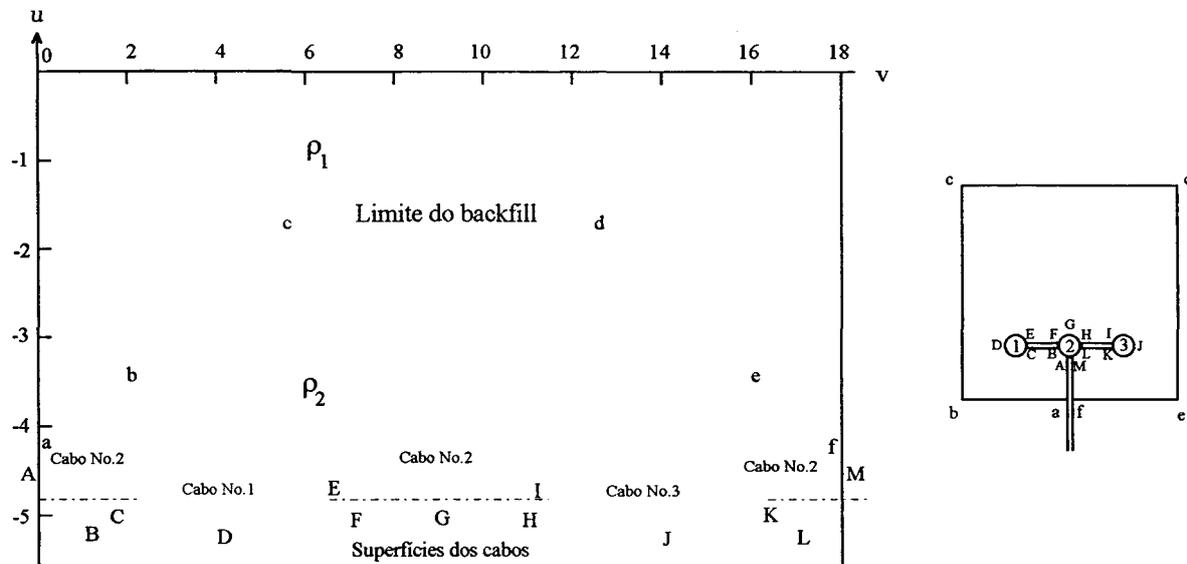


Figura 3-11. Transformação conforme para três cabos em trincheira de backfill.

Este conceito é extrapolado para o caso de três cabos em solo não-uniforme com o auxílio de uma função de mapeamento conveniente, descrita em detalhes no trabalho de Luoni et al. (1972). O resultado desta nova transformação leva a um domínio retangular no plano transformado em que as fronteiras da trincheira de backfill e as superfícies dos cabos assumem uma forma irregular, como a mostrada na figura 3-11. O mapa transformado é então dividido em "tiras" verticais paralelas de larguras convenientes, que são a seguir divididas no comprimento, de modo a acompanhar aproximadamente as fronteiras da região de backfill e das superfícies dos cabos, que passam a ser aproximadas por segmentos de reta. Cada retângulo assim obtido cobre aproximadamente áreas com apenas um dos dois valores de resistividade envolvidos no problema original. Finalmente, tais retângulos são agrupados em três circuitos série-paralelo, de acordo com os limites estabelecidos pelo mapeamento dos cabos, e são combinados para chegar à resistência térmica efetiva global para cada cabo. As três resistências térmicas assim obtidas permitem determinar qual a elevação de temperaturas que a superfície de cada cabo sofre como conseqüência da geração de calor imposta.

3.3.4 Carga contínua e solo alterado pela migração de umidade

Em alguns casos não é possível obter uma análise detalhada das propriedades do solo da região onde o cabo está para ser instalado e uma avaliação criteriosa da migração de umidade não pode ser feita. Nestas circunstâncias, para incluir no projeto a possibilidade de uma eventual secagem parcial do solo em torno do cabo, pode-se recorrer a um método simplificado, descrito no

amendment nro. 2 da norma IEC-287 (1991). Segundo este método, se o calor gerado for suficiente para elevar a temperatura da superfície do cabo acima de um nível crítico, o solo adjacente secará, formando uma região de alta resistividade em torno do cabo, como mostra a figura 3-12.

Assume-se que o limite entre as regiões seca e úmida coincida com uma isoterma, chamada de *isoterma crítica* (T_x). A isoterma crítica é uma propriedade *do solo* e varia de acordo com cada tipo de solo. De acordo com Pirelli S.A. (1987), o valor médio da isoterma crítica é 40 °C para solos do tipo arenoso e 59°C para os solos argilosos, o que justifica a adoção de um valor médio de 50°C como estimativa, quando dados precisos não estão disponíveis.

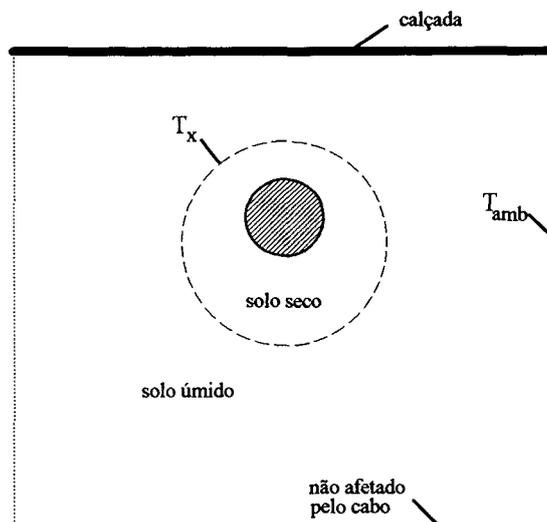


Figura 3-12. Formação de uma região seca no solo em torno do cabo.

A inclusão da temperatura crítica parte do caso em que a temperatura da superfície do cabo não ultrapassa o valor crítico, descrita no item 3.3.1, em que a geração total de calor no cabo pode ser escrita como:

$$W = \frac{T_{\text{sup}} - T_{\text{amb}}}{R_4} \quad (3-25)$$

onde:

- T_{sup} = temperatura na superfície do cabo, (°C);
- T_{amb} = temperatura ambiente, (°C);
- W = total de perdas do cabo (W/m); e
- R_4 = resistência térmica entre a superfície do cabo e o ambiente, para solo úmido (mK/W).

A resistividade do solo úmido é constante e vale ρ_u (mK/W), e a resistividade do solo seco, na região entre o cabo e a isoterma crítica é dada por ρ_s (mK/W). Se a temperatura na superfície do cabo for maior do que a temperatura crítica, o calor total gerado no cabo, equação (3-25), passa a ser escrito como

$$W = \frac{\rho_u (T_{\text{sup}} - T_x) + (T_x - T_{\text{amb}})}{R_4} \quad (3-26)$$

onde:

- T'_{sup} = temperatura na superfície do cabo quando a migração de umidade é considerada, (°C);
- T_x = temperatura crítica, (°C);

Assim, a mudança da resistência térmica externa ao cabo, resultante da formação de uma região seca, pode ser incluída na fórmula normal de cálculo de ampacidade para carga contínua, equação (3-2), levando a

$$(\theta I)^2 = \frac{\Delta T_{cond} - W_{diel} \left[0,5R_{diel} + n(R_{ench} + R_{prot} + \nu R_{solo}) \right] + (\nu - 1)\Delta T_x}{R_{diel} + n(1 + \lambda_1)R_{ench} + n(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(R_{prot} + \nu R_{solo})} \quad (3-27)$$

onde $\nu = \rho_s/\rho_u$ é a relação entre as resistividades das regiões seca e úmida.

3.3.5 Carga cíclica e solo alterado pela migração de umidade

Neste caso também é empregado o conceito de *temperatura crítica*, descrito no item 3.3.4 para cabos submetidos a cargas contínuas. É consenso entre os projetistas que este valor crítico de temperatura, que diferencia solo úmido de seco, pode ser mais alto para cargas cíclicas do que o valor utilizado para cargas contínuas, mas este efeito é difícil de ser determinado porque o comportamento da umidade sob a ação de cargas cíclicas é mais complexo do que com cargas contínuas. Por razões de segurança, atualmente adota-se para cargas cíclicas o mesmo valor de temperatura crítica que para cargas contínuas (Pirelli S.A., 1987).

Ao contrário do caso de cargas contínuas, ainda não há uma norma para o projeto de cabos elétricos sujeitos a cargas cíclicas, levando em consideração uma eventual secagem parcial em torno do cabo. Alguns métodos estão sendo avaliados atualmente pela CIGRÉ, entre os quais o procedimento de cálculo empregado por Pirelli S.A. (1987), descrito a seguir.

O método Pirelli combina, com adaptações adequadas, os métodos de cálculo da norma IEC 853-2 para cabos de potência sujeitos a cargas cíclicas e do amendment nr. 2 da norma IEC 287, para cabos sujeitos a migração de umidade. O fundamento teórico fica com as seguintes características:

1. Assume-se um ciclo do tipo *flat top* como o da figura 3-2, em que são acrescentadas as perdas no dielétrico, para chegar às perdas totais;
2. No instante em que chega o início do período de 6 horas (em que a carga é máxima), assume-se que o campo de temperaturas é devido somente à média do ciclo de perdas, $W_{médio}$, a qual, da mesma forma que para cargas contínuas em solos sujeitos a secagem parcial, é escrita em termos da temperatura crítica (T_x) como:

$$W_{médio} = \frac{\frac{\rho_u}{\rho_s} (\overline{T'_{sup}} - T_x) + (T_x - T_{amb})}{R_4} \quad (3-28)$$

em que as grandezas à direita têm o mesmo significado que na equação (3-26). Na verdade, a temperatura na superfície do cabo devido às perdas médias ainda não é conhecida e é necessário estimá-la (em um valor superior à temperatura crítica), o que leva a um valor de $W_{\text{médio}}$ estimado;

3. Considera-se que a temperatura da superfície do cabo no final do período de 6 horas atinge seu valor máximo, equivalente à aplicação de uma carga contínua no valor da carga máxima;
4. Considera-se que a elevação da temperatura da superfície do cabo acima do valor médio, no início do período de 6 horas, é efeito da diferença entre a carga máxima e a média (área hachurada na figura); a parcela desta diferença que não puder ser armazenada no cabo é que levará a temperatura na superfície do cabo para o valor máximo descrito no item 3;

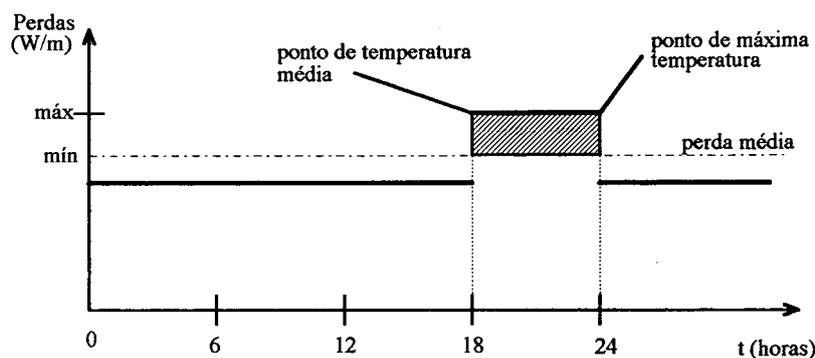


Figura 3-13. Parcela das perdas responsável pela elevação até a temperatura máxima.

5. Com o auxílio das capacitâncias, estima-se a capacidade de armazenamento de calor do cabo nas 6 horas finais do ciclo e assume-se que este armazenamento é feito em uma primeira parte destas 6 horas, em um tempo igual à constante de tempo do cabo; *na segunda parte* do período de 6 horas, a parcela da diferença entre o máximo e a média das perdas, descrita no item 4, que excedeu a capacidade de armazenamento do cabo na primeira parte do período é transferida para o solo; assume-se que é esta parcela que será a responsável por elevar a temperatura na superfície do cabo de um valor médio onde se encontra para o valor máximo do ciclo;
6. O excesso de calor descrito no item 5, gerado na segunda parte do período de 6 horas, é atribuído a uma fonte linear enterrada em um solo seco (houve secagem parcial, por hipótese) e é calculada qual seria a elevação da temperatura da superfície desta fonte com tal geração de calor imposta;
7. Como a temperatura máxima da superfície do cabo já é conhecida em função de uma carga contínua máxima (item 3 acima), um novo valor de temperatura *média* para a superfície do cabo pode ser calculado, com o auxílio da elevação de temperatura calculada no item 6;
8. Esta nova temperatura média da superfície do cabo é comparada com o valor inicialmente arbitrado no item 2: se a comparação não for boa, o cálculo é refeito.

Obtém-se, assim, valores de temperaturas no cabo que levam em consideração carga cíclica e secagem parcial no cabo.

3.5 Solução do problema completo

A norma Pirelli (1987) se refere ainda à solução do problema de secagem parcial quando é conhecida uma análise detalhada das propriedades do solo. Neste caso, com base no trabalho de Donazzi (1979), pode-se determinar com precisão o valor da isoterma crítica, apenas estimado nos cálculos até aqui descritos.

Mesmo abordando os problemas de migração de umidade e utilização de solo especial em torno do cabo, as normas atualmente disponíveis não permitem a solução do problema real, em que é necessário simular cabos de potência sujeitos a uma carga variável, considerando simultaneamente os efeitos de migração de umidade e utilização de backfill.

Uma modelagem mais criteriosa para o problema do solo, com base na teoria de meios porosos insaturados, permite que todas as complexidades do solo sejam levadas em consideração de forma natural. Aparentemente, esta teoria não tem sido empregada pelos projetistas de cabos porque a solução das equações que formam a sua base envolvem a determinação de coeficientes complexos, dependentes de muitos parâmetros. Além disto, as simulações de transientes com o auxílio desta teoria são normalmente muito demoradas.

Nos capítulos que seguem, a teoria de Philip e de Vries (1957), conforme apresentada por Hartley (1987) é aplicada a um problema de três cabos gerando calor simultaneamente, considerando migração de umidade e utilização de solo especial. Qualquer forma de curva de carga pode ser empregada, pois na solução destas equações é empregado um método do tipo "evolução temporal", em que os campos de temperatura e umidade vão sendo obtidos em seqüência, em intervalos regulares de tempo a partir do instante inicial.

O problema de simulações demoradas é contornado com a montagem em separado de uma matriz para os coeficientes. Assim, durante a simulação, quase todos os coeficientes que antes eram calculados a cada instante, já estão na memória do computador e podem ser rapidamente acessados. Cada solo pode ter a sua matriz arquivada, eliminando a necessidade de refazer os complexos cálculos que dão origem aos coeficientes a cada simulação. Com esta estrutura, pode-se montar uma biblioteca de solos que podem ser tomados como backfill ou como solo natural da região de instalação do cabo, conforme a necessidade do projetista.

4 O SOLO CIRCUNDANTE AO CABO

É necessário conhecer a estrutura interna do cabo de potência para poder quantificar o calor gerado por efeito Joule, mas é o solo circundante que vai ser o maior responsável pela sua vida útil. A resistência térmica correspondente ao solo é a mais significativa e mesmo cabos constituídos de materiais de resistividade térmica muito baixa apresentarão problemas se forem enterrados em solos com baixa capacidade de conduzir calor.

Mudar simplesmente para um solo com menor resistividade térmica pode não resolver o problema a longo prazo, pois o maior perigo é a *secagem* do solo. Se este solo não tiver uma boa capacidade de reter umidade na forma líquida, ele não poderá compensar a lenta expulsão de umidade na forma de vapor decorrente do aquecimento e secará na região próxima ao cabo. Uma vez seco, sua resistividade térmica atingirá valores muito altos, mesmo se inicialmente este solo pudesse ser considerado como adequado para o aterro. A região seca assim formada passa a atuar como uma espécie de isolante térmico em série com o solo úmido da região e dependendo da sua extensão pode levar o cabo a falhar.

Para avaliar o perigo de secagem do solo e a extensão de uma eventual camada seca, é necessário adotar um modelo que explique como a porção de solo próxima ao cabo reage à imposição de calor e como ela interage com o solo úmido distante. Um dos modelos mais utilizados atualmente na análise de fenômenos de transporte de calor e umidade em solos úmidos é o modelo fenomenológico de Philip e De Vries (1957). Philip e De Vries assumem uma relação de proporcionalidade entre os fluxos de calor e massa através do solo e os gradientes de temperatura e umidade presentes. Estas relações dependem de coeficientes (denominados de "difusividades") que são escritos em função de propriedades mais fundamentais do meio. Estas propriedades devem ser determinadas experimentalmente e variam com temperatura e umidade.

A solução do problema de transferência de calor e massa em solos úmidos à luz do modelo de Philip e De Vries pode ser dividida em duas etapas. A primeira etapa consiste na determinação das propriedades térmicas e hidrológicas básicas do meio e suas dependências com temperatura e umidade. Estas propriedades levam aos coeficientes fenomenológicos de Philip e De Vries. A segunda etapa é a solução do sistema de equações não-lineares que resultam do modelo para as condições do ambiente no local de instalação do cabo. A determinação experimental das propriedades de solos adequados a aterramento de cabos de potência é extensivamente discutida por Oliveira (1993).

Neste capítulo é apresentado o modelo de Philip e De Vries (1957) de acordo com o desenvolvimento teórico proposto por Hartley (1987). Também é discutido o significado dos coeficientes fenomenológicos de Philip e De Vries no contexto do problema do cabo elétrico e a obtenção matemática destes coeficientes, que serão utilizados na simulação computacional descrita no capítulo 6.

4.1 Descrição dos fenômenos físicos

O problema de transporte de calor e umidade em solos é bastante complexo. A figura 4-1 mostra esquematicamente um cabo de potência enterrado em solo úmido. Quando se inicia a transmissão de potência, a região em torno do cabo aquece e a umidade ali presente começa a evaporar, aumentando a pressão de vapor nos poros. Cria-se então um gradiente de pressão de vapor em relação ao solo distante, mais frio. Devido a este gradiente, surge um fluxo de vapor que tem como consequência baixar a umidade do solo que circunda o cabo. Por outro lado, tal processo de secagem deixa a região que contém material seco (S) com uma alta capacidade de succionar água por capilaridade a partir da região úmida (U).

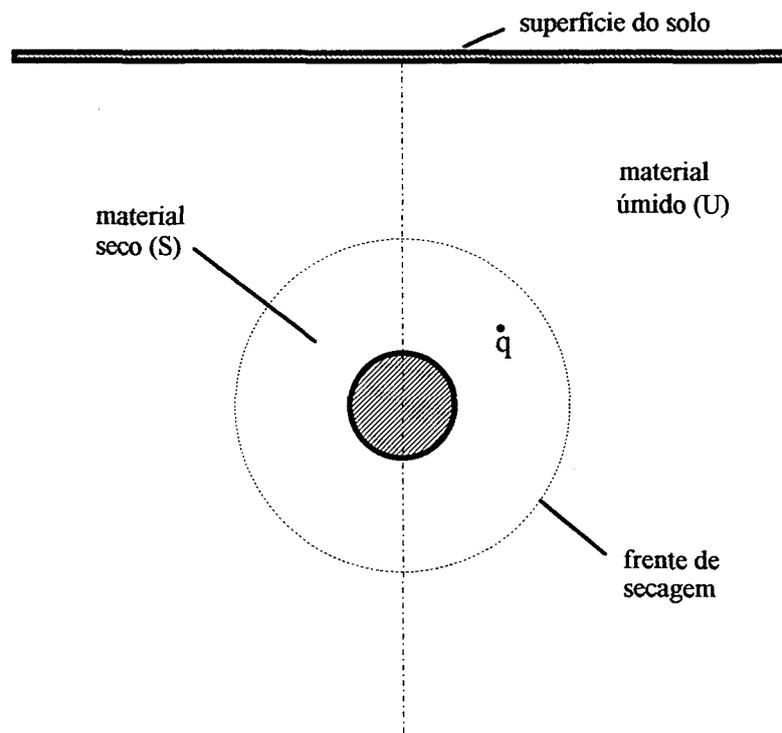


Figura 4-1. Situação esquemática de um cabo em funcionamento

A fronteira entre "S" e "U" é normalmente denominada uma "frente de secagem". Com o aquecimento do solo, o processo tende a atingir equilíbrio e a frente de secagem a ficar estacionária. A posição da frente depende, entre outras coisas, da *relação entre os fluxos de vapor e de líquido*, que está associada às propriedades do solo. Tal relação pode determinar também a ocorrência de uma situação em que a região adjacente à superfície do cabo seca muito rapidamente, após o início do aquecimento. Como a resistividade térmica do solo seco é muito maior do que a do solo úmido, neste caso a temperatura da superfície do cabo pode disparar e chegar a um nível perigoso antes mesmo que o processo atinja regime permanente.

Em uma situação normal de funcionamento, a frente de secagem atinge uma posição em regime permanente e tende a se manter nesta posição enquanto a geração de calor for mantida. Se a geração é diminuída ou temporariamente eliminada, a frente tende a recuar para próximo do cabo, diminuindo a camada seca e também a resistividade térmica global do solo que envolve o cabo. A variação ao longo do tempo é uma característica normal da carga imposta a cabos de potência e o ideal é ter uma teoria que caminhe passo a passo no tempo para acompanhar de perto os efeitos destas oscilações sobre o solo.

4.2 Conceitos e parâmetros fundamentais

Antes de apresentar as equações governantes, é necessário definir alguns termos e conceitos que servem de base à aplicação de teorias macroscópicas a meios porosos.

4.2.1 Unidade elementar fundamental em meios porosos

Nas teorias de análise macroscópica, como a de Philip e De Vries, o meio poroso é tratado como um contínuo. É como se ele fosse observado de longe: a imagem que se obtém de uma observação distante de um meio poroso é exatamente a de um contínuo, em que cada ponto é uma "mistura" de todas as fases presentes (sólida, líquida e gasosa). Nas equações governantes válidas para meios *contínuos*, cada ponto se refere a um volume diferencial, definido pela matemática como "um volume tão pequeno quanto se queira". Se o meio é de fato contínuo, este conceito faz sentido e cada ponto no domínio de solução está associado a um volume de dimensões infinitesimais. No caso de meios porosos, há um mínimo tamanho de volume que pode ser tomado que ainda contém uma quantidade representativa das três fases presentes. Para preservar a idéia de contínuo, portanto, o "volume diferencial" de equações válidas para meios porosos deve ser adequadamente definido.

A definição de uma unidade fundamental de cálculo associada a modelos macroscópicos de meios porosos insaturados é o passo inicial da teoria de médias volumétricas de Whitaker (1977). O "Volume Elementar Representativo" (V.E.R.) definido por Whitaker é um volume diferencial pequeno em relação às dimensões globais do meio, mas grande relativamente ao tamanho de um poro qualquer. A figura 4-2 mostra um V.E.R. típico e as três fases que sempre estarão presentes: sólida (s), líquida (l) e gasosa (v+a), composta de vapor d'água (v) e ar (a).

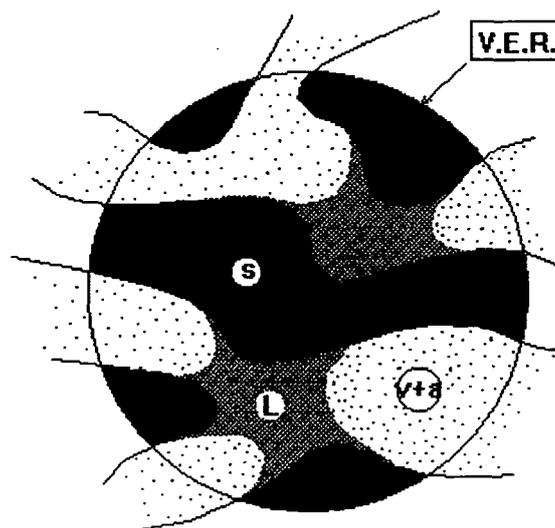


Figura 4-2. Volume Elementar Representativo em meio poroso insaturado.

Tal definição é fundamental para uma eventual comparação dos resultados teóricos com resultados experimentais. Por exemplo, a imagem mostrada na figura 4-2 pode representar uma ampliação de um ponto (x,y) qualquer no solo. Para este ponto, o que representaria uma "temperatura do solo", $T(x,y)$, obtida da aplicação dos modelos? Uma média das temperaturas no líquido, uma média no sólido ou uma média sobre todas as fases presentes? Cada uma destas médias é obtida de modo diferente e leva a equações governantes diferentes.

Com referência a este volume pode-se agora definir com rigor as grandezas envolvidas nos processos de transporte em meios porosos. Em seu desenvolvimento semi-empírico, Hartley (1987) apresenta uma dedução clara e intuitiva dos diversos termos das equações de Philip e De Vries, mas não apresenta uma definição rigorosa das grandezas envolvidas.

4.2.2 Porosidade, Conteúdo de umidade e Saturação de meios porosos

Define-se umidade em um ponto qualquer do solo como o volume ocupado pela água líquida (V_l) adicionado ao volume ocupado pelo vapor d'água se ele fosse condensado, *em um V.E.R. (V) associado a este ponto.*

A umidade está relacionada com a quantidade de água presente nos espaços vazios do solo. Antes de poder avaliá-la, é preciso conhecer qual porção do solo é composta de espaços vazios. Esta informação é chamada de porosidade (ϵ), dada por:

$$\epsilon = \frac{V_{\text{vazios}}}{V_{\text{total}}} \quad \left(\frac{\text{m}^3_{\text{vazio}}}{\text{m}^3_{\text{solo}}} \right) \quad (4-1)$$

e é aproximadamente constante ao longo de um mesmo solo com compactação uniforme.

O conteúdo de umidade de um ponto é definido como:

$$\theta = \theta_l + \theta_v \quad \left(\frac{\text{m}^3_{\text{líquido}}}{\text{m}^3_{\text{solo}}} \right) \quad (4-2)$$

onde:

$$\theta_l = \frac{V_l}{V} \quad \text{e} \quad \theta_v = \frac{\rho_v}{\rho_l} (\epsilon - \theta_l) \quad (4-3)$$

são os conteúdos de umidade na forma de líquido e de vapor condensado, respectivamente. O resultado obtido da equação da conservação da massa de Philip e De Vries é o campo de conteúdo de umidade em qualquer instante de tempo.

A porosidade corresponde ao valor máximo que o conteúdo de umidade assumiria se todos os espaços vazios do solo estivessem preenchidos com água. Em vista disto, é comum o conteúdo de umidade ser adimensionalizado em relação à porosidade, fornecendo o grau de saturação do solo,

$$S = \frac{\theta}{\epsilon} \quad (4-4)$$

que assume valores entre zero e 1, conforme o solo varie o seu estado entre completamente seco e completamente saturado com água.

4.2.3 Temperatura de um ponto no meio poroso

Um termopar inserido em um ponto qualquer no solo entra em contato com as três fases que o constituem: sólida, líquida e gasosa. É de esperar, portanto, que a temperatura que este termopar

registre seja uma média das temperaturas das três fases em um V.E.R. associado a este ponto. Em outras palavras, a temperatura no termopar deverá valer:

$$T_{\text{termopar}} = \frac{1}{V} \int_V T dV \quad (4-5)$$

sobre o volume total do V.E.R.. Por outro lado, as formas finais das equações de Whitaker (1977) e Hartley (1987) são semelhantes. Uma comparação direta entre as duas permite concluir que a temperatura de um ponto fornecida pelo modelo de Philip e De Vries nada mais é do que uma média volumétrica global sobre o total do volume do V.E.R. associado a este ponto conforme a definição de Whitaker, ou seja,

$$T_{\text{Hartley}} = \langle T \rangle_{\text{Whitaker}} = \frac{1}{V} \int_V T dV \quad (4-6)$$

onde o símbolo " $\langle \rangle$ " designa média volumétrica do que está entre os colchetes.

A conclusão final é de que a temperatura obtida a partir da solução da equação da conservação da energia de Philip e De Vries tem exatamente a definição do que é esperado experimentalmente e não precisa correções para poder ser comparada com os resultados experimentais.

4.2.4 Potencial de sucção, permeabilidade relativa e condutividade térmica efetiva

Nas teorias macroscópicas, a variação dos coeficientes que associam os fluxos de umidade e calor com as grandezas de interesse, temperatura e umidade, deve ser determinada experimentalmente. Estes coeficientes podem ser determinados diretamente pela sua definição fenomenológica, a partir da associação de fluxos e gradientes medidos sob condições específicas, mas também podem ser obtidos de maneira indireta, com o auxílio de modelos fenomenológicos como os de Philip e De Vries (1957) e Luikov (1966). Pelos modelos fenomenológicos os coeficientes são derivados de propriedades mais fundamentais do meio. Para o modelo de Philip e De Vries, por exemplo, para obter a variação completa de todos os coeficientes fenomenológicos com temperatura e umidade, basta levantar esta mesma variação para três propriedades básicas do solo: potencial de sucção (ψ), permeabilidade relativa (k_{rl}) e resistividade térmica efetiva (ρ_{ef}).

As expressões matemáticas destas três grandezas são, portanto, equações de correlação dos dados experimentais, diferentes para cada solo.

Potencial de sucção, ψ

O potencial de sucção está relacionado com a capacidade de retenção de água nos microporos do solo e com a movimentação da massa líquida. Para ocorrer movimento em um fluido qualquer em um meio contínuo (sem poros na sua estrutura) é preciso haver diferença de pressão. Em um meio poroso vale a mesma regra se ele estiver completamente saturado. Para meios porosos saturados, a vazão de líquido pode ser relacionada com a pressão na fase fluida por meio da lei empírica de Darcy,

$$\frac{\bar{j}_l}{\rho_l} = -\frac{K_{sat}}{\mu_l}(\nabla P - \rho_l \bar{g}) \quad (4-7)$$

onde:

- j_l é a vazão de líquido ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$);
- P é a pressão (N/m^2);
- K é a permeabilidade do solo à passagem de líquido (m^2);
- μ_l é a viscosidade do líquido escoando nos poros ($\text{Pa}\cdot\text{s}$);
- g é a gravidade (m^2/s).

No caso de meios porosos insaturados, como os solos em geral, é preciso ser mais específico quanto ao potencial para a migração de líquido. Não pode ser a pressão na fase gasosa, pois, para temperaturas abaixo do ponto de ebulição da água, a pressão pode ser considerada uniforme nos poros. Seguindo a idéia válida para transferência de massa em meios contínuos de que há uma tendência de haver migração de onde tem mais umidade para onde está menos úmido, é intuitivo considerar que o potencial para o fluxo de líquido é o conteúdo de umidade. Mas então como se explicaria o fato de não haver migração através da fronteira entre argila completamente úmida e areia seca? O potencial mais adequado deve, portanto, estar relacionado com a capacidade do solo de absorver e reter água. Tal potencial é chamado *potencial de sucção* e está relacionado com o movimento do líquido por *capilaridade* dentro dos poros, resultante de diferenças de pressão apenas na fase líquida.

O fluido migra da região que tem menos capacidade de reter água (poros maiores) para a que tem maior capacidade de succionar e reter umidade por capilaridade (poros menores). Devido ao modo como é definido, o potencial de sucção é negativo. A curva de $(-\psi)$ em função do conteúdo de umidade (θ) (adimensionalizado como grau de saturação) deve ser determinada experimentalmente e tem a forma mostrada na figura 4-3, com grandes variações em escala logarítmica.

A dependência do potencial de sucção com a temperatura está relacionada com o alívio da tensão superficial da água com um aumento de temperatura. Quanto mais fraca a tensão superficial, mais fraco o efeito de capilaridade e menor o potencial de sucção.

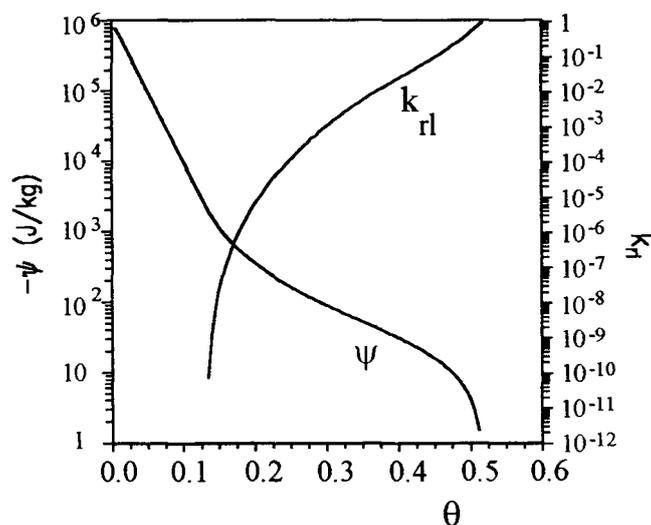


Figura 4-3. Curva típica de potencial de sucção em função da umidade.

Permeabilidade relativa, k_{r1}

Na verdade, o papel de potencial do movimento é atribuído a $(-\psi)$, de forma a manter a idéia clássica de que os fluxos mássicos devem ocorrer do maior potencial (ψ menos negativo) para o menor potencial (ψ mais negativo). A equação que define fluxos mássicos em meios porosos insaturados é muito semelhante à equação (4-7) e tem a seguinte forma:

$$\frac{\bar{j}_1}{\rho_1} = -\rho_1 \frac{K_{sat} k_{r1}}{\mu_1} (\nabla\psi - \bar{g}) \quad (4-8)$$

onde:

- j_1 é a vazão de líquido (kg/m²/s);
- ψ é o potencial de sucção (J/kg);
- μ_1 é a viscosidade dinâmica da água (Pa.s);
- K_{sat} é a permeabilidade do solo saturado ao transporte de líquido (m²);
- k_{r1} é a permeabilidade relativa do solo insaturado ao transporte de líquido (adimensional).

Para manter esta forma geral, é introduzida a permeabilidade relativa (k_{r1}), que varia desde zero para solos completamente secos até 1 para solos saturados como indica a figura 4-3. Isto significa que quanto mais úmido o solo mais os seus poros estão interconectados por caminhos contínuos de líquido por onde a água pode escoar na forma líquida. Solos secos não apresentam poros ligados com líquido e portanto não permitem escoamento de água na forma líquida.

A permeabilidade relativa é uma grandeza adimensional aproximadamente independente do fluido que estiver escoando no meio poroso.

Condutividade térmica efetiva, k_{ef}

As teorias macroscópicas assumem que o fluxo de calor por condução é proporcional ao gradiente de temperatura. No caso de meios contínuos o coeficiente de proporcionalidade é a condutividade térmica dada em (W/m/K) (ou o seu inverso, a resistividade térmica, dada em (mK/W)). Uma vez mais deseja-se extrapolar a forma geral de uma lei do contínuo para meios porosos. Isto é possível com a substituição da condutividade térmica tradicional por uma condutividade "efetiva", que leve em conta as três fases presentes (os grãos sólidos do solo, a água líquida e a fase gasosa, composta de ar e vapor d'água).

O valor da condutividade térmica efetiva corresponde à condutividade do meio poroso na situação hipotética em que não há movimento de vapor e nem de líquido. Na realidade, um fluxo de calor através do solo sempre induzirá algum fluxo de vapor e isto pode levar a um valor aumentado da condutividade efetiva, chamado condutividade aparente. Diversos métodos experimentais e modelos teóricos para a determinação da condutividade térmica efetiva são analisados e comparados no trabalho de Oliveira (1993).

Como a água é melhor condutor de calor do que o ar, quanto mais seco o solo, menor a sua condutividade térmica efetiva (ou maior a sua resistividade térmica efetiva). À medida que o solo fica mais úmido, mais água vai ocupando o lugar do ar nos poros, melhorando a conexão entre os seus grãos e aumentando a eficiência do conjunto em transmitir calor. A água contribui para um aumento de condutividade efetiva somente até o limite de conteúdo de umidade a partir do qual os grãos já estão suficientemente conectados e os acréscimos de umidade não fazem mais diferença. A partir deste limite, a condutividade atingiu seu valor máximo e fica constante até a

saturação completa. A figura 4-4 mostra a variação da condutividade térmica efetiva com a umidade para um solo silto-arenoso.

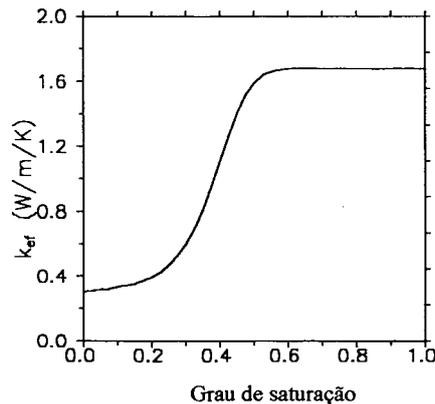


Figura 4-4. Variação de k_{ef} com a umidade para solo silto-arenoso (Couvillion, 1981).

As variações da condutividade térmica efetiva com a temperatura se devem basicamente às variações individuais das condutividades térmicas dos materiais que compõem o solo.

4.3 O modelo de Philip e De Vries

O desenvolvimento completo das equações que serão utilizadas neste trabalho pode ser encontrado no trabalho de Hartley (1987). Parte-se de equações genéricas de conservação de água, ar e energia para sistemas multicomponentes e obtém-se equações que expressam um balanço entre os fluxos de água, ar e energia e as suas acumulações e transformações dentro de solos. É para a caracterização destes fluxos que é necessário adotar o modelo conceitual para meios porosos insaturados de Philip e De Vries (1957).

Philip e De Vries procuram explicar os processos que ocorrem no interior de meios porosos insaturados através de uma extrapolação das leis clássicas de transporte válidas para meios contínuos, estabelecendo ligações entre os fluxos de água, ar e energia em meios porosos e os potenciais que os causam. Inicialmente, os fluxos são escritos como função de dois potenciais: a *temperatura* e o *potencial de sucção*. Em uma etapa subsequente, o potencial de sucção é convertido em conteúdo de umidade, que é uma grandeza de interpretação mais intuitiva. A solução das equações governantes obtidas com o seu modelo fenomenológico permite determinar a temperatura (T) e o conteúdo de umidade (θ) em qualquer ponto do domínio, para qualquer instante de tempo após o início de um processo no solo.

Sendo θ o conteúdo de umidade e T a temperatura em um ponto do solo, conforme definidos anteriormente, as equações de conservação da água nas fases líquida e vapor e de conservação da energia podem ser escritas como:

i) problema da transferência de calor:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot [k_s \nabla T + \rho_l h_w D_{\theta w} \nabla \theta] \quad (4-9)$$

ii) problema de migração de umidade:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot [D_{\theta w} \nabla \theta + D_{T w} \nabla T - K_g \hat{k}] \quad (4-10)$$

onde k é um vetor unitário na direção e sentido da gravidade.

Estas equações são fortemente acopladas. Todos os seus coeficientes, os chamados *coeficientes fenomenológicos*, variam em escala logarítmica com a umidade, como mostra a figura 4-5. Nesta figura está representada também a influência da temperatura, bem menor do que a da umidade mas significativa em alguns pontos.

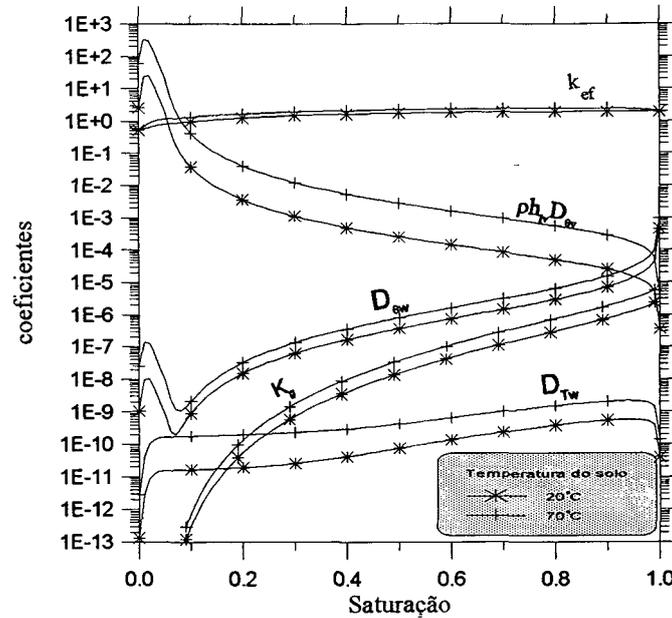


Figura 4-5. Coeficientes fenomenológicos para solo silto-arenoso (Couvillion, 1981).

Para que seja possível realizar a simulação destas equações é necessário obter a variação com umidade e temperatura dos seus 5 coeficientes:

- C = capacidade térmica do solo ($J/m^3/K$), dada por:

$$C = \rho_s (1 - \varepsilon) c_{vs} + \rho_l \theta c_{vl} + \rho_v (\varepsilon - \theta) c_{vv} + \rho_a (\varepsilon - \theta) c_{va} \quad (4-11)$$

em que c_v é o calor específico a volume constante para cada um dos componentes principais do solo, sólido (s), vapor (v), ar (a) e água líquida (l);

- k_* = condutividade térmica aparente do solo ($W/m/K$), dada por:

$$k_* = k_{ef} + \rho_l h_{lv} D_{Tv} \quad (4-12)$$

onde k_{ef} é a condutividade térmica efetiva, expressa como uma correlação empírica;

- A difusividade de água, tanto na forma de líquido como de vapor, devido a gradientes de temperatura ($m^2/s/K$), dada por:

$$D_{Tw} = D_{Tv} + D_{Tl} \quad (4-13)$$

- A difusividade de água, tanto na forma de líquido como de vapor, devido a gradientes de umidade (m^2/s), dada por:

$$D_{\theta w} = D_{\theta v} + D_{\theta l} \quad (4-14)$$

- K_g = condutividade hidráulica, equivalente à influência da gravidade na migração de umidade (m/s).

Nestes coeficientes aparecem algumas características físicas da água, como o calor latente de vaporização (h_{lv}) e a massa específica (ρ_l), e também as chamadas "difusividades" de Philip e De Vries:

- D_{Tv} = coeficiente de transporte associado à migração da umidade no estado de VAPOR através do solo, devido a gradientes de TEMPERATURA, em ($m^2/s/K$);
- $D_{\theta v}$ = coeficiente de transporte associado à migração da umidade no estado de VAPOR através do solo, devido a gradientes de UMIDADE, em (m^2/s);
- D_{Tl} = coeficiente de transporte associado à migração de umidade no estado LÍQUIDO através do solo, devido a gradientes de TEMPERATURA, em ($m^2/s/K$);
- $D_{\theta l}$ = coeficiente de transporte associado à migração de umidade no estado LÍQUIDO através do solo, devido a gradientes de UMIDADE, em (m^2/s).

Os coeficientes de transporte aparecem como consequência dos modelos adotados por Philip e De Vries para explicar os fenômenos que ocorrem a nível de poro. Devido à grande quantidade de informações contida em suas expressões, pequenas mudanças na umidade do solo podem levar a mudanças drásticas nos valores destes coeficientes, como indicam as curvas características mostradas na figura 4-6.

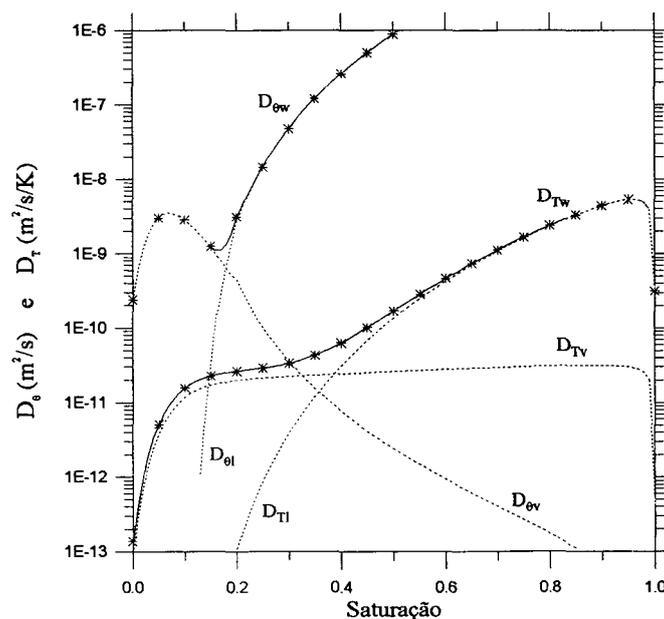


Figura 4-6. Coeficientes de transporte típicos para solos.

Nos itens seguintes, estes coeficientes são analisadas em mais detalhe. É discutido o comportamento da sua curva característica e a influência que eles exercem sobre os fenômenos que ocorrem em solo submetido a aquecimento por uma fonte de calor. Como é mostrado a seguir, uma análise dos coeficientes de Philip e De Vries permite determinar quais os solos que têm maior tendência a secar quando utilizados como aterro de cabos de potência.

4.3.1 Coeficiente de transporte do líquido devido a gradientes de umidade, $D_{\theta l}$

Este coeficiente (também conhecido como "difusividade *isotérmica* do líquido" devido à denominação originalmente sugerida por De Vries, 1958) aparece como consequência direta do uso da lei de Darcy modificada para meios porosos insaturados, equação (4-7), e vale:

$$D_{\theta l} = \frac{\rho_l K_{sat} k_{rl}}{\mu_l} \left(\frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right)_T \quad (4-15)$$

Representa a facilidade com que a água se movimenta no estado líquido entre dois pontos de um mesmo meio poroso com conteúdos de umidade diferentes, mas com a mesma temperatura. Locais menos úmidos apresentam maior potencial de sucção e tendem a absorver a umidade de locais mais úmidos em um mesmo solo.

Sua curva característica tende a se anular para valores de umidade abaixo do ponto em que a água líquida perde a sua continuidade. Este ponto é característico de cada solo e é chamado conteúdo de umidade irreduzível ou residual (θ_r). Para conteúdos de umidade inferiores a θ_r , a água líquida encontra-se espalhada no meio poroso preenchendo os poros menores ou recobrando a superfície dos grãos e não pode se movimentar.

4.3.2 Coeficiente de transporte do líquido devido a gradientes de temperatura, D_{Tl}

Este coeficiente (também conhecido como "difusividade *térmica* do líquido") também é consequência da Lei de Darcy modificada e vale:

$$D_{Tl} = \frac{\rho_l K_{sat} k_{rl}}{\mu_l} \left(\frac{\partial \psi}{\partial T} \right)_\theta \quad (4-16)$$

A água é retida nos minúsculos poros do solo por um efeito de capilaridade. A capilaridade é um efeito associado à tensão superficial na interface entre líquido e vapor que aparece no menisco de um capilar em contato com um líquido. Um aumento de temperatura tende a induzir um alívio da tensão superficial, o que indica que é preciso menos energia para retirar a água retida em poros quentes do que em poros mais frios. Logo, se um meio poroso com distribuição uniforme de umidade é submetido a um aquecimento localizado, haverá migração de água na fase líquida da região mais quente para a região mais fria. O coeficiente de transporte D_{Tl} é uma quantificação da facilidade com que este fenômeno ocorre.

Do mesmo modo como no caso de $D_{\theta l}$, o coeficiente D_{Tl} também é zero abaixo do conteúdo de umidade residual. Por outro lado, na saturação não existem interfaces entre líquido e vapor e nesta condição o fluxo de líquido termicamente induzido também deve ser nulo. Logo, para algum valor de conteúdo de umidade entre θ_r e $\theta_{saturação}$, a curva de D_{Tl} passa por um máximo como o que pode ser observado na figura 4-6.

4.3.3 Coeficiente de transporte do vapor devido a gradientes de umidade, $D_{\theta v}$

Em um solo isotérmico, se por alguma razão a pressão de vapor (ou, equivalentemente, a umidade relativa) aumentar em alguma região, haverá difusão para as regiões com pressão de

vapor menor, em uma tendência de equalizar a pressão de vapor em todos os poros. Solos com estrutura mais favorável à ocorrência deste fenômeno possuem alto $D_{\theta v}$ e vice-versa.

Este coeficiente (também conhecido como "difusividade isotérmica do vapor") é obtido a partir de uma extrapolação da lei de Fick e é calculado por:

$$D_{\theta v} = \frac{D_{va} R_g \rho_{sat}}{\rho_l R_a} \left(\frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right)_T \quad (4-17)$$

onde ϕ é a umidade relativa nos poros do meio, ρ_{sat} é a massa específica de saturação do vapor, D_{va} é a difusividade do vapor nos poros secos e R_a e R_g são, respectivamente, as constantes dos gases para o ar seco e para a mistura gasosa do ar com o vapor.

Para valores de umidade acima da residual é usual expressar $D_{\theta v}$ em função do potencial de sucção. A transformação da equação (4-17) é feita através da condição de equilíbrio termodinâmico entre vapor e líquido no meio poroso expressa pela lei de Kelvin:

$$\phi = \exp\left(\frac{\psi}{R_v T}\right) \quad (4-18)$$

Após a aplicação da lei de Kelvin, a expressão de $D_{\theta v}$ se torna:

$$D_{\theta v} = \frac{D_{va} \rho_{sat} R_g}{\rho_l R_a R_v T} \exp\left(\frac{\psi}{R_v T}\right) \left(\frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right)_T \quad (4-19)$$

No modelo de Philip e De Vries a difusão do vapor no solo é uma composição de fenômenos físicos distintos:

- interação entre o vapor e o meio poroso insaturado:
a difusividade de vapor pelos poros é influenciada pela quantidade de vapor disponível. Como o vapor está em equilíbrio com a fase líquida em cada poro do meio, a quantidade de vapor disponível cresce à medida que aumenta o conteúdo de umidade;
- difusão "inerte" do vapor pelos poros com ar:
corresponde à alteração experimentada pela difusividade da lei de Fick clássica pelo fato de não estar sendo aplicada a um meio contínuo. É necessário definir uma difusividade "efetiva", pois uma difusão entre dois pontos do solo não depende apenas do componente que está se difundindo (vapor d'água) e do meio em que se realiza a difusão (ar), como no caso clássico. Deve-se levar em conta que o vapor terá que encontrar caminhos livres para poder se difundir. Necessariamente a difusão de vapor entre dois pontos com diferentes valores de pressão de vapor em um meio poroso se realizará por caminhos "tortuosos". Neste contexto, o efeito que deve ser considerado pela imposição de um gradiente de concentração de vapor ao meio é a modificação da distribuição da umidade. Tal modificação influi no valor da difusividade porque *rearranja os caminhos disponíveis* para a difusão de vapor.

Quando o solo está completamente seco, todos os poros estão disponíveis para a difusão, fazendo com que a difusividade efetiva seja a mais alta possível. Com o aumento de umidade, o número e o tamanho dos poros preenchidos com água líquida aumenta. Isto tem um efeito

de redução da área disponível para a difusão de gás e de diminuição do valor da tortuosidade dos canais com ar, o que leva a uma queda acentuada da difusividade efetiva. Quando a fase gasosa perde a continuidade através do meio, esta parcela se torna nula.

Ainda, como através do meio existe um gradiente de pressão de vapor, os poros preenchidos com água estão sujeitos a valores de umidade relativa diferentes entre as suas extremidades. Isto ocasiona um fluxo de líquido alimentado pela condensação de vapor na extremidade com umidade relativa maior e que fornece vapor por evaporação no lado com umidade relativa menor. Como resultado, o fluxo de vapor fica intensificado pelo processo de destilação esquematizado na figura 4-7.

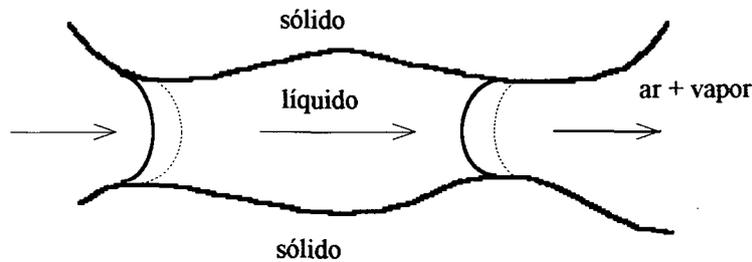


Figura 4-7. Mecanismo de aumento do transporte de vapor nas pontes de líquido.

A difusividade efetiva depende, portanto, da distribuição de poros e do conteúdo de umidade. Philip e De Vries adotaram a seguinte função:

$$D_{va} = D_0 f(\theta) \quad (4-20)$$

onde D_0 é a difusividade do vapor no ar livre e $f(\theta)$ vale

$$\begin{cases} f(\theta) = \varepsilon \tau, & \text{para } \theta \leq \theta_r \\ f(\theta) = (\varepsilon - \theta) \left[1 + \frac{\theta}{\varepsilon - \theta_r} \right] \tau, & \text{para } \theta > \theta_r \end{cases} \quad (4-21)$$

onde ε é a porosidade do solo, θ_r é o conteúdo de umidade residual ou irreduzível (conteúdo de umidade abaixo do qual a água líquida perde a sua continuidade) e τ a sua tortuosidade. A tortuosidade é um conceito associado a uma modelagem dos canais do meio poroso como capilares. Dois pontos (x,y) quaisquer do domínio podem ser ligados por uma linha reta, atravessando o meio poroso como se ele fosse um contínuo, ou por um capilar típico, que segue os caminhos tortuosos formados pelos poros do meio. A tortuosidade é definida como a média das relações entre as distâncias em linha reta e os comprimentos dos percursos pelos capilares, ou seja,

$$\tau = (\text{distância em linha reta}) / (\text{caminho pelos capilares}) \quad (4-21a)$$

e é sempre menor do que 1. De acordo com Couvillion (1981), a tortuosidade vale 0,66 para a maioria dos solos.

A composição destes efeitos explica a forma da curva mostrada na figura 4-6. Quando o solo está completamente seco, a umidade relativa é zero; como não há vapor, a difusividade isotérmica de vapor também deve ser zero. À medida que cresce o conteúdo de umidade, cresce a quantidade de vapor disponível e a formação de ilhas de líquido (ainda que aumentando a tortuosidade) auxilia o processo de transferência de vapor, por causa dos mecanismos de condensação-evaporação. Nesta região, $D_{\theta v}$ cresce com o aumento de umidade.

Entretanto, com o crescimento de θ , diminui a área disponível para a difusão e aumenta a tortuosidade do meio para a difusão de vapor. A partir do momento em que a fase líquida ganha a sua continuidade, este efeito se sobrepõe ao de aumento da umidade relativa. A difusividade passa a decrescer e cai a zero no ponto onde a fase gasosa perde a continuidade.

A dependência do coeficiente $D_{\theta v}$ com a temperatura é uma consequência das dependências de D_0 , ρ_{sat} e ψ com T .

4.3.4 Coeficiente de transporte do vapor devido a gradientes de temperatura, D_{Tv}

Em um solo com umidade uniforme existe vapor em equilíbrio com a água líquida retida nos seus poros. Enquanto a temperatura também for uniforme, a pressão parcial deste vapor está relacionada apenas com a curvatura do menisco que separa a fase líquida da de vapor. Se este meio for aquecido de maneira diferenciada, a pressão parcial do vapor em equilíbrio com a água líquida nos poros passará a ser mais intensa nas regiões mais quentes do meio do que nas regiões frias. Logo, a imposição de um gradiente de temperatura em um meio com umidade uniformemente distribuída leva à formação de um gradiente de pressão de vapor nos poros não preenchidos com água líquida e, como consequência à difusão de vapor. Conclui-se que em meios porosos com alto D_{Tv} a imposição de um gradiente de temperatura leva a uma secagem das regiões mais quentes.

A difusividade térmica do vapor também é obtida a partir de uma extensão da lei de Fick e é calculada por:

$$D_{Tv} = \zeta \frac{D_{va} R_g}{\rho_l R_a} \rho_{sat} \left(\frac{\partial \phi}{\partial T} + \frac{\phi h_{lv}}{T^2 R_v} \right) \quad (4-22)$$

onde a derivada da umidade relativa é obtida com o auxílio da lei de Kelvin, equação (4-18), e vale:

$$\frac{\partial \phi}{\partial T} = - \frac{\phi \ln \phi}{T} \quad (4-23)$$

Além disto, aparece a difusividade efetiva (m^2/s), dada pela equação (4-20), as constantes do ar (R_a) e da mistura gasosa (R_g) dadas em ($J/kg/K$).

Na equação (4-22) aparece ainda o fator ζ , associado a uma correção de escalas. A lei de Fick foi empiricamente estendida para o meio poroso como um todo, mas rigorosamente ela só é válida para descrever o processo de difusão dentro de um poro. Ora, a variação de concentração de vapor através do poro deve-se ao gradiente de temperatura médio da fase gasosa e não ao gradiente de temperatura médio global para o qual foi deduzida a equação da conservação da energia (equação 4-9). Apesar de as fases estarem em equilíbrio térmico, o que garante que as médias volumétricas de temperaturas sobre cada fase em separado são iguais, os gradientes de temperatura ao longo de cada fase podem ser bastante diferentes. Para deixar o gradiente sobre o

qual age D_{Tv} mais próximo do gradiente local, a nível de poro, é proposta a correção dada pelo fator de intensificação térmica ζ que vale:

$$\zeta = \frac{\langle \nabla T_g \rangle^g}{\langle \nabla T \rangle} \quad (4-24)$$

onde $\langle \nabla T_g \rangle^g$ é o gradiente de temperatura médio na fase gasosa e $\langle \nabla T \rangle$ é o gradiente de temperatura médio global. Estes valores podem ser calculados por uma teoria proposta por De Vries (1952) ou por um modelo desenvolvido por Jackson e Black (1983). Os dois modelos fornecem valores semelhantes. O modelo de célula unitária de Jackson e Black (1983) destina-se ao cálculo de condutividade térmica efetiva de meios porosos granulares insaturados. Segundo este modelo,

$$\zeta = \frac{1}{\frac{k_a}{k_s} + \frac{\varepsilon(1-S)}{1-c_{ss}}} \quad (4-24a)$$

onde S é o grau de saturação local, k é a condutividade térmica (W/m/K), ε é a porosidade do solo. O índice "a" se refere ao ar nos poros, o índice "s" se refere ao material sólido do solo e c_{ss} é a fração da superfície sólida total do meio que está em contato mútuo (partícula-partícula), dada por:

$$c_{ss} = \frac{\frac{k_d}{k_s} \left[1 + \varepsilon \left(\frac{k_s}{k_a} - 1 \right) \right] - 1}{\frac{k_d}{k_s} - 1 + \varepsilon \left(\frac{k_s}{k_a} - 1 \right)} \quad (4-24b)$$

em que o índice "d" se refere ao solo seco. O fator ζ varia normalmente entre 1 e 3.

4.3.5 Efeito da gravidade, K_g

Na equação (4-10) aparece ainda um coeficiente que não tem propriamente um papel de difusividade. O coeficiente K_g representa na verdade um fluxo mássico, consequência unicamente do efeito da gravidade, dado por:

$$K_g = \frac{\rho_l K_{sat} k_{r1} g}{\mu_1} \quad (4-25)$$

onde g é a aceleração da gravidade (m/s^2). Em solos comuns, as forças de interação da água com a matriz porosa são preponderantes e o efeito da gravidade só se torna evidente próximo à saturação. Em solos com poros grandes, como é o caso de solos arenosos, a gravidade pode chegar a ter alguma influência nos valores de umidade normais do solo.

De um modo geral, é importante levar em consideração o efeito da gravidade quando se quer modelar a ação da chuva ou a proximidade de um lençol freático. A chuva entra no solo saturando inicialmente a sua superfície. Por isto, antes de se difundir como líquido ou vapor, a água da chuva terá que "cair" através dos poros pela ação da gravidade.

4.4 Fluxos de calor e umidade no solo próximo a uma fonte térmica

Este é exatamente o tipo de problema representado por cabos elétricos subterrâneos. Na análise que segue considera-se um cabo impermeável ao fluxo de umidade dissipando calor para o solo, desde o momento em que é iniciada a geração de calor. Com base na descrição dos coeficientes de Philip e De Vries apresentada anteriormente, é discutido o papel das difusividades de líquido e de vapor no contexto da transferência de calor e umidade no solo em torno do cabo.

O processo transiente

Inicialmente o fluxo de calor que deixa o cabo é transmitido através do solo por condução nos grãos sólidos e nas pontes de líquido. Rapidamente o campo térmico gerado altera as condições de equilíbrio na superfície dos grãos e um processo de evaporação se estabelece nas regiões mais quentes. Também devido ao campo térmico surge um gradiente de pressão de vapor na mesma direção do fluxo de calor e inicia-se um processo de difusão de vapor pelos poros com ar e através das pontes de líquido. Neste momento, o fluxo de vapor depende do gradiente gerado e da difusividade térmica do vapor (D_{Tv}).

O fluxo de vapor cresce com o aumento do gradiente de temperatura e começa a alterar substancialmente o conteúdo de umidade do meio. As regiões mais quentes tornam-se mais secas e as mais frias tornam-se mais úmidas. O gradiente de temperatura também age sobre a fase líquida. Nas regiões mais quentes, a diminuição da tensão superficial faz com que as forças que prendem a água nos poros fiquem menores em relação àquelas que agem nas regiões mais frias. Assim, existindo continuidade na fase líquida, o líquido migrará para as regiões mais frias e este fluxo será regulado pela difusividade térmica do líquido (D_{Tl}). Portanto, tanto o fluxo termicamente induzido de vapor como o de líquido colaboram para que as regiões quentes se tornem mais secas.

A partir do estabelecimento de um gradiente de conteúdo de umidade adverso ao gradiente de temperatura, começa a haver migração de água no estado líquido das regiões mais úmidas para as regiões mais secas. Esta migração ocorre desde que haja continuidade da fase líquida e é regulada pela difusividade isotérmica do líquido ($D_{\theta l}$). Da mesma forma, como há sempre vapor em equilíbrio com a água nos capilares, nas regiões com maior umidade a pressão de vapor é mais alta que nas regiões mais secas. Este gradiente induz um movimento de vapor das regiões mais úmidas para as regiões mais secas, regulado pela difusividade isotérmica do vapor ($D_{\theta v}$).

Normalmente, este processo é dominado pela migração do vapor para longe do cabo por difusão e pela migração de água líquida para próximo do cabo por capilaridade. Quando o solo perto do cabo seca a ponto do líquido perder a sua continuidade, o único fluxo de umidade possível para a região seca é na forma de vapor. Nestas condições, mesmo com o desligamento do cabo elétrico, o retorno da umidade se dá de uma forma muito lenta. Inicialmente, forma-se uma frente de vapor a partir da região distante do cabo que migra na direção do solo mais seco e o umedece. Com a intensificação do umedecimento e o aumento da umidade relativa na região seca, uma frente de água líquida começa a avançar sobre esta região. Atrás desta frente existe conexão da fase líquida, o que possibilita haver fluxo de líquido.

Significado dos termos das equações de conservação

Para analisar a interação entre as difusividades, é necessário recorrer às equações de conservação. As equações de Philip e De Vries, equações (4-9) e (4-10), na verdade representam balanços dos fluxos totais de umidade e calor.

Fluxo total de umidade, j_u

É o resultado conjunto dos fluxos de umidade na forma de vapor e na forma de líquido. A parcela devida ao vapor vale:

$$\bar{j}_v = -\rho_1 [D_{\theta_v} \nabla \theta + D_{T_v} \nabla T] \quad (4-26)$$

e a parcela devida ao líquido vale:

$$\bar{j}_l = -\rho_1 [D_{\theta_l} \nabla \theta + D_{T_l} \nabla T - K_g \hat{k}] \quad (4-27)$$

resultando em um fluxo total de umidade dado por

$$\bar{j}_u = \bar{j}_v + \bar{j}_l = -\rho_1 (D_{\theta_w} \nabla \theta + D_{T_w} \nabla T - K_g \hat{k}) \quad (4-28)$$

onde k é um vetor unitário na direção e sentido da gravidade.

O fluxo mássico total j_u possui três parcelas distintas:

- i) o primeiro termo indica o fluxo de líquido e vapor das regiões úmidas afastadas do cabo para a região seca próxima a ele, como consequência da diferença de umidade;
- ii) o segundo termo representa o fluxo de vapor da região quente (e portanto mais seca) para as regiões mais frias (e portanto mais úmidas);
- iii) o terceiro termo relaciona-se ao fluxo de líquido pela ação da gravidade.

Fluxo total de calor, q

Dado por:

$$\bar{q} = -(k_{ef} + \rho_1 h_{lv} D_{T_v}) \nabla T - \rho_1 h_{lv} D_{\theta_v} \nabla \theta \quad (4-29)$$

Na equação do fluxo de calor também aparecem três termos:

- i) o primeiro diz respeito principalmente ao fluxo de calor por condução pura nos grãos sólidos e pontes de líquido;
- ii) o segundo é o fluxo de calor latente carregado pelo vapor da região quente próxima ao cabo (e portanto mais seca) para as regiões mais frias distantes do cabo (e portanto mais úmidas);
- iii) o terceiro representa o fluxo de calor latente reconduzido pelo vapor que migra das regiões mais úmidas (mais frias) para a região mais seca (mais quente).

Todos estes efeitos competem entre si de acordo com a intensidade de seus coeficientes e do balanço dos fluxos resulta a distribuição de umidade e temperatura.

Influência das condições de contorno

Os processos de transferência no solo dependem não somente das propriedades do meio, mas também das condições de contorno de massa (calçada impermeável ou não, por exemplo) e de energia (geração de calor alta ou baixa).

Por exemplo, no caso do cabo elétrico tem-se um fluxo de calor imposto a uma porção de solo limitada por uma fronteira impermeável (calçada). Este fluxo de calor terá que sair do cabo por um processo de condução de calor ou migração de vapor. Se o fluxo de calor for baixo e o meio estiver suficientemente úmido, grande parte do calor deverá migrar por condução de calor e um pequeno fluxo de vapor será suficiente para retirar a parcela restante. Neste caso, o fluxo de líquido em sentido inverso deverá ser suficiente para reabastecer de umidade a região próxima ao cabo e não haverá a secagem completa do material do solo nesta região.

Porém, se o fluxo de calor for alto, ou se não houver no solo um conteúdo de umidade suficientemente alto, o fluxo de vapor será intenso, a fim de se adaptar ao fluxo de calor imposto. Não sendo possível uma reposição do líquido na taxa adequada, o solo irá secar gradativamente. A secagem do solo diminui a condutividade térmica efetiva, o que força a um aumento ainda maior do fluxo de vapor. No instante em que o solo torna-se seco, a temperatura do cabo sobe drasticamente (pois o solo seco tem pouca capacidade de remover o calor gerado) e o líquido perde totalmente a possibilidade de retorno. Esta é a situação mais crítica para o projeto de um cabo elétrico subterrâneo.

Importância relativa das difusividades

As curvas de difusividades em função do conteúdo de umidade mostradas na figura 4-8 foram divididas em 3 regiões:

i) na região I o fluxo de calor ocorre por condução e por transporte de vapor termicamente induzido. A parcela de fluxo de calor devido ao fluxo isotérmico de vapor é pequena devido ao fato de D_{0v} ser praticamente nulo. Ainda, nesta região o coeficiente k_* , equação (4-12), é aproximadamente constante para valores baixos de temperatura. Na equação da conservação da massa, equação (4-10), predomina a parcela de fluxo isotérmico de líquido. Nesta situação, os fluxos de massa e energia, equações (4-28) e (4-29), podem ser escritos como:

$$\bar{j}_u = -\rho_1 (D_{01} \nabla \theta - K_g \hat{k}) \quad (4-30)$$

$$\bar{q} = -k_* \nabla T \quad (4-31)$$

com $k_* \approx$ constante. Nesta região, portanto, o sistema torna-se desacoplado e as equações de conservação podem ser escritas separadamente;

ii) na região II o fluxo de calor ocorre basicamente pela energia transportada pelo vapor. Não existe fluxo de líquido e a migração de umidade ocorre somente por transporte de vapor. As equações são acopladas, mas o efeito de D_{01} e D_{T1} pode ser desprezado;

iii) na região III $D_{01} \approx D_{0v}$ e o fluxo de líquido ocorre tanto na forma de vapor como de líquido. O fluxo de calor possui tanto uma parcela condutiva como uma parcela de transporte por calor latente e as equações precisam ser usadas na forma completa, equações (4-9) e (4-10).

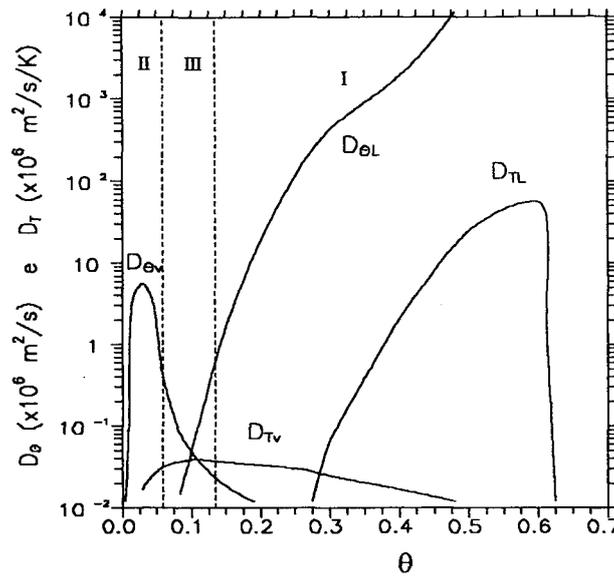


Figura 4-8. Propriedades difusivas para um solo de textura fina (Hartley, 1977).

4.5 Instabilidade termo-hidrológica dos solos de aterro

O calor gerado pelo cabo está constantemente causando evaporação da umidade contida no solo próximo. Em um processo normal, esta região é constantemente reabastecida com água no estado líquido vinda do solo distante. Quando o processo entra em equilíbrio, o conteúdo de umidade do solo próximo ao cabo é sempre menor do que o seu valor original, qualquer que seja a quantidade de calor gerada. Se esta diferença for um valor pequeno, ou seja, se a umidade do solo próximo ao cabo baixar pouco, este solo é dito "hidrologicamente estável". Se a região mais aquecida pelo cabo secar completamente, o solo é chamado de "hidrologicamente instável".

Este fenômeno de instabilidade tem sido uma preocupação constante dos projetistas de cabos. Evidências experimentais demonstram que durante o aquecimento causado pelo cabo o solo fica instável se ultrapassar um "ponto crítico" bem definido (Donazzi et al., 1979). Em seus trabalhos, Endacott et al. (1970) e Arrighi et al. (1970) consideram que o solo fica instável se na sua região mais quente (no contato com a superfície do cabo) for ultrapassada uma *temperatura crítica*. Se isto ocorrer, assume-se que todo o solo que tiver temperatura acima deste valor crítico apresenta resistividade térmica de solo seco e todo o solo que tiver temperatura abaixo da crítica não é afetado pelo cabo e mantém a resistividade térmica correspondente ao seu conteúdo de umidade original. Este é o fundamento do "modelo de duas fases" incluído no amendment nr. 2 da norma IEC 287 (1991) para levar em consideração a possibilidade de secagem parcial do solo circundante a cabos de potência subterrâneos¹.

Na verdade, é a *umidade* que denuncia o início da instabilidade, de modo que o que pode ser determinado experimentalmente é um valor de *grau de saturação* ($S=\theta/\epsilon$) crítico, S_{cr} , que não pode ser ultrapassado pelo solo próximo ao cabo em seu processo de secagem. O grau de saturação crítico é o grau de saturação abaixo do qual o conteúdo de umidade é pequeno demais para permitir que a água se mova através dos grãos do solo por capilaridade, o que significa que este é exatamente o ponto em que o equilíbrio entre os fluxos de líquido e vapor é interrompido. O valor da temperatura crítica pode ser determinado a partir da umidade crítica através de uma análise de equilíbrio hidrológico.

¹Ver capítulo 3, item 3.3.4.

Condição de equilíbrio hidrológico

Com base na análise de equilíbrio hidrológico descrita no trabalho de Donazzi et al. (1979), pode-se determinar o valor da temperatura crítica a partir do grau de saturação crítico e de alguns parâmetros característicos do solo. Utilizando a notação do presente trabalho, os passos básicos desta análise são os seguintes:

1. Parte-se do princípio de que o equilíbrio é atingido no momento em que o fluxo de calor (j_v) para longe do cabo se iguala ao fluxo de líquido (j_l) em sua direção. Este princípio, mostrado na figura 4-9, também é a base de funcionamento dos tubos de calor (ver, por exemplo, Fagotti e Colle, 1990). Matematicamente, isto corresponde a

$$\bar{j}_v = -\bar{j}_l \quad (4-32)$$

em que o sinal negativo indica que os fluxos de vapor e de líquido ocorrem em sentidos diferentes;

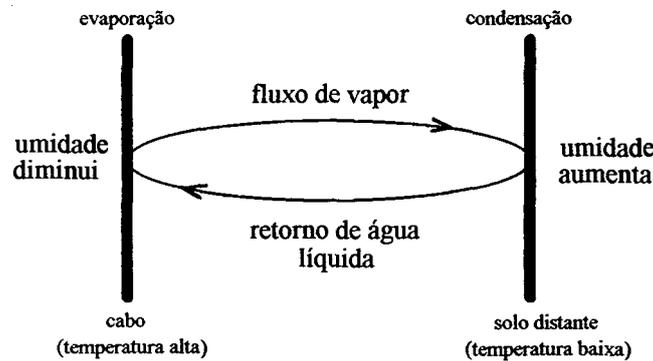


Figura 4-9. Equilíbrio hidrológico em solo úmido sujeito a gradiente de temperatura.

2. Para especificar os fluxos de vapor e líquido, é empregado o modelo de Philip e De Vries:

$$\bar{j}_v = -\rho_l (D_{Tv} \nabla T + D_{\theta v} \nabla \theta) \quad (4-33)$$

$$\bar{j}_l = -\rho_l (D_{Tl} \nabla T + D_{\theta l} \nabla \theta) \quad (4-34)$$

em que a influência da gravidade é desprezada;

3. assume-se que o fluxo de água líquida é causado principalmente pelo gradiente de umidade e que o fluxo de vapor depende principalmente do gradiente de temperatura, o que permite escrever:

$$\bar{j}_v = -\rho_l D_{Tv} \nabla T \quad (4-35)$$

$$\bar{j}_l = -\rho_l D_{\theta l} \nabla \theta \quad (4-36)$$

4. para descrever as difusividades é empregado um modelo simplificado descrito por Ärpäd Kezdi (1974), que as relaciona com grau de saturação e porosidade da seguinte forma:

$$D_{Tv} = D_{Tv0} (1 - S) \quad (4-37)$$

$$D_{\theta1} = D_{\theta10} (S - S_{cr})^2 \quad \text{para } S > S_{cr} \quad (4-38)$$

onde S é o grau de saturação ($S = \theta/\epsilon$), S_{cr} é o grau de saturação crítico, determinado experimentalmente, e D_{Tv0} e $D_{\theta10}$ são constantes adequadas que dependem somente da porosidade (ϵ);

5. substituindo as equações (4-35) a (4-38) em (4-32) e assumindo que o lugar geométrico das curvas de temperatura constante (isotermas) no solo coincide com o das curvas de umidade constante (isoumidades), chega-se à seguinte equação diferencial:

$$\frac{dT}{dS} = -\frac{1(S - S_{cr})^2}{\eta(1 - S)} \quad (4-39)$$

onde η é uma constante característica de cada solo;

6. enquanto o conteúdo de umidade do solo vai de seu valor natural (S_{solo}) até o valor crítico (S_{cr}), a temperatura deste solo deve variar desde o valor ambiente até a temperatura crítica. Integrando a equação (4-39) entre estes limites, pode-se obter o valor da temperatura crítica como:

$$T_{cr} = T_{amb} + \frac{1}{\eta} \left[\frac{S_{solo}^2 - S_{cr}^2}{2} + (S_{solo} - S_{cr})(1 - 2S_{cr}) + (1 - S_{cr})^2 \ln \left(\frac{1 - S_{solo}}{1 - S_{cr}} \right) \right] \quad (4-40)$$

onde:

- T_{cr} é o valor da isoterma crítica, que coincide com a curva de isoumidade correspondente ao grau de saturação crítico S_{cr} ;
- T_{amb} é a temperatura ambiente do solo;
- S_{solo} é o grau de saturação natural do solo;
- os parâmetros S_{solo} , S_{cr} , e η devem ser encontrados por meio de experimentos adequados.

Esta análise de equilíbrio vale enquanto forem válidas as suas hipóteses:

1. o fluxo de líquido está associado somente a gradientes de umidade: altas variações de temperatura podem ter grande influência no efeito de capilaridade e portanto na migração de líquido pelo meio;
2. o fluxo de vapor depende somente de gradientes de temperatura: quando a geração de calor diminui (numa situação típica de carga cíclica, por exemplo), o fenômeno de migração de vapor da região distante do cabo (e portanto mais úmida) para a região seca nas suas proximidades fica bastante acentuado;

3. os modelos das difusividades são simplificados: seria necessário estabelecer condições de validade para os mesmos.

Groenveld et al. (1984) apresentam um método mais completo de análise desta situação crítica, com base no modelo de Philip e De Vries (1957). Além de incluir todos os mecanismos de transporte previstos pela teoria, eles incluem o efeito da temperatura e da histerese sobre estes mecanismos.

Determinação de S_{cr}

Conforme a norma Pirelli (1987), o valor de S_{cr} pode ser avaliado de forma indireta, a partir de medições da resistividade térmica ρ em função do grau de saturação S . Em geral, a curva ($\rho \times S$) tem a forma mostrada na figura 4-10. O parâmetro S_{cr} é definido como o valor do grau de saturação no ponto em que a curva sofre uma variação abrupta.

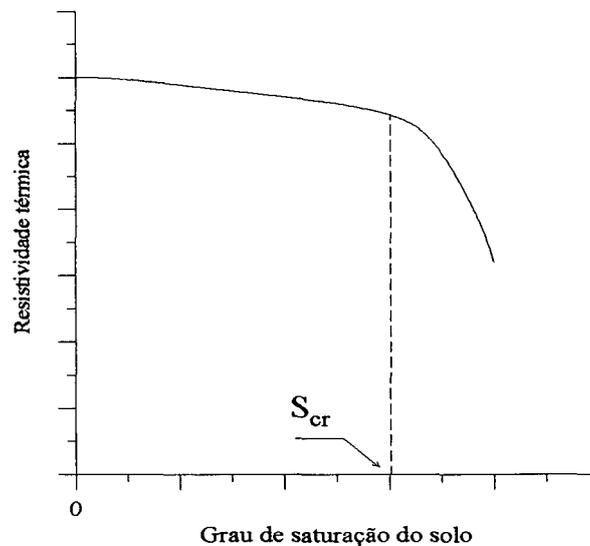


Figura 4-10. Definição qualitativa do grau de saturação crítico.

A saturação crítica também pode ser determinada diretamente, pela imposição de um gradiente térmico a uma amostra do solo que se deseja analisar. Segundo Donazzi et al. (1979), variações no grau de saturação menores do que 5% são observadas se o solo estiver em uma condição hidrológicamente estável. Por outro lado, se a instabilidade hidrológica for atingida, por efeito de um gradiente térmico muito intenso ou em consequência de um conteúdo inicial de umidade muito baixo, ocorrem variações altas de umidade (maiores do que 15%), podendo eventualmente ser atingida a secagem completa do solo na região quente. A medição da umidade na região mais quente do solo e a observação do estado final do solo permitem determinar a umidade crítica.

Determinação do valor de η

O parâmetro η está relacionado com os modelos adotados para as difusividades, equações (4-37) e (4-38) e vale:

$$\eta = \frac{D_{Tv0}}{D_{\theta10}} \quad (4-41)$$

Rigorosamente, η teria que ser determinado a partir de valores de D_{Tv0} e $D_{\theta10}$ coerentes com o modelo de Árpád Kezdi (1974). Mas η também pode ser determinado indiretamente, como parâmetro de ajuste entre um campo de umidades teórico obtido a partir da equação (4-39) e medições experimentais. Este procedimento é detalhado no trabalho de Donazzi et al. (1979), que substitui na equação (4-39) um modelo teórico para a dependência da resistividade com a umidade e obtém uma distribuição completa do grau de saturação. O parâmetro η é variado até que seja obtido o melhor ajuste da curva real aos dados experimentais.

4.6 O efeito de histerese nos coeficientes fenomenológicos

No modelo original de Philip e De Vries, os coeficientes fenomenológicos em um local qualquer do solo dependem apenas dos valores de umidade e temperatura neste ponto, não interessando o processo a que o solo localizado neste local foi submetido para chegar a este estado.

Na prática, a retirada de líquido do solo (ou drenagem) é diferente da adição de líquido (ou embebição). A diferença fica evidenciada na determinação da curva de potencial de sucção deste solo. Para chegar a um ponto qualquer desta curva, leva-se uma amostra do solo a ficar com um conteúdo de umidade pré-estabelecido e mede-se o potencial de sucção correspondente. Mas esta amostra pode chegar ao valor pré-fixado de umidade de duas maneiras diferentes:

- i) por drenagem: parte-se de um estado de saturação completa e retira-se água; ou
- ii) por embebição: adiciona-se umidade a um solo inicialmente seco.

Constata-se experimentalmente que estes dois procedimentos levam a curvas diferentes, ou seja, o potencial de sucção associado a um valor de umidade depende do processo a que foi submetido o solo para chegar a esta umidade. Esta dependência leva o nome de *histerese*. A figura 4-11 mostra qualitativamente duas curvas de potencial de sucção diferenciadas pelo processo de obtenção de seus pontos.

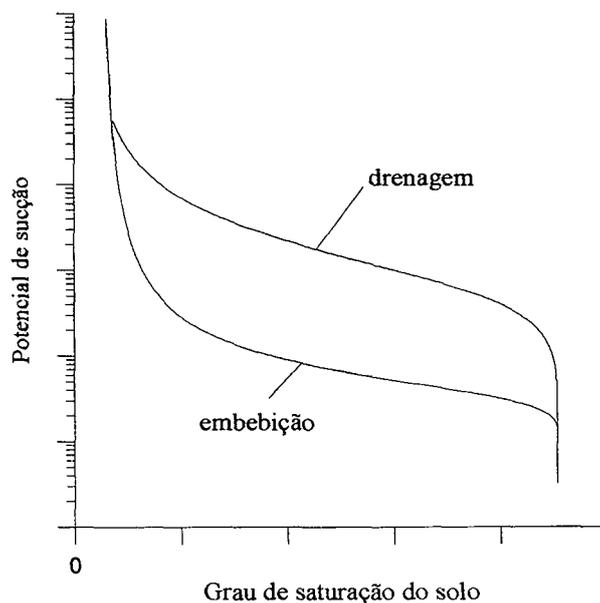


Figura 4-11. Efeito de histerese sobre a curva de potencial de sucção.

As duas curvas mostradas na figura 4-11 na verdade são curvas limites. Se o solo por elas descrito for submetido a uma composição de processos de drenagem e embebição, qualquer ponto entre estas duas curvas poderá vir a representar o estado deste solo. Neste caso, a curva que descreveria este processo complexo seria uma linha em algum lugar na região entre as duas curvas limites.

O solo em torno do cabo elétrico está essencialmente submetido a um processo de secagem a partir do momento em que o cabo é ligado. Esta situação se inverte, e o solo passa a ser umedecido, somente se a potência for desligada ou diminuída. Conclui-se que a histerese deve ser importante quando se deseja simular uma parada para manutenção ou cargas cíclicas com grandes variações (fator de carga muito baixo).

Modelagem da histerese

A histerese não está sempre presente e o seu efeito só aparece em condições específicas. Antes de aplicar qualquer modelo de histerese, é preciso determinar onde este efeito aparece no modelo de Philip e de Vries, quando aplicado ao problema de cabos de potência subterrâneos. Conforme discutido no item 4.4, no solo próximo ao cabo elétrico estão ocorrendo basicamente dois processos de migração de umidade:

- i) migração de vapor de regiões secas (próximas ao cabo) para regiões úmidas (distantes), governada pelos coeficientes *térmicos*, D_{Tv} e D_{Tl} ;
- ii) migração de líquido de regiões úmidas (distantes do cabo) para regiões secas (perto do cabo), governada pelas coeficientes *isotérmicos* $D_{\theta v}$ e $D_{\theta l}$.

Portanto, os coeficientes térmicos estão associados a um processo de drenagem e os coeficientes isotérmicos estão associados a um processo de embebição. Ainda, o efeito de $D_{\theta v}$ é mais pronunciado para valores de umidade abaixo da irreduzível, quando não há continuidade na fase líquida.

O processo de histerese é local, isto é, a definição da curva que descreve o processo em um ponto qualquer depende do efeito conjunto de todos os coeficientes. No início do aquecimento, por exemplo, ocorre uma secagem geral do solo que circunda o cabo. Groenveld et al. (1984) sugerem que as situações em que o efeito da histerese começa a aparecer coincidem com o momento em que há uma nítida predominância da difusividade do líquido devido a gradientes de umidade, $D_{\theta l}$, que é o momento em que a potência dissipada no cabo baixa muito e a temperatura do solo ao seu redor começa a cair. Neste momento, o fluxo de vapor diminui e o fluxo de umidade na forma líquida de longe para perto do cabo começa a se intensificar. Conclui-se que a histerese aparece em todos os coeficientes, mas, em uma simulação de cabos elétricos de potência, tem efeito significativo apenas sobre $D_{\theta l}$.

Por outro lado, deseja-se incluir a histerese na simulação numérica sem perder de vista que o presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de resolver um problema real da indústria de cabos elétricos de potência. Neste contexto, o programa que resultou do tratamento numérico das equações de Philip e de Vries, e com o qual os resultados do capítulo 7 foram gerados, só terá alguma utilidade prática se permitir a análise de diferentes configurações e possibilidades em um tempo computacional razoável. É preciso ter cuidado, portanto, para não comprometer as simplificações e otimizações implementadas especificamente com o fim de diminuir o tempo de simulação computacional. Com esta preocupação, não poderiam ser incorporados às equações empregadas no presente trabalho modelos que exigissem que os coeficientes fossem *recalculados* a cada iteração. É exatamente para evitar a repetição de cálculos idênticos e possibilitar execuções rápidas que os coeficientes e a sua dependência com conteúdo de umidade e temperatura são armazenados em matrizes e são apenas *acessados* cada vez que é necessário.

Mesmo restringindo o efeito de histerese apenas ao coeficiente $D_{\theta 1}$, é preciso um modelo que seja simples o bastante para manter a estrutura computacional de coeficientes "pré-calculados", mas que de alguma forma considere um efeito de histerese. Pode-se conseguir boa precisão na simulação da histerese aplicando-se o modelo de Mualém (1976) para os fenômenos que ocorrem a nível microscópico. Mas, mesmo com este modelo, simples e de fácil implementação, a simulação ainda seria muito lenta. O modelo de Mualém respeita as infinitas possibilidades de curvas secundárias da curva de potencial de sucção e, para calcular o valor instantâneo do potencial de sucção, seria necessário localizar a curva secundária específica em que o processo se encontra. Os extensos cálculos que devem ser executados até a determinação de cada ponto da curva de $D_{\theta 1}$ teriam que ser refeitos *a cada avanço no tempo* e a simulação se tornaria excessivamente lenta.

O único modo de considerar a histerese sem comprometer a estrutura computacional otimizada é modelar de alguma forma apenas as duas curvas principais e assumir que o processo tem apenas estas duas opções extremas para seguir. O fenômeno de histerese é certamente muito mais complexo do que isto, mas esta idéia foi apresentada por Groenveld et al. (1984) e será aproveitada sem alterações no presente trabalho, por ser a única forma viável de levar em consideração a histerese. O erro envolvido em desprezar as curvas secundárias não fica muito significativo na simulação porque as curvas principais de $D_{\theta 1}$ (obtidas a partir das curvas principais de embebição e drenagem do potencial de sucção) ficam próximas entre si, para os solos empregados no presente estudo. O coeficiente $D_{\theta 1}$ não depende apenas do potencial de sucção e a diferença evidenciada nas curvas de potencial de sucção fica diminuída quando passada para $D_{\theta 1}$. Além disto, a maior diferença entre as curvas principais de $D_{\theta 1}$ é encontrada para conteúdos de umidade próximos à saturação, difíceis de encontrar na prática, e vai diminuindo com a diminuição da umidade. A figura 4-12 mostra as curvas principais de $D_{\theta 1}$ para o backfill bimodal, de acordo com o modelo empírico descrito a seguir.

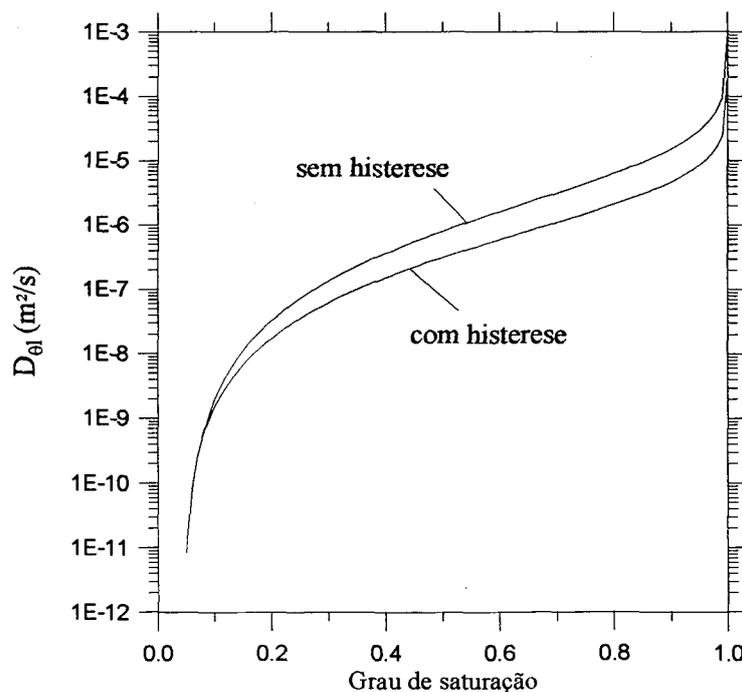


Figura 4-12. Efeito de histerese sobre a curva de $D_{\theta 1}$ para backfill bimodal.

Mesmo assumindo que o efeito de histerese é importante apenas sobre $D_{\theta 1}$ e que apenas as curvas principais devem ser modeladas, resta ainda o problema de determinar a curva de embebição. Rigorosamente, a curva de embebição teria que vir de dados experimentais, mas como a simulação de cabos subterrâneos é normalmente assumida como um problema típico de *secagem* em solos, apenas as curvas relativas à drenagem são levantadas experimentalmente. Como não há dados disponíveis e a sua determinação experimental é bastante trabalhosa, no presente trabalho a histerese será levada em consideração através da correção do coeficiente $D_{\theta 1}$ por um fator heurístico. A idéia deste fator foi introduzida por Groenveld et al. (1984). Em seu trabalho, a expressão de $D_{\theta 1}$ é diferente da equação (4-15) e é dada por:

$$D_{\theta 1} = \frac{\rho_1 K_{sat} k_r}{\mu_1} \left(\frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right)_T \frac{1}{e(\theta)} \quad (4-42)$$

onde o fator $e(\theta)$ vale

$$\begin{aligned} e(\theta) &= 1 && \text{se } -\psi \geq 1 \text{ m.c.a. (metros de coluna d'água)} \\ e(\theta) &= 3 - \log_{10}^{-100} \psi && \text{se } -\psi < 1 \text{ m.c.a.} \end{aligned} \quad (4-43)$$

O fator $e(\theta)$ empregado por Groenveld et al. aplica-se especificamente à areia utilizada em seu estudo. Este é um fator heurístico e no presente trabalho foi ajustado com base nas curvas de potencial de sucção disponíveis, modificando-se os coeficientes da equação (4-43) até que a curva resultante fosse compatível com a curva de drenagem correspondente. Em relação a este processo, valem as seguintes observações:

- o ajuste foi feito sobre ψ e não sobre $D_{\theta 1}$ porque a diferença entre as curvas principais de ψ é mais nítida;
- é certo que:
$$\frac{\partial(\psi/e)}{\partial \theta} \neq \frac{1}{e} \frac{\partial \psi}{\partial \theta}$$

e a análise teria que ser feita sobre $\partial \psi / \partial \theta$, mas a diferença é pequena e pode ser desprezada;

- estas conclusões foram tomadas com base em uma análise gráfica executada com o auxílio do software Mathcad, para os solos utilizados no presente trabalho. O programa correspondente encontra-se no apêndice A.

Com isto, pretende-se levar em conta o mais aproximadamente possível, de acordo com os objetivos gerais do trabalho, a diminuição de $D_{\theta 1}$ causada pelo efeito da histerese sobre o potencial de sucção. De acordo com a análise gráfica realizada, o coeficiente $D_{\theta 1}$ associado à embebição não fica muito distante do associado à drenagem, para os solos utilizados.

Nas simulações executadas no capítulo 7, a diferença entre as temperaturas finais nos cabos para os casos com e sem histerese variou desde 1°C, nas potências transmitidas mais baixas, até valores em torno de 10°C, para as potências transmitidas mais altas (maiores do que 100 MVA). Ou seja, o modelo de histerese adotado leva à determinação de temperaturas mais altas exatamente nos casos mais críticos, que exigem análise mais cuidadosa, o que justifica a sua adoção no presente trabalho.

Discussão do modelo

O modelo aqui adotado segue inteiramente a abordagem de Groenveld et al. (1984) para a histerese. Este era o modelo mais simples e o único que poderia ser implementado integralmente, sem aumentar excessivamente o tempo computacional. Porém, no trabalho de Groenveld et al. não há nenhuma discussão a respeito dos aspectos físicos de seu modelo e alguns pontos não ficam bem claros. Tais questões não puderam ser esclarecidas e podem mesmo invalidar o modelo. O modelo se baseia em dois pontos fundamentais:

- 1) o único coeficiente que é influenciado de maneira importante pela histerese é $D_{\theta 1}$;
- 2) o efeito da histerese aparece como uma *diminuição* de $D_{\theta 1}$.

Pode-se aceitar a argumentação qualitativa de Groenveld et al. para o primeiro ponto. A influência da histerese sobre os demais coeficientes é realmente pequena. Por outro lado, não é explicado em seu trabalho porque foi considerado que a histerese leva a uma diminuição de $D_{\theta 1}$.

No momento em que o processo se inverte, e passa de secagem para embebição, a curva de potencial de sucção característica não passa imediatamente a ser a curva de embebição. Há uma etapa intermediária de transição, em que o processo segue uma curva secundária entre as duas principais, mostrada na figura 4-13 (Mualém, 1976). O coeficiente $D_{\theta 1}$ não depende diretamente do potencial de sucção ψ , mas sim da sua *derivada* em relação à umidade (ver equação (4-15)) e, nesta etapa intermediária, a derivada de ψ é *maior* do que nos trechos correspondentes das curvas principais. Aparentemente, a conclusão seria, ao contrário do proposto por Groenveld et al., de que o coeficiente $D_{\theta 1}$ *aumenta* com a inclusão da histerese. Esta conclusão não é óbvia e somente poderia ser confirmada com a efetiva implementação computacional do modelo de Mualém (1976).

O modelo de Mualém (1976) é certamente mais preciso e mais correto do que o de Groenveld et al., mas a sua implementação exigiria que os coeficientes fossem recalculados a cada iteração, o que aumentaria excessivamente o tempo computacional. Por outro lado, como o trabalho de Groenveld et al. não discute os princípios físicos utilizados, também não se pode chegar a uma conclusão definitiva de que ele não é válido. Além disto, mesmo se o modelo de Groenveld et al. é discutível quanto à sua validade, sua implementação está a favor da segurança (temperaturas dos cabos calculadas com a histerese de Groenveld et al. incluída são sempre maiores do que as calculadas sem histerese).

O efeito de histerese normalmente é desprezado na modelagem de cabos elétricos subterrâneos. Sua influência é de fato muito pequena e só aparece em situações muito particulares. O modelo adotado é apenas uma aproximação e terá que ser revisado quando dados experimentais estiverem disponíveis.

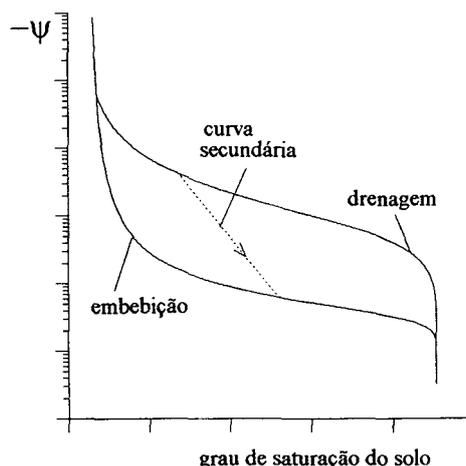


Figura 4-13. Curva secundária entre as curvas de embebição e drenagem.

Resultados de simulações completas para o transiente do cabo, incluindo as equações da energia e da umidade não foram encontrados na literatura. Mesmo assim, uma vez que a forma geral da equação da umidade é idêntica à da equação da energia e o método de solução é rigorosamente o mesmo para as duas equações, assume-se que o fato do balanço de umidade (ver item 6.4.2) fechar corretamente é suficiente para garantir a correta implementação do problema mássico.

6.5.2 Validação com resultados do software Cymcap (1991)

O software Cymcap (1991) é atualmente usado pela Divisão de Cabos da empresa Pirelli S.A. para o projeto de seus cabos. Este software é amplamente usado pelos projetistas de cabo nos Estados Unidos e Canadá e reproduz fielmente as normas descritas no capítulo 3.

O cabo escolhido para teste é do tipo EPR, com condutor de alumínio de 400 mm² de seção transversal e é composto dos elementos mostrados na tabela 6-1. Foram considerados 3 cabos enterrados a uma profundidade de 1,80m, com distância entre centros de 15cm.

Tabela 6-1. Descrição do cabo utilizado para comparação com Cymcap.

ELEMENTO	MATERIAL	DIÂMETRO EXTERNO (mm)
1) Condutor	Alumínio	25,50
2) Isolante	EPR	60,00
3) Blindagem	Fios de cobre	69,78
4) Proteção	Polietileno	81,68

Foram realizados dois testes para comparação:

- 1) regime permanente, umidade constante na região (resistividade uniforme = 1 [mK/W]);
- 2) regime permanente, umidade da região de acordo com o modelo de duas fases:
 - se a temperatura do solo é menor do que 50°C, o solo permanece com o valor de resistividade original inalterado;
 - se a temperatura do solo ultrapassar 50°C, assume-se que o solo secou e que sua resistividade ficou 3 vezes maior.

As tabela 6-2 e 6-3 mostram as temperaturas no condutor e na superfície do cabo obtidas com o software Cymcap e com o programa utilizado no presente trabalho, para os dois casos descritos acima. Constata-se que o modelo empregado no presente trabalho apresenta bons resultados quando comparado com as normas para o projeto de cabos, em situações sem migração de umidade no solo ou considerando esta migração de acordo com o modelo de duas fases.

Tabela 6-2. Temperatura no condutor do cabo central.

MODELO	Ampacidade	CYMCAP	Presente trabalho	Diferença (%)
Uniforme	472 [A]	90,0°C	88,0°C	2,2
Duas fases	384 [A]	90,0°C	87,7°C	2,6

Tabela 6-3. Temperatura na superfície do cabo central.

MODELO	Ampacidade	CYMCAP	Presente trabalho	Diferença (%)
Uniforme	472 [A]	71,8°C	70,9°C	1,25
Duas fases	384 [A]	77,5°C	76,1°C	1,80

6.6 Comparação com resultados experimentais

A eficácia do modelo em reproduzir a realidade física é testada por Moya (1995), através de comparação com resultados experimentais. Seu experimento, ainda em andamento no momento da redação do presente trabalho, consta de uma fonte cilíndrica de cobre dissipando calor em solo úmido de backfill bimodal (utilizado por Pirelli S.A. no aterramento de cabos de potência em situações críticas). Seus resultados experimentais de temperatura e umidade, tomados em diversas posições do solo e ao longo de todo o transiente, são diretamente comparados com os resultados obtidos com o programa utilizado no presente trabalho.

7 RESULTADOS

Todos os resultados apresentados deste capítulo estão relacionados com a simulação de um circuito trifásico, composto de cabos do tipo SCOF enterrados em uma região de solo predominantemente silto-arenoso. Em alguns casos foi considerada a adição de backfill bimodal próximo aos cabos para garantir a transmissão de altas potências elétricas. Através de um acompanhamento do nível de temperatura no interior do cabo central do circuito e dos níveis de temperatura e umidade no solo adjacente, são mostradas as condições de segurança dos cabos do circuito.

Inicialmente é feita uma análise em regime permanente, para verificar o efeito da inclusão de backfill sobre a situação dos cabos em regime permanente. Neste ponto é verificada qual a quantidade necessária de backfill e o efeito da variação de diversos parâmetros representativos da condição do meio que envolve o cabo. Logo em seguida é feita uma análise do transiente, em que, com base nas conclusões da análise em regime permanente, são escolhidos alguns casos para serem acompanhados detalhadamente, desde o início da transmissão de potência. Além da evolução diária da temperatura no condutor do cabo central e da umidade do solo em um ponto próximo à superfície do cabo central, em alguns instantes do transiente estrategicamente escolhidos são apresentados os campos de temperatura e umidade em todo o solo que faz parte do domínio computacional.

A análise transiente inclui ainda uma situação em que a corrente varia diariamente (carga cíclica) e ao longo dos anos (carregamento progressivo), em uma instalação em que houve secagem parcial do solo silto-arenoso que envolve os cabos. Com isto, pretende-se mostrar o desempenho do método de solução em uma situação crítica, de difícil convergência, em que aparecem grandes oscilações nas grandezas de interesse.

Ao final do capítulo, alguns aspectos da metodologia são avaliados. Valores equivalentes de condutividade térmica são determinados para a região próxima aos cabos (mais seca) e para a porção do solo mais afastada dos cabos (mais úmida), permitindo uma comparação com o modelo de duas fases. Para completar a análise, o impacto da inclusão do efeito de histerese é quantificado.

7.1 Descrição do problema para análise

Na análise a seguir, assumem-se parâmetros que identifiquem o problema a ser resolvido com um problema real. Os cabos são modelados de acordo com os dados técnicos de um cabo SCOF fornecidos por Pirelli S.A. e a condição do solo da região é determinada com base em um relatório do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT-SP) sobre as características do solo em um trecho de uma linha de alta tensão em Osasco, no estado de São Paulo.

Descrição da instalação dos cabos

Parte-se de um caso básico, mostrado na figura 7-1. Os 3 cabos do circuito trifásico simulado estão em formação plana, regularmente transpostos, com ligação cruzada ("cross-bonded"). Assume-se que será necessário acrescentar backfill, pois, devido aos altos valores de corrente que serão utilizados, o solo de aluvião certamente secará. Mesmo assim, são apresentados resultados para solo de aluvião em todo o domínio, para comparação.

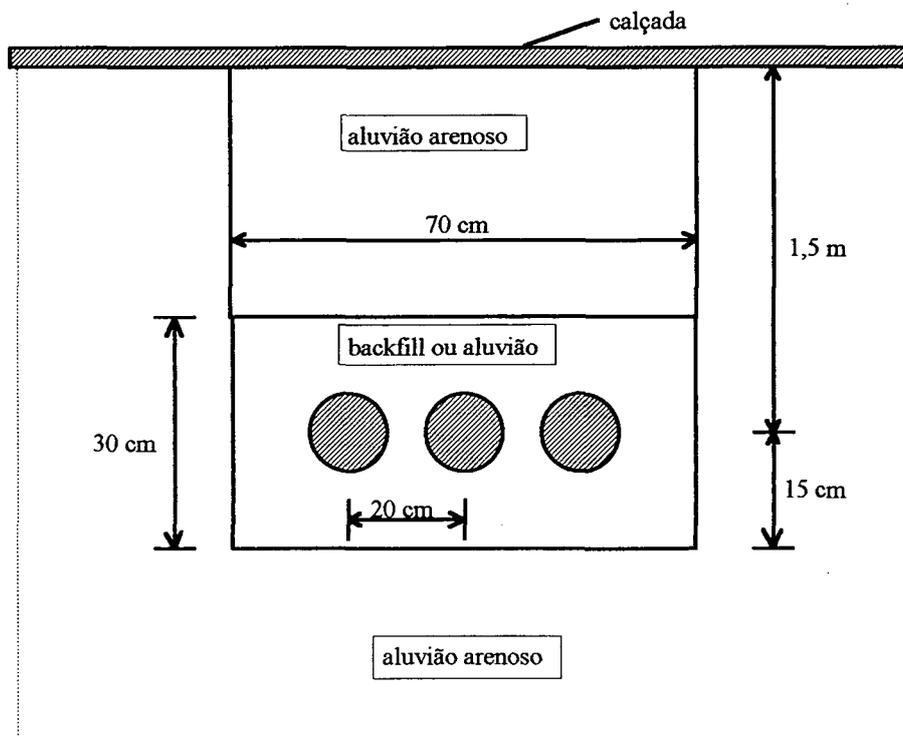


Figura 7-1. Representação esquemática da instalação no terreno.

Descrição do cabo

A descrição técnica dos cabos utilizados é a seguinte:

- cabo OF (Oil-Filled), low-pressure, self-contained;
- condutor do tipo "hollow", de cobre, com seção transversal de 450 mm²;
- tensão fase-fase = 138 kV;
- blindagem composta de 3 elementos metálicos:
 - 1) capa de chumbo, com seção transversal de 368,58 mm²;
 - 2) fita de cobre;
 - 3) fios de cobre de seção retangular, em formação de 30x(5x0,85) mm² e fator de encordoamento de 1,034;
- dimensões das camadas internas conforme tabela 7.1.

Tabela 7-1. Dimensões internas do cabo empregado nas simulações.

CAMADA:	DIÂMETRO (mm)	ESPESSURA (mm)
1) canal	12,50	-
2) condutor	27,61	7,56
3) semicondutor	28,55	0,47
4) dielétrico	48,05	9,75
5) semicondutor	48,32	0,135
6) fiberglass	48,71	0,195
7) capa de chumbo	53,31	4,6
8) cintamento radial	54,11	0,4
9) cintamento longitudinal	55,01	0,85
10) proteção externa	64,11	4,56

Determinação das perdas no interior dos cabos

Tanto os coeficientes de perdas devido às correntes induzidas como as perdas no dielétrico (ver capítulo 2) foram calculados à parte, de acordo com as normas, em uma análise do interior do cabo mostrada no apêndice B. Estas grandezas dependem do modo de instalação dos cabos e estão associadas a parâmetros elétricos. Sua determinação é complexa, mas foi otimizada para inclusão na norma, de modo que elas podem ser obtidas a partir de fórmulas simples, com o auxílio de algumas tabelas. Para o cabo SCOF utilizado, nas condições de instalação especificadas, as perdas são:

- perda na blindagem de chumbo = 4,6% da perda no núcleo de cobre;
- perda na blindagem de fios de cobre = 9,6% da perda no núcleo de cobre;
- perda no dielétrico = 10,4 W/m.

Descrição do solo

A tabela 7-2 apresenta uma análise dos solos em uma região de Osasco (SP) em que foi instalada uma linha de alta tensão. Estes dados foram levantados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de SP (1987) e são aqui considerados como uma referência para o tipo de solo que pode ser encontrado no estado de São Paulo. As colunas são valores médios calculados com os dados do IPT e não estão relacionadas entre si.

Tabela 7-2. Condição do solo examinado pelo IPT-SP (1987) na região de Osasco (SP).

Propriedade	massa específica (kg/m ³)		umidade natural (%)	resistividade térmica (mK/W)		capacidade térmica (J/m ³ /K)	
	seco	úmido		seco	úmido	seco	úmido
Solo			-				
Mínimo	1,33	1,68	27	1,08	0,35	360.000	2.319.000
Valor médio	1,58	1,80	31	2,02	0,43	738.000	3.528.000
Máximo	1,72	1,91	37	3,70	0,56	1.116.000	4.264.000

OBS.: 1) o estado de solo "úmido" refere-se a solo com a umidade natural de onde foi retirada a amostra;

2) a umidade natural aqui apresentada é definida como a percentagem da massa de água presente na amostra (kg) em relação à massa de solo seco (kg);

- 3) estes valores baseiam-se na determinação de 22 amostras de solo na região Altino-Osasco, no estado de São Paulo;
- 4) não estão consideradas nesta tabela as amostras que continham algum material orgânico.

Atualmente estão disponíveis para simulação apenas dados para solo do tipo silto-arenoso (aluvião), areno-siltoso (backfill bimodal) ou arenoso. O solo silto-arenoso é tomado como solo da região na análise que segue, porque sua resistividade térmica a seco (3,33 mK/W) é maior do que a média dos solos examinados e encontra-se dentro da faixa de valores encontrados. Além disto, o valor mínimo de resistividade térmica com umidade natural do aluvião (0,59 mK/W, a 70°C) ainda é maior do que o mínimo valor de resistividade térmica encontrado nas amostras.

Com base nestas observações, pode-se concluir que a utilização de solo silto-arenoso como solo da região em uma simulação para o estado de São Paulo não corresponde exatamente à realidade, mas a diferença está a favor da segurança. O aluvião é menos eficiente em dissipar calor do que a grande maioria das amostras examinadas pelo IPT-SP (1987).

Os dados de backfill bimodal utilizados nas simulações foram obtidos por Oliveira (1993), a partir de amostras deste solo fornecidas por Pirelli S.A..

7.2 Análise em regime permanente

A seguir são apresentados os efeitos da variação de diversos parâmetros sobre a temperatura do condutor do cabo central em regime permanente. Para a obtenção destes resultados foi utilizada uma malha de 450 volumes (18 x 25), em um domínio de 5,4 m (largura total) por 4,2 m (altura total). Quando não indicado, a temperatura ambiente foi tomada como 30°C e a temperatura natural dos solos como 25°C.

7.2.1 Influência da umidade natural do solo da região

A temperatura final do condutor do cabo central (a mais crítica) depende da potência que se quer transmitir pelo circuito, mas também do estado de umidade do solo em que a linha será enterrada. A umidade natural do solo representa condição de contorno e ponto de partida para a simulação do transiente do sistema.

Cada valor de potência transmitida terá um efeito diferente sobre as temperaturas dos cabos, dependendo do conteúdo de umidade natural deste solo. Se este solo já contém naturalmente pouca umidade (menos de 40% dos espaços vazios preenchidos com água), há uma grande chance de ocorrer secagem parcial devido à geração de calor nos cabos. Por outro lado, quando a umidade natural do solo da região se mantém sempre em níveis altos (mais de 60% dos espaços vazios do solo preenchidos com água), mesmo gerações de calor intensas têm pouco efeito sobre a umidade.

O valor correto da umidade natural do solo da região para utilização em uma simulação teria que ser determinado a partir de um controle periódico da umidade natural em vários pontos da região por onde a linha vai passar. Este tipo de levantamento é trabalhoso e nem sempre está disponível, de modo que normalmente é necessário *estimar* a umidade natural do solo para a análise teórica do projeto, a partir de algumas poucas medições durante o inverno (época do ano em que o solo está mais seco).

A figura 7-2 mostra a temperatura que o condutor do cabo central atinge quando uma potência constante é transmitida pela linha por tempo suficiente para que seja atingido o regime permanente. Uma ampla faixa de potências foi estudada (30 a 150 MVA) e os resultados são mostrados para diferentes valores de umidade natural (ou grau de saturação inicial do solo, S_i) e

considerando a presença ou não de solo especial (backfill) próximo aos cabos. Conforme a condição do solo, foram analisados 4 casos:

1. Aluvião com $S_i = 0,35$:
todo o solo em torno dos cabos constituído de aluvião arenoso, com uma umidade natural correspondente a um grau de saturação de 0,35 (35% dos espaços vazios do solo de aluvião preenchidos com água);
2. Aluvião com $S_i = 0,40$:
todo o solo em torno dos cabos constituído de aluvião arenoso, com uma umidade natural correspondente a um grau de saturação de 0,40 (40% dos espaços vazios do solo de aluvião preenchidos com água);
3. Aluvião com $S_i = 0,60$:
todo o solo em torno dos cabos constituído de aluvião arenoso, com uma umidade natural correspondente a um grau de saturação de 0,60 (60% dos espaços vazios do solo de aluvião preenchidos com água);
4. Trincheira de backfill:
em vista da possibilidade de secagem do aluvião arenoso com baixa umidade ($S_i = 0,35$), o caso 1 é repetido com a adição de backfill bimodal (com grau de saturação = 0,60) em uma pequena trincheira próximo aos cabos. Rigorosamente, a saturação inicial do backfill é pouco importante, pois na prática, a transmissão de potência sempre demora alguns meses antes de ser iniciada e o backfill acaba se ajustando às condições do solo que o envolve, o qual funciona como uma espécie de condição de contorno para o backfill.

Antes de iniciada a simulação da parte térmica, é executada uma simulação da equação da umidade por um longo período sem geração de calor, permitindo que a umidade do domínio entre em equilíbrio.

Observa-se que se a umidade natural do solo da região for maior do que 0,40 (40% dos espaços vazios do solo preenchidos com água), a temperatura do condutor se mantém em níveis aceitáveis, abaixo de 90°C. Além disto, nota-se que quando o grau de saturação natural do solo baixa a 0,35, a curva muda bruscamente de comportamento para uma potência transmitida em torno de 100 MVA, evidenciando alguma modificação fundamental na estrutura do solo. Esta modificação é uma secagem parcial do solo. Conforme a figura 7-3, o grau de saturação do solo próximo ao cabo em regime permanente se mantém em níveis aceitáveis para $S_i = 0,4$ ou 0,6 mas cai bruscamente com o aumento de potência para $S_i = 0,35$, indicando que para esta condição de umidade natural, existe a possibilidade de haver secagem parcial no solo adjacente aos cabos, dependendo da potência transmitida.

Solos em estado natural dificilmente chegam a um grau de saturação menor do que 0,4 e a maioria dos solos apresenta um grau de saturação acima de 0,6. Os solos examinados pelo IPT-SP (1987) tinham em média um conteúdo de umidade natural de 31% em massa. Esta percentagem de água representa, para o aluvião arenoso, um grau de saturação de 75%. Mesmo assim, sendo necessário transmitir potências tão altas como 150 MVA, é preciso prever a possibilidade de um período de seca. Por esta razão, a figura 7-2 apresenta também o efeito da inclusão de uma porção de backfill bimodal em torno dos cabos. O backfill foi acrescentado a partir da previsão de que o solo se manteria com $S_i = 0,35$ por longos períodos. Nota-se que se o grau de saturação do solo da região estiver realmente no valor de 0,35, mesmo com backfill a temperatura do condutor pode chegar a níveis perigosos, se a potência transmitida chegar próximo a 150 MVA. Como confirma a figura 7-3, se o solo da região estiver tão seco, mesmo o backfill secará.

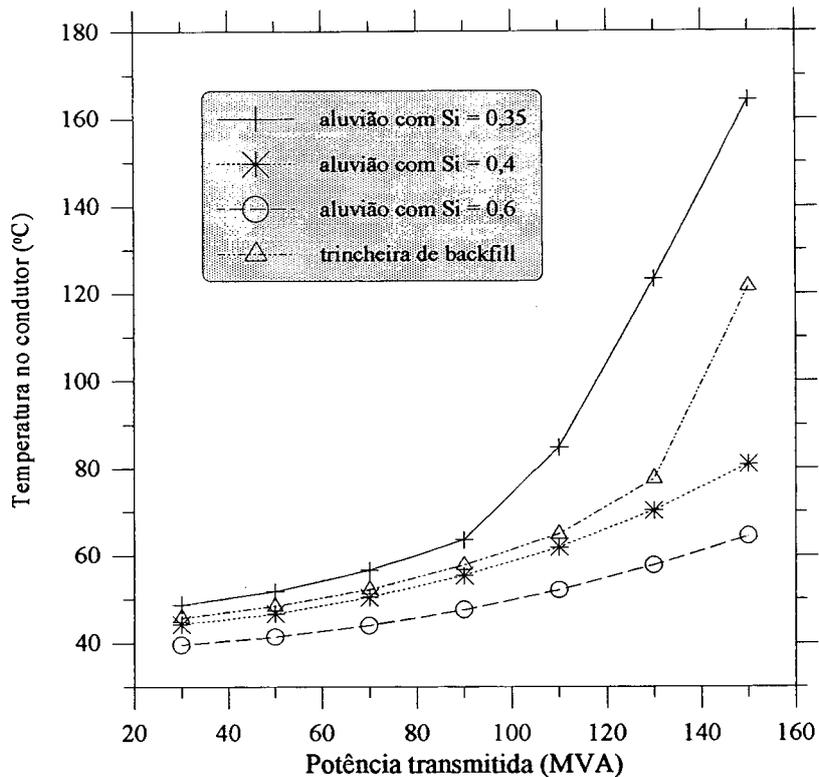


Figura 7-2. Influência da umidade natural do solo da região sobre a capacidade de transmissão de potência do circuito.

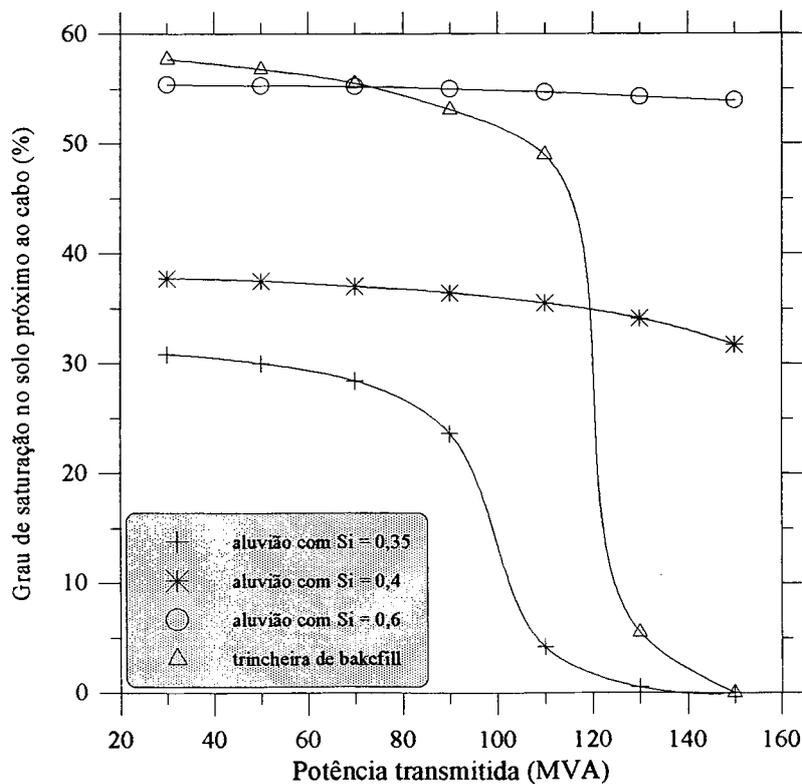


Figura 7-3 Influência da umidade natural do solo da região sobre o estado final de umidade do solo próximo aos cabos.

7.2.2 Quantidade ótima de backfill

Além de indicar a necessidade ou não de adição de solo especial, a análise numérica deve permitir a determinação da quantidade que será necessária. As figuras 7-4 e 7-5 mostram que a adição de backfill tem um forte efeito sobre a temperatura do condutor (largura e altura nulas correspondem a não adição de backfill). A simples presença do backfill já coloca a temperatura do condutor em níveis bem mais baixos. Mas a partir daí, pode-se dobrar a largura da camada de backfill mostrada na figura 7-1, por exemplo, mas conforme a figura 7-4, isto adiantará muito pouco em termos de diminuição da temperatura no condutor. Por isto, a determinação do tamanho ótimo da largura da camada de backfill satisfaz a critérios práticos: a largura da camada de backfill é a mesma largura da vala que foi cavada para a instalação da linha. A vala para a instalação da linha deve ter uma largura suficiente para permitir o trabalho de uma pessoa (aproximadamente 70 cm).

Da mesma forma, pode-se levar a camada de backfill da figura 7-1 até a calçada (mantendo fixo o fundo), mas, conforme a figura 7-5, isto representará um ganho menor do que 2,5 % em termos de diminuição da temperatura no condutor do cabo central. Por outro lado, uma camada menor do que 30 cm pode dar margem a falhas na proteção ao longo da linha, de modo que 30 cm foi escolhido como um valor ótimo para a altura da camada de backfill.

Também se pode aumentar a camada de backfill aumentando-se a porção que fica *abaixo* dos cabos. Na prática, isto equivale a cavar uma vala mais profunda do que o necessário para os cabos, reaterrar um pouco com backfill e só então instalar a linha. Esta situação foi implementada na simulação computacional mantendo-se a fronteira superior da camada de backfill a uma profundidade constante de 1,35m e aumentando-se a sua fronteira inferior desde 1,65m (correspondendo a uma camada de backfill de 30cm de altura) até 1,95m (correspondendo a uma camada de backfill de 60cm de altura).

Os resultados desta análise estão mostrados nas figuras 7-6 e 7-7. A figura 7-6 mostra que novamente a simples adição de backfill leva a temperatura do condutor a estabilizar em níveis mais baixos (profundidade da camada no mesmo nível dos cabos, em 1,5m, corresponde a solo sem backfill), mas mostra também que uma extensão adicional da profundidade da camada de backfill leva a ganhos pequenos. A figura 7-7 mostra a condição de umidade do solo próximo ao cabo central associada a cada altura de trincheira de backfill simulada. Nota-se que qualquer aumento da profundidade do backfill leva a uma diminuição da umidade na região dos cabos. Com o aumento da camada de backfill há uma migração da umidade da região superior da camada para o fundo. Os cabos estão localizados na parte superior da camada de backfill (cada vez que a profundidade do backfill é aumentada, os cabos se localizam mais ao alto, relativamente à camada de backfill) e a ação da gravidade ao nível de umidade indicado (40 a 60%) é muito acentuada e tende a deixar esta região com um conteúdo de umidade menor do que a porção inferior do backfill. Enquanto o solo próximo aos cabos se mantiver com um grau de saturação maior do que 40%, as propriedades do backfill variam pouco e a ampliação da região de material bom condutor (backfill) representa um ganho em termos de diminuição da temperatura de equilíbrio dos cabos. A pouca influência do aumento da camada de backfill para o fundo era esperada, pois a resistência térmica que domina o processo de transferência de calor é aquela associada ao solo *acima* dos cabos, que liga a geração de calor com o ambiente. Diminuir a resistência térmica abaixo dos cabos tem pouca influência porque o caminho preferencial para o fluxo de calor é o solo que fica entre os cabos e a calçada.

Conclui-se, de maneira geral, que a *presença* de backfill influi decisivamente na segurança dos cabos, mas também que a *quantidade* de backfill tem importância secundária na análise. A determinação da quantidade ótima de backfill ficou ligada, neste caso, a critérios práticos.

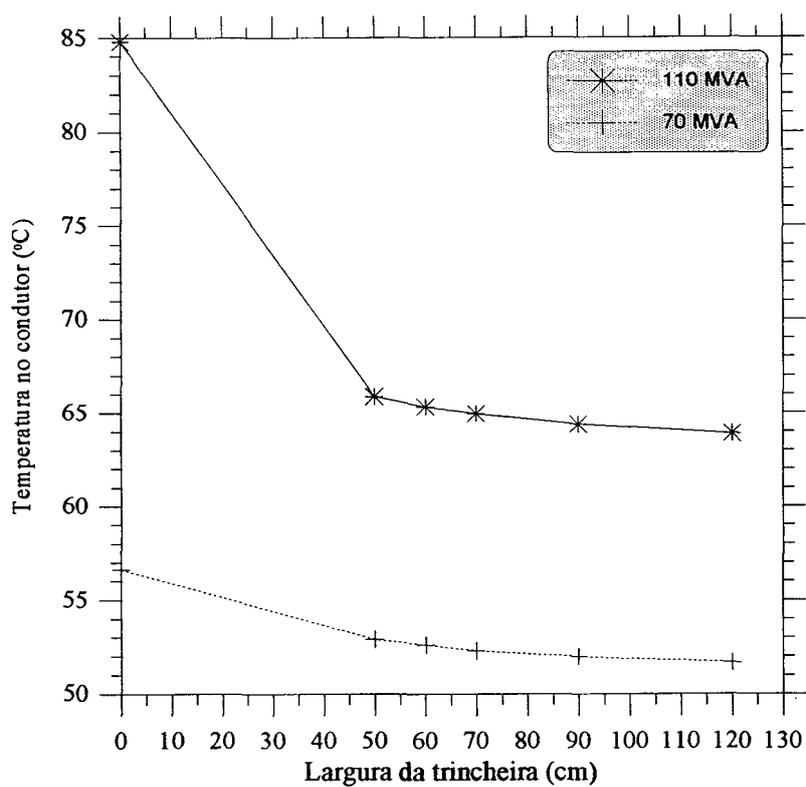


Figura 7-4. Influência da largura da trincheira de backfill.

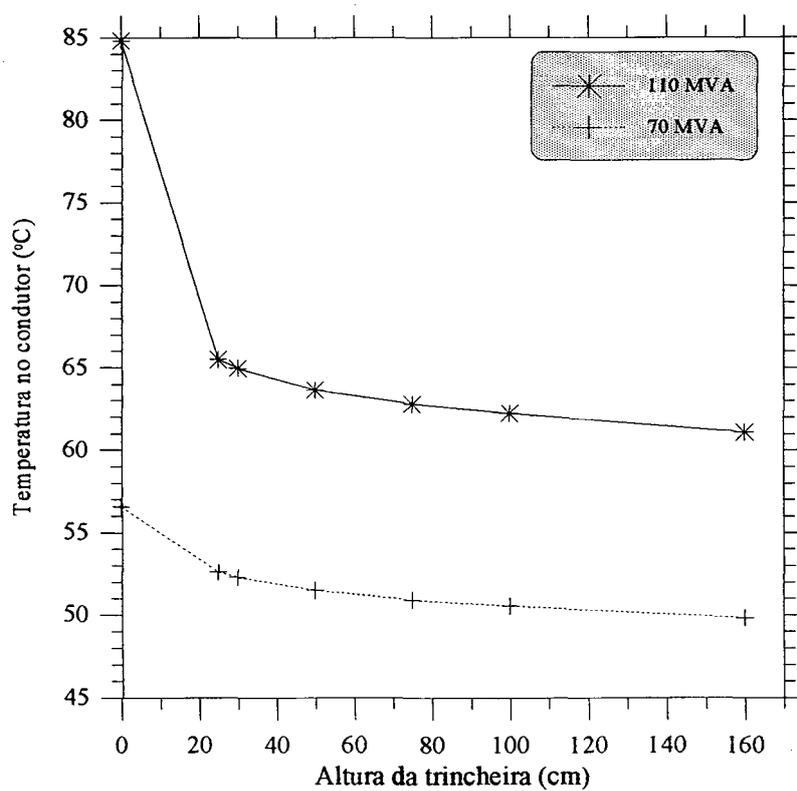


Figura 7-5. Influência da altura da trincheira de backfill.

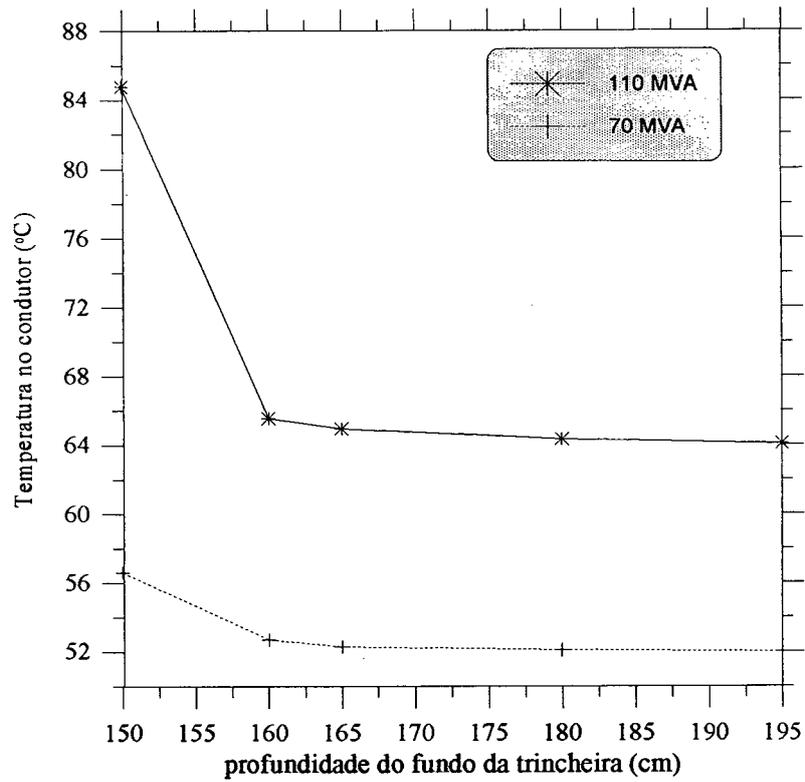


Figura 7-6. Influência da extensão da profundidade da camada de backfill sobre a temperatura de regime permanente do condutor.

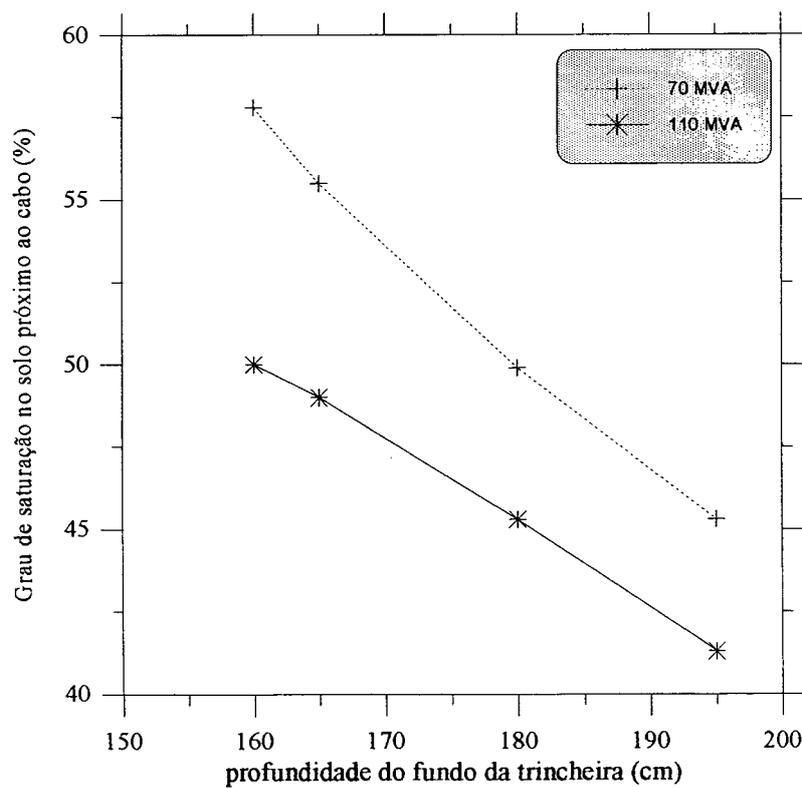


Figura 7-7. Influência da extensão da profundidade da camada de backfill sobre a umidade do solo próximo aos cabos.

7.2.3 Influência dos parâmetros físicos

Os parâmetros físicos principais que caracterizam a região onde a linha será enterrada são:

- a temperatura do ar ambiente acima da calçada;
- a temperatura natural do solo da região;
- a velocidade do vento acima da calçada.

É desejável conhecer também a influência destes parâmetros, pois na maioria dos casos não há dados disponíveis a seu respeito e eles devem ser estimados.

De acordo com a figura 7-8, aproximadamente a cada 10°C de modificação na temperatura do ar ambiente, a temperatura do condutor do cabo central sofre uma modificação de 5°C. Por esta razão, escolhe-se como temperatura padrão do ar nos cálculos a seguir uma temperatura própria de verão: 30°C.

A temperatura natural do solo da região tem uma influência semelhante à da temperatura ambiente: a figura 7-9 mostra que a cada 10°C de modificação nesta temperatura, há uma mudança de aproximadamente 4°C na temperatura do condutor. Assume-se que a temperatura do solo, mesmo em condições críticas, não ultrapasse 25°C.

Tanto a temperatura do ar ambiente como a temperatura natural do solo da região desempenham um papel de condição de contorno para o modelo físico. Por isto, sua influência sobre o problema se dá de maneira semelhante.

A temperatura que o solo junto à calçada assume depende da temperatura do ar ambiente e também da eficiência na troca de calor entre a calçada e o ar ambiente. Esta eficiência está ligada ao vento acima da calçada. A figura 7-10 mostra que há uma grande diferença entre uma situação sem vento e uma situação com vento, mas que a partir de ventos em torno de 4 km/h já não há nenhuma modificação perceptível. A faixa de valores razoáveis para este parâmetro fica entre 0 e 5 km/h, pois a velocidade do vento em condições normais vale menos do que 5 km/h. Além disto, para a temperatura no condutor do cabo, nas condições de instalação indicadas na figura 7-1, tanto faz um vento de 5 km/h acima da calçada como uma ventania de 20 km/h. A prescrição de um vento muito forte (maior do que 5 km/h) sobre a calçada é equivalente a assumir uma condição de contorno de "temperatura prescrita" (e no valor da temperatura ambiente) nesta fronteira do domínio de solução.

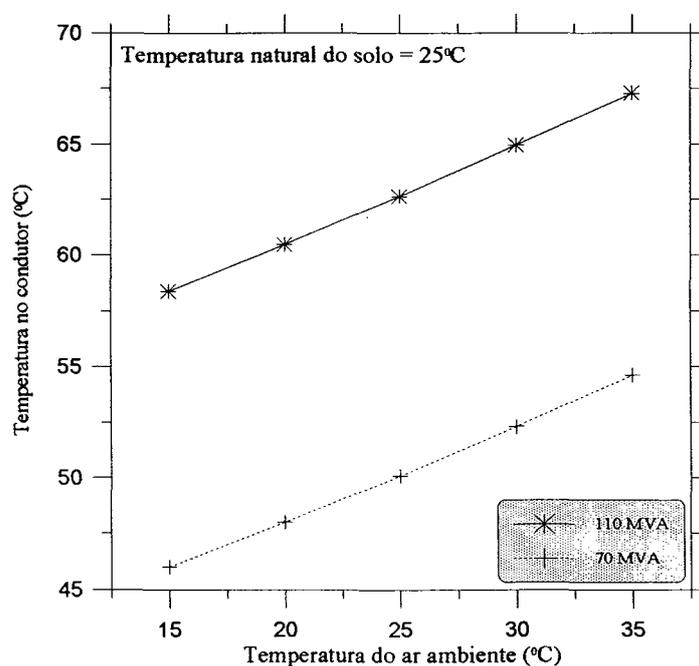


Figura 7-8. Influência da temperatura do ar ambiente.

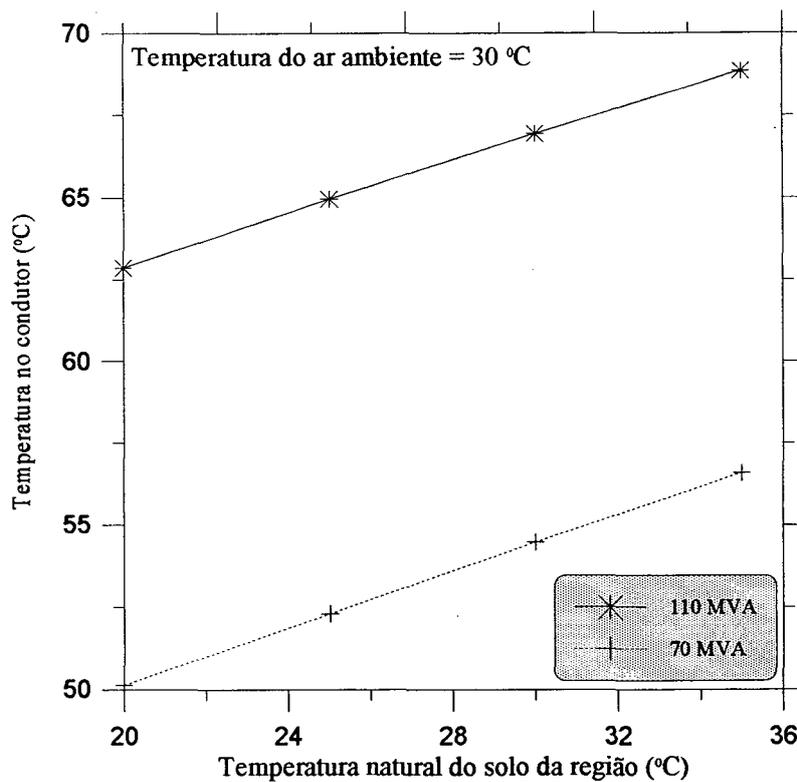


Figura 7-9. Influência da temperatura natural do solo da região.

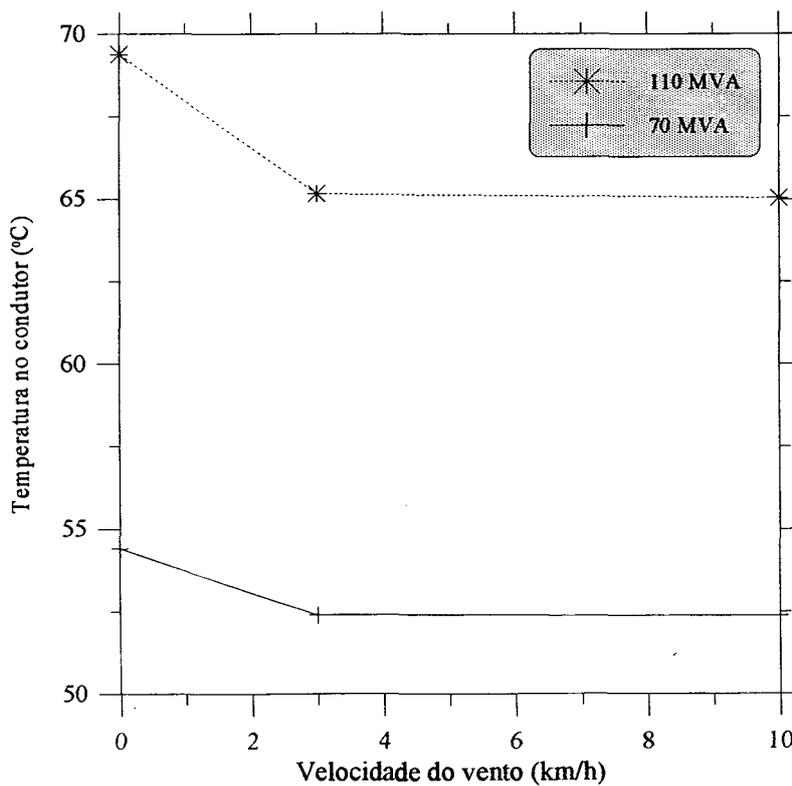


Figura 7-10. Influência da velocidade do vento.

Em função dos resultados obtidos com a análise de regime permanente, conclui-se que os valores adequados para os parâmetros analisados são os seguintes:

- largura da trincheira de backfill = 70 cm;
- altura da trincheira de backfill = 30 cm;
- profundidade do fundo da trincheira de backfill = 1,65 m;
- temperatura do ar ambiente acima da calçada = 30°C;
- temperatura natural do solo da região (condição inicial e de contorno) = 25°C;
- velocidade do vento acima da calçada = 20 km/h (temperatura prescrita na calçada).

7.3 Análise transiente

A análise transiente compreende duas partes distintas. Na primeira, a evolução da temperatura do condutor do cabo central da linha é acompanhada instante após instante, desde o início da transmissão de potência. A curva resultante é comparada com a curva que seria obtida se fosse aplicado o modelo de duas fases, segundo o qual o solo em cada ponto do domínio é classificado como seco (se a temperatura no ponto for maior do que 50°C) ou úmido, com uma umidade igual à umidade natural da região (se a temperatura no ponto for menor do que 50°C). O modelo de duas fases é atualmente utilizado nas normas de projetos de cabos da IEC para levar em consideração a possibilidade de secagem parcial do solo em torno do cabo (ver cap. 3).

Não faz sentido falar em "umidade natural da camada de backfill", pois a umidade natural do backfill vai ser aquela que resultar após a sua "acomodação" em relação à condição natural do solo da região, que o estará envolvendo. Por esta razão, e também porque os métodos atualmente empregados pelas normas não possibilitam a inclusão de trincheira de backfill quando já foi incluída a possibilidade de secagem parcial do solo, esta primeira análise é feita somente para solo de aluvião, em duas condições de umidade natural, sem a inclusão de backfill.

A comparação dos transientes de domínio homogêneo (composto apenas de aluvião) com domínio heterogêneo (composto de aluvião e de backfill) é feita logo em seguida. Nesta segunda parte são mostradas "fotografias" das situações da temperatura em 3 instantes distintos de tempo real de simulação: 1 semana, 2 meses e 1 ano após o início da geração de calor. Além disto são mostrados os campos de umidade e resistividade em regime permanente, para a mesma simulação.

Todos os resultados foram obtidos para uma potência transmitida de 130 MVA. Este valor foi escolhido porque leva a uma secagem parcial do solo de aluvião arenoso com grau de saturação inicial de 35%. Mas o problema da secagem desaparece para este nível de potência se o solo de aluvião tiver um grau de saturação inicial de 40% ou se for acrescentado backfill, que são os outros dois casos analisados neste item.

Todos os resultados foram obtidos com uma malha de 450 volumes (18 x 25), em um domínio de 5,4 m (largura total) por 4,2 m (altura total).

7.3.1 Transiente do cabo

Neste item é mostrado um acompanhamento detalhado da evolução da temperatura no condutor do cabo central da linha durante 2 anos. Não é acrescentado backfill e todo o domínio é composto de solo de aluvião arenoso. Na análise são comparadas 4 situações distintas do solo de aluvião em torno dos cabos:

1. Solo seco: assume-se que o solo está completamente seco. Este caso serve como um limite superior para as temperaturas que o cabo pode atingir;

2. Duas zonas:
solo seco para temperatura maior do que 50°C e úmido (com umidade igual à inicial) para temperatura menor do que 50°C. Durante a simulação, a cada avanço no tempo todos os pontos do domínio são visitados e é determinado o seu estado;
3. Phillip e de Vries:
são resolvidas as equações governantes para a transferência de calor e umidade, de acordo com o modelo de Phillip e de Vries descrito no capítulo 4;
4. Umidade constante:
considera-se que o solo permaneça com o seu conteúdo de umidade original inalterado durante toda a simulação, ou seja, para qualquer quantidade de calor gerado, a umidade do solo é sempre igual à umidade natural do solo da região.

As figuras 7-11 e 7-12 mostram os transientes do condutor nos 4 casos descritos, para duas condições de umidade natural do solo de aluvião arenoso, correspondentes aos graus de saturação de 35% e 40%, respectivamente. Na extremidade final de cada curva está indicada a temperatura de regime permanente do condutor para aquele caso. Devido à alta potência dissipada, a temperatura do solo ultrapassa o patamar de 90°C. Quando isto acontece, o modelo de Phillip e De Vries não pode mais ser usado do modo como foi implementado no presente trabalho. Mesmo sendo usados apenas para efeito de comparação entre os modelos, os resultados que incluem temperaturas acima de 90°C no solo devem ser tomados com cuidado. Os trechos em que a temperatura da superfície do cabo (o solo encostado no cabo central é o que está mais quente de todo o domínio) está acima de 90°C estão representados por curvas tracejadas.

Para o caso de solo mais seco ($S_i = 35\%$) mostrado na figura 7-11, o modelo de duas zonas superestima em apenas 9% a temperatura de regime permanente prevista pelo modelo de Phillip e de Vries (mais exato). O *transiente* segundo o modelo de duas zonas, porém, fica bastante distante da realidade. Por este modelo, o condutor do cabo já atinge a temperatura de regime permanente (134°C) em aproximadamente 6 meses. No mesmo momento, o modelo de Phillip e de Vries indica que o condutor ainda está a uma temperatura de aproximadamente 85°C. Segundo a figura 7-13, o modelo de Phillip e de Vries indica que o solo próximo aos cabos segue em direção a uma secagem total, mas que 6 meses após o início da simulação ele ainda apresenta alguma umidade, o que explica a maior demora em atingir altas temperaturas do que o modelo de duas zonas. Ainda, em relação ao caso de umidade inicial mais baixa ($S_i = 35\%$), observa-se que o transiente descrito pelo modelo de duas zonas segue a curva de umidade constante até que o condutor atinge aproximadamente 62°C, e logo em seguida passa a descrever uma curva paralela ao caso de solo seco. Esta temperatura do condutor deve corresponder a uma temperatura do solo encostado no cabo de 50°C.

Para o caso de umidade inicial mais alta ($S_i = 40\%$), a figura 7-12 mostra que simular o transiente de acordo com o modelo de duas zonas pode levar a um grande erro, correspondendo a uma superavaliação de 40% em regime permanente sobre o cálculo mais exato. A razão disto é que, apesar das temperaturas no solo ultrapassarem 50°C, o solo próximo aos cabos não seca. Pela figura 7-13, se o solo de aluvião iniciar com um grau de saturação de 40%, sua umidade baixará lentamente, e apenas até um grau de saturação de 34,1%. Neste caso, a hipótese de que ocorreria secagem da porção de solo que ultrapassasse 50°C não é confirmada pelo modelo de Phillip e de Vries. Há mecanismos hidrológicos que compensam o potencial de secagem associado à geração de calor, se o solo da região tiver uma umidade natural de 40% ou mais. Neste caso, a figura 7-12 mostra que é muito mais adequado considerar que a umidade do solo é constante e igual à umidade natural da região do que considerar que há o aparecimento de uma região seca em torno do cabo se a temperatura do solo ultrapassar a temperatura crítica de 50°C.

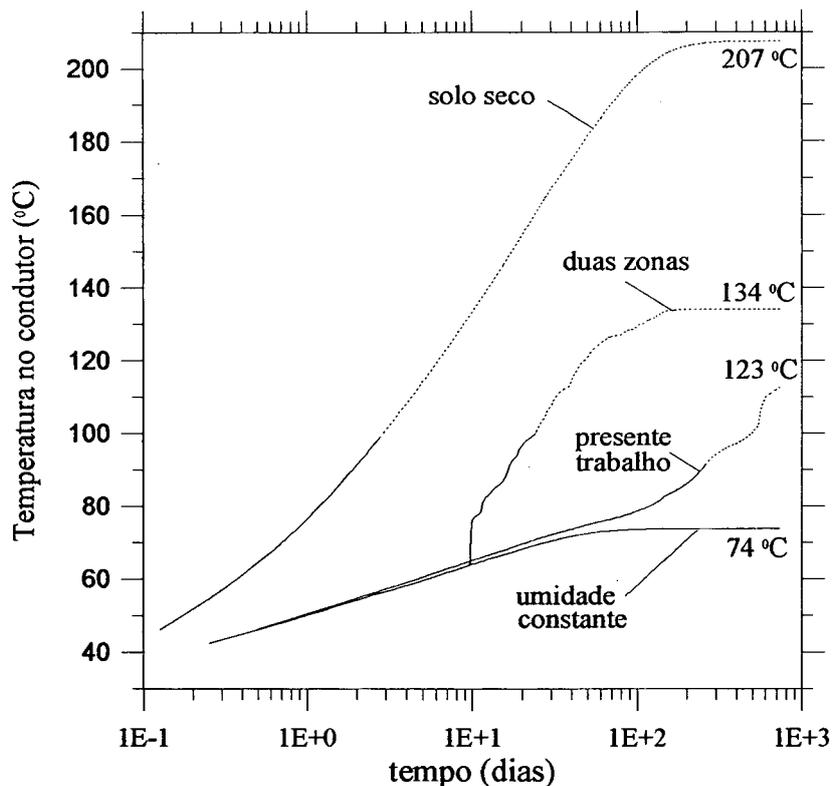


Figura 7-11. Transiente do condutor do cabo central para solo de aluvião arenoso com $S_i = 0,35$, de acordo com 4 modelos distintos.

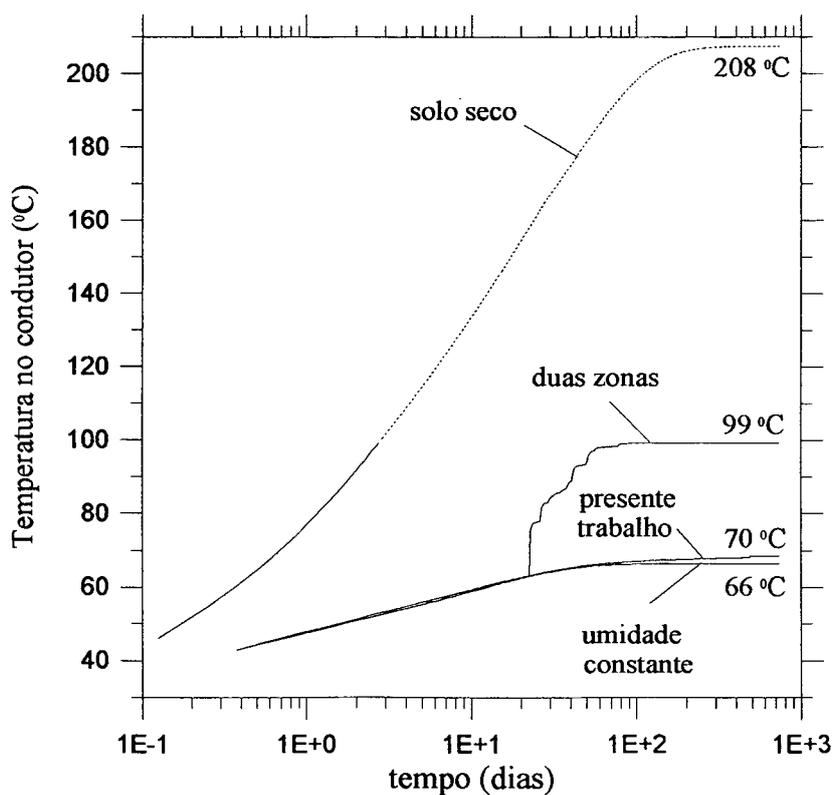


Figura 7-12. Transiente do condutor do cabo central, para solo de aluvião arenoso com $S_i = 0,40$, de acordo com 4 modelos distintos.

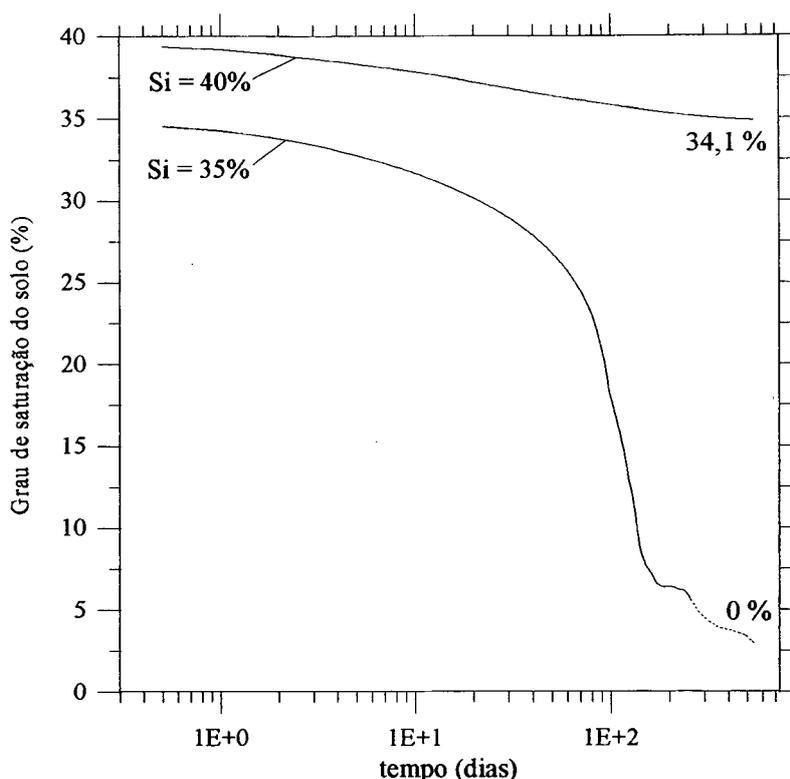


Figura 7-13. Transiente da umidade do solo próximo ao cabo, para solo de aluvião arenoso, de acordo com o modelo de Phillip e de Vries.

7.3.2 Transiente do solo

A caracterização do solo em torno do cabo será feita na forma de isocurvas para a temperatura, para a umidade e para a resistividade térmica.

Curvas de temperatura constante sem adição de backfill

As figuras 7-14, 7-15 e 7-16 mostram o desenvolvimento do campo de temperaturas em torno dos cabos, para uma potência de 130 MVA, em carga contínua, se o domínio for composto somente de solo de aluvião. Está representado todo o domínio de solução, desde os cabos até as regiões não-perturbadas pelos cabos.

Este tipo de figura permite avaliar de uma maneira global o impacto do calor gerado nos cabos sobre o solo onde eles são enterrados. A figura 7-16 mostra que as isotermas acompanham o contorno dos cabos somente até alguns centímetros de distância da sua superfície e que logo após já assumem um formato de elipse. Ou seja, a partir de alguns centímetros de distância, é como se os 3 cabos representassem apenas uma fonte de calor elipsoidal. Pode-se notar também que a região de maior influência dos cabos já está formada dois meses após o início da geração de calor. A diferença para a situação do solo um ano após o início da geração, mostrada na figura 7-16, é apenas o aumento de temperatura em uma região bem próxima aos cabos.

A visualização dos campos de temperaturas possibilita também, com o auxílio dos campos de umidades apresentados a seguir, determinar com muito mais precisão um modelo de

duas zonas como aquele descrito no item 7.3.1. Por exemplo, de acordo com a figura 7-16, as isothermas com valores maiores do que 50°C estão localizadas entre 1,1m e 1,9m de profundidade e desde 0,5 m antes até 0,5 m depois da linha de simetria do domínio. O campo de umidades nesta região está representado na figura 7-21 e mostra que a região seca é um pouco menor do que isto, sugerindo que a isoterma crítica tenha um outro valor (maior).

Curvas de temperatura constante com adição de backfill

Após a adição de backfill, as figuras 7-17, 7-18 e 7-19 mostram que os processos de transferência de calor são mais acelerados, e o regime permanente é atingido mais rapidamente. O campo de temperaturas para dois meses de simulação já está praticamente nos mesmos níveis do campo correspondente a regime permanente mostrado na figura 7-19. Nota-se também que o campo de influência dos cabos em regime permanente é menor após a adição de backfill.

Curvas de umidade constante sem adição de backfill

Essencialmente, o resultado que importa da simulação numérica é o campo de temperaturas, já que o que interessa saber é se o condutor do cabo vai atingir sua temperatura limite ou não. Porém, uma vez que todos os coeficientes das equações governantes dependem fortemente da umidade, um conhecimento profundo do campo de umidades pode fornecer informações importantes para o projeto. O campo de umidades demora muito mais a se modificar do que o campo de temperaturas, de modo que uma simulação de um ano seria curta para a análise da umidade. Por esta razão, está mostrado na figura 7-20 o campo de umidades em regime permanente, na região próxima aos cabos. Nota-se a forma elipsoidal das isocurvas. Verticalmente, estas elipses não são simétricas em relação à linha que passa pelos cabos, mas são deslocadas para baixo, principalmente pelo efeito de gravidade sobre a umidade. As curvas de isoumidades apresentam uma forma muito semelhante à das isothermas, exceto na região bem próxima à calçada. Este efeito está associado ao fato de que a calçada não permite a passagem de umidade mas permite a passagem de calor.

Conforme a análise de regime permanente realizada anteriormente, a transmissão de uma potência de 130 MVA leva a uma secagem parcial do solo em torno dos cabos se não houver adição de backfill. A figura 7-20 mostra em detalhe a umidade nesta região seca. Observa-se que a região com conteúdo de umidade significativamente mais baixo do que o inicial corresponde à isoterma de 60°C, que pode ser identificada na figura 7-16. Este aumento no valor da isoterma crítica padrão de 50°C pode estar associado ao fato de que a temperatura ambiente usada no presente trabalho vale 30°C, o que é um valor normal para o verão brasileiro mas excessivamente alto para os padrões internacionais, que adotam comumente 20°C como temperatura média do ar ambiente. Mesmo assim, este resultado é insuficiente para permitir alguma conclusão sobre a relação entre o valor da isoterma crítica e a temperatura ambiente. Provavelmente, a temperatura natural do solo em 25°C também contribuiu para a determinação do valor da isoterma que coincidiu com os limites da zona de solo seco.

Curvas de umidade constante com adição de backfill

Na figura 7-21 está mostrado o campo de umidades próximo aos cabos, em regime permanente, quando nesta região há uma camada de backfill bimodal. Neste caso, a forma das curvas de

isoumidades é muito semelhante à das isotermas correspondentes e mesmo próximo à calçada a semelhança se mantém. Observa-se nesta figura que o local onde se encontra a camada de backfill está nitidamente demarcado, o que não acontece com as isotermas mostradas na figura 7-19. No caso das temperaturas, as isocurvas cruzam o domínio inteiro de maneira suave e contínua e não é possível distinguir onde fica a porção que tem backfill. A forte distinção notada nos campos de umidades está associada com a grande diferença entre as propriedades hidrológicas dos dois solos. O aluvião é um solo natural, enquanto que o backfill bimodal é um solo artificial, bom condutor de calor, desenvolvido especialmente para ser usado como aterro. O backfill mantém um grau de saturação em torno de 60% numa grande parte do seu domínio, apesar da geração de calor que lhe está sendo imposta e dos baixos níveis de umidade do solo de aluvião que o cerca (o aluvião parte de um grau de saturação de 35% apenas). Para uma potência transmitida de 130 MVA, o backfill também tem uma tendência a secar, mas a figura 7-21 mostra que uma diminuição acentuada de umidade (em relação aos 60% iniciais) só pode ser notada em uma pequena porção de solo bem próxima aos cabos.

As isoumidades mostradas na figura 7-21 apresentam ainda diversas peculiaridades na sua forma. As curvas que estão no interior do backfill ficam separadas das curvas que se encontram no aluvião por uma pequena região próxima à fronteira em que as linhas ficam paralelas. No interior do backfill a umidade fica praticamente estratificada e em consequência da gravidade os maiores níveis de umidade ficam no fundo. As isoumidades no domínio correspondente ao aluvião têm uma forma regular, elíptica, desde o momento em que termina a camada de backfill.

Curvas de resistividade constante

As figuras 7-22 e 7-23 foram elaboradas para mostrar o efeito final (em regime permanente) da geração de calor nos cabos sobre a propriedade mais importante dos solos, do ponto de vista de projeto: a resistividade térmica. A figura 7-22 mostra a situação do campo de isoresistividades quando o domínio é completamente constituído de aluvião arenoso. Como era de esperar, os valores mais altos encontram-se próximo aos cabos, pois a secagem desencadeada pelos cabos força a um aumento de resistividade térmica. A forma das isoresistividades é semelhante à das isoumidades, mas existem diferenças marcantes devido à resistividade ter sido calculada como o inverso da condutividade térmica aparente. A condutividade térmica aparente adiciona à condutividade térmica efetiva uma parcela que leva em conta a transferência de calor devido à migração de vapor (ver cap. 4). Tal parcela está associada a um coeficiente de Phillip e de Vries, o coeficiente de termomigração do vapor devido a gradientes de temperatura (D_{Tv}), e leva em conta, portanto, toda a sua dependência logarítmica com a umidade.

As isoresistividades assumem uma forma ainda mais complexa quando há uma região com backfill. A figura 7-23 mostra este caso, em que as isoresistividades devem acompanhar a dependência da condutividade térmica e de D_{Tv} com umidade e temperatura e as suas mudanças drásticas de acordo com o tipo de solo. Um aspecto relevante é que apesar da forma complexa das isocurvas, a resistividade térmica não varia muito no domínio do aluvião. Como era de se esperar, os menores valores de resistividade térmica são encontrados no interior da camada de backfill.

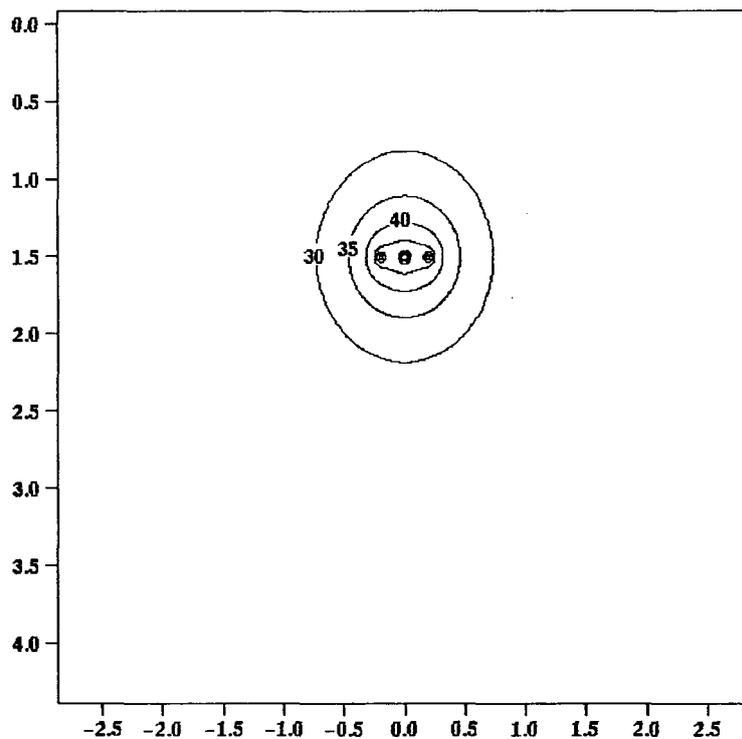


Figura 7.14. Campo de temperaturas para solo de aluvião, 1 semana após o início do transiente.

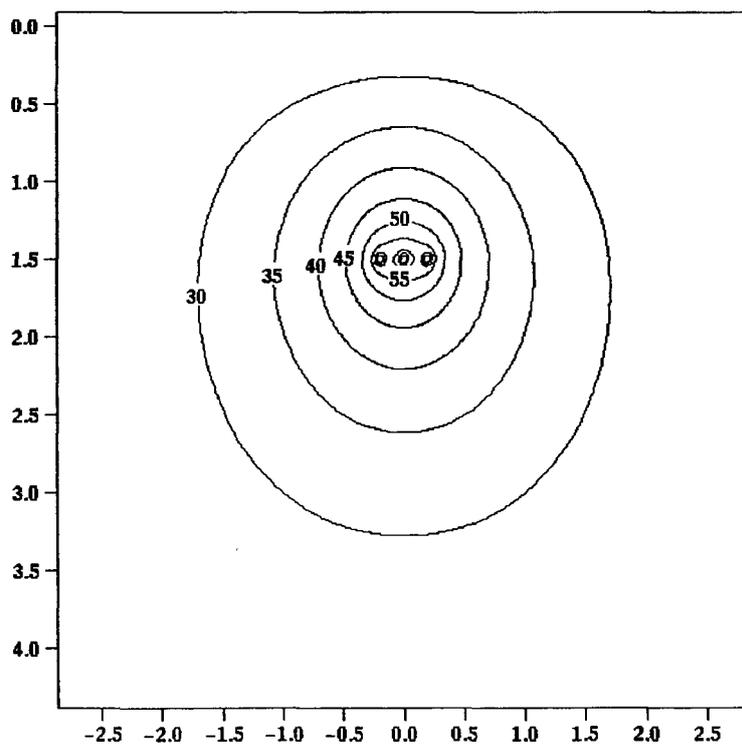


Figura 7.15. Campo de temperaturas para solo de aluvião, 2 meses após o início do transiente.

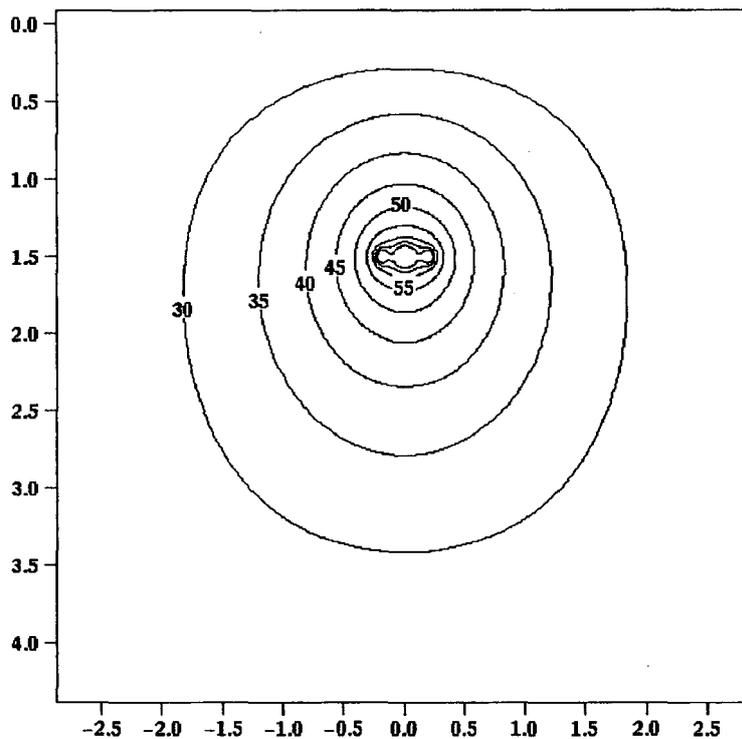


Figura 7.16. Campo de temperaturas para solo de aluvião, 1 ano após o início do transiente.

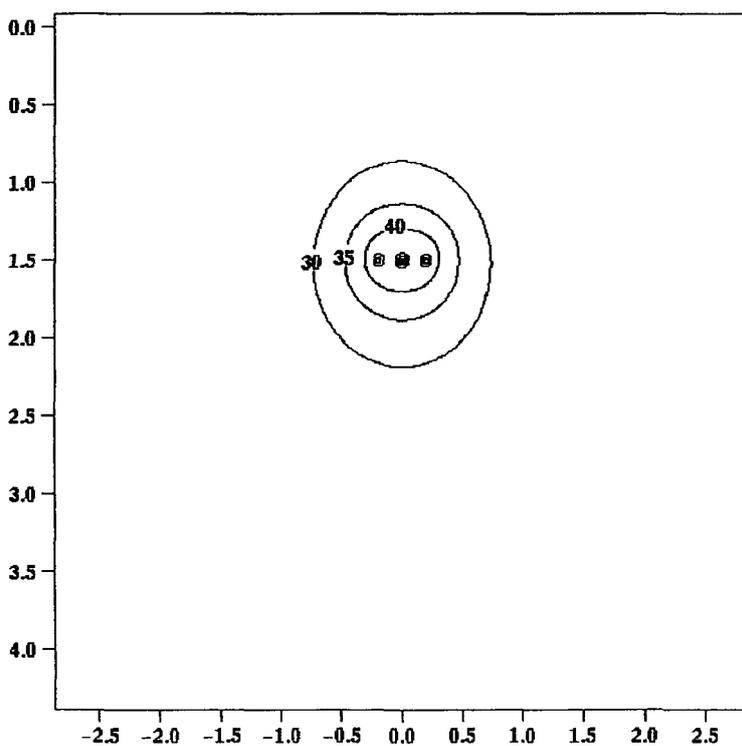


Figura 7.17. Campo de temperaturas para solo de aluvião com trincheira de backfill, 1 semana após o início do transiente.

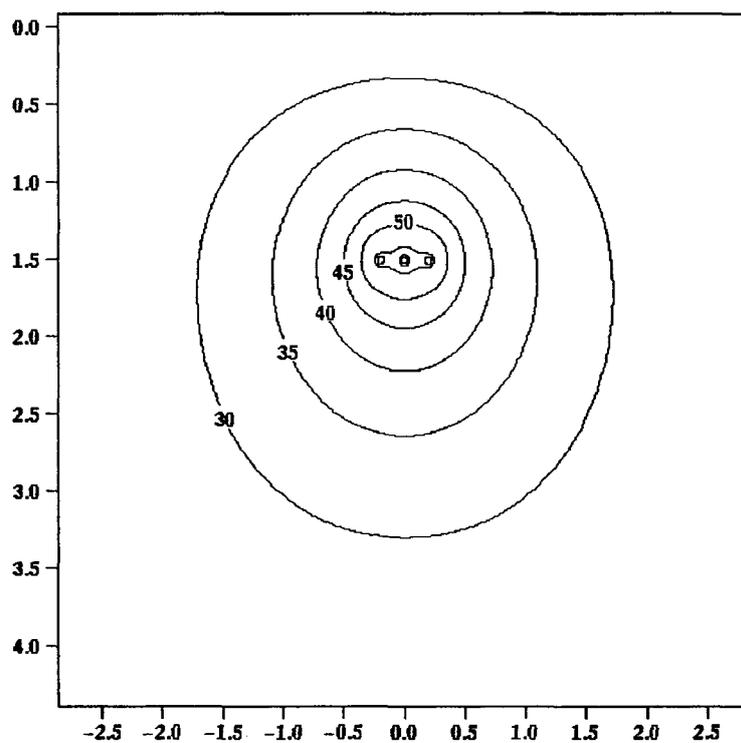


Figura 7.18. Campo de temperaturas para solo de aluvião com trincheira de backfill, 2 meses após o início do transiente.

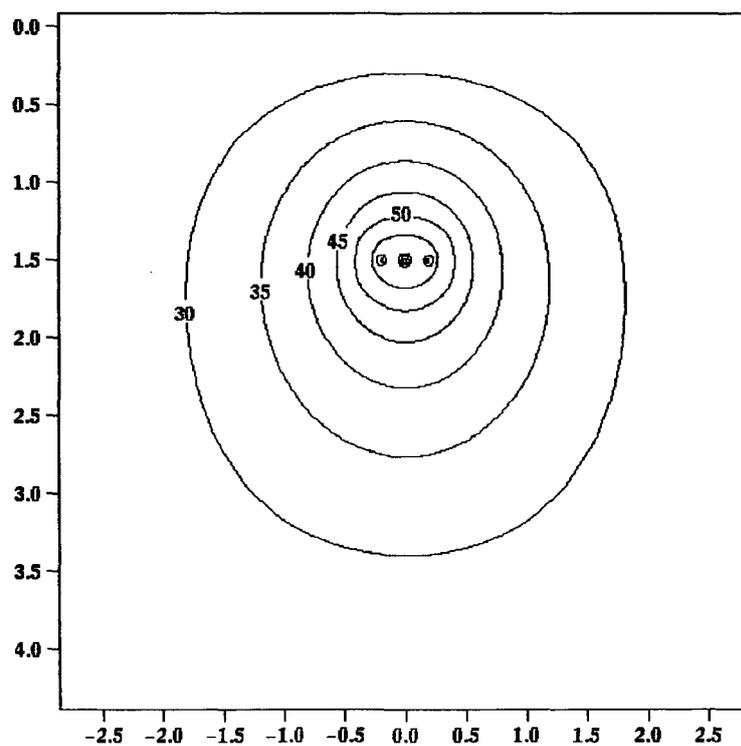


Figura 7.19. Campo de temperaturas para solo de aluvião com trincheira de backfill, 1 ano após o início do transiente.

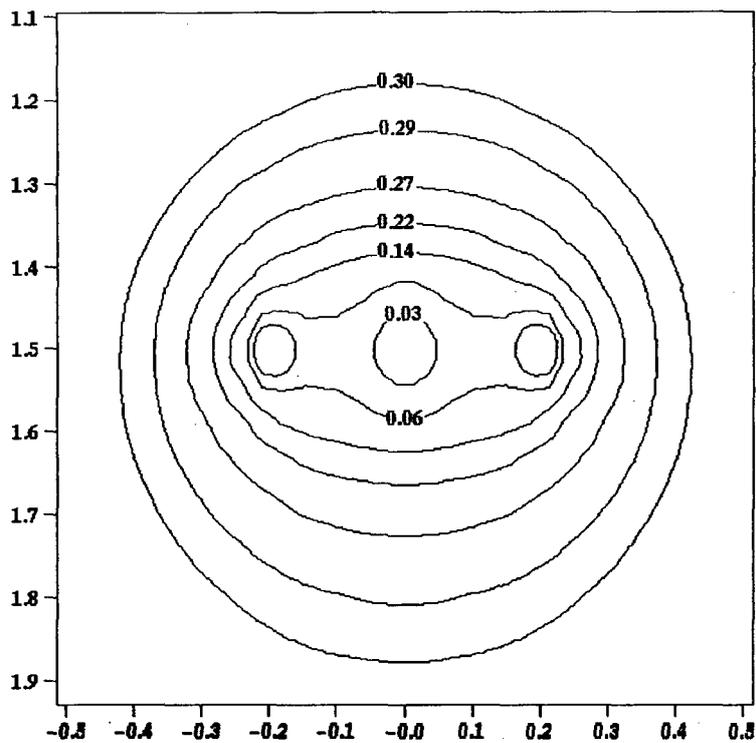


Figura 7-20. Campo de umidades para solo de aluvião, em regime permanente.

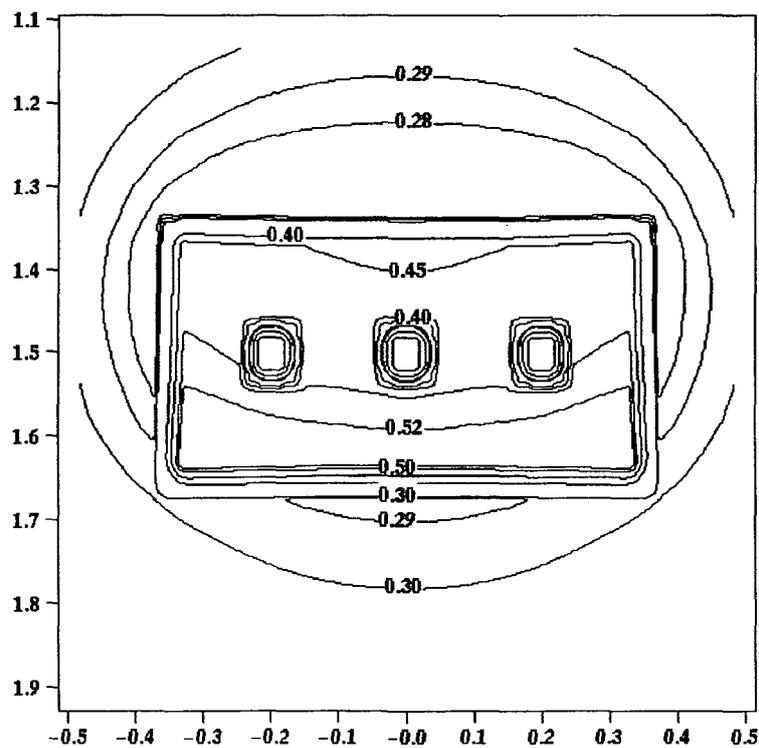


Figura 7-21. Campo de umidades para solo de aluvião com trincheira de backfill, em regime permanente.

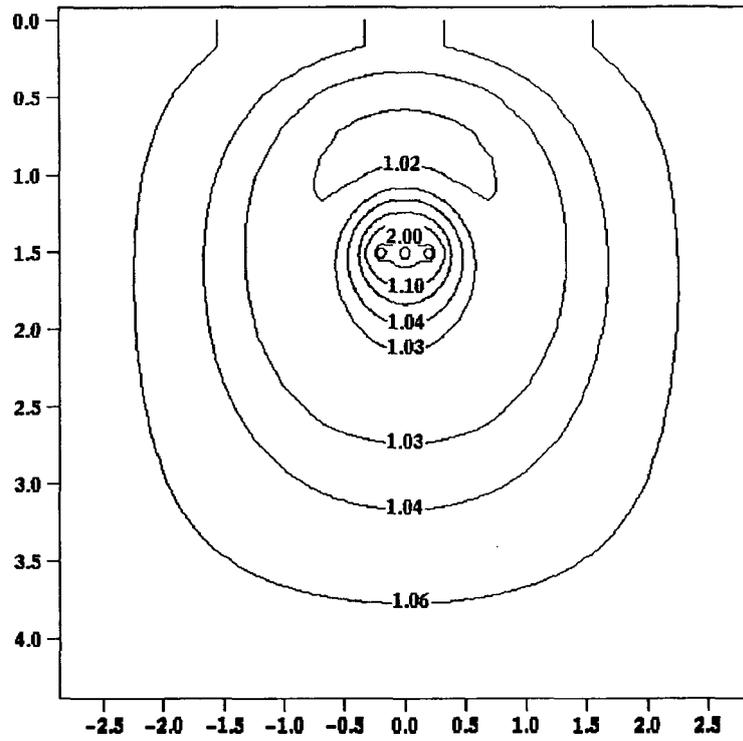


Figura 7-22. Campo de resistividades para solo de aluvião, em regime permanente.

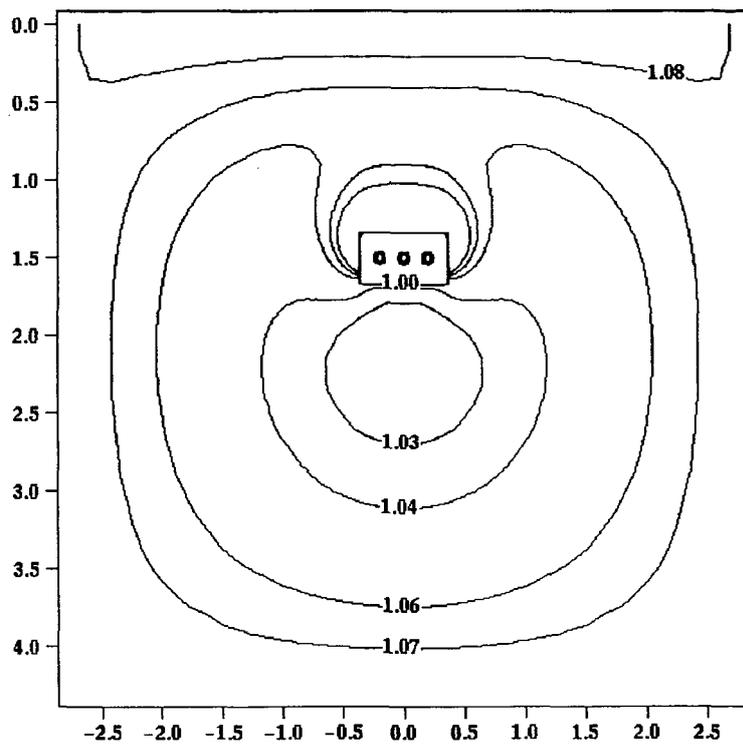


Figura 7-23. Campo de resistividades para solo de aluvião com trincheira de backfill, em regime permanente.

7.4 Carregamento variável

Toda a análise inicial é feita com carga constante (fator de carga unitário), para levar a situações de regime permanente bem definidas, para as quais cada instante no tempo pode ser claramente identificado no transiente com um nível de temperatura e umidade. Com isto se pode conhecer os parâmetros importantes do problema e a resposta do solo ao aquecimento provocado pela transmissão de uma carga constante pelo cabo. Passa-se agora a analisar o efeito da imposição de cargas que variem ao longo do tempo. Com isto, procura-se uma aproximação maior com a situação real, em que a corrente que passa pelo cabo varia tanto diariamente (ciclo diário), como com o passar dos anos (carregamento progressivo). A análise é feita de maneira comparativa, em relação a um carregamento uniforme, sem variação ao longo dos anos.

Para criar um caso que levasse a uma secagem parcial do solo em torno dos cabos com o passar do tempo, não foi incluída uma camada de backfill e com isto as temperaturas atingiram níveis que seriam inaceitáveis em um projeto real. Na realidade, com os níveis de potência envolvidos neste caso, já era esperado que fosse haver a necessidade de adição de backfill. O objetivo do estudo desenvolvido neste item, porém, é comparar o efeito da secagem entre os carregamentos uniforme e progressivo e testar o método numérico em uma situação crítica, de difícil convergência. Se fosse acrescentado backfill, a secagem provavelmente não ocorreria.

Para esta análise foram implementadas duas curvas de carga variáveis. A primeira é uma curva com fator de carga de 75%. A variação diária segue uma curva do tipo "flat top" (ver cap. 3), em que uma potência máxima de 150 MVA é aplicada apenas por 6 horas do ciclo diário completo, sendo as outras 18 horas preenchidas com um valor de carga menor, de tal forma que a média diária seja apenas 75% do máximo correspondente a 150 MVA. Também foi implementada uma outra curva do tipo "flat top" com fator de carga de 75%, mas com a demanda máxima de potência sendo aumentada gradativamente ao longo dos anos até o final da vida útil dos cabos (25 anos), de acordo com a seguinte regra:

- 1º ano: máximo de 50 MVA;
- 2º e 3º anos: máximo de 70 MVA;
- 4º e 5º anos: máximo de 90 MVA;
- 6º ao 15º ano: máximo de 110 MVA;
- 16º ao 25º ano: máximo de 150 MVA.

Este último carregamento, de maneira progressiva, é o que mais se aproxima da realidade. Quando uma concessionária instala uma linha de alta potência, ela tem que levar em consideração que a demanda de energia elétrica cresce a cada ano. A solicitação ao fabricante de cabos elétricos é feita sobre um valor nominal de demanda que só será atingido no final da vida útil do cabo (150 MVA, por exemplo). Normalmente, o crescimento gradativo de demanda não é analisado porque os métodos disponíveis atualmente nas normas não permitem este tipo de análise. Além disto, como as potências finais são as mesmas, as temperaturas certamente deverão estar seguindo a mesma curva no final dos 25 anos e por isto é assumido que as duas situações são completamente equivalentes. Todos os resultados foram obtidos com uma malha de 450 volumes (18 x 25), em um domínio de 5,4 m (largura total) por 4,2 m (altura total).

Os resultados destas simulações estão mostrados nas figuras 7-24 e 7-25. O alto calor gerado levou a temperatura do solo a ultrapassar o limite de validade do modelo; as regiões indicadas como "extrapolação" ou desenhadas em tracejado devem ser avaliadas com cuidado. A figura 7-24 mostra as temperaturas nos condutores centrais das linhas nos dois casos descritos. Pode-se notar as oscilações das temperaturas nos cabos acompanhando o ciclo diário de carga. Ao mesmo tempo em que oscila, a temperatura do cabo cresce, até atingir uma situação em que a repetição do ciclo de carga leva exatamente ao mesmo ciclo de temperaturas, numa situação que se pode chamar de regime periódico estável.

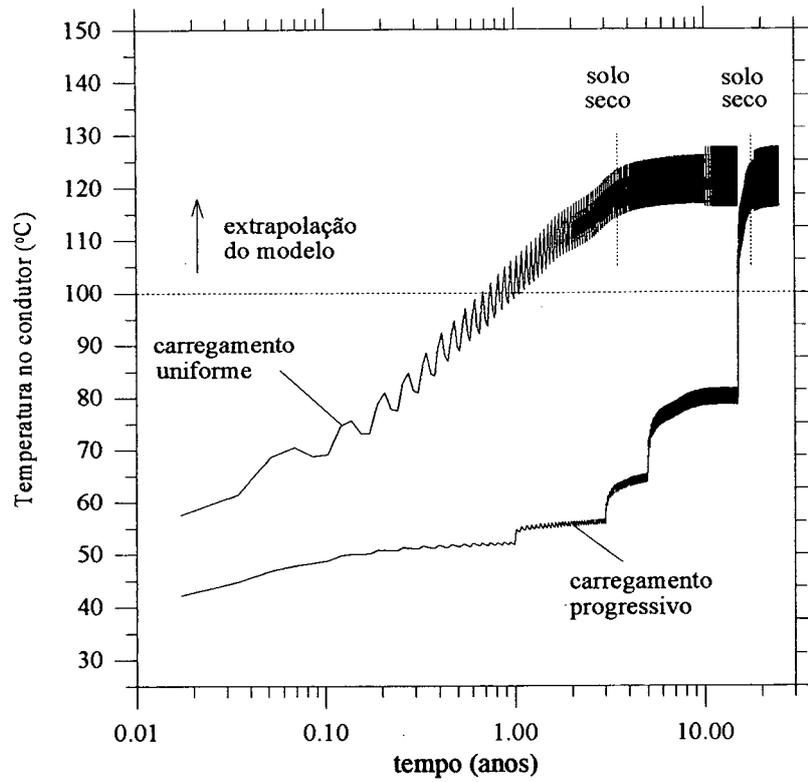


Figura 7-24. Transiente no condutor para carga cíclica uniforme e para carregamento progressivo.

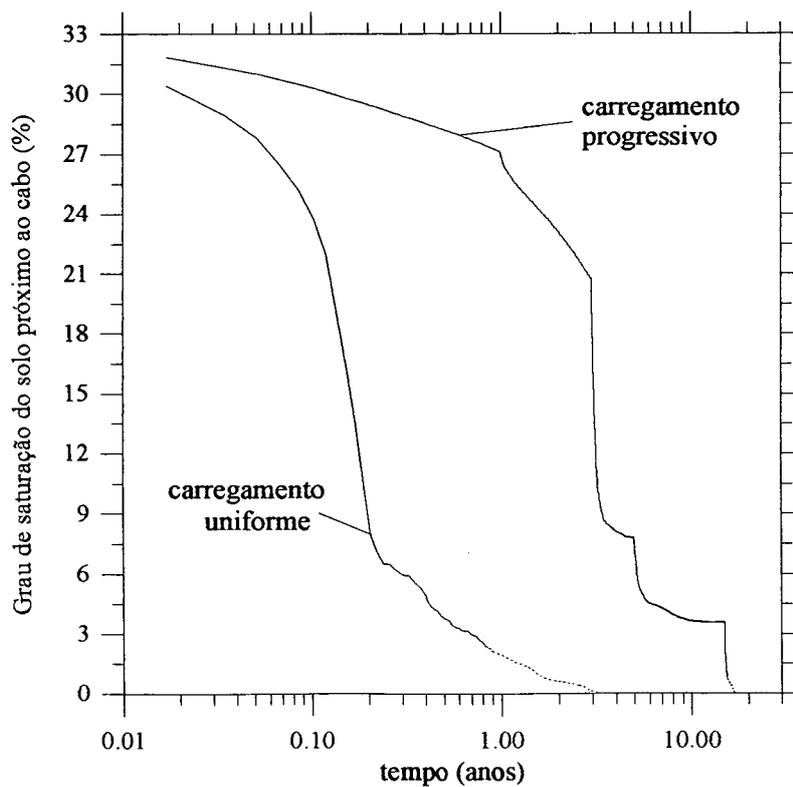


Figura 7-25. Transiente da umidade próximo ao cabo central, para carga cíclica uniforme e para carregamento progressivo.

Como o último nível de carga do carregamento progressivo (150 MVA) corresponde ao valor da carga do carregamento uniforme, as duas curvas tendem a se encontrar no final do período de simulação. Mesmo assim, a situação não é equivalente. A figura 7-25 mostra que em ambos os casos o solo próximo aos cabos tende a secar, mas mostra também que há uma diferença da ordem de 10 anos entre os instantes correspondentes à secagem em cada caso. Isto significa que levar em consideração o caráter progressivo da demanda de energia elétrica proporciona uma folga de 10 anos para que chova na região e a umidade natural saia do nível crítico de 35% de saturação que foi assumido.

Conclui-se que provavelmente haverá uma diferença fundamental nas temperaturas entre os carregamentos uniforme e progressivo no final da vida útil dos cabos. A simulação mostra que em ambos os casos o solo nas proximidades seca, mas mostra também que considerar que o carregamento já esteja com um valor máximo de 150 MVA desde o início do processo leva a uma apreciação muito pouco realista da eficiência real do sistema em dissipar o calor gerado.

7.5 Resultados adicionais

7.5.1 Temperatura radial

A figura 7-26 mostra, para 4 instantes de tempo, a temperatura em uma linha reta horizontal que passa pelo centro de um cabo de potência enterrado em solo de aluvião, sem adição de backfill, transmitindo uma potência de 110 MVA. No início da simulação, todo o aluvião está com um grau de saturação de 30% (muito seco). A temperatura ambiente é de 30°C, a velocidade do vento é de 20 km/h e a temperatura natural do solo é de 25°C.

Observa-se que, em regime permanente, o campo térmico em torno de um cabo dissipando calor é tal que a temperatura máxima é atingida no condutor deste cabo e vai diminuindo radialmente para fora em uma relação direta com o logaritmo da distância ao centro do cabo, formando duas retas de inclinações diferentes.

Quando uma potência q' (W/m) é dissipada através de um anel cilíndrico de um meio contínuo composto de um material A, limitado por 2 cilindros de raios r_e e r_i , em regime permanente aparecem em tais cilindros as temperaturas T_e e T_i , respectivamente. De posse destes dados, pode-se calcular a resistividade térmica do material deste anel por meio de

$$\rho_A = -\frac{(T_e - T_i) 2\pi}{\ln(r_e/r_i) q'} \quad (7-1)$$

Se este mesmo cálculo for executado com as retas da figura 7-26, considerando como "anéis cilíndricos" as regiões de solo correspondentes às duas retas mostradas, o resultado levará em consideração todos os materiais presentes no anel cilíndrico de solo considerado (rocha, ar e água), em suas devidas proporções. Isto significa que na camada mais próxima ao cabo, em que o solo está mais seco, a resistividade efetiva calculada de acordo com a equação (7-1) registrará uma alta quantidade de ar e o seu valor nesta camada deverá ser maior do que o correspondente à região mais afastada do cabo.

Rigorosamente, a resistividade no solo varia na direção radial em consequência da variação da umidade e é diferente para cada cilindro tomado a partir do centro do cabo. Os dois valores que se obtém aplicando-se a equação (7-1) às duas retas mostradas na figura 7-26 resultam na verdade em valores médios. Estes valores, no entanto, dão uma boa idéia sobre o estado geral da umidade em cada camada.

Os resultados que se obtêm a partir das retas da figura 7-26, para solo de aluvião, são os seguintes:

- resistividade térmica média do solo da região seca = 2,463 m⁰C/W;
- resistividade térmica média do solo da região úmida = 1,212 m⁰C/W;

Buscando-se nas curvas de resistividade (ou, equivalentemente, condutividade) térmica do solo de aluvião, figura 4-5, os valores de umidade que correspondem aos valores de resistividades encontrados, chega-se à seguinte conclusão:

- grau de saturação médio do solo na região seca = 5,3 % (para uma temperatura de 52⁰C);
- grau de saturação médio do solo na região úmida = 30 % (para uma temperatura de 34⁰C).

Estes valores são apenas aproximações, pois as temperaturas estipuladas são apenas médias em suas camadas. Por outro lado, a obtenção de valores médios de resistividades razoáveis de forma indireta serve como uma corroboração adicional do processo numérico descrito no presente trabalho.

A existência de duas regiões bem distintas com umidades de solo seco e úmido lembra o modelo de duas fases. A distribuição real da umidade pelo domínio, no entanto, varia continuamente, como mostra a figura 7-27. Como as propriedades do solo variam muito com a umidade, os processos de transferência de calor e umidade associados ao modelo de duas fases estão longe de corresponder à realidade. Além disto, a temperatura correspondente à zona de transição entre as zonas seca e úmida mostrada na figura 7-26 vale em torno de 42⁰C e não exatamente 50⁰C como sugere o modelo de duas fases.

Pode-se realizar uma análise muito semelhante mesmo com a inclusão de backfill. Neste caso, os resultados da distribuição radial de temperaturas estão mostrados na figura 7-28. As duas retas não mais se encontram no limite entre solo seco e solo úmido, mas sim na fronteira entre backfill e aluvião. Os resultados obtidos foram os seguintes:

- camada de backfill:
 - resistividade térmica média = 0,522 m⁰C/W, correspondendo a
 - grau de saturação do solo = 47,8 %;
- camada de aluvião (solo da região);
 - resistividade térmica média = 1,267 m⁰C/W, correspondendo a
 - grau de saturação do solo = 30 %;

Estes resultados também concordam com o perfil de umidades obtido com o método computacional, mostrado na figura 7-29. De acordo com estes resultados, o aluvião mantém sua umidade original quase inalterada (30%) devido à presença de backfill, o qual, devido às suas propriedades termo-hidrológicas se mantém em um nível mais alto de umidade (47,8 %), garantindo a manutenção de temperaturas baixas no cabo. Na figura 7-29, na interface entre aluvião e backfill aparece um degrau entre os níveis de umidade e temperatura, evidenciando a maior capacidade de retenção de umidade do backfill.

Os resultados de umidade obtidos nos dois casos não representam a média real da umidade, mas sim um valor equivalente em termos de resistividade térmica. Assim, no caso do aluvião, um grau de saturação de 5,3% significa que, *do ponto de vista da resistividade térmica*, tanto faz o solo ter na parte seca a distribuição mostrada na figura 7-27 ou um grau de saturação constante de 5,3%.

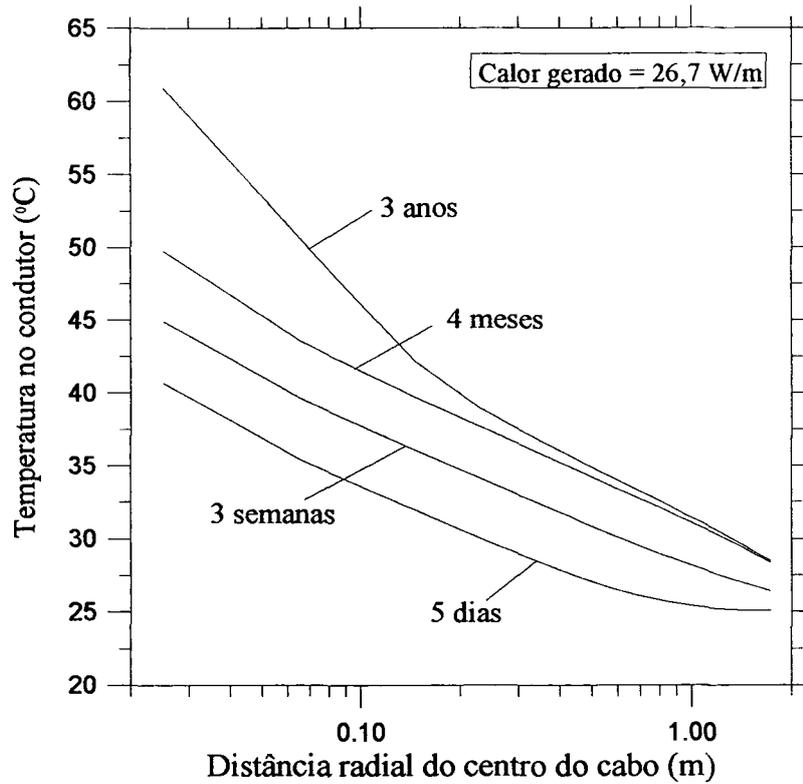


Figura 7-26. Perfil de temperaturas do solo em uma linha horizontal passando pelo centro do cabo, para solo de aluvião com $S_i = 0,30$.

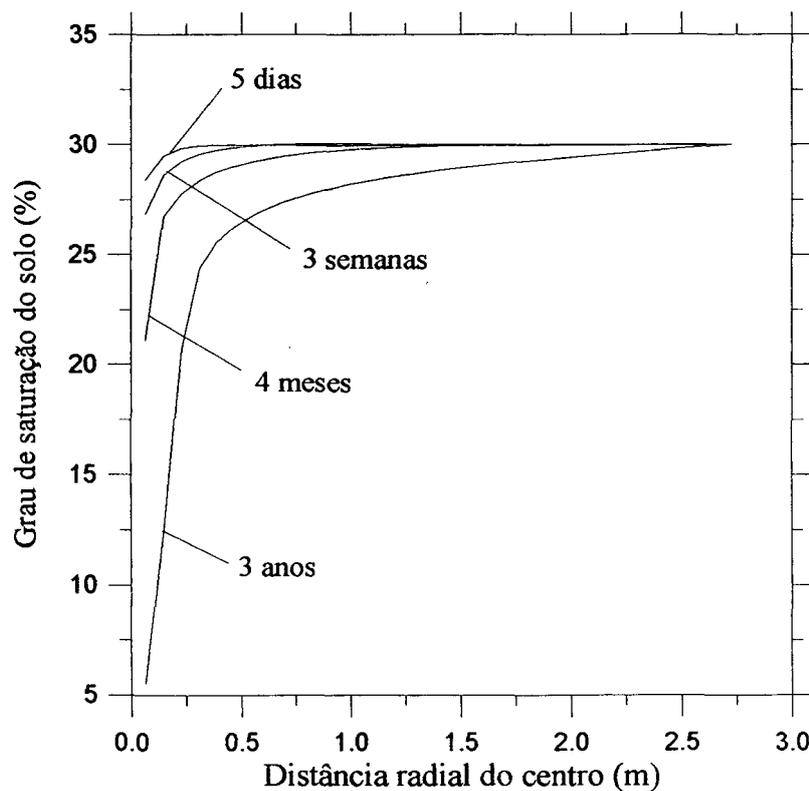


Figura 7-27. Perfil de umidades do solo em uma linha horizontal passando pelo centro do cabo, para solo de aluvião com $S_i = 0,30$.

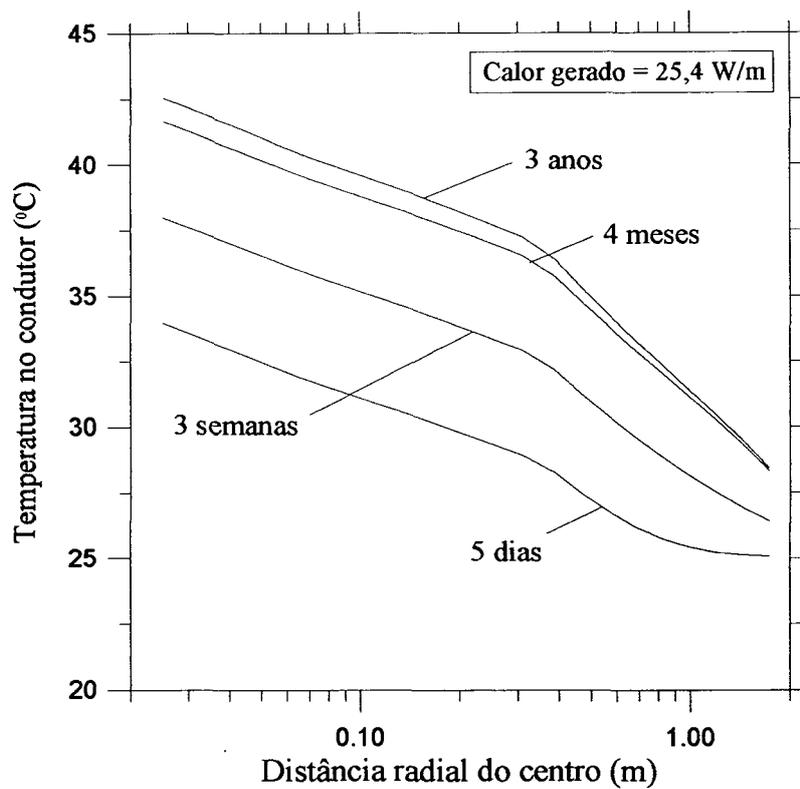


Figura 7-28. Perfil de temperaturas do solo em uma linha horizontal passando pelo centro do cabo, para solo de aluvião com $S_i = 0,30$ e com backfill.

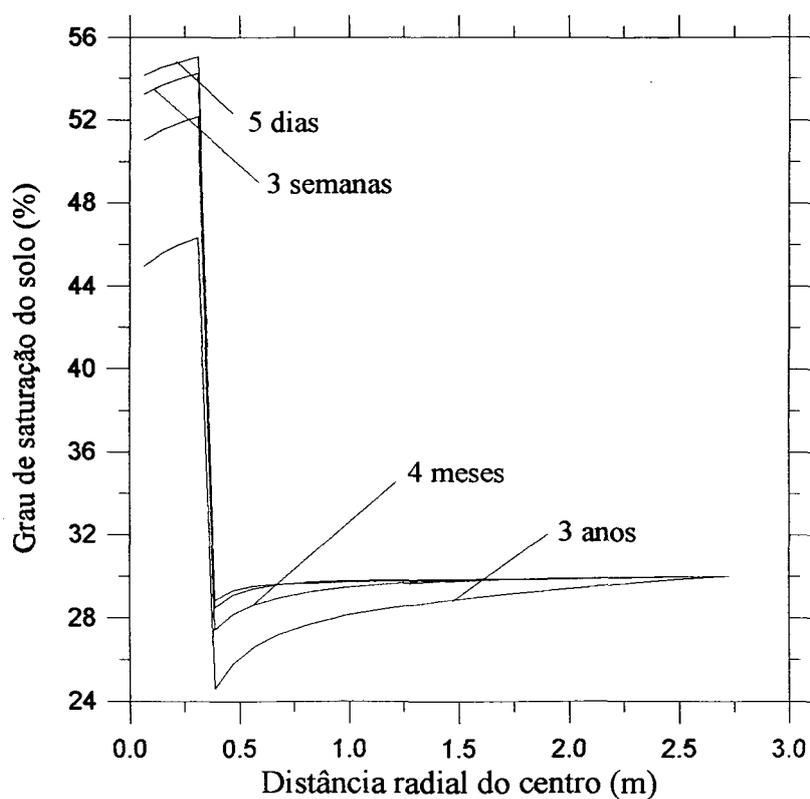


Figura 7-29. Perfil de umidades do solo em uma linha horizontal passando pelo centro do cabo, para solo de aluvião com $S_i = 0,30$ e com backfill.

7.5.2 Influência do efeito de histerese

No final do capítulo 4 é descrita a inclusão do efeito de histerese no modelo físico. A histerese funciona como uma barreira ao retorno de umidade na forma líquida por capilaridade, após a sua expulsão na forma de vapor devido ao aquecimento. Quando incluído na simulação, este efeito, leva à obtenção de níveis de umidade mais baixos próximo ao cabo e, como consequência, à determinação de temperaturas mais altas na simulação. Em todos os resultados até aqui obtidos, este efeito foi incluído na simulação. O modelo empregado no presente trabalho certamente fica mais completo com a inclusão da histerese, mas as figuras 7-30 e 7-31 foram elaboradas para permitir uma quantificação deste efeito e determinar até que ponto sua inclusão foi importante.

A figura 7-30 mostra uma comparação das temperaturas de condutor apresentadas na figura 7-2 para aluvião com grau de saturação de 35% com os resultados que seriam obtidos se a histerese não fosse levada em consideração. Observa-se que se a histerese não fosse levada em conta os valores obtidos seriam menores e que esta diferença aumenta à medida que a potência transmitida aumenta. O efeito de histerese leva a temperaturas maiores porque, como mostra a figura 4-11, quando ele não é incluído a migração de líquido devido a gradientes de umidade fica superestimada e, portanto, o reumedecimento do solo seco próximo aos cabos pela água líquida no solo distante também fica superestimado. O resultado é que, sem histerese, as umidades de equilíbrio do solo próximo aos cabos são maiores, em toda a faixa de potências transmitidas testada (30 a 150 MVA), como mostra a figura 7-31.

No caso mais crítico, para uma potência transmitida de 150 MVA, a inclusão leva a aumento de 10 % na temperatura do condutor. Além disto, com histerese o solo já atinge uma situação de secagem parcial quando é transmitida uma potência de 130 MVA, mas sem histerese a conclusão seria de que a secagem parcial só ocorreria para uma potência transmitida de 150 MVA.

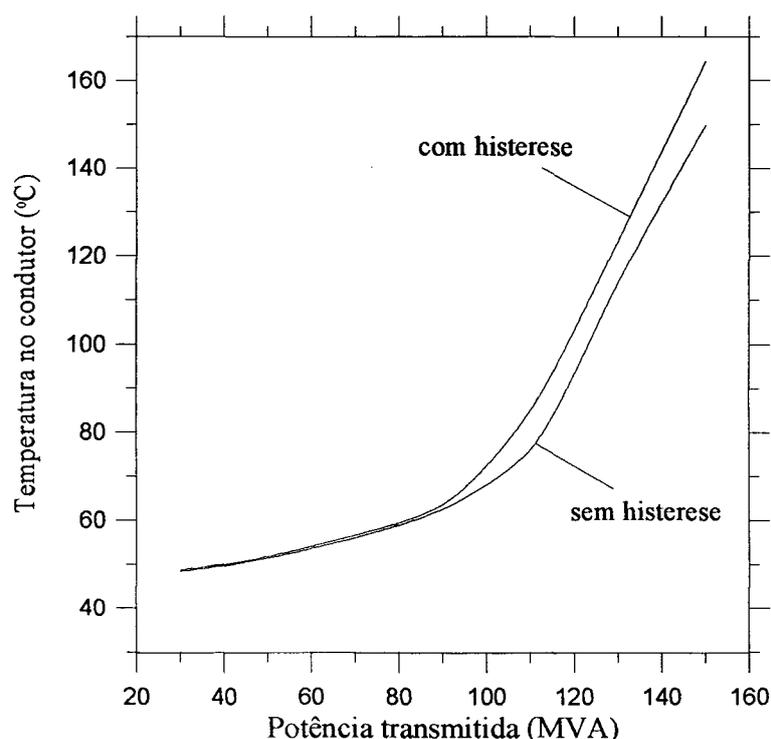


Figura 7-30. Efeito da histerese sobre a temperatura do condutor do cabo central em regime permanente.

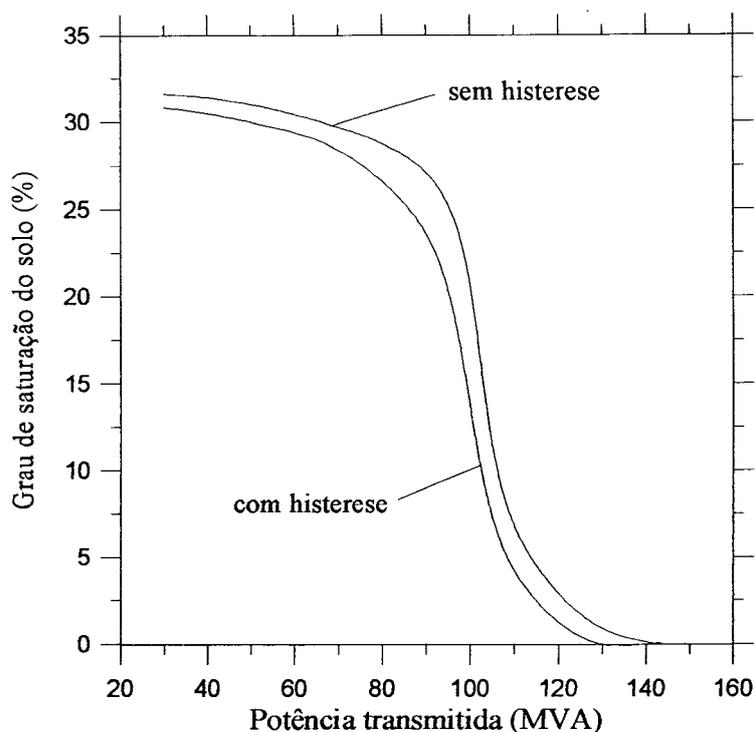


Figura 7-31. Efeito da histerese sobre a umidade próximo ao cabo central em regime permanente.

7.5.3 Comparação com resultados obtidos com o software Cymcap

Durante a validação, alguns resultados obtidos com a presente metodologia foram comparados com aqueles gerados pelo software comercial CYMCAP (1991) para uma situação de regime permanente e sem migração de umidade. Este mesmo software será agora empregado para simulações transientes. Inicialmente, uma carga constante será considerada e a seguir a carga será variada ciclicamente.

No caso de carga constante, assume-se um solo cujos valores de resistividade térmica para solo seco e com umidade natural sejam, respectivamente, de 3,3 mK/W e 0,6 mK/W. Para uma temperatura de condutor estipulada para o cabo central em 90°C, CYMCAP forneceu uma corrente de 464 A (equivalente a uma perda de 32,5 W/m). Quando simulada com a presente metodologia, a mesma situação leva, para uma corrente de 464 A, a temperaturas de condutor de 73°C e 126°C, para graus de saturação do solo de 40% e 35%, respectivamente. Fica evidenciada aqui a importância do conteúdo de umidade inicial do solo da região assim como a influência da migração de umidade.

Para uma carga cíclica (fator de carga de 75%) e resistividade térmica do solo de 1mK/W (o que corresponde ao backfill utilizado no presente trabalho em um grau de saturação de 20%), o CYMCAP fornece como ampacidade uma corrente de 575 A (equivalente a uma perda de 48 W/m) para uma temperatura de condutor fixada em 90°C. A presente metodologia, aplicada para grau de saturação inicial de 30% e corrente de 575 A com fator de carga 75%, fornece como resultado a temperatura de 100°C para a temperatura do cabo. Esta alta temperatura é resultado do desenvolvimento de uma zona seca em torno dos cabos, devido à alta geração de calor. Nesta situação, o software CYMCAP não seria adequado para a análise de ampacidade.

8 CONCLUSÃO

Foi aplicado o modelo de Phillip e de Vries ao problema de transferência de calor e migração de umidade em solos que circundam cabos de potência subterrâneos, com o objetivo de determinar a máxima potência que poderia ser transmitida pelos cabos sem danificar sua estrutura devido a superaquecimento. As soluções deste problema que podem ser encontradas na literatura são normalmente de pouca utilidade prática para o projeto de cabos, seja porque simplificam o problema no solo, desprezando a migração de umidade, ou porque simplificam o problema no cabo, fornecendo apenas a temperatura na sua superfície para valores constantes de geração de calor, ignorando o fato de que a própria geração de calor depende do nível de temperatura *no condutor* do cabo.

O modelo de Phillip e de Vries utilizado no presente trabalho é tão completo quanto possível para permitir a obtenção de soluções rápidas, incluindo a dependência de todos os coeficientes com temperatura e umidade, além de aspectos especiais da modelagem de solos, tais como efeito de histerese e influência da gravidade. As equações de Phillip e de Vries foram discretizadas pelo método de volumes finitos e o sistema de equações algébricas resultantes foi resolvido de maneira otimizada, de modo a permitir a obtenção de soluções em microcomputador. Esta última exigência decorre do interesse de tornar útil o programa computacional utilizado na elaboração da tese para os projetistas de cabos elétricos. Os resultados deste programa foram validados com resultados obtidos por outros autores e com o programa atualmente empregado pela indústria Pirelli S.A. no projeto de seus cabos.

O método numérico é aplicado a diversos casos reais, em que os cabos da linha são caracterizados de acordo com dados fornecidos por Pirelli S.A.. De acordo com estas análises, chegou-se a diversas conclusões importantes, tais como:

- a umidade natural do solo da região é o fator mais importante para a manutenção da temperatura no interior do cabo em níveis razoáveis. Diferenças de umidade natural do solo de aluvião tão pequenas como 5% no grau de saturação podem significar a diferença entre ocorrer ou não secagem parcial em torno do cabo;
- a adição de backfill tem grande influência sobre o nível de temperaturas no cabo, mas a quantidade de backfill acrescentada tem importância secundária. Basta colocar backfill suficiente para envolver completamente os cabos;
- a temperatura do ar ambiente acima da calçada influi bastante, mas a velocidade do vento acima da calçada tem importância secundária;
- o modelo de duas fases, que divide o solo próximo aos cabos em seco ou úmido, conforme sua temperatura seja maior ou menor do que uma temperatura crítica (normalmente, 50°C), consegue prever razoavelmente bem a temperatura de regime permanente do condutor do cabo central do circuito nos casos em que a umidade natural do solo da região é baixa.

Quando a umidade natural é alta, é melhor considerar que a umidade é constante e igual à inicial;

- de acordo com uma análise das isotermas e isoumidades, chegou-se à conclusão de que a isoterma crítica, no caso em que a temperatura ambiente era de 30°C, ficava próxima a 60°C, indicando que a isoterma crítica depende da temperatura ambiente, a qual é normalmente tomada como 20°C;
- uma avaliação rigorosa da demanda real que é imposta aos cabos e do momento em que ela chegará ao máximo (para o qual os cabos são normalmente projetados) pode significar alguma vantagem em termos de projeto. Com uma demanda progressiva chega-se, no final de uma vida útil de 25 anos, à mesma situação de solo do que com uma demanda contínua, já no máximo desde o início do funcionamento da linha. Porém, se há a possibilidade de ocorrer secagem parcial do solo, o momento em que esta secagem ocorre com carregamento progressivo pode vir a acontecer muito mais tarde do que o previsto com base em um cálculo feito com carga contínua. Conclui-se que análises com carregamento progressivo e com carga contínua não são equivalentes: certamente haverá uma diferença na situação do solo no final da vida útil dos cabos da linha devido às chuvas, que não são consideradas no presente trabalho.

A metodologia de projeto empregada no presente trabalho não é utilizada atualmente porque, normalmente, uma simulação com as equações de Phillip e de Vries podia chegar a horas de computação em computadores de grande porte. No entanto, com algumas simplificações e com uma otimização do processo numérico, foi possível obter soluções bastante rigorosas do ponto de vista científico e com qualquer padrão de demanda ao longo da vida útil dos cabos, considerando ainda as propriedades termo-hidrológicas específicas de cada solo e a sua dependência com temperatura e umidade.

Pode-se obter soluções rápidas com as normas atualmente empregadas pelos projetistas, mas sempre com um superdimensionamento dos cabos. Com um tratamento adequado do processo numérico, pode-se obter soluções muito mais precisas e detalhadas, em tempos razoáveis para o projeto. Em outras palavras, com uma ferramenta de análise mais poderosa do que as normas, que permita avaliar mais rigorosamente a situação real do problema, pode-se trabalhar com fatores de segurança menores.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anders, G.J., Chaaban, M., Bedard, N. e Ganton, R.W., "New Approach to Ampacity Evaluation of Cables in Ducts Using Finite Element Technique", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. PWRD-2, No. 4, pp. 969-975, October 1987.
- Anders, G.J. e Radhakrishna, H.S., "Power Thermal Analysis with Consideration of Heat and Moisture Transfer in the Soil", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 3, No. 4, pp. 1280-1288, October 1988.
- Árpád Kezdi, *Soil Physics*, Elsevier, 1974.
- Arrighi, R., Ridon, R., Benard, P. e Causse, L., "Contribution to the Study of the Thermal Environment of Buried Cables", CIGRE Paper 21-06, 1970.
- Barnes, C.C., *Power Cables: Their Design and Installation*, Chapman and Hall Ltd., London, 1966.
- Bartoli, J.R. e Almeida, G.R., "Cabos de Potência em Solo Parcialmente Seco. Experimentação sobre Modelos Estacionários", *IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, Florianópolis, SC, pp. 105-108, dezembro, 1987a.
- Bartoli, J.R. e Almeida, G.R., "Cabos de Potência em Solo Parcialmente Seco. Percolação de Umidade em Condição de Campo Térmico e Gravitacional Acoplados", *IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, Florianópolis, SC, pp. 109-112, dezembro, 1987b.
- Bories, S.A., "Fundamentals of Drying of Capillary-Porous Bodies", in *Convective Heat and Mass Transfer in Porous Media*, pp. 391-434, Kluwer Academic Publishers, Holanda, 1991.
- Brandon, T.L., Mitchell, J.K., Cameron, J.T., "Thermal Instability in Buried Cable Backfills", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 115, No. 1, pp. 38-55, January 1989.
- *Cable Ampacity Program*, versão 5.0, CYME International Company, desenvolvido por Ontario Hydro (Toronto), McMaster University (Hamilton), CYME International (Montreal), e financiado por Canadian Electrical Association, 1991.
- CIGRÉ SC 21, "The Calculation of the Effective External Thermal Resistance of Cables Laid in Materials having Different Thermal Resistivities", *Electra*, N. 98, pp. 19-42, January 1985.

- CIGRÉ SC 21, "Current Ratings of Cables Buried in Partially Dried Out Soil. Part 1: Simplified Method that Can be Used with Minimal Soil Information: 100% Load Factor", *Electra*, N. 104, pp. 11-22, January 1986.
- Corey, A.T., "Mechanics of Heterogeneous Fluids in Porous Media", *Water Resources Publications*, Fort Collins, Colorado, 1977.
- Couvillion, R.J., "*Heat and Mass Transfer in a Semi-infinite Moist Soil with a Drying Front Present*", Ph. D. Thesis, Georgia Institute of Technology, 1981.
- De Vries, D.A., "Simultaneous Transfer of Heat and Moisture in Porous Media", *Trans. Am. Geophysical Union*, Vol. 39, Nr. 5, pp. 909-916, 1958.
- Donazzi, F., Occhini, E. e Seppi, A., "Soil Thermal and Hydrological Characteristics in Designing Underground Cables", *Proc. IEE*, Vol. 126, No. 6, Pt. C, pp. 506-516, June 1979 (Discussão relevante em: *Proc. IEE*, Vol. 127, Pt. C, pp. 333-338, 1980).
- Endacott, J.D., Flack, H.W., Morgan, A.M., Holdup, H.W., Miranda, F.J., Skipper, D.J. e Thelwell, M.J., "Thermal Design Parameters Used for High Capacity E.H.V. Cable Circuits in Great Britain", CIGRÉ Paper 21-03, 1970.
- Ewen, J., "Thermal Instability in Gently Heated Unsaturated Sand", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 31, Nr. 8, pp. 1701-1710, 1988.
- Ewen, J., "Susceptibility to Drying of Unsaturated Soil Near Warm Impermeable Surface", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, pp. 359-366, 1990.
- Fagotti, F. e Colle, S., "Método Analítico para Análise dos Efeitos da Condução do Calor em Tubos de Calor", *Anais do III Encontro Nacional sobre Ciências Térmicas*, pp. 637-643, Itapema, SC, 1990.
- Ferreira, L.S.D., "*Transferência de Calor e Migração de Umidade em Solos que Envolvem Cabos de Potência Aterrados*", Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 1993.
- Flatabo, N., "Transient Heat Conduction Problem in Power Cables Solved by the Finite Element Method", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol.-92, pp. 161-168, 1973.
- Gela, G. e Dai, J.J., "Calculation of Thermal Fields of Underground Cables Using the Boundary Element Method", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 3, No. 4, pp. 1341-1347, October 1988.
- Groenveld, G.J., Snijders, A.L., Koopmans, G. e Vermeer, J., "Improved Method to Calculate the Critical Conditions for Drying Out Sandy Soils Around Power Cables", *Proc. IEE*, Vol.131, Pt.C, no.2, pp. 42-53, 1984.
- Hanna, M.A. e Chikhani, A.Y., "Thermal Analysis of Power Cables in Multi-Layered Soil - Part 1: Theoretical Model", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, No. 3, pp. 761-771, July 1993.

- Hartley, J.G., "An Analysis of the Thermal Stability of the Soil Environment of Underground Electrical Cables", Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, 1977.
- Hartley, J.G., "Coupled Heat and Moisture Transfer in Soils: A Review", in: *Advances in Drying*, edited by A. S. Mujumdar, Hemisphere Publishing Co., 1987.
- Hartley, J.G. e Black, W.Z., "Thermal Instability and the Thermal Probe", *Proceedings of the Workshop on Current Rating of Buried Cables in Relation to Thermal Properties of Soil*, edited by A.L. Snijders and J. Vermeer, KEMA Laboratories, Arnhem, Holanda, pp. 119-129, September 1984.
- Heinhold, L., *Power Cables and their Application*, Siemens Aktiengesellschaft, Berlin and München, 1979.
- Incropera, F.P., De Witt, D.P., *Introduction to Heat Transfer*, John Wiley & Sons, New York, 1990.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, "Propriedades Termofísicas de Materiais Utilizados no Soterramento de Cabos de Transmissão", *Relatório Técnico No. IPT 24947/87*, São Paulo, SP, fevereiro de 1987.
- International Electrotechnical Commission, "Publication 287, Calculation of the Continuous Current Rating of Cables (100% load factor)", *IEC Standard*, Genève, Suisse, 1982.
- International Electrotechnical Commission, "Publication 287, Amendment 2, Calculation of the Continuous Current Rating of Cables (100% load factor)", *IEC Standard*, Genève, Suisse, 1991.
- International Electrotechnical Commission, "Publication 853-2, Calculation of the Cyclic and Emergency Current Rating of Cables / Part 2: Cyclic Rating of Cables greater than 18/30 (36) kV and Emergency Ratings for Cables of all Voltages", *IEC Standard*, Genève, Suisse, 1989.
- International Electrotechnical Commission, "Publication 986, Guide to Short-Circuit Temperature Limits", *IEC Standard*, Genève, Suisse, 1989.
- Jackson, K.W. e Black, W.Z., "A Unit-cell Model for Predicting the Thermal Conductivity of a Granular Medium Containing an Adhesive Binder", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 26, nr.1, pp. 87-99, 1983.
- King, S.Y. e Halfter, N.A., *Underground Power Cables*, Longman, 1982.
- Luikov, A.V., *Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies*, Pergamon Press Ltd., 1966.
- Lunardini, V.J., *Heat Transfer in Cold Climate*, Van Nostrand Reinhold Company, 1981.
- Luoni, G., Morello, A. e Holdup, H.W., "Calculation of the External Thermal Resistance of Buried Cables through Conformal Transformation", *Proc. IEE*, Vol. 121, pp. 575-585, 1972.

- Mitchell, J.K., Kao, T-C, Abdel-Hadi, O.N., "*Backfill Materials for Underground Power Cables - Phase I*", Research Project 7841-1, EPRI EL-506, Interim Report, Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley, 1977.
- Mitchell, J.K., Brandon, T.L. e Cameron, J.T., "Full-scale Field Tests of Temperature and Moisture Conditions in Cable Backfill Systems", *Proceedings of the Workshop on Current Rating of Buried Cables in Relation to Thermal Properties of Soil*, KEMA Laboratories, Arnhem, Holanda, September 1984.
- Moya, R.E.S., "*Análise Experimental em Regime Periódico da Transferência de Calor e Umidade em Torno de Cabos Elétricos Enterrados em Solos Úmidos*", Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, em andamento.
- Mualém, Y., "A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media", *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 3, pp. 513-522, 1976.
- Oliveira, A.A.M., "*Caracterização das Propriedades Termo-Hidráulicas de Materiais para Reaterro de Cabos Elétricos de Potência*", Dissertação de mestrado, Univ. Fed. de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 1993.
- Oliveira, A.A.M., Freitas, D.S. e Prata, A.T., "Influência das Propriedades do Meio nas Difusividades do Modelo de Philip e De Vries em Solos Insaturados", *Anais do XXII Encontro Sobre Escoamentos em Meios Porosos*, Florianópolis, SC, 1993.
- Patankar, S.V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Co., New York, 1980.
- Philip, J.R. e De Vries, D.A., "Moisture Movement in Porous Media under Temperature Gradients", *Trans. Am. Geophysical Union*, Vol. 38, pp. 222-232, 1957.
- Pirelli S.A., *High Voltage Cable Standards*, Vol. I, 1987.
- Radhakrishna, H.S., Lau, K.C., Crawford, A.M., "Coupled Heat and Moisture Flow Through Soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 110, No. 12, pp. 1766-1784, December 1984.
- Van Genuchten, M.Th., "A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils", *Journal of the Am. Soil Sci. Soc.*, Vol. 44, pp. 892-898, 1980.
- Whitaker, S., "Simultaneous Heat, Mass and Momentum Transfer in Porous Media. A Theory of Drying", in: *Advances in Heat Transfer*, edited by J. P. Harnett and T. F. Irvine Jr., Vol. 13, pp. 119-200, 1977.
- Williams, J.A., Parmar, D. e Conroy, M.W., "Controlled Backfill Optimization to Achieve High Ampacities on Transmission Cables", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, No. 1, pp. 544-552, January 1994.

A - GERAÇÃO DO ARQUIVO DE DIFUSIVIDADES

Os coeficientes empregados nas equações de Philip e de Vries resolvidas no presente trabalho, equações (4-9) e (4-10) foram analisados extensivamente com o auxílio de um programa escrito para o software *Mathcad 4.0*. Com o auxílio deste programa, foi possível estudar graficamente as expressões matemáticas utilizadas. Ao final de sua execução, o programa gera um arquivo de difusividades correspondente ao solo estudado. Foi também com o auxílio deste programa que o modelo de histerese descrito no capítulo 4 foi analisado.

Este programa está aqui reproduzido integralmente porque o software *Mathcad* utiliza uma linguagem de programação que mostra as expressões matemáticas na mesma forma em que são deduzidas, ou seja, a própria impressão do programa já é um relatório do que foi feito.

GERACAO DO ARQUIVO DE DIFUSIVIDADES DO SOLO

SELEÇÃO DO TIPO DE SOLO

Tipo	Solo	tipo := 2
1	Aluvião	
2	Backfill	
3	Arenoso	

LEITURA DOS DADOS DO SOLO ESCOLHIDO

i := 1..12

$v_i := \text{if}(\text{tipo}==1, \text{READ}(\text{aluv}), \text{if}(\text{tipo}==2, \text{READ}(\text{backf}), \text{if}(\text{tipo}==3, \text{READ}(\text{areia}), 0)))$

Porosidade	:	$\epsilon := v_2$	$\epsilon = 0.265$
Saturacao residual	:	$S_k := v_3$	$S_k = 0.04$
Permeabilidade de saturacao (m2)	:	$ksat := v_4$	$ksat = 3.72 \cdot 10^{-13}$
Parametros da Eq. de Van Genuchten (psi em J/kg):		$\alpha := v_5$	$\alpha = 1.407$
		$\beta := v_6$	$\beta = 1.728$
Parametros para a Eq. de Couvillion (psi em J/kg):		$a := v_7$	$a = 4.906$
		$b := v_8$	$b = 105$
Saturacao de transicao (VG --> C)	:	$St := v_9$	$St = 0.0531$
Condutividade termica da fase solida (W/m/K)	:	$ks := v_{10}$	$ks = 3.33$
Condutividade termica do meio seco (W/m/K)	:	$kd := v_{11}$	$kd = 0.53$
Ponto de início da histerese (pF)	:	$af := v_{12}$	$af = 3.8$

CALCULO DAS COORDENADAS DOS PONTOS (S,T) (Temperatura de Referencia: 25 C)

n := 100
 i := 0..n
 Li := 0 Ls := 1
 $S_i := Li + i \cdot \frac{Ls - Li}{n}$

m := 1
 j := 0..m
 Lit := 20 Lst := 70
 $T_j := Lit + \frac{j}{m} \cdot (Lst - Lit) + 273.15$

$S_i := \text{if}(S_i \leq S_k, S_k + 0.0001, S_i)$

$S_i := \text{if}(S_i > 0.9999, 0.9999, S_i)$

CONSTANTES E PROPRIEDADES FÍSICAS

Zero := 10^{-32}

g := 9.81 T0 := 298 P0 := 101325 pliq := 1000

Rv := 461.51 Ra := 287.06 Rg := 289.7

$$\mu_{liq_j} := 1.0834 \cdot 10^{-8} \cdot \exp\left(\frac{2635.57}{T_j} + 8.30853 \cdot 10^{-3} \cdot T_j\right)$$

$$\rho_{sat_j} := 1.39165 \cdot \frac{10^9}{T_j} \cdot \exp\left[\frac{-5819.36}{T_j} + 0.0135514 \cdot T_j - 5.8 \cdot 10^{-5} \cdot (T_j)^2 + 5.722 \cdot 10^{-8} \cdot (T_j)^3\right]$$

$$h_{lv_j} := (757.577 - 0.584 \cdot T_j) \cdot 4186$$

$$D_{vacont_j} := 2.56 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{T_j}{T_0}\right)^{1.88}$$

$$\sigma_j := 0.072 \cdot \exp\left[-2.05 \cdot 10^{-3} \cdot (T_j - 298) - 8.567 \cdot 10^{-6} \cdot (T_j - 298)^2\right] \quad \sigma_0 := 0.072 \quad (\text{Para } T = T_0)$$

$$\gamma_j := -2.05 \cdot 10^{-3} - 1.7134 \cdot 10^{-5} \cdot (T_j - 298)$$

$$k_{ar_j} := 7.36 \cdot 10^{-5} \cdot (T_j - 298.15) + 0.026077$$

PROPRIEDADES TERMO-HIDRÁULICAS DO SOLO

Condutividade térmica efetiva (modificar para cada solo) (W/m/K)

$$\lambda_{aa_i} := \frac{k_d}{0.1786 + 0.8214 \cdot \exp\left[-1.74224 \cdot S_i + 9.6831 \cdot (S_i)^2 - 47.7571 \cdot (S_i)^3\right]} \quad \text{Aluvião}$$

$$\lambda_{bf_i} := k_d + 1.441 \cdot (1 - \exp(-3.238 \cdot S_i)) \quad \text{Condutividade térmica do backfill}$$

$$\lambda_{ew_i} := k_d + 2.07 \cdot (1 - \exp(-8.9 \cdot S_i)) \quad \text{Condutividade térmica da areia de Ewen}$$

$$\lambda_{ef_i} := \text{if}(\text{tipo} = 1, \lambda_{aa_i}, \text{if}(\text{tipo} = 2, \lambda_{bf_i}, \text{if}(\text{tipo} = 3, \lambda_{ew_i}, 0)))$$

Calculo da saturacao efetiva (Se)

$$Se_i := \frac{S_i - S_k}{1 - S_k}$$

Potencial de succao (J/kg)

$$\Psi_{l_i} := -R_v \cdot T_0 \cdot a \cdot \exp(-b \cdot S_i)$$

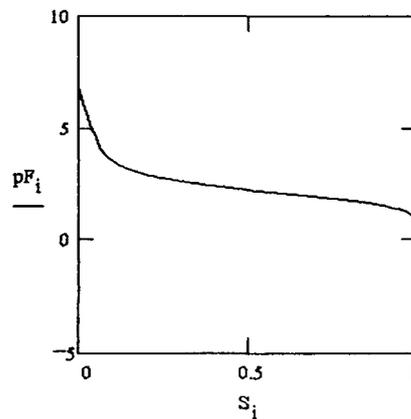
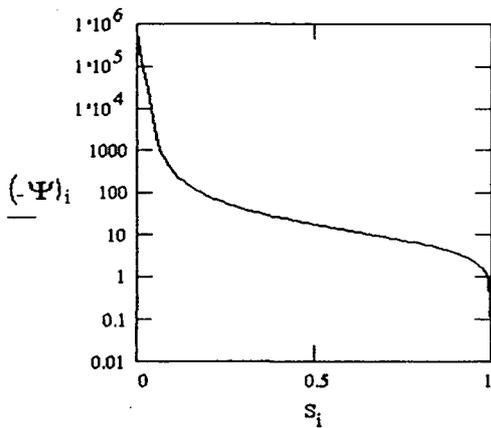
$$\eta := 1 - \frac{1}{\beta}$$

$$\Psi_{2_i} := \frac{-1}{\alpha} \left[(Se_i)^{-\left(\frac{1}{\eta}\right)} - 1 \right]^{\frac{1}{\beta}} \cdot g$$

$$\Psi_i := \text{if}(S_i < St, \Psi_{1_i}, \Psi_{2_i})$$

Potencial de sucção na forma de curva pF:

$$pF_i := \log\left(-100 \cdot \frac{\Psi_i}{g}\right) \quad \text{====>>> psi em m.c.a.}$$



Derivada do potencial de sucção em rel a S

=====

$$d\Psi_{1 ds_i} := -b \cdot \Psi_{1_i}$$

$$d\Psi_{2 ds_i} := \frac{g}{\alpha \cdot \beta \cdot \eta \cdot (1 - Sk)} (Se_i)^{-\frac{1}{\eta} - 1} \left[(Se_i)^{-\frac{1}{\eta}} - 1 \right]^{-\eta}$$

$$d\Psi_{ds_{i,j}} := \text{if}(S_i < St, d\Psi_{1 ds_i}, d\Psi_{2 ds_i}) \cdot \frac{\sigma_j}{\sigma_0}$$

Derivada do potencial de sucção em rel a T

=====

$$d\Psi_{dT_{i,j}} := \gamma_j \cdot \Psi_i$$

Umidade relativa

=====

$$\phi_{i,j} := \exp\left(\frac{\Psi_i}{Rv \cdot T_j}\right)$$

Derivada da umidade relativa com rel a s

=====

$$d\phi ds_{i,j} := \frac{\phi_{i,j}}{Rv \cdot T_j} \cdot d\psi ds_{i,j}$$

Derivada da umidade relativa com rel a T

=====

$$d\phi dt_{i,j} := \frac{-\phi_{i,j} \cdot \ln(\phi_{i,j})}{T_j}$$

Permeabilidade relativa

=====

$$krl_i := \text{if} \left[S_i < S_k + 0.0001, \text{Zero}, (Se_i)^{0.5} \cdot \left[1 - \left[1 - (Se_i)^{\frac{1}{\eta}} \right]^\eta \right]^2 \right]$$

Difusividade do vapor nos poros do meio

=====

$$f_i := \text{if} \left[S_i < S_k, \varepsilon \cdot 0.66, \varepsilon \cdot (1 - S_i) \cdot \left[1 + \frac{S_i}{(1 - S_k)} \right] \cdot 0.66 \right]$$

$$Dva_{i,j} := f_i \cdot Dvacont_j$$

Fator de intensificação térmico

=====

$$css_j := \frac{\frac{kd}{ks} \left[1 + \varepsilon \cdot \left(\frac{ks}{kar_j} - 1 \right) \right] - 1}{\left[\frac{kd}{ks} - 1 + \varepsilon \cdot \left(\frac{ks}{kar_j} - 1 \right) \right]}$$

css_j

0.137876
0.134713

$$\zeta_{i,j} := \frac{1}{\left[\frac{kar_j}{ks} + \frac{\varepsilon \cdot (1 - S_i)}{1 - css_j} \right]}$$

DIFUSIVIDADES DO MODELO DE PHILLIP E DE VRIES

=====

1) Difusividade do liquido devido a gradientes de umidade [m2/s]

=====

Calculo de Dol

=====

$$Dol_{i,j} := \frac{\rho_{liq} \cdot ks_{at} \cdot krl_i}{\mu_{liq} \cdot \varepsilon} \cdot d\psi da_{i,j}$$

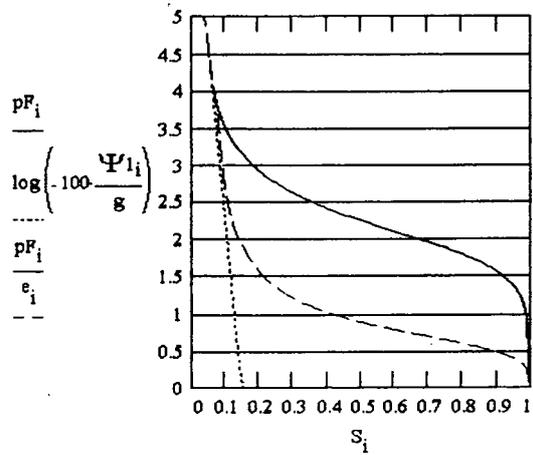
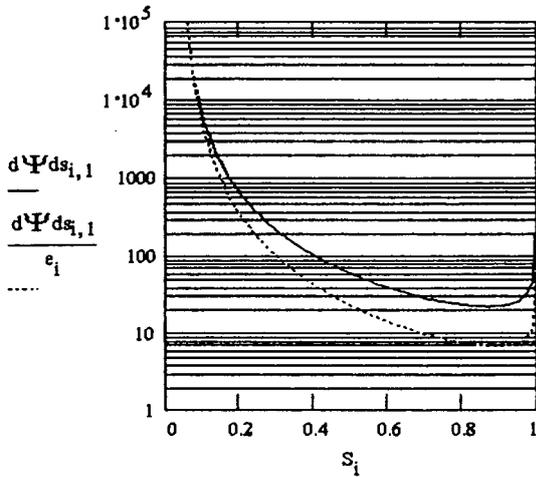
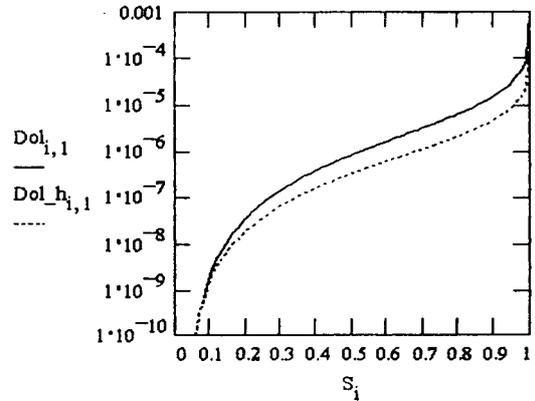
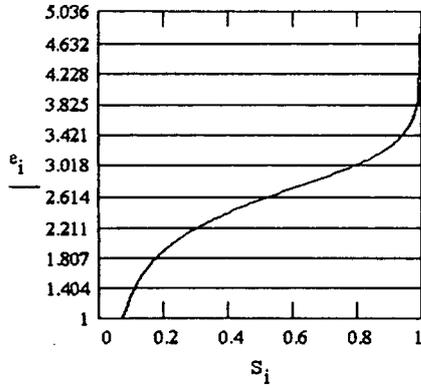
Efeito de histerese sobre Dol (cálculo de Dol_h)

tipo = 2

=====

$$af = 3.8 \quad bf := 1 \quad e_i := \text{if}(pF_i \geq af, 1, 1 + af - bf \cdot pF_i)$$

$$Dol_{h,i,j} := \frac{Dol_{i,j}}{e_i}$$



2) Difusividade do liquido devido a gradientes de temperatura [m2/s/K]

=====

Calculo de DTI

=====

$$Dh_{i,j} := \frac{\rho_{liq} \cdot k_{sat} \cdot k_{rl_i}}{\mu_{liq}} \cdot d\Psi dT_{i,j}$$

3) Difusividade do vapor devido a gradientes de umidade [m2/s]

=====

Calculo de Dov

=====

$$Dov_{i,j} := Dva_{i,j} \cdot R_g \cdot \frac{\rho_{sat_j}}{\rho_{liq} \cdot Ra \cdot s} \cdot d\phi ds_{i,j}$$

4) Difusividade do vapor devido a gradientes de temperatura [m²/s/K]

=====

Calculo de Dtv

=====

$$Dtv_{i,j} := Dva_{i,j} \cdot \zeta_{i,j} \cdot Rg \cdot \frac{\rho_{satj}}{\rho_{liq} \cdot Ra} \left[\frac{\phi_{i,j} \cdot hlv_j}{Rv \cdot (T_j)^2} + d\phi dt_{i,j} \right]$$

5) Contribuição da gravidade na conservação da massa [1/s]

=====

$$Kg_{i,j} := \frac{\rho_{liq} \cdot k_{sat} \cdot kr_{li}}{\mu_{liq}} \cdot g$$

6) Montagem dos coeficientes das equações

=====

$$\rho_{hlv} \cdot Dov_{i,j} := \rho_{liq} \cdot hlv_j \cdot Dov_{i,j} \quad \lambda_{ap_{i,j}} := \lambda_{ef_i} + \rho_{liq} \cdot hlv_j \cdot Dtv_{i,j}$$

$$Do_{i,j} := Dol_{i,j} + Dov_{i,j} \quad Dt_{i,j} := Dt_{i,j} + Dtv_{i,j}$$

RESULTADOS

=====

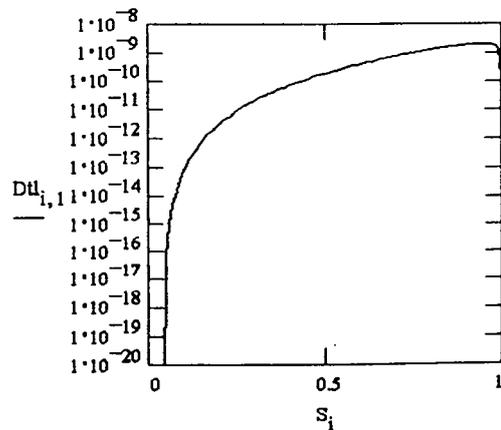
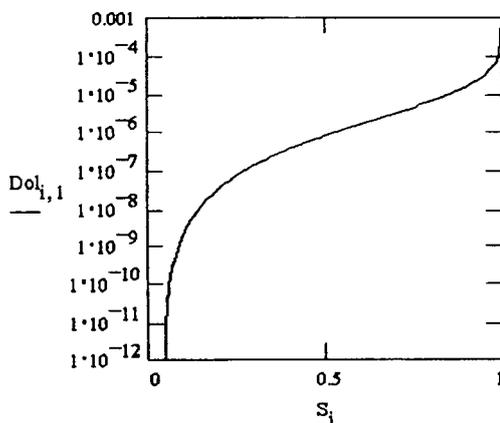
Constantes Físicas

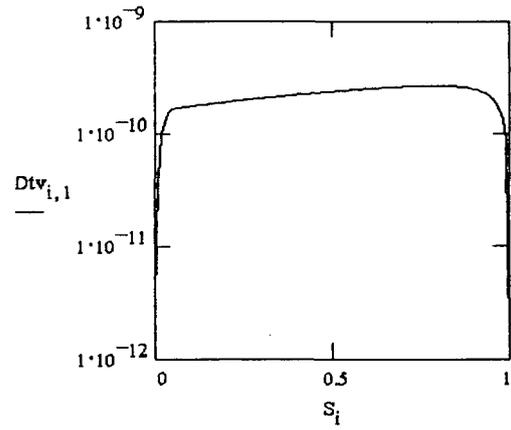
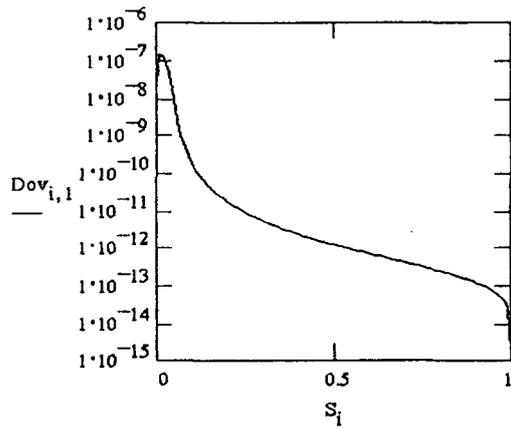
=====

T _j	μ _{liq}	ρ _{sat}	hlv _j
293.15	9.933633 · 10 ⁻⁴	0.017452	2.454576 · 10 ⁶
343.15	4.060697 · 10 ⁻⁴	0.199799	2.332345 · 10 ⁶
k _{ar}	γ _j	σ _j	Dvacont _j
0.025709	-0.001967	0.072705	2.482232 · 10 ⁻⁵
0.029389	-0.002824	0.064499	3.337516 · 10 ⁻⁵

Difusividades

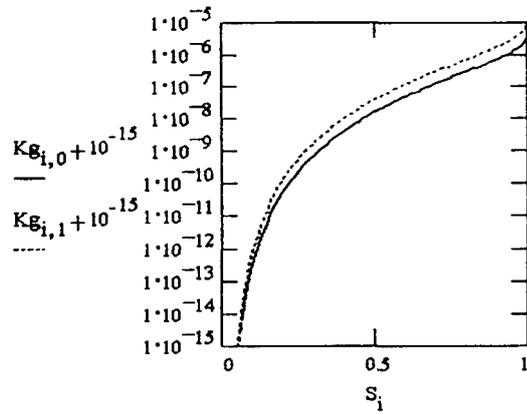
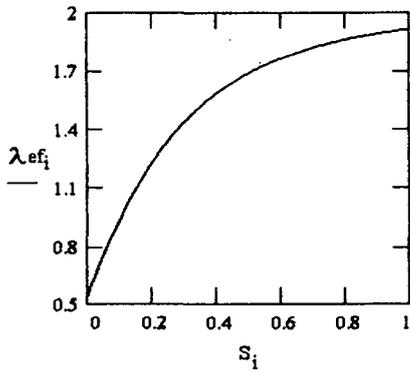
=====





Conductividade térmica efetiva
=====

Coefficiente Kg
=====



GRAVACAO DOS RESULTADOS EM DISCO:
=====

PRNCOLWIDTH := 12

PRNPRECISION := 4

WRITEPRN(*) := augment(augment(augment(augment(augment(S, lambda_p), rho_lhlvDov), Do), Dt), Kg)

B - ANÁLISE DO INTERIOR DO CABO

A perda no condutor de um cabo subterrâneo para alta tensão é devida a efeito Joule, e pode ser calculada a partir do conhecimento da corrente que passa pelo cabo e do material de que é feito o condutor (o que permite determinar a sua resistência elétrica). Nas camadas metálicas exteriores ao condutor (blindagem e armadura) também há perdas, as quais são devidas a correntes indesejáveis induzidas pela corrente que passa pelo condutor. A determinação destas perdas adicionais resulta de uma análise do ponto de vista elétrico e pode ser perfeitamente determinada de acordo com as normas atualmente existentes. Com base em dados básicos do cabo e da instalação, a norma fornece fatores que determinam o valor das perdas adicionais como uma proporção da perda principal no núcleo.

Os cálculos destes fatores não estão incluídos no processo numérico porque exigiriam uma complexa interface gráfica para cobrir todos os modelos de cabos e possibilidades de instalação. Sua determinação por meio das normas é simples e uma automatização deste cálculo não é o objetivo do presente trabalho. Desta forma, os fatores de perdas do cabo empregado na determinação dos resultados do capítulo 7 foram calculados à parte e estão mostrados no programa apresentado a seguir, preparado com o auxílio do software *Mathcad 4.0*. Devido à estrutura deste software, o programa utilizado já tem o formato de um relatório, indicando exatamente quais as fórmulas utilizadas.

Estudo do transiente parcial no interior do cabo

=====

Elevação da temperatura do condutor acima da temperatura da superfície do cabo,
para um cabo SCOF dado, de acordo com a norma IEC 853-2.

Solução do circuito térmico simplificado segundo a norma:

=====

1) Dados da rede:

Pot := 150·10⁶ (potência transmitida na linha, VA)

U0 := 138·10³ (tensão fase-neutro, V)

f := 60 (frequência de transmissão, Hz)

Tadm := 90 (temperatura máx. admissível para o condutor, C)

s := 0.1 (espaçamento entre os eixos dos condutores, m)

$I := \frac{Pot}{\sqrt{3} \cdot U0}$ (corrente transmitida, A) I = 627.555

2) Resistividades térmicas dos materiais do cabo, em (mK/W)

pdiel := 5.0 (papel impregnado com óleo)

pprot := 3.5 (HDPE)

3) Capacidades térmicas volumétricas dos materiais do cabo, em (J/m³/K)

σcond := 3.45·10⁶ (cobre)

σdiel := 2.7·10⁶ (papel impregnado com óleo)

σblind1 := 1.45·10⁶ (capa de chumbo)

σblind2 := 3.45·10⁶ (fios de cobre)

σprot := 2.4·10⁶ (HDPE)

4) Dimensões do cabo (diâmetros e áreas de seção transversal):

$$\phi_{\text{canal}} := 12.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\phi_{\text{cond}} := 27.61 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad A_{\text{cond}} := 4.50 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\phi_{\text{sc1}} := 28.55 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\phi_{\text{diel}} := 48.05 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad A_{\text{diel}} := \pi \cdot \frac{\phi_{\text{diel}}^2 - \phi_{\text{sc1}}^2}{4} \quad A_{\text{diel}} = 1.17315 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\phi_{\text{sc2}} := 48.71 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\phi_{\text{blind1}} := 53.31 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad A_{\text{blind1}} := \pi \cdot \frac{\phi_{\text{blind1}}^2 - \phi_{\text{sc2}}^2}{4} \quad A_{\text{blind1}} = 3.686 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\phi_{\text{blind2}} := 55.01 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad A_{\text{blind2}} := \frac{30.5 \cdot 0.85 \cdot 10^{-6}}{1.034} \quad A_{\text{blind2}} = 1.233 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\phi_{\text{prot}} := 64.11 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad A_{\text{prot}} := \pi \cdot \frac{\phi_{\text{prot}}^2 - \phi_{\text{blind2}}^2}{4} \quad A_{\text{prot}} = 8.514 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

5) Resistências térmicas (mK/W):

5.1) Resistência térmica do dielétrico:

$$R_{\text{diel}} := \frac{\ln\left(\frac{\phi_{\text{diel}}}{\phi_{\text{cond}}}\right)}{2 \cdot \pi} \cdot \rho_{\text{diel}} \quad R_{\text{diel}} = 0.441$$

5.2) Resistência térmica da proteção externa:

$$R_{\text{prot}} := \frac{\ln\left(\frac{\phi_{\text{prot}}}{\phi_{\text{blind2}}}\right)}{2 \cdot \pi} \cdot \rho_{\text{prot}} \quad R_{\text{prot}} = 0.085$$

6) Resistências ôhmicas (ohm/m) do condutor e das blindagens:

6.1) Resistência ôhmica do condutor:

i) resistência ôhmica do condutor na máxima temperatura de operação:

$$\alpha_{20} := \frac{1}{254.5} \quad \alpha_{20} = 0.00393$$

$$R_0 := \frac{17.241 \cdot 10^{-9}}{A_{\text{cond}}} \quad R_0 = 3.831 \cdot 10^{-5} \text{ ohm/m}$$

$$R_{\text{lin}} := R_0 \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot (T_{\text{adm}} - 20)) \quad R_{\text{lin}} = 4.885 \cdot 10^{-5} \text{ ohm/m}$$

ii) fatores de película (y_s) e de proximidade (y_p):

$$k_s := \frac{\phi_{\text{cond}} - \phi_{\text{canal}}}{\phi_{\text{cond}} + \phi_{\text{canal}}} \cdot \left(\frac{\phi_{\text{cond}} + 2 \cdot \phi_{\text{canal}}}{\phi_{\text{cond}} + \phi_{\text{canal}}} \right)^2 \quad k_s = 0.648$$

$$x_{s2} := \frac{8 \cdot \pi \cdot f}{R_{\text{lin}}} \cdot 10^{-7} \cdot k_s \quad y_s := \frac{x_{s2}^2}{192 + 0.8 \cdot x_{s2}^2} \quad y_s = 0.021$$

proximidade:

$$k_p := 0.8 \quad x_{p2} := \frac{8 \cdot \pi \cdot f}{R_{\text{lin}}} \cdot 10^{-7} \cdot k_p$$

$$y_p := \frac{x_{p2}^2}{192 + 0.8 \cdot x_{p2}^2} \cdot \left(\frac{\phi_{\text{cond}}}{s} \right)^2 \cdot \left[0.312 \cdot \left(\frac{\phi_{\text{cond}}}{s} \right)^2 + \frac{1.18}{\left(\frac{x_{p2}^2}{192 + 0.8 \cdot x_{p2}^2} \right) + 0.27} \right] \quad y_p = 0.009$$

iii) Todos os efeitos incluídos na resistência ôhmica:

$$R_{\text{ohmcond}} := R_{\text{lin}} \cdot (1 + y_s + y_p) \quad R_{\text{ohmcond}} = 5.031 \cdot 10^{-5} \quad (\text{ohm/m})$$

6.2) Resistência ôhmica da capa de fios de cobre na sua máxima temperatura de operação:

$$R_0 := \frac{17.241 \cdot 10^{-9}}{\text{Ablind2}} \quad R_0 = 1.398 \cdot 10^{-4} \quad \text{ohm/m}$$

$$T_{\text{admcapa}} := T_{\text{adm}} - (R_{\text{ohmcond}} \cdot I^2) \cdot R_{\text{diel}} \quad T_{\text{admcapa}} = 81.264 \quad \text{C}$$

$$R_{\text{lin}} := R_0 \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot (T_{\text{admcapa}} - 20)) \quad R_{\text{lin}} = 1.735 \cdot 10^{-4} \quad \text{ohm/m}$$

$$R_{S2} := R_{\text{lin}}$$

6.3) Resist. ôhmica da capa de chumbo, na sua máx. temperatura de operação:

$$\alpha_{20} := \frac{1}{230} \quad \alpha_{20} = 0.00435$$

$$R_0 := \frac{214 \cdot 10^{-9}}{\text{Ablind1}} \quad R_0 = 5.806 \cdot 10^{-4} \quad \text{ohm/m}$$

$$R_{\text{lin}} := R_0 \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot (T_{\text{admcapa}} - 20)) \quad R_{\text{lin}} = 7.353 \cdot 10^{-4} \quad \text{ohm/m}$$

$$R_{S1} := R_{\text{lin}}$$

7) Perda na blindagem (cálculo $d\lambda_1$), de acordo com item 6.6 da norma:

$$\omega := 2 \cdot \pi \cdot f \quad \omega = 376.991$$

$d := \phi_{\text{blind1}}$ (diâmetro médio da blindagem, assumido igual para as duas)

7.1) Cálculo de λ_{111} (perdas por eddy-currents)

* Perda na capa de chumbo:

$$m := \frac{\omega}{RS1} \cdot 10^{-7} \quad m = 0.051$$

$$\lambda_0 := 6 \cdot \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \cdot \left(\frac{d}{2 \cdot s} \right)^2 \quad \lambda_0 = 0.001 \quad (\text{delta1 e delta2 podem ser desprezados})$$

$$\lambda_{111_1} := \frac{RS1}{Rohm_{\text{cond}}} \cdot \lambda_0 \quad \lambda_{111_1} = 0.016$$

* Perda nos fios de cobre:

$$m := \frac{\omega}{RS2} \cdot 10^{-7} \quad m = 0.217$$

$$\lambda_0 := 6 \cdot \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \cdot \left(\frac{d}{2 \cdot s} \right)^2 \quad \lambda_0 = 0.019$$

$$\Delta 1 := 0.86 \cdot m^{3.08} \cdot \left(\frac{d}{2 \cdot s} \right)^{1.4 \cdot m + 0.7} \quad \Delta 1 = 0.002$$

$$\lambda_{111_2} := \frac{RS2}{Rohm_{\text{cond}}} \cdot \lambda_0 \quad \lambda_{111_2} = 0.066$$

7.2) Cálculo de λ_{11} (perdas por circulating currents):

* Perda na capa de chumbo:

$$\lambda_{11_1} := 0.03$$

* Perda nos fios de cobre:

$$\lambda_{11_2} := 0.03$$

7.3) Perdas totais nas blindagens:

* Perda na capa de chumbo:

$$\lambda_{1_1} := \lambda_{11_1} + \lambda_{111_1} \quad \lambda_{1_1} = 0.046$$

* Perda nos fios de cobre:

$$\lambda_{1_2} := \lambda_{11_2} + \lambda_{111_2} \quad \lambda_{1_2} = 0.096$$

* Perda total:

$$\lambda_1 := \lambda_{1_1} + \lambda_{1_2} \quad \lambda_1 = 0.143$$

8) Resistências térmicas equivalentes (resist. do circuito elétrico simplificado):

$$R_{thA} := R_{diel}$$

$$R_{thB} := (1 + \lambda_1) \cdot R_{prot}$$

9) Capacitâncias individuais:

$$C_{cond} := \sigma_{cond} \cdot A_{cond} \quad C_{cond} = 1.553 \cdot 10^3$$

$$C_{diel} := \sigma_{diel} \cdot A_{diel} \quad C_{diel} = 3.168 \cdot 10^3$$

$$C_{blind1} := \sigma_{blind1} \cdot A_{blind1}$$

$$C_{blind2} := \sigma_{blind2} \cdot A_{blind2} \quad C_{blind} := C_{blind1} + C_{blind2} \quad C_{blind} = 959.854$$

$$C_{prot} := \sigma_{prot} \cdot A_{prot} \quad C_{prot} = 2.043 \cdot 10^3$$

10) Fatores de divisão das capacitâncias para garantir resistividades iguais:

$$p1 := \frac{1}{2 \cdot \ln\left(\frac{\phi_{diel}}{\phi_{cond}}\right)} - \frac{1}{\left(\frac{\phi_{diel}}{\phi_{cond}}\right)^2 - 1} \quad p1 = 0.409$$

$$p2 := \frac{1}{2 \cdot \ln\left(\frac{\phi_{prot}}{\phi_{blind2}}\right)} - \frac{1}{\left(\frac{\phi_{prot}}{\phi_{blind2}}\right)^2 - 1} \quad p2 = 0.475$$

11) Capacitâncias equivalentes para o circuito simplificado:

$$CA := C_{\text{cond}} + p1 \cdot C_{\text{diel}} \quad CA = 2.85 \cdot 10^3 \quad (\text{J/K/m})$$

$$CB := (1 - p1) \cdot C_{\text{diel}} + \frac{C_{\text{blind}} + p2 \cdot C_{\text{prot}}}{1 + \lambda 1} \quad CB = 3.559 \cdot 10^3 \quad (\text{J/K/m})$$

12) Coeficientes auxiliares para a solução do transiente:

$$M0 := \frac{1}{2} \cdot (CA \cdot (R_{\text{thA}} + R_{\text{thB}}) + CB \cdot R_{\text{thB}})$$

$$N0 := CA \cdot R_{\text{thA}} \cdot CB \cdot R_{\text{thB}}$$

$$a := \frac{M0 + \sqrt{M0^2 - N0}}{N0} \quad a = 0.0037$$

$$b := \frac{M0 - \sqrt{M0^2 - N0}}{N0} \quad b = 6.21 \cdot 10^{-4}$$

$$Ra := \frac{1}{a - b} \cdot \left[\frac{1}{CA} - b \cdot (R_{\text{thA}} + R_{\text{thB}}) \right] \quad Rb := R_{\text{thA}} + R_{\text{thB}} - Ra$$

$$Ra = 0.0054$$

$$Rb = 0.533$$

13) Geração de calor no núcleo, (W/m):

$$Wc := R_{\text{ohmcond}} \cdot I^2 \quad Wc = 19.813$$

14) Total das perdas por efeito Joule, (W/m), por cabo:

$$WI := (1 + \lambda 1) \cdot Wc \quad WI = 22.638$$

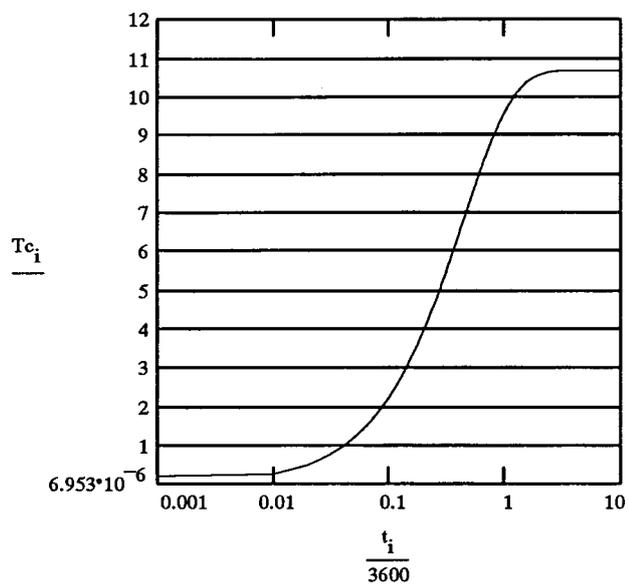
15) Elevação da temperatura do condutor sobre a superfície do cabo:

$t_{\text{final}} := 10$ (horas) $t_{\text{final}} := t_{\text{final}} \cdot 3600$

$n := 1000$ $i := 0..n$

$t_i := \frac{i}{n} \cdot t_{\text{final}} + 10^{-3}$

$Tc_i := Wc \cdot [Ra \cdot (1 - \exp(-a \cdot t_i)) + Rb \cdot (1 - \exp(-b \cdot t_i))]$



C - DESCRIÇÃO DO PROGRAMA UTILIZADO

O programa foi montado com uma estrutura de "menus" para facilitar o acesso aos parâmetros que devem ser modificados. Estes parâmetros estão separados em grupos, de acordo com a sua função na simulação. Basicamente, além dos parâmetros que definem o interior dos cabos, há os parâmetros físicos, os geométricos e os computacionais, que servem para caracterizar o domínio completo, incluindo os solos. Para acessar qualquer item dos menus, o usuário deve pressionar a tecla correspondente ao número do item ou à letra que estiver escrita em maiúsculo.

A estrutura geral dos menus é a seguinte (alguns itens são mostrados com valores típicos, como exemplo):

MENU PRINCIPAL:

- (1) PREPARAÇÃO DO CASO
- (2) AJUSTE DE PARÂMETROS
- (3) SIMULAÇÃO
- (4) RESULTADOS
- (5) FINALIZAR

(1) PREPARAÇÃO DO CASO:

(1.1) Cabo elétrico:

- (1.1.1) Cabo novo
- (1.1.2) Abrir arquivo de dados
- (1.1.3) Salvar dados atuais
- (1.1.4) Editar dados do cabo:
 - (1.1.4.1) Seção efetiva do condutor = ###.# [mm²]
 - (1.1.4.2) Fator de película (ys) = #.###
 - (1.1.4.3) Fator de proximidade (yp) = #.###
 - (1.1.4.4) Perdas no dielétrico (Wd) = #.## [W/m]
 - (1.1.4.5) Caracterização das camadas internas:
 - (#) Camada número # (o número seleciona a camada)
 - (#.1) Material da camada
 - (#.1.1) Metálico
 - (#.1.2) Isolante elétrico
 - (#.1.3) Proteção externa
 - (#.1.4) Outros
 - (#.2) Diâmetro externo = ##.## [mm]
 - (#.3) Perdas na camada = ###.## % das perdas no núcleo
 - (1.1.4.6) Mostrar cabo atual

(1.2) Novo caso

(1.3) Abrir caso de arquivo

(1.4) Salvar caso atual (### dias simulados)

(1.5) Reinicializar caso atual

(2) AJUSTE DE PARÂMETROS:**(2.1) Físicos:**

- (2.1.1) Corrente máxima nos cabos = 300.00 [A]
 (2.1.2) Fator de carga = 1.00
 (2.1.3) Temperatura do ar ambiente = 25.0 [C]
 (2.1.4) Velocidade do vento na calçada = 3.0 [km/h]
 (2.1.5) Modificar condições do solo:
 (2.1.5.1) Solo da região de instalação : aluvião...
 (#) Lista de solos...
 (2.1.5.2) Umidade inicial do solo da região = 16.16 % (em peso)
 (2.1.5.3) Solo especial próximo aos cabos : backfill...
 (#) Lista de solos...
 (2.1.5.4) Umidade inicial do solo especial = 9.00 % (em peso)
 (2.1.5.5) Temperatura inicial dos solos = 25.0 [C]

(2.2) Geométricos:

- (2.2.1) Profundidade do centro dos cabos = #.## [m]
 (2.2.2) Distância entre centros dos cabos = ##.# [cm]
 (2.2.3) Altura da porção de solo especial = ##.# [cm]
 (2.2.4) Largura da porção de solo especial = ##.# [cm]
 (2.2.5) Profundidade do fundo da porção especial = #.## [m]
 (2.2.6) Largura total do domínio de solução = #.## [m]
 (2.2.7) Altura total do domínio de solução = #.## [m]
 (2.2.8) Razão de PG para construção da malha = #.##
 (2.2.9) Proporção entre volumes (domínio/cabo) = #.##
 (2.2.0) Mostrar malha computacional

(2.3) Processamento:

- (2.3.1) Número de soluções da equação da energia = 2
 (2.3.2) Número de soluções da equação da umidade = 2
 (2.3.3) Número máx. de iterações do acoplamento = 3
 (2.3.4) Controles adicionais:
 (2.3.4.1) Resíduo máx. para a equação da energia = 1.00e-8
 (2.3.4.2) Resíduo máx. para a equação da umidade = 1.00e-8
 (2.3.4.3) Relaxação para a equação da energia = 1.00
 (2.3.4.4) Relaxação para a equação da umidade = 1.00
 (2.3.4.5) Razão de PG para os avanços no tempo = 1.000
 (2.3.4.6) Máx. intervalo de tempo admissível = 99999.00 [dias]
 (2.3.4.7) Informações sobre convergência (S/N) : S
 (2.3.4.8) Intervalos entre gravações = 5.

(3) SIMULAÇÃO:

- INSTANTE ATUAL : 180.0 [dias]
 (3.1) Simular até : 365.0 [dias]
 (3.2) Intervalos de : 4.0 [horas]
 (3.3) Executar

(4) RESULTADOS:

- (4.1) Balanços de energia e umidade
 (4.2) Temperatura da superfície do cabo
 (4.3) Temperatura do condutor do cabo
 (4.4) Umidade do solo próximo ao cabo central

Em alguns casos, a função de um parâmetro selecionado é evidente. Para uma correta seleção de alguns parâmetros, no entanto, é necessário levar em conta alguns detalhes adicionais, que são descritos a seguir. O número que aparece em negrito entre parênteses corresponde à posição do comando na estrutura geral de menus acima.

4.1 PREPARAÇÃO DE UM CASO (1)

Um "caso" computacional é um conjunto de parâmetros completo, pronto para ser simulado. Toda definição de caso deve ser feita *necessariamente* de acordo com a seguinte seqüência:

- 1) **Definir estrutura interna dos cabos (1.1):**
antes de começar a caracterizar o domínio externo aos cabos, é preciso conhecer as suas dimensões;
- 2) **Definir parâmetros físicos (2.1):**
uma vez definidos os cabos, é preciso definir as condições do meio que os envolve;
- 3) **Definir parâmetros geométricos (2.2):**
informar todas as dimensões da instalação dos cabos. Neste ponto o programa gera automaticamente uma malha, a qual pode ser visualizada automaticamente (2.2.0);
- 4) **Definir parâmetros computacionais (2.3):**
último passo antes da execução. Devem ser definidos os controles que estabelecem a convergência a cada avanço no tempo. Basicamente, são estes controles que definem a precisão da simulação.

Todo este conjunto de parâmetros (em torno de 50 no total) tem que ser especificado antes de qualquer execução do programa. Há uma grande flexibilidade na definição do caso para permitir a caracterização mais exata possível do problema real, mas dificilmente o usuário terá que modificar todos os parâmetros disponíveis. A definição de um caso computacional pode ser feita de dois modos:

(1.2) Começando um caso novo:

parâmetros recebem um valor pré-estabelecido ("default"), que poderá ser modificado conforme as características da simulação a ser executada e os campos recebem valores iniciais. Os valores default preparam o programa para um transiente típico de 3 cabos em trincheira de Backfill bimodal, em uma região em que haja dominância de solo do tipo aluvião arenoso (silto-arenoso);

(1.3) Abrindo um caso de arquivo:

pode-se recuperar um caso que tenha sido gravado anteriormente. Pode-se continuar este caso do ponto em que parou ou pode-se reinicializá-lo (1.5) (campos assumem valores iniciais) para criar um caso novo a partir da modificação de alguns parâmetros apenas. *Neste caso não será possível modificar o cabo elétrico sem reinicializar o caso.*

Pode-se gravar em arquivo qualquer caso adequadamente definido (1.4). No arquivo ficam guardadas todas as informações (dados e parâmetros e campos de temperaturas e umidades) sobre a situação da simulação no instante da gravação. Este arquivo servirá para uma posterior execução do caso guardado, a partir do ponto em que foi interrompida a simulação, e também poderá servir de base para a criação de um caso novo. O nome para gravação poderá ter até 8 letras (nome de um arquivo em DOS). O arquivo terá a extensão ".CAS" e ficará armazenado no subdiretório "CASOS".

4.1.1 ESPECIFICAÇÃO DO CABO ELÉTRICO

Se o caso é novo (está sendo definido pela primeira vez), será necessário informar as características dos cabos da linha antes de qualquer outro parâmetro. Todas as informações sobre a estrutura dos cabos estão agrupadas sob este item (1.1). Assume-se que os 3 cabos são idênticos. Neste item pode-se optar entre:

(1.1.1) Definir um cabo novo:

são atribuídas características default ao cabo e o usuário deve modificá-las com o auxílio dos recursos de edição do cabo (1.1.4);

(1.1.2) Abrir um arquivo com um conjunto de dados pronto:

pode-se tomar um cabo já pronto de arquivo. Pode-se utilizá-lo diretamente ou pode-se modificar alguns parâmetros para obter um cabo novo;

(1.1.3) Salvar dados atuais:

após todas as edições de um cabo novo, pode-se querer adicioná-lo à lista de cabos disponíveis. Os dados do cabo são salvos em um arquivo cujo nome (de até 8 letras) é fornecido pelo usuário. Os arquivos de dados sobre cabos ficam no subdiretório "CABOS" e possuem a extensão ".CAB";

(1.1.4) Editar dados do cabo:

neste item estão agrupadas todas as características estruturais dos cabos da linha. Alguns parâmetros, como:

- fator de película e fator de proximidade,
- perdas no dielétrico devidas à tensão,
- perdas nas camadas devidas à corrente,

devem ser calculados à parte com o auxílio das normas e o resultado deve ser informado no item adequado.

Outros, como os diâmetros externos das camadas internas dos cabos e os materiais que as compõem podem ser obtidos diretamente do modelo do cabo escolhido. Na estrutura do cabo está prevista uma camada "zero", que serve para indicar o início das camadas que realmente interessam ao cálculo. Se, por exemplo, o cabo é oco e o seu canal central mede 12mm de diâmetro, o diâmetro externo da camada "zero" deve ser informado como 12mm. Os materiais devem ser escolhidos entre os disponíveis nos menus, que são os apresentados na norma Pirelli (1987).

A edição é simples: a cada camada é atribuído um número de ordem e são permitidos 3 tipos de comandos:

- **Edição da camada nro. #:** basta apertar o número (#) da camada;
- **Inserção após a camada nro. #:** apertar a tecla "+" e logo em seguida apertar o número da camada (#) após a qual se deseja inserir uma nova camada;
- **Eliminação da camada nro. #:** apertar a tecla "-" e logo em seguida apertar o número da camada (#) que deve ser deletada.

OBS.: i) após a edição são feitos alguns testes de consistência e o cabo só é declarado como "definido" se todos os testes forem satisfatórios. Note-se que sem que o cabo esteja adequadamente definido, não será permitido ao usuário modificar os demais parâmetros (físicos, geométricos ou computacionais);

ii) pode-se conferir visualmente a estrutura interna do cabo que foi informado ao programa (1.1.4.6).

4.1.2 AJUSTE DOS PARÂMETROS FÍSICOS

Uma vez definido o cabo, o usuário deve passar ao ajuste dos parâmetros (2). Os primeiros a serem definidos são os parâmetros físicos (2.1), que dizem respeito a:

4.1.2.1 Condições de transmissão no cabo:

- Corrente máxima de transmissão (2.1.1);
- Fator de carga (2.1.2):

o fator de carga varia entre 0 e 1 e é utilizado na representação de cargas cíclicas. O fator de carga indica a proporção entre a demanda média de corrente imposta ao cabo em um ciclo diário e o valor de pico no mesmo ciclo. Fator de carga unitário significa que a demanda diária de corrente é constante;

4.1.2.2 Condições do ambiente:

Devem ser especificados a temperatura do ar ambiente (2.1.3) mais próxima possível da média anual na região e a velocidade do vento (2.1.4) predominante no local. A partir da velocidade do vento fornecida é determinado internamente um coeficiente de convecção na calçada, de acordo com a seguinte expressão (Lunardini, 1981):

$$h = 7.371 + 6.43V^{0.75} \quad (C-1)$$

onde:

- h é o coeficiente de transferência de calor convectivo ($W/m^2/^\circ C$);
- V é a velocidade do vento (m/s).

4.1.2.3 Descrição dos solos (2.1.5):

- Tipos de solos (2.1.5.1 e 2.1.5.3):
é necessário escolher entre as opções disponíveis (ver cap. 3, item 3.2.5, pág. 18) aquelas que mais se aproximam dos solos realmente encontrados no aterro. As propriedades do arquivo de disco correspondente ao solo escolhido serão utilizadas na simulação;
- Condições iniciais:
a temperatura inicial (2.1.5.5) é comum para as 2 regiões do domínio (dentro e fora da região de solo especial), mas o nível de umidade inicial dependerá do tipo de solo selecionado. Além disto, a condição inicial de umidade do solo especial (2.1.5.4) influi apenas durante o transiente, não sendo importante para o valor final da temperatura do cabo. Por outro lado, o valor da umidade inicial do solo nativo da região (2.1.5.2) é fundamental para o resultado final da simulação.

4.1.3 AJUSTE DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS (2.2)

Dizem respeito às dimensões do domínio e à malha computacional, tais como:

4.1.3.1 Posicionamento dos cabos:

- Profundidade do centro dos cabos (2.2.1):
localização do centro dos cabos em relação à calçada;
- Distância entre centros (2.2.2);

4.1.3.2 Descrição da porção de solo especial:

- Altura da porção de solo especial (2.2.3);
- Largura da porção de solo especial (2.2.4);
- Profundidade do fundo da porção especial (2.2.5):
permite a localização desta camada em relação à calçada;

4.1.3.3 Descrição do domínio:

- Largura total do domínio de solução (2.2.6);
- Altura total do domínio de solução (2.2.7):
a fronteira do domínio de solução se localiza em um ponto que não influencia o que acontece próximo aos cabos. A largura e a altura totais do domínio são calculadas internamente e são aqui mostradas apenas como referência e para modificação em casos especiais. Normalmente, elas não devem ser modificadas pelo usuário.

4.1.3.4 Caracterização da malha:

Parâmetros que servem de guia à construção da malha computacional. Seus valores default já permitem a construção de uma malha bastante eficiente. Apesar disto, pode-se querer uma malha mais grosseira, para ser utilizada apenas em testes, por exemplo. Pode-se também desejar uma malha mais refinada, para casos mais críticos, em que seja difícil obter convergência. A geração da malha é controlada pelos seguintes parâmetros:

- **Razão de PG para construção da malha (2.2.8):**
em algumas regiões do domínio computacional de solução, as dimensões dos volumes seguem uma progressão geométrica (a malha é dita não-uniforme). Desta forma, a malha fica mais "concentrada" (são colocados mais volumes) nas regiões em que as grandezas de interesse (temperatura e umidade) variam mais abruptamente. Em termos práticos, uma razão maior implica em uma malha com menos pontos (se a razão de PG é grande, com poucos pontos já se pode "cobrir" a região de interesse); uma razão menor leva a um número maior de volumes. Valores razoáveis para esta razão variam entre 1.2 (malha muito concentrada) até 4 (malha muito grosseira);
- **Proporção entre volumes (domínio/cabo) (2.2.9):**
nas regiões correspondentes ao interior dos cabos, todos os volumes têm a mesma dimensão (a malha é dita uniforme). Esta dimensão é calculada apenas com base nas dimensões dos cabos. Nas regiões correspondentes ao interior da porção de solo especial, a malha também é uniforme. Neste caso a dimensão do volume é calculada a partir dos volumes correspondentes aos cabos, de acordo com a proporção especificada neste item. Em termos práticos, a seleção de uma proporção maior entre volumes leva a uma malha com menos pontos. Valores típicos para este parâmetro normalmente ficam entre 0.5, que significa uma malha muito concentrada dentro da região de solo especial, até 10, que significa poucos pontos computacionais nesta região;
- **Mostrar malha computacional (2.2.0):**
no momento em que esta opção é selecionada, é mostrado um esboço da malha computacional que corresponde aos parâmetros de malha fornecidos.

4.1.4 AJUSTE DOS PARÂMETROS COMPUTACIONAIS

Referem-se aos controles necessários à parte estritamente numérica do problema, tais como:

4.1.4.1 Controle de convergência:

Quando a situação física já é crítica (alta potência dissipada ou solo inicialmente seco, por exemplo), ou quando o solo apresenta variações excessivamente altas na sua dependência com a umidade, pode ser difícil conduzir a simulação até a convergência. Nestes casos, pode ser necessário forçar um maior número de soluções do sistema algébrico a cada iteração antes de avançar no tempo ou, equivalentemente, exigir que as equações atinjam um nível de convergência mais rigoroso antes de prosseguir no transiente. Durante cada avanço no tempo, a convergência é controlada da seguinte forma:

- **Controle do acoplamento:**
para que o acoplamento fique completamente resolvido, é necessário que ao longo de cada iteração o método numérico "tenha tempo" de transmitir todas as informações referentes às modificações na equação da energia para a equação da umidade e vice-versa. Para isto estão disponíveis 3 controles, que especificam a proporção entre o número de soluções da equação da energia e da umidade e o número de repetições do conjunto:
 - 1) número de repetições da solução do sistema de equações associado à equação da energia (2.3.1), com valores normais entre 1 e 3;
 - 2) número de repetições da solução do sistema de equações associado à equação da umidade (2.3.2), com valores normais entre 2 e 5;
 - 3) número máximo de iterações do acoplamento (2.3.3), que pode valer desde 1 (quando se deseja chegar rapidamente a uma solução em regime permanente) até valores altos como 10 (quando se deseja uma

avaliação precisa do transiente). O valor 1 para este parâmetro leva ao mesmo resultado em regime permanente do que o 10; a diferença é que se o acoplamento é repetido poucas vezes, o regime transiente não é resolvido com precisão (diz-se que a simulação seguiu um transiente "distorcido" até chegar a regime permanente).

- Resíduos máximos aceitáveis:

O resíduo (R) é um parâmetro adimensional calculado a partir das equações algébricas. Para a equação da energia, equação (6-8), ele é obtido da seguinte forma:

$$R_p = \frac{(a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + S - a_P T_P)}{a_P T_P} \quad (C-2)$$

e de maneira semelhante para a equação da umidade, equação (6-16). Para cada ponto da malha há uma equação algébrica associada e, portanto, um valor de resíduo. A cada iteração é pesquisado o maior resíduo para cada uma das duas equações. Teoricamente, se as equações estivessem completamente convergidas, seus resíduos deveriam valer zero. Na solução numérica considera-se uma convergência completa se tais resíduos atingirem um número suficientemente baixo em relação à precisão do computador, neste caso 10^{-15} . Sendo assim, pode-se exigir uma convergência mais rigorosa ou menos rigorosa a cada iteração aumentando ou diminuindo o valor destes resíduos. Não ocorre avanço no tempo até que os resíduos tenham baixado dos valores que forem aqui especificados ou até que o número máximo de repetições das equações (2.3.1, 2 e 3) tenha sido atingido. Pode-se modificar:

- 1) Resíduo máximo para a equação da energia (2.3.4.1);
- 2) Resíduo máximo para a equação da umidade (2.3.4.2);

Normalmente, ambos os valores estão fixados em 10^{-10} , mas podem assumir desde valores como 10^{-6} (solução grosseira para o transiente) até valores como 10^{-14} (solução extremamente precisa para o transiente).

- Relaxações:

A cada passagem do método de solução (a cada solução dos sistemas de equações), pode-se incorporar integralmente ao processo numérico a nova solução (ou seja, antes de seguir adiante pode-se calcular os novos coeficientes com o campo recém obtido, sem modificações), ou incorporar somente uma percentagem desta solução, de forma a atenuar variações bruscas nas grandezas de interesse (temperatura e umidade). Estas "percentagens" são denominadas de relaxações e têm um valor entre 0 e 1 para cada uma das duas equações. Valem 1, normalmente, quando o efeito de relaxar não é desejado. Pode-se ter:

- 1) Relaxação para o avanço da equação da energia (2.3.4.3);
- 2) Relaxação para o avanço da equação da umidade (2.3.4.4).

- Informações sobre convergência (S/N) (2.3.4.7):

Pode-se solicitar que durante a simulação apareçam na tela, para cada iteração:

- 1) a descrição da iteração: quantidade de iterações já realizadas;
- 2) o tempo transcorrido, em dias, desde o início da simulação;
- 3) a percentagem do total de iterações que já foi realizada;
- 4) os valores das temperaturas na superfície e no condutor do cabo central da linha;
- 5) a umidade (% em massa) de um ponto do solo próximo ao cabo central;
- 6) o número de repetições do acoplamento que foi necessário para atingir o critério de convergência especificado (nem todas as repetições especificadas no item (2.3.3) podem ter sido necessárias);
- 7) os resíduos para as equações da energia e da umidade (devem ficar abaixo de 10^{-7} se for desejado um transiente real preciso).

- Intervalos entre gravações (2.3.4.8):

A cada avanço no tempo (Δt), são calculadas as temperaturas no condutor e na superfície do cabo central e a umidade no solo próximo. Estes valores são guardados em arquivo (POSPROC.GRF no subdiretório SAÍDAS) para servirem de base ao gráfico que é desenhado na tela como resultado (4.2, 4.3 e 4.4). Se o avanço estipulado for pequeno (menor do que 6 horas) e a simulação desejada for extensa (mais de dois anos), este arquivo pode ficar muito extenso e não será possível mostrar todos os seus pontos na tela. Porém, não é

necessário atualizar o arquivo a cada avanço no tempo. Pode-se guardar apenas os resultados que são obtidos a cada 5 avanços, por exemplo, que o gráfico que aparecerá na tela ainda será bastante preciso. Este número de avanços entre gravações é especificado neste item.

4.1.4.2 Controle do avanço no tempo:

Para este controle estão disponíveis 4 parâmetros:

- Intervalo de tempo inicial, Δt , (3.2):
pode variar desde valores como 0.25 hora, quando se quer um acompanhamento cuidadoso da evolução do transiente, até valores tão altos como 10^5 horas, quando é interessante conhecer apenas a situação em regime permanente;
- Tempo final para processamento (3.1):
instante de tempo até onde há interesse de calcular o transiente. Neste instante o processamento pára e o usuário pode avaliar os resultados, pode gravar o caso para posterior utilização ou pode simplesmente seguir adiante;
- Razão de PG para os avanços no tempo (2.3.4.5):
se este parâmetro for maior do que 1, os intervalos de tempo aumentam segundo uma progressão geométrica a partir do intervalo inicial. Valores normais para este parâmetro oscilam entre 1 (intervalos de tempo constantes) até 1,01 (progressão acentuadamente rápida do tamanho dos intervalos ao longo do tempo);
- Máximo intervalo de tempo admissível (2.3.4.6):
se os Δt 's aumentarem segundo uma progressão geométrica, é necessário limitá-los, estabelecendo este valor máximo, pois do contrário haveria a possibilidade de se atingir rapidamente valores irreais (se há interesse em acompanhar o transiente cuidadosamente, não faz sentido permitir que Δt atinja valores maiores do que 1 dia, por exemplo).

4.2 EXECUÇÃO DA SIMULAÇÃO

Quando o caso estiver completamente definido, pode-se acionar a simulação (3.3), a qual irá calcular os campos de temperaturas e umidades em torno dos cabos para cada avanço no tempo. Os itens "intervalo de tempo" (3.2) e "tempo final de simulação" (3.1) estão posicionados próximos ao comando de execução para facilitar o controle do tempo transcorrido.

Assim que a simulação é acionada, o programa primeiro "acomoda" o campo de umidades. Isto é feito pela simulação da equação da umidade por 6 meses sem impor nenhuma geração de calor. Este é um tempo suficiente para que o campo de umidades praticamente entre em regime permanente. Logo em seguida é iniciada a geração de calor e o campo de temperaturas também começa a se modificar e a influenciar o campo de umidades.

O resultado de uma simulação depende das condições físicas e geométricas do problema, mas também do modo como o usuário conduz a execução. Alguns detalhes importantes a observar são o tamanho dos intervalos de tempo que serão adotados e a escolha da malha computacional.

4.2.1 ESCOLHA DO AVANÇO NO TEMPO

Os cálculos executados pelo programa visam simular a evolução da temperatura dos cabos ao longo do tempo, a partir de um campo inicial até algum instante pré-determinado (6 meses de simulação, por exemplo). Este campo inicial pode ser determinado no instante $t=0$ ou pode vir de algum arquivo, quando uma parte do transiente já tiver sido executada previamente.

O resultado final após um longo período de simulação (correspondente a mais de 2 anos de vida útil dos cabos) é sempre o mesmo, para uma mesma malha: a condição de *regime permanente*, em que todo o calor gerado pelos cabos atravessa as fronteiras do domínio. Esta é a situação em que, se nenhuma condição de contorno se modificar, o sistema "cabos+solo" se estabiliza.

Por outro lado, o processo de avanço no tempo até esta condição estável depende do modo como serão calculados os intervalos de tempo (Δt) a partir do instante inicial. Para que a curva (Temperatura X tempo) obtida

seja correta, é preciso adotar um Δt (3.2) bem pequeno, para garantir precisão em relação ao tempo. Mas pode-se também atingir a condição de estabilidade com um valor alto para Δt . Neste caso só fica correto o resultado final, que é a condição de regime permanente; os resultados intermediários, que descrevem a evolução das temperaturas e umidades *ao longo* do tempo ficam errados (a simulação chega à condição de regime permanente correta mas o processo transiente fica "distorcido").

4.2.1.1 Cálculo para regime permanente

Para obter a situação de regime permanente, basta usar um valor bem grande de Δt (10^5 horas, por exemplo) no mesmo caso preparado para o transiente. Neste caso a variável "tempo" (3.1) fica sem sentido e pode assumir valores tão altos como 100000 dias ou mais. O que controla a simulação são os valores de resíduo que são calculados ao final de cada avanço no tempo (ver item 4.1.4.1, pág. 27). Deve-se seguir adiante a simulação até que os balanços demonstrem que foi alcançada convergência completa (ver item 4.3.1, pág. 32).

Exatamente por representar o estado final que deve ser alcançado pelo processo transiente, o cálculo para regime permanente deve sempre ser feito antes do cálculo do transiente. Na maioria dos casos, o regime permanente é atingido rapidamente, com relativamente pouco tempo de computação.

4.2.1.2 Cálculo em regime transiente

O resultado em regime permanente não depende do intervalo de tempo adotado, mas a curva que descreve a evolução transiente da temperatura do condutor do cabo central pode se modificar bastante de acordo com o Δt escolhido. De um modo geral, para um transiente preciso deve-se adotar o menor Δt possível. Porém, com avanços muito pequenos no tempo, pode ser necessário um tempo muito grande de computação para chegar ao instante final estipulado. O ideal seria poder obter um transiente preciso mesmo com um Δt bem grande.

O que se faz é adotar um valor razoável para Δt : 6 horas, por exemplo. Os resultados de um transiente de 1 mês obtidos com este Δt devem ser comparados com aqueles que seriam obtidos com um valor de Δt bem menor (a metade, por exemplo). Se a diferença for pequena, o Δt de 6 horas é considerado suficiente e pode ser adotado para simulações maiores.

Pode-se ainda manter um Δt fixo o tempo todo ou partir de um Δt pequeno (pois no início as modificações dos campos são mais intensas), passando ao longo do tempo para valores maiores de Δt (quando já estiver se aproximando o regime permanente). Este tipo de procedimento pode permitir a obtenção de uma curva precisa ao longo do tempo com um número total de avanços muito menor do que com Δt constante. Porém, a correta razão de aumento do Δt (2.3.4.5) ao longo do tempo tem que ser determinada com cuidado, iniciando-se com uma razão bem grande (1.01, por exemplo) e refazendo a simulação com razões menores. Quando a curva de transiente não mudar mais, pode-se parar de diminuir a razão de avanço. Este é um recurso adicional que só deve ser utilizado em simulações muito longas, pois representa a inclusão de mais uma variável que terá que ser otimizada.

4.2.1.3 Cálculo com cargas cíclicas

O valor de Δt para cargas cíclicas deve necessariamente ser menor do que 6 horas, pois caso contrário não será possível reproduzir a curva de variação diária de carga, a qual apresenta um valor nas primeiras 18 horas do dia e um outro valor (maior) nas últimas 6 horas. Além disto, o valor de Δt não pode aumentar ao longo do tempo, pois fatalmente não reproduziria com precisão uma curva de carga com 2 patamares, como é o caso de cargas cíclicas.

4.2.2 ESCOLHA DA MALHA COMPUTACIONAL

O resultado que o programa fornece, tanto em regime permanente como ao longo do transiente, depende da malha adotada. O programa fornece resultados para a malha que tiver sido especificada, mas não testa se a malha está adequada (bem refinada) ou se o número de volumes é insuficiente (malha grosseira).

De um modo geral, quanto mais refinada a malha (quanto maior o número de divisões do domínio), mais preciso será o resultado. Mas uma malha mais refinada envolve maior número de pontos e exige mais memória, a qual pode não estar disponível. Além disto, como o método de solução associa uma equação algébrica a cada volume, quanto mais volumes mais equações algébricas a resolver e mais longo é o tempo de simulação.

Visualmente é possível deduzir aproximadamente se a malha está suficientemente refinada ou não (2.2.0), mas o modo correto de conduzir a simulação é:

- 1) rodar o programa até regime permanente para uma malha que visualmente pareça satisfatória (às vezes, o programa pode não convergir para malhas grosseiras demais);
- 2) adotar uma malha mais refinada (se possível, com um número total de volumes 50% maior do que o do item 1);
- 3) se o valor da temperatura no condutor do cabo central em regime permanente se modificar menos do que 2%, a malha utilizada no item 1) estava adequada e pode ser utilizada para a avaliação do transiente.

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Quando a variável que controla o tempo atinge o tempo final especificado nos dados de entrada, pode-se obter 3 tipos de resultados:

- balanços de calor e de umidade;
- evolução das temperaturas do cabo central da linha ao longo do tempo;
- evolução da umidade do solo próximo ao cabo central ao longo do tempo.

4.3.1 BALANÇOS DE CALOR E DE UMIDADE

Ao ser selecionado este tipo de resultado (4.1), é apresentada na tela uma análise da simulação até aquele instante (para obter uma cópia impressa, basta apertar a tecla "I"). Nesta análise são exibidos os seguintes itens:

- 1) **Um resumo dos dados de entrada;**
- 2) **Resultados parciais da simulação:**

No próprio título é informado o tempo transcorrido de simulação (em dias), ou seja, a que instante no tempo se referem os campos de temperatura e umidade que estão na memória do computador no momento em que a simulação é interrompida para análise dos resultados. A partir destes campos, são calculados e apresentados neste item:

- as temperaturas na superfície e no condutor do cabo central:
toda a simulação do aquecimento dos cabos e da migração da umidade nos solos que os circundam tinha por objetivo principal chegar a estes valores. Ou seja, efetua-se a simulação para determinar a solução do problema: "dado que há 3 cabos enterrados em um solo gerando calor, qual a eficiência deste solo em dissipar o calor gerado?" Como resposta escolheu-se determinar a temperatura de equilíbrio no condutor destes cabos; um processo eficiente de dissipação do calor (incluindo condução pelo solo e transporte associado à umidade) levaria a um valor baixo para esta temperatura e vice-versa. Neste item são mostrados os valores obtidos pelo programa após a simulação que foi especificada nos dados de entrada;
- o nível de umidade (% em massa) próximo ao cabo central:
a umidade participa decisivamente dos processos de transferência de calor. É de esperar que um solo mais úmido seja mais eficiente para dissipar o calor gerado nos cabos e que solos mais secos retenham mais o calor, levando a temperaturas de equilíbrio mais altas. Em vista disto, é importante acompanhar o comportamento da umidade no solo, paralelamente ao da temperatura. Como não há um resultado bem definido que ilustre a evolução da umidade (no caso da temperatura, a temperatura nos cabos é um bom indicativo de problemas na convergência), é aqui apresentado simplesmente o valor que é calculado para a umidade em um ponto próximo ao cabo central. Pelo acompanhamento deste valor pode-se, por exemplo, saber se o solo que circunda o cabo está secando muito rapidamente, quando então se caracterizaria uma situação em que possivelmente a temperatura dos cabos tenderia a subir sem controle, antes mesmo que fosse atingido regime permanente. Neste caso, a simulação tem que ser conduzida com mais cuidado.

- 3) **Um balanço de calor:**

Sabe-se quanto calor é gerado, já que este é um dado de entrada. Do ponto de vista computacional repete-se o processo que ocorre na realidade física, ou seja, este calor vai aos poucos sendo passado para o domínio (solo) que circunda os cabos. A rapidez com que ocorre esta "transferência" vai depender da capacidade do solo de absorver o

calor que lhe está sendo entregue (ou seja, vai depender da capacidade térmica do solo). De qualquer forma, após passado algum tempo, deve-se chegar a regime permanente, ou seja, todo o calor que for gerado pelos cabos deverá estar atravessando os limites do domínio físico (e, portanto, computacional). Neste momento, somadas a quantidade de calor (em [W/m]) que atravessa a calçada, com o calor que atravessa as laterais do domínio e com o calor que sai por baixo do domínio, deve-se obter exatamente o calor que está sendo gerado.

Neste item da tela de resultados são apresentados os fluxos de calor que atravessam cada uma das fronteiras (calçada, fronteiras laterais e fronteira inferior) e, entre parênteses, a percentagem que os mesmos representam em relação ao calor que é gerado. Em regime permanente, deve-se ter, portanto, uma certa distribuição percentual entre as fronteiras do domínio e uma indicação de 100 % no item "calor TOTAL que sai".

Este balanço pode ser muito útil no acompanhamento de um processo transiente e na avaliação do regime permanente mas não tem utilidade em simulações com cargas cíclicas.

4) Um balanço de umidade:

Da mesma forma que para o caso do calor, é desejável saber se o campo de umidades obtido computacionalmente levou a uma distribuição coerente de umidade no domínio. Por exemplo, se é calculado que há um fluxo de água atravessando a fronteira inferior do domínio por gravidade, este mesmo valor de fluxo deverá, em regime permanente, estar atravessando as fronteiras laterais. Esta é a única situação possível, já que a calçada está modelada como impermeável.

Para permitir a verificação da consistência do campo de umidades, são apresentados neste item 3 valores de fluxo de umidade:

- massa (quantidade de água) que sai pela calçada:
deve ser tão próxima de zero quanto permita a precisão do computador (normalmente, próximo de 10^{-7});
- massa que entra nas laterais:
vazão (em [kg/dia]) de umidade que entra no domínio pelas laterais; como descrito anteriormente, em regime permanente deverá estar muito próximo da massa que sai pela fronteira inferior;
- massa que sai por baixo (em [kg/dia]):
a maior parte deste fluxo vem do efeito da gravidade; tem que ser compensado pela massa que entra nas laterais;
- balanço de massa:
somando-se, em regime permanente, a massa que entra na calçada (muito próxima de zero), com a massa que sai por baixo, com a massa que entra pelas laterais, deve-se chegar tão próximo quanto possível de zero. Na prática, quando o balanço atinge valores da ordem de 10^{-6} , já não há mais mudanças significativas no campo de umidades, ou seja, já não é preciso avançar mais no transiente.

4.3.2 EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS DO CABO CENTRAL

Uma outra opção de resultados é este gráfico na tela com a evolução da temperatura na superfície ou no condutor do cabo central ao longo do transiente (4.2 e 4.3). Desta forma, pode-se ir acompanhando o efeito sobre a simulação de cada novo avanço de simulação. Pode-se também observar oscilações e complicações no processo de convergência, indicando uma possível necessidade de modificação de algum parâmetro computacional. Note-se que a abscissa (variável tempo) está em escala logarítmica.

4.3.3 EVOLUÇÃO DA UMIDADE PRÓXIMO AO CABO CENTRAL

De maneira semelhante às temperaturas nos cabos, a seleção deste item (4.4) leva à apresentação de um gráfico com a evolução temporal (tempo em escala logarítmica) do nível de umidade do solo (% em massa) em um ponto próximo ao cabo central. Acompanhando este gráfico pode-se identificar, após cada execução, se a tendência do solo encostado no cabo central é de secar ou de atingir um conteúdo estável de umidade.