

3. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DA TERRA

Os resultados obtidos até este ponto mostraram que a onda terrestre depende fundamentalmente dos parâmetros elétricos do solo. O conhecimento destes parâmetros é imprescindível para o cálculo correto da intensidade do campo elétrico. A título de ilustração, a tabela I apresenta valores da condutividade e da constante dielétrica para alguns tipos de solo. É claro que esta tabela não esgota todas as possibilidades e os valores aqui indicados poderão ser usados em um determinado problema como uma primeira aproximação, a qual deverá ser corrigida assim que houver disponibilidade de medidas no local em estudo. Um levantamento realizado no Brasil levou aos valores indicados na figura 5 [14].

TABELA I

PARÂMETROS ELÉTRICOS DE ALGUNS SOLOS TÍPICOS

Tipo de Solo	Condutividade (mmho/m)	Constante Dielétrica
Água do mar	5000	80
Água doce	1	80
Solo bom (região de pastagens, úmi das)	20	30
Solo médio	10	10
Solo seco (terreno arenoso e pedregoso)	1	4



Obs. VALORES INDICADOS EM mmho/m

FIG 5 - DISTRIBUIÇÃO DE CONDUTIVIDADE DO SOLO NO BRASIL

Por outro lado, conforme comentado anteriormente, as teorias clássicas podem ser utilizadas na determinação dos parâmetros elétricos do solo. Ilustrando este procedimento, serão descritas nesta seção dois métodos onde, através da medida da intensidade do sinal recebido, é possível estimar os valores da condutividade e da permissividade da terra. O primeiro utiliza a relação entre as componentes ortogonais de uma onda irradiada por uma antena com polarização vertical. O outro método é função da atenuação observada na amplitude do campo com a distância. Cumpre destacar que em ambos será usada a teoria da terra plana e, em consequência, as medidas deverão ser realizadas em distâncias não superiores ao limite estabelecido por (7).

3.1. Método da inclinação da onda

O parágrafo 2.1 limitou-se a analisar a componente vertical (E_z) do campo elétrico devido a um dipolo orientado segundo o eixo z. Entretanto, existe também uma componente horizontal que, no caso de coordenadas cilíndricas, corresponde à componente radial (E_ρ). Na situação de campo distante, a componente horizontal pode ser desprezada em relação à vertical. No entanto, a medida da relação entre estas componentes pode ser usada na estimativa dos parâmetros elétricos do solo.

Segundo Wait [15], no caso da terra homogênea, a relação entre E_ρ e E_z é dada por,

$$I = \frac{E_\rho}{E_z} = \frac{\omega \epsilon_0 Z_1}{k_0 \cos \alpha}$$

onde

$$Z_1 = \eta_1 \sqrt{1 - k_0^2/k_1^2} \text{ - impedância de superfície;}$$

$$\eta_1 = \eta_0 \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\epsilon_1}} ; \eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi$$

Para incidência razante, $\alpha=0$ e,

$$I = \sqrt{1 - k_0^2/k_1^2} \eta_1/\eta_0 \quad (10)$$

Observa-se em (10) que I é complexo. Isto mostra que E_z e E_ρ não estão em fase. Consequentemente, o vetor campo elétrico descreve, em um ponto do espaço, uma elipse função do tempo. A elipse é traçada no plano perpendicular à superfície da terra que contém o eixo z (onde está localizada a antena transmissora, como mostra a figura 6). A orientação do eixo maior da elipse e a relação entre os eixos maior e menor são determinadas pelas relações entre as fases e as amplitudes de E_ρ e E_z . No caso da terra homogênea, a elipse gira no sentido anti-horário. Para a terra estratificada, a elipse poderá girar também no sentido horário. É obvio que a denominação de método de inclinação da onda deriva da conformação geométrica do problema.

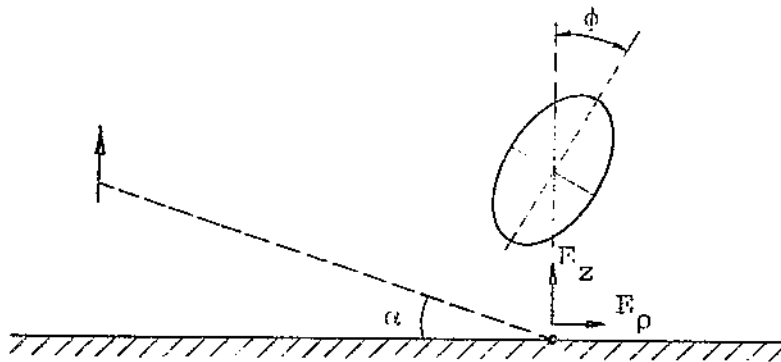


Fig. 6 - Geometria do método de inclinação da onda

É imediato concluir de (10) que a inclinação I pode ser calculada a partir de σ_1 e ϵ_1 . Inversamente, estes parâmetros também pode ser avaliados se I for conhecido. A razão r entre os eixos maior e menor da elipse, assim como o ângulo de inclinação ϕ do eixo maior são facilmente medidos. Determinar r e ϕ equivale a conhecer I , isto é, I pode ser obtido a partir de r e ϕ . Mais especificamente, o módulo e o argumento de I são dados por,

$$|I| = \sqrt{\frac{1+r^2 \operatorname{tg}^2 \phi}{r+\operatorname{tg}^2 \phi}} \quad (11)$$

e

$$\arg I = \pm \cos^{-1} \frac{(r^2-1) \operatorname{tg} \phi}{\sqrt{(r^2+\operatorname{tg}^2 \phi)(1+r^2 \operatorname{tg}^2 \phi)}} \quad (12)$$

O sinal do argumento de I depende da direção de rotação do vetor campo elétrico em torno da elipse mostrada na figura 6. Por sua vez, esta direção pode ser determinada pela relação de fase entre as componentes do campo elétrico ao longo dos eixos da elipse. Se a terra for homogênea, a direção será no sentido anti-horário e o sinal do argumento de I positivo. Por outro lado, se a terra for estratificada e a rotação no sentido anti-horário, os valores ϵ_1 e σ_1 correspondem aqueles que no caso da terra homogênea produziram a mesma inclinação da obtida com o solo estratificado. Os valores assim medidos poderão se aproximar dos correspondentes à camada superior dependendo da profundidade de penetração da frequência de operação. O efeito da estratificação, conforme foi comentado na seção anterior, faz com que a inclinação I_1 seja dada por,

$$I_1 = I Q \quad (13)$$

onde I é a inclinação relativa à terra homogênea com os parâmetros elétricos da camada superior e Q o fator de correção dado por (3). Embora não haja dificuldade na avaliação deste efeito [15], muito pouco tem sido feito no que se refere à determinação dos parâmetros elétricos da terra estratificada.

A estratificação do solo pode causar também uma rotação no sentido horário, correspondendo a um sinal negativo para o argumento de I . Nesta situação, os valores dos parâmetros ϵ_1 e σ_1 podem estar completamente descorrelatados da estrutura estratificada.

Uma vez conhecido $I = |I| \arg I$, tem-se de (10) que

$$I = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\epsilon'}} \sqrt{1 - \frac{\epsilon_0}{\epsilon'}} \quad (14)$$

A partir de (14) determina-se ϵ' e a seguir ϵ_1 e σ_1 . Cumpre destacar que este método leva a valores médios dos parâmetros elétricos do solo. A precisão depende da profundidade de penetração da frequência utilizada.

No que diz respeito à medida propriamente dita, em sua concepção mais simples, pode ser usada uma antena de recepção do tipo dipolo, montada em uma estrutura que permita sua rotação no plano que contém a antena de transmissão. Determina-se as posições dos eixos maior e menor de elipse, respectivamente, pelos valores máximos e mínimos da tensão nos terminais do dipolo. A descrição desta técnica, empregando dipolos cruzados, pode ser encontrada em um trabalho de King [16].

3.2. Método da atenuação da onda [17]

Este método utiliza medidas da intensidade do sinal na determinação dos parâmetros elétricos do solo. Estes parâmetros são obtidos a partir da comparação das medidas da atenuação do sinal ao longo de uma radial com os valores previstos teoricamente pela onda de superfície. Antes de passar à descrição do método em si deve ser lembrado que a distância numérica p , no caso de incidência razante, pode ser escrita na forma,

$$p = |p| e^{jb} = -j \frac{k_0 dz_1^2}{2\eta_0^2} \quad (15)$$

ou seja, p é proporcional a d/λ .

Utilizando (6) traça-se em papel log-log curvas da intensidade de campo em função da distância numérica ($|p|$ como abcissa e a fase b como parâmetro). A figura 7 ilustra este procedimento, onde o campo $|E_z|$ foi normalizado de tal forma que para $|p|=1$ tem-se $|E_z|=1$. Toma-se então uma série de medidas de E_z ao longo de uma radial, com as antenas transmissora e receptora situadas ao nível do solo (onda de superfície). Com os valores medidos traça-se outro gráfico, em papel log-log transparente, com as mesmas divisões de escala da figura 7, tendo porém como abcissa o parâmetro d/λ . É claro que a curva experimental terá a mesma forma das curvas da figura 7, com a diferença de não ser normalizada. Os parâmetros elétricos do solo são obtidos através do casamento da curva experimental com uma das curvas teóricas. Desloca-se vertical e horizontalmente a curva experimental até que se obtenha o casamento desejado.

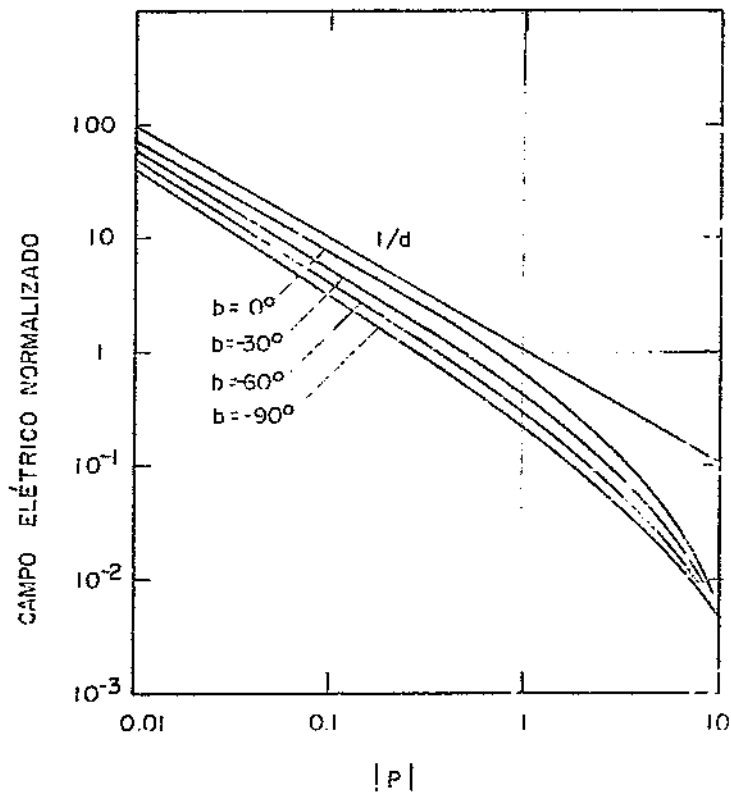


FIG. 7 — CURVA DE ATENUAÇÃO NORMALIZADA

De acordo com a proporcionalidade entre $|p|$ e d/λ , tom-se que

$$|p| = K \frac{d}{\lambda} \quad (16)$$

onde,

$$K = \pi \left| \frac{Z_1}{\eta_0} \right|^2 \quad (17)$$

Por outro lado, é fácil verificar que,

$$b = \arg \left[-j \left(\frac{Z_1}{\eta_0} \right) \right]^2 \quad (18)$$

Desta forma, com a superposição entre as curvas experimental e teórica determina-se K e b . Conhecidos estes parâmetros e usando (17) e (18) pode-se calcular Z_1 e, daí, chega-se a ϵ_1 e σ_1 .

Outra maneira de determinar os parâmetros elétricos do solo a partir de medidas deste tipo, consiste em traçar em um papel log-log uma família de curvas do campo elétrico vertical normalizado, para diversos conjuntos de valores de ϵ_1 e σ_1 , em função de d/λ . A curva experimental é traçada em um papel transparente, com as mesmas divisões de escala. Neste caso, como a escala horizontal é a mesma (d/λ), é suficiente fazer um deslocamento vertical para se obter o casamento das curvas. Uma vez obtido o casamento, lê-se diretamente os valores de ϵ_1 e σ_1 . Este processo dá um pouco mais de trabalho, no que diz respeito à obtenção das curvas teóricas porém permite maior precisão no cálculo. Além disto, este método pode ser adaptado a um computador onde, através de uma técnica de tentativas, os valores de ϵ_1 e σ_1 sejam obtidos numericamente.