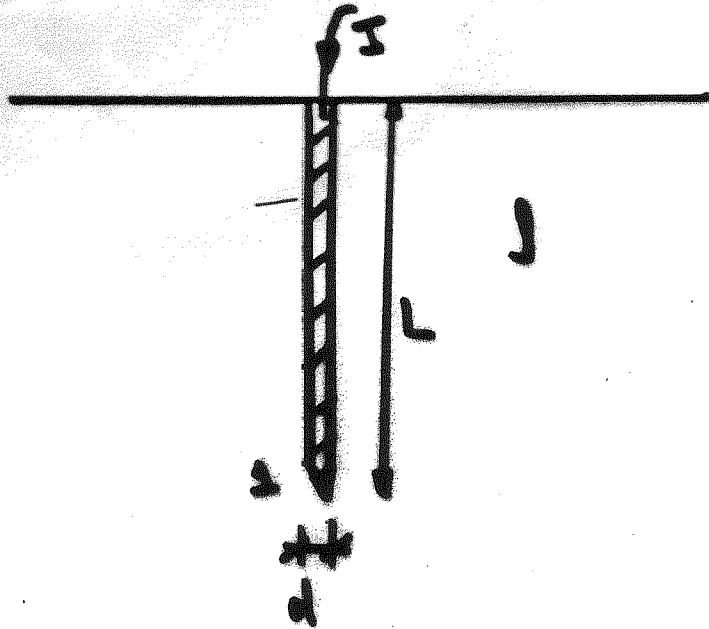
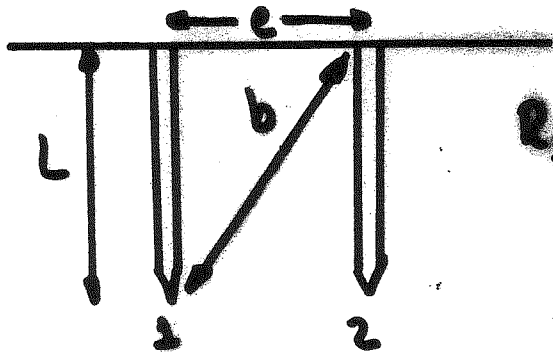


ATERRAMENTO - HASTE VERTICAL



$$R_{\text{HASTE}} = \frac{\rho_a}{2\pi L} \ln\left(\frac{4L}{d}\right) = R_{11}$$

MUTUAS ENTRE HASTES



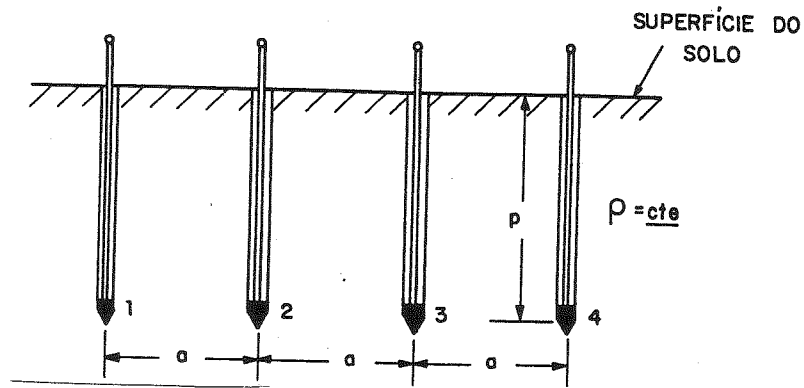
$$R_{12} = \frac{\rho_a}{4\pi L} \ln\left[\frac{(b+L)^2 - e^2}{e^2 - (b-L)^2}\right]$$

$$R_2 = R_{11} + R_{12} + \dots + R_{1n} \quad (\text{PI n hastes})$$

ASSOCIAÇÃO DE N HASTES

$$R_{eq} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}}$$

MÉTODO DE WENNER (3 CAMADA)



Quatro Hastes Cravadas no Solo

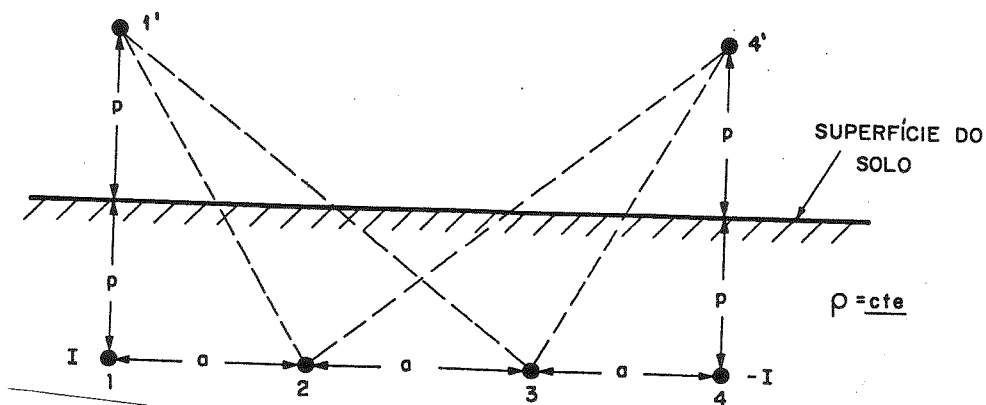


Imagem do Ponto 1 e 4

$$V_2 = \frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{1}{a} + \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right]$$

$$V_3 = \frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{1}{2a} + \frac{1}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} - \frac{1}{a} - \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} \right]$$

$$V_{23} = V_2 - V_3 = \frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right]$$

$$R = \frac{V_{23}}{I} = \frac{\rho}{4\pi} \left[\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right]$$

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}}} \quad [\Omega.m]$$

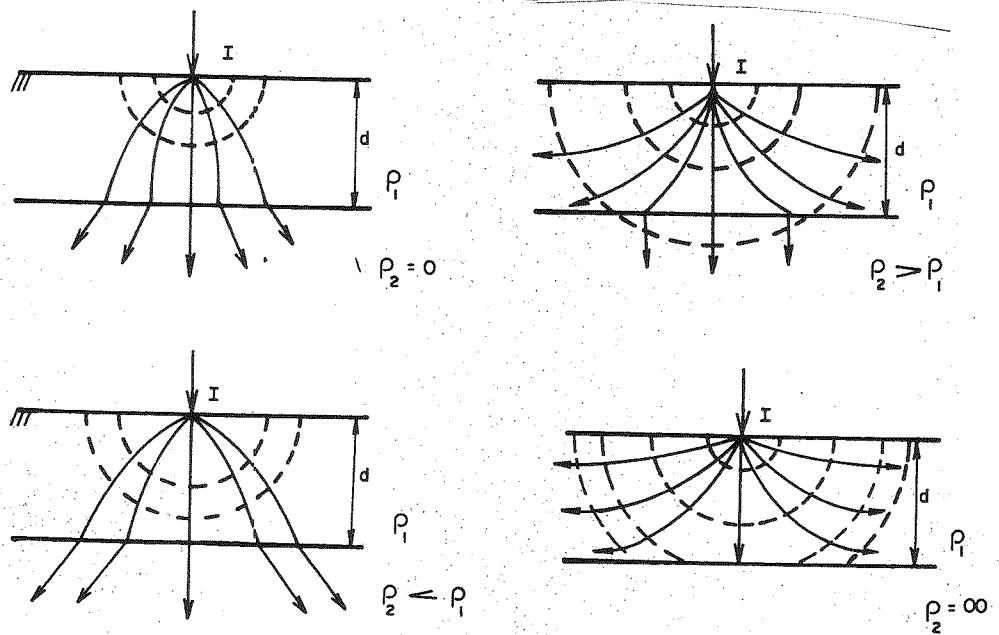
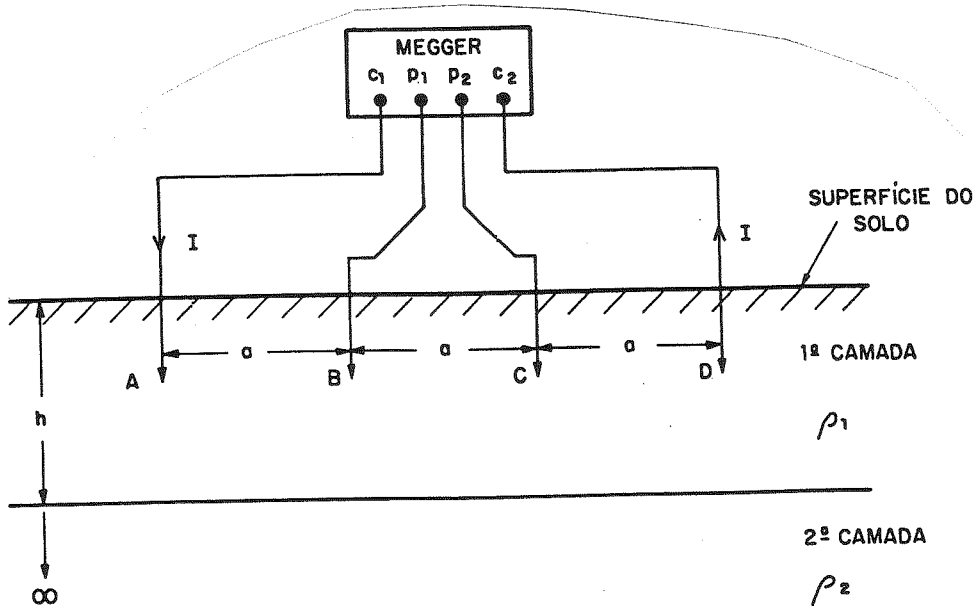


Figura 1.5.1: Estratificação do Solo em Duas Camadas

MÉTODO DE WENNER (2 CAMADAS)

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$



Configuração de Wenner no Solo de Duas Camadas

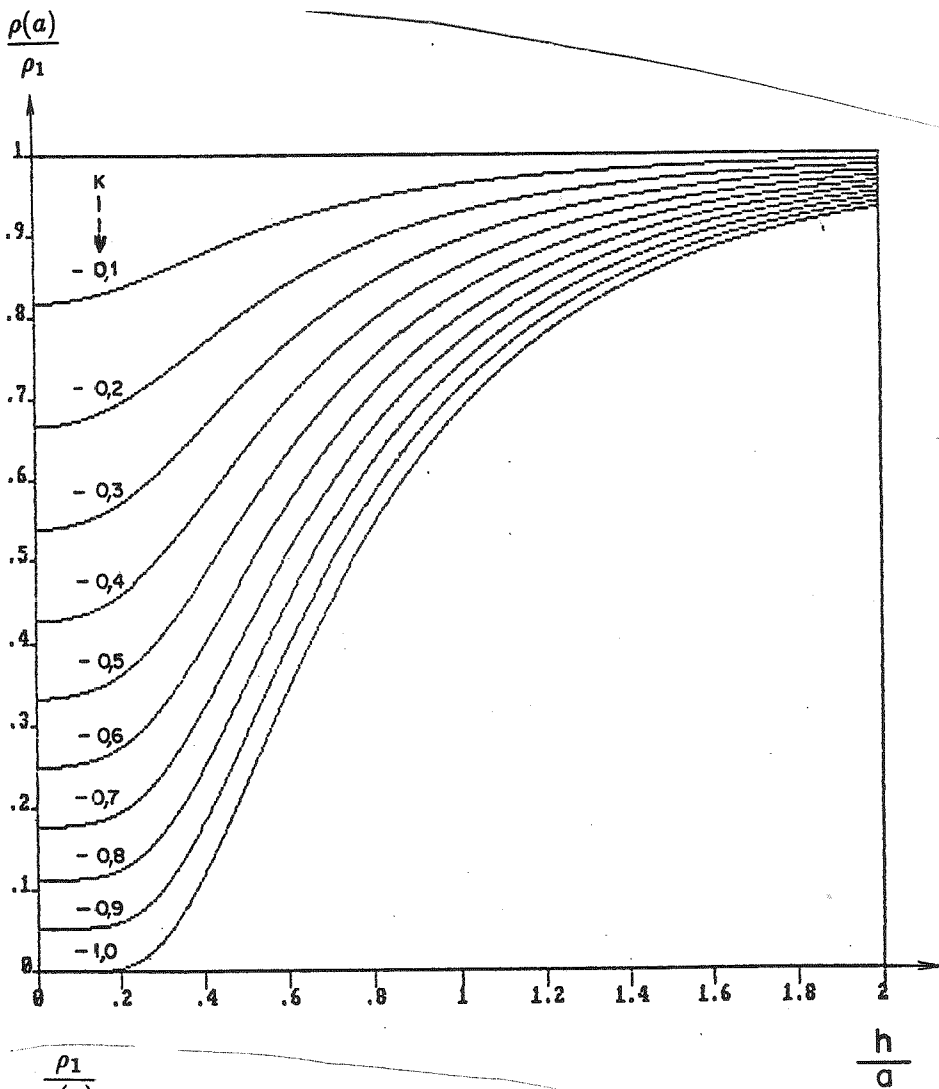
$$V_B = \frac{I\rho_2}{2\pi} \left[\frac{1}{a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{a^2 + (2nh)^2}} \right] - \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{2a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{(2a)^2 + (2nh)^2}} \right]$$

$$V_C = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{2a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{(2a)^2 + (2nh)^2}} \right] - \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{a^2 + (2nh)^2}} \right]$$

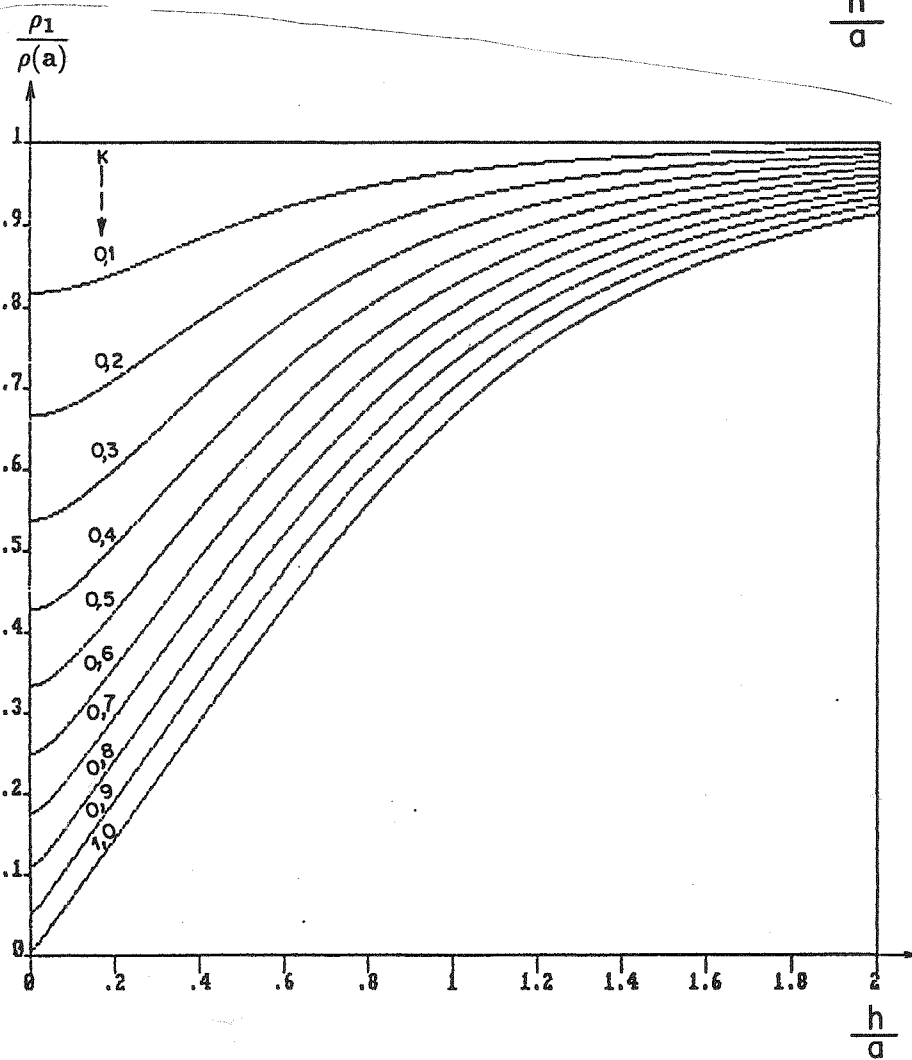
$$V_{BC} = \frac{I\rho_1}{2\pi a} \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n\frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n\frac{h}{a})^2}} \right] \right\}$$

$$\rho_a = 2\pi R a$$

$$\frac{\rho(a)}{\rho_1} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n\frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n\frac{h}{a})^2}} \right]$$

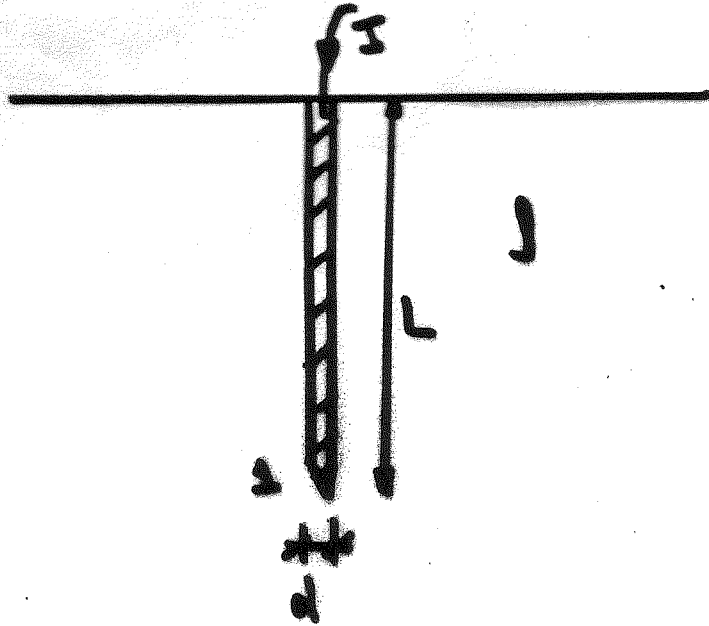


Curvas para K Negativos



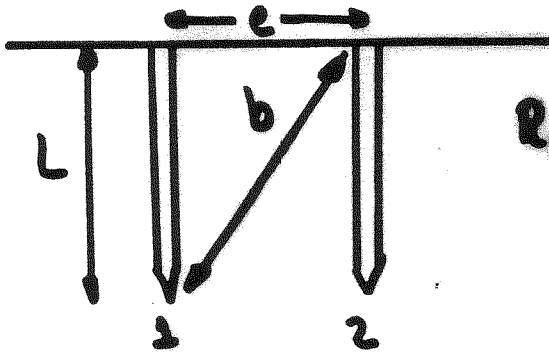
Curvas para K Positivos

ATERRAMENTO - HASTE VERTICAL



$$R_{\text{HASTE}} = \frac{J_a}{2\pi L} \ln\left(\frac{4L}{d}\right) = R_{s1}$$

MUTUAS ENTRE HASTES

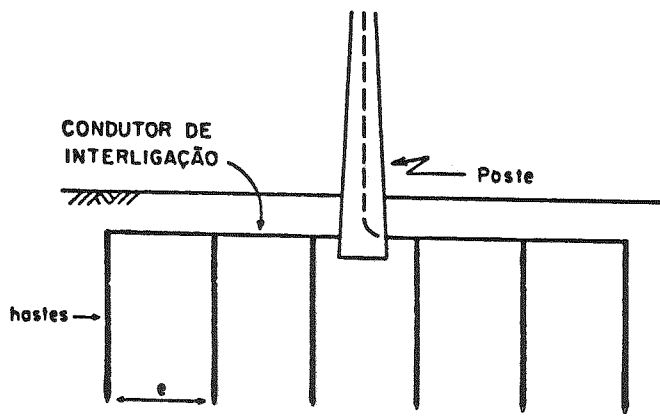


$$R_{s2} = \frac{J_a}{4\pi L} \ln\left[\frac{(b+L)^2 - e^2}{e^2 - (b-L)^2}\right]$$

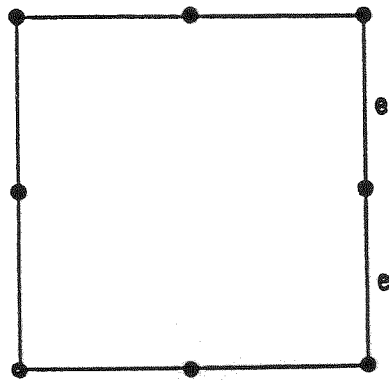
$$R_s = R_{s1} + R_{s2} + \dots + R_{sn} \quad (\text{PI n hastes})$$

ASSOCIAÇÃO DE N HASTES

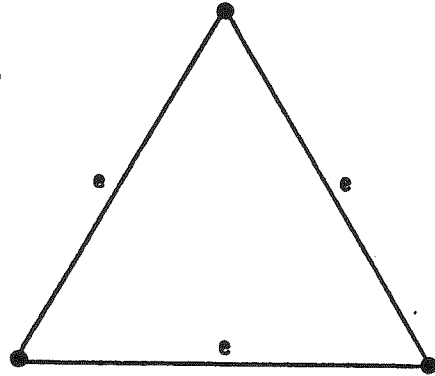
$$R_{eq} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}}$$



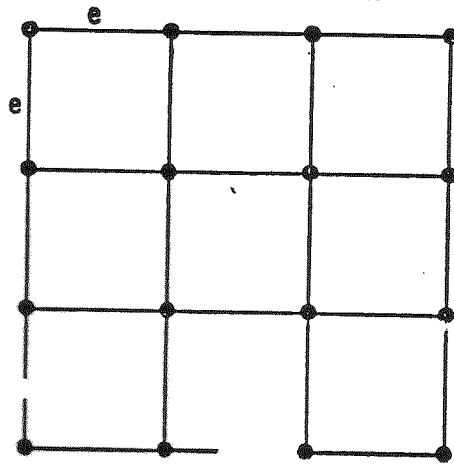
Hastes Alinhadas em Paralelo



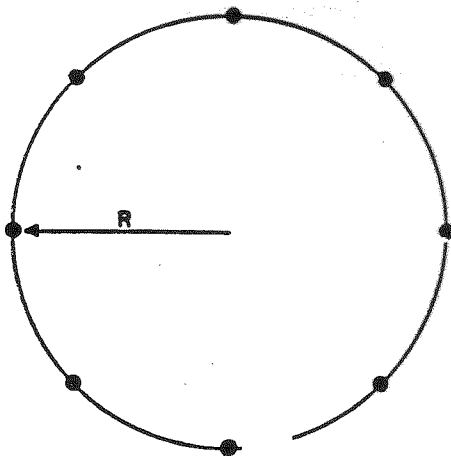
Quadrado Vazio



Triângulo Equilátero



Quadrado Cheio



Hastes em Circunferência

Dimensionamento de Sistema de Aterramento com Hastes em Triângulo

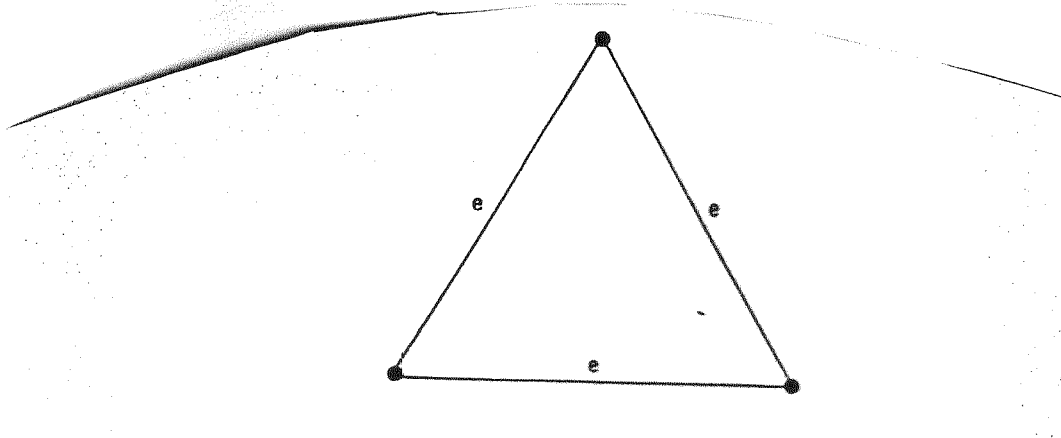


Figura 4.7.1: Triângulo Equilátero

Todo o dimensionamento do sistema em triângulo, baseia-se na definição do índice de redução (K) visto no subitem 4.5.1.

$$R_{eq\Delta} = K R_{1haste} \quad (4.7.1)$$

Onde:

R_{1haste} \Rightarrow Resistência elétrica de uma haste cravada isoladamente no solo

K \Rightarrow Índice de redução do sistema de aterramento

$R_{eq\Delta}$ \Rightarrow Resistência equivalente apresentada pelo sistema de aterramento em triângulo com lado "e"

Os índices de redução (K) são obtidos diretamente das curvas da figura 4.7.2.

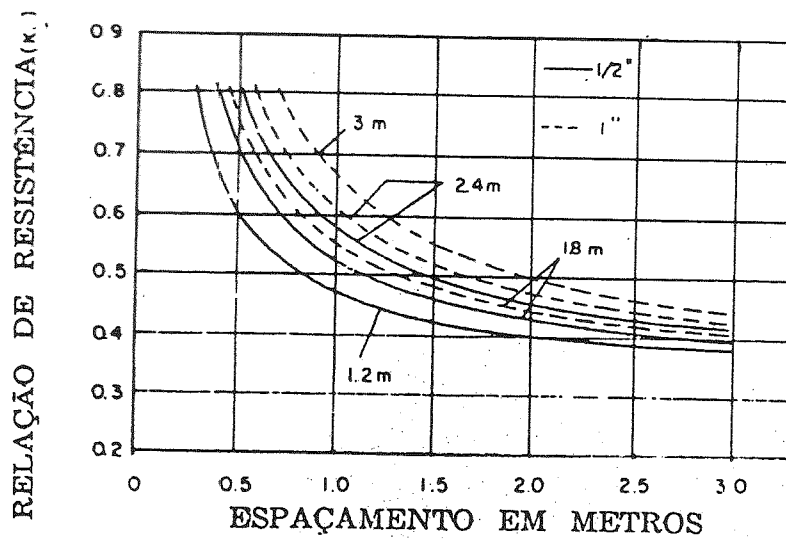


Figura 4.7.2: Curvas dos K x e

As curvas são para hastes de $\frac{1}{2}$ " e 1", com tamanhos de 1,2; 1,8; 2,4 e 3 metros.

A resistência equivalente do sistema é dada pela expressão 4.5.7 com o índice de redução (K) obtido das figuras 4.8.2 e 4.8.3.

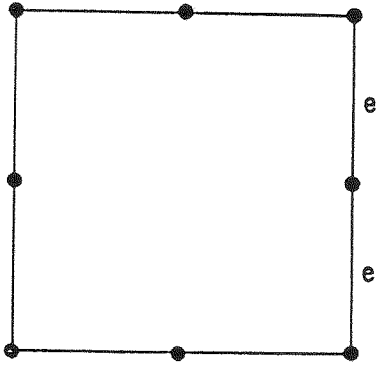


Figura 4.8.1: Quadrado Vazio

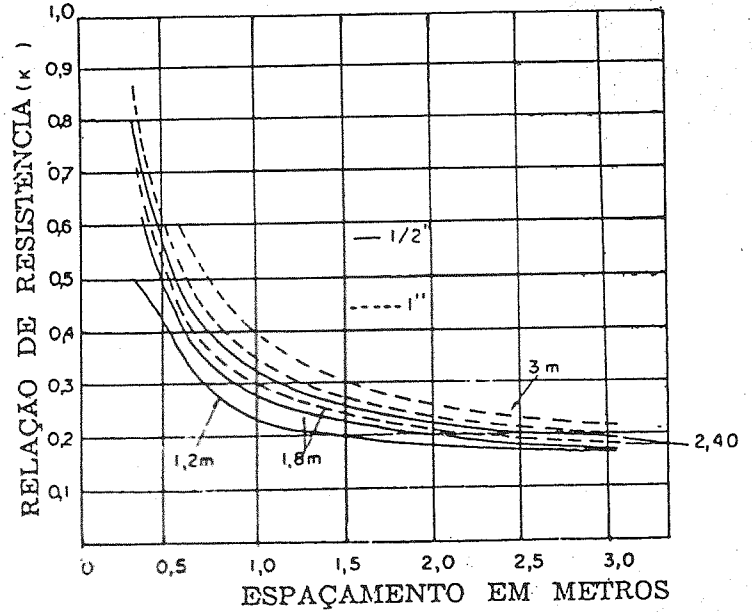


Figura 4.8.2: Oito Hastes em Quadrado Vazio

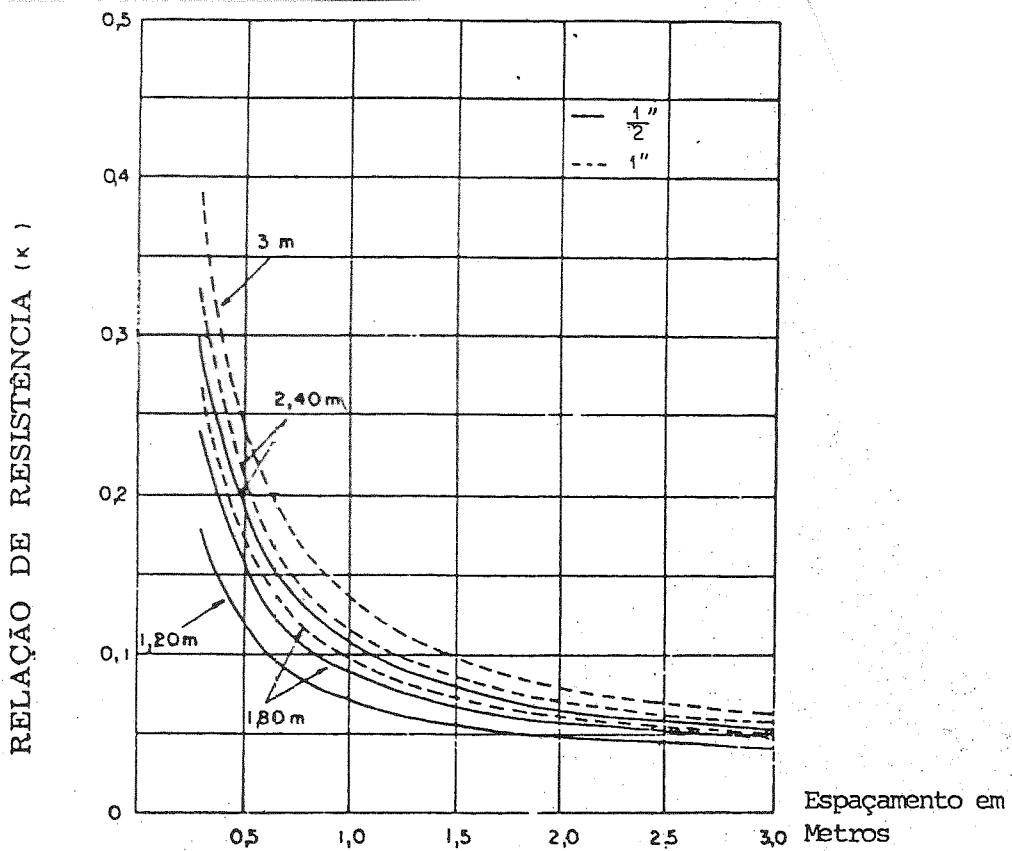


Figura 4.8.3: Trinta e Seis Hastes em Quadrado Vazio

Dimensionamento de Sistema com Hastes em Quadrado Cheio

Os índices de redução (K) são obtidos pelas curvas das figuras 4.9.2 e 4.9.3.

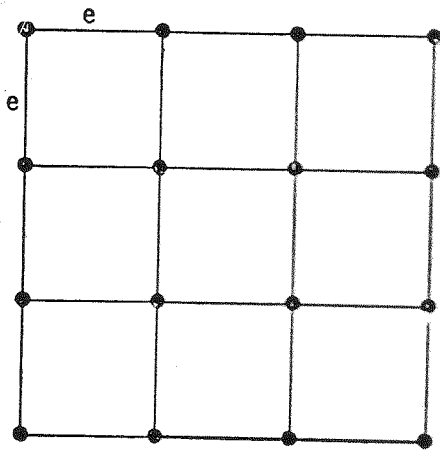


Figura 4.9.1: Quadrado Cheio

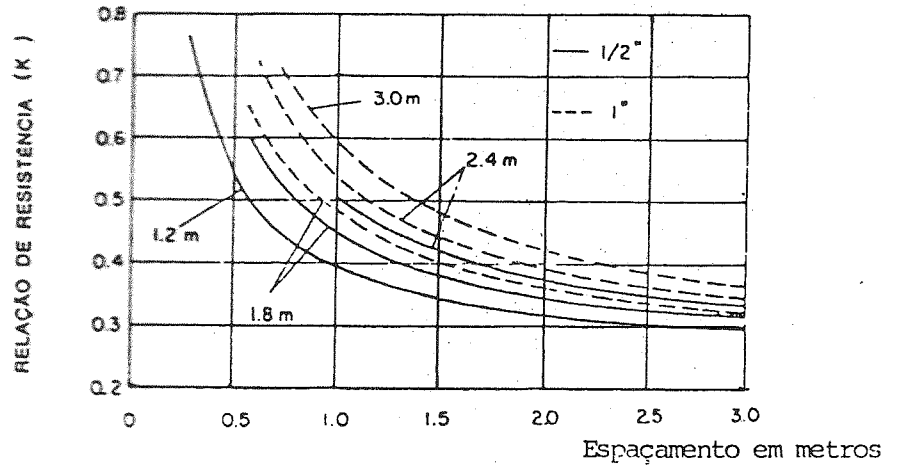


Figura 4.9.2: Quatro Hastes em Quadrado Cheio (Vazio)

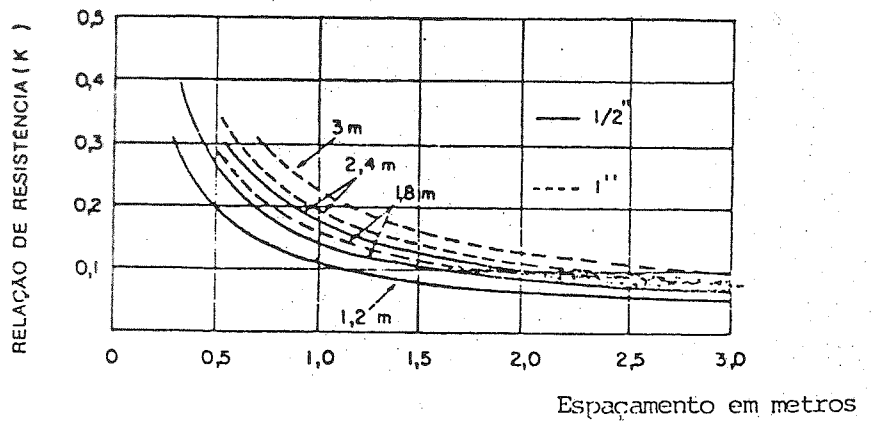


Figura 4.9.3: Trinta e Seis Hastes em Quadrado Cheio

Dimensionamento de Sistema com Hastes em Circunferência

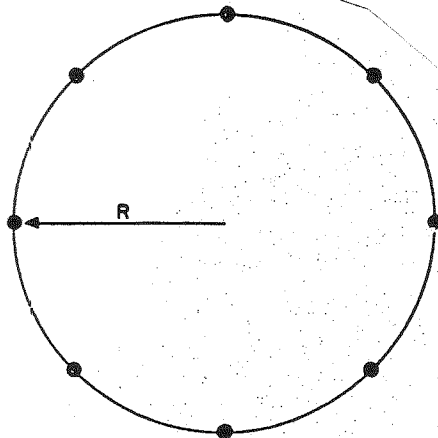


Figura 4.10.1: Hastes em Circunferência

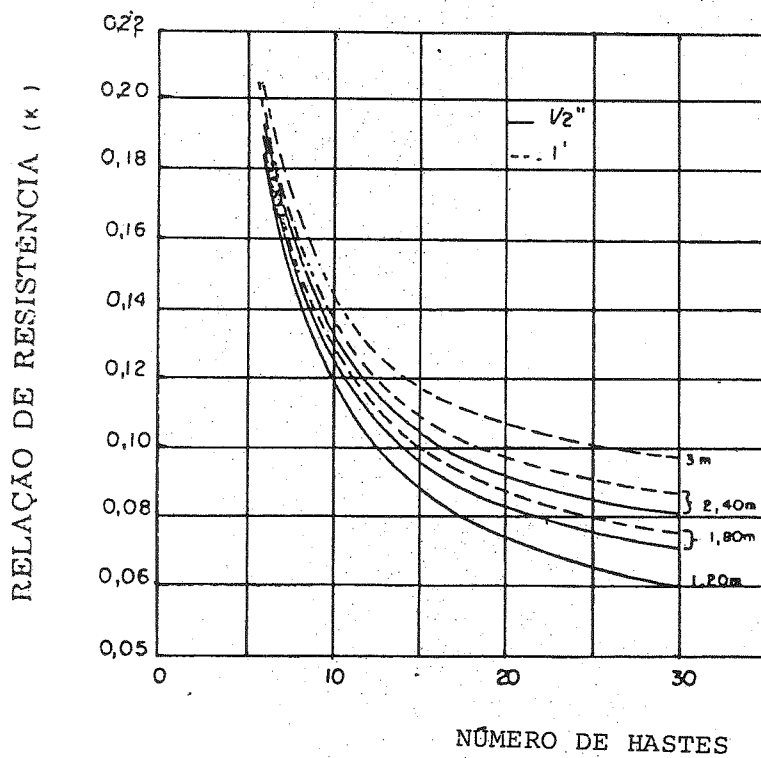


Figura 4.10.2: Hastes em Circunferência com Nove Metros de Raio

Resistência de Aterramento de Condutores Enrolados em Forma de Anel e Enterrados Horizontalmente no Solo

A figura 4.12.1 mostra um aterramento em forma de anel que pode ser usado aproveitando o buraco feito para a colocação do poste.

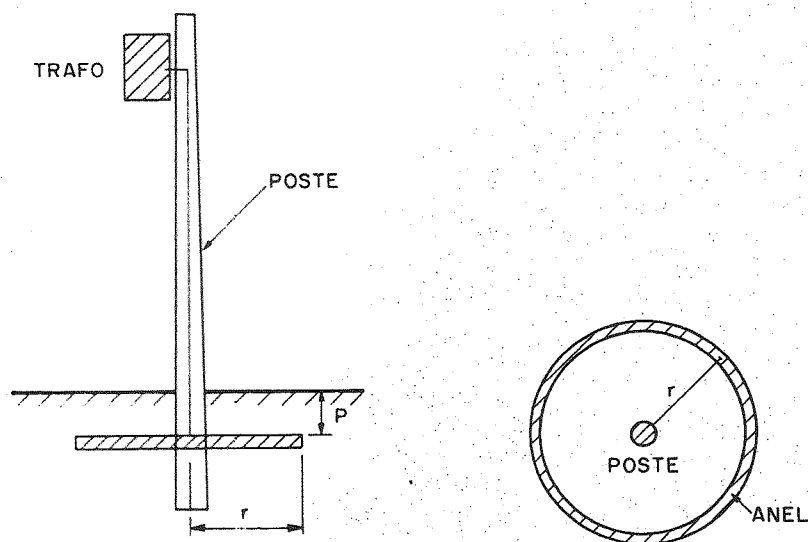


Figura 4.12.1: Aterramento em Forma de Anel

A resistência de aterramento em anel é dada pela fórmula 4.12.1.

$$R_{anel} = \frac{\rho a}{\pi^2 r} \ln \left(\frac{4r^2}{dp} \right) \quad [\Omega] \quad (4.12.1)$$

Onde:

$p \Rightarrow$ Profundidade que está enterrado o anel [m]

$r \Rightarrow$ Raio do anel [m]

$d \Rightarrow$ Diâmetro do círculo equivalente à soma da seção transversal dos condutores que formam o anel [m]

Sistemas com Condutor Enterrado Horizontalmente no Solo

A resistência de aterramento de um condutor enterrado horizontalmente no solo, é dada pela fórmula 4.13.1. Ver figura 4.13.1.

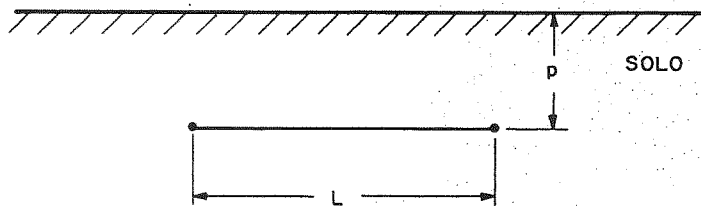


Figura 4.13.1: Condutor Enterrado Horizontalmente no Solo

$$R = \frac{\rho a}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{2L^2}{rp} \right) - 2 + \frac{2p}{L} - \left(\frac{p}{L} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{p}{L} \right)^4 \right] \quad [\Omega] \quad (4.13.1)$$

Onde:

p ⇒ Profundidade em que está enterrado o condutor [m]

L ⇒ Comprimento do condutor [m]

r ⇒ Raio equivalente do condutor [m]

Apresenta-se a seguir, as fórmulas para a obtenção da resistência de aterramento dos condutores enterrados horizontalmente no solo, que tenham as configurações da figura 4.13.2.

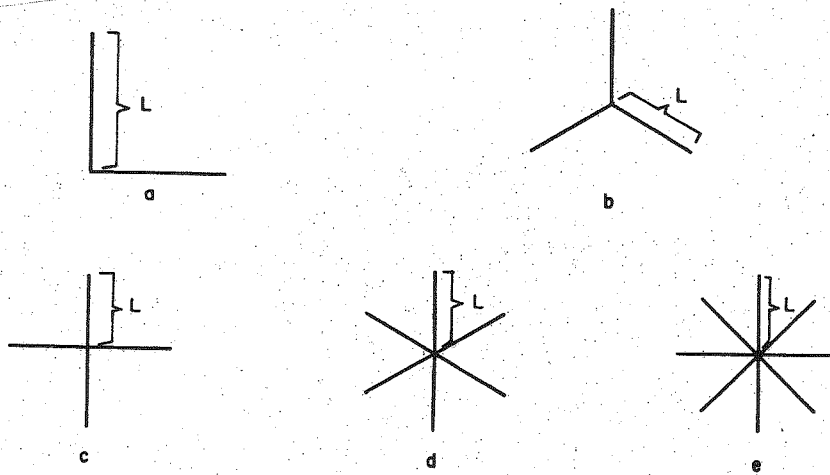


Figura 4.13.2: Configurações Horizontais de Condutores

a) Dois condutores em ângulo reto, letra (a) da figura 4.13.2.

$$R = \frac{\rho a}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{L^2}{2rp} \right) - 0,2373 + 0,8584 \frac{p}{L} + 1,656 \left(\frac{p}{L} \right)^2 - 10,85 \left(\frac{p}{L} \right)^4 \right] \quad [\Omega] \quad (4.13.2)$$

Onde:

L \Rightarrow Tamanho de cada segmento retilíneo a partir da conexão [m]

b) Configuração em Estrela com três pontas, letra (b) da figura 4.13.2.

$$R = \frac{\rho a}{3\pi L} \left[\ln \left(\frac{L^2}{2rp} \right) + 1,077 - 0,836 \frac{p}{L} + 3,808 \left(\frac{p}{L} \right)^2 - 13,824 \left(\frac{p}{L} \right)^4 \right] \quad [\Omega] \quad (4.13.3)$$

c) Configuração em Estrela com quatro pontas, letra (c) da figura 4.13.2.

$$R = \frac{\rho a}{4\pi L} \left[\ln \left(\frac{L^2}{2rp} \right) + 2,912 - 4,284 \frac{p}{L} + 10,32 \left(\frac{p}{L} \right)^2 - 37,12 \left(\frac{p}{L} \right)^4 \right] \quad [\Omega] \quad (4.13.4)$$

d) Configuração em Estrela com seis pontas, letra (d) da figura 4.13.2.

$$R = \frac{\rho a}{6\pi L} \left[\ln \left(\frac{L^2}{2rp} \right) + 6,851 - 12,512 \frac{p}{L} + 28,128 \left(\frac{p}{L} \right)^2 - 125,4 \left(\frac{p}{L} \right)^4 \right] \quad [\Omega] \quad (4.13.5)$$

e) Configuração em Estrela com oito pontas, letra (e) da figura 4.13.2.

$$R = \frac{\rho a}{8\pi L} \left[\ln \left(\frac{L^2}{2rp} \right) + 10,98 - 22,04 \frac{p}{L} + 52,16 \left(\frac{p}{L} \right)^2 - 299,52 \left(\frac{p}{L} \right)^4 \right] \quad [\Omega] \quad (4.13.6)$$