O cálculo da resistência equivalente de hastes paralelas alinhadas é feito usando as fórmulas 4.2.1, 4.5.1, 4.5.2 e 4.5.5, e pela fórmula 4.5.6 é calculado o coeficiente de redução (K).

Exemplo 4.6.1

Calcular a resistência equivalente do aterramento de quatro hastes alinhadas como mostra a figura 4.6.2 em função de ρa. Determinar o índice de redução (K).

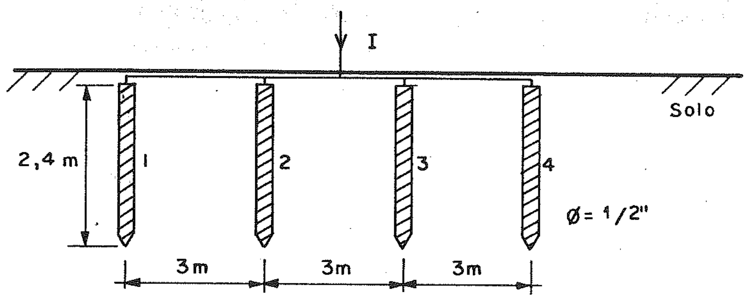

Figura 4.6.2: Sistema com Quatro Hastes Alinhadas

Escrevendo a fórmula 4.5.1 extensivamente para o sistema de quatro hastes, teremos:

$$\begin{aligned}R_1 &= R_{11} + R_{12} + R_{13} + R_{14}\\ R_2 &= R_{21} + R_{22} + R_{23} + R_{24}\\ R_3 &= R_{31} + R_{32} + R_{33} + R_{34}\\ R_4 &= R_{41} + R_{42} + R_{43} + R_{44}\end{aligned}$$

Como as hastes são todas do mesmo formato, temos:

$$R_{11} = R_{22} = R_{33} = R_{44} = \frac{\rho a}{2\pi L}\, ln\left(\frac{4L}{d}\right) = \frac{\rho a}{2\pi \,.\, 2,4}\, ln\left(\frac{4\,.\,2,4}{\frac{1}{2}\,.\,2,54\,.\,10^{-2}}\right) = 0,44\rho a$$

Devido à zona de bloqueio, as resistências mútuas de acréscimo são o usando a fórmula 4.5.2.

$$R_{12} = R_{21} = R_{23} = R_{32} = R_{34} = R_{43} = \frac{\rho a}{4\pi L}\, ln\left[\frac{(b_{12}+L)^2 - e_{12}^2}{e_{12}^2 - (b_{12}-L)^2}\right]$$

$$b_{12} = \sqrt{L^2 + e_{12}^2} = \sqrt{5,76+9} = \sqrt{14,76} = 3,841m$$

$$R_{12} = \frac{\rho a}{4\pi \,.\, 2,4}\, ln\left[\frac{(3,841+2,4)^2 - 3^2}{3^2 - (3,841-2,4)^2}\right] = 0,048\rho a$$

$$R_{13} = R_{31} = R_{42} = R_{24} = \frac{\rho a}{4\pi L}\, ln\left[\frac{(b_{13}+L)^2 - e_{13}^2}{e_{13}^2 - (b_{13}-L)^2}\right]$$

$$e_{13} = 6m \qquad b_{13} = 6,462m$$

$$R_{13} = \frac{\rho a}{4\pi \,.\, 2,4}\, ln\left[\frac{(6,462+2,4)^2 - 6^2}{6^2 - (6,462-2,4)^2}\right] = 0,0258\rho a$$

$$R_{14} = R_{41} = \frac{\rho a}{4\pi L}\, ln\left[\frac{(b_{14}+L)^2 - e_{14}^2}{e_{14}^2 - (b_{14}-L)^2}\right]$$

$$e_{14} = 9m$$

$$b_{14} = \sqrt{9^2 + 2,4^2} = 9,314m$$

$$R_{14} = \frac{\rho a}{4\pi \,.\, 2,4}\, ln\left[\frac{(9,314+2,4)^2 - 9^2}{9^2 - (9,314-2,4)^2}\right] = 0,0174\rho a$$

Cálculo de R_1, R_2, R_3 e R_4

$$\begin{aligned}R_1 &= 0,44\rho a + 0,048\rho a + 0,0258\rho a + 0,0174\rho a = 0,5312\rho a\\ R_2 &= 0,048\rho a + 0,44\rho a + 0,048\rho a + 0,0258\rho a = 0,5618\rho a\\ R_3 &= 0,0258\rho a + 0,048\rho a + 0,44\rho a + 0,048\rho a = 0,5618\rho a\\ R_4 &= 0,0174\rho a + 0,0258\rho a + 0,048\rho a + 0,44\rho a = 0,5312\rho a\end{aligned}$$

Devido à simetria, $R_1 = R_4$ e $R_2 = R_3$

Cálculo da Resistência Equivalente ($R_{eq_{4h}}$), Usando 4.5.5

$$R_{eq_{4h}} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}}$$

$$R_{eq_{4h}} = \frac{1}{\frac{1}{0,5312\rho a} + \frac{1}{0,5618\rho a} + \frac{1}{0,5618\rho a} + \frac{1}{0,5312\rho a}} = 0,1365\rho a$$

Índice de Redução (K)

$$K = \frac{R_{eq_{4h}}}{R_{hh}} = \frac{0,1365\rho a}{0,44\rho a} = 0,31$$

Isto significa que a resistência equivalente de quatro hastes é igual a 31% da resistência de uma haste isolada. Para evitar todo esse caminho trabalhoso, o coeficiente de redução (K) é tabelado e está apresentado nas tabelas do Apêndice A. Nas tabelas tem-se disponível o valor da resistência de uma haste, obtida usando a fórmula 4.2.1 em função de ρa. Além da coluna do **K**, tem-se a coluna do $R_{eq} = KR_{1haste}$ em função de ρa. Assim, no exemplo 4.6.1, usando a tabela A.0.5, pode-se ter diretamente o índice de redução $K = 0,31$ e o $R_{eq_{4h}} = 0,136\rho a$.

Analisando as tabelas do coeficiente de redução (K) para hastes alinhadas, pode-se observar que também existe uma saturação na diminuição da resistência equivalente com o aumento do número de hastes. Na prática, o número de hastes alinhadas é limitado a 6 (seis), acima do qual o sistema torna-se anti-econômico.

Exemplo 4.6.2

Um sistema de aterramento consiste de oito hastes, espaçadas de 3m, cravadas em um solo com $\rho a = 100\ \Omega.m$. O comprimento das hastes é de 2,4m e o diâmetro de $\frac{1}{2}$". Pede-se:

a) Resistência do sistema de aterramento;

$$R_{1haste} = \frac{\rho a}{2\pi L}\, ln\left(\frac{4L}{d}\right) = \frac{100}{2\pi\,.\,2,4}\, ln\left(\frac{4\,.\,2,4}{\frac{1}{2}\,.\,2,54\,.\,10^{-2}}\right)$$

$$R_{1haste} = 0,44\rho a = 44\Omega$$

Para 8 (oito) hastes, $K = 0,174$ conforme Tabela A.0.5 do Apêndice A.

$$R_{eq_{8h}} = K\,.\,R_{1haste} = 0,174\,.\,44 = 7,6\Omega$$

b) Quantas hastes devem ser cravadas para ter-se uma resistência máxima de 10Ω

$$R_{eq} \leq 10\Omega$$

$$R_{eq} = K\ R_{1haste} \leq 10$$

$$K \leq \frac{10}{44} \quad \longrightarrow \quad K \leq 0,227$$

Da Tabela A.0.5 obtém-se 6 (seis) hastes ou mais.

c) Fazer uma curva $\mathbf{R_{eq}}$ x Nº de hastes em paralelo com $e = 3m$ para as hastes da

Usando sistematicamente a Tabela A.0.5, efetua-se a curva que está apre tada na figura 4.6.3.

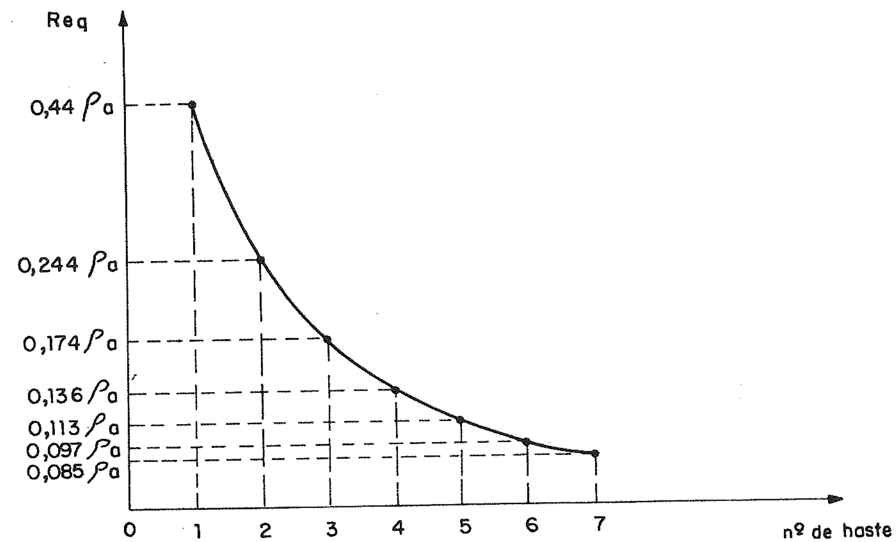

Figura 4.6.3: Curva $\mathbf{R_{eq}}$ x Nº de Hastes em Paralelo