



Aterramento

AQUILES

Primeira Letra - Especifica a situação da alimentação em relação à terra.

T - A alimentação (lado fonte) tem um ponto diretamente aterrado;

I - Isolação de todas as partes vivas da fonte de alimentação em relação à terra ou aterramento de um ponto através de uma impedância elevada.

Segunda Letra - Especifica a situação das massas (carcaças) das cargas ou equipamentos em relação à terra.

T - Massas aterradas com terra próprio, isto é, independente da fonte;

N - Massas ligadas ao ponto aterrado da fonte;

I - Massa isolada, isto é, não aterrada.

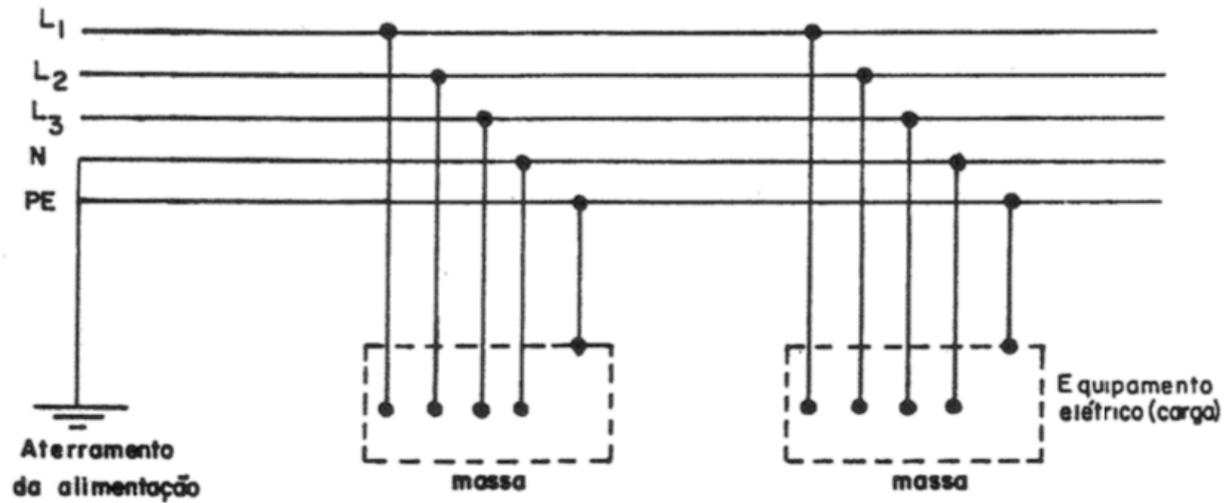
Outras Letras - Forma de ligação do aterramento da massa do equipamento, usando o sistema de aterramento da fonte.

S - Separado, isto é, o aterramento da massa é feito com um fio (PE) separado (distinto) do neutro;

C - Comum, isto é, o aterramento da massa do equipamento é feito usando o fio neutro (PEN).

Classificacao de sistemas de Aterramento BT

Sistema de alimentação e consumidor do tipo TN-S.



Sistema TN-S

Sistema TN-S

Sistema tipo TN-C.

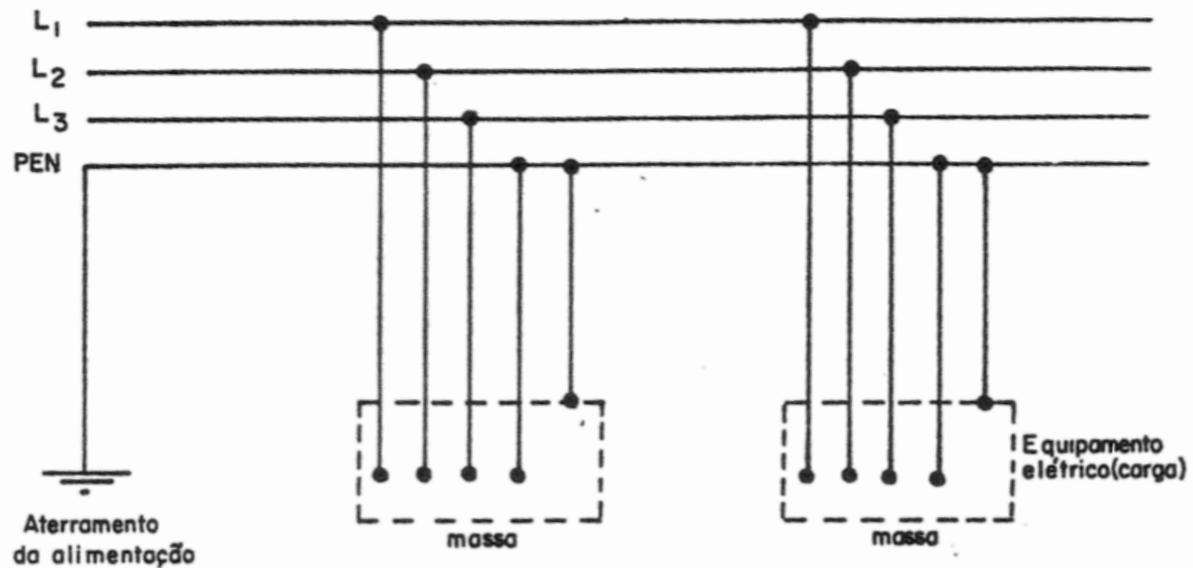
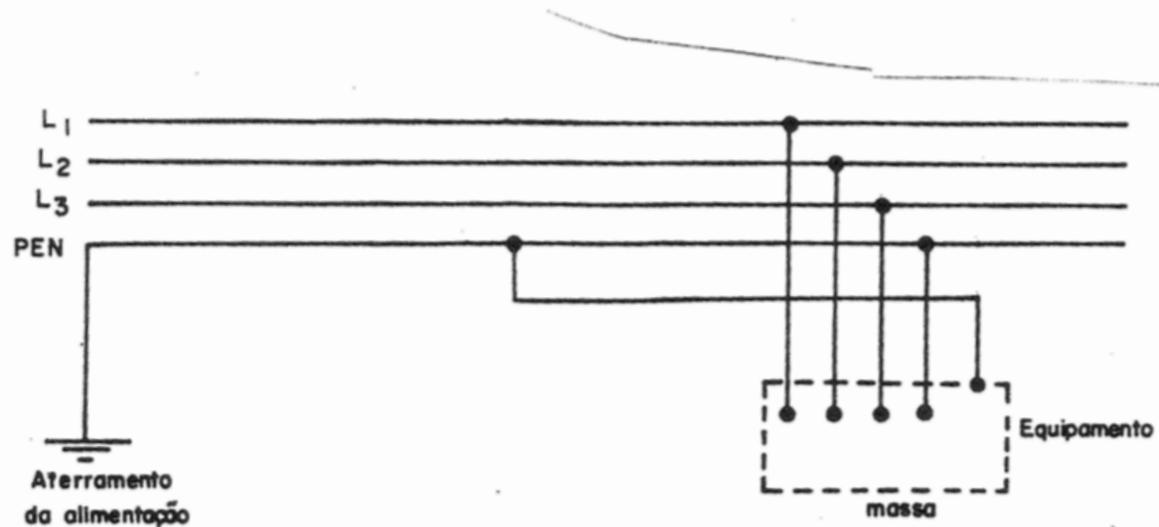


Figura 1.10.2: Sistema TN-C

Sistema TN-C

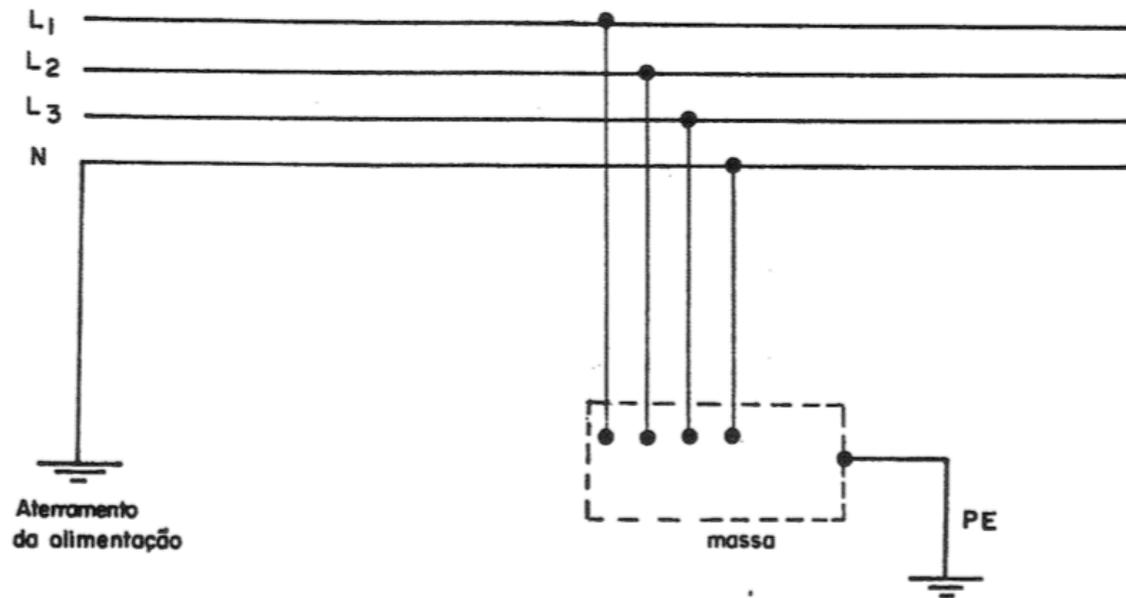
Sistema TN-C-S - A fonte (alimentação) é aterrada (T), o equipamento tem o seu aterramento que usa um fio separado (S) que, após uma certa distância, é conectado ao fio neutro (C).



Sistema TN-C-S

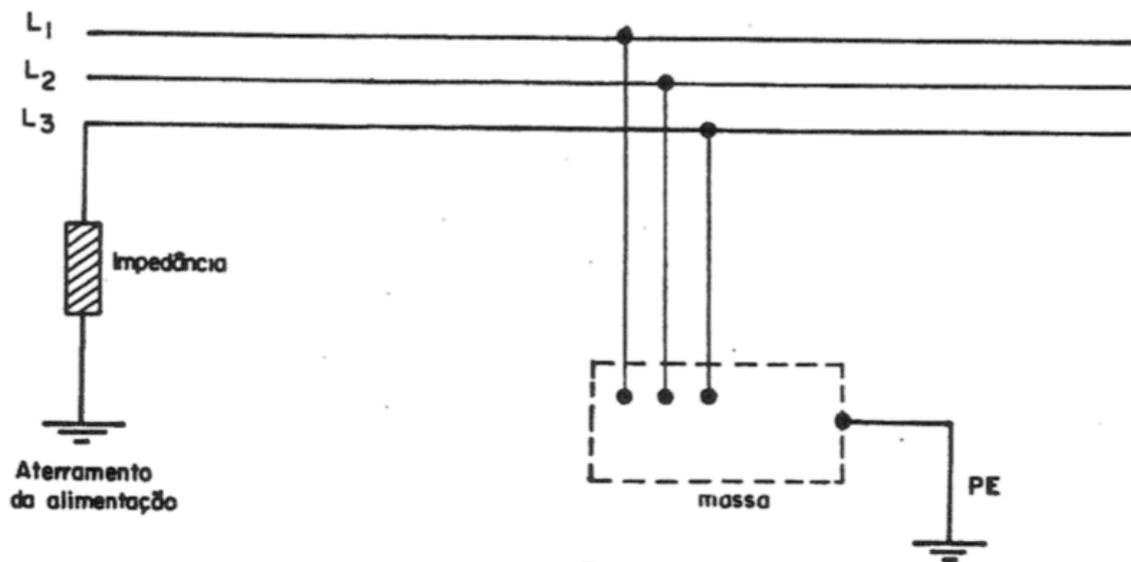
Sistema TN-C-S

Sistema TT - A fonte é aterrada (T) e a massa metálica da carga tem um terra separado e próprio (T).



Sistema TT

Sistema IT - A fonte não está aterrada (I) ou aterrada por uma impedância considerável e a massa do equipamento da carga tem terra próprio (T).



Sistema IT

Sistema IT

TIPO DE SOLO	RESISTIVIDADE [$\Omega.m$]
Lama	5 a 100
Terra de jardim com 50% de umidade	140
Terra de jardim com 20% de umidade	480
Argila seca	1.500 a 5.000
Argila com 40% de umidade	80
Argila com 20% de umidade	330
Areia molhada	1.300
Areia seca	3.000 a 8.000
Calcário compacto	1.000 a 5.000
Granito	1.500 a 10.000

Tabela 1.2.1: Tipo de Solo e Respectiva Resistividade

Resistividade do Solo

Resistividade do Solo x Umidade

Índice de Umidade (% por peso)	Resistividade ($\Omega.m$) (solo arenoso)
0,0	10.000.000
2,5	1.500
5,0	430
10,0	185
15,0	105
20,0	63
30,0	42

Tabela 1.3.1: Resistividade de Um Solo Arenoso com Concentração de Umidade

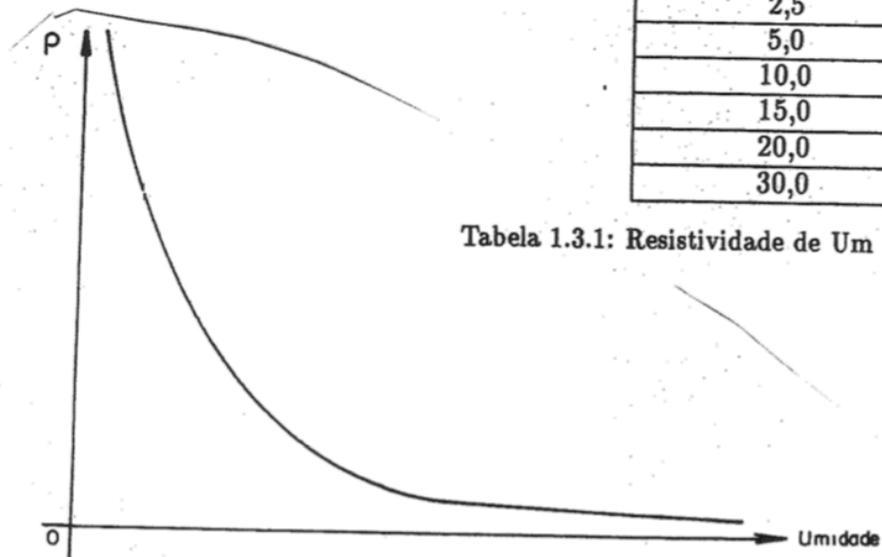
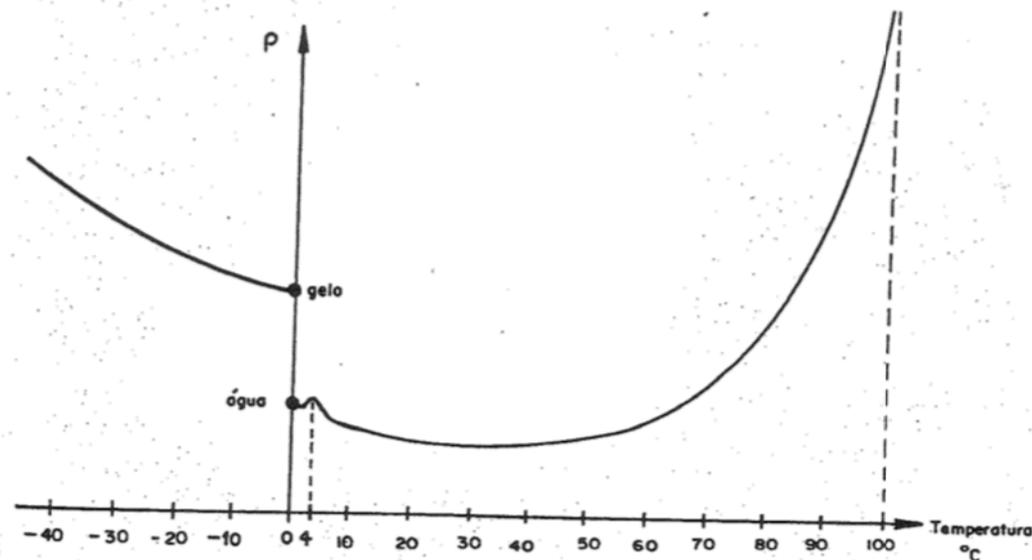


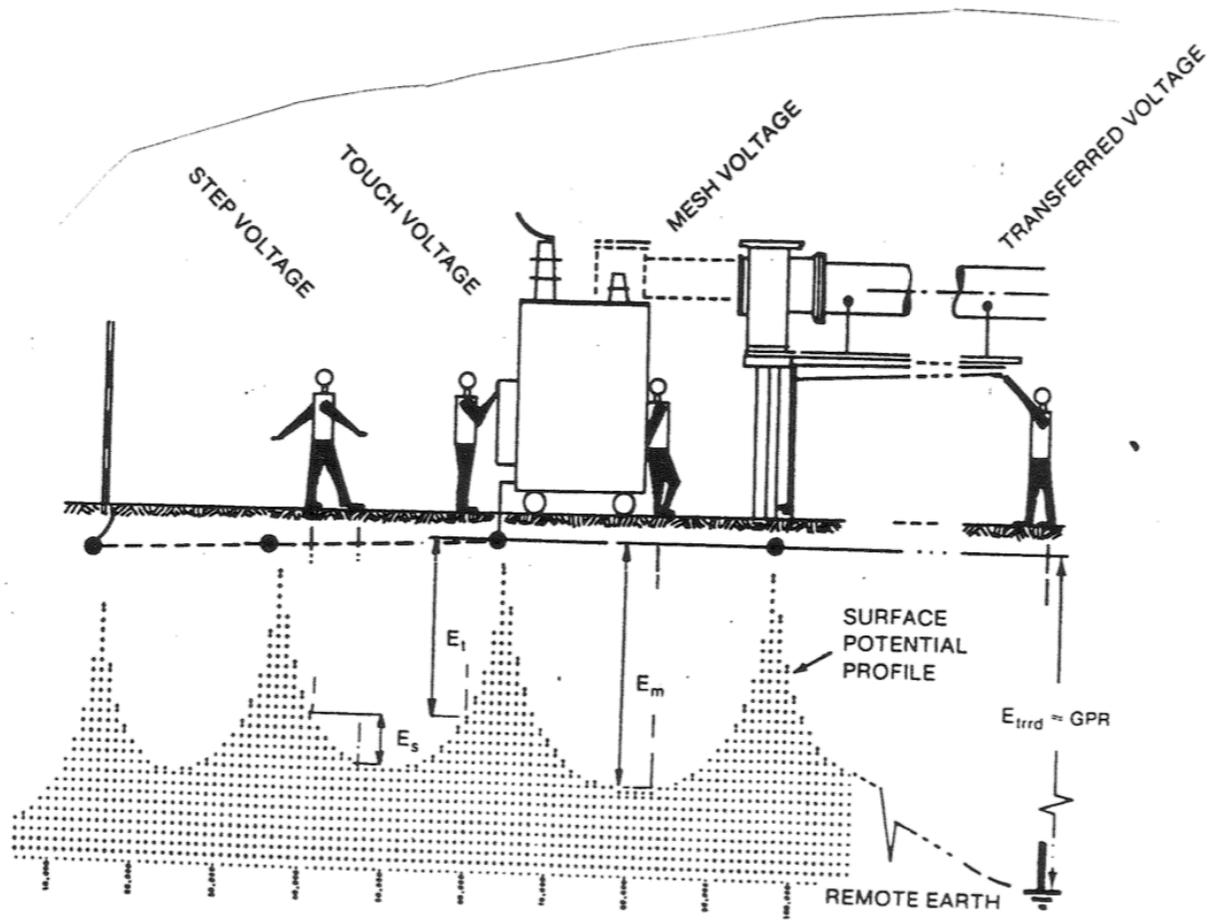
Figura 1.3.1: ρ x Umidade Percentual Solo Arenoso

Temperatura (°C)	Resistividade ($\Omega.m$) (solo arenoso)
20	72
10	99
0 (água)	138
0 (gelo)	300
- 5	790
-15	3.300

Tabela 1.4.1: Variação da Resistividade Com a Temperatura Para o Solo Arenoso



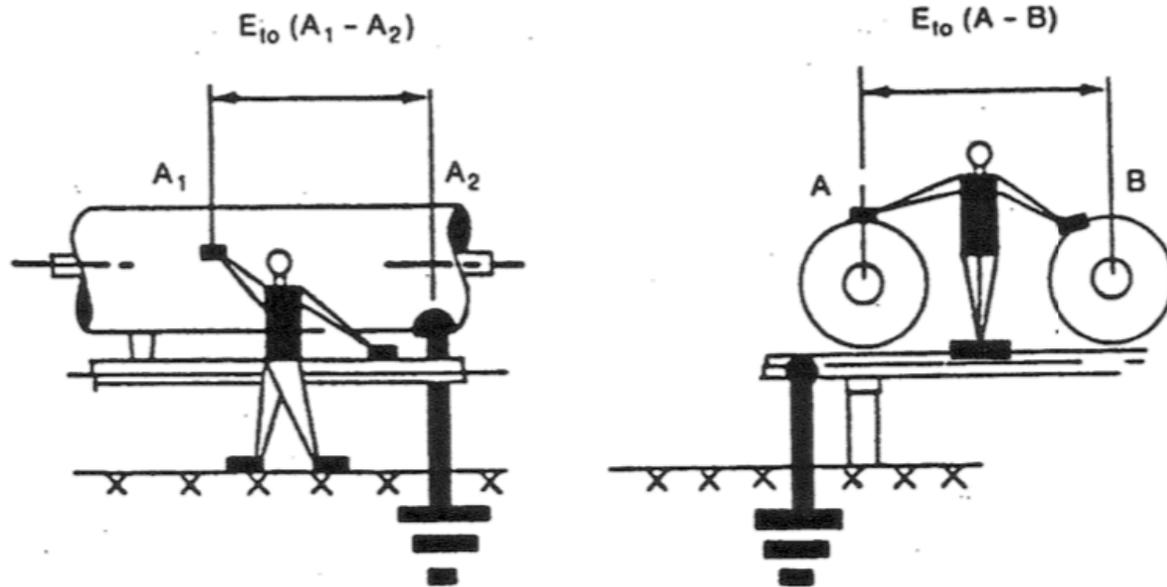
Resistividade do Solo x Temperatura



Basic Shock Situations

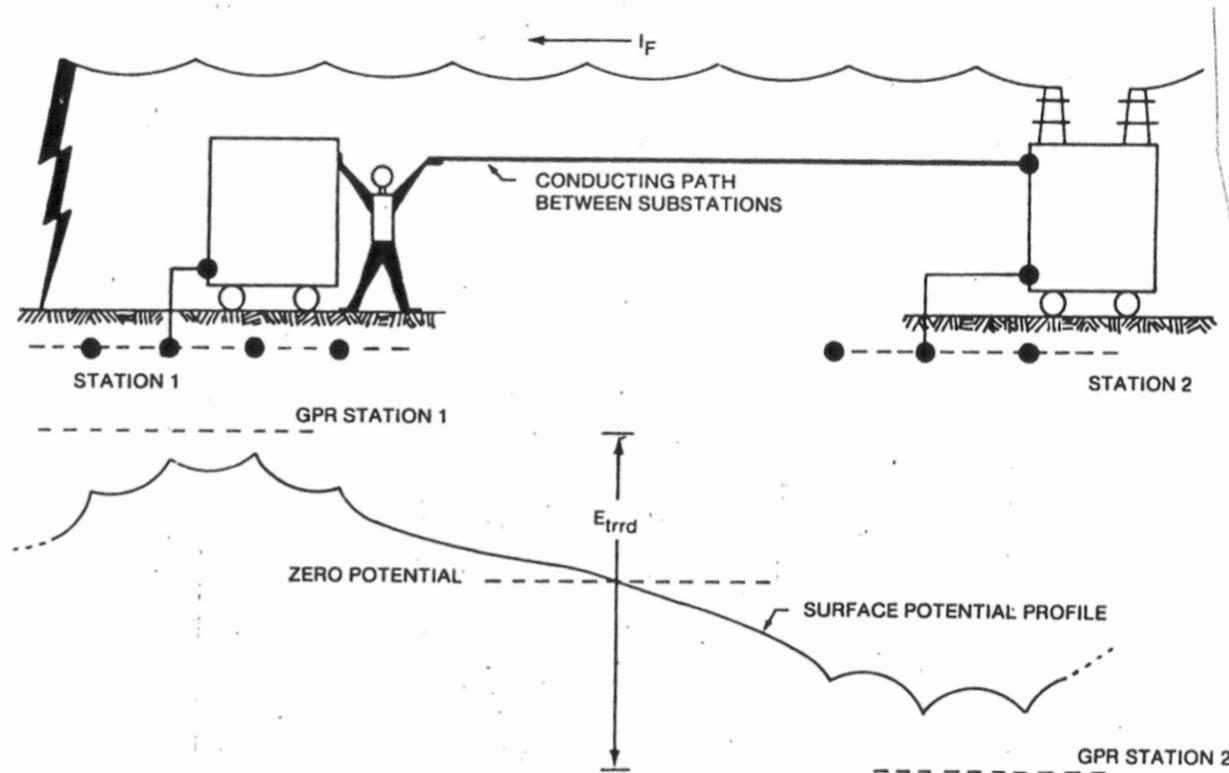
Potencial de
Passo, de
Toque e de
Malha

Typical Metal-to-Metal Touch Situations in GIS

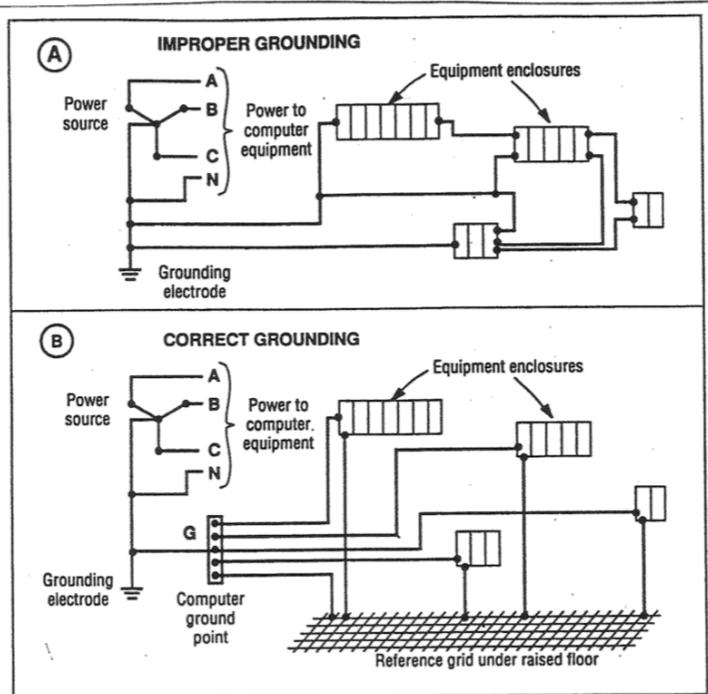


Potencias de
Toque – Gas
Insulated
Substation

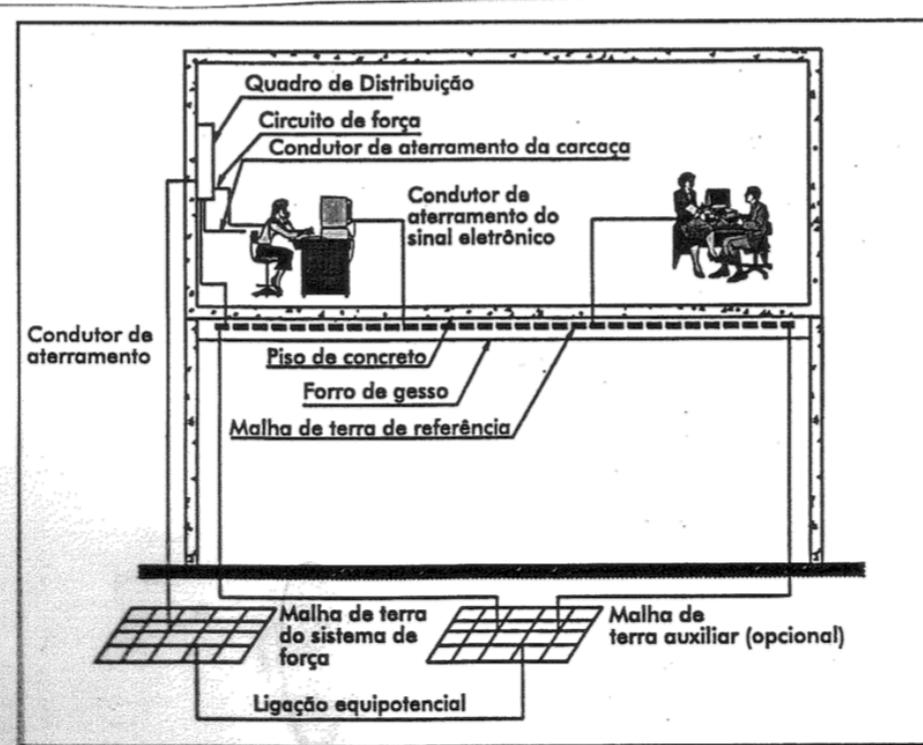
Tipica Situacao de Potencial Externo Transferido



Typical Situation of External Transferred Potential



Computer equipment grounding techniques. (A) illustrates grounding that is not appropriate for this type of equipment. (B) illustrates proper grounding utilizing both equipment grounding and a reference-grid for high-frequencies. Note that all ground leads for grounding of the equipment (not to reference grid) must be run in the same cable or raceway with power conductors. All connections from the equipment to the reference grid must be kept as short as possible.



Instalação de computadores em edifícios, acima do nível do solo

Instalacao aterramento de edificacao

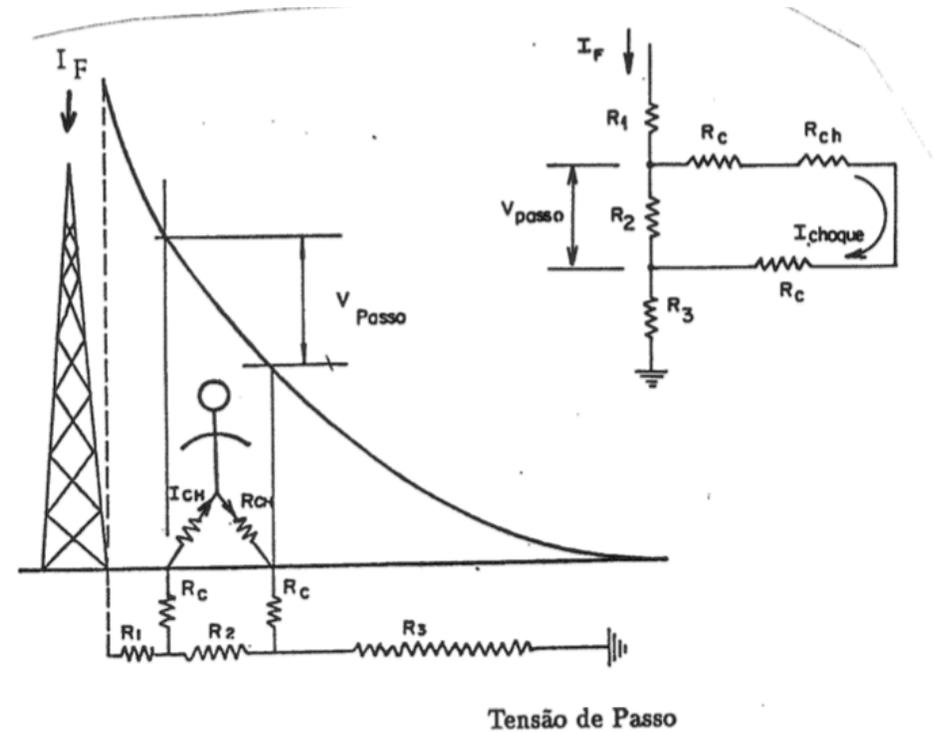
$$V_{\text{passo}} = (R_{ch} + 2 R_c) I_{\text{choque}}$$

Para $R_c = 3 \beta_s$

$$V_{\text{passo}} = (1000 + 6 \beta_s) I_{\text{choque}}$$

$$V_{\text{passo máx}} = \frac{116 + 0,696 \beta_s}{\sqrt{t}}$$

POTENCIAL DE PASSO

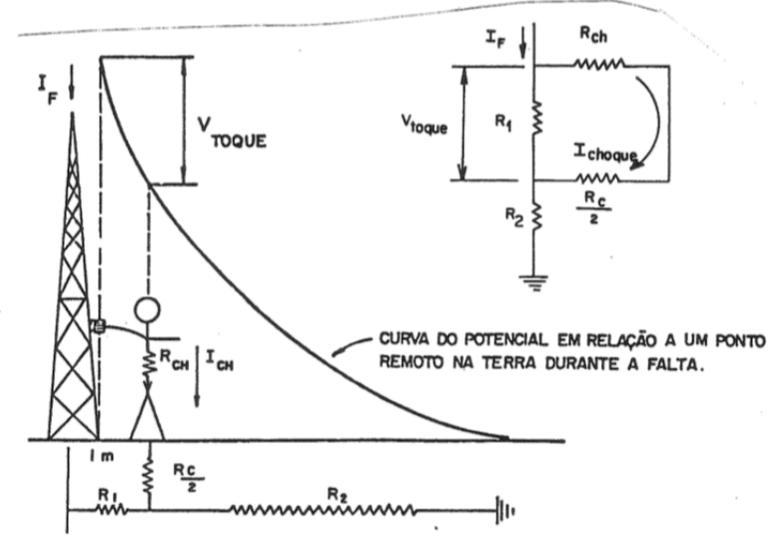


Potencial e Passo

$$V_{\text{toque máximo}} = \frac{116 + 0,174 I_s}{\sqrt{t}}$$

POTENCIAL DE TOQUE

Potencial de toque



CURVA DO POTENCIAL EM RELAÇÃO A UM PONTO REMOTO NA TERRA DURANTE A FALTA.

Potencial de Toque

$$V_{\text{toque}} = \left(R_{ch} + \frac{R_c}{2} \right) \cdot I_{\text{choque}}$$

Onde:

R_{ch} \Rightarrow Resistência do corpo humano considerada 1.000Ω

R_c \Rightarrow Resistência de contato que pode ser considerada igual a $3\rho_s$ (resistividade superficial do solo), de acordo com a recomendação da IEEE-80

I_{choque} \Rightarrow Corrente de choque pelo corpo humano

R_1 e R_2 \Rightarrow Resistências dos trechos de terra considerados

A expressão do potencial de toque pode ser escrita da seguinte maneira:

$$V_{\text{toque}} = (1000 + 1,5 \rho_s) I_{\text{choque}}$$

MALHA DE ATERRAMENTO

• CONDUTOR

$$I = 226,53 S_{Cu} \sqrt{\frac{1}{t_{def}} \ln \left(\frac{\theta_m - \theta_a}{234 + \theta_a} + 1 \right)}$$

S_{Cu} - mm²

I - A

t_{def} - s

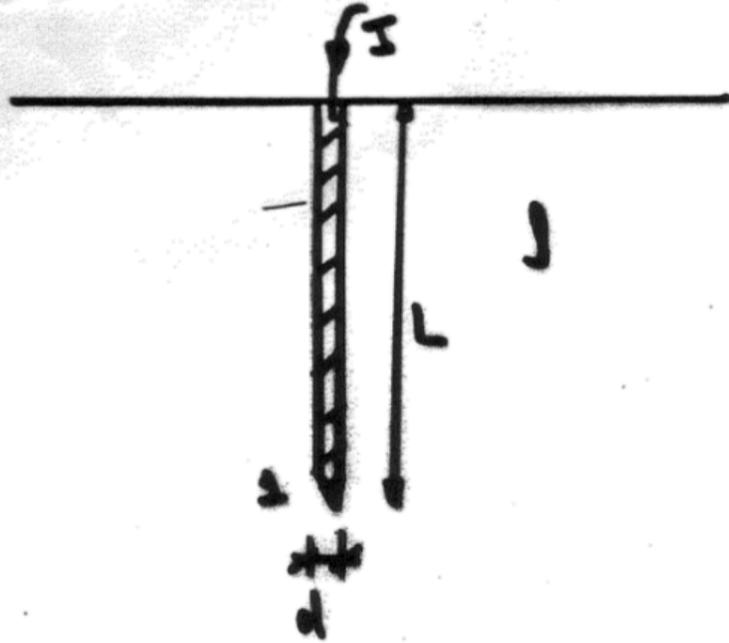
θ_a - temp. ambiente °C

θ_m - temp. máxima permissível
°C

θ_m	CONEXÃO
250°C	CAVILHADA, PRESSÃO
450°C	SOLDA CONVENCIONAL
550°C	MAÇARICO (LIGA CU - FÓSFORO)
850°C	SOLDA EXOTÉRMICA

Condutor e Conexões de Malha de Aterramento

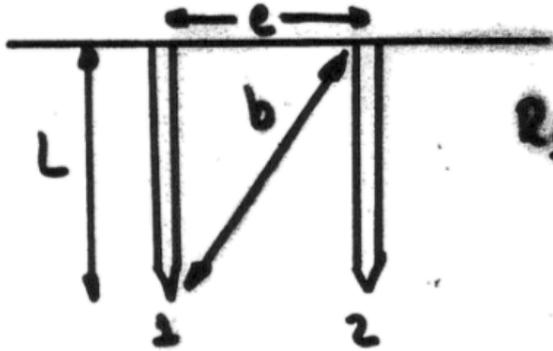
ATERRAMENTO - HASTE VERTICAL



$$R_{\text{WASTE}} = \frac{Q_a}{2\pi L} \ln\left(\frac{4L}{d}\right) = R_{111}$$

Aterramento
Haste
Vertical

MUTUAS ENTRE HASTES



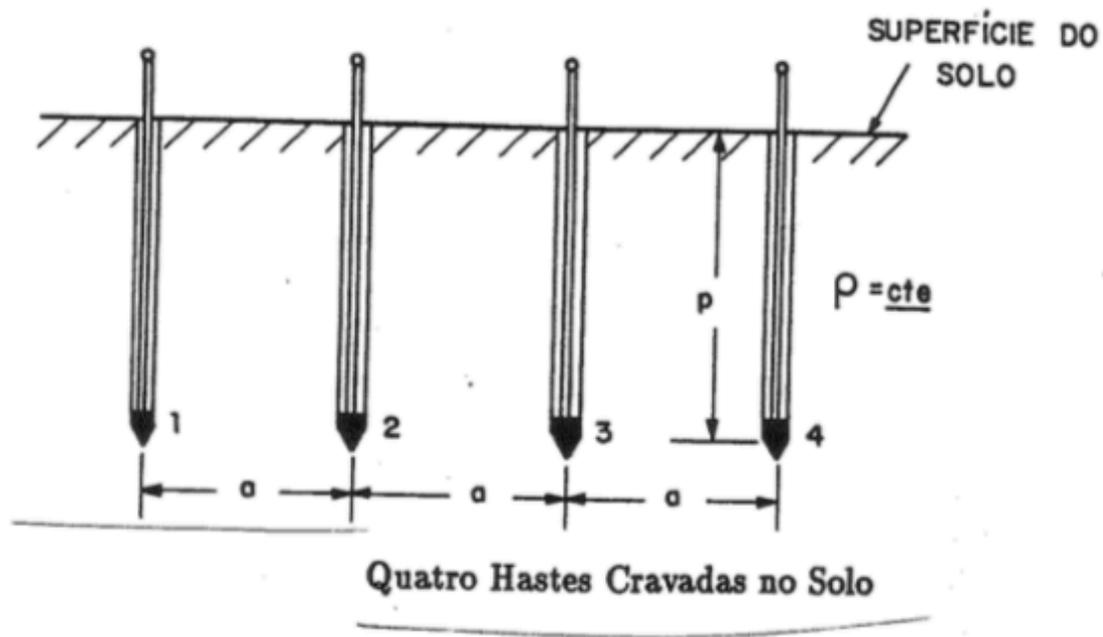
$$R_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi L} \ln \left[\frac{(b+L)^2 - e^2}{e^2 - (b-L)^2} \right]$$

$$R_1 = R_{12} + R_{13} + \dots + R_{1n} \quad (\text{PI n hastes})$$

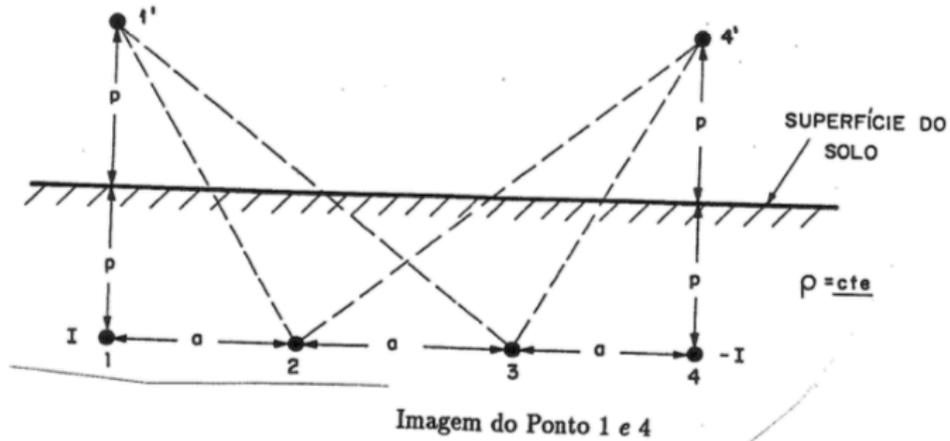
ASSOCIAÇÃO DE N HASTES

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

Mutuas
entre
Hastes



Metodod e
Werner para
uma camada
de Solo



Determinação da Resistividade di Solo

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

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

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

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

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

Estratificação do Solo em duas camadas

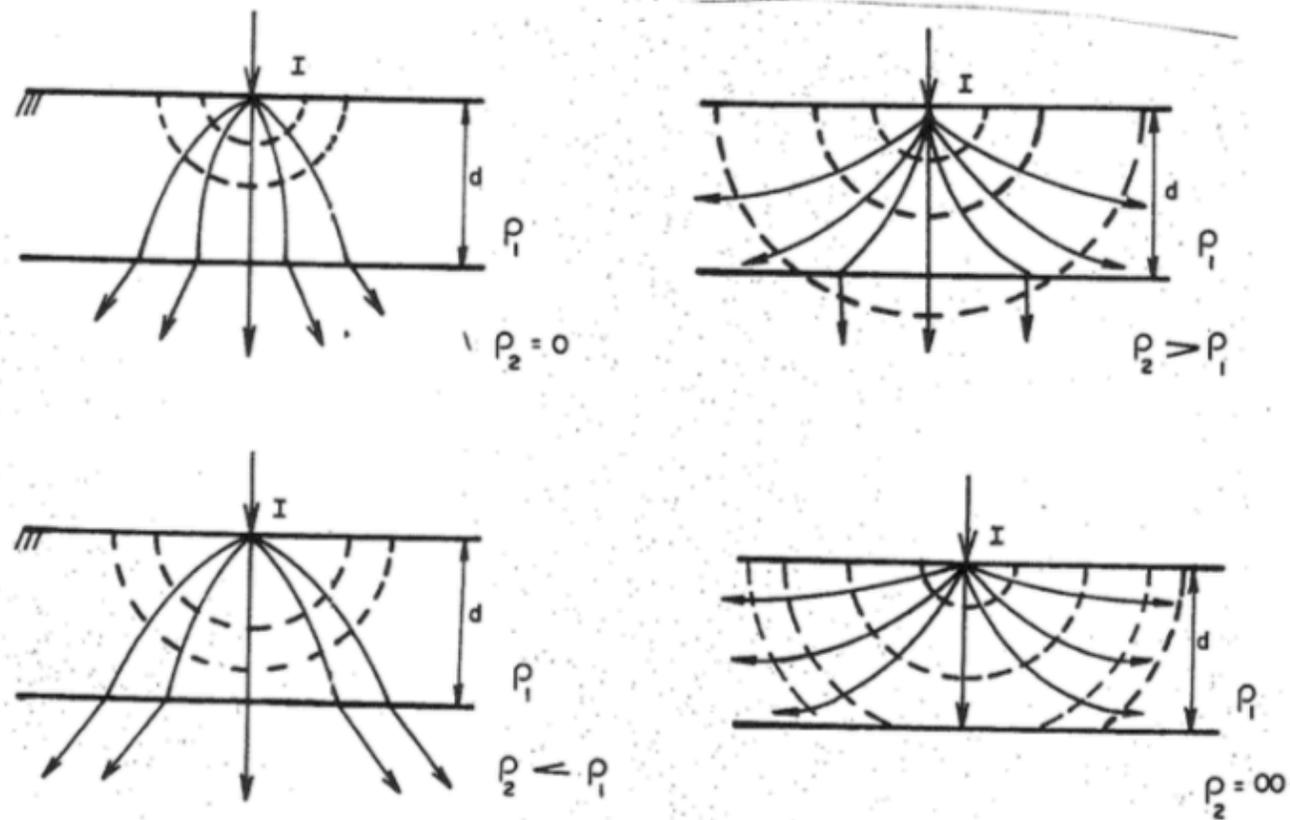
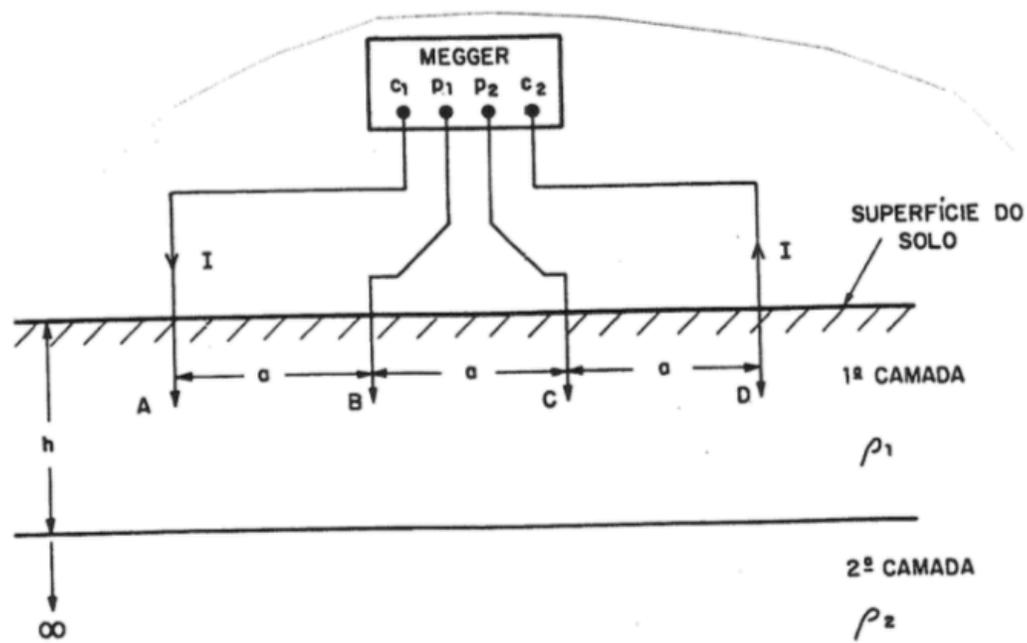


Figura 1.5.1: Estratificação do Solo em Duas Camadas



Configuração de Wenner no Solo de Duas Camadas

MÉTODO
DE
WENNER
(2 CAMADAS)

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

Metodo
Werner para
duas Camadas
de Solo

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

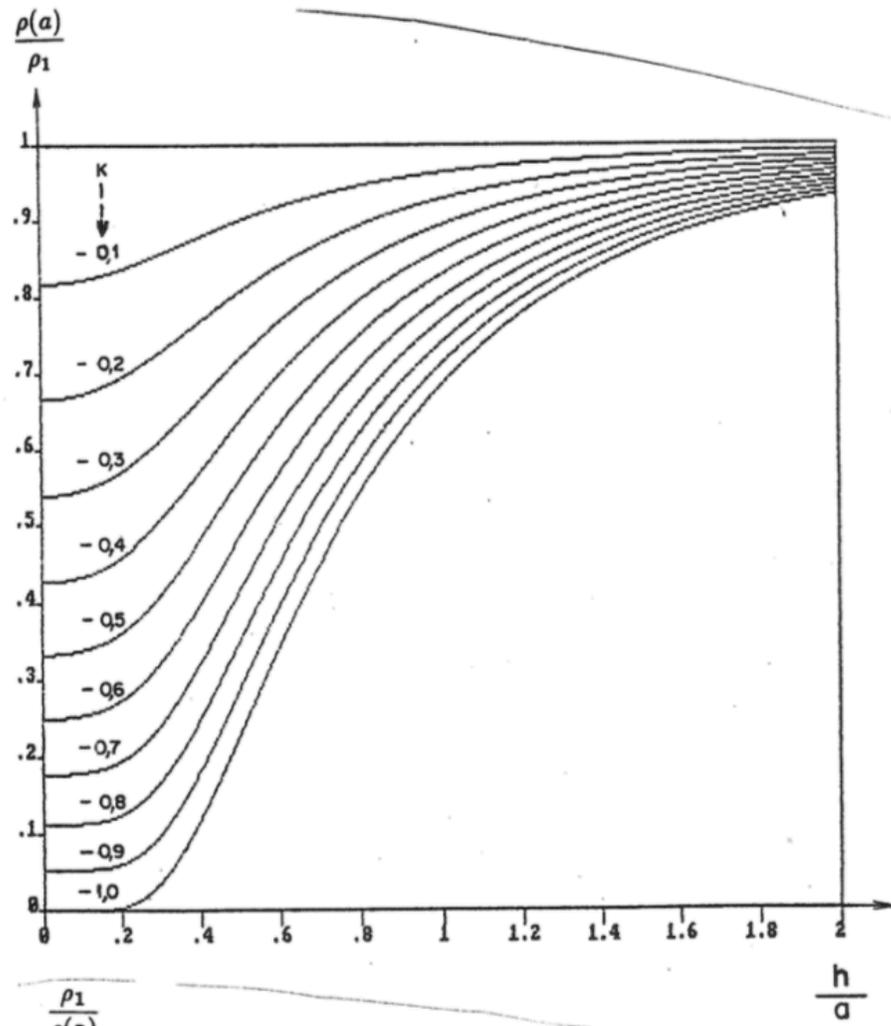
$$V_C = \frac{I \rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{2a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{(2a)^2 + (2nh)^2}} \right] - \frac{I \rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{a^2 + (2nh)^2}} \right]$$

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

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

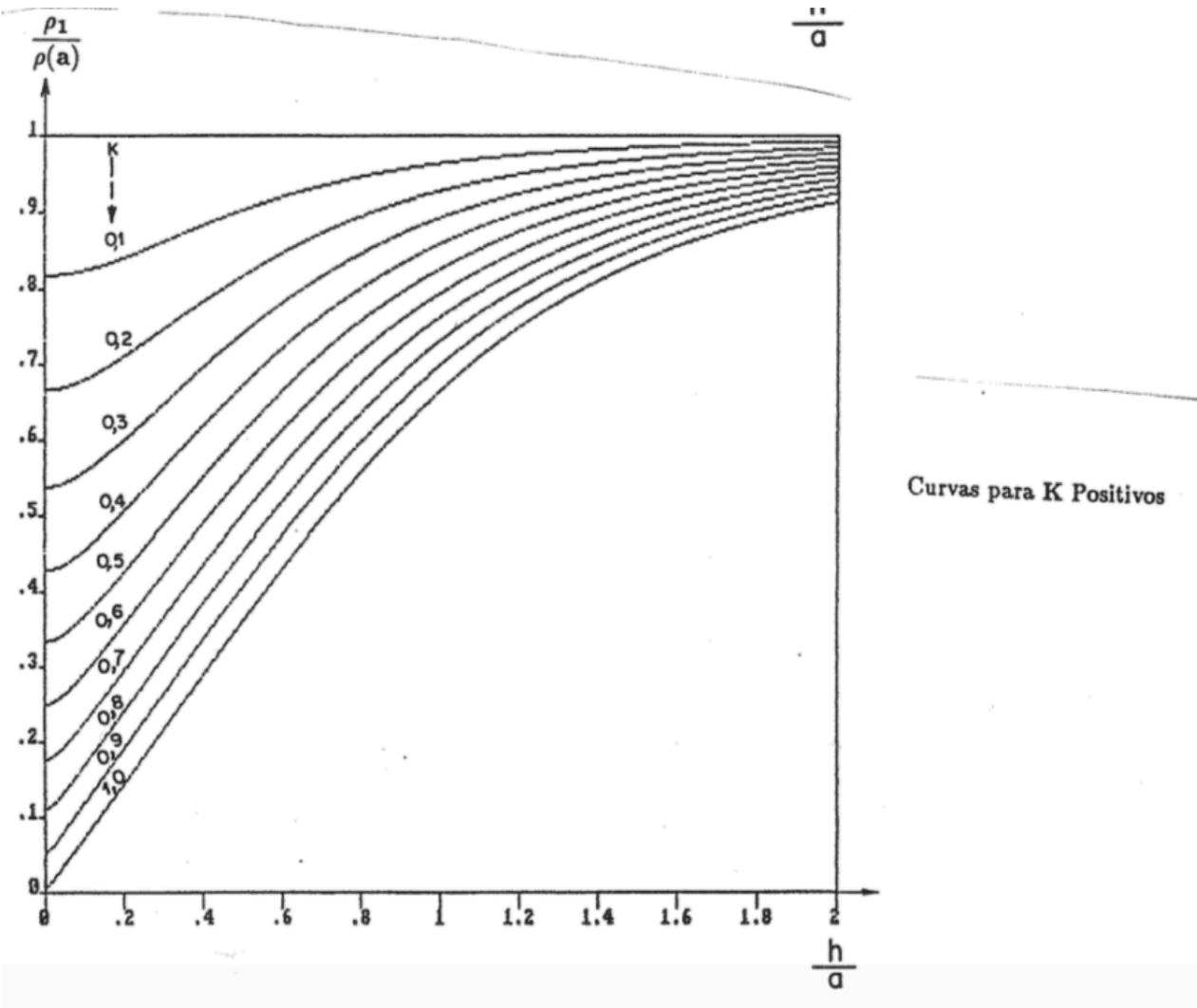
$$\frac{\rho(a)}{\rho_1} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n \frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n \frac{h}{a})^2}} \right]$$

Calculo da Resistividade Relativa – para duas camadas de solo

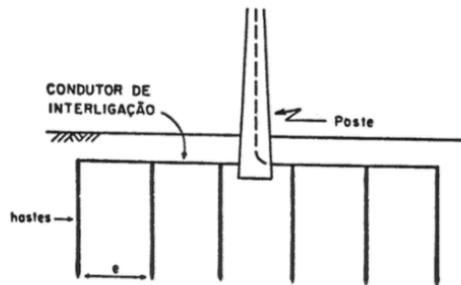


Curvas para K Negativos

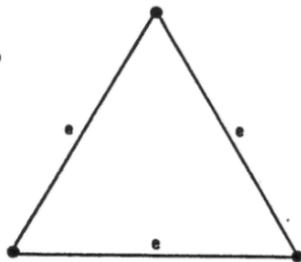
Curvas de Resistividade x K negativo



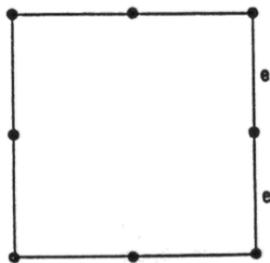
Curvas de Resistividade x K positivo



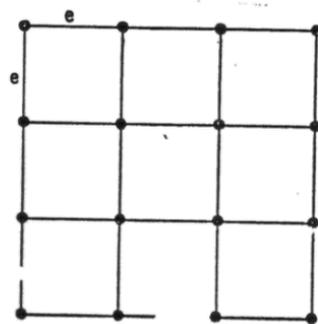
Hastes Alinhadas em Paralelo



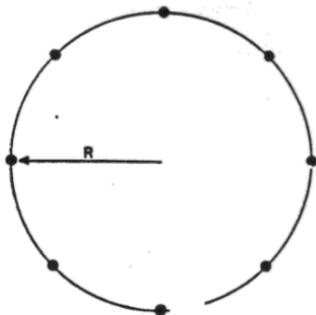
Triângulo Equilátero



Quadrado Vazio



Quadrado Cheio



Hastes em Circunferência

Tipos de Malhas de Aterramento

Dimensionamento de Sistema de Aterramento com Hastes em Triângulo

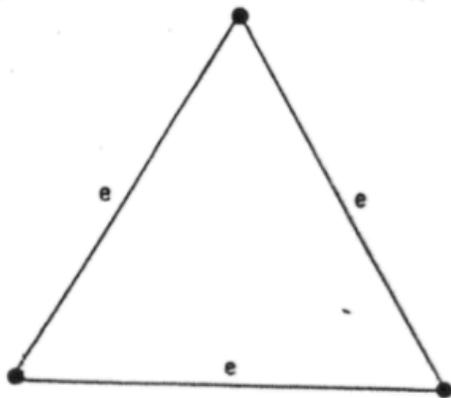


Figura 4.7.1: Triângulo Equilátero

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"

Malha Triangular

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

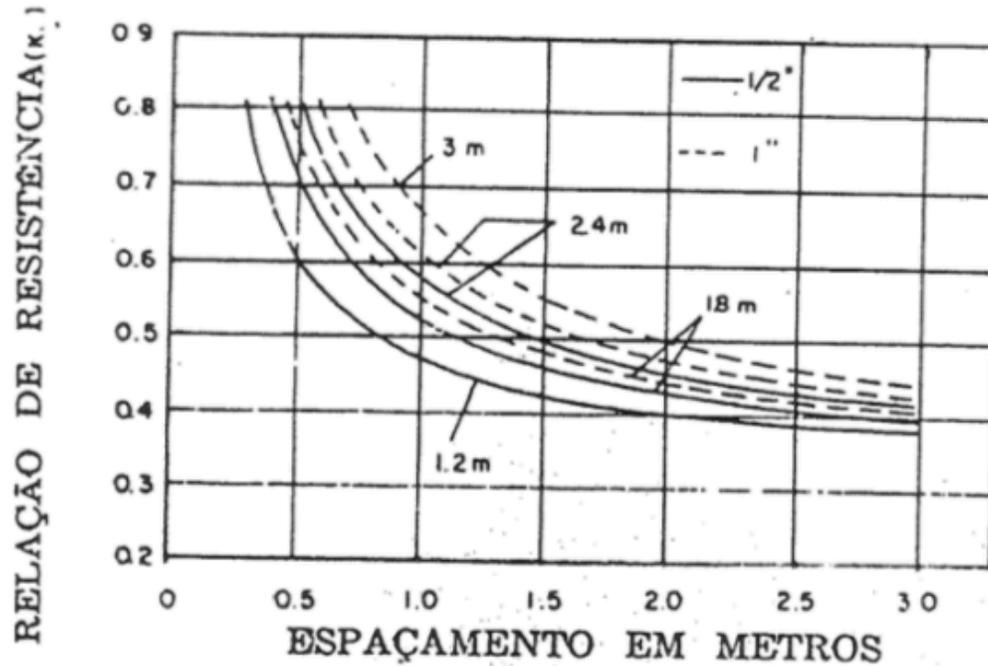


Figura 4.7.2: Curvas dos K x e

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

Malha Triangular Índice K

Malha em Quadrado Vazio Indice K 8 Hastes

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.

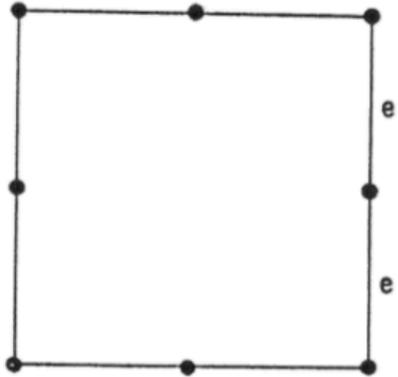


Figura 4.8.1: Quadrado Vazio

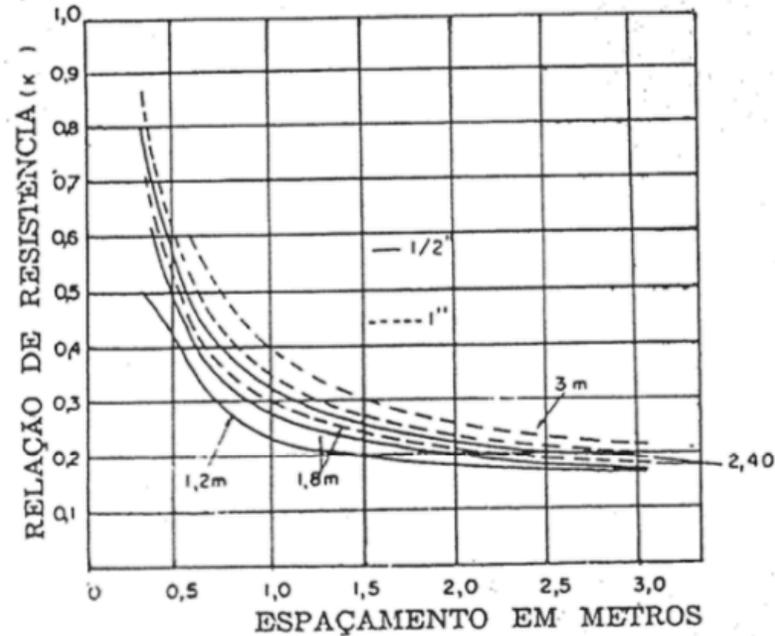


Figura 4.8.2: Oito Hastes em Quadrado Vazio

Malha em
Quadrado
Vazio
Indice K
36 Hastes

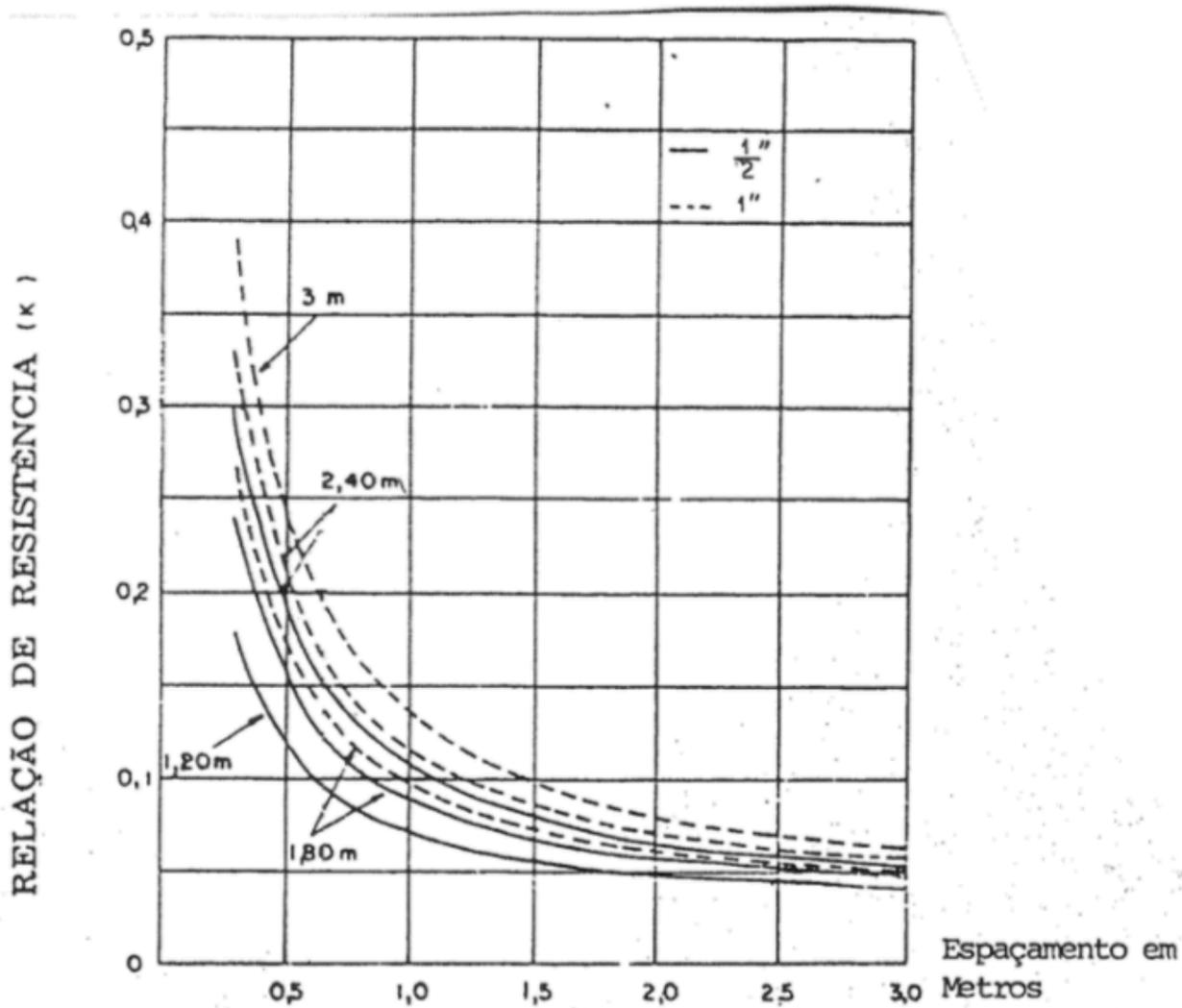


Figura 4.8.3: Trinta e Seis Hastes em Quadrado Vazio

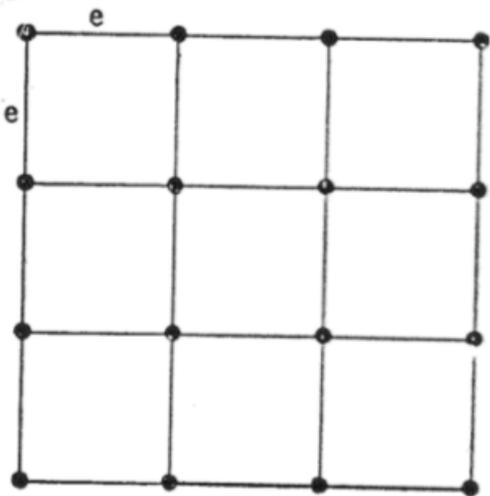


Figura 4.9.1: Quadrado Cheio

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

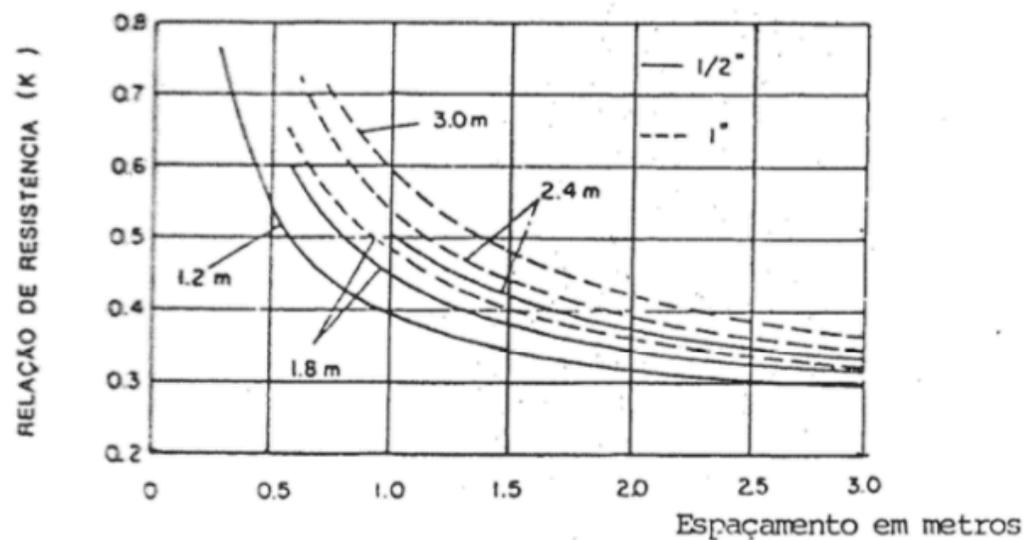


Figura 4.9.2: Quatro Hastes em Quadrado Cheio (Vazio)

Malha em
Quadrado
Cheio
Índice K
4 Hastes

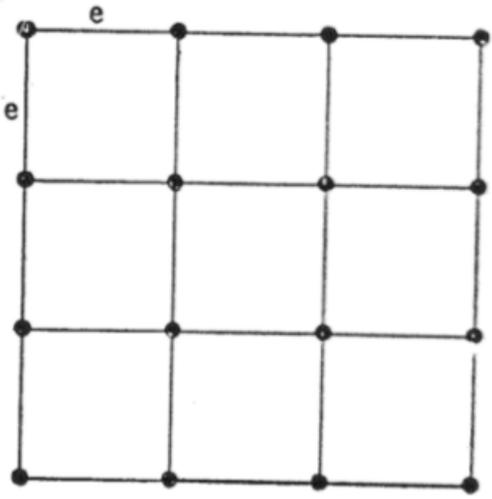


Figura 4.9.1: Quadrado Cheio

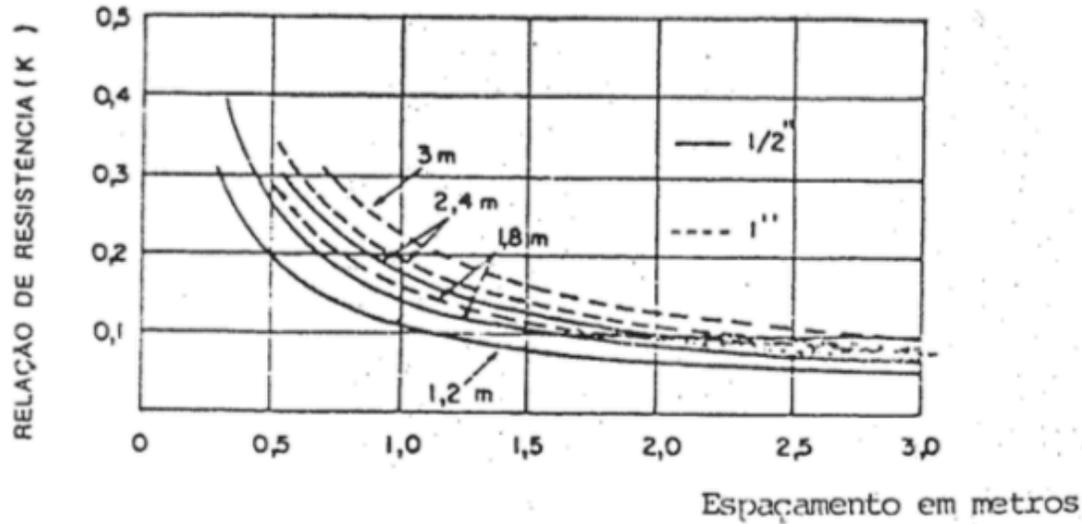


Figura 4.9.3: Trinta e Seis Hastas em Quadrado Cheio

Malha em
Quadrado
Cheio
Índice K
36 Hastas

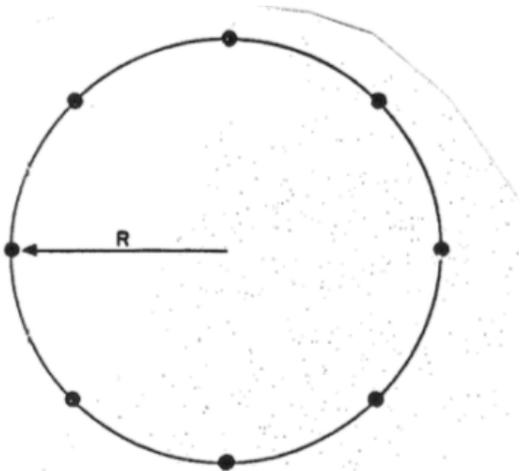


Figura 4.10.1: Hastes em Circunferência

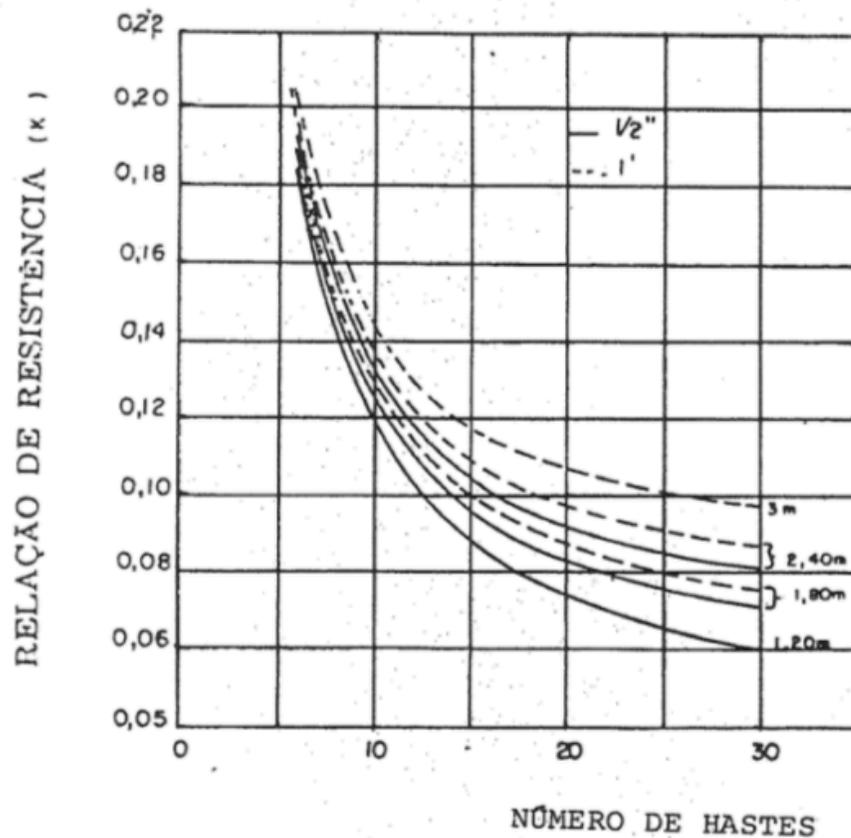


Figura 4.10.2: Hastes em Circunferência com Nove Metros de Raio

Malha em Circulo

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.

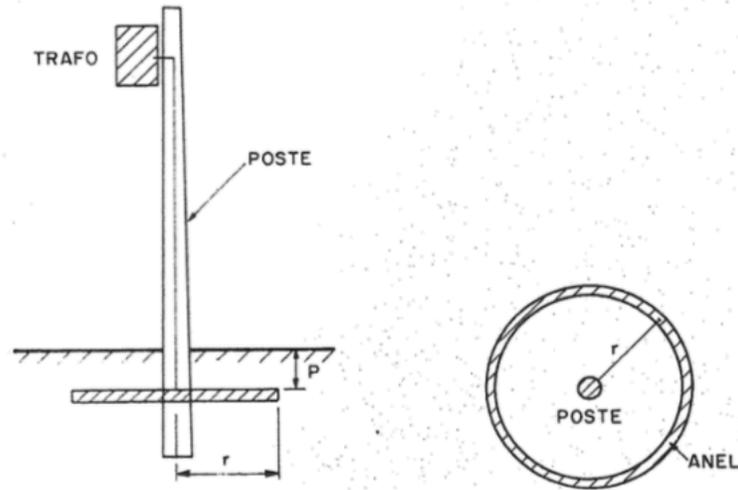


Figura 4.12.1: Aterramento em Forma de Anel

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

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

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]

Malha em Anel

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.

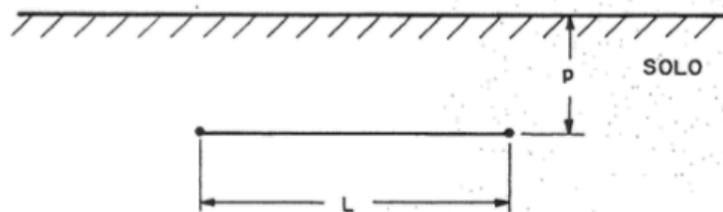


Figura 4.13.1: Condutor Enterrado Horizontalmente no Solo

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

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.

Malha Com Condutor Horizontal

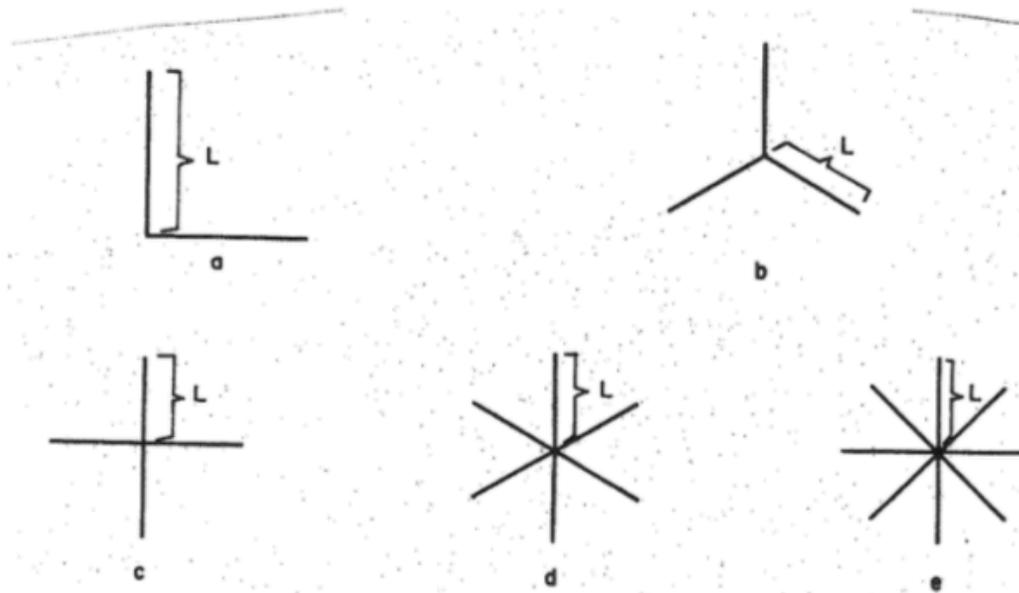


Figura 4.13.2: Configurações Horizontais de Condutores

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]

Malha com Varios Condutores Horizontais

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.

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

Malha com
Varios
Condutores
Horizontais
3 , 4, 6 e 8
pontas

Exemplo 4.6.1

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

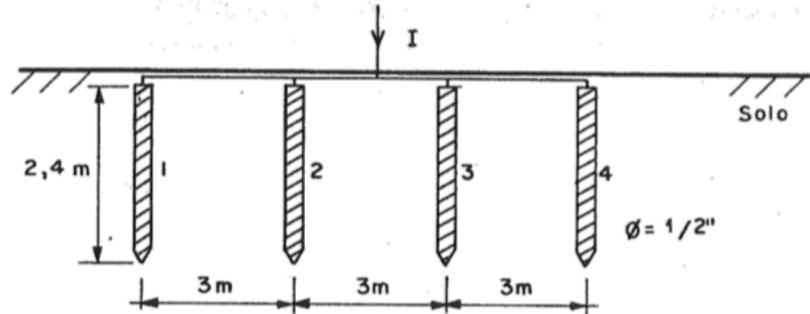


Figura 4.6.2: Sistema com Quatro Hastes Alinhadas

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:

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

Exemplo

1/1

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

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

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

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

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

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

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

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

$$e_{14} = 9m$$

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

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

Cálculo de R_1 , R_2 , R_3 e R_4

$$R_1 = 0,44\rho a + 0,048\rho a + 0,0258\rho a + 0,0174\rho a = 0,5312\rho a$$

$$R_2 = 0,048\rho a + 0,44\rho a + 0,048\rho a + 0,0258\rho a = 0,5618\rho a$$

$$R_3 = 0,0258\rho a + 0,048\rho a + 0,44\rho a + 0,048\rho a = 0,5618\rho a$$

$$R_4 = 0,0174\rho a + 0,0258\rho a + 0,048\rho a + 0,44\rho a = 0,5312\rho a$$

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

Cálculo da Resistência Equivalente (R_{eq4h}), Usando 4.5.5

$$R_{eq4h} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}}$$

Exemplo 1/2

$$R_{eq4h} = \frac{1}{\frac{1}{0,5312\rho a} + \frac{1}{0,5618\rho a} + \frac{1}{0,5618\rho a} + \frac{1}{0,5312\rho a}} = 0,1365\rho a$$

Índice de Redução (K)

$$K = \frac{R_{eq4h}}{R_{hh}} = \frac{0,1365\rho a}{0,44\rho a} = 0,31$$

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 $R_{eq} = K R_{1haste}$ 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 $R_{eq4h} = 0,136\rho a$.

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

1/3

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;

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

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

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

$$R_{eq8h} = K \cdot R_{1haste} = 0,174 \cdot 44 = 7,6\Omega$$

Exemplo

2/1

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

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

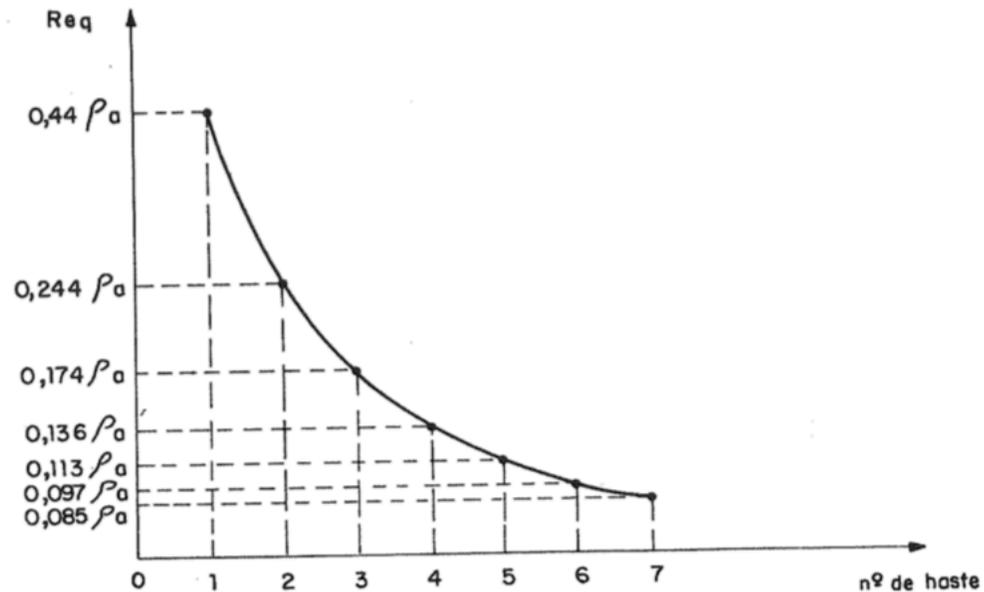
$$R_{eq} = K R_{1haste} \leq 10$$

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

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

c) Fazer uma curva $R_{eq} \times N^{\circ}$ de hastes em paralelo com $e = 3m$ para as hastes da

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



Exemplo 2/2
