

A photograph showing a construction site with a grid of steel reinforcement bars (rebar) laid out on a concrete slab. The rebar is arranged in a regular grid pattern, and the concrete is visible in the background. A black rectangular box with rounded corners is overlaid on the center of the image, containing the text "MALHA DE ATERRAMENTO".

MALHA DE ATERRAMENTO

OBJETIVOS DO ATERRAMENTO



- Proporcionar a resistência de aterramento mais baixa possível, para correntes de falta à terra
- Manter os potenciais produzidos pelas correntes de falta dentro de limites de segurança de modo a não causar a fibrilação do coração humano
- Permitir que equipamentos de proteção sejam mais sensibilizados e isolem rapidamente as falhas à terra
- Proporcionar um caminho de escoamento a terra para descargas atmosféricas
- Usar a terra como retorno de corrente no sistema MRT
- Escoar cargas estáticas geradas nas carcaças dos equipamentos

RESISTIVIDADE DO SOLO

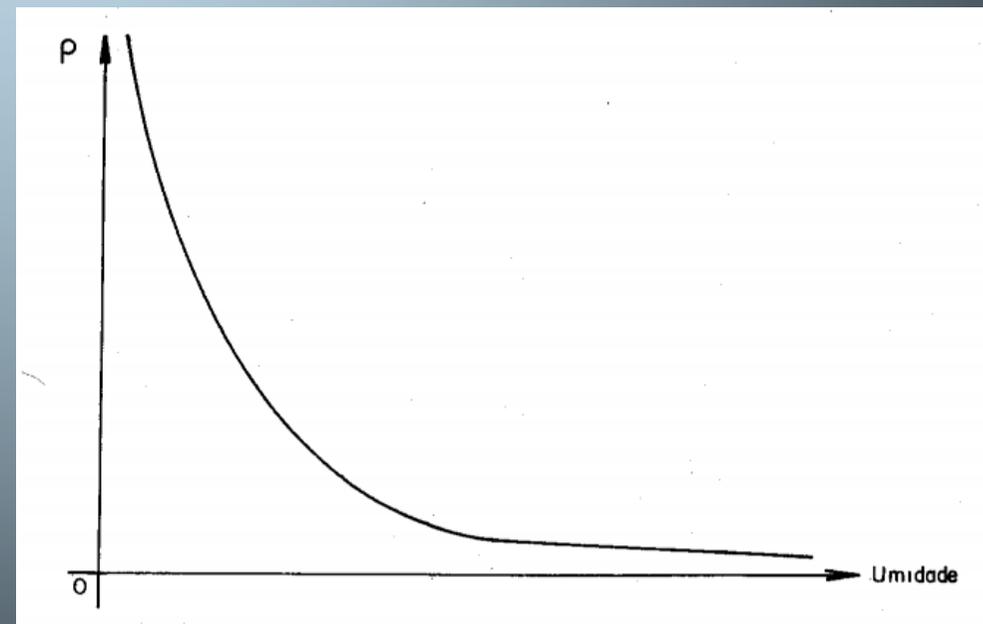


TIPO DE SOLO	RESISTIVIDADE [$\Omega.m$]
Lama	5 a 100
Terra de jardim com 50% de umidade	140
Terra de jardim com 20% de umidade	480
Argila seca	1.500 a 5.000
Argila com 40% de umidade	80
Argila com 20% de umidade	330
Areia molhada	1.300
Areia seca	3.000 a 8.000
Calcário compacto	1.000 a 5.000
Granito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

INFLUÊNCIA DA UMIDADE



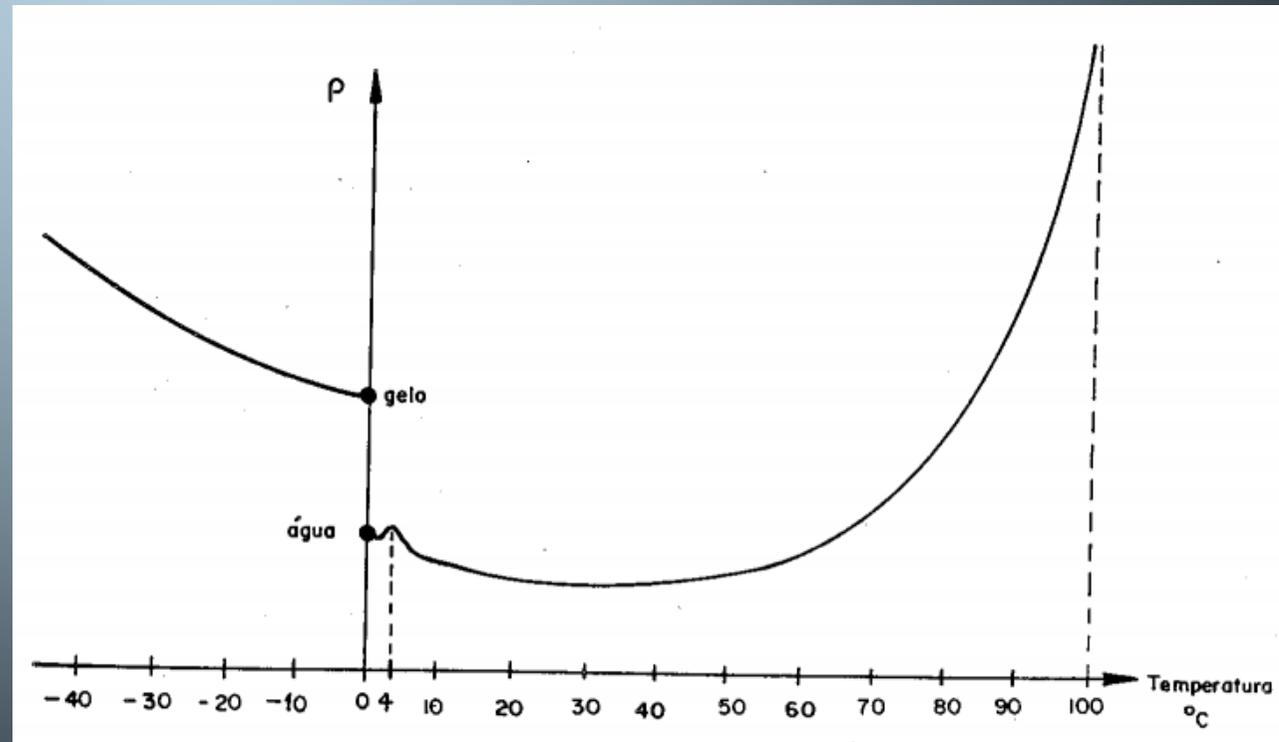
Índice de Umidade (% por peso)	Resistividade ($\Omega.m$) (solo arenoso)
0,0	10.000.000
2,5	1.500
5,0	430
10,0	185
15,0	105
20,0	63
30,0	42



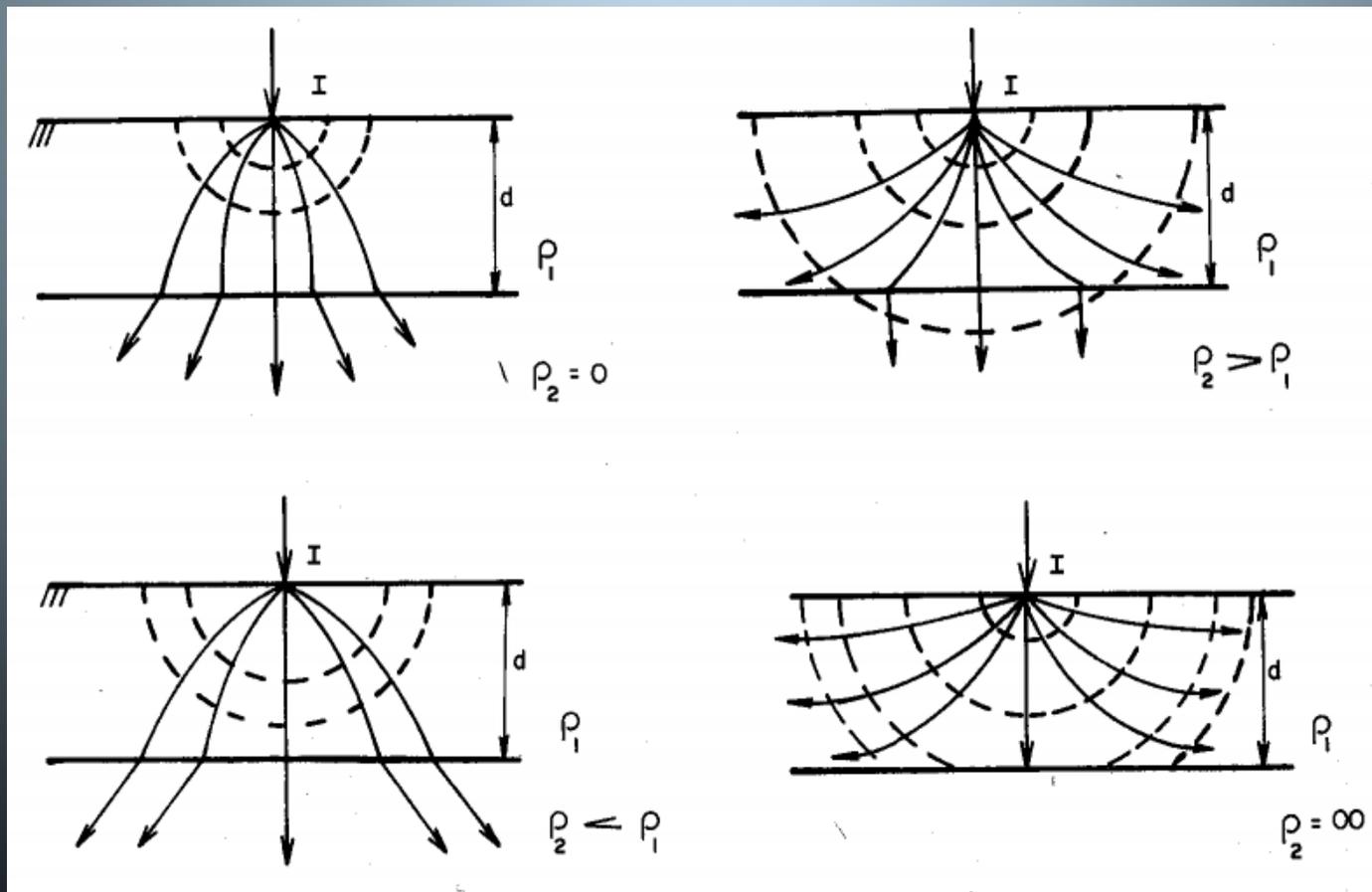
INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA



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



INFLUÊNCIA DA ESTRATIFICAÇÃO



SISTEMAS DE ATERRAMENTO

- Tipos de hastes

- Copperweld

- ✓ Barra de aço de seção circular onde o cobre é fundido sobre a mesma

- Encamisado por extrusão

- ✓ Alma de aço é revestida por um tubo de cobre através de processo de extrusão

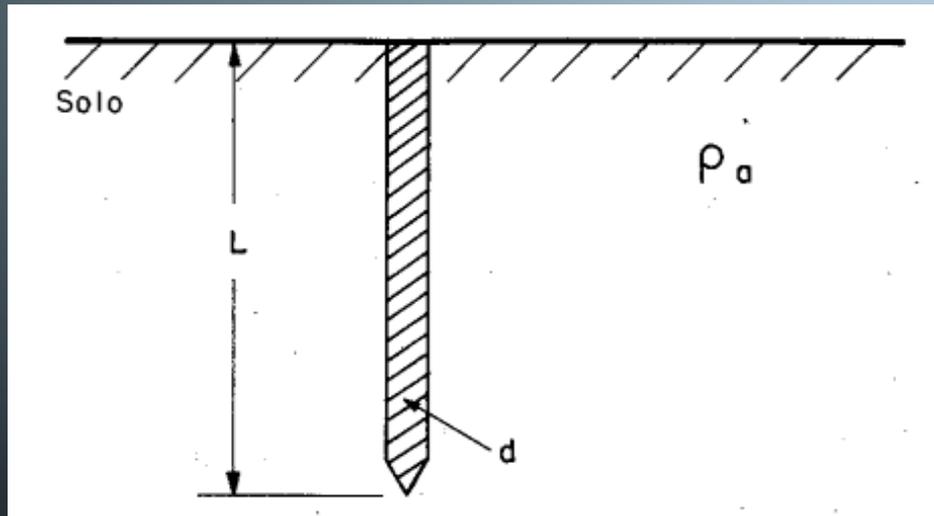
- Cadweld

- ✓ O cobre é depositado eletroliticamente sobre a alma de aço

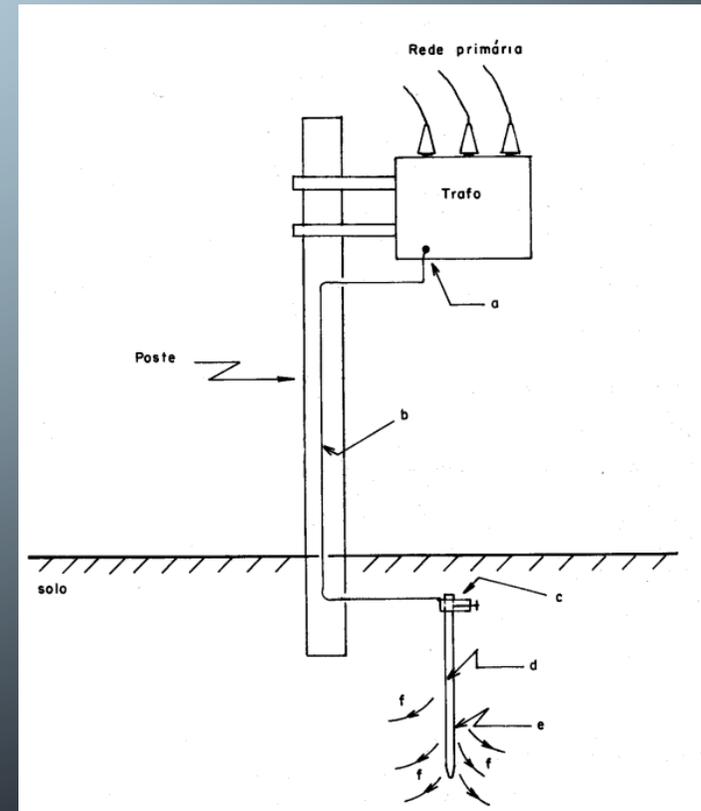


SISTEMAS DE ATERRAMENTO

- Dimensionamento de um sistema de aterramento com uma haste vertical

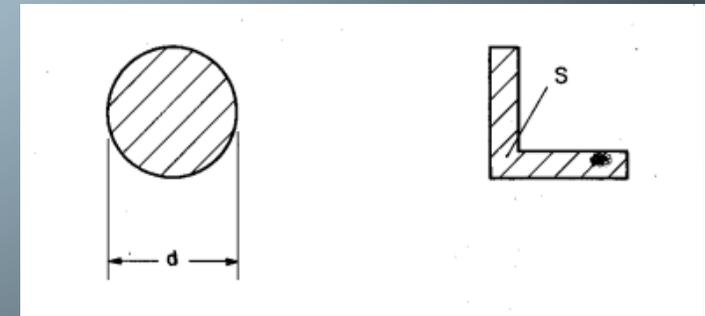
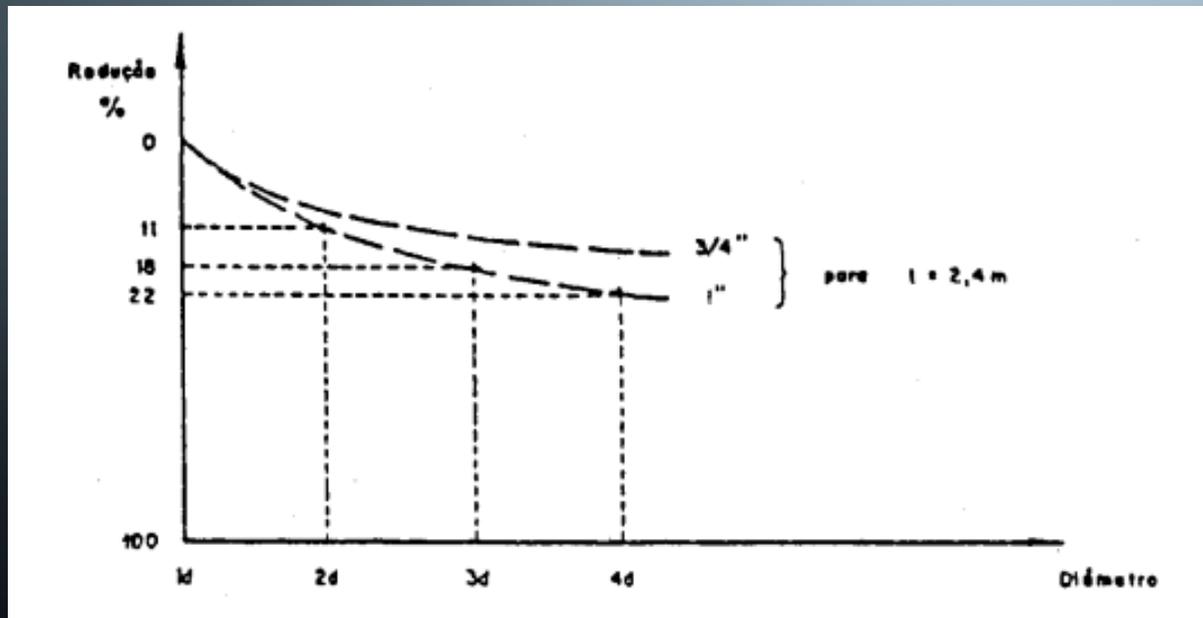


$$R_{1haste} = \frac{\rho_a}{2\pi L} \ln \left(\frac{4L}{d} \right) \quad [\Omega]$$



SISTEMAS DE ATERRAMENTO

- Aumento do diâmetro da haste

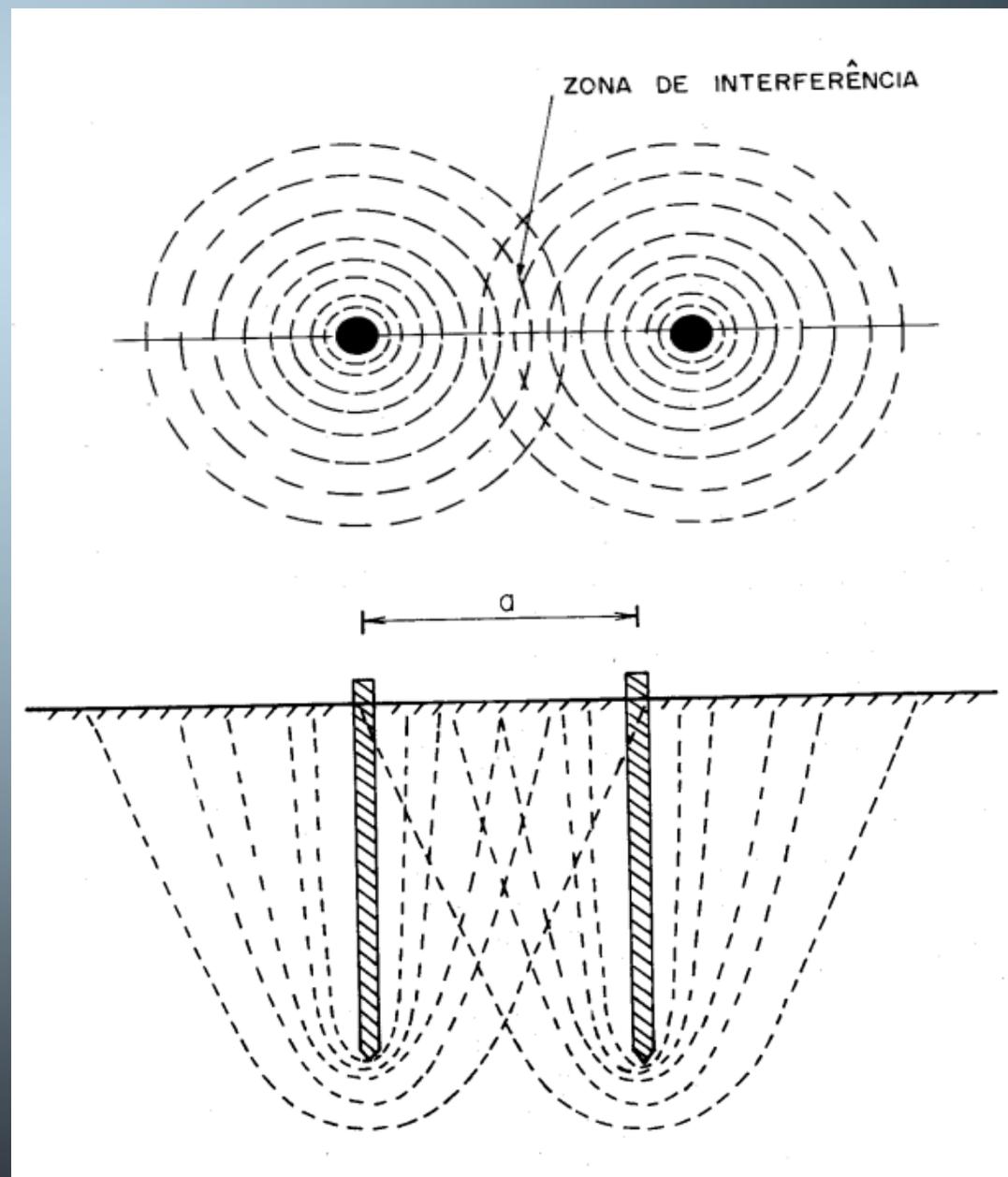
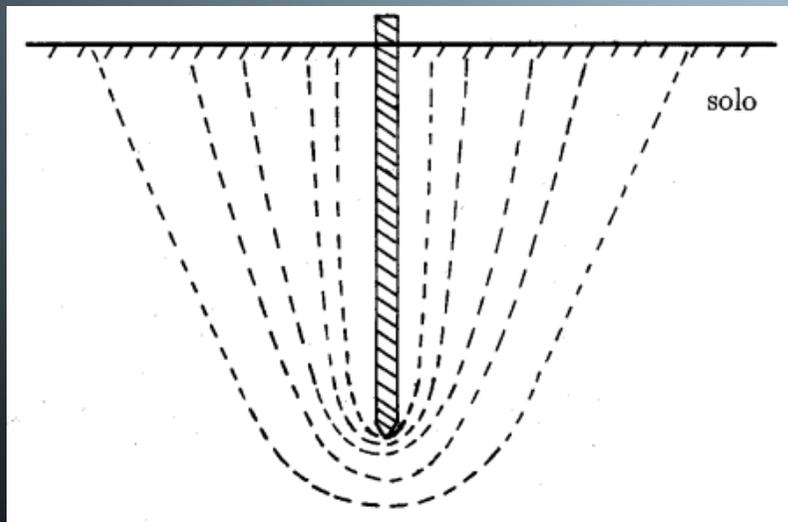


$$S_{cantoneira} = S_{circulo} = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2$$

$$d = 2 \sqrt{\frac{S_{cantoneira}}{\pi}}$$

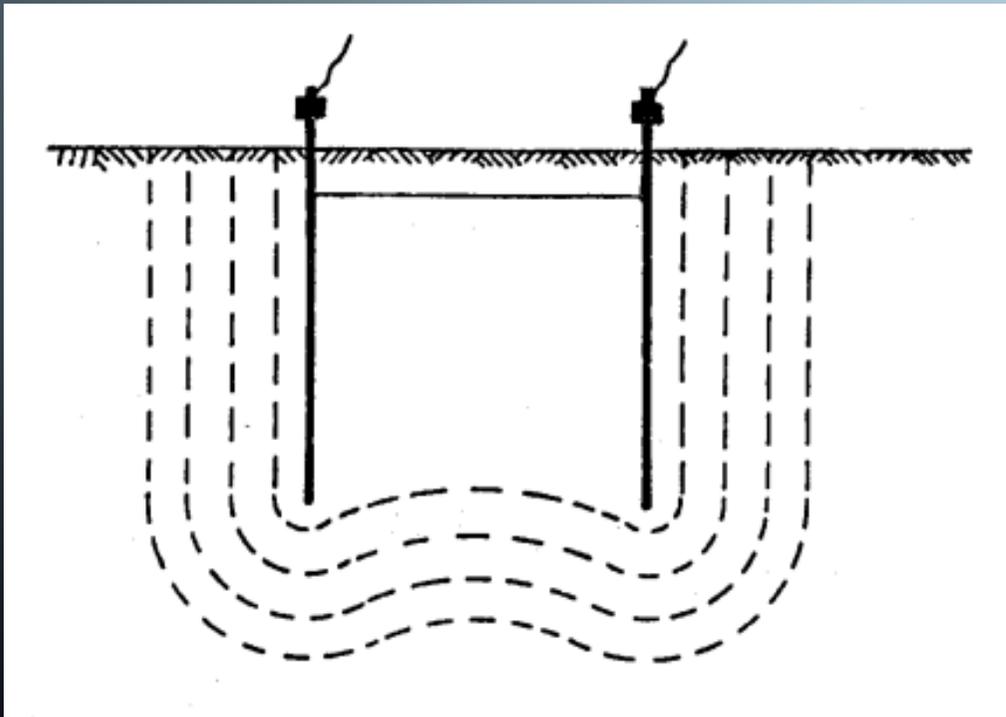
SISTEMAS DE ATERRAMENTO

- Interligação de hastes em paralelo



SISTEMAS DE ATERRAMENTO

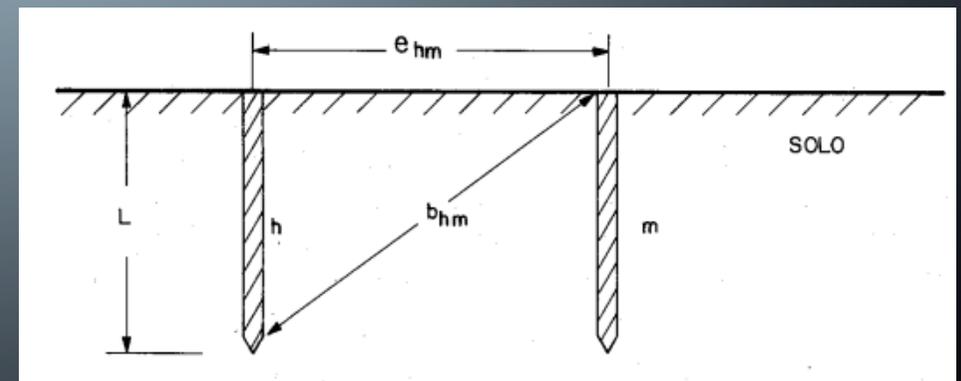
- Interligação de hastes em paralelo



$$\frac{R_{1haste}}{2} < R_{2haste} < R_{1haste}$$

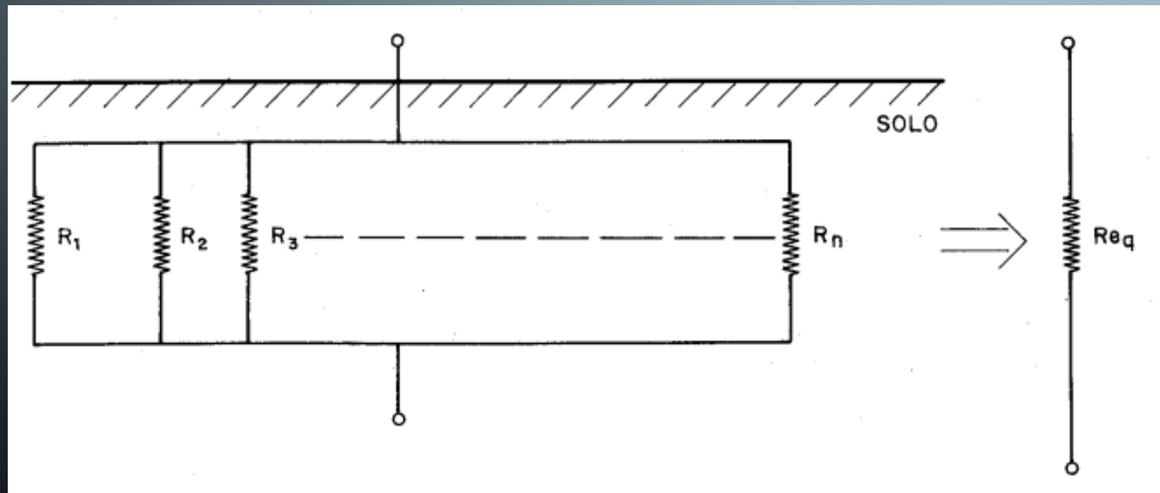
$$R_h = R_{hh} + \sum_{m=1, m \neq h}^n R_{hm}$$

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



SISTEMAS DE ATERRAMENTO

- Interligação de hastes em paralelo

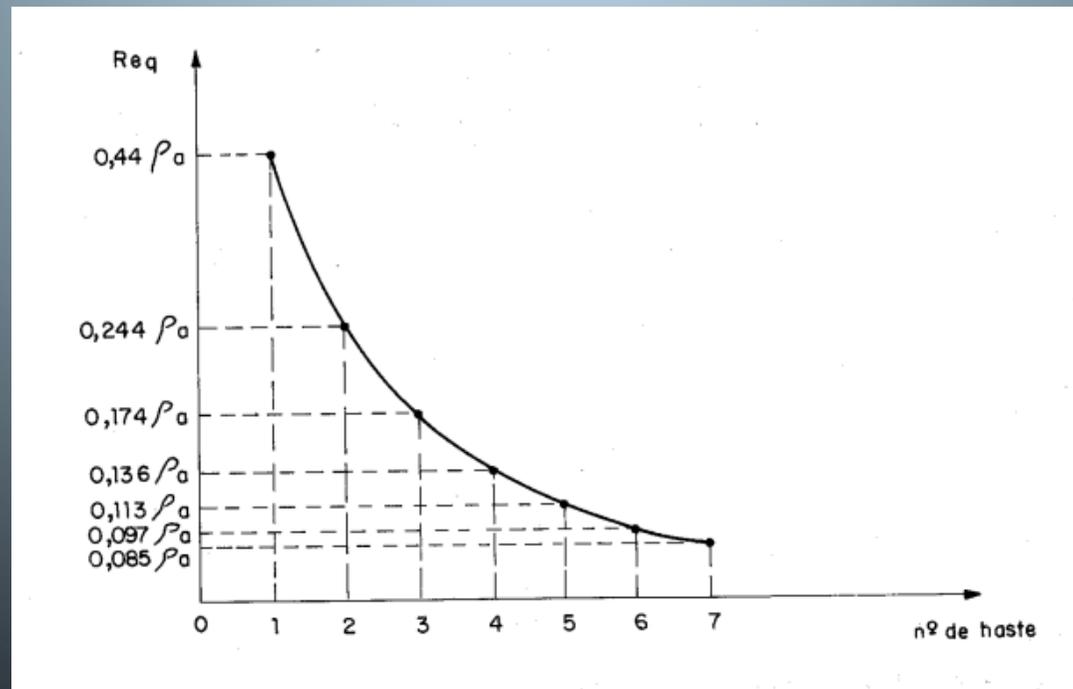


$$\begin{aligned}R_1 &= R_{11} + R_{12} + R_{13} + \cdots + R_{1n} \\R_2 &= R_{21} + R_{22} + R_{23} + \cdots + R_{2n} \\&\vdots \\R_n &= R_{n1} + R_{n2} + R_{n3} + \cdots + R_{nn}\end{aligned}$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}$$
$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}}$$

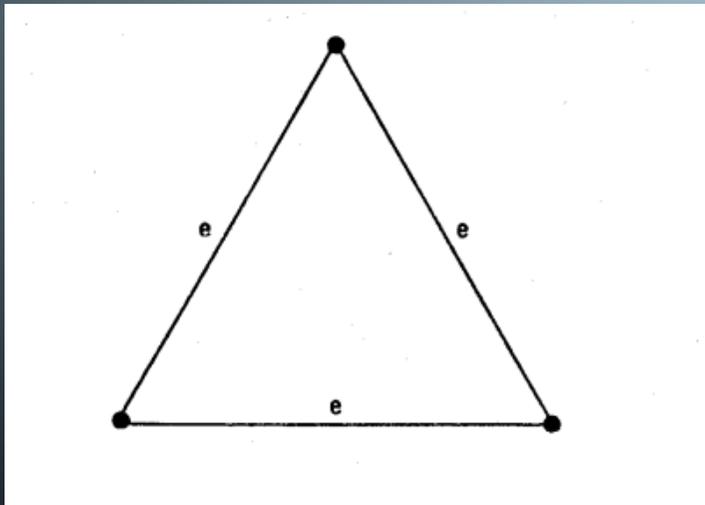
SISTEMAS DE ATERRAMENTO

- Interligação de hastes em paralelo

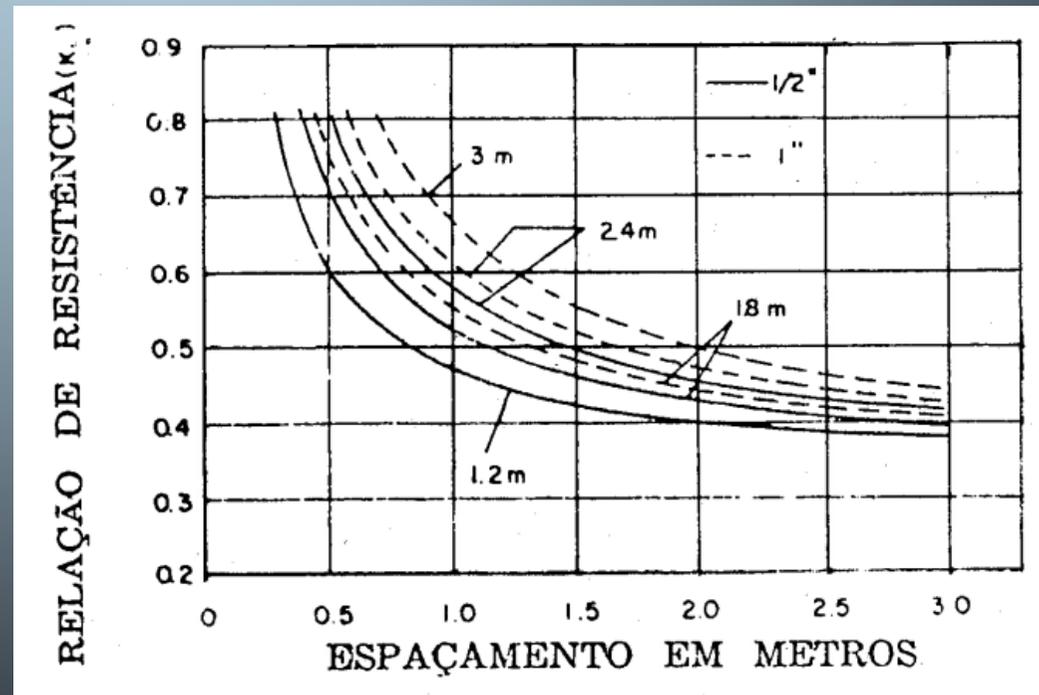


SISTEMAS DE ATERRAMENTO

- Dimensionamento de sistema de aterramento com hastes em triângulo

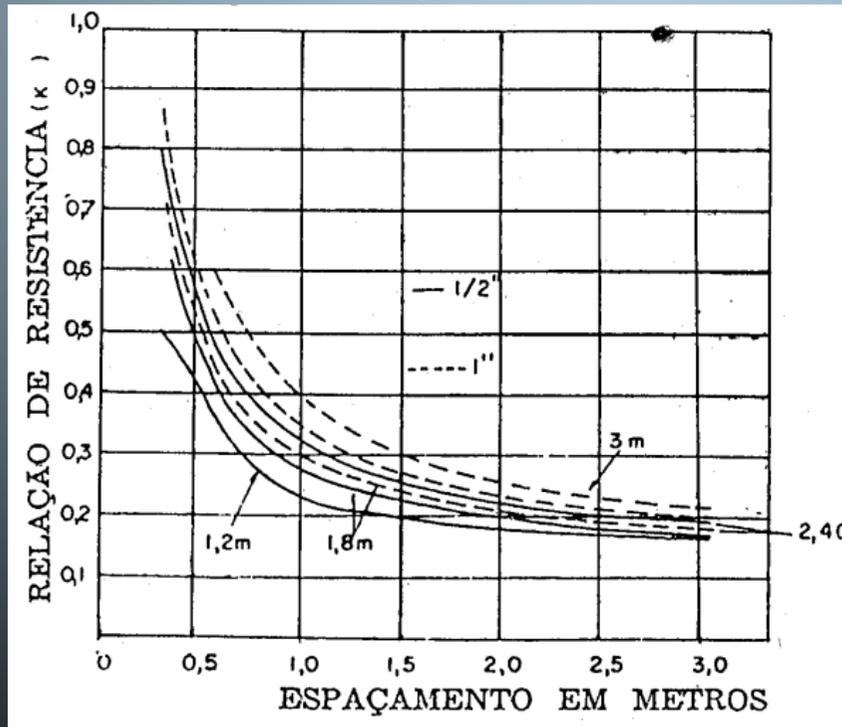
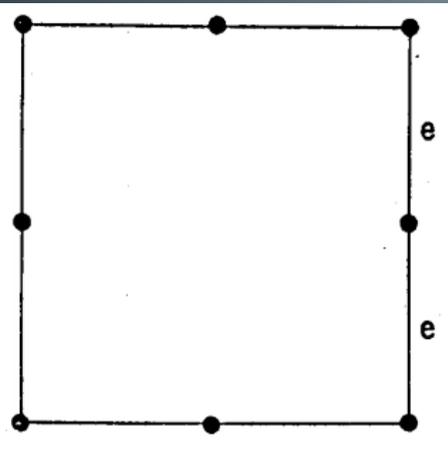


$$R_{eq\Delta} = K R_{1haste}$$

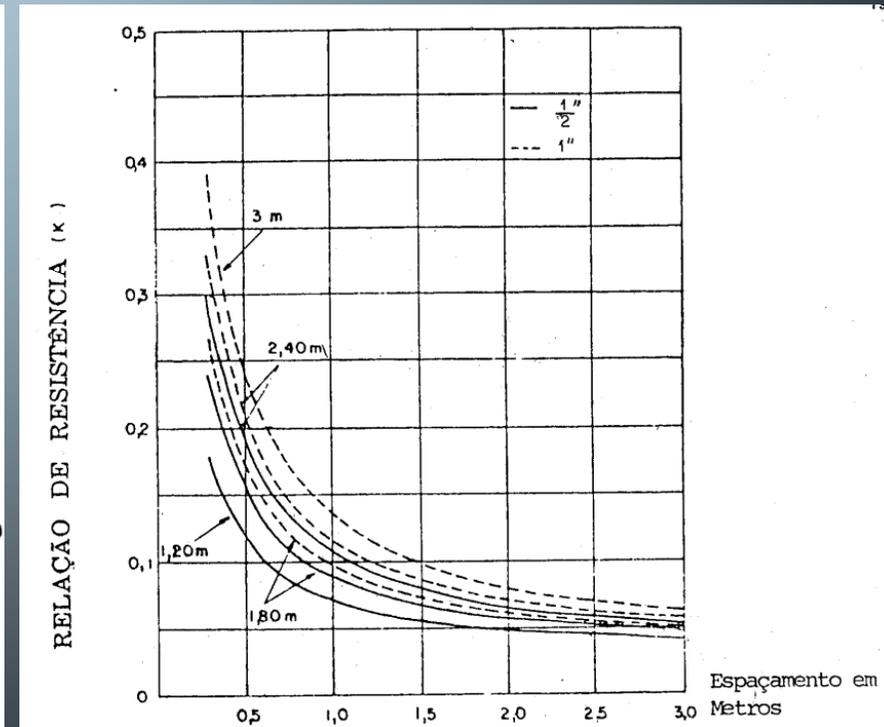


SISTEMAS DE ATERRAMENTO

- Dimensionamento de sistema de aterramento com hastes em quadrado vazio



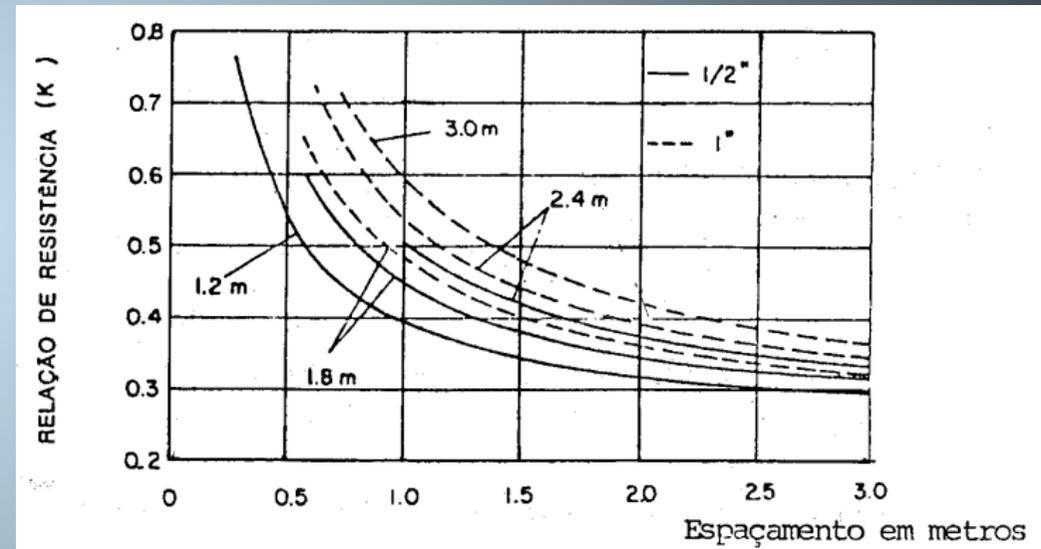
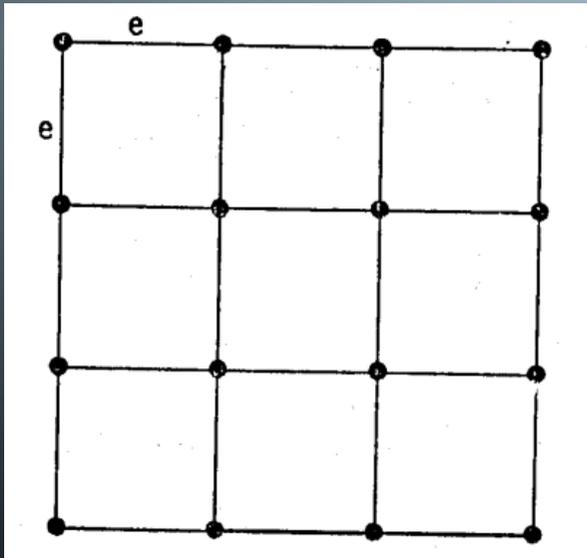
8 Hastes



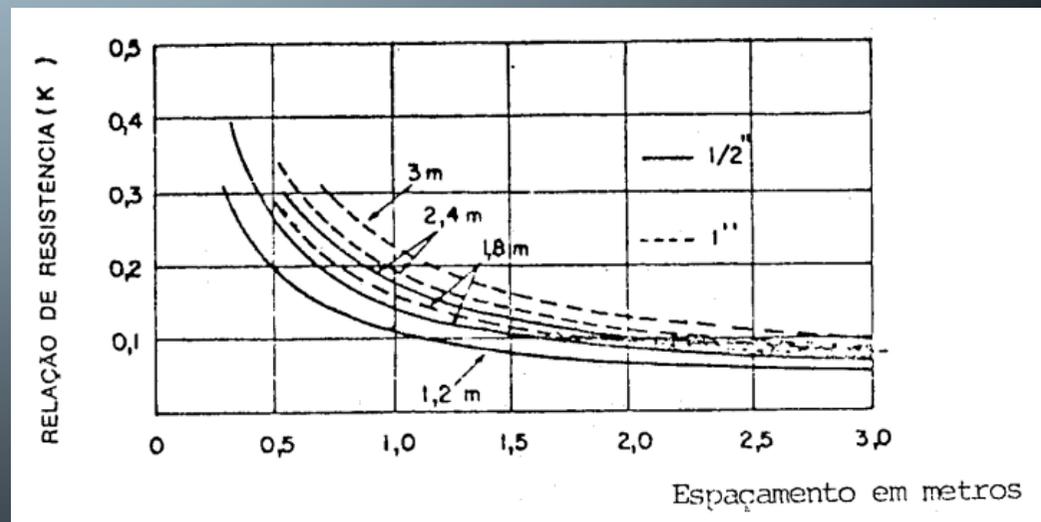
36 Hastes

SISTEMAS DE ATERRAMENTO

- Dimensionamento de sistema de aterramento com hastes em quadrado cheio



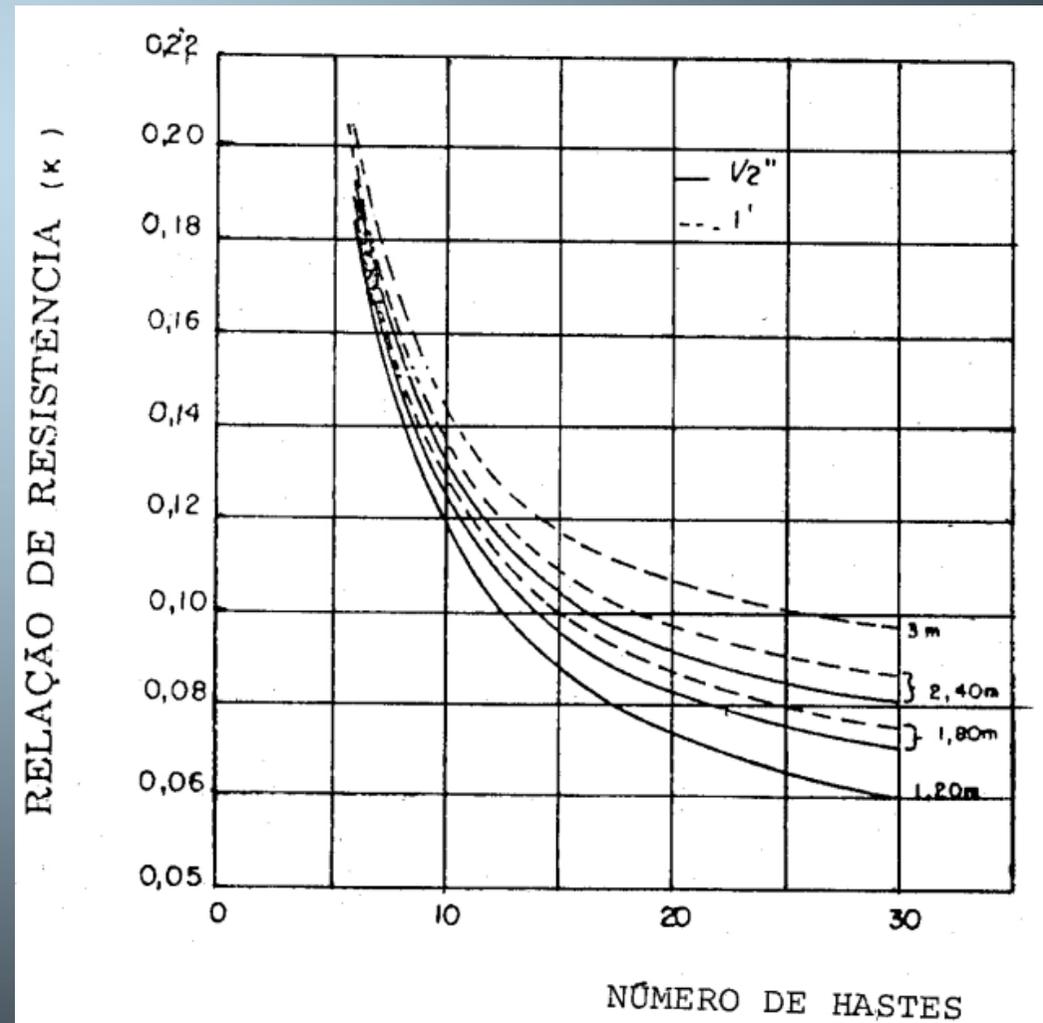
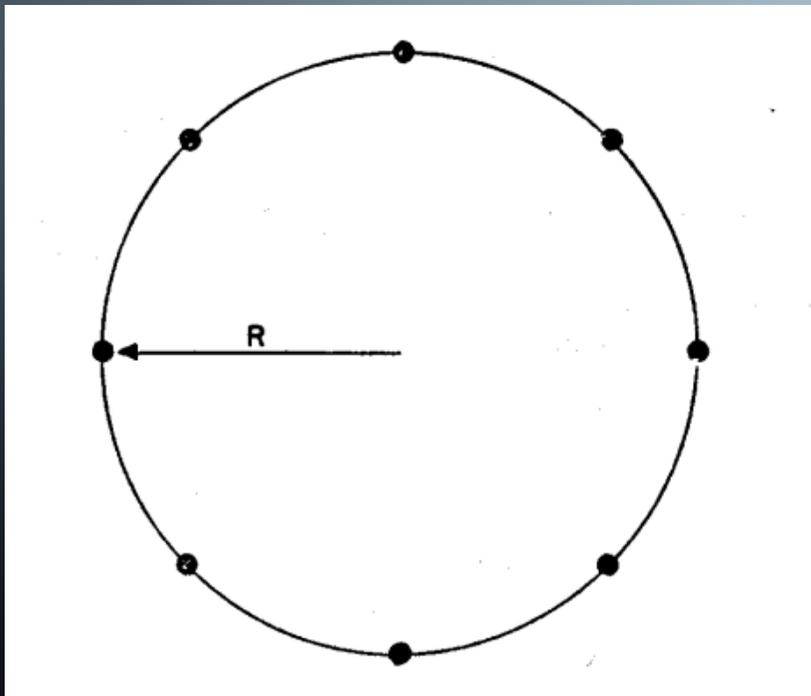
8 Hastes



36 Hastes

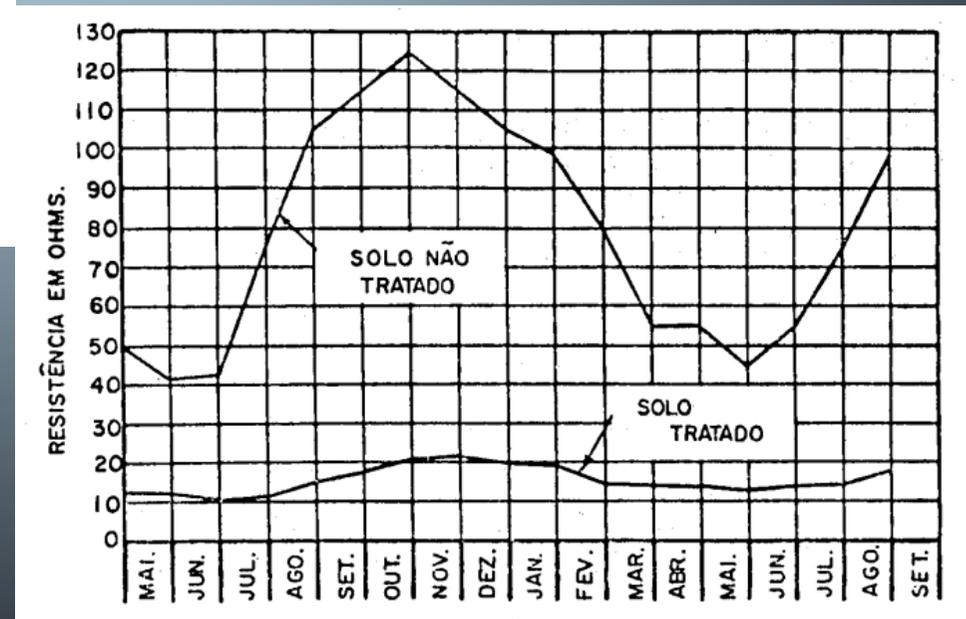
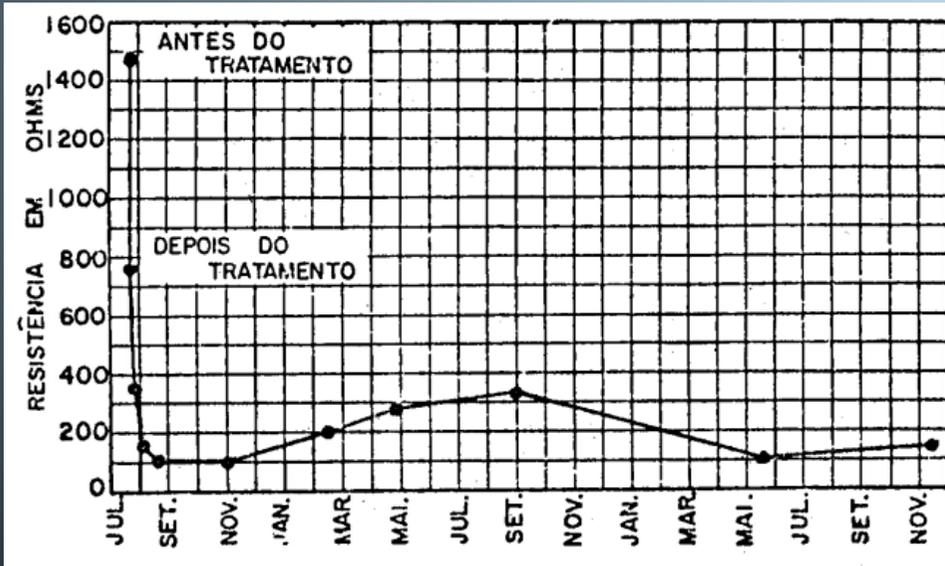
SISTEMAS DE ATERRAMENTO

- Dimensionamento de sistema de aterramento com hastes em circunferência

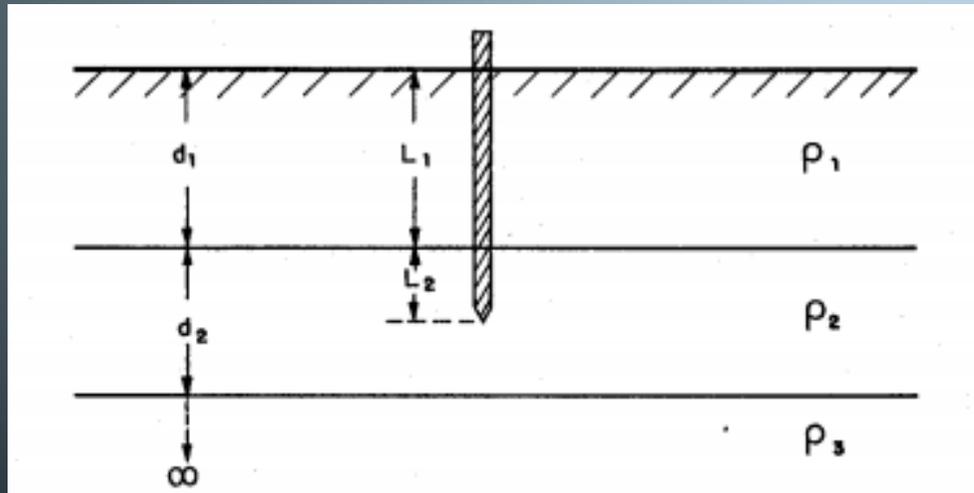


Com 9 metros de raio

TRATAMENTO QUÍMICO DO SOLO



RESISTIVIDADE APARENTE



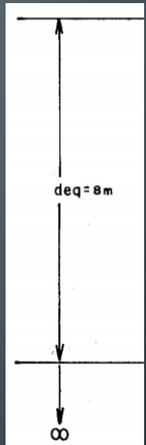
$$R_{\text{aterramento}} = \rho a f(g)$$

- Coeficiente de penetração

$$\alpha = \frac{r}{d_{eq}}$$

$$r = \frac{A}{D}$$

- A** ⇒ Área abrangida pelo aterramento
- D** ⇒ Maior dimensão do aterramento

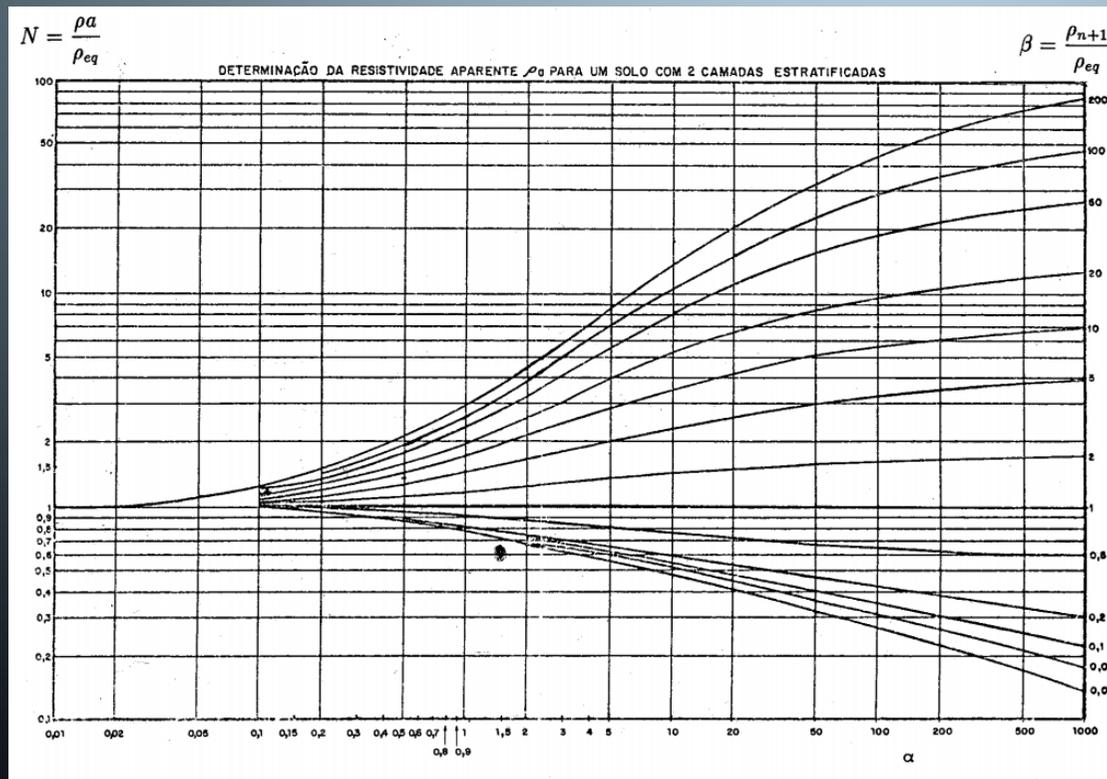


- Coeficiente de divergência

$$\beta = \frac{\rho_{n+1}}{\rho_{eq}}$$

RESISTIVIDADE APARENTE

- Para solo com duas camadas



$$\rho_a = N \cdot \rho_{eq}$$

FIBRILAÇÃO VENTRICULAR DO CORAÇÃO PELO CHOQUE ELÉTRICO



- Os efeitos variam com:

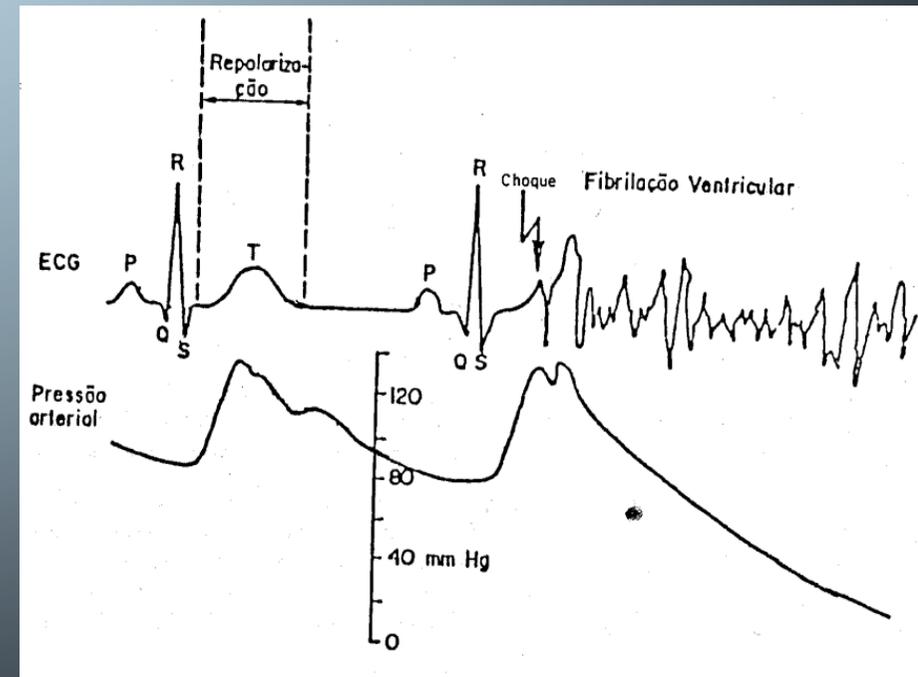
- ✓ Percurso da corrente elétrica pelo corpo
- ✓ Intensidade da corrente elétrica
- ✓ Tempo de duração do choque elétrico
- ✓ Tipo da corrente elétrica
- ✓ Frequência da corrente elétrica
- ✓ Tensão elétrica
- ✓ Estado de umidade da pele
- ✓ Condições orgânicas do indivíduo

- As perturbações são:

- ✓ Inibição dos centros nervosos, inclusive dos que comandam a respiração, produzindo **parada respiratória**
- ✓ Alteração do ritmo cardíaco, podendo produzir **fibrilação ventricular** e uma consequente **parada cardíaca**
- ✓ Queimaduras profundas, produzindo **necrose** do tecido
- ✓ Alterações no sangue provocadas por efeitos térmicos e eletrolíticos da corrente elétrica

FIBRILAÇÃO VENTRICULAR DO CORAÇÃO PELO CHOQUE ELÉTRICO

- Para choques elétricos devidos à tensão de toque e passo imposta pelo sistema de aterramento durante o defeito da rede elétrica, a manifestação mais importante a ser considerada é a **fibrilação ventricular do coração**
- A fibrilação ventricular é **irreversível espontaneamente**
- Se nenhuma providência for tomada dentro de 4 minutos, os danos cerebrais são comprometedores
- Dentro de 8 a 12 minutos, a fibrilação vai diminuindo a sua intensidade, passando para o regime de **parada cardíaca**
- Após a pressão cair a zero, o sangue está parado no corpo (estado conhecido como **morte aparente**)



INFLUÊNCIA DA CORRENTE ELÉTRICA



INFLUÊNCIA DA CORRENTE

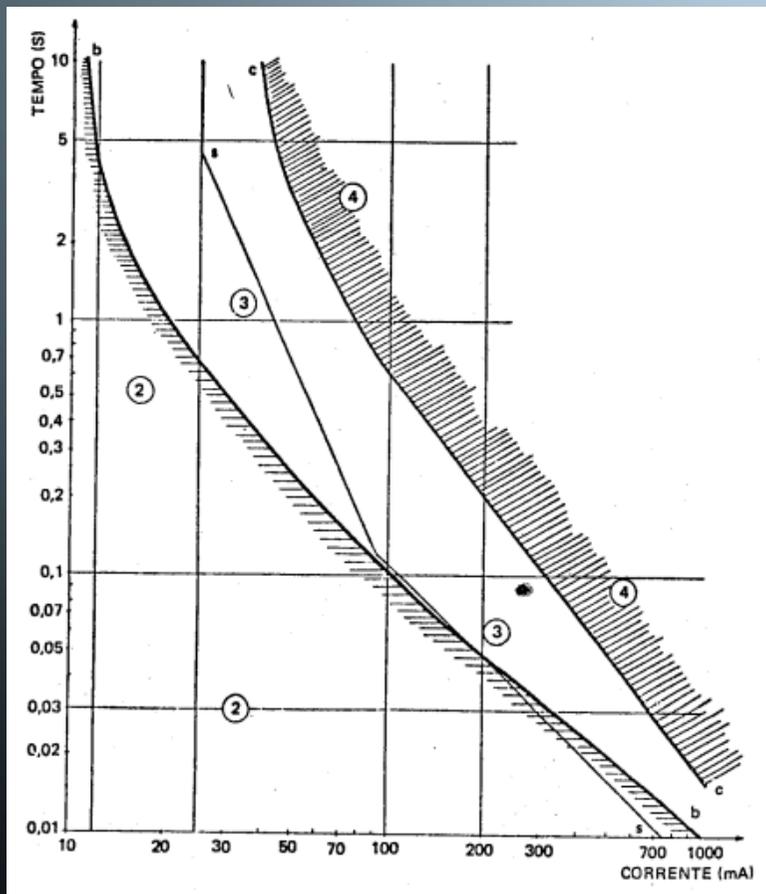
I (m A)		REAÇÃO FISIOLÓGICA	CONSEQUÊNCIA	SALVAMENTO	RESULTADO FINAL MAIS PROVÁVEL
C.A.	C.C.				
ATÉ 25	ATÉ 80	1 mA (C.A.)-Limiar da sensação/sens. de formigamento 5-15 mA(C.A.)-Contração muscular 15-25 mA(C.A.)-Contr.Violenta Impossib. de soltar o eletrodo. Prob. Respiratório	Se a corrente for próxima 25 mA --- pode haver Asfixia e conseq. Morte Aparente.	RESPIRAÇÃO ARTIFICIAL	RESTABELECIMENTO
25-80	80-300	- Sensação Insuportável - Contrações Violentas - Asfixia	MORTE APARENTE	RESPIRAÇÃO ARTIFICIAL	RESTABELECIMENTO
>80	>300	- Asfixia Imediata - Fibrilação Ventric. - Alteração Musculares (Químicas). - Queimaduras	MORTE APARENTE	- RESPIRAÇÃO ARTIFICIAL - MASSAGEM CARDÍACA	CASO LEVADO AO HOSP. E FEITO A DESFIBRILAÇÃO -- RESTABELECIMENTO
CORRENTE DA ORDEM DE AMPÈRES		- Queimaduras (Efeito Térmico). - Necrose dos tecidos - Fibrilação Vêntric. - Asfixia Imediata - Danos Posteriores Resultado do Produto da Eletrolise	- MORTE APARENTE - DEPENDENDO DA EXTENSÃO DAS QUEIMADURAS, SE QUELAS OU MORTE	- RESPIRAÇÃO ARTIFICIAL - MASSAGEM CARDÍACA - TRATAMENTO HOSPITALAR	- HOSPITAL - DESFIBRILAÇÃO - RECUPERAÇÃO DIFÍCIL - ATROFIA MUSCULAR - OUTROS DANOS



Charles Dalziel (1904–1986)

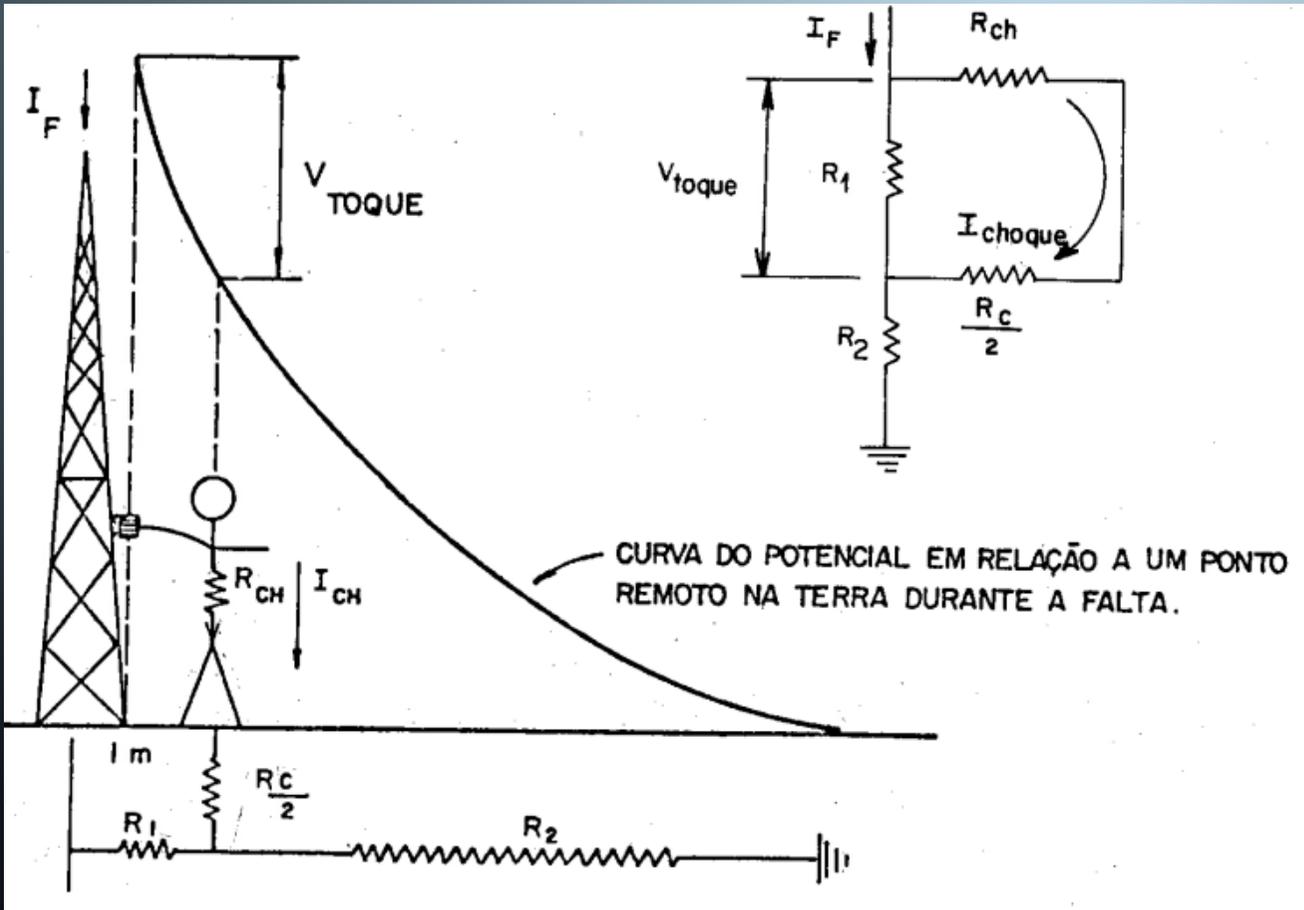
was a professor of electrical engineering and computer sciences at UC Berkeley. He studied the effects of electricity on animals and humans. He wrote *The Effects of Electric Shock on Man*, a book in which he explains the effects of different amounts of electricity on human subjects. He also invented the ground-fault circuit interrupter or GFCI in 1961. The GFCI is commonly found in home bathrooms or kitchens. The device operates normally until 5 milliamps passes from the appliance to ground. Charles Dalziel was a pioneer in understanding electric shock in humans.

INFLUÊNCIA DA CORRENTE ELÉTRICA



- Zona 2: Geralmente, nenhum efeito patofisiológico perigoso
- Zona 3: Produz algum efeito perigoso
O efeito mais importante é o pulmonar
Já pode haver risco de fibrilação
- Zona 4: Zona perigosa com probabilidade de fibrilação superior em 50% das pessoas
- Curva S: Curva de segurança com probabilidade de 0,5% de ocorrência de fibrilação ventricular

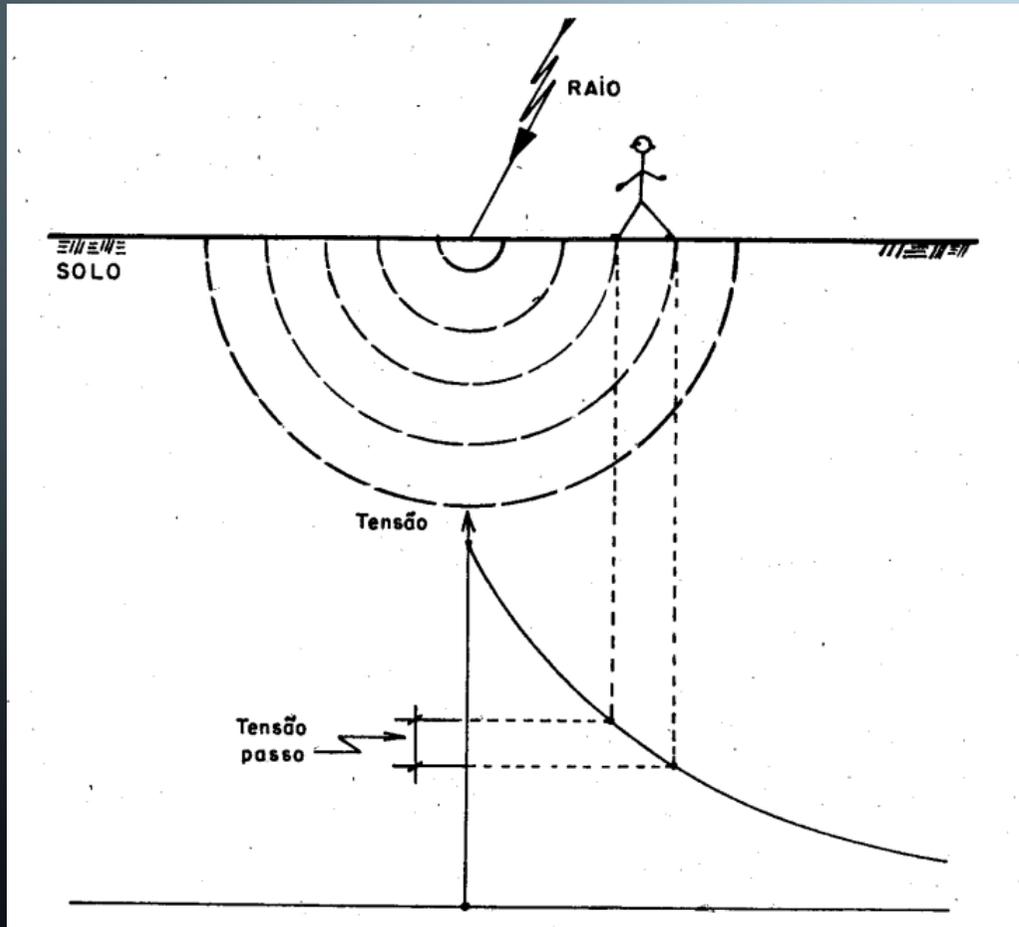
POTENCIAL DE TOQUE



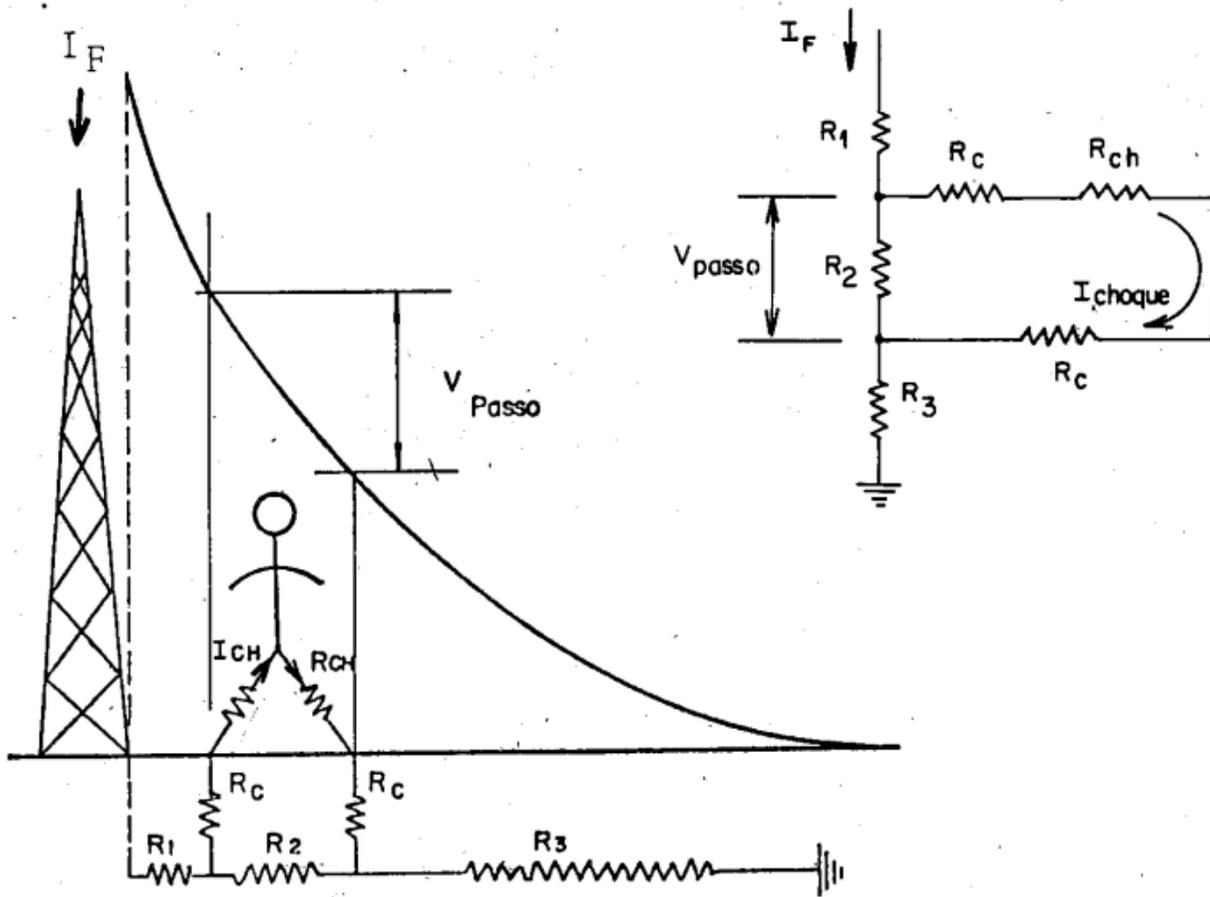
$$V_{\text{toque máximo}} = (1000 + 1,5 \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t}}$$

$$V_{\text{toque máximo}} = \frac{116 + 0,174 \rho_s}{\sqrt{t}} \quad [\text{Volts}]$$

POTENCIAL DE PASSO DE UM RAIO



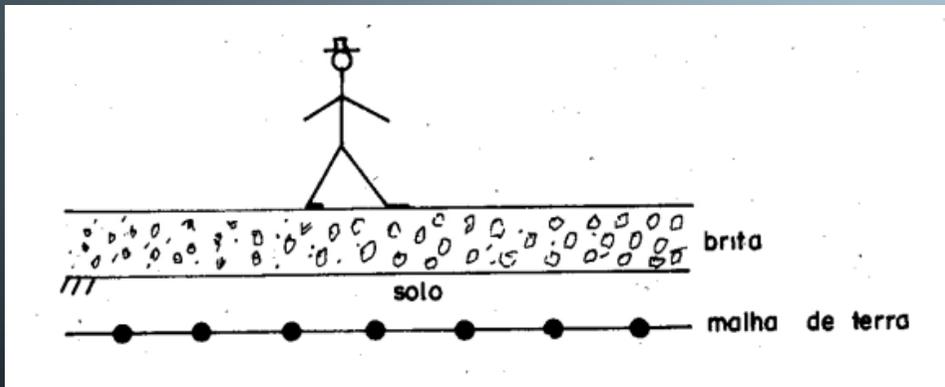
POTENCIAL DE PASSO



$$V_{passo \text{ máximo}} = (1000 + 6\rho s) \frac{0,116}{\sqrt{t}}$$

$$V_{passo \text{ máximo}} = \frac{116 + 0,696\rho s}{\sqrt{t}}$$

CORREÇÃO DO POTENCIAL DE PASSO E DE TOQUE MÁXIMO DEVIDO À COLOCAÇÃO DE BRITA NA SUPERFÍCIE



$$C_s(h_s, K) = \frac{1}{0,96} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n \frac{h_s}{0,08})^2}} \right]$$

$h_s \Rightarrow$ Profundidade (espessura) da brita [m]

$$K = \frac{\rho_a - \rho_s}{\rho_a + \rho_s}$$

$\rho_a \Rightarrow$ Resistividade aparente da malha, sem considerar a brita

$\rho_s = \rho_{brita} \Rightarrow$ Resistividade da brita

$C_s = 1 \Rightarrow$ Se a resistividade da brita for igual a resistividade do solo

MALHA DE ATERRAMENTO

- Dimensionamento do condutor da malha

- ✓ Deve ser dimensionado considerando os esforços mecânicos e térmicos
- ✓ Na prática, utiliza-se, no mínimo, o condutor de 35mm²
- ✓ Dimensionamento térmico (fórmula de Onderdonk)

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

S_{cobre} ⇒ Secção do condutor de cobre da malha de terra em mm².

I ⇒ Corrente de defeito em Ampères, através do condutor.

t_{defeito} ⇒ Duração do defeito em Segundos.

θ_a ⇒ Temperatura ambiente em °C.

θ_m ⇒ Temperatura máxima permissível em °C.

$\theta_m = 250^\circ\text{C}$ ⇒ para malha cavilhada com juntas de bronze;

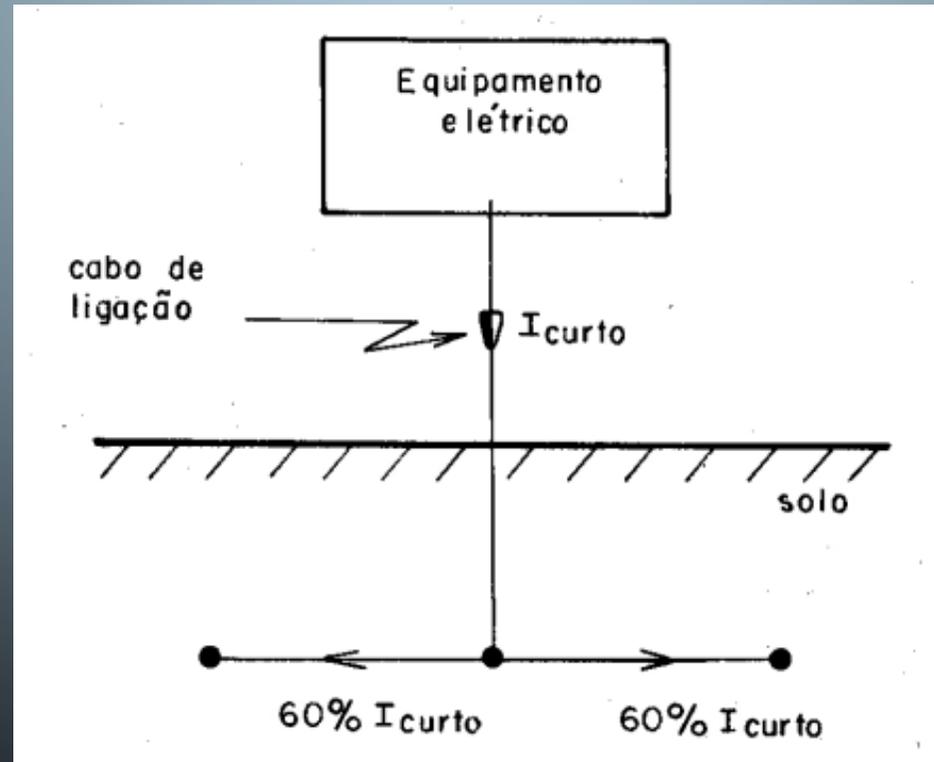
$\theta_m = 450^\circ\text{C}$ ⇒ para malha com emendas tipo solda convencional;

$\theta_m = 550^\circ\text{C}$ ⇒ para malha cuja conexão é com **Foscoper**;

$\theta_m = 850^\circ\text{C}$ ⇒ para malha com emendas em solda exotérmica.

MALHA DE ATERRAMENTO

- Dimensionamento do condutor da malha



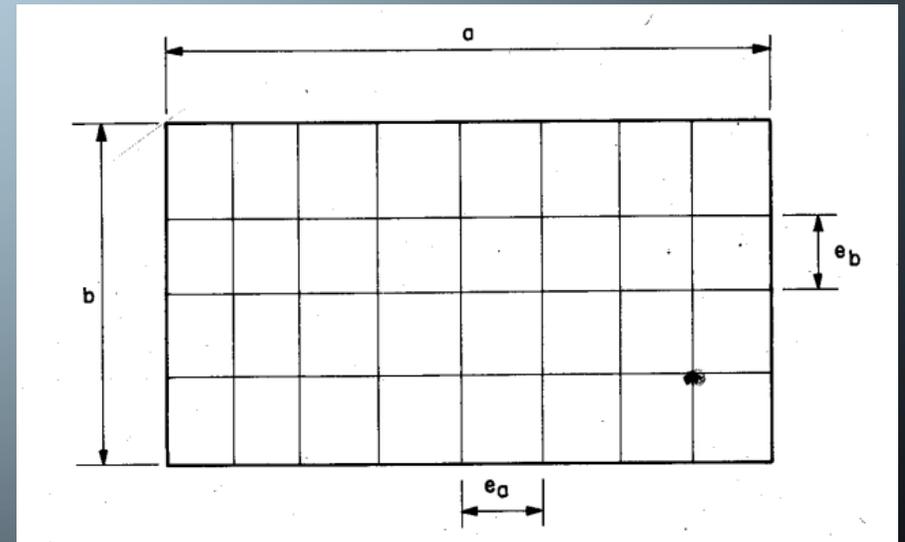
MALHA DE ATERRAMENTO

- Potenciais máximos a serem verificados

$$V_{\text{toque}} \leq V_{\text{toque máximo}}$$

$$V_{\text{passo}} \leq V_{\text{passo máximo}}$$

- Malha inicial

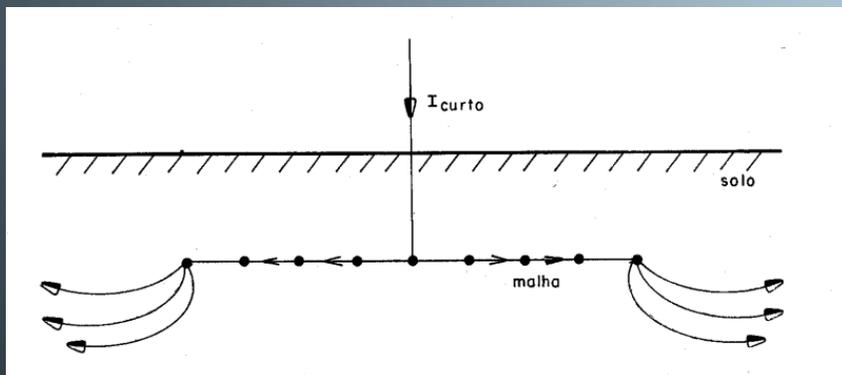


$$N_a = \frac{a}{e_a} + 1$$

$$N_b = \frac{b}{e_b} + 1$$

MALHA DE ATERRAMENTO

- Potencial da malha



$$V_{malha} = \frac{\rho_a K_m K_i I_{malha}}{L_{total}}$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left\{ \ln \left[\frac{e^2}{16hd} + \frac{(e+2h)^2}{8ed} - \frac{h}{4d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2N-1)} \right\}$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}$$

h \Rightarrow Profundidade da malha [m]

e \Rightarrow Espaçamento entre condutores paralelos ao longo do lado da malha [m]

d \Rightarrow Diâmetro do condutor da malha [m]

$N = \sqrt{N_a N_b}$ \Rightarrow A malha retangular é transformada numa malha quadrada com N condutores paralelos em cada lado

$K_{ii} = 1$ \Rightarrow Para malha com hastes cravadas ao longo do perímetro ou nos cantos da malha ou ambos

$K_{ii} = \frac{1}{(2N)^{\frac{1}{4}}}$ \Rightarrow Para malha sem hastes cravadas na malha ou com poucas hastes não localizadas nos cantos e perímetro da malha

K_h \Rightarrow Correção de profundidade é calculado pela expressão 8.9.3.

$h_0 = 1m$.

$$K_i = 0,656 + 0,172 N$$

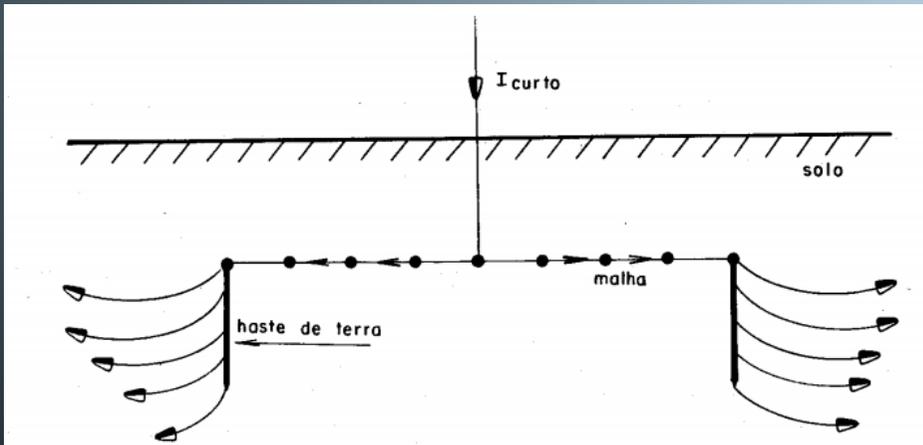
ρ_a \Rightarrow Resistividade aparente vista pela malha

I_{malha} \Rightarrow Parcela da corrente máxima de falta que realmente escoo da malha para a terra

L_{total} \Rightarrow Comprimento total dos condutores da malha

MALHA DE ATERRAMENTO

- Potencial da malha



$$L_{total} = L_{cabo} + 1,15 L_{hastes}$$

$$V_{malha} = \frac{\rho a K_m K_i I_{malha}}{L_{cabo} + 1,15 L_{hastes}}$$

- Potencial de passo na malha

$$V_{psM} = \frac{\rho a K_p K_i I_{malha}}{L_{total}}$$

K_p ⇒ Coeficiente que introduz no cálculo a maior diferença de potencial entre dois pontos distanciados de 1m. Este coeficiente relaciona todos os parâmetros da malha que induzem tensões na superfície da terra.

$$K_p = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{e+h} + \frac{1}{e} (1 - 0,5^{N-2}) \right]$$

$N = \text{Máximo}(N_a, N_b)$ ⇒ este dará o maior valor para K_p

$$V_{psM} = \frac{\rho a K_p K_i I_{malha}}{L_{cabo} + 1,15 L_{hastes}}$$

- Potencial da malha

MALHA DE ATERRAMENTO

- Resistência de aterramento da malha

$$R_{malha} = \rho a \left[\frac{1}{L_{total}} + \frac{1}{\sqrt{20A_{malha}}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{\frac{20}{A_{malha}}}} \right) \right]$$

$A_{malha} = a.b \Rightarrow$ Área ocupada pela malha [m^2]

$h \Rightarrow$ Profundidade da malha [m], com $0,25m \leq h \leq 2,5m$

$L_{total} \Rightarrow$ Comprimento total dos cabos e hastes que formam a malha

MALHA DE ATERRAMENTO

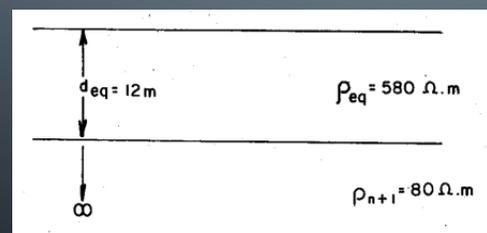
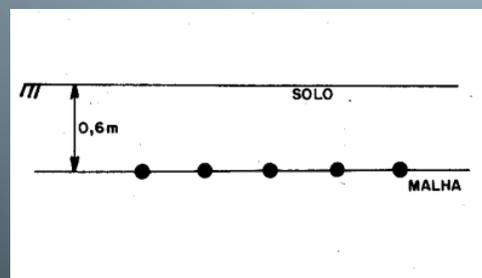
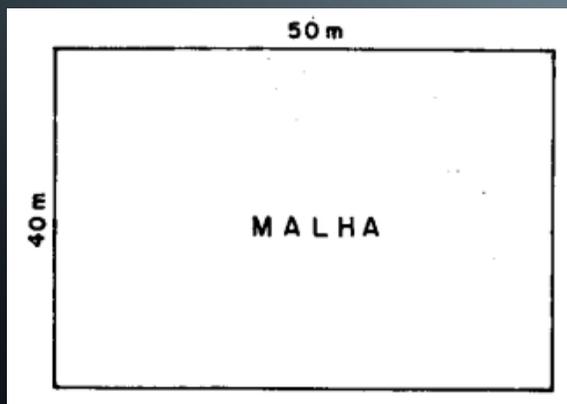
- Exemplo de dimensionamento

Projetar uma malha de terra com os seguintes dados pré-definidos:

$$I_{cc\phi-T(\text{máximo})} = 3000A \quad I_{malha} = 1200A$$

Tempo de abertura da proteção para a corrente de defeito é $t_{\text{defeito}} = 0,6s$.

$\rho_s = \rho_{\text{brita}} = 3000 \Omega.m$ com uma camada de 20cm colocada na superfície do solo.



- Determinação de ρ_a , vista pela malha

$$r = \frac{A}{D} = \frac{40 \cdot 50}{\sqrt{40^2 + 50^2}} = \frac{2000}{64,03} = 31,23m$$

$$\alpha = \frac{r}{d_{eq}} = \frac{31,23}{12} = 2,60$$

$$\beta = \frac{\rho_{n+1}}{\rho_{eq}} = \frac{80}{580} = 0,138$$

$$\left. \begin{matrix} \alpha \\ \beta \end{matrix} \right\} \rightarrow N = 0,71$$

$$\rho_a = N \rho_{eq} = 0,71 \cdot 580 = 411,8 \Omega.m$$

MALHA DE ATERRAMENTO

2. Cálculo da seção transversal dos condutores que formam a malha de terra

$$I_{\text{defeito}} = 60\% I_{\text{cc}\phi-T} = 0,6 \cdot 3000 = 1800A$$

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

$$\theta_a = 30^\circ C$$

$$\theta_m = 450^\circ C \rightarrow \text{solda convencional}$$

$$1800 = 226,53 S_{\text{cobre}} \sqrt{\frac{1}{0,6} \ln \left(\frac{450 - 30}{234 + 30} + 1 \right)}$$

$$S_{\text{cobre}} = 6,31 \text{ mm}^2$$

Por razões mecânicas usa-se no mínimo o cabo com 35 mm^2 , cujo diâmetro é $6,6756 \text{ mm}$.

3. Seção transversal do cabo de ligação

$$I_{\text{defeito}} = 3000A$$

$$\theta_m = 250^\circ C$$

$$S_{\text{cabo de ligação}} = 13,10 \text{ mm}^2$$

Usar 35 mm^2 .

MALHA DE ATERRAMENTO

4. Valores dos potenciais máximos admissíveis

$$C_s(h_s, K) = \frac{1}{0,96} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n \frac{h_s}{0,08})^2}} \right]$$

$h_s = 0,20m \rightarrow$ camada de brita

$$K = \frac{\rho_a - \rho_s}{\rho_a + \rho_s} = \frac{411,8 - 3000}{411,8 + 3000} = -0,759$$

$$C_s(h_s, K) = \frac{1}{0,96} \left\{ 1 + 2 \left[\frac{-0,759}{\sqrt{1 + (\frac{2 \cdot 0,2}{0,08})^2}} + \frac{(-0,759)^2}{\sqrt{1 + (\frac{2 \cdot 2 \cdot 0,2}{0,08})^2}} + \frac{(-0,759)^3}{\sqrt{1 + (\frac{2 \cdot 3 \cdot 0,2}{0,08})^2}} \right] \right\}$$

$C_s(h_s, K) = 0,7905$

$$V_{\text{toque máximo}} = [1000 + 1,5 C_s(h_s, K) \rho_s] \frac{0,116}{\sqrt{t}}$$

$$V_{\text{toque máximo}} = [1000 + 1,5 \cdot 0,7905 \cdot 3000] \frac{0,116}{\sqrt{0,6}}$$

$$V_{\text{toque máximo}} = 682,47V$$

$$V_{\text{passo máximo}} = [1000 + 6 C_s(h_s, K) \rho_s] \frac{0,116}{\sqrt{t}}$$

$$V_{\text{passo máximo}} = [1000 + 6 \cdot 0,7905 \cdot 3000] \frac{0,116}{\sqrt{0,6}}$$

$$V_{\text{passo máximo}} = 2280,62V$$

5. Projeto inicial para o espaçamento

$$e_a = e_b = 3m$$

- Número de condutores ao longo dos lados

$$N_a = \frac{50}{3} + 1 = 17,66 \quad N_b = \frac{40}{3} + 1 = 14,33$$

Como N_a e N_b devem ser inteiros, faz-se

$$N_a = 18 \quad e_a = 2,941m$$

$$N_b = 14 \quad e_b = 3,077m$$

- Comprimento total dos cabos que formam a malha.

$$L_{\text{cabo}} = 18 \cdot 40 + 14 \cdot 50 = 1420m$$

MALHA DE ATERRAMENTO

6. Cálculo da resistência da malha

$$R_{malha} = \rho a \left[\frac{1}{L_{total}} + \frac{1}{\sqrt{20A_{malha}}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{\frac{20}{A_{malha}}}} \right) \right]$$

$A_{malha} = a.b \Rightarrow$ Área ocupada pela malha [m²]

$h \Rightarrow$ Profundidade da malha [m], com $0,25m \leq h \leq 2,5m$

$L_{total} \Rightarrow$ Comprimento total dos cabos e hastes que formam a malha

$$R_{malha} = 411,8 \left[\frac{1}{1420} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 40 \cdot 50}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0,6 \sqrt{\frac{20}{40 \cdot 50}}} \right) \right]$$

$$R_{malha} = 4,291 \Omega$$

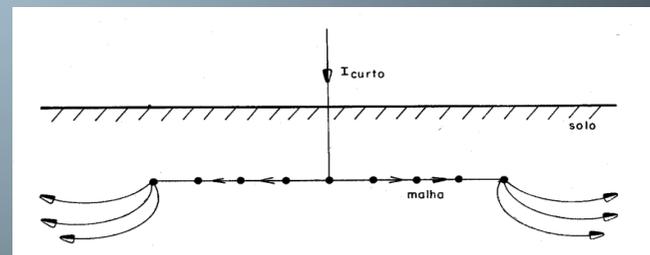
$$V_{toque\ máximo\ da\ malha} = R_{malha} \cdot I_{malha} = 4,291 \cdot 1200 = 5149,2V$$

$$R_{malha} \cdot I_{malha} > V_{toque\ máximo}$$

7. Cálculo do potencial de malha durante o defeito

$$V_{malha} = \frac{\rho a K_m K_i I_{malha}}{L_{total}}$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left\{ \ln \left[\frac{e^2}{16hd} + \frac{(e+2h)^2}{8ed} - \frac{h}{4d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2N-1)} \right\}$$



$h \Rightarrow$ Profundidade da malha [m]

$e \Rightarrow$ Espaçamento entre condutores paralelos ao longo do lado da malha [m]

$d \Rightarrow$ Diâmetro do condutor da malha [m]

$N = \sqrt{N_a N_b} \Rightarrow$ A malha retangular é transformada numa malha quadrada com N condutores paralelos em cada lado

$K_{ii} = 1 \Rightarrow$ Para malha com hastes cravadas ao longo do perímetro ou nos cantos da malha ou ambos

$K_{ii} = \frac{1}{(2N)^{\frac{1}{2}}} \Rightarrow$ Para malha sem hastes cravadas na malha ou com poucas hastes não localizadas nos cantos e perímetro da malha

$K_h \Rightarrow$ Correção de profundidade é calculado pela expressão

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}$$

MALHA DE ATERRAMENTO

7. Cálculo do potencial de malha durante o defeito

$$N = \sqrt{18 \cdot 14} = 15,8745$$
$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot 15,8745)^{\frac{2}{15,8745}}} = \frac{1}{(31,749)^{0,126}} = 0,6468$$
$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0,6}{1}} = 1,2649$$

$$\text{Condutor } 35\text{mm}^2 \Rightarrow d = 6,6756 \cdot 10^{-3}\text{m}$$

Como $e_a \neq e_b$, utiliza-se apenas no cálculo do K_m , o maior espaçamento, pois o mesmo resulta no maior valor de K_m .

$$e = \text{máximo}(e_a, e_b) = 3,077\text{m}$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left\{ \ln \left[\frac{3,077^2}{16 \cdot 0,6 \cdot 6,6756 \cdot 10^{-3}} + \frac{(3,077 + 2 \cdot 0,6)^2}{8 \cdot 3,077 \cdot 6,6756 \cdot 10^{-3}} - \frac{0,6}{4 \cdot 6,6756 \cdot 10^{-3}} \right] + \frac{0,6468}{1,2649} \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot 15,8745 - 1)} \right] \right\}$$

$$K_m = 0,6673$$

$$K_i = 0,656 + 0,172 \cdot 15,8745 = 3,3864$$

$$V_{malha} = \frac{411,8 \cdot 0,6673 \cdot 3,3864 \cdot 1200}{1420} = 786,39\text{V}$$

$$V_{malha} \geq V_{\text{toque máximo}}$$

MALHA DE ATERRAMENTO

8. Estimativa do mínimo comprimento do condutor

$$V_{malha} \leq V_{toque\ máximo}$$
$$\frac{\rho a K_m K_i I_{malha}}{L_{mínimo}} \leq V_{toque\ máximo}$$

$$L_{mínimo} \geq \frac{\rho a K_m K_i I_{malha}}{V_{toque\ máximo}}$$
$$L_{mínimo} \geq \frac{411,8 \cdot 0,6673 \cdot 3,3864 \cdot 1200}{682,47}$$
$$L_{mínimo} \geq 1636,22m$$

9. Modificação do projeto da malha

$$L_{total} = L_{cabo} + L_{hastes} \geq L_{mínimo}$$

$$L_{total} = 1420 + 3N_h \geq 1636,22$$

$$N_h \geq 72,07$$

$$N_h = 73\ hastes$$

$$L_{hastes} = 3N_h = 3 \cdot 73 = 219m$$

$$L_{total} = L_{cabo} + L_{hastes} = 1420 + 219 = 1639m$$

MALHA DE ATERRAMENTO

10. Cálculo do potencial de malha

$$K_{ii} = 1 \quad N = \sqrt{18 \cdot 14} = 15,8745$$

$$K_h = 1,2649 \quad K_i = 3,3864$$

$$K_m = 0,5565$$

$$V_{malha} = \frac{411,8 \cdot 0,5565 \cdot 3,3864 \cdot 1200}{1420 + 1,15 \cdot 219} = 557,02V$$

$$V_{malha} \leq V_{toque \text{ máximo}}$$

11. Cálculo do potencial de passo na periferia da malha

$$N = \text{máximo}(18, 14) = 18$$

$$K_i = 0,656 + 0,172 \cdot 18 = 3,752$$

$$e = \text{mínimo}(e_a, e_b) = 2,941m$$

$$K_p = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{e+h} + \frac{1}{e} (1 - 0,5^{N-2}) \right]$$

$$K_p = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \cdot 0,6} + \frac{1}{2,941 + 0,6} + \frac{1}{2,941} (1 - 0,5^{18-2}) \right]$$

$$K_p = 0,4634$$

$$V_{psM} = \frac{411,8 \cdot 0,4634 \cdot 3,752 \cdot 1200}{1420 + 1,15 \cdot 219} = 513,91V$$

$$V_{psM} < V_{passo \text{ máximo}}$$