



PROCEDIMENTOS DE PROJETOS

CÁLCULO DE SISTEMAS DE ELETRODOS DE TERRA

I N D I C E

ITEM	TÍTULO	PÁGINA
1.	OBJETIVO	02/12
2.	CAMPO DE APLICAÇÃO	02/12
3.	NORMAS APLICÁVEIS	02/12
4.	CRITÉRIOS DE CÁLCULO	02/12
5.	MÉTODOS DE CÁLCULO	03/12
5.1	Sistema de Eletrodo Vertical Singelo	03/12
5.2	Sistema com Eletrodos Verticais Multiplos	04/12
5.3	Sistema de Poço de Terra	05/12
5.4	Sistema de Eletrodos Horizontais enterrados for mando malha ou rede	05/12
5.6	Curvas para determinação do comprimento da hastes de cobre	07/12

PROCEDIMENTOS DE PROJETOS

CÁLCULO DE SISTEMAS DE ELETRODOS DE TERRA

1. OBJETIVO

Este documento tem por objetivo estabelecer diretrizes para a execução de cálculos dos sistemas de eletrodos de terra.

2. CAMPO DE APLICAÇÃO

Aplicam-se ao projeto de sistemas de eletrodos de terra, a serem usados nas estações de telecomunicações, das Empresas do Grupo TELEBRÁS.

3. NORMAS APLICÁVEIS

226-1140-01 : Especificações Gerais de Sistemas de Aterramento.

226-3740-01 : Procedimentos de Testes - Medições de Resistividade do Solo e de Resistência dos Sistemas de Aterramento.

4. CRITÉRIOS DE CÁLCULO

O cálculo para os Sistemas de eletrodos de terra, parte do valor da resistividade do solo, devendo atingir valores de resistência esperada inferiores àqueles de resistência máxima desejável para cada aplicação, conforme especificado na NORMA TELEBRÁS 226-1140-01 . Nos casos que não for possível encontrar um valor menor que a resistência máxima desejável, seja por posição da resistividade do solo ou das dimensões do terreno, deve ser tomado como referência o valor de resistência máxima admissível.

5. MÉTODOS DE CÁLCULO

5.1 Sistema de Eletrodo Vertical Singelo

Este sistema poderá ser usado em terrenos de baixa resis
tividade, $\rho \leq 100 \Omega \text{ m}$.

Com ρ conhecido e usando a fórmula,

$$R_{e1} = \frac{\rho}{2\pi L} \left(1_n \frac{8L}{d} - 1 \right) \quad \text{onde,}$$

R_{e1} = resistência esperada, em ohm

ρ = resistividade do solo, em ohm.m

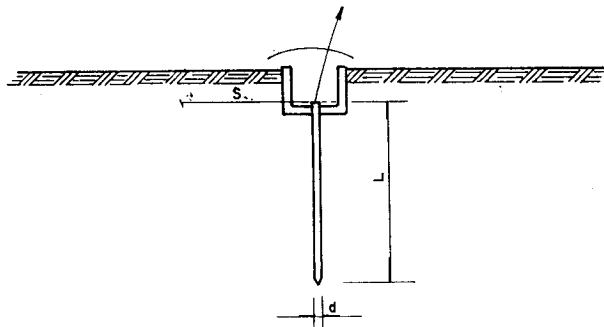
L = comprimento do eletrodo a ser enterrado, em metros,

1_n = logarítmo neperiano

d = diâmetro do eletrodo, em metros

Atribuímos valores a L e d , até atingirmos um R_e , menor que a resistência máxima desejável.

A mesma fórmula poderá ser aplicada para outras seções transversais, além da circular. Neste caso, d deverá ser a maior dimensão da seção reta usada.



ELETRODO VERTICAL SINGELO

5.2 Sistema com Eletrodos Verticais Múltiplos

Este sistema poderá ser usado quando a resistividade do solo for baixa e quando não houver disponibilidade no local, de eletrodo com o comprimento encontrado no caso anterior.

Com a resistividade conhecida e calculada a resistência esperada de um eletrodo com o comprimento disponível (Re_1) usa-se a fórmula:

$$R_e = \frac{1}{n} \left[Re_1 + \frac{\rho}{\pi S} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \dots + \frac{1}{n} \right) \right]$$

onde:

R_e = resistência esperada, em ohm

ρ = resistividade do solo, em ohm.m

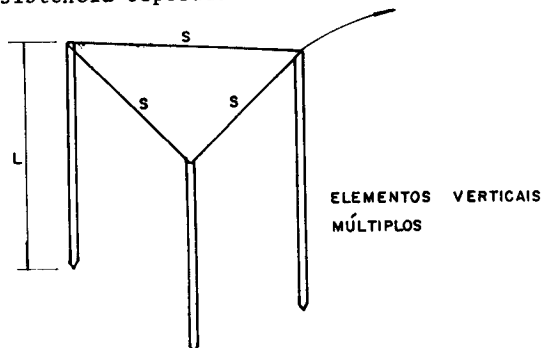
S = espaçamento entre eletrodos, sendo
 S sempre maior ou igual a L .

Re_1 = resistência esperada de (1) um eletrodo, em ohm.

n = número de eletrodos

Atribuímos valores a n , até atingir o valor de R_e menor que a resistência máxima desejável.

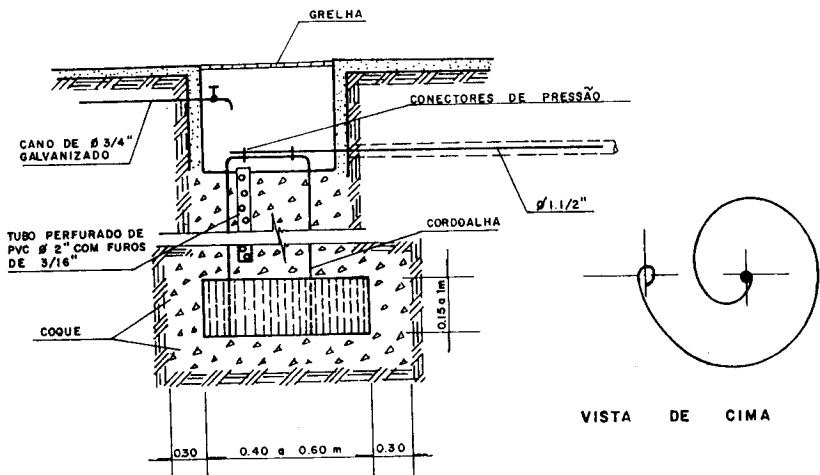
A ligação entre os eletrodos deverá ser feita utilizando-se cabo de cobre nú enterrado, que melhorará a resistência esperada.



5.3 Sistema de Poço de Terra

Este sistema poderá ser utilizado quando a resistividade do solo for baixa e o espaço disponível para construção de sistema de eletrodos de terra for pequeno.

Devido a artifícios utilizados (coque, gotejamento de água) a resistividade do solo é alterada, tornando-se difícil o cálculo da resistência esperada, e portanto, não é efetuado.



5.4 Sistema de Eletrodos Horizontais Enterrados Formando Malha ou Rede.

É o sistema mais utilizado para grandes instalações, porque ao mesmo tempo que assegura equipotencialidade na plataforma da estação, baixa bastante a resistência do solo, sendo ainda bastante simplificado o cálculo.

Com ρ e r conhecidos, usando-se a fórmula:

$$R = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L} \quad \therefore \quad L = \frac{4\rho r}{4Rr - \rho}$$

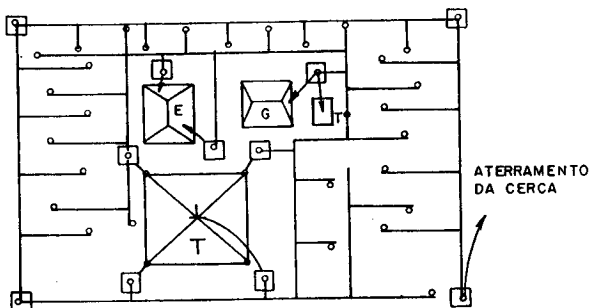
onde:

L - comprimento de todo o material a ser enterrado horizontalmente (despreza-se portanto, o comprimento dos eletrodos verticais, quando houver).

r - raio do círculo de área equivalente a do quadrilátero da plataforma.

$$(dimensões a + b) \text{ Assim } r = \sqrt{\frac{a \times b}{\pi}}$$

Atribuem-se valores a L de modo a ser encontrado um $R_e \leq R$ máximo desejável.



MALHA DE ELETRODOS HORIZONTAIS

5.5 Sistema de Eletrodos Radiais Horizontais Múltiplos

Este sistema é particularmente empregado no aterramento de mastros de antenas. Caracteriza-se por um ponto comum entre os rabichos horizontais que se desenvolvem radialmente da base do mastro.

Com ρ conhecido e usando a fórmula:

$$R_{e1} = \frac{\rho}{2\pi L} \left[2,3 \log \left(\frac{L^2}{d \cdot t} \right) \right] \text{ , onde}$$

R_{e1} = resistência esperada de um eletrodo

d = diâmetro

t = profundidade em que o cabo está enterrado,

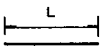
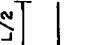




atribuímos valores a L , d e t , encontrando Re_1 .

Com Re_1 , encontramos na Tabela abaixo para a configuração radial desejada e verificamos se Re é menor do que R máximo desejável; em caso contrário, atribuímos novo valor a L , repetimos os cálculos, até que seja encontrado um Re menor que o R máximo desejável.

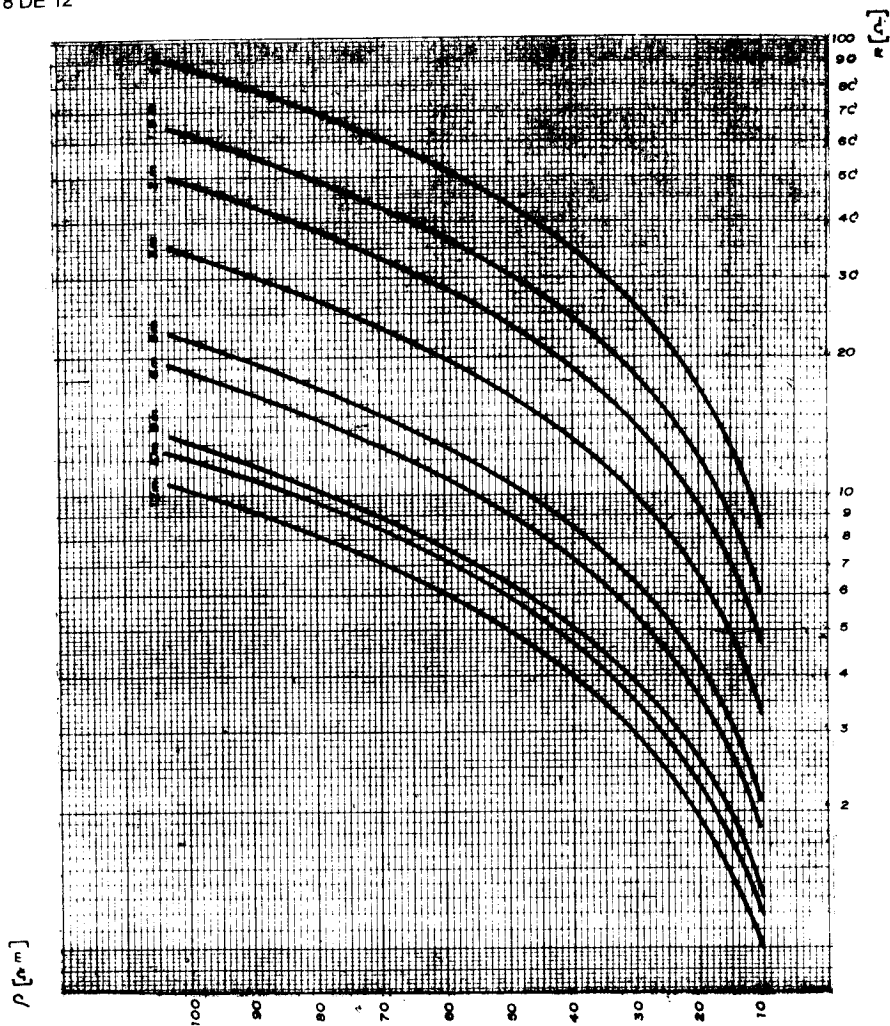
Se o comprimento L encontrado for muito grande, recomenda-se uma configuração com maior número de radiais.

Este é um processo de cálculo por tentativas, onde deve ser procurado a configuração mais eficiente e econômica, em termos de aterramento.

Valores da resistência de terra de vários arranjos de fios, comparados com a resistência de terra de um único fio reto com o mesmo comprimento.

ARRANJO		RESISTÊNCIA DE TERRA (Re)
	LINHA RETA	Re_1
	ÂNGULO RETO	$1,03 Re_1$
	ESTRELA DE TRES PONTAS	$1,06 Re_1$
	ESTRELA DE QUATRO PONTAS	$1,12 Re_1$
	ESTRELA DE SEIS PONTAS	$1,42 Re_1$
	ESTRELA DE OITO PONTAS	$1,65 Re_1$

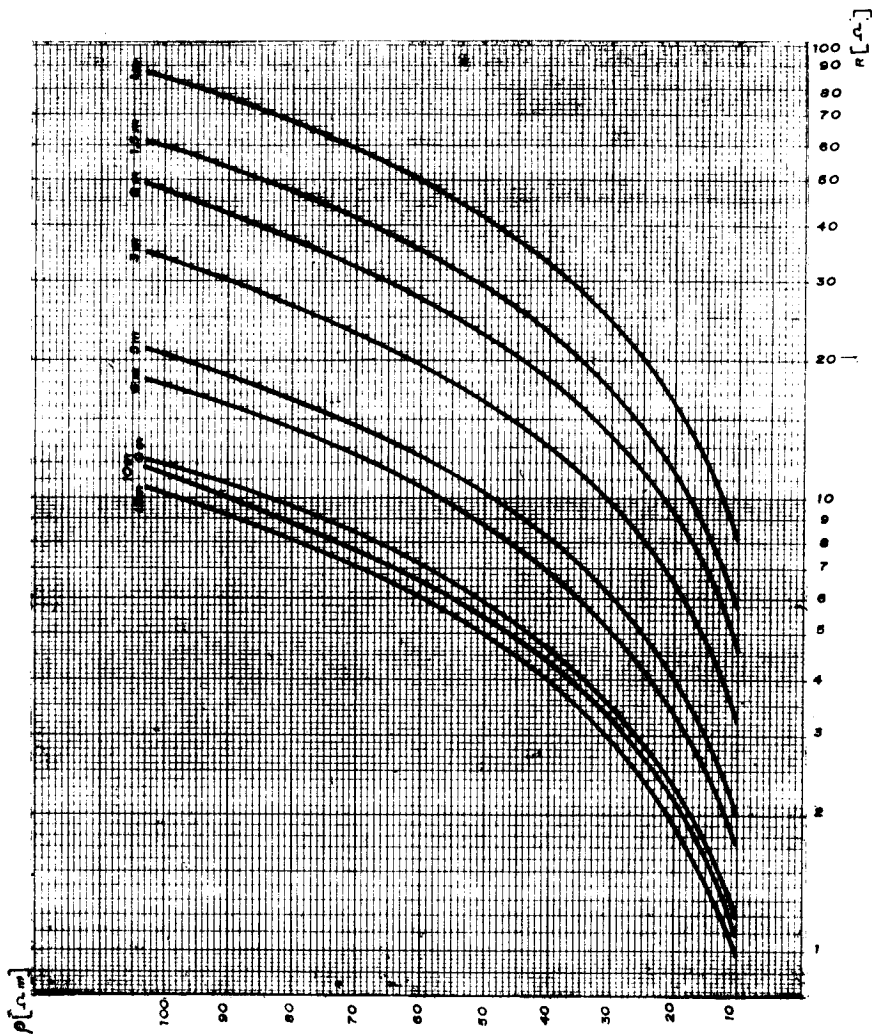
- 5.6 A partir da fórmula indicada no item 5.1 foram obtidas curvas para determinação do comprimento das hastes de cobre, a través da resistividade do solo e da resistência de terra desejada. Foram utilizados os diâmetros de eletrodos disponíveis no mercado.



$\emptyset = 9,5 \text{ mm}$

FÓRMULAS P/ O CÁLCULO

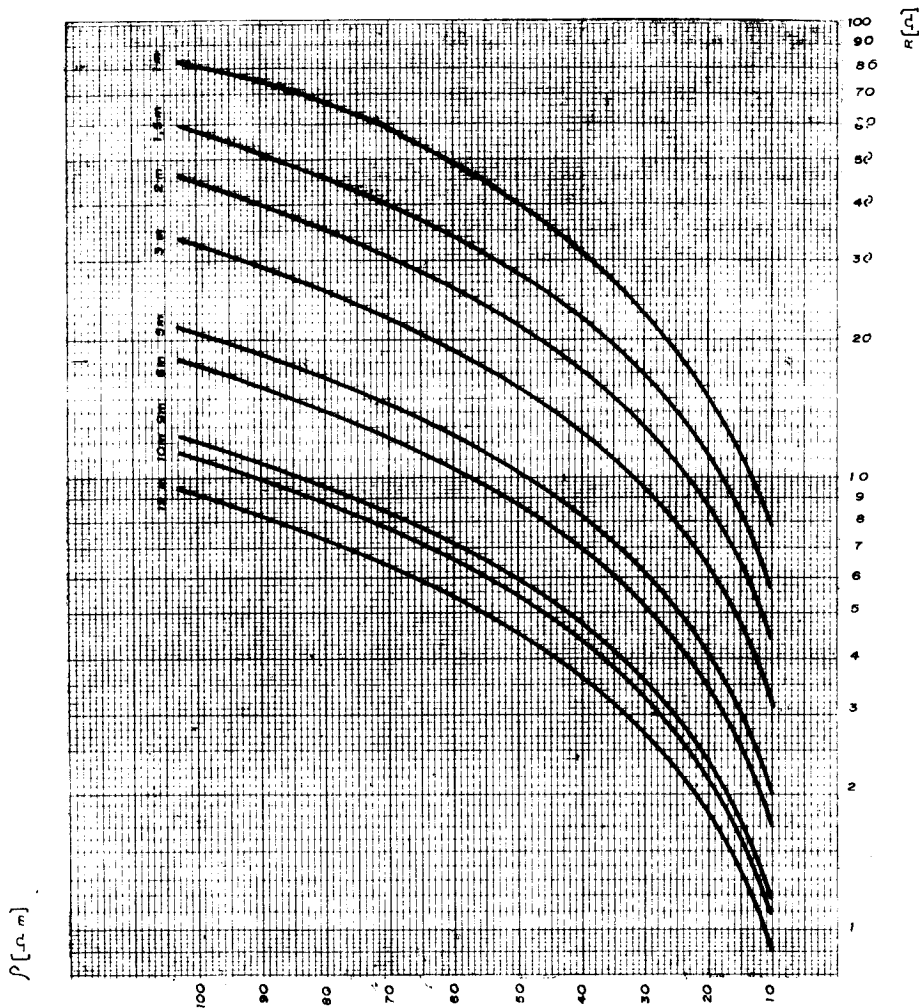
- $R/m = 0,91 \rho \Omega m$
- $R/5m = 0,65 \rho \Omega m$
- $R/2m = 0,51 \rho \Omega m$
- $R/3m = 0,36 \rho \Omega m$
- $R/5m = 0,23 \rho \Omega m$
- $R/6m = 0,20 \rho \Omega m$
- $R/9m = 0,14 \rho \Omega m$
- $R/12m = 0,11 \rho \Omega m$



$\phi 12,7 \text{ mm}$

FÓRMULAS P/Q CÁLCULO

$R1m = 0,87 \text{ } \Omega \cdot m$
 $R1,5m = 0,62 \text{ } \Omega \cdot m$
 $R2m = 0,49 \text{ } \Omega \cdot m$
 $R3m = 0,35 \text{ } \Omega \cdot m$
 $R5m = 0,22 \text{ } \Omega \cdot m$
 $R6m = 0,19 \text{ } \Omega \cdot m$
 $R9m = 0,13 \text{ } \Omega \cdot m$
 $R10m = 0,12 \text{ } \Omega \cdot m$
 $R12m = 0,11 \text{ } \Omega \cdot m$



$\phi = 15,9 \text{ mm}$

FÓRMULAS PARA O CÁLCULO

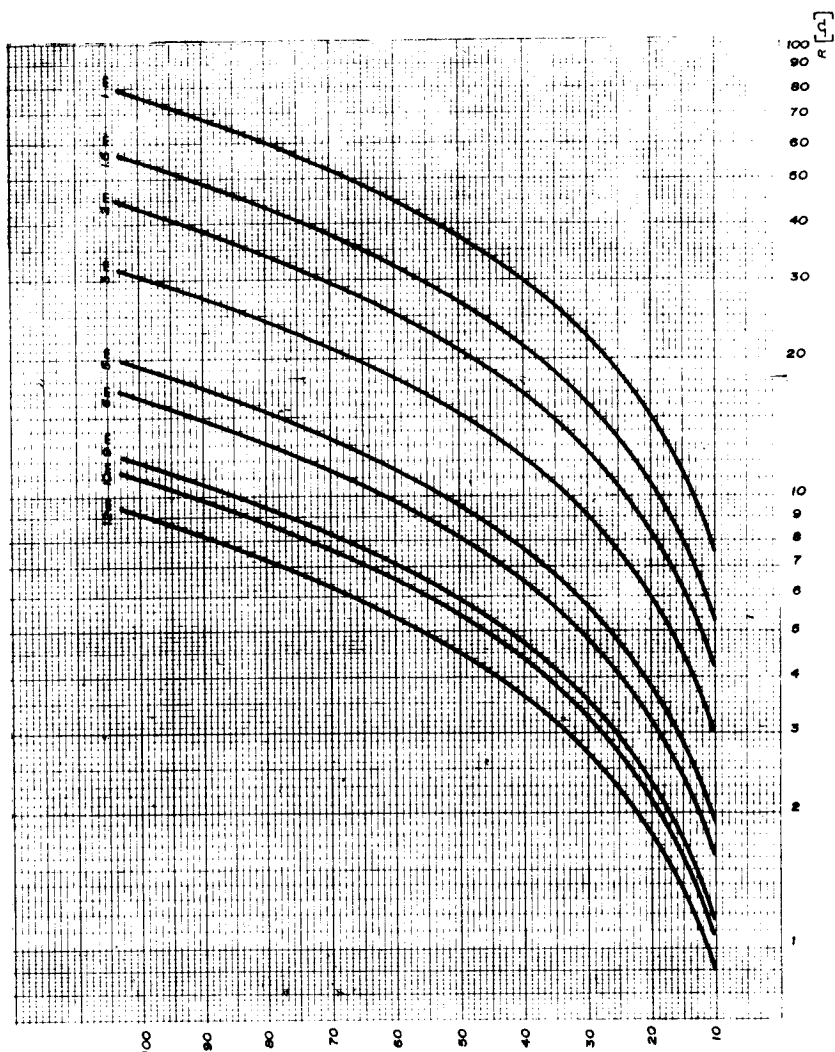
$R_{1m} = 0,83 \beta \Omega \cdot m$
 $R_{1.5m} = 0,60 \beta \Omega \cdot m$
 $R_{2m} = 0,47 \beta \Omega \cdot m$
 $R_{3m} = 0,39 \beta \Omega \cdot m$
 $R_{5m} = 0,22 \beta \Omega \cdot m$
 $R_{6m} = 0,19 \beta \Omega \cdot m$
 $R_{9m} = 0,13 \beta \Omega \cdot m$
 $R_{10m} = 0,12 \beta \Omega \cdot m$
 $R_{12m} = 0,10 \beta \Omega \cdot m$

$\rho [\Omega \cdot m]$

$\varnothing 19,1 \text{ mm}$

FÓRMULA ρ /CÁLCULO

R_{1m}	=	$0,80/\rho_{1m}$
$R_{1,5m}$	=	$0,58/\rho_{1m}$
R_{2m}	=	$0,46/\rho_{1m}$
R_{3m}	=	$0,33/\rho_{1m}$
R_{5m}	=	$0,21/\rho_{1m}$
R_{6m}	=	$0,18/\rho_{1m}$
R_{9m}	=	$0,13/\rho_{1m}$
R_{10m}	=	$0,12/\rho_{1m}$
R_{12m}	=	$0,10/\rho_{1m}$

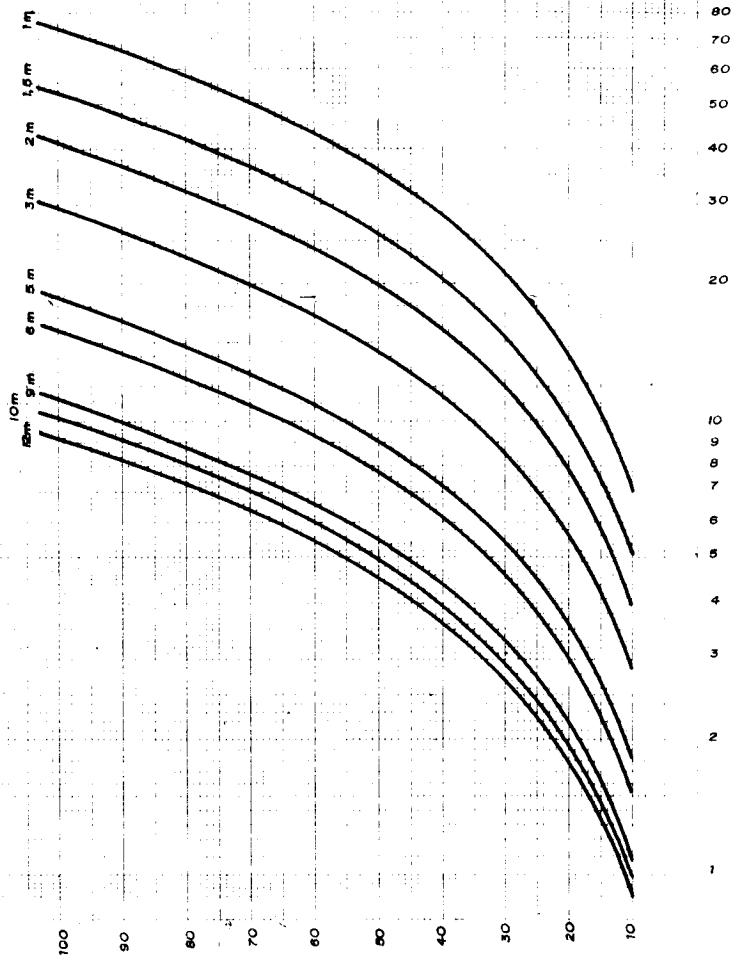


$\rho [\Omega.m]$

$\phi = 25,4 \text{ mm}$

FÓRMULAS P/O CÁLCULO

$R1m = 0,76 \rho \Omega.m$
 $R1,5m = 0,55 \rho \Omega.m$
 $R2m = 0,43 \rho \Omega.m$
 $R3m = 0,31 \rho \Omega.m$
 $R5m = 0,20 \rho \Omega.m$
 $R6m = 0,17 \rho \Omega.m$
 $R9m = 0,12 \rho \Omega.m$
 $R10m = 0,11 \rho \Omega.m$
 $R12m = 0,10 \rho \Omega.m$



$R [\Omega]$