

### 3.4 Os Eléctrodos de Terra

Os eléctrodos utilizados nos circuitos de terra dividem-se em dois tipos:

- . **Eléctrodos de terra horizontais:** Eléctrodos enterrados geralmente até a uma profundidade de cerca 1 m (tipicamente: 0,80 m), constituídos normalmente por condutores nus (maciços ou multifilares), em configurações de estrela, serpentinas ou anéis.
- . **Eléctrodos de terra verticais:** Eléctrodos enterrados geralmente a uma profundidade superior a 1 m, normalmente varetas (simples ou extensíveis), isoladas ou em paralelo.



Fig. 26 - Marinhas: varetas de 2 m.

A utilização de um ou outro tipo de eléctrodo, deve estar intimamente relacionada com o tipo de solo onde se vai estabelecer o circuito de terras. No projecto de um circuito de terras, o factor solo em todas as suas variáveis (resistividade, morfologia e constituição) deve condicionar em larga medida o tipo de solução a adoptar, no que á escolha de um eléctrodo diz respeito.

Escolher um tipo de eléctrodo implica portanto escolher, à partida, se é vertical ou horizontal, mas cada um deles possui uma série de outros parâmetros que devem também ser especificados pelo projectista, como sendo: comprimento, forma, disposição, secção etc.

*Mas a principal ideia a reter é que o projecto de um circuito de terras, que implica a escolha do tipo de eléctrodo a utilizar e definição completa dos seus parâmetros, deve ser completa e absolutamente inseparável de um conhecimento das condições do solo onde o circuito de terra vai ser implementado.*

Complexos e profundos estudos realizados e anos de experiência no terreno na implementação de circuitos de terra que fossem de encontro aos objectivos traçados, resultaram em normalização, que em Portugal se traduz nas normas

vigentes, como o RSSPTS<sup>1</sup>, no que aos principais parâmetros dos eléctrodos diz respeito.

Para além de respeitarem as normas vigentes referentes ao valor de RE, os eléctrodos constituintes de um circuito de terra devem:

- **Não ser danificados pelas correntes de defeito que os atravessam.**
- **Ter resistência mecânica suficiente.**
- **Resistir à corrosão do solo e meio ambiente.**

---

<sup>1</sup> Ver ANEXO B

### 3.4.1 A Secção

O primeiro factor que se deve ter em conta no dimensionamento é o aquecimento.

Não me vou deter muito neste aspecto, pois as secções mínimas estão já normalizadas e fazem parte dos regulamentos em vigor, quer em Portugal quer no estrangeiro, e são, além do mais, uniformes.

Para cada tipo de eléctrodo<sup>2</sup> (formado por condutores ou varetas) considerado, vou referir as secções mínimas e usualmente utilizadas no terreno, mas antes de tudo mais, vou fazer uma referência ao método de cálculo das secções mínimas dos condutores indicado pelo Standard 80 do IEEE<sup>3</sup>:

$$A = I / \sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{tt \cdot \alpha r \cdot \rho r}\right) \cdot \ln\left(\frac{K0 + Tm}{K0 + Ta}\right)}$$

com:

*A - Secção do condutor em mm<sup>2</sup>*

*I - Valor eficaz da corrente*

*Tm – máxima temperatura admissível em °C*

*Ta – Temperatura ambiente em °C*

*Tr – Temperatura de referência para o material escolhido em °C*

*$\alpha 0$  – Coeficiente de resistividade térmica a 0°*

*$\alpha r$  - Coeficiente de resistividade térmica à temperatura de referência, Tr*

*$\rho r$  – A resistividade do condutor de terra à temperatura de referência Tr em  $\mu\Omega/\text{cm}^3$*

*$K0 = 1/\alpha 0$  ou  $K0 = (1/\alpha r) - Tr$*

*tc – Tempo da passagem da corrente em s*

*TCAP – Factor de capacidade térmica em  $\text{J}/\text{cm}^3/^\circ\text{C}^4$*

O IEEE fornece depois uma tabela onde podem ser consultadas as constantes para preencher na fórmula.

Convém referir que esta formula e o método de cálculo do Standard 80 foi concebido para cálculo da secção de condutores para as malhas de terra das subestações, no entanto, tomei conhecimento que se usa no seu âmbito mais geral: cálculo de secções mínimas para condutores de terra/eléctrodos de terra em qualquer tipo de utilização.

<sup>2</sup> Convém referir que um eléctrodo pode ser constituído por condutores de cobre nú, ou por varetas conectadas por condutores.

<sup>3</sup> Existem outras fórmulas utilizadas para o cálculo das secções mínimas. Indico esta por ser a mais recente, sendo uma actualização da antiga, formulada por Sverak.

<sup>4</sup> Este factor foi introduzido pelo IEEE. Reservaram um parágrafo inteiro para o definirem. Está relacionado com o material e as suas características de resistência térmica (9.4, pag 66).

Ela nasce das sucessivas revisões efectuadas a fórmulas antigas, mais simples, mas menos precisas.

Eis a tabela do IEEE para as constantes a serem introduzidas na sua fórmula:

Material Constants						
Description	Material Conductivity (%)	$\alpha_r$ Factor @ 20 °C	$K$ ( $1/\alpha_0$ ) @ 0 °C	Fusing Temperature (°C)	$\rho_r$ @ 20 °C ( $\mu\Omega/\text{cm}$ )	TCAP Factor Effective Value ( $\text{J}/\text{cm}^3/^\circ\text{C}$ )
Standard Annealed Soft Copper Wire	100.0	0.00393	234	1083	1.7241	3.422
Commercial Hard Drawn Copper Wire	97.0	0.00381	242	1084	1.7774	3.422
Copper-Clad Steel Core Wire	40.0	0.00378	245	1084/1300	4.397	3.846
Copper-Clad Steel Core Wire	30.0	0.00378	245	1084/1300	5.862	3.846
Commercial EC Aluminum Wire	61.0	0.00403	228	657	2.862	2.556
Aluminum Alloy Wire 5005	53.5	0.00353	263	660	3.2226	2.598
Aluminum Alloy Wire 6201	52.5	0.00347	268	660	3.2840	2.598
Aluminum-Clad Steel Core Wire	20.3	0.00360	258	660/1300	8.4805	2.670
Zinc-Coated Steel Core Wire	8.5	0.00320	293	419/1300	20.1	3.931
Stainless Steel No 304	2.4	0.00130	749	1400	72.0	4.032

Fig. 27 - IEEE : Tabela das constantes para cada material

Na EDP, em vários documentos internos indica-se uma outra fórmula, mais simples:

$$A = \frac{If}{K} \sqrt{\frac{tf}{\ln\left(\frac{\theta f + \beta}{\theta i + \beta}\right)}}$$

com:

A - Secção em mm<sup>2</sup>

If - Corrente de defeito que circula no condutor em A (valor eficaz)

tf - Duração da corrente If em s

K( $\alpha$ ) - Constante do material, em A.mm<sup>-2</sup>.s<sup>-1/2</sup>

$\theta_i$  - Temperatura inicial em °C

$\theta_f$  - Temperatura final em °C

$\beta$  - Constante do material em °C

São definidos valores máximos para a  $\theta_f$ , tf e If, o que leva ao cálculo de A.

É fornecida também uma tabela onde podem ser consultadas as constantes para cada material.

<b>Valores característicos de 3 metais</b>			
	Cobre	Alumínio	aço
$\alpha$ (A mm <sup>-2</sup> s <sup>-1/2</sup> )	226	148	78
$\beta$ (°C)	235	228	202

Fig. 28 - Tabela de constantes fornecida na EDP

A questão das secções envolvidas parte da previsão das correntes de defeito que devem ser escoadas para a terra.

Como já referi atrás, estas secções estão normalizadas, utilizando-se as secções de 25 mm<sup>2</sup> (mínimo) e 35 mm<sup>2</sup> nos cabos nus, sejam eles maciços ou multifilares, para eléctrodos horizontais e condutores de ligação a eléctrodos verticais tipo vareta.



Fig. 29 - Marinhas (Esposende), Condutor: cabo de cobre nu multifilar de 35 mm<sup>2</sup>

*Hoje em dia, a prática corrente na EDP é a utilização de cabos de cobre nu de 35 mm<sup>2</sup> multifilar tanto para a execução do próprio eléctrodo (no caso de ser horizontal) como para a ligação do eléctrodo à instalação (no caso de estarmos a falar em varetas).*

A tabela indica as seguintes secções e diâmetros para os vários tipos de eléctrodos utilizados na empresa, convém referir que quando se identifica o “tipo de eléctrodo” como cabo nu, está-se a referir aos eléctrodos horizontais:

Tipos mais correntes de eléctrodos de terra e respectivas dimensões mínimas				
Tipo de eléctrodo	Material constituinte	Diâmetro exterior (mm)	Secção (mm <sup>2</sup> )	Diâmetro dos fios constituintes (mm)
<b>Cabo nú</b>	Condutores de cobre (maciço)		25	
	Condutores de aço galvanizado (maciço)	10		
	Condutores de cobre (multifilares)		25	1,8
<b>Vareta</b>	Aço revestido a cobre (maciço)	14,2/15		
	Aço galvanizado (maciço)	16		

Fig. 30 - Tabela fornecida pela EDP nos documentos internos

### 3.4.2 Os tipos de Eléctrodos

A seguir vou falar dos vários tipos de eléctrodos existentes.

Por ‘tipo’ de eléctrodos deve-se entender o tipo de disposição dos condutores que o constituem no solo e a própria forma dos eléctrodos.

Os eléctrodos horizontais podem ser:

- *Condutores enterrados horizontalmente*
- *Serpentinas simples ou duplas*
- *Anéis*
- *Patas de Ave (eléctrodos tipo estrela<sup>5</sup> com 3 raios)*
- *Eléctrodos tipo estrela*

Os eléctrodos verticais podem ser:

- *Varetas<sup>6</sup> simples ou extensíveis*
- *Chapas*

Poderão existir outro tipo eléctrodos, vou-me referir apenas aos mais usados actualmente, especialmente no âmbito da EDP.

Nas próximas páginas vou-me socorrer de gráficos. Todos eles foram traçados pela aplicação informática que desenvolvi durante o meu estágio na EDP: O S.P.T., para informação detalhada acerca da interface usada, modo de funcionamento e até eventual consulta dos módulos de cálculo ou do seu código, sugiro uma consulta ao anexo A.

Uma das razões para o desenvolvimento do SPT foi exactamente as possibilidades que criava na análise de um eléctrodo através de cálculo automático, e a facilidade com que as conclusões podiam ser tiradas.

Sendo assim, durante os próximos itens referentes aos tipos de eléctrodos farei referência ao SPT sempre que for caso disso.

Os condutores horizontais e as chapas são pouco usados hoje em dia (ou praticamente não usados), nesse sentido serão alvo apenas de uma referência.

Vou introduzir também o conceito de **performance** de um eléctrodo, entendida como a inclinação de recta da variação do seu valor aproximado de RE com  $\rho$  (resistividade do solo).

Tomemos, por exemplo, a fórmula que aproxima RE para um eléctrodo tipo vareta :

---

<sup>5</sup> Ou “Eléctrodos em estrela”, o que não está muito correcto de ser dito, porque não é o eléctrodo que está em estrela, são os condutores que o constituem.

<sup>6</sup> Piquets, Varas, Estacas ou “Pipes”, “Grounding Rods”, como são conhecidos na literatura Inglesa.

$$RE = \frac{\rho}{2\pi.l} * \left[ \ln\left(\frac{8.l}{d}\right) - 1 \right]$$

cujos parâmetros são:

*l* : Comprimento

*d* : Diâmetro da vareta

*ρ* : Resistividade do solo

Se for traçado o gráfico de RE(ρ) para l = 2m, d = 0,015 m :

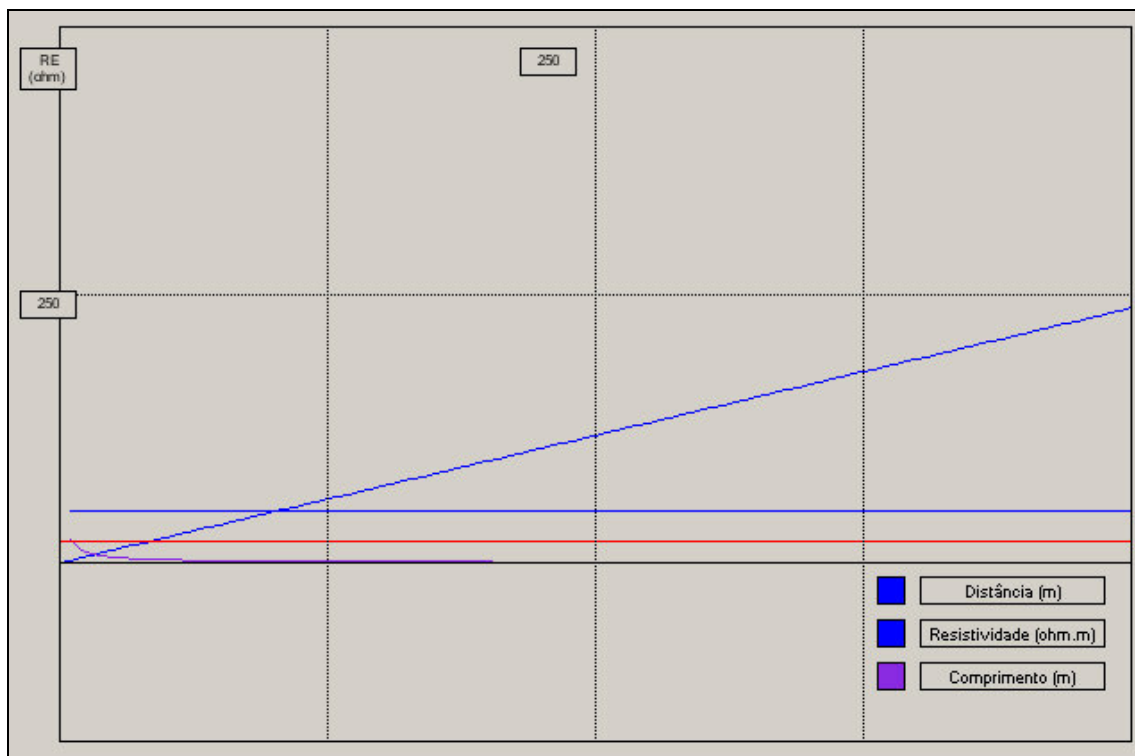


Fig. 31 - SPT: RE(ρ) para uma vareta l=2m (recta azul), d=0,015 m. Escala x: 500 Ω.m, escala y: 500 Ω

Podemos dizer que quanto menor for a derivada do gráfico (inclinação da recta), menos a resistência do eléctrodo (RE) vai variar com a resistividade (ρ) e melhor será a sua *performance*.



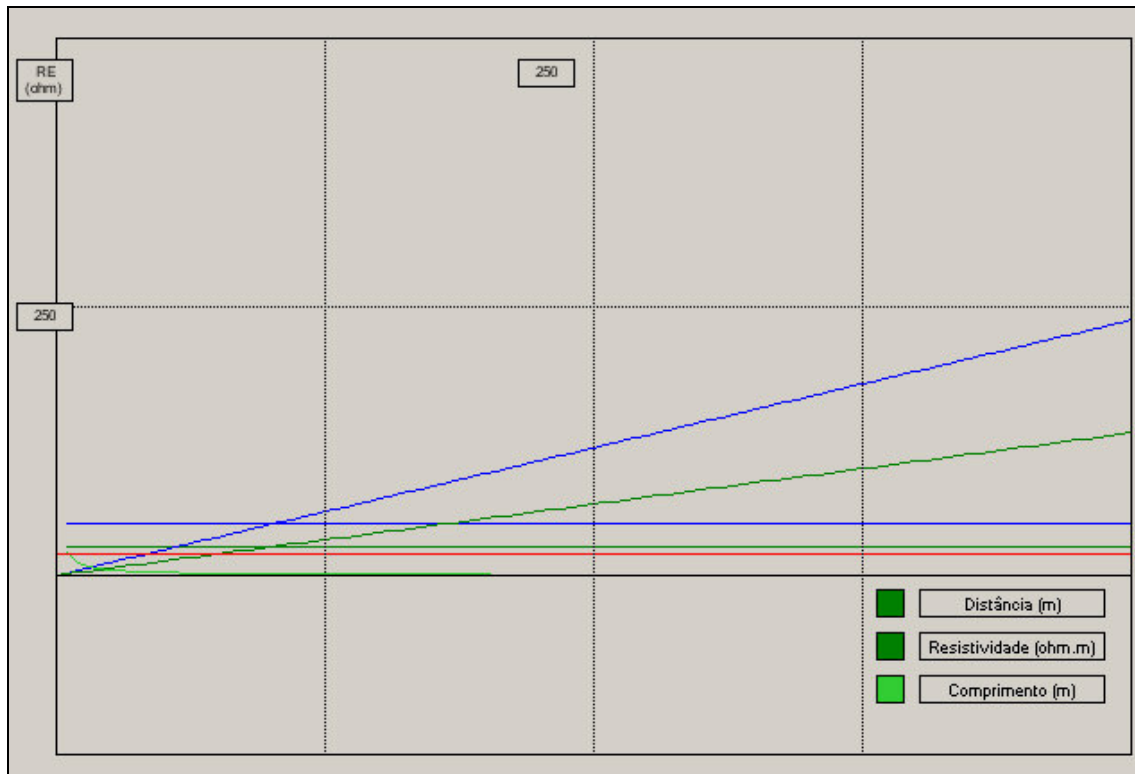


Fig. 32 - SPT: RE(p) para uma vareta  $l=2\text{m}$  (recta a azul) e para uma vareta  $l=4\text{m}$  (recta a verde),  $d=0,015\text{ m}$ . Escala x:  $500\ \Omega\cdot\text{m}$ , escala y:  $500\ \Omega$

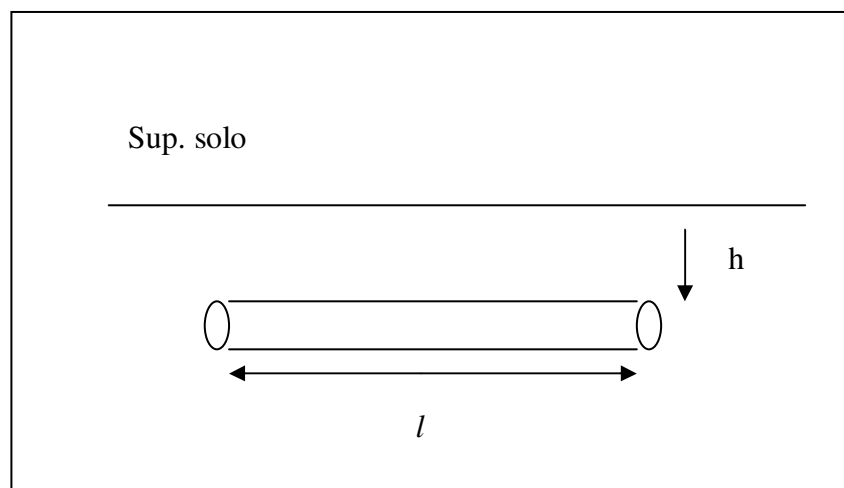
No caso acima, traçou-se o gráfico RE (p) para uma vareta de 4 m de comprimento (a verde), verifica-se que a sua derivada é menor do que a da recta azul ( $l=2\text{ m}$ ), logo, varia menos com a resistividade do solo, e a sua *performance* é melhor.

De facto, uma das possibilidades de diminuir a resistência de terra de um eléctrodo formado por varetas, é aumentar o comprimento das mesmas, como vamos ver mais à frente.

### 3.4.2.1 – Chapas e Condutores Horizontais

São pouco utilizados devido especialmente ao seu alto preço (no caso das chapas) e fracas *performances* (em ambos).

#### . Condutor Horizontal



No caso de um Condutor Horizontal,  $RE^7$  pode ser aproximada por:

$$RE = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \left( \ln \frac{2 \cdot l}{\sqrt{2 \cdot r \cdot h}} - 1 \right)$$

com:

$\rho$  : Resistividade do solo

$l$  : Comprimento do condutor

$h$  : Profundidade de enterramento

$r$  : Raio do condutor, ou  $2 \cdot r = d$ , diâmetro do condutor

No caso de se enterrar um condutor ou cabo de cobre nú multifilar com diâmetro de cada fio de 1,8 mm<sup>8</sup> com 3 m de comprimento,  $h = 0,8$  m, com  $\rho = 100 \Omega \cdot m$  vem  **$RE \approx 37,43 \Omega$** .

Em muita literatura nem é referida uma fórmula que aproxime  $RE$  para um condutor horizontal, visto que na actualidade este tipo de eléctrodo **vem sendo**

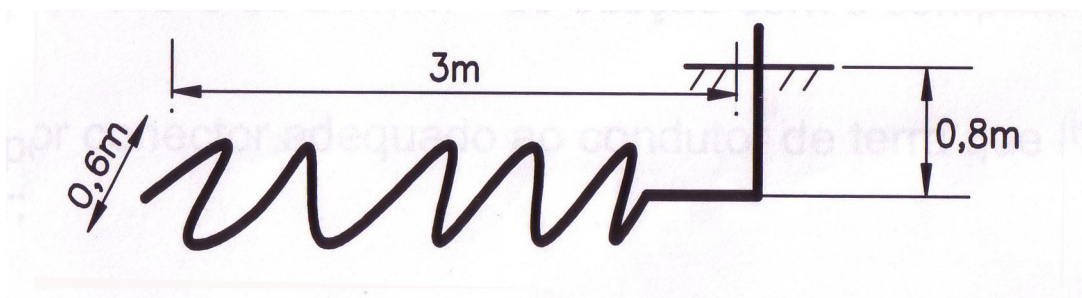
<sup>7</sup> No caso do condutor horizontal (como em quase todos os eléctrodos) existe mais do que uma fórmula para aproximar o valor de  $RE$ , esta foi a que usei no SPT, retirada de vária documentação interna da EDP e foi referida no 2º Encontro de Medicina e Segurança no Trabalho, em 27 de Outubro de 1992, onde constava uma profunda e muito interessante abordagem ao problema das terras.

<sup>8</sup> Considero  $d \approx 3 \cdot 1,8 = 5,4$  mm (ANEXO B), se fosse condutor de cobre maciço considerava  $d \approx 5,7$  mm, ver ANEXO C, no caso de considerar  $d \approx 6,6$  mm (classe 2, ver ANEXO C), para condutores multifilares vinha  **$RE \approx 36,37 \Omega$** , logo, considerei o pior caso. **Daqui para frente utilizo as tabelas do Anexo C**

**substituído pelas serpentinas simples ou duplas**, devido principalmente à economia de espaço.

$RE \approx 37,43 \, \Omega$  para um solo com  $\rho = 100 \, \Omega.m$  equivale a falar num valor de RE na ordem dos 40 % da resistividade do solo.

Uma serpentina simples de 3 m de comprimento, enterrada a 0,8 m num solo com a mesma resistividade ( $\rho = 100 \, \Omega.m$ ) traduz-se num valor de RE que será aproximadamente 20 % do valor da resistividade do solo, ou seja  $RE \approx 20 \, \Omega$ .



Ou seja, igual espaço, melhor  $RE^9$ .

Eis o gráfico  $RE(l)$ , variação com o comprimento:

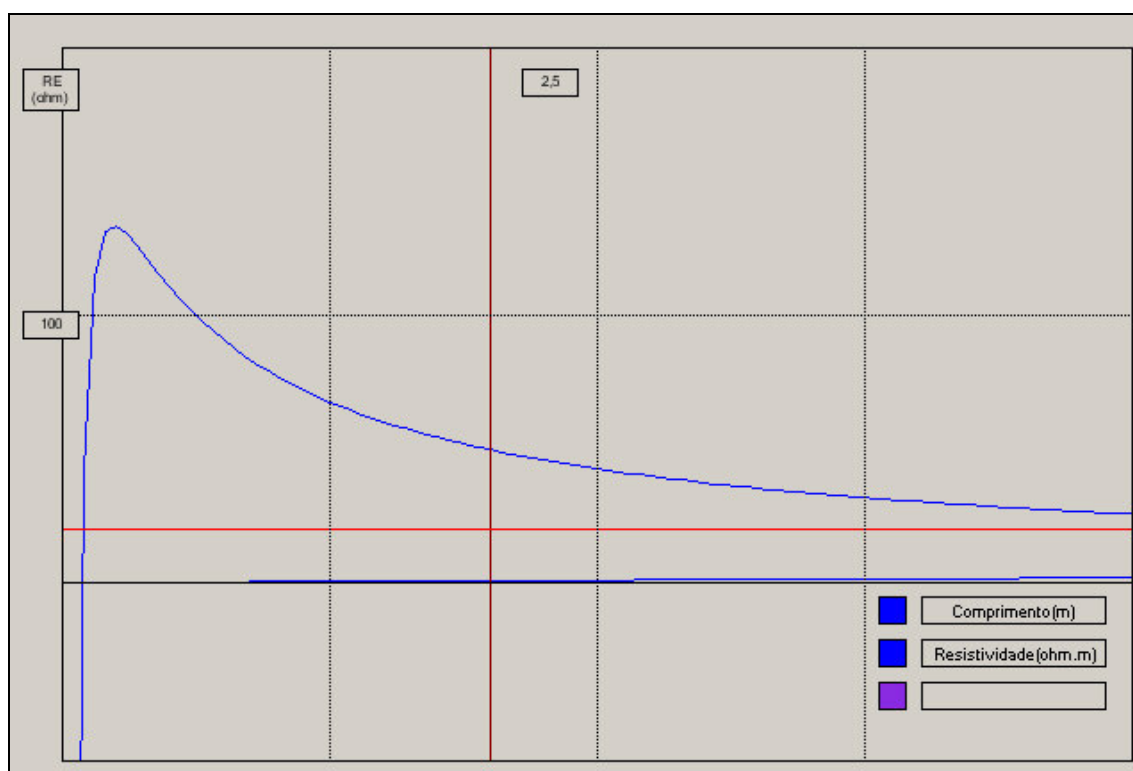


Fig. 33 - SPT:  $RE(l)$  para um condutor  $l = 3m$  (a azul),  $h = 0,8 m$ ,  $d = 0,0066 m$ . Escala x: 5 m , escala y : 200  $\Omega$ . A recta vertical a castanho marca  $l = 2 m$ , a recta horizontal a vermelho marca  $RE = 20 \, \Omega$ .

<sup>9</sup> Apesar de uma serpentina exigir, obviamente, mais condutor.

Para um condutor horizontal, cabo de cobre nú, multifilar, com 3 m, enterrado a 0,8 m de profundidade, com 25 mm<sup>2</sup> de secção, RE ( $\rho$ ), variação com o comprimento:

Curva 1 Condutor Horizontal

Numero de pontos: 30 Escala X: 40 Escala Y: 100

-----  
Variação com o comprimento do condutor

Comp: 1,3333	RE: 64,906
Comp: 2,6667	RE: 40,7163
Comp: 4	RE: 30,3666
Comp: 5,3333	RE: 24,4898
Comp: 6,6667	RE: 20,6559
Comp: 8	RE: 17,9377
Comp: 9,3333	RE: 15,9003
Comp: 10,6667	RE: 14,3107
Comp: 12	RE: 13,0327
Comp: 13,3333	RE: 11,9806
Comp: 14,6667	RE: 11,098
Comp: 16	RE: 10,3461
Comp: 17,3333	RE: 9,697
Comp: 18,6667	RE: 9,1306
Comp: 20	RE: 8,6316
Comp: 21,3333	RE: 8,1883
Comp: 22,6667	RE: 7,7916
Comp: 24	RE: 7,4345
Comp: 25,3333	RE: 7,111
Comp: 26,6667	RE: 6,8166
Comp: 28	RE: 6,5474
Comp: 29,3333	RE: 6,3002
Comp: 30,6667	RE: 6,0724
Comp: 32	RE: 5,8616
Comp: 33,3333	RE: 5,6661
Comp: 34,6667	RE: 5,4842
Comp: 36	RE: 5,3144
Comp: 37,3333	RE: 5,1555
Comp: 38,6667	RE: 5,0066
Comp: 40	RE: 4,8667

-----

Como referi atrás, o condutor horizontal enterrado tem pior comportamento ou *performance* que uma serpentina, logo **deverá ser utilizada** esta em sua substituição.

Traçando as rectas de variação RE ( $\rho$ ) para um condutor horizontal com 3 m de comprimento com condutor multifilar de 25 mm<sup>2</sup> e uma serpentina simples de 3 m de comprimento por 0,6 m de largura, também com um condutor de 25 mm<sup>2</sup> e enterrada a 0,8m:

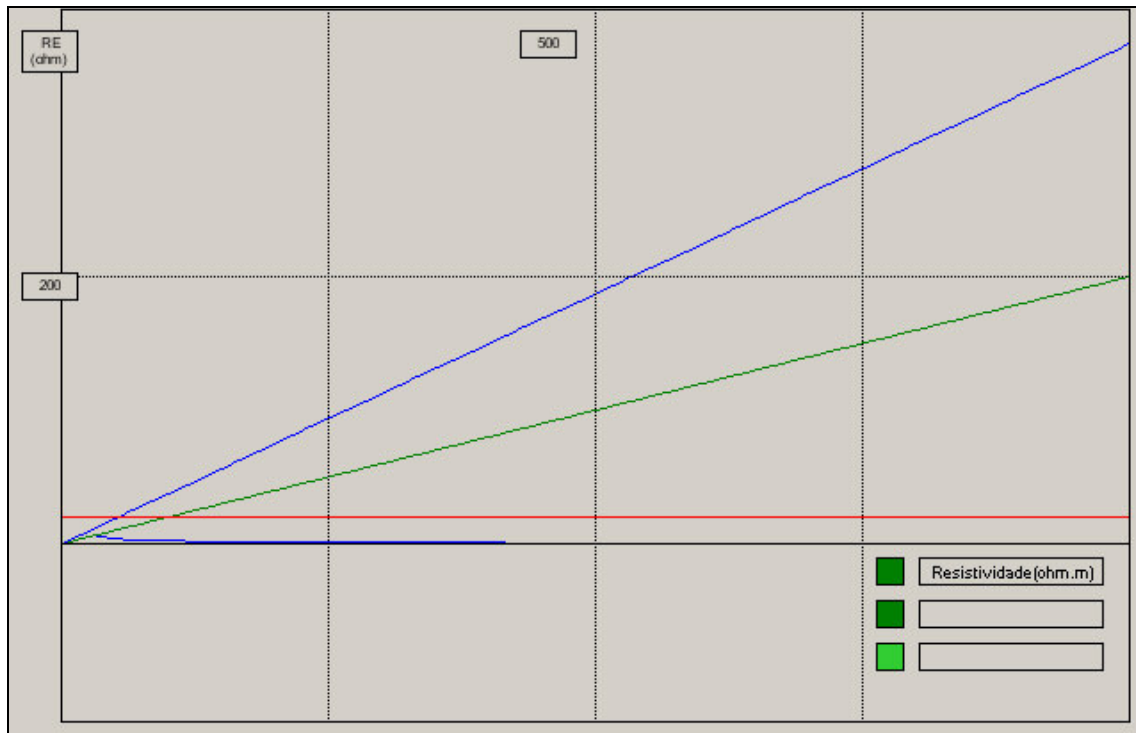


Fig. 34 - SPT: RE (ρ) para um condutor horizontal (a azul) e para uma serpentina (a verde), ambos a 0,8 m de profundidade e com 3 m de comprimento.

## . Chapas

Como já referi atrás, as chapas estão em claro desuso, devido em particular ao seu custo.

A fórmula que aproxima RE é da forma:

$$RE = \frac{\rho}{4} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2 \cdot A}}$$

Vejamos o cálculo de RE para  $\rho = 100 \Omega \cdot m$ , considerando uma placa de cobre de meio metro de comprimento (!), ou seja,  $A = 0,25 m^2$ .

$$RE = \frac{100}{4} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2 \cdot 0,25}} = 62,5 \Omega$$

E qual seria, aproximadamente, o valor de A, necessário para igualar o condutor de 3 m de comprimento,  $25 mm^2$  ?

$$A = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\rho^2}{16 \cdot RE^2}$$

Se fizéssemos  $RE = 37,43 \, \Omega$  obtínhamos  **$A = 0,7 \, m^2$**  (!).

Para igualarmos uma serpentina seguramente precisaríamos de ter chapas em cobre com área superior a  $1 \, m^2$  (!!).

Claramente se vê porque razão já não se usa este tipo de eléctrodo.

Quer um quer outro eléctrodo são utilizados com aditivos como o carvão vegetal para melhorar RE.

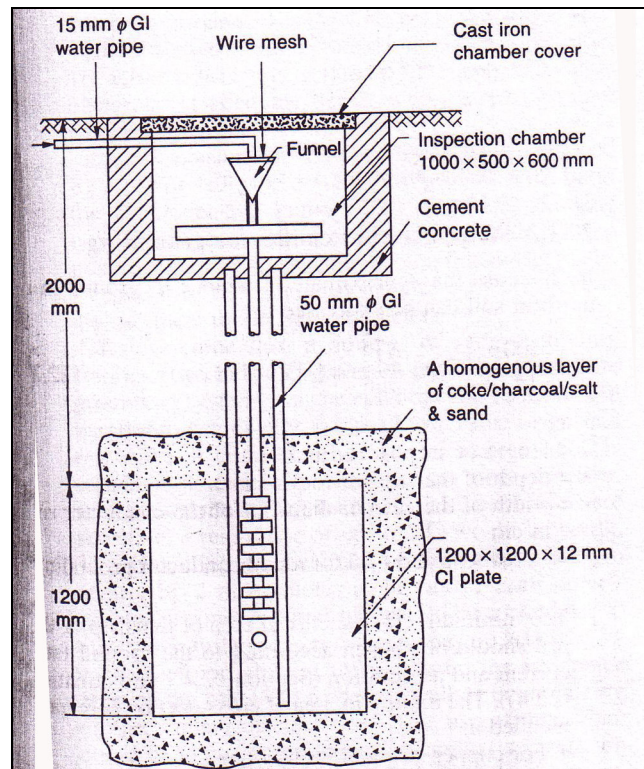
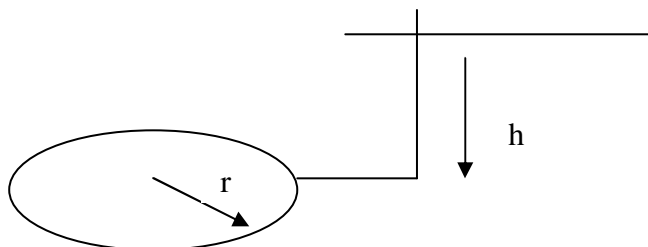


Fig. 35 - Chapa (com aditivos representados)

### 3.4.2.2 Anéis

Os Anéis também estão a cair em desuso devido ao espaço que ocupam.



Ainda hoje muitos se encontram instalados na base de postes da rede de transporte da REN, onde não se punha o problema do espaço.

Conseguem-se bons valores de RE com eléctrodos em anel. A fórmula que aproxima o valor da resistência de terra é a seguinte:

$$RE = \frac{\rho}{2.\pi^2} . (\ln(\frac{8.D}{d}) + \ln(\frac{4.D}{(2.p)}))$$

Com:

$\rho$  : Resistividade do solo  
 D : Diâmetro do anel  
 d : Diâmetro do condutor utilizado  
 p : Profundidade de enterramento

Existe uma outra expressão que surge em muita literatura<sup>10</sup>:

$$RE = 0,366 . \frac{\rho}{2.\pi.r} (\log(\frac{16.r}{d}) + \log(\frac{4.r}{h}))$$

Com:

$\rho$  : Resistividade do solo  
 r : Raio do anel  
 d : Diâmetro do condutor utilizado  
 h : Profundidade de enterramento

<sup>10</sup> Surge nomeadamente na tese de doutoramento de Manuel da Ressurreição Cordeiro: “Métodos computacionais para o tratamento eficiente de...”, ver Bibliografia e referências.

Foi esta fórmula que escolhi para programar no SPT, pelo facto de fornecer valores de RE *um pouco mais altos do que a anterior*.

A lógica aqui é tentar, sempre que se justifique, considerar **o pior caso**, como forma até de aproximação à realidade do terreno.

*Para um anel com raio de 5 m (10 m de diâmetro), enterrado 0,80 m num solo de  $\rho = 100 \Omega.m$ , usando um condutor de cobre nú de 25 mm<sup>2</sup> :  $RE \approx 6,38 \Omega$ .*

**Isto significa que a performance de um Anel se aproxima em muito da de uma Pata de Ave (Estrela de 3 raios), onde RE é cerca de 6% da resistividade do solo.**

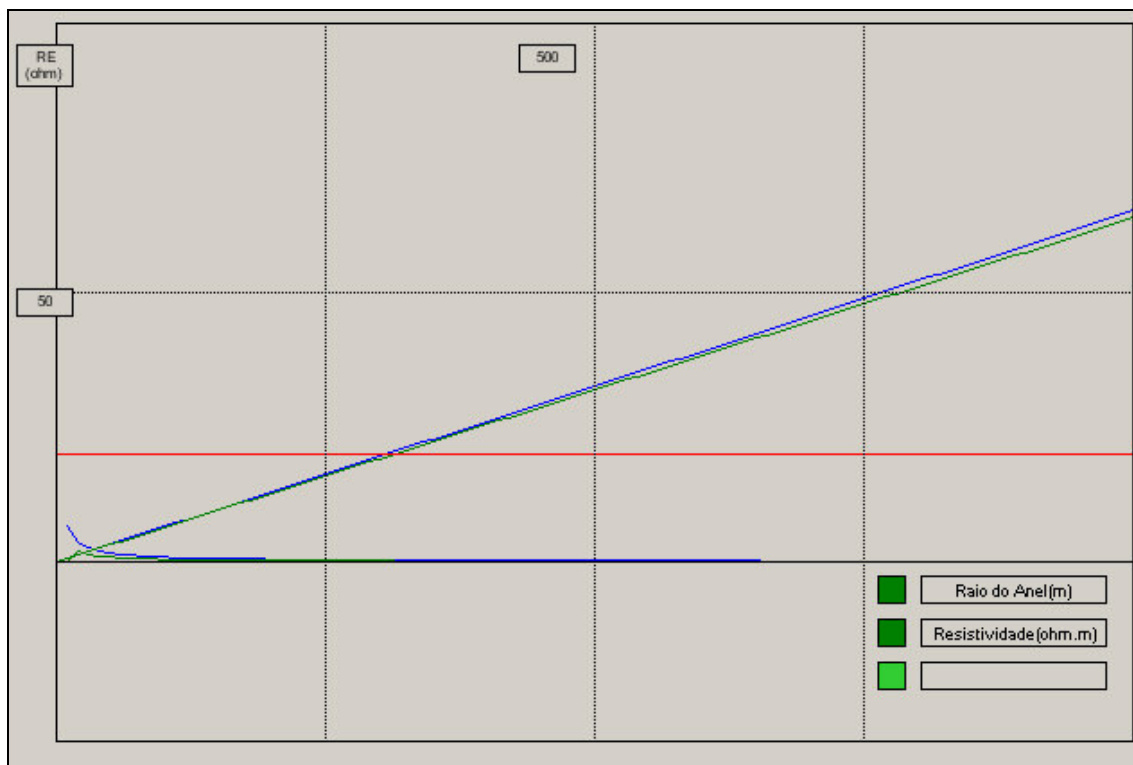


Fig. 36 - Comparação da performance de uma Pata de Ave, a azul, ( condutor: cabo de cobre nu de 25 mm<sup>2</sup><sup>11</sup>, l = 10 m, p = 0,8 m) com um Anel (condutor : cabo de cobre nu de 25 mm<sup>2</sup>, r = 5 m, p = 0,8 m),  $\rho = 100 \Omega.m$

Existem duas razões para optar por uma Pata de Ave em vez de um Anel:

- A possibilidade de com uma Pata de Ave podermos jogar com os seus raios de forma a aproveitar melhor o espaço disponível.
- A melhor resposta da Pata de Ave em termos da tensão de passo<sup>12</sup>, sendo por isso opção primordial para PT's e postes de alta tensão, por exemplo.

<sup>11</sup> Condutor de cobre nú de 25 mm<sup>2</sup> multifilar, d  $\approx$  6,6 mm, ver ANEXO C.

<sup>12</sup> Não me vou deter neste aspecto, isso é demonstrado através de ensaios em laboratório, por exemplo. As Patas de Ave são prática corrente na EDF como forma de responder melhor às descargas atmosféricas.



