

Mestrado

Engenharia de Segurança e Higiene Ocupacionais



Dissertação apresentada para obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia de Segurança e Higiene Ocupacionais, pela  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

**Corrosão dos Materiais de Terras de  
Protecção**

José Maria Pereira Beleza

Porto, 2010



Mestrado  
Engenharia de Segurança e Higiene Ocupacionais

**Dissertação**  
**Corrosão dos Materiais de Terras de**  
**Protecção**

José Maria Pereira Beleza

Porto, 2010

Orientador: Professor Doutor António Carlos Sepúlveda Machado e Moura

Co-Orientador: Professor Doutor José Inácio Ferrão de Paiva Martins



## **AGRADECIMENTOS**

Deseja o autor expressar os seus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram de algum modo para a elaboração deste trabalho, em especial:

- Professor Doutor António Sepúlveda Machado e Moura pelo incentivo e apoio.
- Professor Doutor José Inácio Ferrão de Paiva Martins pela orientação.
- Professor Santos Baptista pela disponibilidade sempre demonstrada.
- Engenheira Maria Cristina da Silva Nunes, pela colaboração e ajuda na materialização dos ensaios.
- À minha família pela paciência e compreensão que tiveram durante o tempo que dediquei à prossecução deste trabalho.

## RESUMO

O presente trabalho teve por finalidade analisar o comportamento à corrosão dos materiais de eléctrodos de terra em função do tipo de solos onde são inseridos.

Os solos escolhidos foram os das centrais da PT Comunicações Serra de Arouca, S. Pedro da Cova, Granja e Lavra.

Os eléctrodos de terra utilizados para obter os provetes de ensaio foram de aço, diâmetro de 16 mm e com um revestimento de 250 µm de cobre, e chapas de cobre electrolítico com as dimensões de 500 mm x 500 mm x 1,1 mm.

O comportamento dos eléctrodos foi realizado em vasos perfurados cheios com terra durante mais de três mil horas, procurando-se simular situações passíveis de se encontrarem no seu funcionamento real, como seja, a alteração da resistividade do meio e pH pelas chuvas. Os provetes foram monitorizados para uma periódica medição do potencial e corrente face a uma dada referência, ao mesmo tempo que se procedia a uma inspecção visual.

A agressividade dos solos foi interpretada em termos do domínio termodinâmico e velocidade de corrosão manifestadas pelos provetes.

*Palavras-chave:* eléctrodos de terra, corrosão nos solos, cobre, descargas eléctricas, protecção catódica.

## ABSTRACT

The goal of this work was to analyze the corrosion behaviour of ground electrode materials depending on the type of soil where they are inserted.

The soils chosen were those of PT Comunicações Serra de Arouca, S. Pedro da Cova, Granja and Lavra. The ground electrodes used for the test specimens were made of steel, diameter 16 mm and a coating of 250  $\mu\text{m}$  in copper and electrolytic copper plates with dimensions of 500 mm x 500 mm x 1.1 mm.

The behaviour of the electrodes was performed in perforated pots filled with soil for more than three thousand hours, attempting to simulate situations likely to meet in its actual workings, such as, changing the resistivity of the medium and pH by rains. The samples were monitored for a periodic potential measurement and current towards a reference electrode, at the same time as introducing a visual inspection.

The aggressiveness of the soil has been interpreted in terms of thermodynamic and field corrosion rate expressed by the samples.

*Keywords:* ground electrodes, corrosion in soils, copper, electric shocks, cathodic protection.

## Índice

<b>Agradecimentos</b>	i
<b>Resumo</b>	ii
<b>Abstract</b>	iii
<b>Índice Geral</b>	iv
<b>1 Introdução</b>	1
<b>2 Caracterização das estruturas alvo</b>	5
2.1 Eléctrodos de terra	5
2.1.1 Eléctrodos de terra em chapa de cobre	5
2.1.2 Eléctrodos de terra em aço	5
2.2 Regime de Neutro e sistemas de ligação envolvendo a terra	6
2.2.1 Tipos de ligação à terra	7
2.3 Soldadura aluminotermicas	11
<b>3 Instalação do pára-raios</b>	12
<b>4. Corrosão metálica</b>	13
4.1 Conceitos teóricos	13
4.2 Determinação da velocidade de corrosão	17
4.3 Corrosão nos solos	18
4.3.1 Corrosão nos eléctrodos de terra	24
4.3.2 Prejuízos causados pela corrosão nas terras de protecção	26
<b>5 Parte experimental</b>	27
5.1 Tipos de solo	27
5.2 Procedimento experimental	28
5.3 Resultados experimentais	29
5.3.1 Observação do potencial e corrente dos provetes de ensaio face à referência do eléctrodo de grafite	29
5.3.2 Protecção catódica do eléctrodo de Cobre pelo Zinco	32
5.3.3 Observação da corrosão do ferro do eléctrodo de terra de aço na parte de corte	34
5.3.4 Determinação da corrosão no cobre	37
5.4 Discussão dos resultados	37



<b>6 Conclusões</b>	39
<b>Considerações finais</b>	40
<b>Referencias Bibliográficas</b>	41
<b>Legislação aplicável</b>	43
<b>Normas de referência</b>	47

## Índice figuras

Fig. 1 Descarga atmosférica	5
Fig. 2 Exemplo de terra com chapa de cobre 500*500*1.1mm	5
Fig. 3 Eléctrodos de terra com as dimensões de 2.1m de comprimento e 16mm de diâmetro	6
Fig.4 Área de influência de um eléctrodo de terra	9
Fig.5 Sistemas de protecção contra descargas atmosféricas e sobretensões	10
Fig 6 Tensão de passo ou potencial de passo	11
Fig.7 Moldes para efectuar as soldaduras aluminotérmicas	12
Fig. 8 Pára-raios acoplado em torre	12
Fig.9 Esquema do mecanismo de corrosão de metais e suas ligas	13
Fig. 10 Esquema representativo do mecanismo de corrosão galvânica	14
Fig. 11 Esquema representativo do mecanismo de corrosão por células de acção local	14
Fig.12 Energias livres de formação de alguns óxidos metálicos	15
Fig.13 Analogia eléctrica duma pilha de corrosão	15
Fig. 14 Diagrama de Evans	16
Fig. 15 Diagrama esquemático de polarização para três materiais metálicos	18
Fig.16 Pilhas de corrosão no solo	19
Fig 17 Método de Wenner para medição da resistividade dos solos	20
Fig.18 Gama da variação usual do Eh com o pH em solos	23
Fig 19 Diagrama de potencial – PH em água a 25°C	26
Fig. 20 Efeitos de uma descarga num quadro eléctrico	26
Fig. 21 Eléctrodo de terra de aço revestido com Cu – Central da Granja	29
Fig. 22 Eléctrodo de terra de Cu – Central da Granja	29
Fig 23 Eléctrodo de terra de aço revestido com Cu – Central de Arouca	30
Fig. 24 Eléctrodo de terra de Cu – Central de Arouca	30

Fig 25 Eléctrodo de terra de aço revestido com Cu – Central de Valongo	30
Fig. 26 Eléctrodo de terra de Cu – Central de Valongo	31
Fig 27 Eléctrodo de terra de aço revestido com Cu – Central da Lavra	31
Fig. 28 Eléctrodo de terra de Cu – Central da Lavra	31
Fig. 29 Estado dos eléctrodos no final dos ensaios	32
Fig 30. Eléctrodo de terra de Cu após corte da protecção catódica – Central de Arouca	32
Fig 31. Eléctrodo de Zn após corte da protecção catódica – Central de Arouca	33
Fig 32. Acoplamento galvânico Zn-Cu – Central de Arouca	33
Fig 33 Eléctrodo de terra de Cu com protecção catódica – Central de Arouca	33
Fig 34 Eléctrodo de terra aço – penetração do ferro – Central de Arouca	34
Fig 35 Eléctrodo de terra aço – penetração do ferro – Central de Valongo	35
Fig 36 Eléctrodo de terra aço – penetração do ferro – Central da Granja	35
Fig 37 Eléctrodo de terra aço – penetração do ferro – Central da Lavra	36
Fig 38 Eléctrodo de terra de aço após o ensaio	36

## Índice Tabelas

Tabela 1 Velocidades de corrosão em alguns solos	19
Tabela 2 Potenciais redox de solos em várias condições de arejamento	24
Tabela 3 Velocidade de corrosão do Cu nos vários solos	37

## Anexos

Anexo 1 Potenciais de eléctrodo standard a 25C° - Série Electroquímica	49
Anexo 2 Série Galvânica	50
Anexo 3 Calculo de equipamento de protecção	51
Anexo 4 Resultados experimentais	52
Tabela 1 Granja eléctrodo de terra (ferro revestido com $\mu\text{m}$ cobre)	52
Tabela 2 Granja eléctrodo do cobre	53
Tabela 3 Arouca eléctrodo de terra (ferro revestido com $\mu\text{m}$ cobre)	54
Tabela 4 Arouca eléctrodo do cobre	55
Tabela 5 Valongo eléctrodo de terra (ferro revestido com $\mu\text{m}$ cobre)	56
Tabela 6 Valongo eléctrodo do cobre	57
Tabela 7 Lavra eléctrodo de terra (ferro revestido com $\mu\text{m}$ cobre)	58

Tabela 8 Lavra eléctrodo do cobre	59
Tabela 9 Arouca eléctrodo do cobre/grafite	60
Tabela 10 Arouca eléctrodo do Zinco/grafite	60
Tabela 11 Arouca eléctrodo do cobre/zinco	61
Tabela 12 Arouca eléctrodo de (Zn+Cu)/grafite	61

## 1. Introdução

A evolução das sociedades esteve desde sempre associada ao desenvolvimento das comunicações. A partir do século XIX, com a invenção do telefone, as telecomunicações assumiram um papel decisivo no contexto social e económico de todos os países, constituindo um factor essencial de progresso a par da electricidade e das indústrias transformadoras.

Em Portugal a história das comunicações está intimamente ligada às empresas que, desde os finais do século XIX até aos nossos dias, instalaram, mantiveram e desenvolveram as telecomunicações nacionais, sector fundamental para podermos competir numa economia globalizada. Passemos a descrever as datas históricas que marcaram o nascimento das telecomunicações [1-7], bem como a origem da Portugal Telecom:

1838- Samuel Morse apresenta o telégrafo eléctrico da sua autoria, em França, perante a Academia das Ciências.

1850/1851 - 1º Cabo telegráfico submarino sob o Canal

1852 – É criado o Ministério das Obras Públicas, Comércio e Indústria, presidido por António Maria Fontes Pereira de Melo, onde ficam integrados os serviços de Correios e Postas do Reino, como Direcção Geral.

1855 – Em 26 de Abril, o Ministro da Indústria, Fontes Pereira de Melo e Alfredo Bréguet estabelecem contrato de implantação da Telegrafia Eléctrica cuja rede inicial abrange o Terreiro do Paço, as Cortes, o Palácio das Necessidades, em Lisboa e Sintra, Mafra, Carregado, Caldas da Rainha, Alcobaça, Leiria, Coimbra, Aveiro, Porto, Aldeia Galega (Montijo), Barreiro, Setúbal, Montemor-o-Novo, Évora, Estremoz e Elvas. Este contrato foi confirmado pela Lei de 13 de Julho. Em 16 de Setembro é inaugurado o serviço.

Estabelecimento do serviço electro-semafórico (ofício do Ministério da Guerra, de 17 de Julho).

1856 – Foram implantados três cabos subfluviais no Rio Tejo, o rio de Samora e Vau de Alcochete, para passagem das linhas telegráficas para a margem sul e ligação a Elvas.

1857 – É publicado o primeiro Regulamento do Serviço Telegráfico em 16 de Julho. Aprovado a 1ª Convenção de serviços Telegráficos com Espanha por Lei de 12 de Julho.

1858 – 1º Cabo telegráfico submarino transatlântico entre a Inglaterra e a Terra Nova.

1868 – Assinatura de uma Convenção Telegráfica em Viena de Áustria a 21 de Julho. As alterações que implicou na organização do serviço telegráfico foram ratificadas pelo Decreto de 17 de Dezembro e Orgânica de 31 de Dezembro.

1870 – 1º Cabo Telegráfico Submarino entre Portugal e a Inglaterra – 2 de Julho.

1871 – Novo Cabo subfluvial no Rio Tejo, entre o Bom Sucesso (Torre de Belém) e o Portinho da Costa, composto por seis condutores. A amarração foi feita em 27 de Abril.

1872 – É assinada uma 2ª Convenção Telegráfica entre Portugal e Espanha ratificada por Lei de 7 de Fevereiro. Primeiro ensaio com o aparelho telegráfico de Cristiano Bramão, que estabeleceu comunicação entre Lisboa e Carcavelos.

1876 – Em 16 de Fevereiro Graham Bell regista a sua patente do telefone.

1879 – Primeiros ensaios de ligações telefónicas a cargo de Cristiano Bramão em que se chegou a estabelecer ligação entre Lisboa, Bom Sucesso, Barreiro e Setúbal, usando o aparelho deste inventor.

1880 – Fusão dos Correios e Telégrafos, duas Direcções Gerais, numa só: a Direcção-Geral dos Correios, Telégrafos e Faróis, dependente do Ministério das Obras Públicas, Comércio e Indústria. Os Serviços sofreram uma profunda reorganização. 3ª Convenção Telegráfica com Espanha.

1882 – São inauguradas as redes telefónicas da cidade de Lisboa. A 26 de Abril, e a do Porto, a 1 de Julho, sendo concessionária a empresa Edison Gower Bell Telephone. A companhia instalou os seus escritórios na Rua do Alecrim, 10, em Lisboa e no Porto, numa dependência do Grande Hotel. O primeiro locutório chamado Estação Garrett abriu na Havaneza do Chiado.

1884 – Em França são inauguradas as primeiras linhas telefónicas interurbanas e nos EUA a linha Boston/New York.

1887 – Foi autorizado por Decreto o trepasse da concessão da rede telefónica detido pela Edison Gower Bell Telephone of Europe de Londres para a The Anglo-Portuguese Company.

- 1890 – Intervenção da comutação telefónica automática.
- 1891 – Primeiro cabo telefónico sob o Canal da Mancha.
- 1896 – Guglielmo Marconi consegue, com sucesso, a primeira emissão rádio (TSF) à distância de 3 Km.
- 1904 – Abertura ao público do primeiro circuito telefónico entre as cidades de Lisboa e Porto. As duas estações terminais foram instaladas: em Lisboa, na travessa de S. Sebastião da Pedreira (designada então por travessa de S. Francisco de Xavier), e no Porto, na Rua Saraiva de Carvalho.
- 1906 – São inauguradas na área de Lisboa as estações telefónicas de Alhandra, Almada, Barreiro, Sesimbra, Cruz Quebrada e Sacavém.
- 1908 – Reunião da Conferência Telegráfica Internacional em Lisboa.
- 1911 – Na sequência das reformas empreendidas pelo novo Regime Republicano, implantado em 1910, os serviços de Correios, Telégrafos e Fiscalização das Industrias Eléctricas passam a ter autonomia administrativa e financeira sendo constituída a Administração-Geral dos CTT – Decreto de 14 de Maio, assinado por Brito Camacho. Foi 1º Administrador-Geral o Eng.º António Maria da Silva.
- 1912 – O engenheiro americano Pupin define os procedimentos necessários á instalação dos cabos telefónicos subterrâneos.
- 1914 – Primeiras centrais telefónicas automáticas em França e na Grã-Bretanha.
- 1915 – Inauguração da Estação Norte da APT, na Rua Andrade Corvo, em edifício próprio, capacidade para servir 10000 assinantes. Implantaram-se as linhas telefónicas Porto-Braga e Coimbra-Figueira da Foz.
- 1917 – Primeira greve telegráfico postal.
- 1925 – Inauguração da grande Central Telefónica da Trindade em Lisboa, em edifício construído pela APT.
- 1926 - Inauguração do serviço radiotelegráfico Insular e Internacional.
- 1927 – Inaugurou-se a Estação da Picaria no Porto, em edifício construído pela APT.
- 1928 - Estabeleceu-se a primeira ligação telefónica Lisboa-Madrid.
- 1931 – Primeira instalação telefónica interurbana pelo sistema de transmissão em alta-frequência.
- 1943 – Assinatura do Acordo Telegráfico com o Brasil, que entrou em vigor em 1 de Junho.
- 1948 – É introduzido o serviço automático na estação de Belém.

1951 – Implantação do Cabo Hertziano S. Miguel-Santa Maria.

1953 – Estabeleceu-se o serviço telefónico Portugal e a Grécia.

1969 – Inauguração do cabo Submarino Portugal-África do Sul.

1983 – É introduzida a fibra óptica na rede de transmissão.

1987 – Início da digitalização da comutação.

1994 – O Decreto-Lei 122/94 de 14 de Maio reorganiza o tecido empresarial do sector das telecomunicações determinando a constituição de um operador nacional de telecomunicações, a Portugal Telecom, S.A., com base na fusão da Telecom Portugal, S.A., dos TLP, S.A. e da Teledifusão de Portugal, S.A.

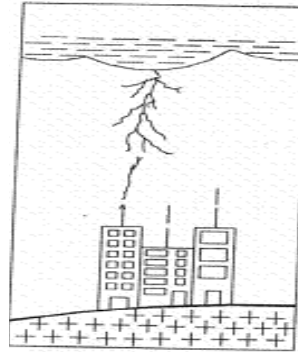
2009 – Implantação da rede Nacional de fibra óptica.

## 2. Caracterização das estruturas alvo [8-17]

### 2.1 *Eléctrodos de terra*

Os eléctrodos de terra são materiais utilizados para a protecção de pessoas e bens contra descargas atmosféricas (Fig.1) e eléctricas.

**Figura 1** – Descarga atmosférica (T = 30.000°C numa milésima de segundo) sobre o pára-raios de edifício.



#### 2.1.1. *Eléctrodos de terra em chapa de cobre*

Chapa de cobre electrolítico com um condutor de cobre de 6 mm de espessura para efectuar a ligação com o ponto de ligação das terras da instalação que se pretende proteger, Fig. 2.



**Figura 2** – Exemplo de terra com chapa de cobre: dimensões: 500 x 500 x 1,1 mm

#### 2.1.2. *Eléctrodos de terra em aço*

Os eléctrodos de terras são em aço com um revestimento electrolítico de cobre de espessura igual ou superior a 250  $\mu\text{m}$ , com um comprimento de 2,10 m e 14,25 mm de diâmetro. Terão de suportar na base um esforço manual superior para implementar a penetração no terreno, ser equipados com batente e ponteira, e permitir a ligação de vários eléctrodos de forma a conseguir-se o comprimento pretendido, Fig. 3.





**Figura 3** – Eléctrodo de terra com as dimensões de 2,1 m de comprimento e 16mm de diâmetro.

Também podem ser usados, como eléctrodos de terra, outros elementos metálicos, como por exemplo; condutores de cobre estanhado, fitas, tubos, cabos nus, armaduras do betão imersas no solo.

#### *Regime de Neutro e sistemas de ligação envolvendo a terra*

Habitualmente nas instalações eléctricas encontramos três regimes de neutro designados por TT, TN e IT.

Os sistemas eléctricos de transmissão e de utilização de energia, são estabelecidos com um determinado esquema de ligação à terra. Existem, diferentes esquemas, eles distinguem-se pelo modo de ligação à terra, podendo ser um dos seguintes: TT, TN, IT. O TN, pode assumir as siglas TN-C, TN-S e TN-C-S.

A primeira letra do código refere-se ao modo de ligação à terra ao nível da rede de distribuição.

Primeira letra T, significa ligação directa do neutro à terra.

Primeira letra I, significa ponto neutro isolado da terra ou ligado à terra por impedância de valor elevado.

Segunda letra T, significa massas ligadas directamente à terra, independentemente da eventual ligação do neutro à terra.

Segunda letra I, significa massas ligadas directamente ao neutro ou através de um condutor ligado àquele na extremidade (PE).

### 2.2.1 Tipos de ligações à terra

Enquanto decorre a fase de projecto de uma instalação eléctrica, seja ela para utilização industrial ou residencial, torna-se oportuna uma primeira abordagem focalizada em alguns aspectos importantes, como sejam:

- Conhecimento das cargas a instalar.
- Regime de neutro a adoptar.
- Tipo de protecções a instalar.
- Características das ligações à terra.

Sobre este último item, afiguram-se apropriadas algumas considerações. De um modo geral, pode-se recorrer à ligação à terra quando se quer:

- Proteger as pessoas de contactos (directos ou indirectos) com massas de equipamentos que, por sua vez interaccionem com as partes activas dos mesmos.
- Proteger pessoas e bens de sobretensões de origem atmosférica.
- Proteger equipamentos contra o surgimento de sobreintensidades.

Deste modo surgem os seguintes tipos de ligação à terra:

- Ligação para efeitos de protecção.
- Ligação para efeitos de serviço.
- Ligação para baixada de pára-raios

Tome-se como exemplo uma instalação de telecomunicações, que é das mais exigentes do ponto de vista do valor da resistência de terra, pois além de contemplar as três ligações já enunciadas, entra em linha de conta com uma quarta ligação à terra, relativa à instalação de um grupo electrogéneo de socorro (GES).

Segundo as disposições legais, as terras, devem ter um valor da sua resistência o mais baixo possível, para evitar diferenças de potenciais.

Para uma instalação de telecomunicações, o valor máximo permitido por lei para a resistência de terra é de  $20\Omega$ .

Com estes dados já podemos, nesta fase, definir o valor óhmico pretendido para a instalação e, consequentemente, o tipo de ligação à terra a executar.

Existem, no entanto, alguns aspectos a ter em conta, quando se define o tipo de ligação à terra. O mais importante deles tem a ver com a *natureza do terreno* onde se vai efectuar a instalação. É este aspecto que influencia uma grandeza, cuja importância é fundamental neste tipo de análise – a *resistividade do terreno*, que mais não é do que a

resistência que o terreno (no seu estado natural) oferece à passagem da corrente eléctrica.

Com este dado pode-se ter uma ideia quanto ao tipo de terreno com que se está a trabalhar. Não se espera que um terreno rochoso apresente uma resistividade igual à de um terreno agrícola. E, ainda assim, mesmo uma área de terreno rochoso não apresenta uma resistividade constante. Assim, ao construir-se uma rede de terras, tão exigente como a de uma instalação de telecomunicações, o mínimo que se pode esperar são surpresas! A medida da resistividade do terreno deverá ser efectuada em diversas direcções, utilizando-se posteriormente o pior dos valores obtidos como referência para a resistência de terra.

Poderá parecer inapropriado efectuar toda esta parafernália de medidas antes de se iniciar a fase do desaterro do terreno. No entanto, este procedimento é importantíssimo, uma vez que permite ter uma primeira noção dos custos mínimos envolvidos na rede de terras pretendida.

Seguidamente inicia-se a fase do desaterro para a construção da instalação.

Concluído o desaterro, será apropriada uma nova medida da resistividade do terreno. E é nesta fase que se podem ter surpresas, pois o terreno poderá evidenciar uma natureza ainda mais resistiva, o que, inevitavelmente, vai envolver custos acrescidos na rede de terras.

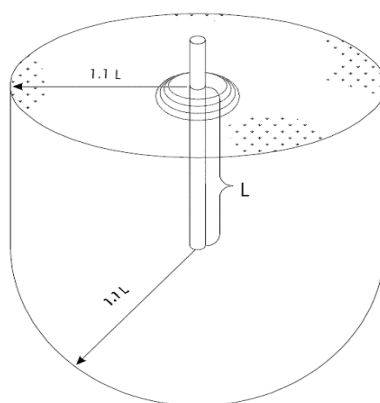
Agora que já se tem uma ideia (não uma certeza) quanto à real natureza do terreno, pode-se começar a construir a rede de terras projectada através da instalação de troços de cobre no subsolo, um meio sempre corrosivo para os metais e suas ligas. Os materiais a utilizar deverão sempre ser de qualidade inquestionável, designadamente os materiais de aço revestidos com cobre de espessura superior a 250  $\mu\text{m}$ . Deste modo abrem-se valas com uma profundidade mínima de 0,9 m, nas quais se coloca uma camada de 0,1 m de espessura constituída por areia fina, terra cirandada ou turfa.

O cabo de cobre (nu no caso de uma terra de protecção e isolado para uma terra de serviço) é então colocado a uma profundidade de 0,8 m e envolvido por turfa molhada e compactada em três camadas de 0,2 m cada uma. Os últimos 0,1 m de espessura da profundidade da vala poderão ser preenchidos com terras sobranes da sua fase de abertura.

Se o terreno for rochoso não se conseguem atingir os valores óhmicos razoáveis com a simples instalação de simples cabos em valas. Torna-se necessário o recurso a eléctrodo de terras a uma profundidade nunca inferior a 0,8 m. Em alguns casos

(terrenos com uma resistividade elevadíssima) o eléctrodo de terras atinge profundidades superiores a 40 m, o que se consegue recorrendo à abertura de furos artesianos.

Quando nos referimos a eléctrodo de terras, deve-se ter em consideração um factor muito importante – *a sua área de influência*, que abrange um hemisfério que envolve o eléctrodo. A prática usual da empresa é a de considerar um raio equivalente a 1,1 vezes o seu comprimento, como se pode ver na Fig. 4.



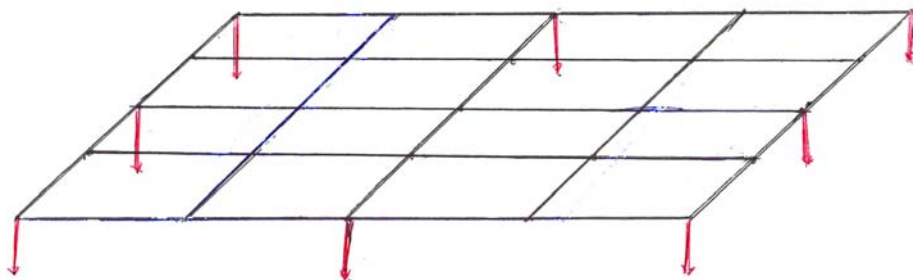
**Figura 4** – Área de influência de um eléctrodo de terra.

Deste modo, não deverá ser colocado nenhum eléctrodo nessa área de influência. Embora o eléctrodo de terras de aço seja muito corrente, também se utiliza bastante a chapa de cobre, que permite uma melhor difusão das correntes resultantes de sobretensões, por abranger uma área envolvente equivalente à própria chapa. É como se deslizássemos uma chapa de terra sobre a que está instalada.

Tratando-se de uma instalação de telecomunicações com uma torre de betão, existe aqui uma boa oportunidade para se conseguirem valores óhmicos bastante baixos na fundação da torre (que normalmente tem uma forte componente de elementos metálicos). Efectivamente, a sua estrutura metálica pode ser aproveitada nesse sentido, através da instalação de um eléctrodo de terra no fundo da sapata e aos chumbadouros da torre, formando tipo gaiola de Faraday, Fig. 5. Estas ligações deverão ser feitas mediante uma soldadura aluminotérmica com molde apropriado ou então com recurso a ligadores bimetálicos disponíveis no mercado.

Existe ainda a baixada do pára-raios, que deverá ser também estabelecida em cabo de cobre ao longo da torre e sem curvas muito pronunciadas. As ligações às fundações da torre e o cabo da baixada do pára-raios serão ligados a uma placa

distribuidora de terra, a instalar na torre, onde também ligará um terceiro cabo de cobre, destinado à interligação com as restantes terras da instalação.



**Figura 5** – Sistema de protecção contra descargas atmosféricas e sobretensão: eléctrodo de terra nas fundações

Passemos da torre ao edifício da central telefónica. E, neste capítulo aplica-se ao edifício o que foi afirmado para a torre, no que diz respeito às suas fundações. Os pilares do edifício são também uma boa oportunidade para a construção de um anel em cabo de cobre nu. Podem ainda, embora de forma criteriosa, ser instalados alguns eléctrodos enterrados nos pilares, interligados pelo referido cabo. No interior do edifício deve existir uma placa distribuidora de terra com borne amovível, para se ligarem as diversas terras da instalação.

Para uma boa protecção, todas as partes metálicas de uma instalação devem de estar todas ligadas à terra através de uma barra distribuidora, com “link” amovível para efeitos de medida da resistência de terra, a efectuar, no mínimo com carácter anual.

Quanto à terra de serviço, será estabelecida separadamente em relação à terra de protecção e à baixada do pára-raios. A sua construção é em tudo semelhante às anteriores, com uma pequena *nuance* – o cabo de cobre a instalar tem de ser dotado de isolamento azul.

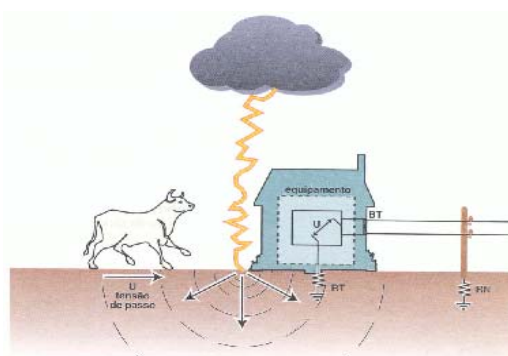
As resistências de terra devem medir-se periodicamente ao longo do ano, com especial incidência nos meses de Verão (Junho, Julho, Agosto e Setembro), nos quais o tempo é mais seco, os solos apresentam menores índices de humidade e, consequentemente os valores óhmicos (para a resistência de terra) são maiores. O Decreto-lei n.º 42895 de 1960, no artigo n.º 58 – 2º, refere que “A resistência, em ohm, dos eléctrodos de terra deverá ser tão pequena quanto possível e inferior em qualquer

ocasião a 20 ohm.” O artigo 60 diz que “Os proprietários de subestações, postos de transformação e centrais eléctricas deverão verificar, uma vez por ano, durante os meses de Junho, Julho, Agosto e Setembro, a resistência de contacto de todos os eléctrodos de terra; os resultados obtidos devem anotar-se neste registo, de forma a poderem ser consultados em qualquer ocasião pela Fiscalização Eléctrica do Governo.”

É extremamente importante que, no momento da descarga, tudo esteja interligado, ou equipotencializado, pois o potencial eléctrico eleva-se de igual forma por toda a instalação e vai neutralizar-se também de igual forma ao longo do terreno.

O perigo não é o potencial em si, mas sim a diferença de potencial entre dois pontos muito próximos. É por isso que a segurança das instalações e das pessoas depende de uma eficaz ligação à terra que anule essa mesma diferença de potencial.

**Figura 6** – Tensão de passo ou potencial de passo [27]



O transcrito enquadra-se no contexto das *especificações técnicas* associadas ao projecto execução e instalação da rede de terras, de serviço, e de protecção do grupo gerador e do pára-raios, que constituem o projecto da torre e do maciço de fundação.

A existência do pára-raios e da rede das outras terras tem como objectivo o escoamento das correntes resultantes das descargas atmosféricas que atinjam a torre, sem causar danos a pessoas e bens.

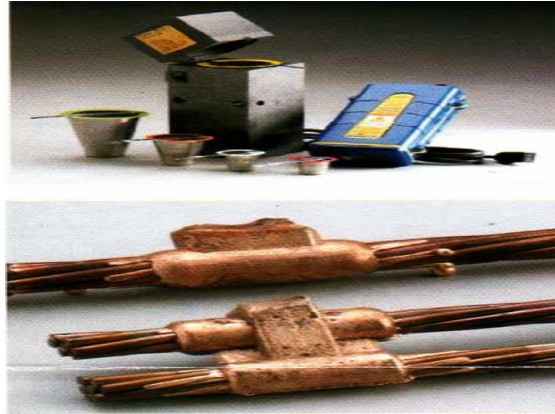
A função dos equipotencializadores é isolar todas as terras, interligando-as no momento da descarga, com a colocação de toda a instalação ao mesmo potencial, voltando a isolá-las no final da descarga.

### 2.3. Soldadura aluminotérmica

As interligações entre os eléctrodos de terra [18], o cabo de terra, a chapa de cobre e a estrutura de fundação das torres e dos edifícios serão efectuadas através de

soldadura aluminotérmica. Esta operação consiste na reacção exotérmica de óxido de cobre e de alumínio, em molde de grafite, com a forma e dimensões apropriadas, Fig. 7.

**Figura 7** – Moldes para efectuar as soldaduras aluminotérmicas



### 3. Instalação do pára-raios

O pára-raios será instalado num mastro no topo da torre em suporte apropriado, Fig. 8, de modo a permitir a instalação de sinalização luminosa. Será ligado à placa de

**Figura 8** – Pára-raios acoplado em torre



terra, através de cabo de cobre nu de 50 mm<sup>2</sup> de secção, fixado por abraçadeiras metálicas, instaladas sobre barra metálica integrada na estrutura da escada, que também será ligada à placa distribuidora de terra instalada na torre ou no edifício. O pára-raios será do tipo Franklin, em cobre niquelado/cromado, com a ponta de metal maciço, com uma altura de 0.35 m, acoplado a uma haste de cobre com 2 m, com coroa de potência e equipado com todos os acessórios para fixação ao suporte e ligador ao cabo da baixada.

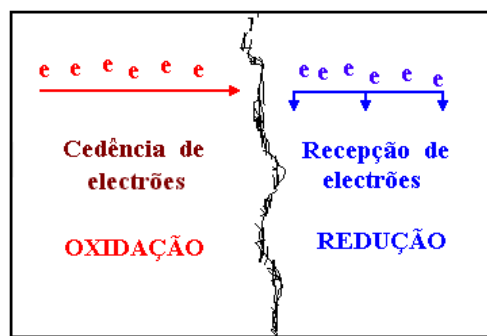
As plataformas da torre, caso existam, serão ligadas ao cabo de descida do pára-raios. O fuste da torre, caso seja metálico, terá de ser ligado a este cabo no topo, existindo ainda uma ligação por cada 15 m de altura. O cabo de descida não deverá ser estabelecido com curvas pronunciadas.

## 4. Corrosão metálica

### 4.1. Conceitos teóricos

A noção de corrosão aplicada aos materiais metálicos segundo Ulich [19] consiste na sua deterioração devido a reacções químicas resultantes da acção do meio onde se encontram inseridos. Actualmente este conceito foi alargado aos materiais não metálicos, e considera-se também a possibilidade de acções de índole mecânica.

A corrosão de metais e suas ligas baseia-se no pressuposto da existência de duas áreas termodinamicamente diferentes entre as quais se desenvolve um fluxo de electrões. À área a montante deste fluxo dá-se o nome de ânodo, e à área a jusante o nome de cátodo, Fig. 9.



**Figura 9** - Esquema do mecanismo de corrosão de metais e suas ligas.

O trabalho inerente ao fluxo de electrões deriva, muito naturalmente, da variação da energia livre sofrida pelo sistema,  $\Delta G < 0$ , e corresponde às seguintes reacções de eléctrodo:

Ânodo:



M = Fe ou Cu para o caso dos eléctrodos de terra.



Cátodo:



ou,

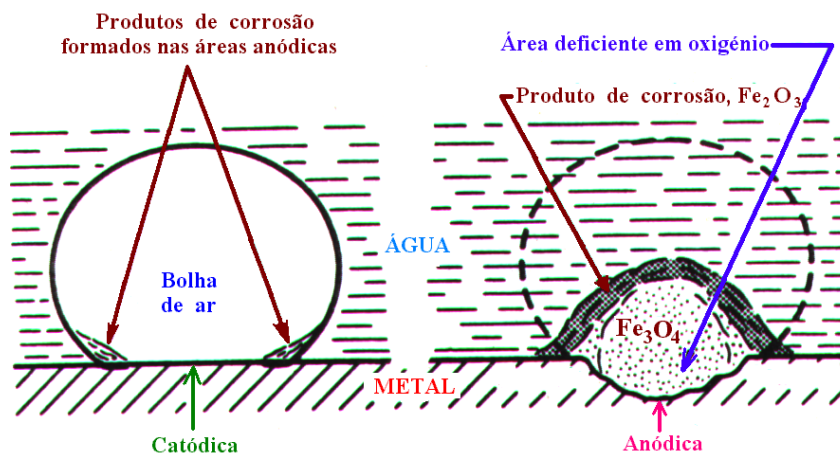


As reacções catódicas (2) e (3) consideradas, respectivamente, para meios arejados e desarejados, são as mais comuns traduzindo a interacção do solvente do sistema com a superfície metálica. Contudo, quando haja outros compostos, como sejam oxidantes, ter-se-á também de equacionar a sua actuação que se traduzirá numa maior agressividade do meio para com os metais.

A diferenciação termodinâmica das áreas catódicas e anódicas pode ficar a dever-se às características intrínsecas dos metais, corrosão galvânica (Fig. 10), ou então resultar das características do meio, células de acção local (Fig. 11).

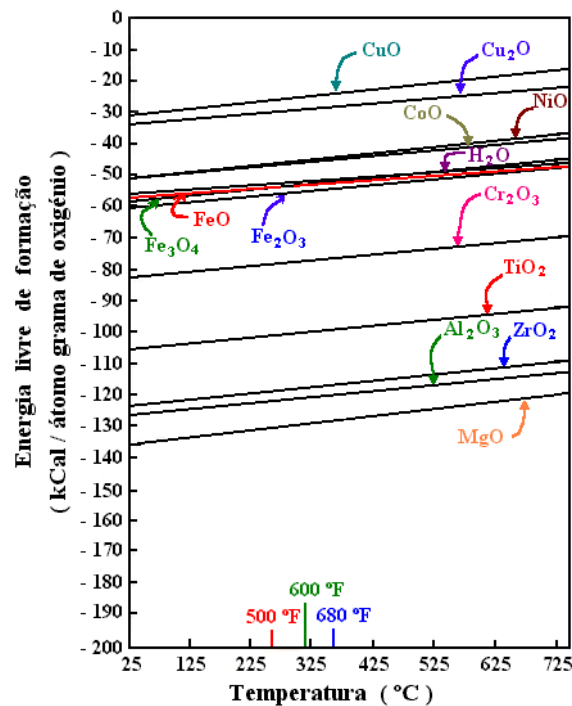


**Figura 10** - Esquema representativo do mecanismo de corrosão galvânica [20].



**Figura 11** - Esquema representativo do mecanismo de corrosão por células de acção local [20].

No primeiro caso o recurso aos potenciais de eléctrodo standard (série electroquímica de potenciais) permite definir teoricamente qual dos metais será o ânodo, sofre corrosão, e qual será o cátodo, funcionará de inerte onde se desenrolará a reacção (2) ou (3). A Fig. 12 dá uma ideia da tendência termodinâmica á corrosão de vários metais em função da temperatura.

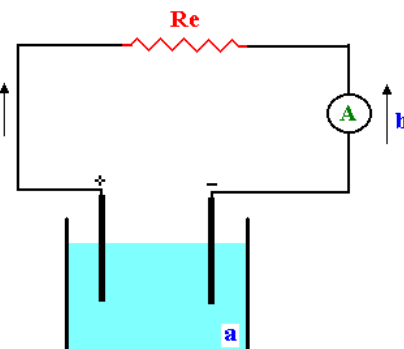


**Figura 12** - Energias livres de formação de alguns óxidos metálicos [20].

Os problemas de corrosão não são tão drásticos para as estruturas metálicas, uma vez que fenómenos de polarização consubstanciam uma corrente em regime permanente inferior à que seria de prever termodinamicamente. A analogia eléctrica destes sistemas pode sintetizar-se no circuito transcrito na Fig. 13.

**Figura 13** - Analogia eléctrica duma pilha de corrosão:

a – gerador, com uma resistência interna  $R_i = R_f$  (electrólito) +  $R_f$  (filmes sobre os eléctrodos); b – sentido de circulação dos electrões; c – sentido da corrente;  $R_e$  resistência exterior.



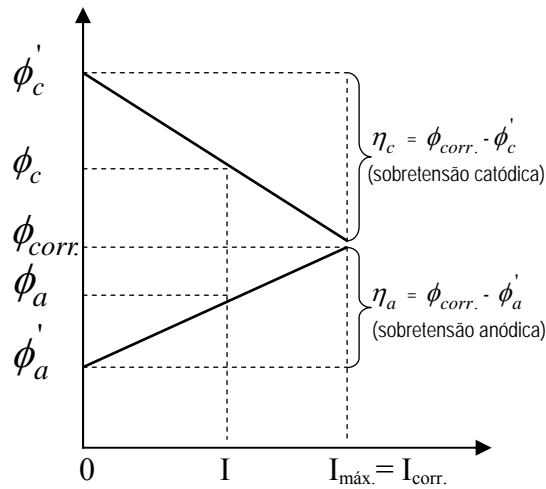
Em circuito aberto a força electromotriz do sistema eléctrico será dada pela seguinte expressão:

$$E' = \phi'_c - \phi'_a \quad (4)$$

$\phi'_c$  = potencial de circuito aberto do cátodo.

$\phi'_a$  = potencial de circuito aberto do ânodo.

Após o fecho do circuito eléctrico, admitindo a inexistência de uma resistência exterior, os fenómenos de polarização (concentração e activação) impõem uma variação dos potenciais dos eléctrodos, como se pode ver na Fig. 14 [21,22].



**Figura 14** - Diagrama de Evans.

A tensão em funcionamento será então dada por:

$$E = (\phi_c - \phi_a) - (R_s + R_f) I \quad (5)$$

ou ainda,

$$E = (\phi'_c + \eta_c - \phi'_a - \eta_a) - (R_s + R_f) I \quad (6)$$

Aplicando o *princípio da conservação de energia* à pilha de corrosão em regime estacionário, obtém-se a seguinte igualdade:

$$E' I = E I + R_i I^2 \quad (7)$$

Resolvendo a equação (7) em ordem a I, corrente que percorre o sistema, obtém-se a seguinte equação:

$$I = \frac{E' - E}{\left(\frac{\eta_a}{I}\right) - \left(\frac{\eta_c}{I}\right) + (R_f + R_s)} \quad (8)$$

$$R_i = \left(\frac{\eta_a}{I}\right) - \left(\frac{\eta_c}{I}\right) + (R_f + R_s)$$

A análise da equação (8) permite concluir que o objectivo dos especialistas de corrosão deva ser o de minimizar ao máximo o valor de  $I$ , ou seja, aumentando  $R_i$  através da majoração das variáveis  $\eta_a$ ,  $\eta_c$ ,  $R_f$  ou  $R_s$ .

#### 4.2. Determinação da velocidade de corrosão

A corrente que percorre a pilha de corrosão impõe necessariamente que a corrente catódica seja igual à corrente anódica.

$$I_c = I_a \quad (9)$$

ou ainda,

$$i_a \times S_a = i_c \times S_c \quad (10)$$

$i_a$  - densidade de corrente anódica;

$i_c$  - densidade de corrente catódica;

$S_a$  - área da região anódica;

$S_c$  - área da região catódica.

Sabendo  $I_a$  a determinação da velocidade de corrosão pode ser efectuada utilizando a equação de Faraday:

$$v = \frac{\Delta m}{t \times S_a} = \frac{M}{z \times F} \times i_a \quad (11)$$

$v$  = velocidade de corrosão, ( $\text{g dm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ).

$\Delta m$  = variação de massa sofrida pelo metal, (g).

$t$  = tempo, (s).

$S_a$  = área do metal, ( $\text{dm}^2$ ).

$M$  = peso atómico grama do metal.

$F$  = constante de Faraday, ( 96500 C ).

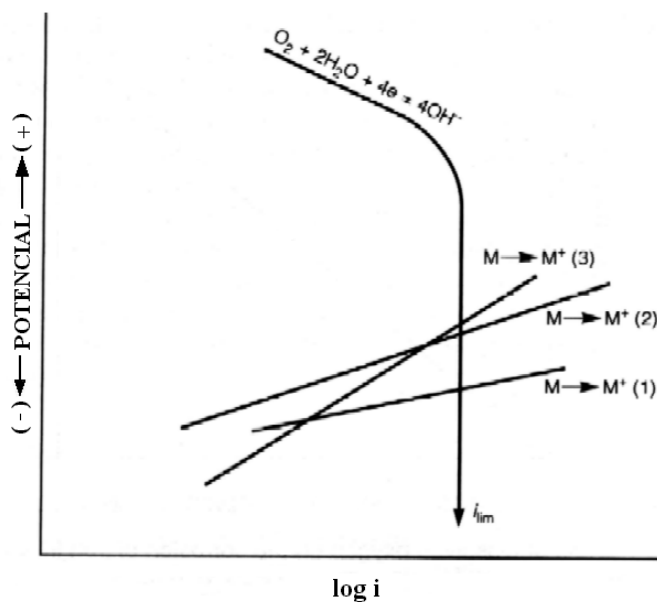
$i_a$  = densidade de corrente anódica, (A/dm<sup>2</sup>).

$z$  = número de electrões postos em jogo, valência do metal.

A massa de metal corroído por unidade de tempo e unidade de superfície aumenta proporcionalmente com a densidade de corrente anódica. Da equação (10) conclui-se o quão importante se torna a relação entre a área catódica e a anódica. O seu aumento impõe uma maior velocidade de corrosão.

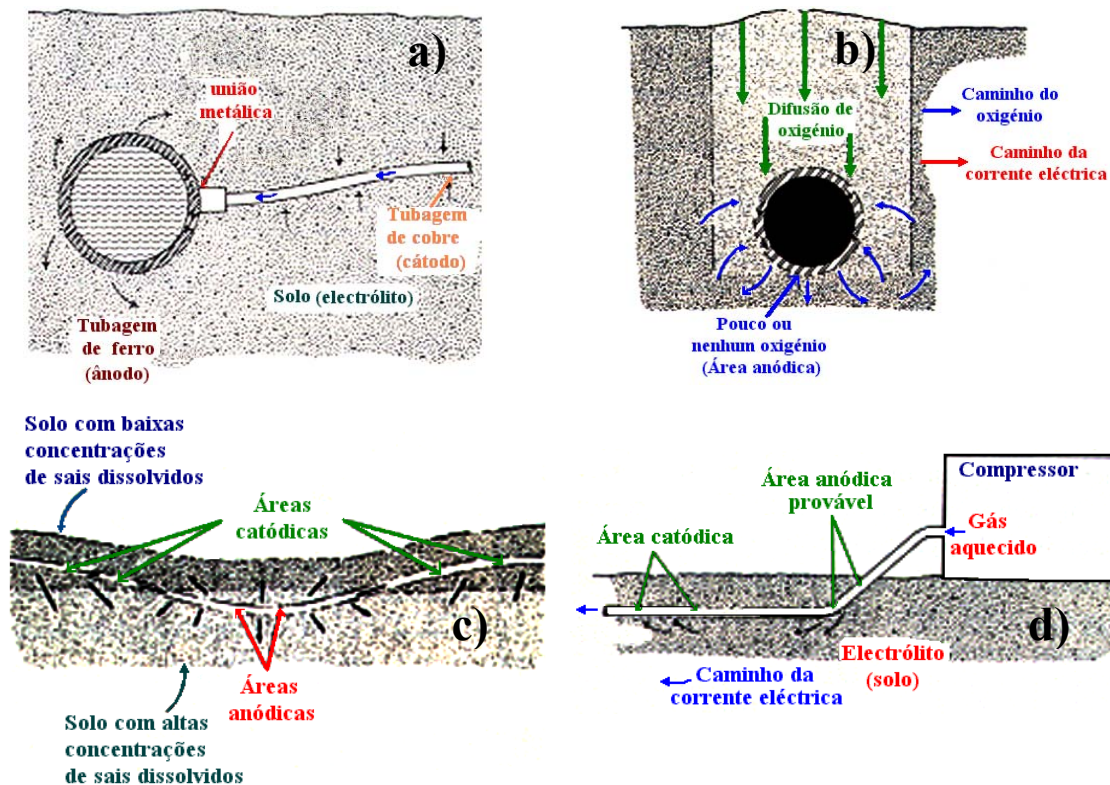
#### 4.3. Corrosão nos solos

A corrosão tem lugar em estruturas onde o solo é o electrólito, estando o sistema na maior parte dos casos *controlado pela difusão do oxigénio* através da água intersticial. A Fig. 15 mostra como a velocidade de corrosão é independente do metal ou de eventuais tratamentos metalúrgicos, desde que o sistema esteja controlado pela difusão ou dissolução de oxigénio. A velocidade de corrosão está controlada catodicamente e é proporcional à densidade de corrente limite e difusão do oxigénio,  $i_L$ .



**Figura 15** - Diagrama esquemático de polarização para três materiais metálicos [20].

A Fig. 16 sintetiza as pilhas de corrosão que normalmente se estabelecem neste meio.



**Figura 16** – Pilhas de corrosão no solo: a) galvânica; b) e c) concentração diferencial; d) temperatura diferencial [20].

A Tabela 1 mostra valores médios da velocidade de corrosão encontrados em alguns solos.

**Tabela 1** - Velocidades de corrosão em alguns solos [19].

Solos	Ferro Forno Siemens (x)		Ferro maleável (x)		Aço Bessemer (x)		Cobre (xx)		Chumbo (x)		Zinco (xxx)	
	mdd	mils	mdd	mils	mdd	mils	mdd	mils	mdd	mils	mdd	mils
Média de vários solos	4,5	5,84	4,7	4,9	4,5	5,1	0,7	<0,7	0,52	>2,6	3	>4,8
New Jersey	10,8	7,51	11,6	6,7	19,5	8,3	5,3	<0,7	0,2	1,1	1,9	3,3
San Diego (argilas)	13,7	>12	13,4	>11	14,3	>11,4	0,7	<0,7	0,6	0,8	-	-
Areia	0,9	2,33	1,0	1,9	1,0	1,7	0,2	<0,7	0,14	1,6	-	-

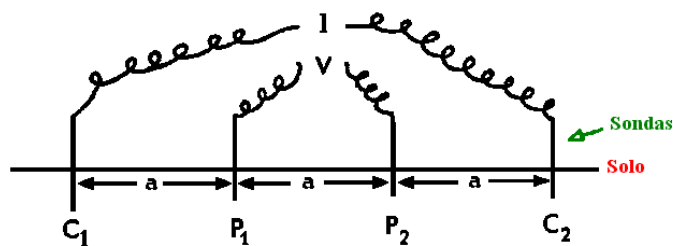
PS: Corrosão: **mdd**, miligramas por decímetro quadrado e por dia; **mils**, 25,4 µm por ano. Tempo de exposição: (x) - 12 anos; (xx) - 8 anos; (xxx) - 11 anos.

O comportamento relativo à corrosão previsto a partir dos potenciais standard, Anexo 1, deveria ser o seguinte:  $E_{Cu}^0 > E_{Pb}^0 > E_{Fe}^0 > E_{Zn}^0$ , logo,  $v_{Zn} > v_{Fe} > v_{Pb} > v_{Cu}$ . Contudo, é bem diferente o observado para a média de vários solos e o solo de New Jersey,  $v_{Fe} > v_{Zn} > v_{Cu} > v_{Pb}$ . A justificação para tal advém da possibilidade de reacções secundárias dos metais com os constituintes do solo. De acordo com a equação (8) a resistência  $R_i$  estabelecida na pilha de corrosão de cada um deles é diferente.

Os factores que afectam a corrosibilidade nos solos são os seguintes:

- Porosidade: Um solo poroso pode reter humidade durante um maior período de tempo ou favorecer um melhor arejamento;
- Sais dissolvidos: Solos contendo ácidos orgânicos derivados do "humus" são corrosivos para o aço, zinco, chumbo e cobre, assim como o cloreto de sódio (NaCl) e o sulfato de sódio (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>);
- pH do meio: Os meios ácidos são mais agressivos por impedirem a formação de películas passivas;
- Condutividade do meio: A redução da resistividade permite o desenvolvimento de pares galvânicos a maiores distâncias.

A resistividade dos solos pode ser determinada a partir de um método desenvolvido por *Wenner*. Quatro lâminas de metal são enterradas no solo à mesma distância umas das outras e, em seguida faz-se passar uma corrente de forma a medir a diferença de potencial entre as duas lâminas interiores, Fig. 17.



**Figura 17** - Método de *Wenner* para medição da resistividade dos solos.

A resistividade será dada pela equação:

$$\rho = 2 \pi a R \quad (12)$$

onde,

$R$  = quociente tensão/corrente

$a$  = distância entre os eléctrodos, em cm.

$\rho$  = resistividade,  $\Omega \times \text{cm}$ .

A resistividade dos electrólitos varia consideravelmente da *água do mar*, 20 a 30 ohm.cm, até à *pedra granítica*, 500.000 ohm.cm.

Os geoquímicos e cientistas do solo e da água [23] usam as medidas de potencial redox ( $E_h$ ) para caracterizar o estado de oxidação-redução das superfícies no meio ambiental. Esses dados exprimem a disponibilidade de electrões no interior desses sistemas: solo e água. O potencial redox depende da concentração dos oxidantes e redutores que existam no meio:

Redutores (dadores de electrões):

- matéria orgânica ( $\text{CH}_2\text{O}$ ), e diversos compostos orgânicos.
- compostos inorgânicos na forma reduzida, tais como  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{H}_2$ .

Oxidantes (receptores de electrões):

- compostos inorgânicos, tais como  $\text{O}_2$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{FeOOH}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{HCO}_3^-$ .

Os solos anaeróbicos, como sejam terras molhadas, são usualmente limitados como receptores de electrões e têm uma grande disponibilidade como dadores de electrões, passando-se precisamente o contrário nos solos arejados, pouca disponibilidade como dadores de electrões e grande disponibilidade como receptores de electrões, em particular o  $\text{O}_2$ . As reacções redox nos ambientes de superfície podem ser representadas pela seguinte reacção de eléctrodo:



onde Ox é a espécie oxidada ou receptor de electrões, Red é a espécie reduzida ou dador de electrões, e  $m$  e  $n$ , respectivamente, o número de iões de hidrogénio e electrões envolvidos na reacção. A equação de Nernst aplicada à reacção é a seguinte:

$$E_h (\text{V}) = E^\circ - \frac{0,059}{n} \log \frac{(\text{Red})}{(\text{Ox})} + 0,059 \frac{m}{n} \text{pH} \quad (13)$$



Analisando a equação (13) verifica-se que o potencial redox aumenta com a actividade da espécie oxidada, diminui com o aumento da actividade da espécie reduzida, e aumenta com a actividade do ião hidrogénio (redução de pH). Considerando a constante de equilíbrio da reacção (12):

$$K = \frac{(\text{Red})}{(\text{Ox})(e^-)^n (H^+)^m} \quad (14)$$

que pode ser reescrita na seguinte forma:

$$\log K = \log(\text{Red}) - \log(\text{Ox}) - n \log(e^-) - m \log(H^+) \quad (15)$$

ou ainda utilizando o operador matemático  $p = \log$ ,

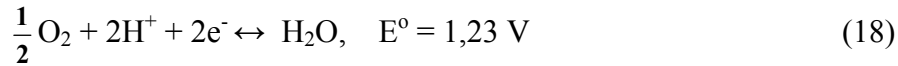
$$pe^- + pH = \log K - \log(\text{Red}) + \log(\text{Ox}) \quad (16)$$

O potencial redox do solo,  $E_h$ , é determinado com um eléctrodo de platina associado a um eléctrodo de referência ( $Hg/Hg_2Cl_2$ , ou  $Ag/AgCl$ ) de forma a constituir uma célula, e relaciona-se com  $pe^-$  (actividade electrónica relativa) através da seguinte equação:

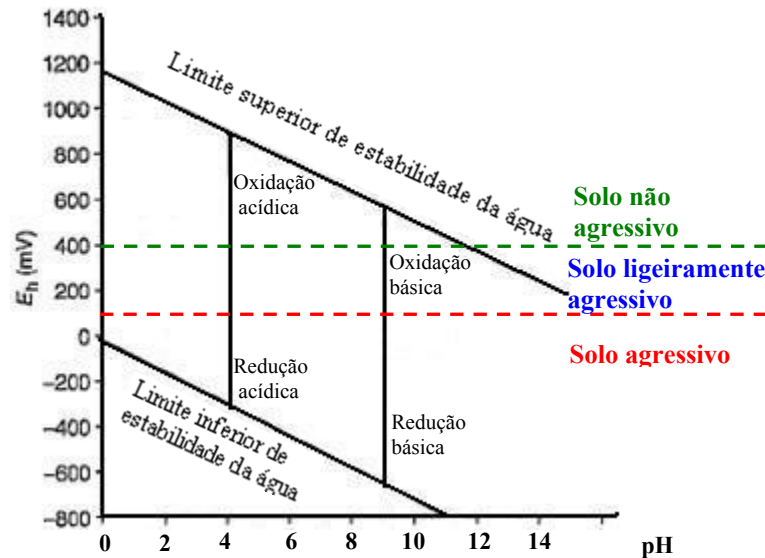
$$pe^- = \frac{E_h (V)}{0,059} \quad (17)$$

O dióxido de carbono proveniente da atmosfera e os ácidos orgânicos resultantes da decomposição da matéria orgânica são as duas principais fontes de acidez dos solos, estabelecendo-se valores de pH da ordem de 5 ou 6. Valores mais baixos de pH observam-se em meios de sulfato,  $pH = 4$ , tomado como limite inferior de pH em ambientes naturais. O limite superior de pH está associado a rochas carbonatadas e silicatadas, respectivamente,  $pH = 10$  e  $pH = 11$ . No entanto, como nos sistemas há sempre emissão de  $CO_2$  para a atmosfera, aceita-se como limite superior de pH o valor 9. A Fig. 18 mostra a correlação entre o  $E_h$  e o pH.

O oxigénio é o oxidante normalmente encontrado na natureza, uma vez que os mais fortes reagem com a água libertando-o. Assim, o limite superior dos potenciais redox é definido pela reacção:



$$E = 1,23 + \frac{0,059}{2} \log[\text{O}_2]^{1/2} [\text{H}^+]^2 \quad (19)$$



**Figura 18** – Gama de variação usual do  $E_h$  com o pH em solos.

Considerando  $[\text{H}^+] = 1$  e a saturação do meio com o oxigénio, 28 ml/l,  $E = 1,19$  V. O limite inferior do potencial redox está associado à reacção de eléctrodo de hidrogénio,



$$E = -0,059 \text{ pH} - \frac{0,059}{2} \log p_{\text{H}_2} \quad (21)$$

Como a pressão máxima possível de atingir na superfície ambiental é a atmosférica, a equação (21) toma a forma,

$$E = -0,059 \text{ pH} \quad (22)$$

A Tabela 2 dá uma ideia dos potenciais redox em função das características do solo, e consequentemente da sua agressividade.

**Tabela 2** – Potenciais redox de solos em várias condições de arejamento [23].

Anaeróbico					Aeróbico	Condição do estrato		
Altamente reduzido	Reduzido	Moderadamente reduzido			Oxidado	Redox		
CO <sub>2</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Fe <sup>3+</sup>	Mn <sup>4+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	O <sub>2</sub>	Receptor de electrões		
Anaeróbico		Indiferente			Aeróbico	Metabolismo microbiológico		
-300	-200	-100	0	+100	+200	+300	+400	+700 mV

#### 4.3.1. Corrosão nos eléctrodos de terra

A escolha usual do cobre como material de terra deriva muito naturalmente das suas extraordinárias propriedades condutoras ( $\rho = 1.72 \times 10^{-8} \, \Omega \cdot m$ ), somente ligeiramente superadas pela prata ( $1.59 \times 10^{-8} \, \Omega \cdot m$ ), aliadas ao seu relativo comportamento nobre ( $E^0 = +0,34 \, V$ ) face à agressividade do meio ambiente. Contudo, o seu custo levou à estratégia de o substituir pelo aço ( $1,18 \times 10^{-7} \, \Omega \cdot m$ ), mais barato apesar de ter uma condutibilidade cerca de sete vezes e meia menor. De acordo com a série galvânica (anexo 2) o aço macio é muito mais activo ( $E = -0,70 \, V$  vs SCE) que o cobre ( $E = -0,32 \, V$  vs SCE), o que colocou o problema da sua corrosibilidade, ou seja, um tempo de vida mais curto quando inserido no solo. Este aspecto foi pensado ultrapassá-lo revestindo-o com uma espessura adequada de cobre, 250  $\mu m$ , face à sua condição de utilização (possibilidade de atravessar solos de diferente agressividade).

O ideal seria que estes materiais mantivessem as características físico-químicas, ao longo do tempo, de modo a que o valor óhmico das terras fosse praticamente o mesmo da fase da construção. Contudo, as medições efectuadas mostram o contrário, ou seja, um aumento da resistividade. Este efeito é atribuído à degradação do material, devido a fenómenos de corrosão induzidos electricamente, que dão lugar à deposição na sua superfície de produtos menos condutores, óxidos, sulfatos, cloretos, etc.

Aparentemente para os dois tipos de eléctrodo de terra está-se na presença de um sistema em que a corrosão do cobre se processa por células de acção local desenvolvidas no solo. As zonas mais arejadas ou de menor temperatura serão as

catódicas. No entanto, o eléctrodo de terra de aço ao longo do tempo pode também vir a sofrer corrosão do tipo galvânico devido aos seguintes factores:

- o revestimento de cobre não ser uniforme e portanto haver zonas que desnudam mais rapidamente.
- a existência de porosidade no revestimento que impõe de imediato essa presença.
- a corrosão é localizada, como tal a velocidade de corrosão é diferenciada, e daí haverem zonas que ficam mais cedo sem o revestimento de cobre.

Quando se processa uma descarga atmosférica ( $T \sim 30.000^{\circ}\text{C}$  em milésimos de segundo), transporte das cargas negativas para a terra (pólo positivo), os eléctrodos de terra podem atingir temperaturas superiores a  $100^{\circ}\text{C}$ . Nesta circunstância ter-se-á também uma corrosão por mecanismo de corrosão seca que contribuirá significativamente para a alteração do valor óhmico da terra, em virtude de alterações estruturais intrínsecas e superficiais dos respectivos materiais.

As características do solo são pois um factor importante na velocidade de corrosão das estruturas metálicas nele inseridas. Estas poderão encontrar-se num dos seguintes estados:

- Imune, não sofre corrosão.
- Activo, sofre corrosão.
- Passivo, sofre corrosão controlada.

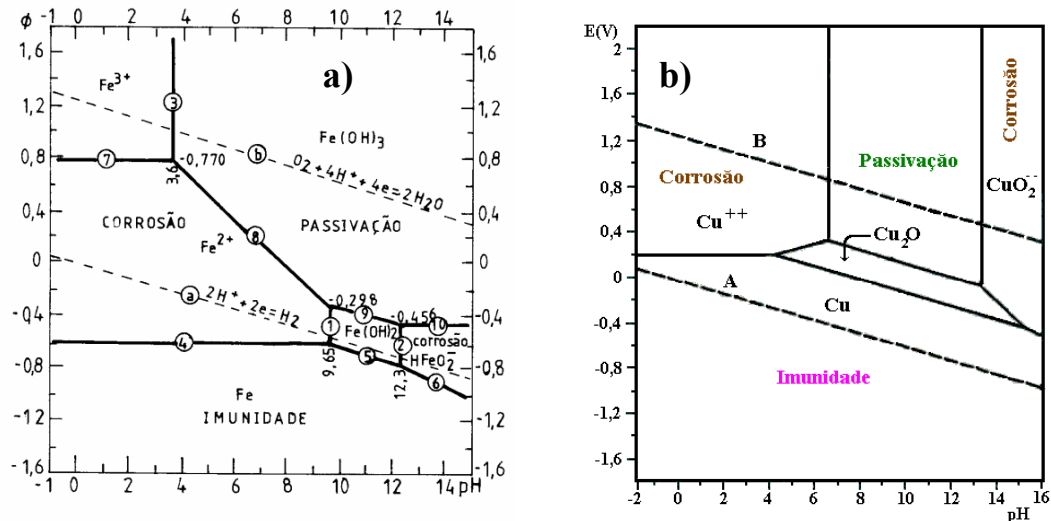
O recurso aos diagramas de Pourbaix permite interpretar o estado em que se encontram os eléctrodos de terra quando imersos num solo corrosivo.

É óbvio que os solos poderão conter outros elementos, por exemplo cloretos e enxofre, e portanto os gráficos de E-pH terão de contemplar a interacção da superfície metálica do ferro ou cobre com esses elementos.

O objectivo deste trabalho é o de analisar o comportamento dos tipos de eléctrodos de terra correntemente utilizados em estruturas de transporte de energia. Face ao exposto, utilizar-se-ão os seguintes métodos:

- medição do potencial em relação a uma referência.
- medição da corrente em relação a uma referência.
- medição da variação de massa do provete ao longo do tempo.

Com base nos valores obtidos e tomando em consideração os diagramas de Pourbaix da Fig. 19, numa análise mais simplista poder-se-á aferir do estado em que os mesmos se encontrem face às características dos solos tomados para estudo.

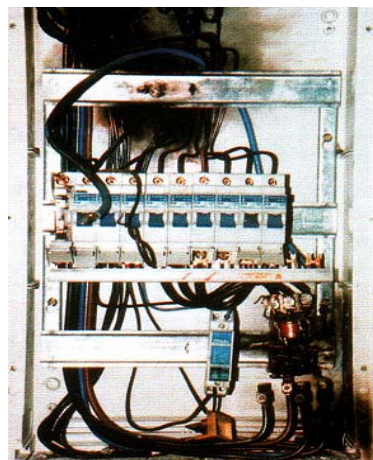


**Figura 19** – Diagramas de potencial – pH em água a 25°C: a) Ferro; b) Cobre.

#### 4.3.2. Prejuízos causados pela corrosão nas terras de protecção

Quando existe uma sobretensão ou uma descarga atmosférica [24,25], a não existência de uma terra de protecção eficaz, isto é, ausência dos valores ohmicos definidos na legislação, pode ocorrer a destruição de diversos equipamentos que a elas estejam ligados, Fig. 20, e mesmo originar incêndio em certas situações. Os montantes destes prejuízos não estão na maioria dos casos contabilizados, mas serão concerteza muito elevados, para não dizer imensuráveis quando se trata da própria vida humana.

**Figura 20** – Efeitos de uma descarga num quadro eléctrico



No anexo 3 mostra-se como se dimensiona um equipamento de protecção para quadros eléctricos.

## 5. Parte experimental

### 5.1. Tipos de solo

Os solos utilizados no estudo à corrosão dos eléctrodos de terra foram os seguintes:

- Central da Granja, próximo do mar. Trata-se de uma areia com pouca capacidade para reter a humidade. O potencial redox observado em condições de cerca de 15% de humidade relativa (HR) é de -0,376 V vs NHE, descendo o valor para -0,395 V vs NHE para HR 25%.
- Central da Serra de Arouca. É um solo contendo granulado proveniente de rocha com capacidade para reter a humidade, e situa-se no cimo de uma serra muito próximo da senhora da Mó. O potencial redox observado em condições de cerca de 15% de humidade relativa (HR) é de -0,272 V vs NHE, descendo o valor para -0,358 V vs NHE para HR 25%.
- Central de S. Pedro da Cova, Valongo. É uma terra preta misturada com rocha resultante de ardósia, situa-se muito próximo das minas de ardósia de Valongo, e tem capacidade de retenção de humidade. O potencial redox observado em condições de cerca de 15% de humidade relativa (HR) é de -0,484 V vs NHE, descendo o valor para -0,620 V vs NHE para HR 25%.
- Central da Lavra, É uma terra agrícola, fica próximo de Vila do Conde, e tem uma grande capacidade de retenção da humidade durante bastante tempo. O potencial redox observado em condições de cerca de 15% de humidade relativa (HR) é de -0,432 V vs NHE, descendo o valor para -0,613 V vs NHE para HR 25%.

Com base nos valores dos potenciais redox a agressividade relativa dos solos seria a seguinte:  $S_{\text{Valongo}} > S_{\text{Lavra}} > S_{\text{Granja}} > S_{\text{Arouca}}$ .

## 5.2. Procedimento experimental

Nos ensaios (1 a 8) realizados sobre os eléctrodos de terra de aço cobreado e de cobre a sequência operatória foi a seguinte:

- 1º Corte dos eléctrodos-provetes e grafite com dimensões compatíveis com as do recipiente onde se colocou o solo.
- 2º Determinação da área dos provetes.
- 3º Colocação do solo teste num vaso perfurado.
- 4º Colocação do provete no solo a uma distância de 3 cm de um eléctrodo de grafite tomado para referência dos potenciais.
- 5º Determinação do potencial do provete relativamente à referência, corrente que passa na célula e respectiva resistência, em vários instantes no decurso do ensaio.
- 6º Para se efectuar medidas da tensão e da corrente utilizou-se dois multímetros DT Ranger 64, um a funcionar como voltímetro e outro a funcionar como amperímetro.
- 7º Introdução periódica de água da torneira, água acidificada a pH = 4,5 com ácido clorídrico, ou água da chuva.
- 8º Determinação final das dimensões e peso dos provetes.

Nos ensaios (9 a 12) realizados sobre o eléctrodo de terra de cobre com protecção catódica por ânodo de zinco a sequência operatória foi a seguinte:

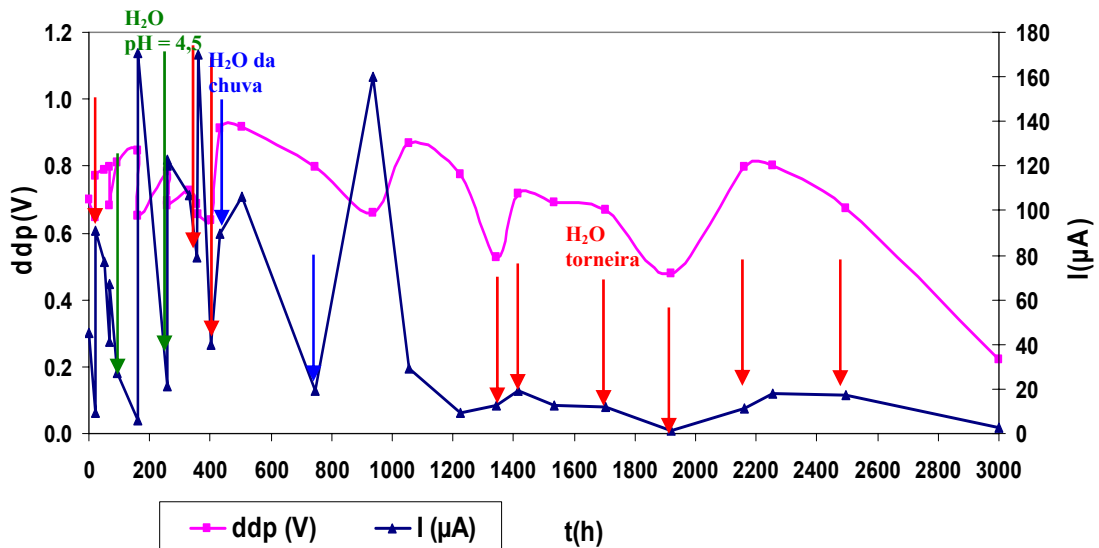
- 1º Corte do eléctrodo-provete, da grafite e do zinco com as dimensões compatíveis com as do recipiente onde se colocou o solo.
- 2º Determinação da área e peso dos provetes e da placa de zinco.
- 3º Colocação do solo teste num vaso perfurado.
- 4º Colocação do provete no solo a uma distância de 2 cm de um eléctrodo de grafite tomado para referência dos potenciais, e o eléctrodo de zinco foi colocado a 5 cm do da grafite.
- 5º Determinação da tensão e da corrente entre o provete e o ânodo de sacrifício de zinco, em vários instantes no decurso do ensaio.
- 6º Determinação do potencial do provete e do zinco relativamente à referência, corrente que passa na célula e respectiva resistência, em vários instantes no decurso do ensaio.

- 7º Introdução periódica de água da torneira, água acidificada a pH = 4,5 com ácido clorídrico, ou água da chuva.
- 8º Determinação no final das dimensões e peso dos provetes e do ânodo de sacrifício.

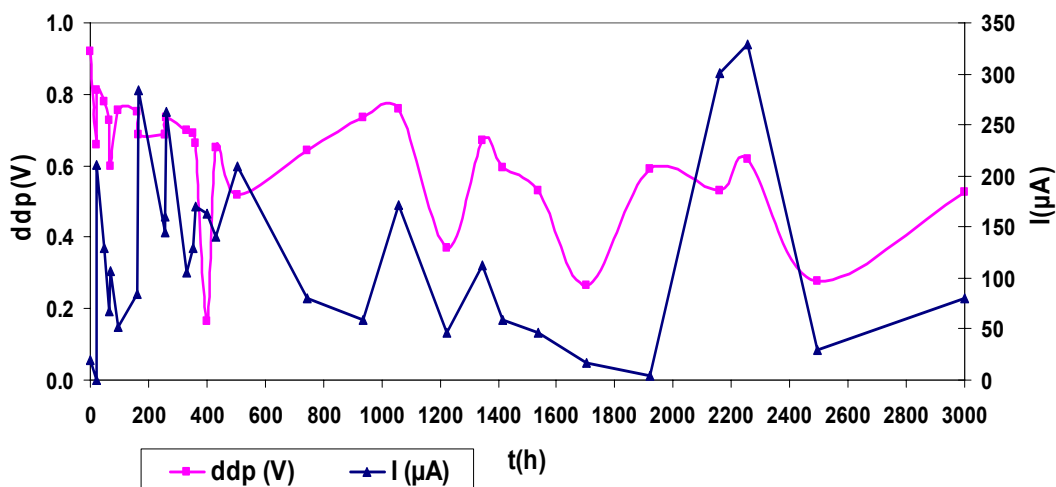
O eléctrodo utilizado como referência, a grafite, foi previamente caracterizado relativamente ao eléctrodo de cobre sulfato de cobre para cada um dos solos. O valor do potencial da grafite em relação ao NHE para o solo de Valongo, Granja, Lavra e Arouca foi, respectivamente, 0,744 V, 0,550 V, 0,355 V e 0,259 V.

### 5.3. Resultados experimentais

#### 5.3.1. Observação do potencial e corrente dos provetes de ensaio face à referência do eléctrodo de grafite



**Figura 21** – Eléctrodo de terra de aço revestido com Cu – Central da Granja.



**Figura 22** – Eléctrodo de terra de Cu – Central da Granja.



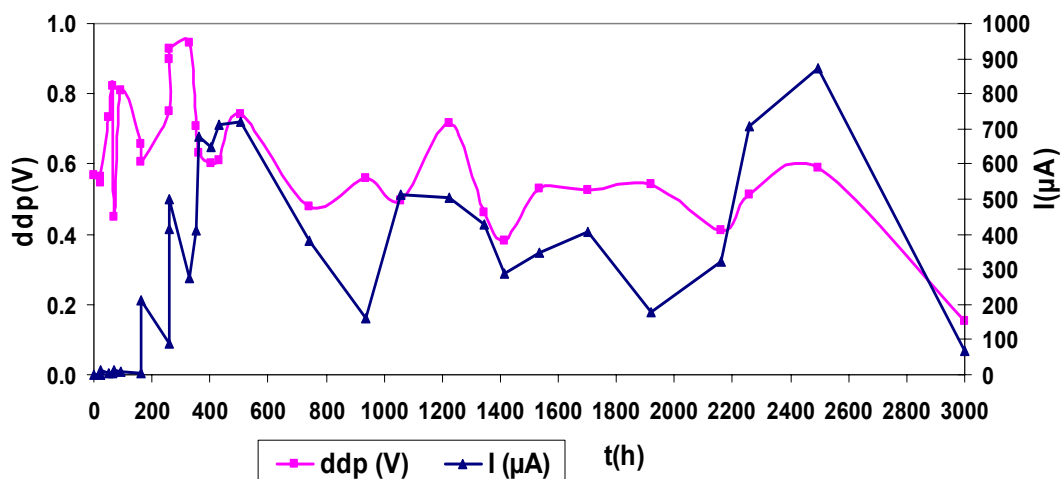


Figura 23 – Eléctrodo de terra de aço revestido com Cu – Central de Arouca

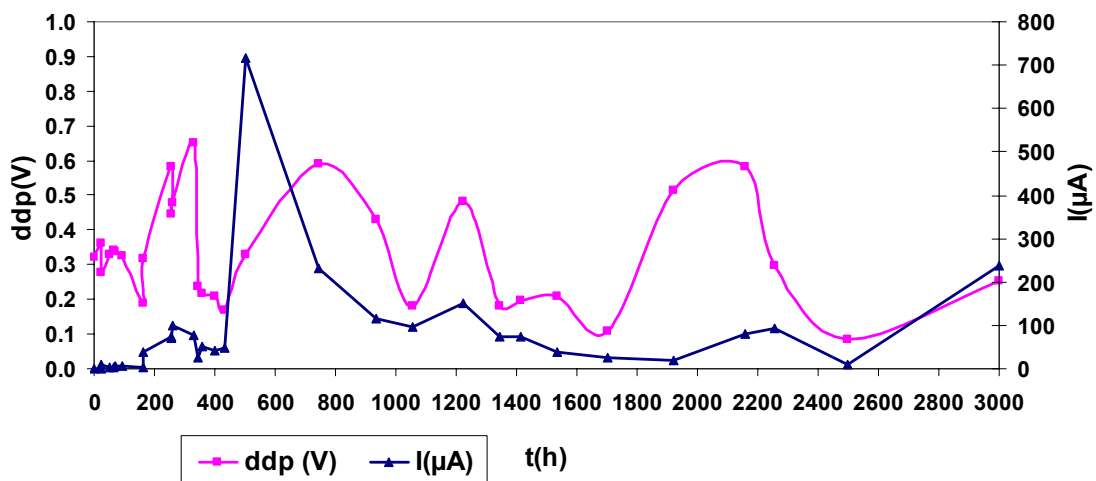


Figura 24 – Eléctrodo de terra de Cu – Central de Arouca.

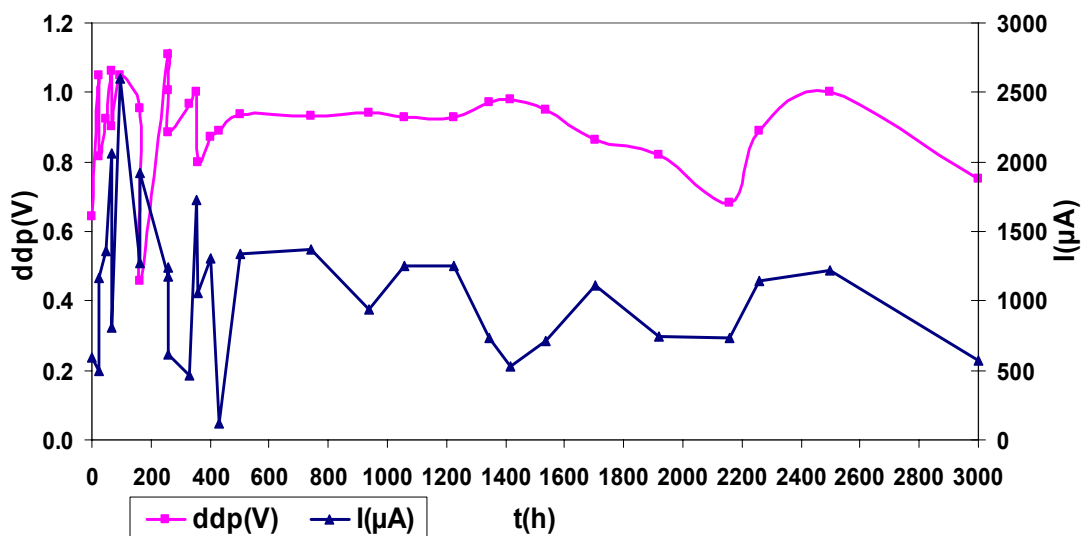


Figura 25 – Eléctrodo de terra de aço revestido com Cu – Central de Valongo.

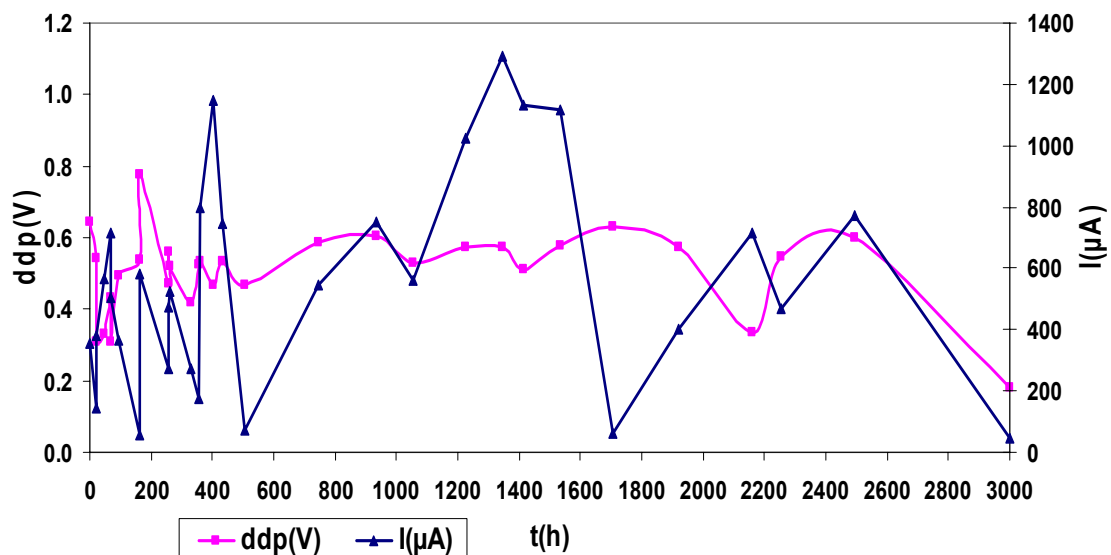


Figura 26 – Eléctrodo de terra de Cu – Central de Valongo.

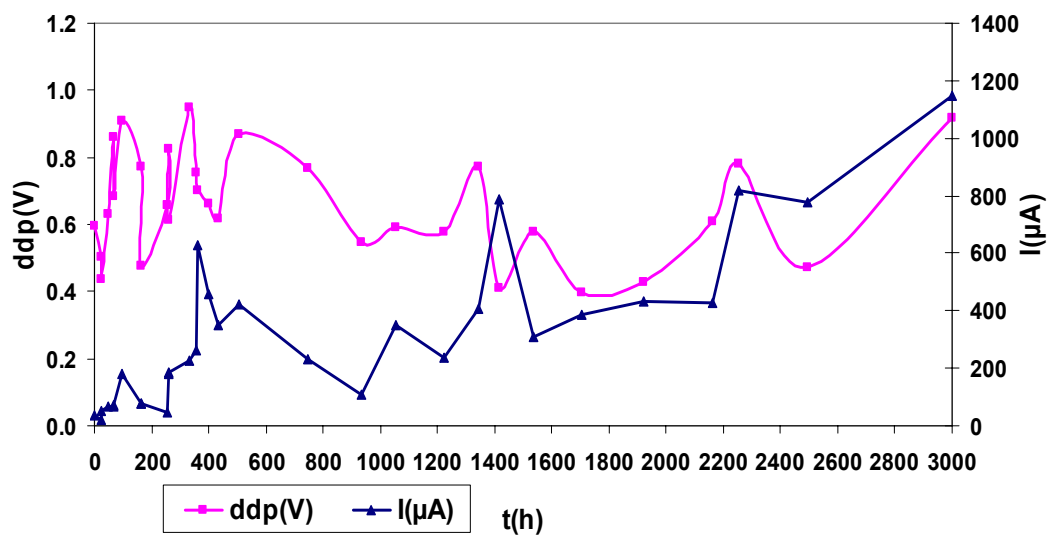


Figura 27 – Eléctrodo de terra de aço revestido com Cu – Central da Lavra.

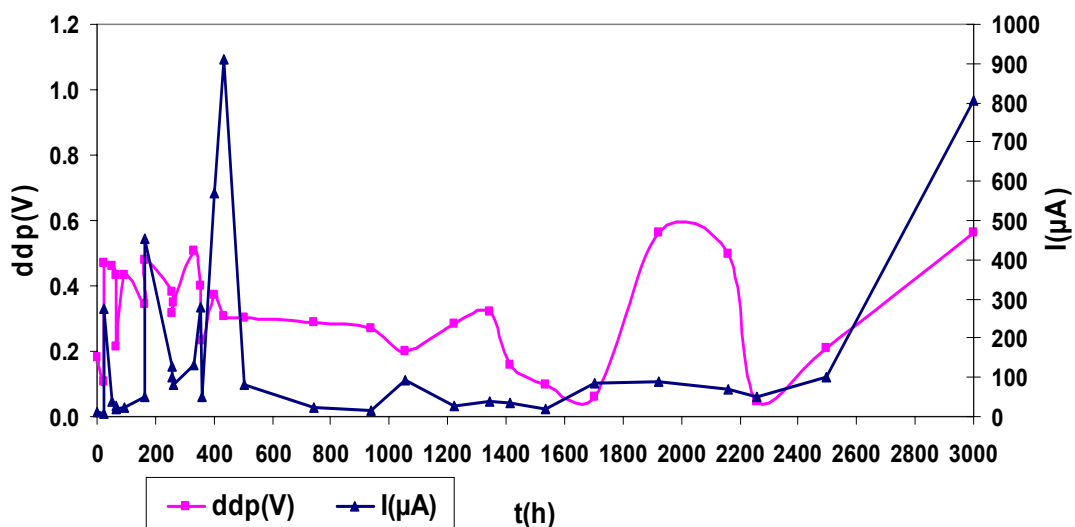
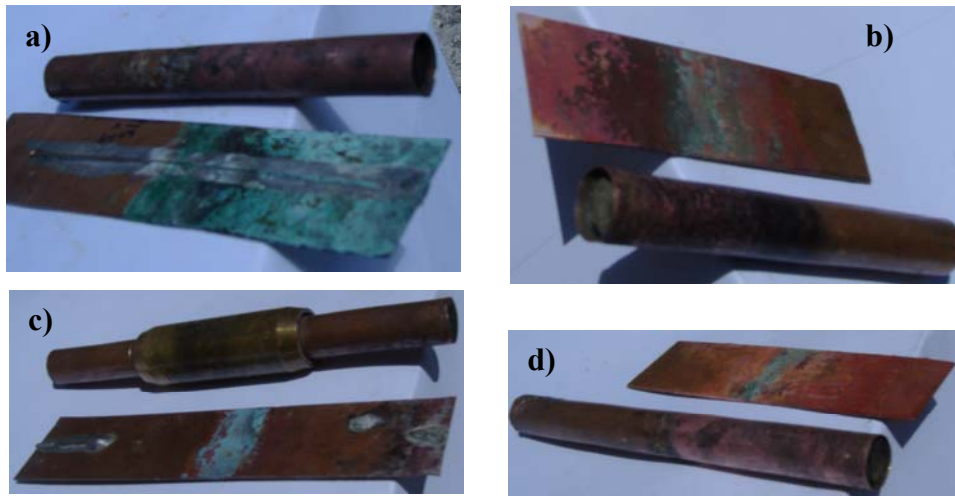


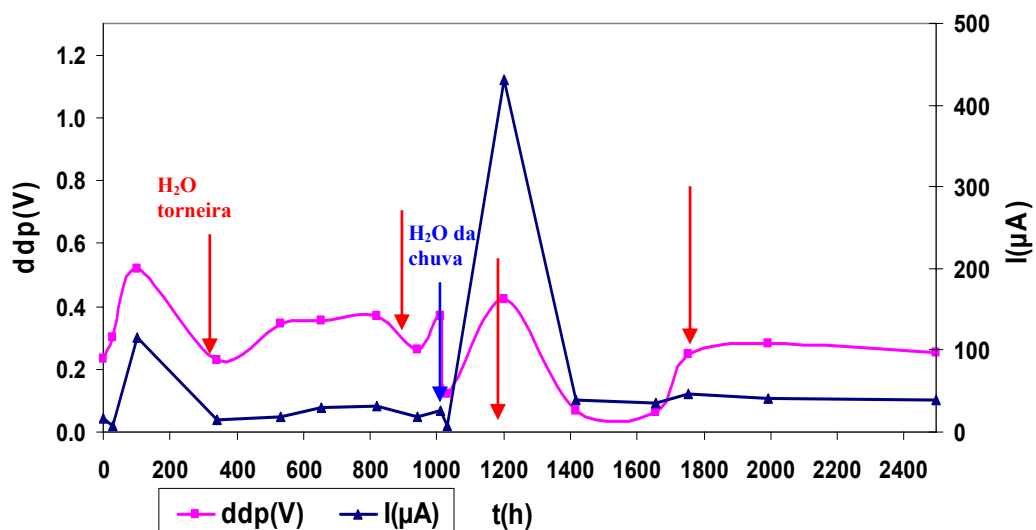
Figura 28 – Eléctrodo de terra de Cu – Central da Lavra.

A Fig. 29 mostra o estado dos eléctrodos de terra de aço e cobre no final dos ensaios.



**Figura 29** – Estado dos eléctrodos no final dos ensaios: a) Valongo; b) Arouca; c) Granja; d) Lavra.

5.3.2. Protecção catódica do eléctrodo de Cu pelo Zn: força electromotriz, corrente e potencial do Cu face à grafite no acoplamento galvânico; potencial do Cu e Zn face à grafite.



**Figura 30** – Eléctrodo de terra de Cu após corte da protecção catódica – Central de Arouca.

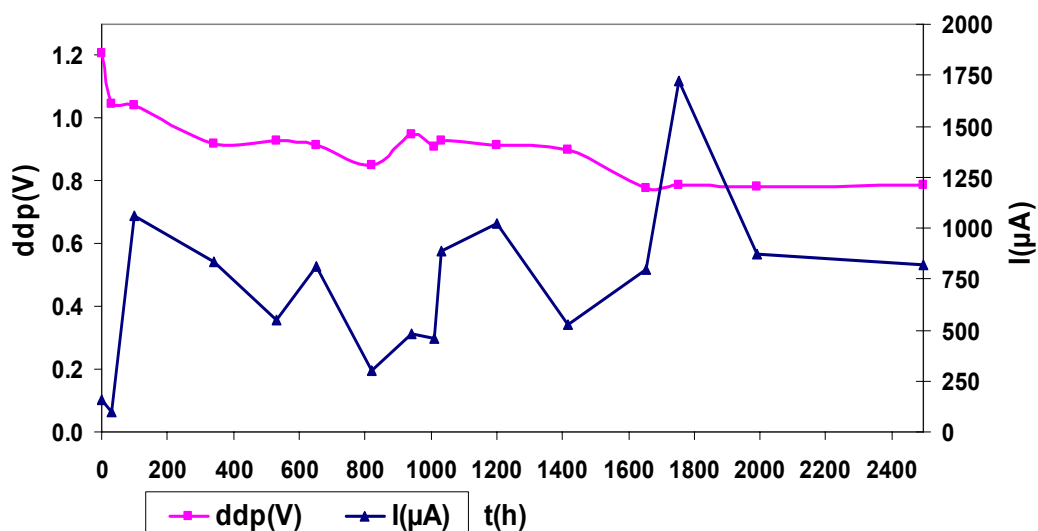


Figura 31 – Eléctrodo de Zn após corte da protecção catódica – Central de Arouca.

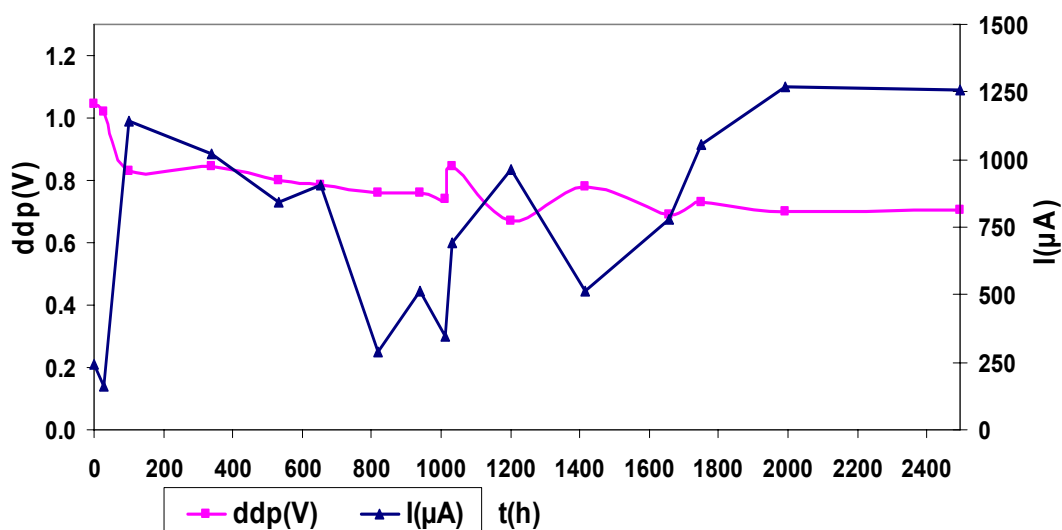


Figura 32 – Acoplamento galvânico Zn-Cu: força electromotriz e corrente – Central de Arouca.

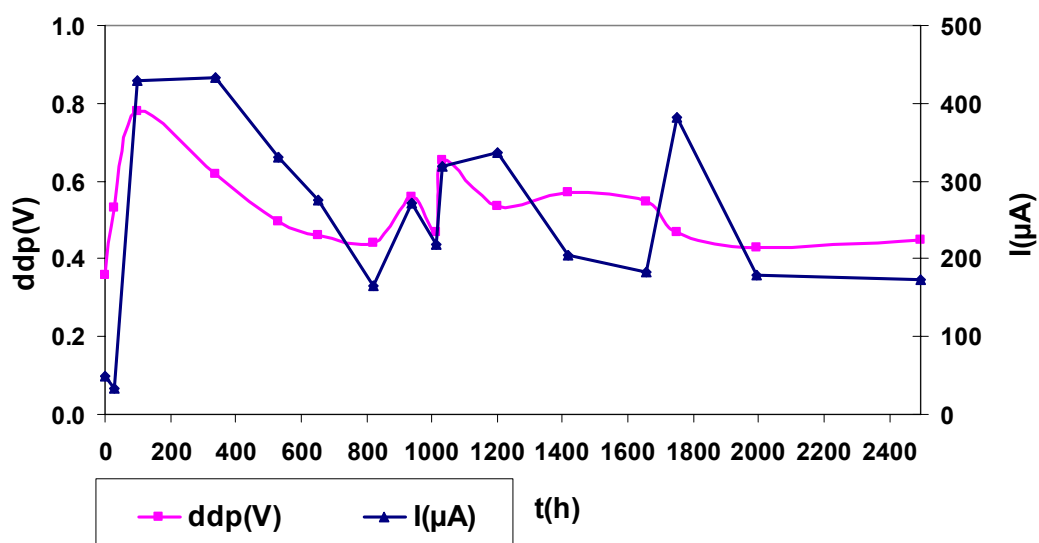
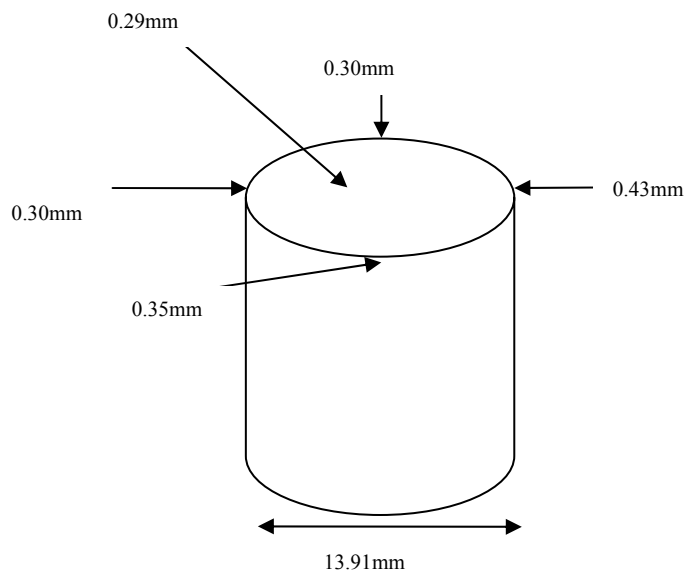


Figura 33 – Eléctrodo de terra de Cu com protecção catódica – Central de Arouca.

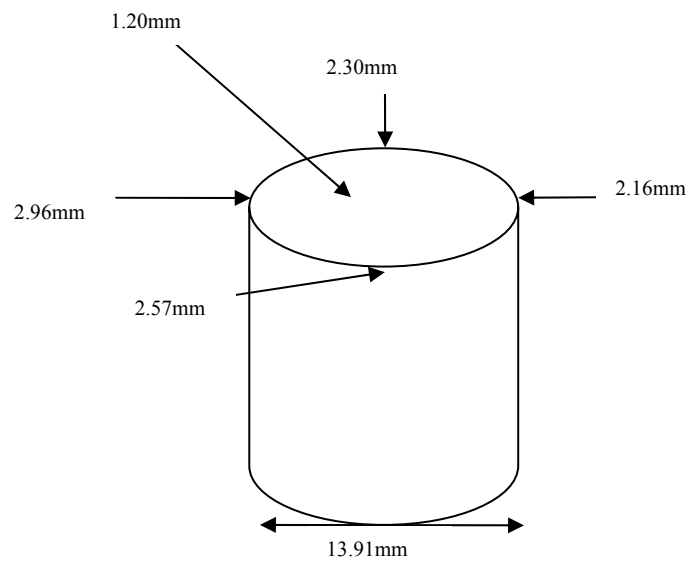
No início do ensaio os eléctrodos de cobre e zinco pesavam, respectivamente, 57,7975 g e 31,4151 g, e no final 57,8400 g e 24,5230 g. No que se refere ao zinco houve uma perda de massa de 6,8921 g, enquanto que relativamente ao cobre se pode dizer que não sofreu corrosão. O ligeiro acréscimo de peso verificado, 0,0425 g, no eléctrodo de cobre fica dever-se a um ténue filme de “óxido” proveniente da sua corrosão, sempre que se procedeu a leituras de potencial com a abertura do acoplamento galvânico.

### 5.3.3. Observação da corrosão do ferro do eléctrodo de terra de aço na parte de corte

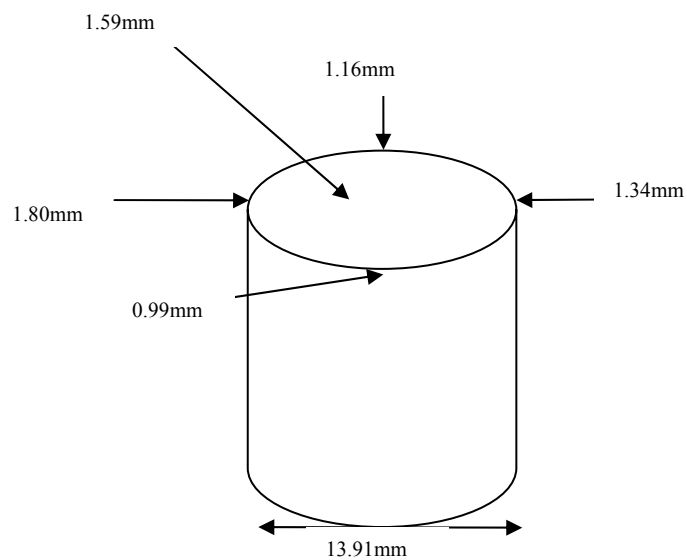
Uma vez que os eléctrodos de terra de aço recobertos com cobre tiveram de ser cortados, o ferro na ponta ficou à vista e, como tal, no final dos ensaios procedeu-se à observação da sua corrosão. As figuras que se seguem sumarizam a penetração observada no ferro no plano transversal e longitudinal.



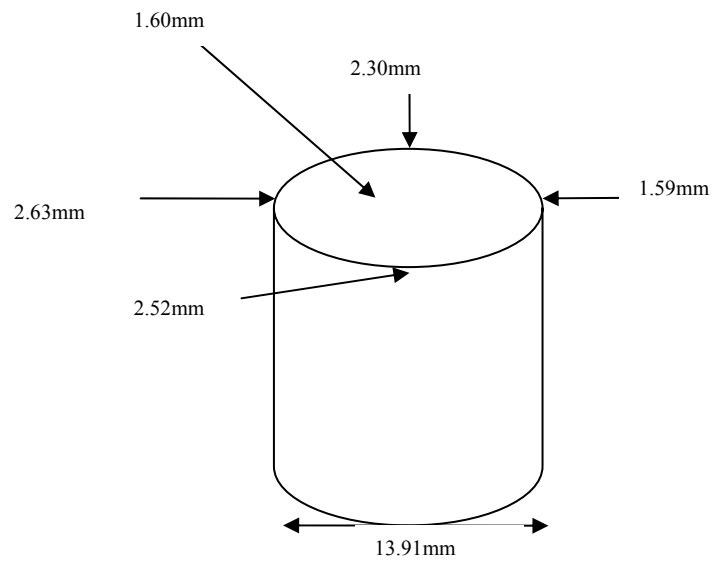
**Figura 34** - Eléctrodo de terra de aço: penetração do ferro - Central de Arouca.



**Figura 35** - Eléctrodo de terra de aço: penetração do ferro - Central de Valongo.



**Figura 36** - Eléctrodo de terra de aço: penetração do ferro - Central da Granja.



**Figura 37** - Eléctrodo de terra de aço: penetração do ferro - Central de Lavra.

A Fig. 38 mostra o estado de degradação do ferro observado nos provetes dos eléctrodos de terra de aço.



**Figura 38** - Eléctrodo de terra de aço após ensaio: penetração do ferro.

#### 5.3.4. Determinação da corrosão do cobre

Em provetes de 2 x 4 cm<sup>2</sup> determinou-se a velocidade de corrosão nos diferentes tipos de solo, a partir da diferença de peso das amostras entre o instante inicial e final, tabela 3.

**Tabela 3** – Velocidade de corrosão do Cu nos vários solos.

Solo	Corrosão/ $\mu\text{m ano}^{-1}$	Solo	Corrosão/ $\mu\text{m ano}^{-1}$
Valongo	8,75	Granja	3,15
Lavra	6,75	Arouca	1,85

#### 5.4. Discussão dos resultados

As adições de electrólito em determinadas alturas dos ensaios visaram aumentar a condutividade do meio, e de acordo com a sua composição simular eventuais situações correntes. O teor de humidade oscilou entre o praticamente seco e o valor de 30%, determinado por toma, secagem e pesagem de solo removido na altura da adição do electrólito.

Os valores de potencial do cobre (Figs. 21,23,25 e 27) observados para o eléctrodo de aço mostram, independentemente do solo onde inserido, que o mesmo se encontra na zona imune do diagrama de Pourbaix, Fig. 19 b), ou seja não sofre corrosão. Esta dedução obtém-se a partir da conversão do potencial observado face à referência, e tomando em consideração o potencial desta no solo face à escala de referência do hidrogénio.

$$\Delta\phi = E_{\text{Cu}} - E_{\text{grafite}} \quad (23)$$

$$E_{\text{Cu}} = \Delta\phi + E_{\text{grafite}} \quad (24)$$

Efectivamente, atendendo ao corte efectuado no eléctrodo de aço passou a ter-se um acoplamento galvânico Fe/Cu, onde o ferro protege catodicamente o cobre. Daí o desgaste observado no ferro traduzido em termos de penetração. De acordo com as Figs 34 a 37, a corrosão relativa do ferro face aos diferentes solos é a seguinte: Valongo > Lavra > Granja > Arouca. Estes valores indicam que a corrente para proteger o Cu segue a agressividade dos meios prevista através dos potenciais redox.



No caso do eléctrodo de terra de cobre, os valores dos potenciais monitorizados, a menos de algumas singularidades, bem como a corrente relativa á referência grafite mostram a mesma agressividade relativa dos solos observados para o ferro. Aliás, os dados de corrosão da tabela 3 corroboram tal afirmação:  $8,75 \mu\text{m ano}^{-1}$  (Valongo) >  $6,75 \mu\text{m ano}^{-1}$  (Lavra) >  $3,15 \mu\text{m ano}^{-1}$  (Granja) >  $1,85 \mu\text{m ano}^{-1}$  (Arouca).

As Figuras 30 à 33 resumizam os resultados do estudo da protecção catódica que se procurou impor ao eléctrodo de terra de cobre através do seu acoplamento galvânico com o zinco. Atendendo à corrente debitada na célula, Fig. 32, verifica-se que a perda de peso sofrida pelo zinco é superior à necessária para a protecção da área do eléctrodo de cobre,  $31,44 \text{ cm}^2$ . Tal fica a dever-se à corrosão do zinco devido a células de acção local. No caso do solo de Arouca a eficiência do zinco como ânodo de sacrifício foi de 40%, com uma densidade de corrente de protecção média de  $2,23 \times 10^{-2} \text{ mA cm}^{-2}$ .

## 6. Conclusões

As observações experimentais realizadas permitem tirar as seguintes conclusões:

1 – A utilização de eléctrodos de terra revestidos a cobre são uma boa solução para minimizar custos, face ao comportamento relativamente nobre manifestado pelo cobre quando imerso nos solos.

2 – A espessura de 250  $\mu\text{m}$  de Cu, face à velocidade de corrosão média observada nos vários solos estudados, parece-nos adequada para um tempo de vida médio superior a 25 anos.

3 – Há que evitar acoplamentos galvânicos entre o Cu e o Fe nos eléctrodos de aço, pois tal ocasionará uma corrosão do Fe que poderá levar a fracturas, o que reduzirá drasticamente a capacidade de descarga do eléctrodo.

4 – O zinco pode ser utilizado como ânodo de sacrifício de eléctrodos de cobre, devendo-se no dimensionamento considerar uma eficiência para o zinco da ordem dos 40%. O valor da densidade de corrente observado para proteger o cobre no solo de Arouca,  $2,23 \times 10^{-2} \text{ mA cm}^{-2}$ , enquadra-se na gama de valores preconizada por Uhlig [19],  $10^{-3} \text{ mA cm}^{-2}$  a  $5 \times 10^{-2} \text{ mA cm}^{-2}$ . Atendendo à resistividade efectiva do solo na vizinhança do ânodo de sacrifício, dever-se-á rodeá-lo de uma camada de material condutor, por exemplo uma mistura de 20% bentonite + 75% gesso + 5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

5 – A agressividade relativa dos solos é a seguinte: Valongo > Lavra > Granja > Arouca.

6 – A monitorização do potencial das estruturas poderá ser utilizada para saber o regime em que se encontra o cobre: estado passivo, estado activo ou estado imune.

7 – Os eléctrodos de terra de aço não devem ser inseridos no terreno à marretada. Este procedimento pode originar fissuras e portanto o estabelecimento de um acoplamento galvânico Fe/Cu, o qual mais tarde pode originar uma fractura do eléctrodo e consequentemente perda da capacidade de descarga. Assim, propõe-se a abertura de valas com a profundidade adequada à implantação do eléctrodo.

8 – Os eléctrodos de terra devem ter uma boa acessibilidade para permitir o seu controle e substituição quando necessário.

### **Considerações finais**

Este trabalho desenvolveu-se no contexto de um aluno trabalhador, e como tal teve de conciliar as necessidades laborais com as de natureza académica. Daí que, no final do mesmo tenhamos a consciência de que o mesmo apresenta lacunas, as quais no entanto poderão ser colmatadas por quem pretender abordar este assunto.

Assim, modestamente, sugerimos na continuação deste estudo o seguinte trabalho:

- 1) Análise da composição dos solos.
- 2) Determinação da resistividade dos solos em função do teor de humidade, arejamento e acidez.
- 3) Para as condições em 2) determinar o potencial redox, a velocidade de corrosão e os produtos de corrosão por difracção de raios X.
- 4) Estudar o comportamento do cobre através de curvas de polarização em soluções provenientes de lavagem dos solos em questão de acordo com os parâmetros definidos em 2).

## **Referências Bibliográficas**

- 1) **Rogério Santos**, Edições Colibri, Setembro de 1999. “Olhos de Boneca”, Uma história das Comunicações 1880
- 2) **Museu das telecomunicações**, Edição Fundação Portuguesa das Comunicações, Ano 2005, Cinco séculos de Telecomunicações em Portugal
- 3) **Miguel Ferreira de Faria**, Edição Companhia Portuguesa Rádio Marconi, Outubro de 2000, 75 Anos de Comunicações Internacionais
- 4) **Rogério Santos, Edição** Telefones de Lisboa e do Porto, Ano 1992, História das Comunicações em Portugal 1877-1990
- 5) **Correios e telecomunicações de Portugal**, Edição Direcção de MarKintg e Património Cultural do Conselho de Administração dos CTT e TLP, Novembro de 1987
- 6) **Património Postal e Telecomunicações da Fundação Portuguesa das Comunicações**, Edição Estar Editora Lda, “100 Anos de telefone 1876 – 1976”
- 7) **Mountjoy, Richard**, 1995, 100 Years of Bell Telephones
- 8) **Christopher. Robertson** Second Edition, 2001, Fundamental Electrical & Electronic Principles
- 9) **L. M. Vilela Pinto** Segunda edição, 2003, Técnicas e tecnologias em Instalações eléctricas, “Associação certificadora de instalações eléctricas”
- 10) **Qenergia**, Seminários técnicos da Qenergia, Maio de 2005, Sistemas de protecção contra descargas atmosféricas – Segurança das instalações
- 11) **Qenergia**, Catalogo de pára-raios e acessórios, Maio 2004, protecção contra descargas atmosféricas directas

- 12) **LEM Instruments, Inc.**, Warning ! copyright c 1998, Ground Resistance Principles, Testing, Technique & Applications
- 13). **OBO Bettermann**, Catalogo, TBS – Sistema de terras e protecção de raios
- 14) (**NORMA PORTUGUESA NP 4426**, CEI 1024-1:1995, Protecção de estruturas e de zonas abertas mediante pára-raios com dispositivo ionizante não radioactivo
- 15) **NORMA PORTUGUESA NP 4426**, Emenda 1 2009, Protecção de estruturas e de zonas abertas mediante pára-raios com dispositivo ionizante não radioactivo
- 16) **QEnergia**, Catálogo Ioniflash, 2010-02, Sistema de protecção contra descargas atmosféricas, Sistema de terras, Grupo Infocontrol.
- 17) **A Portaria nº 949-A/2006 de 11 de Setembro**, juntamente com o Decreto – Lei nº 226/2005, de 28 de Dezembro, define as regras técnicas das instalações eléctricas de baixa tensão.
- 18) **CADWELD PLUS**, Copyright c 2004 Erico International, 2005 Plus Brochure LT0639, Leading Technologies In Exothermic Welding.
- 19) **Herbert H. Uhlig**, Corrosion and Corrosion Control, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1963.
- 20) **Curso JTI Materiais**, Departamento de Engenharia Química, 1999  
Módulos:  
**I - Introdução à Corrosão**, (pp. 1-15), J. Inácio Martins  
**II - Formas de Corrosão**, (pp. 16-41), J. Inácio Martins  
**III - Meios Corrosivos**, (pp. 50-109), J. Inácio Martins
- 21) "*A Corrosão e Protecção dos Metais: Parte I- Princípios Gerais e Tipos de Corrosão*", (**Corros. Prot. Mater.**, **23**, n.º2, 25-27, (2004) (J. Inácio Martins).

22) *"A Corrosão e Protecção dos Metais: Parte 2 - A Termodinâmica da Corrosão"*, (Corros. Prot. Mater., 23, n.º4, 23-26, (2004) (J. Inácio Martins).

23) **RD Delaune, KR Reddy**, Redox potential, in: Encyclopedia of Soils in the Environment, volume 4, pp 366-370, edited by Daniell Hillel, Elsevier, 2005.

24) **OBO Bettermann**, TBS-DST GESC20070514, TBS(Sistema de protecção contra sobretensões), Disruptor ou explosor de equipotencial

25) **ERICO, Inc**, July 7, 2003, Prepared by Chris Rempe, Grounding Products Manager, North and South America. Protecção contra sobretensões para aplicação em quadros eléctricos

26) **Professor Alberto Sérgio Miguel**, editora, 2005, Manual de Higiene e Segurança do trabalho.

27) **Josué Lima Morais e José Martinho Gomes Pereira**, Edição 2006, Guia Técnico das Instalações Eléctricas

#### **Tese**

28) **Cristiano Jose Mira Godinho Pires Ferreira e Idália Nogueira Fernandes**, tese de Mestrado 2000/2001, Protecção de edifícios e estruturas contra descargas atmosféricas

#### **Legislação aplicável**

Decreto-Lei n.º 740/74, Aprova os Regulamentos de Segurança de Instalações de Utilização de Energia Eléctrica e de Instalações Colectivas de Edifícios e Entradas.

Decreto-Lei 411/91 de 14 de Novembro de 1991, Lei-quadro das condições de segurança e higiene saúde no local de trabalho.

Decreto-Lei n.º 348/93 de 1 de Outubro, Estabelece o regime jurídico do enquadramento da segurança, higiene e saúde no trabalho.

Decreto-Lei n.º 50/2005 de 25 de Fevereiro, Regula as prescrições mínimas de segurança e saúde dos trabalhadores.

Decreto-Lei n.º 488/99 de 17 de Novembro, Acolhe no ordenamento jurídico nacional.

Decreto-Lei 128/93 de 22 de Abril, Transpõe para a ordem jurídica interna a directiva Concelho nº89/686 CEE de 21 de Dezembro relativa aos equipamentos de protecção individual EPI.

Portaria n.º 1063/97 de 21 de Outubro, Medidas de segurança contra riscos de incêndio aplicáveis na construção, instalações e fornecimento dos fornecimentos turísticos.

Portaria n.º 213/91 de 14 de Março de 1991, Procede à actualização do registo dos estabelecimentos industriais.

Decreto-Lei 204/93 de 3 de Junho, Estabelece as normas relativas à prevenção dos riscos de acidentes graves que possam ser causados por actividades industriais.

Decreto-Lei n.º 36/2003 de 3 de Maio de 2003, Aprova o novo código de propriedade industrial.

Portaria 53/71 de 3 de Fevereiro de 1971, Aprova o regulamento geral de segurança e higiene do trabalho nos estabelecimentos industriais.

Decreto-Lei 491/85 de 26 de Novembro, Estabelece disposições relativas às contra-ordena no âmbito do direito laboral e da disciplina jurídica sobre higiene e segurança, medicina no trabalho.

Decreto-Lei n.º 141/95, Estabelece as prescrições mínimas para a sinalização de segurança e de saúde no trabalho.

Portaria n.º 1131/93 de 4 de Novembro, Regulamentação técnica relativa aos equipamentos de protecção individual.

Decreto-Lei 128/93 de 22 de Abril, Os equipamentos de protecção individual são dispositivos ou meios destinados a ser envergados ou manejados com vista a proteger o utilizador contra riscos susceptíveis de construir uma ameaça à saúde ou à sua segurança.

Lei n.º 100/97 de 13 de Setembro, Aprova o novo regime jurídico dos acidentes de trabalho e das doenças profissionais.

Lei n.º 35/2004

Decreto-Lei 441/91 de 14 de Novembro de 1991

Portaria n.º 987/93 de 6 de Outubro

Decreto-Lei nº517/80 de 11 de Junho de 2003, Estabelece normas a observar na elaboração dos projectos das instalações eléctricas de serviço particular.

Decreto-Lei 164/01 de 31 de Agosto de 2001, Aprova o regime jurídico da prevenção e controlo de perigos associados a acidentes graves que envolvam substâncias perigosas.

Portaria n.º 344/ de 13 de Maio

Altera o Decreto nº26852/36, o decreto-lei 446/78 e a Portaria nº401/76

A portaria n.º 401/76 de 6 de Julho define a forma como os processos de licenciamento devem ser instruídos.

Decreto-Lei nº446/76, de 5 de Junho, Actualiza o decreto-lei n.º 26852 de 30 de Julho.

Decreto-Lei n.º 26852/36 de 30 de Julho, Regula o licenciamento de instalações eléctricas

Decreto-Lei n.º 90/84 de 26 de Dezembro, Regulamento de segurança de redes de distribuição BT.

Decreto-Lei n.º 110/91 de 18 de Março, Regulamento de segurança de elevadores.



Decreto-Lei n.º 513/70 de 30 de Outubro, Regulamento de segurança elevadores.

Decreto-Lei n.º 272/92 de 3 de Dezembro, Regulamenta as associações inspectoras de instalações eléctricas (CERIEL).

Decreto-Lei n.º 31/83 de 18 de Abril, Aprova o estatuto de técnico responsável por instalações eléctricas de serviço particular.

Decreto-Lei n.º 187/95 de 27 de Julho com redacção dada pelo decreto-lei n.º 44/97 de 20 de Fevereiro.

Portaria n.º 662/96 de 14 de Novembro (o decreto - lei n.º 272/92 de 3 de Dezembro, estabeleceu um novo regime para a aprovação de projectos, inspecção e certificação das instalações eléctricas).

Portaria n.º 1056/98 de 28 de Dezembro, Estabelece a data de início de funções da CERTIEL.

Portaria n.º 311/2002 de 22 de Março, o decreto-lei n.º 4/93 de 8 de Janeiro que aprovou o regulamento de taxas de instalações eléctricas.

Decreto-Lei n.º 97/2002 de 12 de Abril, Regras de mercado.

Decreto-Lei n.º 69/2002 de 25 de Março, Fornecimento de energia eléctrica.

Decreto - Lei n.º 69/2003 de 10/4/2003, Análise jurídica da legislação.

Decreto-Lei n.º 72/92 de 28 de Março de 1992, Protecção dos trabalhadores contra os riscos devido a exposição ao ruído durante o trabalho.

Decreto-lei n.º 349/93 de 1 de Outubro de 1993, Estabelece as prescrições mínimas de segurança e saúde respeitantes ao trabalho com equipamentos dotados com visor.

Decreto-Lei n.º 5 de 2004 de 6 de Janeiro (Ministério da Economia).

Portaria n.º 507 de 2004 de 14 de Maio.

Decreto-Lei n.º 200/2002 de 25 de Setembro, Competências à entidade reguladora.

Decreto-Lei n.º 46847 de 27 de Janeiro de 1966, Regulamento de segurança de linhas eléctricas.

Portaria n.º 37/70 de 17 de Janeiro, Primeiros socorros em acidentes pessoais produzidos por correntes eléctricas.

Decreto-lei n.º 64/90 de 21 de Fevereiro, Aprova o regime de protecção contra riscos de incêndio em edifícios de habitação.

Regulamento de segurança contra incêndio

### **Normas de referência**

IEC 62305 -1 – Parâmetros relativos a descargas atmosféricas. Classificação das estruturas. Danos nas estruturas e funcionalidades. Medidas de protecção. Zonas de protecção.

IEC 62305 -2 – Componentes de risco. Gestão de risco. Gestão de risco nas estruturas e nas funcionalidades.

IEC 62305 -3 – Construção e colocação de um sistema de protecção. Construção de terras. Materiais usados nos sistemas de protecção.

IEC 62305- 4 – Zonas de protecção, equipotencialização das malhas, blindagens, dispositivos de protecção contra sobretensões.

NF C17 – 102, UNE 21186, NP 4426 Protecção de estruturas e de zonas abertas mediante pára-raios com dispositivo ionizante não radioactivo.

Guia técnico de pára-raios da (DGE).

## **ANEXOS**

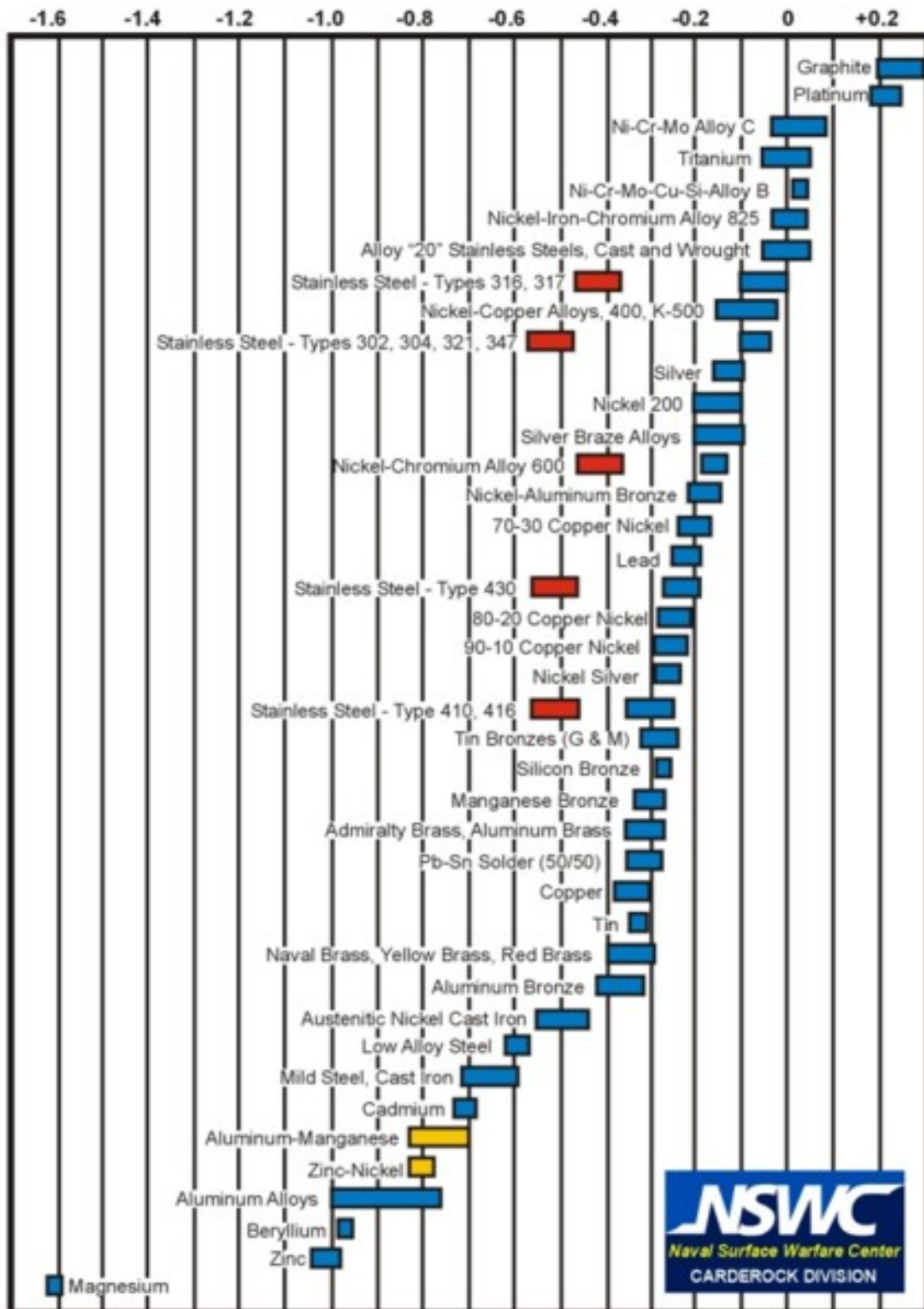
**- Anexo 1**

Potenciais de eléctrodo standard a 25°C – Série Electroquímica

Elemento	Reacção de eléctrodo (Redução)	Potencial de eléctrodo standard de redução, E°/voltes
Li	$\text{Li}^+ + \text{e}^- = \text{Li}$	-3,05
K	$\text{K}^+ + \text{e}^- = \text{K}$	-2,925
Ca	$\text{Ca}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Ca}$	-2,87
Na	$\text{Na}^+ + \text{e}^- = \text{Na}$	-2,714
Mg	$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Mg}$	-2,37
Al	$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- = \text{Al}$	-1,66
Zn	$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Zn}$	-0,7628
Cr	$\text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^- = \text{Cr}$	-0,74
Fe	$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Fe}$	-0,44
Cd	$\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Cd}$	-0,403
Ni	$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Ni}$	-0,25
O, água	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- = \text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{OH}^-$	-0,146
Sn	$\text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Sn}$	-0,14
H (ácido)	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2$	0,00
Cu	$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Cu}$	+0,337
O, água	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- = 4\text{OH}^-$	+0,401
I	$\text{I}_2 + 2\text{e}^- = 2\text{I}^-$	+0,535
O, hidrogénio (ácido)	$\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2\text{O}_2$	+0,695
Ag	$\text{Ag}^+ + \text{e}^- = \text{Ag}$	+0,799
Hg	$\text{Hg}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Hg}$	+0,885
Br	$\text{Br}_2 + 2\text{e}^- = 2\text{Br}^-$	+1,08
O, hidrogénio (ácido)	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- = 2\text{H}_2\text{O}$	+1,229
Cl	$\text{Cl}_2 + 2\text{e}^- = 2\text{Cl}^-$	+1,36
Au	$\text{Au}^{3+} + 3\text{e}^- = \text{Au}$	+1,50
F	$\text{F}_2 + 2\text{e}^- = 2\text{F}^-$	+2,87

- Anexo 2

- Série galvânica



**- Anexo 3**

**- Cálculo de equipamento de protecção**

Tendo em conta os factores já mencionados e designadamente:

- As características do terreno e o sistema implementado,
- Os materiais utilizados e a sua disposição,
- A modelização utilizada nos cálculos dos valores obtidos.

Pode-se calcular a sensibilidade do disjuntor diferencial a aplicar na entrada de uma instalação.

Sabe-se que não podemos ser sujeitos a uma tensão de contacto de 50 V durante mais do que 1s (RSIUEE). Por questões de segurança, assume-se um valor muito inferior, ou seja, 25 V. Assumindo o pior dos valores obtidos após o melhoramento da rede de terras, exemplo  $9.7\Omega$ , aplicando a Lei de Ohm ( $V = RI$ ) para estes valores, obtém-se os seguintes valores de tensão:

<b>Rt (<math>\Omega</math>)</b>	<b>(<math>\Delta I</math>) (mA)</b>	<b>Uc (V)</b>
9,7	30	<b>0,291</b>
	300	<b>2,91</b>
	500	<b>4,85</b>

É de salientar o facto de nas instalações mais comuns se utilizar um diferencial de 300 mA. Trata-se de um valor médio de sensibilidade que se adapta à maioria dos valores das resistências de terra e que pode aplicar-se no nosso caso.

Existem vários tipos de equipamentos de medidas da resistência óhmica, e vários métodos para efectuar essas medidas.

- Anexo 4

- Resultados experimentais

**Tabela 1** – Eléctrodo de terra (ferro revestido com  $\mu\text{m}$  cobre) – Central Granja

t (h)	ddp (V)	I ( $\mu\text{A}$ )	R ( $\Omega$ )
0,0	0,701	45,0	15,6E+3
22,5	0,648	10,0	68,2E+3
23,0	0,771	91,0	8,5E+3
49,0	0,788	77,0	10,2E+3
66,5	0,795	41,0	19,4E+3
67,5	0,680	67,0	10,1E+3
94,0	0,809	27,0	30,0E+3
162,0	0,847	6,0	141,2E+3
163,0	0,651	171,0	3,8E+3
257,5	0,784	21,0	37,3E+3
258,0	0,696	120,0	5,8E+3
260,0	0,680	123,0	5,5E+3
331,0	0,724	107,0	6,8E+3
354,0	0,686	79,0	8,7E+3
360,0	0,654	170,0	3,8E+3
402,0	0,636	40,0	15,9E+3
433,0	0,910	90,0	10,1E+3
504,0	0,918	106,0	8,7E+3
744,0	0,799	19,0	42,1E+3
936,0	0,661	160,0	4,1E+3
1056,0	0,868	29,0	29,9E+3
1224,0	0,775	9,0	82,4E+3
1344,0	0,525	13,0	43,8E+3
1416,0	0,716	19,0	37,7E+3
1536,0	0,689	13,0	54,3E+3
1704,0	0,667	12,0	55,6E+3
1920,0	0,478	1,0	478,0E+3
2160,0	0,799	11,0	72,6E+3
2256,0	0,802	18,0	44,8E+3
2496,0	0,672	17,0	39,5E+3
3000,0	0,223	3,0	85,8E+3

**Tabela 2** – Eléctrodo de cobre – Central Granja

<b>t(h)</b>	<b>ddp (V)</b>	<b>I (μA)</b>	<b>R (Ω)</b>
0,0	0,918	20,0	45,9E+3
22,5	0,657	0,2	3300E+3
23,0	0,810	211,0	3,8E+3
49,0	0,779	130,0	6,0E+3
66,5	0,725	68,0	10,7E+3
67,5	0,600	107,0	5,6E+3
94,0	0,755	52,0	14,5E+3
162,0	0,752	84,0	9,0E+3
163,5	0,685	284,0	2,4E+3
257,5	0,687	145,0	4,7E+3
258,0	0,685	160,0	4,3E+3
260,0	0,735	263,0	2,8E+3
331,0	0,697	106,0	6,6E+3
354,0	0,690	129,0	5,3E+3
360,0	0,661	170,0	3,9E+3
402,0	0,165	163,0	1,0E+3
433,0	0,652	140,0	4,7E+3
504,0	0,517	210,0	2,5E+3
744,0	0,642	80,0	8,0E+3
936,0	0,736	59,0	12,5E+3
1056,0	0,759	171,0	4,4E+3
1224,0	0,370	47,0	7,9E+3
1344,0	0,670	112,0	6,0E+3
1416,0	0,594	59,0	10,1E+3
1536,0	0,531	47,0	11,3E+3
1704,0	0,267	17,0	15,7E+3
1920,0	0,590	4,2	140,5E+3
2160,0	0,529	301,0	1,8E+3
2256,0	0,617	329,0	1,9E+3
2496,0	0,277	30,0	9,2E+3
3000,0	0,525	80,0	6,6E+3



**Tabela 3** – Eléctrodo de terra (ferro revestido  $\mu\text{m}$  com cobre) – Central Arouca

<b>t (h)</b>	<b>ddp (V)</b>	<b>I (<math>\mu\text{A}</math>)</b>	<b>R (<math>\Omega</math>)</b>
0,0	0,568	1,1	516,4E+3
22,5	0,548	0,8	685,0E+3
23,0	0,564	14,0	40,3E+3
49,0	0,735	4,6	159,8E+3
66,5	0,824	2,3	358,3E+3
67,5	0,450	14,0	32,1E+3
94,0	0,808	8,1	99,8E+3
162,0	0,656	2,4	273,3E+3
163,5	0,608	210,0	2,9E+3
257,5	0,752	88,0	8,5E+3
258,0	0,899	415,0	2,2E+3
260,0	0,930	500,0	1,9E+3
331,0	0,947	275,0	3,4E+3
354,0	0,708	410,0	1,7E+3
360,0	0,630	680,0	0,926E+3
402,0	0,603	650,0	0,927E+3
433,0	0,612	710,0	0,862E+3
504,0	0,740	720,0	1,0E+3
744,0	0,478	380,0	1,3E+3
936,0	0,560	161,0	3,5E+3
1056,0	0,497	513,0	0,968E+3
1224,0	0,716	503,0	1,4E+3
1344,0	0,460	430,0	1,1E+3
1416,0	0,380	290,0	1,3E+3
1536,0	0,530	347,0	1,5E+3
1704,0	0,527	405,0	1,3E+3
1920,0	0,542	179,0	3,0E+3
2160,0	0,409	323,0	1,3E+3
2256,0	0,513	709,0	0,723E+3
2496,0	0,590	872,0	0,676E+3
3000,0	0,152	66,4	2,3E+3

**Tabela 4** – Eléctrodo de cobre – Central Arouca

t(h)	ddp (V)	I (μA)	R (Ω)
0,0	0,321	0,900	356,7E+3
22,5	0,363	0,500	726,0E+3
23,0	0,278	11,0	25,3E+3
49,0	0,328	2,8	117,1E+3
66,5	0,341	2,3	148,3E+3
67,5	0,339	5,4	62,8E+3
94,0	0,326	5,7	57,2E+3
162,0	0,189	2,0	94,5E+3
163,5	0,318	40,0	8,0E+3
257,5	0,582	73,0	8,0E+3
258,0	0,445	70,0	6,4E+3
260,0	0,477	100,0	4,8E+3
331,0	0,650	76,0	8,6E+3
345,0	0,236	25,0	9,4E+3
360,0	0,218	53,0	4,1E+3
402,0	0,208	43,0	4,8E+3
433,0	0,168	47,0	3,6E+3
504,0	0,329	715,0	0,4601E+3
744,0	0,590	230,0	2,6E+3
936,0	0,430	117,0	3,7E+3
1056,0	0,181	97,0	1,9E+3
1224,0	0,480	150,0	3,2E+3
1344,0	0,180	73,0	2,5E+3
1416,0	0,197	75,0	2,6E+3
1536,0	0,210	38,0	5,5E+3
1704,0	0,107	27,0	4,0E+3
1920,0	0,514	20,0	25,7E+3
2160,0	0,581	81,0	7,2E+3
2256,0	0,299	94,0	3,2E+3
2496,0	0,86	11,0	7,8E+3
3000,0	0,253	237,0	1,1E+3

**Tabela 5** – Eléctrodo de terra (ferro revestido com 250 µm cobre) – Central Valongo

t(h)	ddp(V)	I (µA)	R(Ω)
0,0	0,645	589,0	1,1E+3
22,5	1,0	500,0	2,1E+3
23,0	0,815	1170,0	0,696E+3
49,0	0,925	1360,0	0,680 E+3
66,5	1,1	2060,0	0,514E+3
67,5	0,902	813,0	1,1E+3
94,0	1,0	2600,0	0,403 E+3
162,0	0,955	1270,0	0,752E+3
163,5	0,457	1920,0	0,238E+3
257,5	1,1	1172,0	0,947E+3
258,0	1,0	1246,0	0,808E+3
260,0	0,886	610,0	1,5E+3
331,0	0,966	462,0	2,1E+3
354,0	1,0	1727,0	0,579E+3
360,0	0,798	1054,0	0,757E+3
402,0	0,870	1309,0	0,664E+3
433,0	0,888	119,9	7,4E+3
504,0	0,938	1340,0	0,700E+3
744,0	0,931	1368,0	0,680E+3
936,0	0,943	940,0	1,0E+3
1056,0	0,927	1253,0	0,739E+3
1224,0	0,927	1247,0	0,743E+3
1344,0	0,970	730,0	1,3E+3
1416,0	0,979	529,0	1,9E+3
1536,0	0,950	709,0	1,3E+3
1704,0	0,862	1113,0	0,774E+3
1920,0	0,822	750,0	1,1E+3
2160,0	0,680	730,0	0,931E+3
2256,0	0,890	1139,0	0,781E+3
2496,0	1,0	1220,0	0,822E+3
3000,0	0,749	567,0	1,3E+3

**Tabela 6** – Eléctrodo de cobre – Central Valongo

<b>t(h)</b>	<b>ddp(V)</b>	<b>I (μA)</b>	<b>R(Ω)</b>
0,0	0,643	355,0	1,8E+3
22,5	0,544	143,0	3,8E+3
23,0	0,308	379,0	0,812E+3
49,0	0,330	565,0	0,584E+3
66,5	0,433	715,0	0,605E+3
67,5	0,310	506,0	0,612E+3
94,0	0,496	367,0	1,4E+3
162,0	0,538	56,0	0,960E+3
163,5	0,775	580,0	1,3E+3
257,5	0,471	272,0	1,7E+3
258,0	0,560	472,0	1,2E+3
260,0	0,520	525,0	0,990E+3
331,0	0,419	275,0	1,5E+3
354,0	0,527	173,0	3,0E+3
360,0	0,536	797,0	0,672E+3
402,0	0,466	1200	0,405E+3
433,0	0,533	746,0	0,714E+3
504,0	0,469	71,0	0,660E+3
744,0	0,586	547,0	1,1E+3
936,0	0,606	750,0	0,808E+3
1056,0	0,530	563,0	0,941E+3
1224,0	0,573	1000	0,558E+3
1344,0	0,575	1300	0,445E+3
1416,0	0,510	1100	0,451E+3
1536,0	0,580	1100	0,519E+3
1704,0	0,630	63,0	1,0E+3
1920,0	0,575	401,0	1,4E+3
2160,0	0,337	715,0	0,471E+3
2256,0	0,549	469,0	1,2E+3
2496,0	0,601	770,0	0,780E+3
3000,0	0,183	44,0	4,2E+3

**Tabela – 7** Eléctrodo de terra (ferro revestido com 250 µm cobre) – Central Lavra

<b>t(h)</b>	<b>ddp(V)</b>	<b>I (µA)</b>	<b>R(Ω)</b>
0,0	0,594	34,0	17,5E+3
22,5	0,501	22,0	22,8E+3
23,0	0,435	52,0	8,4E+3
49,0	0,631	66,0	9,6E+3
66,5	0,860	67,0	12,8E+3
67,5	0,683	70,0	9,8E+3
94,0	0,910	179,0	5,1E+3
162,0	0,770	79,0	9,7E+3
163,5	0,477	76,0	6,3E+3
257,5	0,657	44,0	14,9E+3
258,0	0,825	180,0	4,6E+3
260,0	0,615	185,0	3,3E+3
331,0	0,949	225,0	4,2E+3
354,0	0,756	263,0	2,9E+3
360,0	0,701	627,0	1,1E+3
402,0	0,660	460,0	1,4E+3
433,0	0,617	350,0	1,8E+3
504,0	0,870	420,0	2,1E+3
744,0	0,768	230,0	3,3E+3
936,0	0,547	107,0	5,1E+3
1056,0	0,593	351,0	1,7E+3
1224,0	0,580	238,0	2,4E+3
1344,0	0,771	406,0	1,9E+3
1416,0	0,410	790,0	0,519E+3
1536,0	0,580	310,0	1,9E+3
1704,0	0,398	387,0	1,0E+3
1920,0	0,428	432,0	0,990E+3
2160,0	0,607	425,0	1,4E+3
2256,0	0,779	817,0	0,953E+3
2496,0	0,471	779,0	0,604E+3
3000,0	0,916	1100	0,797E+3

**Tabela 8** – Eléctrodo de cobre – Central Lavra

<b>t(h)</b>	<b>ddp(V)</b>	<b>I (μA)</b>	<b>R(Ω)</b>
0,0	0,180	11,0	16,4E+3
22,5	0,106	6,3	16,8E+3
23,0	0,470	277,0	1,7E+3
49,0	0,459	38,0	12,1E+3
66,5	0,434	29,0	15,0E+3
67,5	0,215	19,0	11,3E+3
94,0	0,431	22,0	19,6E+3
162,0	0,345	49,0	7,0E+3
163,0	0,480	455,0	1,1E+3
257,5	0,380	126,0	3,0E+3
258,0	0,315	100,0	3,2E+3
260,0	0,350	80,0	4,4E+3
331,0	0,508	130,0	3,9E+3
354,0	0,401	278,0	1,4E+3
360,0	0,231	50,0	4,6E+3
402,0	0,370	570,0	0,649 E+3
433,0	0,309	910,0	0,339 E+3
504,0	0,301	80,0	3,8E+3
744,0	0,290	22,0	13,2E+3
936,0	0,269	14,0	19,2E+3
1056,0	0,201	94,0	2,1E+3
1224,0	0,284	27,0	10,5E+3
1344,0	0,320	37,0	8,6E+3
1416,0	0,156	33,0	4,7E+3
1536,0	0,97	21,0	4,6E+3
1704,0	0,60	85,0	0,705E+3
1920,0	0,565	89,0	6,3E+3
2160,0	0,499	71,0	7,0E+3
2256,0	0,47	49,0	0,959E+3
2496,0	0,209	99,0	2,1E+3
3000,0	0,561	805,0	0,696E+3

**Tabela – 9** Eléctrodo de cobre/grafite – Central Arouca

t(h)	ddp(V)	I (μA)	R(Ω)
0,0	0,235	16,0	14,7E+03
29,0	0,303	8,0	37,9E+03
100,0	0,520	115,0	4,52E+03
340,0	0,230	15,0	15,3E+03
532,0	0,343	19,0	18,1E+03
652,0	0,354	29,0	12,2E+03
820,0	0,371	31,0	12,0E+03
940,0	0,260	19,0	13,7E+03
1012,0	0,367	27,0	13,6E+03
1032,0	0,120	8,0	15,0E+03
1200,0	0,421	431,0	0,977E+03
1416,0	0,700	40,0	1,75E+03
1656,0	0,610	35,0	1,74E+03
1752,0	0,245	47,0	5,21E+03
1992,0	0,279	41,0	6,80E+03
2496,0	0,253	39,0	6,49E+03

**Tabela – 10** Zinco/grafite - Central Arouca

t(h)	ddp(V)	I (μA)	R(Ω)
0,0	1,2	160	7,6E+3
29,0	1,0	101	10,4E+3
100,0	1,0	1060	0,981E+3
340,0	0,920	832	1,1E+3
532,0	0,930	550	1,7E+3
652,0	0,915	815	1,1E+3
820,0	0,850	301	2,8E+3
940,0	0,950	483	2,0E+3
1012,0	0,910	455	2,0E+3
1032,0	0,927	890	1,0E+3
1200,0	0,914	1019	0,897E+3
1416,0	0,901	530	1,7E+3
1656,0	0,779	797	0,977E+3
1752,0	0,789	1719	0,459E+3
1992,0	0,780	870	0,896 E+3
2496,0	0,786	817	0,962E+3

**Tabela – 11** Eléctrodo cobre/zinco - Central Arouca

t(h)	ddp(V)	I (μA)	R(Ω)
0,0	1,0	241	4,3E+3
29,0	1,0	160	6,4E+3
100,0	0,828	1142	0,725E+3
340,0	0,847	1020	0,830E+3
532,0	0,799	844	0,946E+3
652,0	0,787	904	0,870E+3
820,0	0,761	290	2,6E+3
940,0	0,759	512	1,5E+3
1012,0	0,739	347	2,1E+3
1032,0	0,844	690	1,2E+3
1200,0	0,671	963	0,696E+3
1416,0	0,780	511	1,5E+3
1656,0	0,690	780	0,884E+3
1752,0	0,730	1056	0,691E+3
1992,0	0,698	1270	0,549E+3
2496,0	0,704	1257	0,560E+3

**Tabela – 12** Eléctrodo de (Zn+Cu)/grafite - Central Arouca

t(h)	ddp(V)	I(μA)	R(Ω)
0,0	0,360	50,0	7,2E+3
29,0	0,530	33,6	16,1E+3
100,0	0,780	429,0	1,1E+3
340,0	0,620	434,0	1,4E+3
532,0	0,497	330,0	1,5E+3
652,0	0,460	275,0	1,7E+3
820,0	0,439	165,0	2,7E+3
940,0	0,560	271,0	2,1E+3
1012,0	0,470	219,0	2,1E+3
1032,0	0,653	318,0	2,1E+3
1200,0	0,536	336,0	1,6E+3
1416,0	0,570	204,0	2,8E+3
1656,0	0,546	183,0	2,9E+3
1752,0	0,467	382,0	1,2E+3
1992,0	0,430	180,0	2,4E+3
2496,0	0,448	173,0	2,6E+3