

## MEDIÇÃO NÃO-INTRUSIVA DA DENSIDADE SUPERFICIAL DE DEPÓSITOS DE SEDIMENTOS EM CAMADA FINA

Gustavo E. Coelho<sup>1</sup>, João Palma<sup>1</sup>, Elsa Alves<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Centro de Instrumentação Científica

<sup>2</sup>Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Departamento de Hidráulica e Ambiente

### RESUMO

O processo de medição de espessuras e de densidades superficiais de sedimentos depositados em modelos físicos tem sido motivo de investigação, conhecendo-se alguns métodos para o efeito, mas todos eles exibindo limitações sérias, em especial quando se pretendem medir depósitos em camada fina, isto é, com poucos milímetros de espessura.

O presente estudo refere-se a um método para realizar este tipo de medição, baseado na variação de resistência elétrica entre elétrodos que fiquem cobertos com a camada de sedimentos. Pretende-se aplicar um método de medição que não perturbe o processo de sedimentação, com sensibilidade para medição de camadas finas (até 1cm) de sedimento, que permita a medição ao longo do tempo, robusto aos efeitos eletroquímicos da água e robusto às perturbações do meio (variação de temperatura, salinidade e nível da água).

Inicialmente é feito um resumo sucinto do estado de arte dos métodos de medição de sedimentos, com a descrição das vantagens e limitações de cada um e salientando a sua aplicabilidade à medição de sedimentos em camadas finas. Segue-se uma descrição do princípio de medição adoptado, identificam-se diversos fatores de influência que, na abordagem convencional, perturbam ou dificultam a medição pretendida, propondo-se soluções para os compensar ou os retirar da cadeia de transdução. É feita uma descrição do circuito eletrónico desenvolvido que permite implementar o método de medição proposto.

Finalmente são apresentados os resultados de um estudo experimental feito em protótipo que mostram a viabilidade do método com as inovações introduzidas para superar as limitações do princípio de medição.

### 1. Introdução

A medição da sedimentação de partículas transportadas pela água assume um papel importante no estudo e modelação física desse tipo de fenómenos em zonas costeiras, estuários, rios e albufeiras. Neste último caso é particularmente relevante a sedimentação causada por correntes de turbidez, cuja modelação física pretende, entre outros aspetos, avaliar a quantidade de sedimento que se deposita ao longo do tempo no fundo de um canal de ensaios, onde aflui água com materiais em suspensão de granulometria fina (20  $\mu\text{m}$ ), de forma a poder definir medidas de controlo da sedimentação em albufeiras.

Conhecem-se vários métodos de medição dos depósitos de sedimentos em modelos físicos [1]. A maioria apresenta sérias limitações quando aplicados a situações como aquela que se pretende, com sedimentos de granulometria fina, depositados em camadas de espessura reduzida, de poucos milímetros. No presente caso

ainda acresce a necessidade de, eventualmente, se poderem fazer também medições em camadas que atinjam cerca de 20 mm.

Os seguidores de perfis de fundo consistem em mecanismos servo-controlados que conduzem uma haste dotada de eléctrodos que, ao descer, deteta a superfície do sedimento por variação da condutividade [2]. Este método (ligeiramente intrusivo), embora tenha uma boa resolução espacial, não é adequado para seguir perfis de sedimentos em camadas de espessura reduzida ou facilmente destrutíveis com a aproximação da ponteira da haste.

As técnicas que implementam a medição com laser apresentam boas características metrológicas mas requerem o esvaziamento dos reservatórios, o que não só pode destruir o perfil dos depósitos dos sedimentos como também não permite obter uma evolução temporal contínua do processo de sedimentação.

Os métodos utilizando sondas ultrasónicas são viáveis em perfis de fundo com variações suaves. Por outro lado, em meios opacos a qualidade deste tipo de medição pode ficar comprometida pelas partículas em suspensão.

O método baseado na medição da resistência elétrica entre eléctrodos colocados no fundo, sob os sedimentos, constitui uma abordagem não-intrusiva viável para a medição da deposição de sedimentos em camada de espessura reduzida [3]. No entanto, este método é muito influenciado pela variação da resistência elétrica da água e do material do sedimento em causa, uma vez que, na condução iónica da água, a variação de temperatura e de salinidade afetam fortemente a sua condutividade elétrica. Além disso, os fenómenos eletroquímicos que originam, por um lado, forças eletromotrizes de polarização e, por outro, produção de bolhas de hidrogénio e de oxigénio na face dos eléctrodos (aumentando a resistência na interface dos mesmos com a água), também criam dificuldades à medição da parte da resistência elétrica exclusivamente devida ao sedimento e à água.

## 2. Princípio de medição

A água, em condições normais, comporta-se como um meio condutor elétrico com uma determinada resistividade ( $10 - 10^4 \Omega\text{m}$ ). No entanto, fatores como a variação de temperatura e variação de salinidade afetam a resistividade da água [4] e por consequência a resistência elétrica medida. O sedimento usado é constituído por pó fino de sílica com granulometria variável ( $2 - 90\mu\text{m}$ ) e com uma resistividade tipicamente muito superior à da água ( $10^{12} - 10^{14} \Omega\text{m}$ ).

O princípio da medição tira partido das diferentes propriedades condutoras elétricas da água e do sedimento (cuja matéria é, por si só, isolante), para medir a variação da resistência elétrica na presença de depósitos de sedimento. A técnica de medição baseia-se na colocação de eléctrodos na face inferior do tanque ou do canal, sob o sedimento, e no facto de a resistência elétrica entre pares de eléctrodos aumentar com o aumento da espessura de sedimento sobre os mesmos. A geometria da água dentro do canal é fixa e a sua altura constante, no entanto, verifica-se que é possível determinar condições para as quais a variação da altura da água não afeta significativamente a medição da sedimento pelo método proposto.

## 2.1. Fenómenos elétricos em presença

É necessário salvaguardar as consequências da passagem de corrente elétrica através da água (dentro e fora do sedimento) que, nomeadamente, desencadeiam fenómenos de electrólise e que se traduzem em dois efeitos: por um lado o aparecimento de forças eletromotrizes (f.e.m.) de polarização e, por outro, a formação de bolhas de hidrogénio e de oxigénio na face dos eléctrodos. Ambos os efeitos dificultam a transdução da resistência elétrica entre eléctrodos. Para minimizar estes efeitos eletroquímicos realiza-se a medição de resistência através da injeção de corrente alternada com uma frequência de alguns quilohertz; deste modo evita-se o desenvolvimento da electrólise ficando, todavia, ainda abaixo das frequências que dão relevo aos efeitos das capacidades parasitas (o que aconteceria com dezenas ou centenas de quilohertz).

O modelo de parâmetros concentrados correspondente à medição entre dois eléctrodos, através da injeção de corrente contínua, representa-se na Fig. 1(a), a qual contém, para além das resistências da água livre e do sedimento molhado, uma f.e.m. de polarização. A resistência da camada de sedimento molhado ( $R_{sed}$ ) varia fortemente com a espessura do sedimento, mas a resistência da água livre ( $R_a$ ) também varia com a salinidade e com a temperatura, conforme se assinala. O valor da resistência total entre eléctrodos ( $R_m$ ) obtêm-se pelo quociente entre a tensão medida e a intensidade de corrente injetada. A aplicação de excitação em corrente alternada permite suprimir a presença da f.e.m. de polarização e o correspondente modelo de parâmetros concentrados passa a ser aquele que se representa na Fig. 1(b), ficando:

$$R_m = R_a + R_{sed} = \frac{V}{I}$$

onde  $V$  e  $I$  podem representar simultaneamente quer valores eficazes quer valores de pico. A eliminação da f.e.m. de polarização nunca será a ideal, como se refere adiante, dado que pode existir sempre alguma componente contínua residual; tal facto motivará outros requisitos de implementação que se expõem mais adiante.

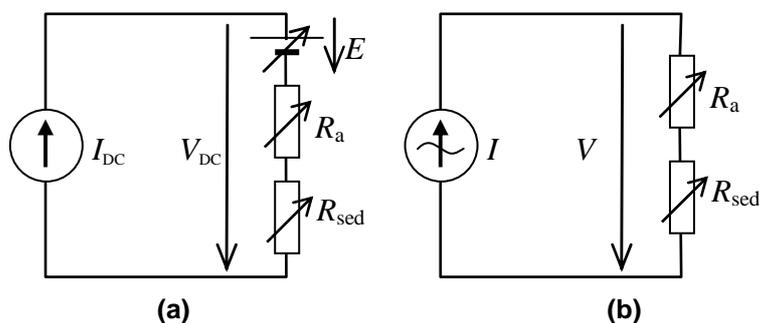
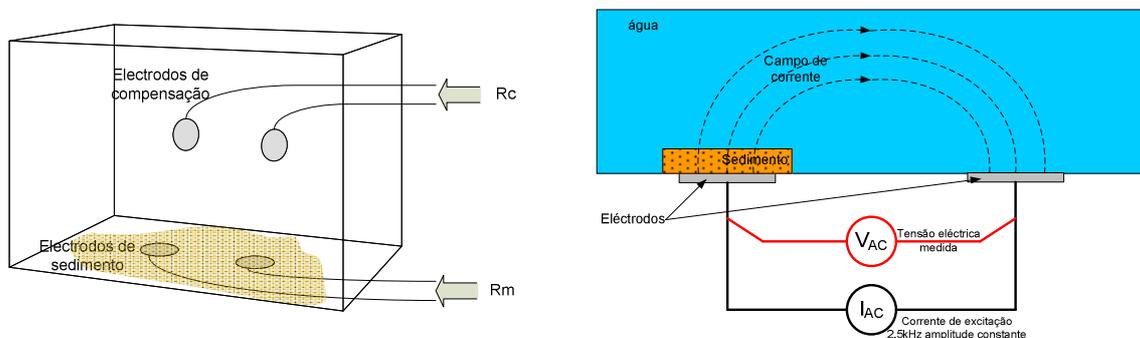


Fig. 1 Modelos de parâmetros concentrados: (a) com injeção de corrente contínua entre eléctrodos; (b) com injeção de corrente alternada.

## 2.2. Compensação da variação de salinidade e temperatura

A aplicação básica do princípio de medição consiste na utilização de um par de eléctrodos, dos quais pelo menos um fique coberto pelos sedimentos. No entanto, a abordagem proposta inclui um par de eléctrodos adicionais com o qual se pretende efetuar a compensação de variações de condutividade da água que aconteçam ao longo dos processos de sedimentação a estudar. A Fig. 2 ilustra como se concretiza esta abordagem, mostrando a disposição dos eléctrodos num volume paralelepípedo de água: o par de medição propriamente dito encontra-se na fronteira inferior, onde se depositam os sedimentos (neste caso, sobre ambos os eléctrodos), para efetuar a medição da resistência  $R_m$ ; o par de compensação situa-se na face de uma das paredes verticais, destinando-se a medir uma resistência  $R_c$  não afetada pela deposição de sedimentos. Os dois pares não necessitam de ter igual dimensão nem igual disposição geométrica.



**Fig. 2 Esquema de princípio de medição proposto utilizando dois pares de eléctrodos.**

As resistências medidas no par principal de eléctrodos (eléctrodos de sedimento) e no par de compensação valem, respetivamente, de acordo com o modelo de medição em corrente alternada:

$$R_m = R_a + R_{sed} \quad \text{e} \quad R_c = R'_a \quad 1$$

O primeiro valor inclui uma parcela de resistência da água e outra do sedimento molhado, enquanto que o segundo apenas inclui a resistência de água (não tendo que se verificar necessariamente igualdade entre  $R_a$  e  $R'_a$ ).

Efetua-se uma primeira medição,  $R_{m0}$ , antes de iniciar o depósito de sedimentos, a qual fornece diretamente o valor da componente de resistência da água no par principal:

$$R_{m0} = R_a \quad 2$$

Seguidamente, já com a presença de sedimentos a cobrir os eléctrodos principais, a medição dará outro valor:

$$R_m = R_a + R_{sed} \quad 3$$

Subtraindo-lhe o valor  $R_{m0}$  anteriormente medido pode-se obter a parte de interesse,  $R_{sed}$ :

$$R_{sed} = R_m - R_{m0} \quad 4$$

No entanto, para que o método tenha efetivo interesse prático, há que resolver o problema da variação de condutividade da água durante o processo de sedimentação, que a experiência mostra ocorrer inevitavelmente, em consequência de variações de temperatura, de salinidade (frequentemente motivada pelo próprio sedimento), bem como de turbidez da água (presença do sedimento em suspensão). Admite-se que as dimensões do volume de água não se alteram ao longo do processo de sedimentação; no entanto, e como será discutido posteriormente, para certas condições geométricas quanto às dimensões relativas de elétrodos e de água envolvente, é possível admitir a hipótese de que a variação de nível de água não afeta as medições de resistência elétrica medida.

A solução proposta consiste em proceder também a uma medição de resistência elétrica  $R_c$  com o par de compensação sempre que seja feita uma medição  $R_m$  com o par principal. Admitindo que a condutividade da água é isotrópica e homogênea em todo o volume do líquido da Fig. 2, pode considerar-se que a sua variação ocorre em igual proporção entre os dois pares de elétrodos, isto é, se na medição inicial sem sedimentos se obtiver com cada par, respetivamente,

$$R_{c0} = R'_a, \quad R_{m0} = R_a \quad 5$$

numa medição posterior, com sedimentos, obter-se-á

$$R_c = kR'_a, \quad R_m = kR_a + kR_{sed} \quad 6$$

O fator de variação da condutividade da água,  $k$ , é dado pelo quociente entre as duas medições feitas no par de compensação:

$$k = \frac{R_c}{R_{c0}} \quad 7$$

A resistência elétrica devida ao sedimento depositado sobre os elétrodos principais obter-se-á por

$$R_{sed} = \frac{R_m}{k} - R_{m0} \quad 8$$

### **2.3. Método de medição por injeção de corrente alternada**

O processo de medição envolve a excitação dos elétrodos com uma corrente alternada, para minimizar o impacto dos fenómenos de hidrólise da água como já foi referido. A resistência elétrica é obtida indiretamente pela medição da amplitude da tensão elétrica, uma vez que a amplitude da corrente de excitação é constante durante todo o processo de medição. Na medição da tensão elétrica determina-se a amplitude pico-a-pico. Esta abordagem permite ter em consideração apenas a resistência elétrica, eliminando a influência de efeitos eletroquímicos da componente contínua do sinal que se manifestam na forma de f.e.m.

Pelo que já foi enunciado, e de acordo com a modelo de parâmetros concentrados da Fig. 1 (b), em cada ocasião de medição excita-se o par de elétrodos de medição e o de referência, com a mesma amplitude  $I$  de corrente, medindo-se as amplitudes de tensão,  $V_m$  e  $V_c$ , respetivamente. O primeiro par de valores,  $V_{m0}$  e  $V_{c0}$ , é medido ainda sem a presença de sedimentos e depois passam a medir-se novos pares  $V_m$  e  $V_c$  sucessivos, com a cadência pretendida, à medida que a deposição decorre.

De acordo com (6), como  $R_m = V_m / I$ ,  $R_a = R_{m0} = V_{m0} / I$  e  $k$  é dado por (7), tem-se:

$$\frac{V_m}{I} = \frac{V_c}{V_{c0}} \left( \frac{V_{m0}}{I} + R_{\text{sed}} \right) \quad 9$$

ou seja,

$$\frac{V_m}{V_c} = \frac{V_{m0}}{V_{c0}} + \frac{I}{V_{c0}} R_{\text{sed}} \quad 10$$

Em conclusão, o quociente entre as tensões medidas nos dois pares de elétrodos, de cada vez, é proporcional à resistência do sedimento existente, aparte um termo constante que corresponde ao valor do quociente obtido na primeira medição, feita sem sedimento.

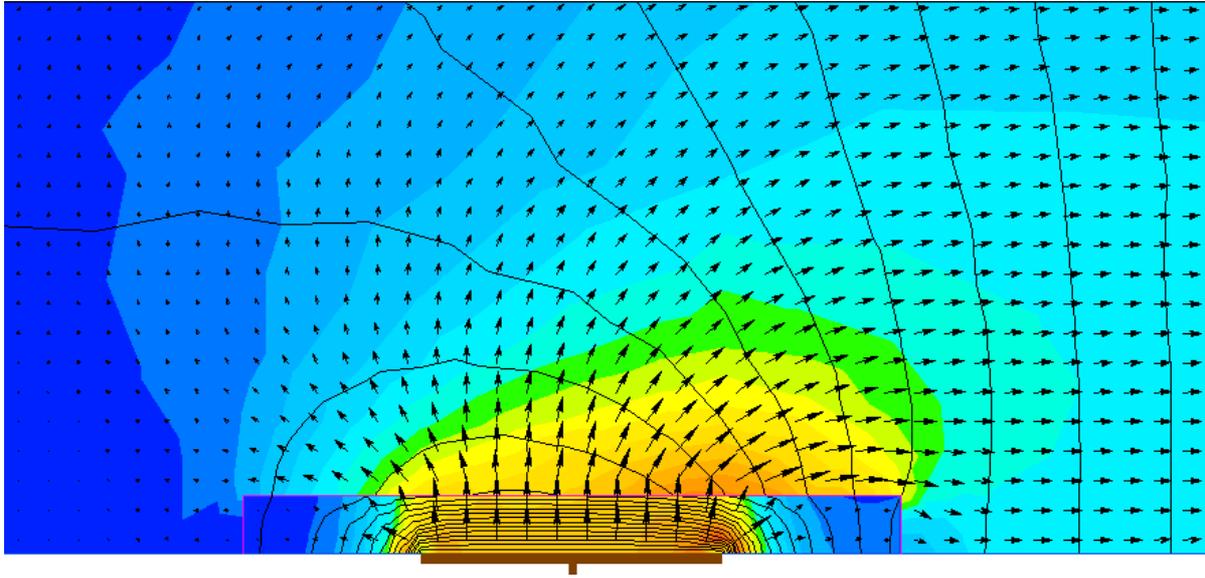
O valor adimensional  $V_m / V_c$  será usado como resultado da transdução da densidade superficial de sedimento.

#### **2.4. Determinação da densidade superficial de sedimentos**

Admite-se que o sedimento depositado apresenta isotropia e homogeneidade das suas propriedades elétricas e que a espessura da camada depositada é uniforme. No entanto, a relação entre a espessura de sedimento depositada sobre o par de elétrodos principais e a resistência  $R_{\text{sed}}$  não é linear em virtude de o campo de correntes elétricas não atravessar a camada de sedimento na direção perpendicular à superfície de contacto dos elétrodos, nem com intensidade uniforme ao longo da mesma, De facto, como se ilustra na Fig. 3 com um perfil de linhas de campo na proximidade de um elétrodo, existe uma assimetria entre a zona mais próxima e a zona mais afastada do outro elétrodo e existem efeitos de aresta com forte inclinação das direções dos vetores no bordo dos elétrodos.

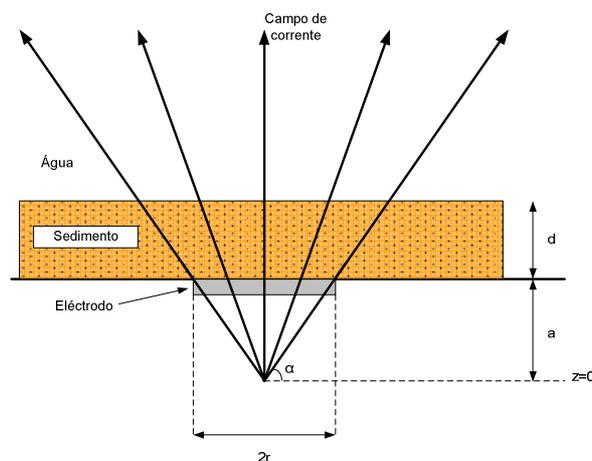
Para além da relação não-linear entre os valores de resistência  $R_{\text{sed}}$  e as espessuras de sedimento (ou, alternativamente, densidades superficiais), depende também do tipo de sedimento considerado.

Para certos casos de disposição de elétrodos já foi usado um modelo que assume distribuição tronco-cónica de linhas de corrente no atravessamento da camada de sedimento [3]. A sua validade é obviamente restrita mas, após parametrização experimental, pode ser útil para realizar interpolações entre os pontos de parametrização. Para o presente caso, poderão propor-se outras geometrias simplificadas de distribuição das linhas de campo de corrente através do sedimento que procurem ajustar-se melhor à distribuição real das linhas de campo, mas será sempre necessário proceder a ensaios experimentais por forma a efetuar a parametrização dos correspondentes modelos teóricos.



**Fig. 3** Perfil longitudinal ilustrativo das linhas de campo da corrente elétrica num dos elétrodos principais, mostrando o atravessamento da camada de sedimento; o elétrodo não representado situa-se à direita, com uma distribuição simétrica da representada. Apenas se simulou a presença de sedimento numa zona envolvente do elétrodo. Os vetores, com o seu sentido e intensidade, representam densidades (pontuais) de corrente; as cores representam regiões com diferentes escalões de intensidade. As linhas contínuas são equipotenciais. [A representação foi produzida com o software *QuickField*].

De acordo com [3] as linhas de campo de correntes na proximidade dos elétrodos podem ser simplificadas por linhas retas sobre uma superfície cónica com origem num ponto virtual a uma distância  $a$  do centro dos elétrodos de raio  $r$ . O ângulo  $\alpha$  representa o menor ângulo entre as linhas de corrente e a superfície horizontal, como esquematizado na Fig. 4.



**Fig. 4** Modelo aproximado da distribuição do campo de corrente na vizinhança do elétrodo [3].

Sendo  $\rho_{\text{sed}}$  a resistividade do sedimento, para cálculo da resistência da camada do sedimento, é necessário calcular a secção transversal do cone ao longo da distância  $d$ . A equação para o cálculo da resistência do sedimento ( $R_{\text{sed}}$ ) é dado por:

$$R_{\text{sed}} = \int_a^{d+a} \frac{\rho_{\text{sed}}}{A(z)} dz \quad 11$$

Integrando a secção  $A(z) = \pi r^2 (z/a)$  do cone fica-se com:

$$R_{\text{sed}} = \frac{\rho_{\text{sed}} d}{\pi r^2} \left( 1 + \frac{d}{r \tan \alpha} \right)^{-1} \quad 12$$

Da equação 12 pode-se concluir que, embora a variação da resistência seja não linear, para camadas muito finas de sedimento, ou seja  $d \ll r$ , existe uma aproximação linear dado por:

$$R'_{\text{sed}} = d \frac{\rho_{\text{sed}}}{\pi r^2} \quad 13$$

Como a altura  $d$  do sedimento é proporcional à quantidade massa por unidade de área, podemos escrever a resistência do sedimento da equação 12 em função da massa do sedimento, como:

$$R_{\text{sed}}(m) = \frac{K_1 m}{1 + K_2 m} \quad 14$$

Sendo que  $K_1$  e  $K_2$  são as constantes proporcionais a  $\rho_{\text{sed}}/\pi r^2$  e  $(r \tan \alpha)^{-1}$ , respetivamente, e são obtidas por ajuste da curva resultante da equação do modelo teórico aos dados experimentais para cada um dos elétrodos.

Da expressão 10 e 14 pode-se definir a tensão compensada em função da massa de sedimento por:

$$\frac{V_m}{V_c}(m) = \frac{V_{m0}}{V_{c0}} + \frac{I}{V_{c0}} R_{\text{sed}}(m) = \frac{V_{m0}}{V_{c0}} + \frac{K_1 I}{V_{c0}} \frac{m}{1 + K_2 m} = K_0 + \frac{K_3 m}{1 + K_2 m} \quad 15$$

Sendo  $K_0 = V_{m0}/V_{c0}$  e  $K_3 = K_1 I/V_{c0}$ .

Pode ainda optar-se por um processo empírico que consiste na medição experimental de valores de  $R_{\text{sed}}$  (devidamente compensados das variações de condutividade da água) para um número considerável de densidades de sedimento (vide Fig. 5) e obter uma função de ajuste que será posteriormente utilizada para determinação da densidade mássica de sedimento ( $m$ ) para cada valor  $R_{\text{sed}}$  que for medido.

Como a relação entre os valores de resistência  $R_{\text{sed}}$  e as densidades superficiais de sedimento depositado depende do tipo de sedimento considerado, bem como da geometria do volume de água na proximidade dos elétrodos, o conjunto de medições a realizar para parametrização do modelo deve ser feito no mesmo local, com o mesmo tipo de sedimentos e com o mesmo sistema de pares de elétrodos com que se irão realizar posteriormente as medições durante os ensaios com correntes de turbidez.

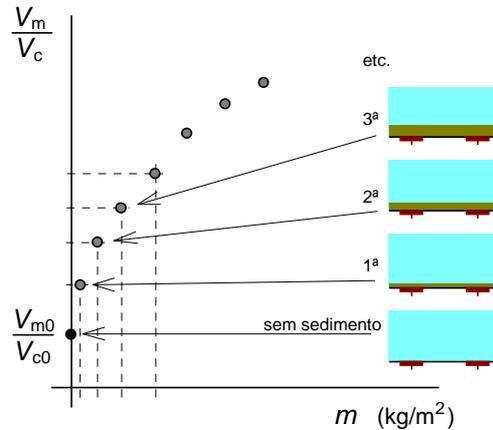


Fig. 5 Sequência de medições experimentais com diferentes densidades mássicas de sedimento.

### 2.5. Influência da variação da altura de água

É importante que este sistema de medição não se apresente sensível a eventuais variações da altura da água no canal onde irá funcionar, que tipicamente são superiores a 50 cm. Este aspeto é determinante para que as medições de sedimento sejam independentes quer do nível absoluto de água quer dos efeitos da variação do mesmo durante os ensaios.

Dado que a intensidade do campo de um dipólo elétrico varia na razão inversa do cubo da distância ao dipolo [5] é esperado que o efeito da variação do nível de água seja minimizado com o aumento desta. Com efeito, a intensidade dos vetores do campo de densidade de corrente elétrica no volume de água, ilustrada na Fig. 3, diminui com a distância aos elétrodos de tal forma que o contributo da condução na água se torna progressivamente mais desprezável em zonas afastadas dos elétrodos.

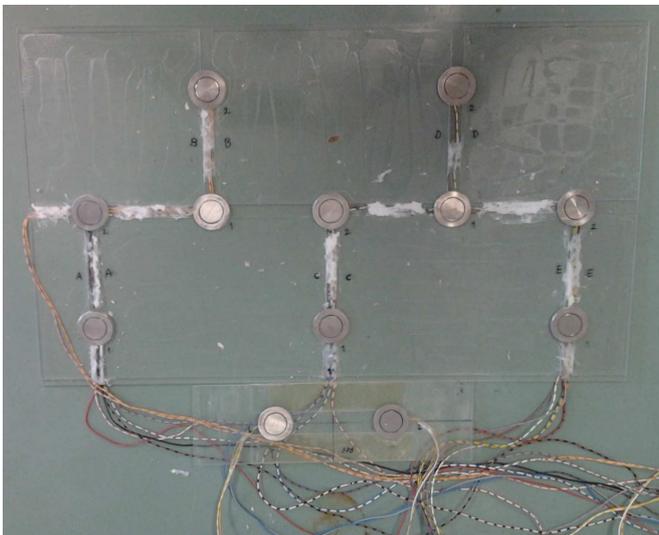
Desta forma é esperado que o efeito da variação do nível de água na resistência global vista entre os elétrodos de fundo se torne insignificante com o aumento da altura de água.

Experimentalmente, esta condição foi verificada para alturas de água superiores a 8 cm, que são amplamente superados nas condições de ensaio pretendidas, no que diz respeito aos elétrodos inferiores. A altura de água terá de ser ainda um pouco maior para que as variações da mesma também não influenciem, de modo sensível, as medições feitas com os elétrodos da face lateral (de compensação); mas com as alturas previstas (acima de 50 cm) essa condição fica largamente salvaguardada.

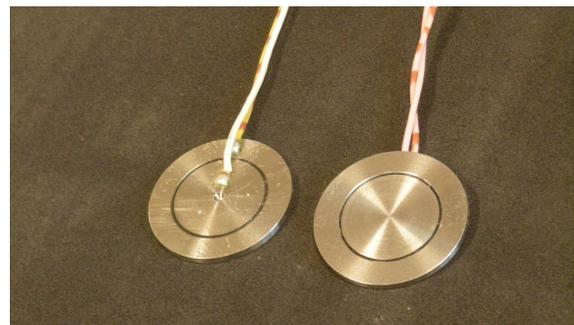
## 3. Implementação do sistema de medição

Para a medição da densidade de sedimento em ensaios de turbidez é instrumentado o fundo do canal com um total de 10 elétrodos. O eléctrodo consiste num disco em aço inox com 30mm de diâmetro e 2mm de espessura. Os elétrodos são embutidos por encaixe numa matriz em acrílico com dimensões 500x300 mm e 4 mm de espessura, criando uma superfície plana, sem irregularidades, de forma a não perturbar processo de sedimentação. Os elétrodos são colocados em pares equidistantes, a 10cm, perfazendo um total de 5 pares de elétrodos para

medição da densidade superficial de depósito de sedimento. Esta placa de acrílico é posteriormente colocada no fundo do canal, formando a superfície horizontal plana devidamente instrumentada.



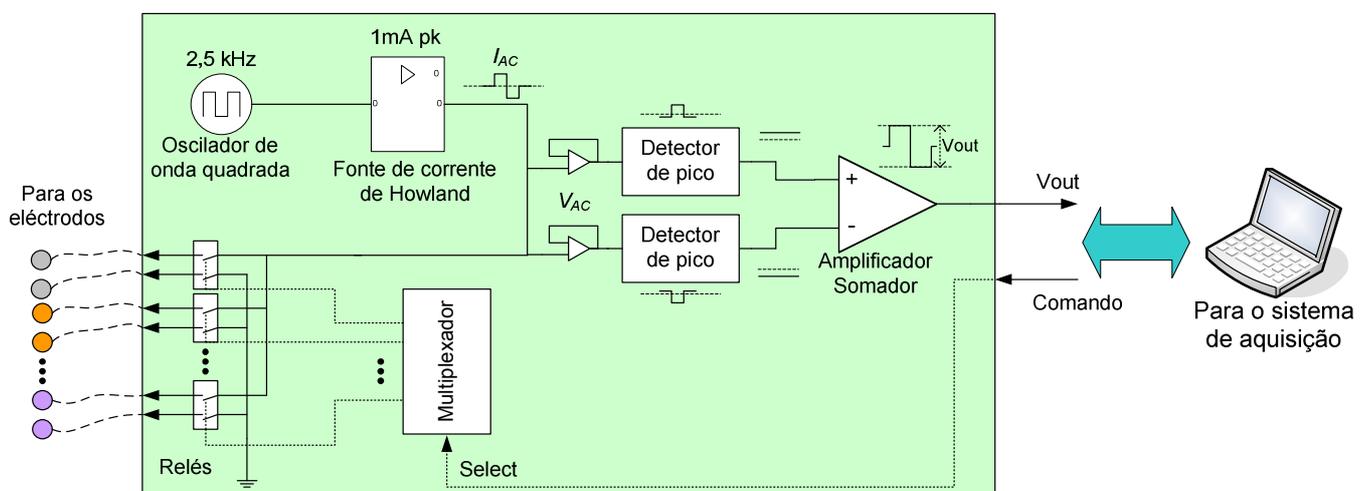
(a)



(b)

**Fig. 6 (a) Placa de acrílico com os elétrodos; (b) pormenor dos elétrodos**

Os elétrodos são ligados a um circuito eletrónico que implementa as funções de excitação dos elétrodos com uma corrente alternada de amplitude constante, condicionamento de sinal [6], medição da amplitude da tensão alternada, interface com o sistema de aquisição e ainda a multiplexagem individual dos elétrodos por meio de relés. O circuito foi desenvolvido para permitir uma fácil e expedita utilização no local dos ensaios, necessitando apenas de uma fonte de alimentação e interface para o sistema de aquisição.



**Fig. 7 Diagrama do circuito eletrónico e interface com os periféricos.**

A tensão de onda quadrada que excita a fonte de corrente é implementada por circuito clássico de oscilador de relaxação [7]. A corrente de excitação é executada por uma fonte de *Howland* dimensionada para produzir um onda quadrada de 1mA de amplitude de pico. A vantagem desta fonte de corrente é permitir aplicar uma corrente constante a uma carga variável (a resistência entre os elétrodos) e com referência à massa do circuito. Os detetores de pico são executados com retificadores de precisão, que desmodulam a amplitude positiva e negativa da onda quadrada. O amplificador-subtrator elabora uma tensão DC proporcional à amplitude da tensão AC dos elétrodos, ou seja a tensão resultante dos elétrodos excitados pela corrente  $I_{AC}$ . Esta abordagem de medição da amplitude AC permite implementar medições do sedimento insensíveis a componentes contínuas de sinal, normalmente causados por efeitos eletroquímicos.

A energização dos 6 relés é comandada por multiplexagem de 3 sinais binários provenientes do sistema de aquisição.

O sistema de aquisição é implementado com um módulo de saídas binárias e um módulo de entradas analógicas, ambos da *National Instruments*. O programa de comando-aquisição é implementado em *Labview* (da *National Instruments*) e permite comandar a seleção de pares de elétrodos e realizar a medição e o armazenamento de dados, em modo automático, durante os ensaios de experimentais.

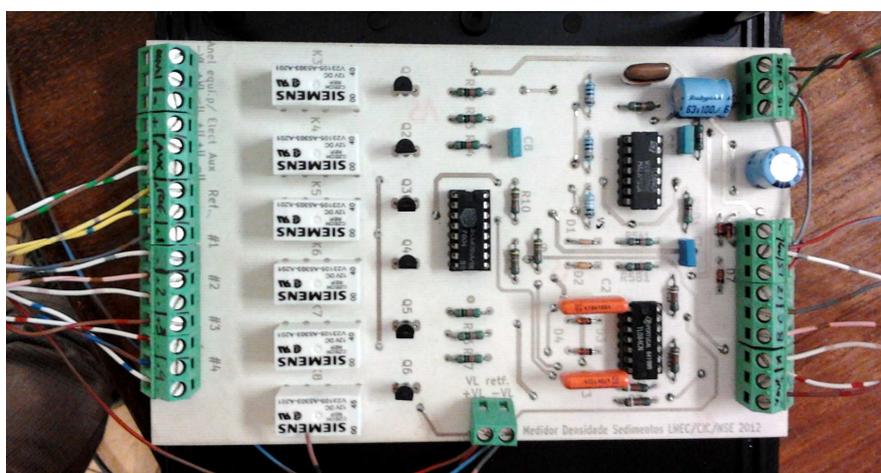
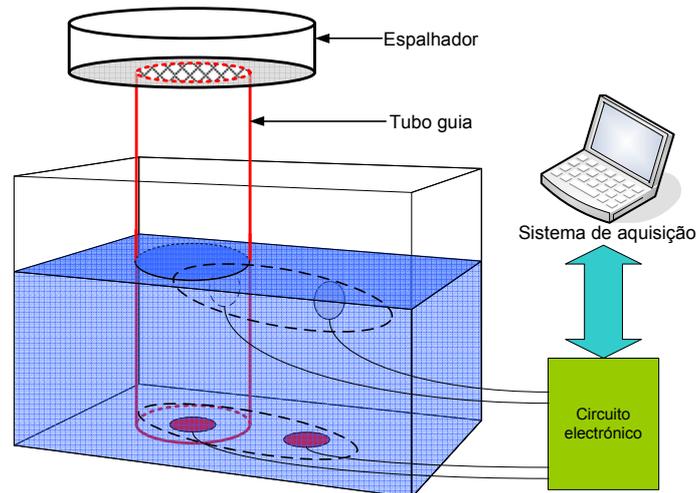


Fig. 8 Realização do circuito em placa de circuito impresso

#### 4. Ensaios experimentais e principais resultados

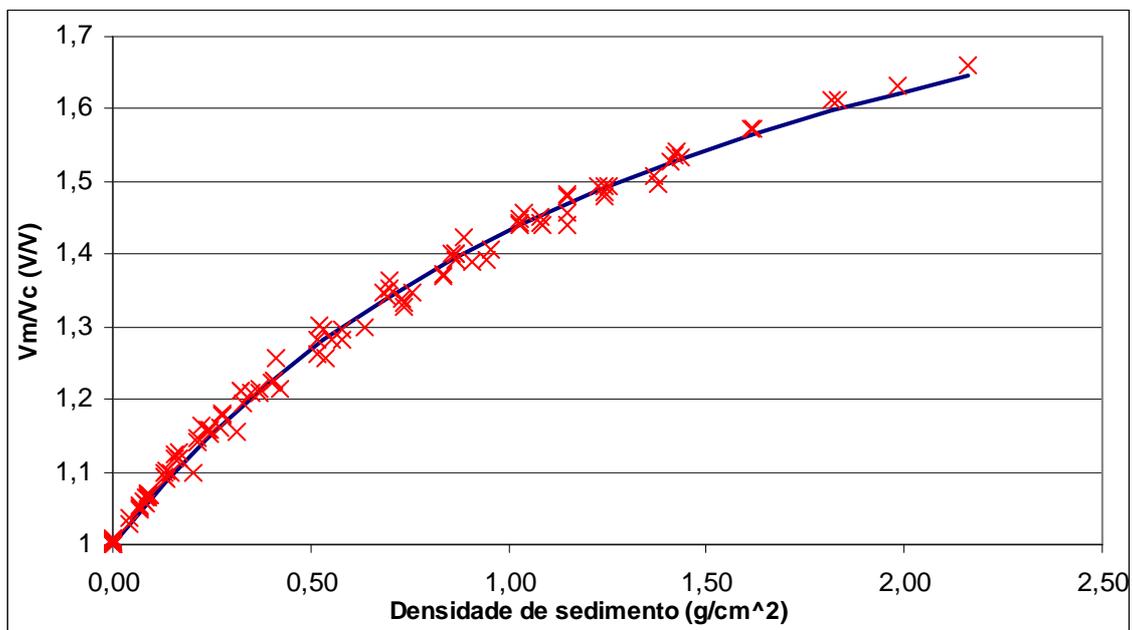
Para validação e parametrização do modelo teórico anteriormente enunciado, foram levados a cabo vários ensaios experimentais em variadas condições ambientais devidamente monitorizadas. Cada ensaio consistiu em adicionar várias porções de sedimento, cuidadosamente pesadas e depositadas, com auxílio de um tubo guia de dimensões conhecidas. Para assegurar uma distribuição uniforme do depósito sobre os elétrodos, o sedimento em pó foi adicionado por intermédio de um espalhador, como ilustrado na Fig. 9. Este método pretende estabelecer as condições padrão na determinação da densidade superficial de sedimento em  $g/cm^2$  e garantir os pressupostos necessários de distribuição uniforme do sedimento sobre os elétrodos. Foram utilizados nestes ensaios tubos guia

com diâmetros de 65 e 80mm que, por serem superiores ao diâmetro dos elérodos, permitiram obter depósitos uniformes na vizinhança dos elérodos mesmo depois de ser retirado o tubo, condição necessária para se efetuarem as medições da tensão elétrica.



**Fig. 9 Método experimental de deposição de sedimento nos elérodos imersos em água.**

O modelo teórico foi parametrizado com os resultados experimentais pelo método dos mínimos quadrados e o resultado apresenta-se no gráfico da Fig. 10. Da parametrização resulta um ajuste do modelo teórico aos dados experimentais obtidos com um coeficiente  $R^2=0,98$ .



**Fig. 10 Resultados experimentais (pontos X vermelhos) e ajuste da curva teórica (azul).**

O gráfico da Fig. 10 mostra ainda que a sensibilidade da medição vai diminuindo com o aumento da densidade superficial como era esperado, em virtude da área de sedimento disponível sobre os elétrodos aumentar com a espessura deste.

Experimentalmente foi verificado que a densidade volúmica do sedimento seco era de, aproximadamente,  $1\text{g/cm}^3$ , pelo que o gráfico da Fig. 10 pode ser diretamente interpretado em função da espessura do sedimento em cm. Nessa perspetiva, o método de medição proposto é aplicável a espessuras  $<1\text{cm}$  satisfazendo os requisitos iniciais. No entanto, verifica-se que mesmo assim o método proposto apresenta ainda sensibilidade para medição de espessuras até pelo menos o dobro da escala inicial, i.e. até  $2\text{cm}$ .

## 5. Discussão e conclusões

O sistema proposto permite medir densidades superficiais de sedimentos de forma não intrusiva e ao logo do tempo com uma incerteza máxima de 10% do valor estimado pelo modelo teórico usado. A dispersão de resultados resulta na dificuldade de estabelecer a densidade superficial padrão cumprindo o pressuposto de camadas homogéneas de sedimento que, por ser de difícil execução, pode introduzir erros na parametrização da curva teórica. Os resultados corroboram esta interpretação, por se verificar uma maior dispersão dos mesmos no início de escala, onde a sensibilidade deste método evidencia uma maior variação não linear, apresentando-se mais sensível no início de escala, i.e. para quantidades reduzidas de sedimento.

A solução de instrumentação desenvolvida permite atenuar os efeitos eletroquímicos nos elétrodos, eliminar os efeitos das forças eletromotrizes residuais e compensar as perturbações da condutividade da água. Os resultados experimentais evidenciam que o sistema proposto permite executar as medições mesmo quando existe sedimento em suspensão e compensar os efeitos de variação da condutividade da água (essencialmente devidos a variação de salinidade e/ou variação de temperatura) com o recurso a elétrodos de compensação. Com efeito, verificou-se experimentalmente que o método de medição proposto permite compensar variações da salinidade da água de modo a ter uma variação da grandeza  $V_m/V_c < 1\%$  mesmo para situações em que se ocorra um variação de 50% na condutividade da água. Quanto à compensação do efeito da temperatura nas medições de sedimento verificou-se uma variação da grandeza  $V_m/V_c < 2\%$  para amplitudes térmicas de  $20\text{K}$ .

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Palma, P. Morais, L. Guilherme, and E. Alves, “Positioning Systems for Bed Profiling in Hydraulics Physical Models,” in *Motion Control*, 2010.
- [2] J. Palma, L. Guilherme, and E. Alves, “Bed profile tracking and data acquisition system for hydraulics physical models,” *Proc. of the 14th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. MELECON*, pp. 96–101, 2008.

- [3] F. de Rooij, S. B. Dalziel, and P. F. Linden, “Electrical measurement of sediment layer thickness under suspension flows,” *Experiments in Fluids*, vol. 26, no. 5, pp. 470–474, Apr. 1999.
- [4] T. S. Light, S. Licht, A. C. Bevilacqua, and K. R. Morash, “The Fundamental Conductivity and Resistivity of Water,” *Electrochemical and Solid-State Letters*, vol. 8, no. 1, pp. E16–E19, 2005.
- [5] D. K. Cheng, *Fundamentals of Engineering Electromagnetics*. Addison-Wesley Publishing Company, 1993.
- [6] R. Pallàs-Areny and J. G. Webster, *Sensors and Signal Conditioning (2nd Edition)*. John Wiley & Sons, 2001.
- [7] A. S. Sedra and K. C. Smith, *Microelectronic Circuits*. Oxford University Press, 1998.