

III. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

III.1. Introdução

III.1.1. Generalidades

As partículas sedimentares apresentam dimensões com variabilidade muito elevada. Na Natureza encontram-se depósitos sedimentares constituídos por elementos com decímetros a metros de diâmetro (como nas moreias glaciárias), até sedimentos compostos por partículas extremamente pequenas, da ordem de alguns micra (como se verifica nas argilas dos grandes fundos oceânicos). Por vezes, a heterogeneidade da dimensão das partículas que constituem um depósito é extremamente elevada, coexistindo elementos com metros de diâmetro numa matriz de partículas pequenas (como nos depósitos formados por alguns fluxos detríticos).

A análise das dimensões das partículas é importante pois que permite deduzir indicações preciosas, entre outras, sobre a proveniência (designadamente sobre a disponibilidade de determinados tipos de partículas e sobre as rochas que lhes deram origem), sobre o transporte (utilizando, por exemplo, o conceito de maturidade textural e a resistência das partículas, segundo a sua composição, à abrasão e à alteração química), e sobre os ambientes deposicionais.

A análise granulométrica consiste na determinação das dimensões das partículas que constituem as amostras (presumivelmente representativas dos sedimentos) e no tratamento estatístico dessa informação. Basicamente, o que é necessário fazer, é determinar as dimensões das partículas individuais e estudar a sua distribuição, quer pelo peso de cada classe dimensional considerada, quer pelo seu volume, quer ainda pelo número de partículas integradas em cada classe. Na realidade, estas três formas têm sido utilizadas.

Assim, para efectuar a descrição adequada de um sedimento, torna-se necessário proceder a uma análise pormenorizada, utilizando classes granulométricas com pequena amplitude. Quanto menor for a amplitude das classes, melhor é a descrição da variabilidade dimensional das partículas que constituem o sedimento.

Classicamente, a granulometria dos sedimentos muito grosseiros (cascalhos, seixos, balastros, etc.) é efectuada medindo (ou pesando) individualmente cada um dos elementos e contando-os. Contudo, para sedimentos menos grosseiros (cascalhos finos, areias), tal forma de mensuração não é prática, sendo nas areias muito difícil e extremamente morosa, e praticamente impossível nos siltes e argilas. Para estes sedimentos, a análise clássica recorre à separação mecânica em classes dimensionais e à determinação do seu peso. No que se refere aos sedimentos lutíticos (siltes e argilas), a forma de determinar a distribuição granulométrica de forma compatível com as das outras classes texturais é ainda mais difícil e problemática.

Os problemas relacionados com a análise granulométrica começam logo com a escolha do método a utilizar. Por um lado, é questionável se se deve utilizar, para cada fracção granulométrica, o número de partículas aí presentes ou o peso dessas partículas. Existem várias tentativas de

relacionar estas duas quantidades mas, como seria de esperar, a aplicação das expressões empíricas que têm sido propostas não funcionam na realidade, ou cometem grandes erros. Basta considerar que existe, nas partículas sedimentares, grande variabilidade de formas e de densidades, para se concluir que qualquer expressão relacionando número e peso está condenada ao fracasso.

III.1.2. Escalas Granulométricas

Para estudar a distribuição granulométrica das partículas que constituem um sedimento é preciso, obviamente, utilizar uma escala. As primeiras escalas a serem utilizadas foram as mais evidentes, aritméticas, como o é a escala milimétrica.

Há muito que se constatou, no entanto, que as escalas lineares ou aritméticas não são as mais apropriadas para obter bons resultados no estudo dos sedimentos. Efectivamente, quando se estuda a distribuição das dimensões das partículas dos sedimentos utilizando escalas aritméticas, verifica-se que essa distribuição é, sistematicamente, assimétrica, isto é, a maior parte das partículas concentra-se nas dimensões mais pequenas (fig. 10). Com este tipo de representação, sedimentos bastante diferentes ficam com aspectos de alguma forma semelhantes, o que, obviamente, não é o mais apropriado para o seu estudo e para a determinação das suas verdadeiras diferenças.

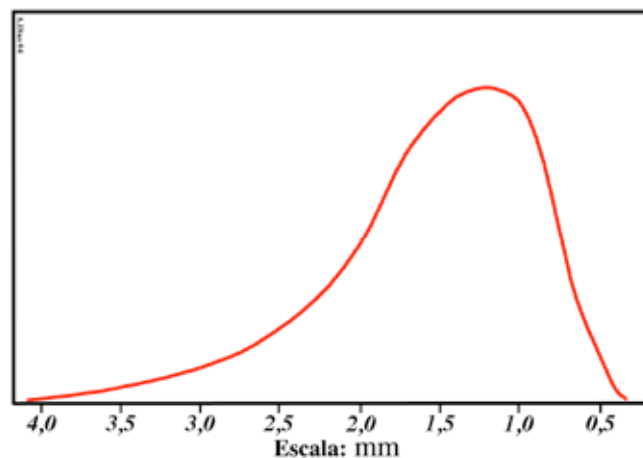


Fig. 10 Distribuição granulométrica de um sedimento hipotético, representada numa escala milimétrica.

Assim, os sedimentólogos cedo constataram que a escala aritmética não é a mais apropriada para estudar os sedimentos. Com efeito, na Natureza, a maior parte das populações obedece a distribuições do tipo gaussiano, também apelidadas de distribuições normais. Por outro lado, há muito que se sabe que muitas propriedades dos sedimentos, tal como a velocidade de sedimentação, variam em função de uma potência da dimensão das partículas.

Se no estudo das populações de partículas sedimentares se utilizarem escalas geométricas em vez de escalas aritméticas, verifica-se que as distribuições resultantes se aproximam bastante mais das curvas gaussianas (fig. 11). Por essa razão, há muito que se começou a tentar descrever os sedimentos com base em escalas geométricas ou logarítmicas.

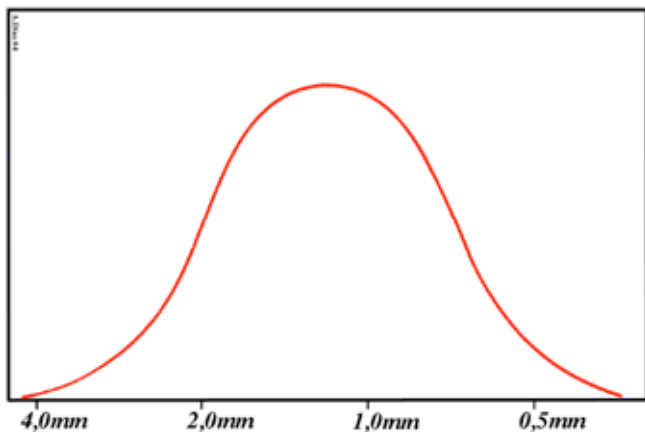


Fig. 11 - Distribuição granulométrica do mesmo sedimento da figura anterior, representado numa escala logarítmica.

Foi o sedimentólogo norte-americano Johan A. Udden que, em 1898, apresentou a primeira proposta de escala geométrica com larga aceitação pela comunidade científica. Trata-se de uma escala geométrica que utiliza potências de 2mm. Esta escala viria a ser ligeiramente modificada e alargada, em 1922, por Chester K. Wentworth, passando a ser conhecida pela designação de escala de Udden-Wentworth. Utilizando potências de 2 e 1mm como ponto de referência, os limites das classes granulométricas utilizadas são, no sentido decrescente, 1mm, 0,5mm, 0,25mm, 0,125mm, etc. e, no sentido crescente, 1mm, 2mm, 4mm, 8mm, etc.

Nos trabalhos de apresentação desta escala, propunham-se, também, designações para os vários elementos da série (isto é, para as classes texturais), cujos limites dimensionais são definidos por valores certos da escala. Por exemplo, na proposta de Wentworth, argilas (*clay*) são as partículas cuja dimensão é inferior a 1/256mm (0,0039mm), silte (*silt*) corresponde ao conjunto de partículas cujas dimensões se encontram entre esta dimensão e 1/16mm (0,0625mm), as partículas de areia (*sand*) têm entre 1/16mm e 1mm, os grânulos (*granules*) variam entre 1 e 4mm, os seixos (*pebbles*) entre 4 e 64mm, e os blocos (*pebbles*) têm mais de 64mm.

III.1.2.1. A Escala ϕ (fi)

A modificação mais significativa à escala de Udden-Wentworth foi proposta, em 1934, por outro sedimentólogo norte-americano, W. C. Krumbein, o qual utilizou os expoentes (as potências de 2) da escala de Wentworth como base de uma escala logarítmica, que designou por escala ϕ (fi). O principal objectivo desta transformação foi facilitar a aplicação dos métodos estatísticos convencionais à sedimentologia. Esta escala teve ampla aceitação pela comunidade científica, estando, actualmente, extremamente divulgada.

Na formulação desta escala, Krumbein verificou que a utilização directa das potências de 2 não era prática. Com efeito, como grande parte das partículas sedimentares têm dimensão inferior a 1mm, o valor da dimensão ϕ destas partículas é negativo. Por exemplo, partículas com diâmetros de meio milímetro teriam o valor, nesta escala, de -1 ($0,5\text{mm} = 2^{-1}$). Tal implicaria que, em grande parte (se

não na maior parte) dos casos se tivesse que trabalhar com valores negativos. Para obviar a este inconveniente, Krumbein definiu a escala ϕ (fi) como

$$\phi = -\log_2 d(\text{mm})$$

A análise dimensional revela, porém, que a escala ϕ , tal como definida por Krumbein, não é adimensional.

Para obviar a este problema, Dean McManus propôs, em 1963, que na fórmula se incluísse a divisão por 1mm, o que não altera o valor, mas o torna adimensional.

Assim, a escala ϕ actualmente em uso define-se como:

$$\phi = -\frac{\log_2 d(\text{mm})}{1\text{mm}}$$

Esta notação tem o inconveniente de obrigar, por vezes, a trabalhar simultaneamente com valores negativos e positivos, visto que as partículas maiores que 2mm têm valor ϕ negativo e as partículas de dimensão inferior têm esse valor positivo. No entanto, como a maior parte dos trabalhos incidem sobre sedimentos arenosos ou mais finos, a utilização desta escala é bastante prática. Por outro lado, além de ser bastante sensível às variações granulométricas dos sedimentos (tanto no que se refere a partículas finas, como a grosseiras), tem a vantagem das classes definidas por Wentworth terem como limites valores inteiros de ϕ .

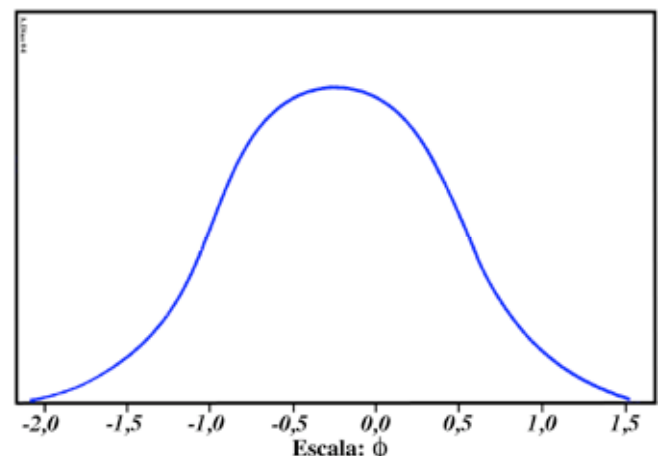


Fig. 12 Curva de distribuição do mesmo sedimento representado nas figuras anteriores, utilizando a escala ϕ .

III.1.2.2. As Escalas Psi (ψ) e Qui (χ)

Uma alternativa à utilização de diâmetros na representação da distribuição granulométrica é a aplicação directa das velocidades de sedimentação. Tal evita, as transformações, de fiabilidade muito questionável, que é necessário efectuar, em muitos métodos granulométricos, para se obterem diâmetros (de sedimentação, equivalentes, nominais, ...) que, na maior parte, mais não são do que abstrações. Efectivamente, não é possível medir directamente esses diâmetros pois que, fisicamente, não existem. Por outro lado, como as conversões que é necessário efectuar se baseiam na Lei da Queda das partículas, não é bem conhecida, existindo várias propostas, os resultados variam com as equações adoptadas.

No que se refere ao diâmetro de peneiração (extensivamente utilizado, essencialmente devido à habitação), este carece, como se sabe, de qualquer significado hidrodinâmico.

A vantagem em utilizar a velocidade de sedimentação como parâmetro descritivo fiável das partículas sedimentares tem sido reconhecida recorrentemente reconhecida pela maior parte dos investigadores que desenvolveram actividade relevante neste tema, pelo menos desde o início do século XX. Na realidade, existem vantagens óbvias em trabalhar com grandezas físicas significativas e mensuráveis.

No entanto, a utilização de escalas aritméticas levantava problemas análogos aos que foram referidos anteriormente, e que conduziram à formulação da escala ϕ . O primeiro investigador a propor a utilização da transformação logarítmica da velocidade de sedimentação foi Robinson (1922; 1924), cujos trabalhos estiveram na origem do denominado método da pipeta para determinar a granulometria de sedimentos finos. A transformação utilizada por Robinson é a seguinte:

$$-\log_{10}(v) + 7$$

em que v corresponde à velocidade de sedimentação em cm/s. A adição da constante 7 tem como finalidade evitar números negativos correspondentes às partículas com menores velocidades de sedimentação.

Apesar do método granulométrico (pipetagem) de Robinson ter sido amplamente reconhecido, sendo, ainda actualmente, largamente utilizado, já o mesmo não se verificou com a sua proposta de utilização das velocidades de sedimentação. Na altura, não havia tecnologia disponível que viabilizasse a construção de tubos de sedimentação que fornecessem resultados precisos no domínio das areias. Assim, a granulometria desta classe textural era efectuada com base no diâmetro (em geral, o diâmetro de peneiração) das partículas. Também para as classes muito grosseiras (cascalhos, seixos, etc.) eram utilizados diâmetros, neste caso medidos directamente em cada elemento. Consequentemente, para estudar a granulometria do sedimento total, o parâmetro mais cómodo a utilizar era o diâmetro, até porque, no que se refere aos finos, a Lei de Stokes permite essa determinação com facilidade e fiabilidade. Assim, a proposta de transformação logarítmica de Robinson acabou por ser completamente esquecida pela comunidade científica.

O desenvolvimento tecnológico viabilizou que, nas décadas de 60 e de 70 do século XX, surgissem tubos de sedimentação para a fracção arenosa, caracterizados por elevada precisão, e que tiveram larga disseminação. A problemática referente ao parâmetro descritivo das partículas que deve ser utilizado voltou à ordem do dia, surgindo várias propostas.

Em 1967, Gerald Middleton propôs a utilização de uma escala, análoga à escala ϕ introduzida por Krumbein (1934), que designou por escala Psi (ψ), e que definiu como

$$\psi = -\log_2 v$$

em que v corresponde à velocidade de sedimentação expressa em cm s^{-1} .

Em 1977, Taira e Scholle, desconhecendo provavelmente os trabalhos de Robinson e de Middleton, propuseram a utilização da escala tau (τ)

$$\tau = -\log_{10}(v)$$

que mais não é do que a transformação de Robinson, embora sem a constante introduzida por este autor.

Tal como aconteceu com a escala ϕ proposta por Krumbein (1934), que não era adimensional, tendo sido, neste aspecto, corrigida por McManus (1963), também a transformação proposta por Middleton (1967) viria a ser corrigida por May, em 1981. Todavia, James May vai mais longe, propondo a redenominação desta escala, que designa por escala χ (qui) e define como

$$\chi = -\log_2\left(\frac{s}{s_0}\right)$$

em que s é a velocidade de sedimentação em ms^{-1} e s_0 a velocidade padrão de 1ms^{-1} .

May justifica estas alterações da seguinte forma: a) utilizando ms^{-1} trabalha-se no sistema internacional; b) o domínio dos valores paramétricos resultante cresce a partir de 0 (correspondente a 1ms^{-1}); c) os valores tornam-se adimensionais; d) a letra grega χ (qui) não tem significado especial em sedimentologia (embora se não deve confundir com o χ^2 utilizado em estatística), o que não acontece com o ψ (psi) proposto por Middleton, pois que, tradicionalmente, se utiliza este símbolo para expressar a esfericidade da partícula.

Infelizmente, estas importantes sugestões acabaram por ser ignoradas pela comunidade científica, não obstante a generalidade dos especialistas reconhecer que o parâmetro descritivo que deveria ser utilizado é a velocidade de sedimentação ou um dos seus derivados.

Na base da não utilização generalizada das velocidades de sedimentação estão vários factores, designadamente a dificuldade em utilizar tubos de sedimentação (pois que os equipamentos deste tipo são bastante dispendiosos), a extrema divulgação do método da peneiração (que, apesar de fornecer resultados pouco significativos, é bastante simples e barato, sendo intensivamente utilizado por não especialistas) e, derivado disso, o costume arraigado em trabalhar com diâmetros de peneiração (impossíveis de converter, com um mínimo de fiabilidade, em velocidades de sedimentação).

Apesar destes hábitos, é importante estar consciente de que se deveriam apenas utilizar diâmetros como descritores das partículas sedimentares quando se utilizam técnicas granulométricas que medem directamente este parâmetro, como é o caso da peneiração e da microscopia. Quando os métodos se baseiam na sedimentação, como se verifica, entre outros, com os tubos de sedimentação, com a pipetagem, com o *SediGraph*, e com o *Malvern*, o descritor adequado é a velocidade de sedimentação, ou uma das suas transformações, sendo a mais coerente a escala χ .

Tabela 4 - Correspondência entre algumas velocidades de sedimentação (em ms^{-1}), transformações logarítmicas propostas por Robinson (1922, 1924), Middleton (1967), Taira & Scholle (1977) e May (1981), e correspondentes diâmetros equivalentes determinados pelas equações de Rubey (1933) e Gibbs *et al.* (1971)

s	Diâmetro ϕ					
	Robinson (1922, 1924)	Middleton (1967)	Taira & Scholle (1977)	May (1981)	Rubey (1933)	Gibbs <i>et al.</i> (1971)
1,00	9,000	-6,644	2,000	0,0		
0,500	8,699	-5,644	1,699	1,0		
0,250	8,398	-4,644	1,398	2,0	-3,3	-0,8
0,125	8,097	-3,644	1,097	3,0	-1,0	0,4
0,0625	7,796	-2,644	0,796	4,0	0,8	1,3
0,0312	7,495	-1,644	0,495	5,0	2,0	2,1
0,0156	7,194	-0,644	0,194	6,0	3,0	2,8
0,00781	6,893	0,356	-0,107	7,0	3,4	3,4
0,00391	6,592	1,356	-0,408	8,0	3,9	3,9
0,00195	6,291	2,356	-0,709	9,0	4,4	4,4
0,000977	5,990	3,356	-1,010	10,0	5,0	5,0

III.2. Métodos Granulométricos

III.2.1. Sedimentos Muito Grosseiros

O primeiro problema que surge quando se pretende fazer a granulometria de um sedimento em que as classes texturais mais grosseiras (seixos, burgaus, blocos, etc.) são abundantes é a quantidade de material, isto é, a amostra que deve ser considerada. Para se obter o mesmo rigor estatístico que normalmente se consegue na granulometria das areias seria necessário, por vezes, dispor de amostras com pesos da ordem das toneladas. Basta pensar qual seria o peso de uma quantidade de seixos equivalente à quantidade de grãos existente numa amostra de areia para ter noção da amplitude do problema.

Por outro lado, e visto que é relativamente fácil, em elementos muito grosseiros, determinar individualmente várias medidas (volume, peso, eixo maior, eixo menor, etc.), é necessário escolher o parâmetro mais adequado. Para ter consistência com o que normalmente se pretende medir na granulometria das areias, dever-se-ia considerar o "diâmetro", o que, no caso vertente, não é fácil, pois que basta olhar para uma população de seixos, burgaus ou balastros para constatar que existe, em cada elemento, um eixo maior e outro menor. Mesmo estes eixos não são, muitas vezes, fáceis de determinar devido às formas muito irregulares que vários dos elementos apresentam.

Por vezes utilizam-se relações entre três eixos ortogonais para tentar determinar o valor do que, em geral, se designa por "diâmetro médio". Contudo, com frequência, a variabilidade é tal que se torna difícil definir e determinar um "diâmetro médio", para já não referir o problema da ambiguidade do significado ambiental desse parâmetro arbitrário. Este problema, que é facilmente visualizável, revela bem os erros que se cometem nas outras fracções granulométricas, quando se consideram os "diâmetros" das partículas.

De qualquer modo, e apesar das limitações inerentes às dimensões dos elementos e, consequentemente, das amostras a considerar, a granulometria dos elementos muito grosseiros é, conceptualmente, a mais fácil. Desde finais do século XIX que têm sido apresentados vários métodos,

como o da medição com régua ou com craveira e o da mesa perfurada com orifícios de diferentes dimensões.

III.2.2. Granulometria de Sedimentos Grosseiros

Os problemas referidos a propósito da granulometria dos elementos muito grosseiros (cascalhos, seixos, etc.) são análogos aos que existem para os sedimentos grosseiros (areias). No entanto, se para os primeiros é relativamente fácil determinar individualmente o parâmetro escolhido (peso, volume, eixo maior, eixo médio, etc.), o mesmo não acontece, obviamente, com os cascalhos e areias.

Se o método quase unanimemente aceite para a granulometria dos cascalhos é o da peneiração, já o mesmo não se verifica no que se refere às areias. Efectivamente, muitos investigadores defendem que o método cientificamente mais correcto para estudar a distribuição granulométrica das partículas é o da sedimentação, em que se determina um parâmetro cujo significado ambiental é mais ou menos directo (a velocidade de sedimentação e/ou o diâmetro de sedimentação), e não o da peneiração, em que se utiliza um parâmetro (diâmetro de peneiração) que não tem qualquer relação com o comportamento hidrodinâmico das partículas.

Contudo, o método da sedimentação é relativamente pouco utilizado pois que:

- a) não é fácil adquirir equipamentos deste tipo no mercado (mundialmente existem apenas duas ou três pequenas empresas que os fornecem a preços bastante elevados);
- b) os equipamentos comerciais não estão, por via de regra, calibrados, e utilizam diversas leis de queda de partículas, o que torna difícil a comparação de resultados;
- c) a construção pelos laboratórios interessados é difícil pois que exige bastante tempo, grande esforço de concepção e oficinas bem apetrechadas;

Por essas razões, o método mais divulgado para efectuar a análise granulométrica de areias continua a ser o da peneiração.

III.2.2.1. Método da Peneiração

O método mais divulgado para efectuar a análise granulométrica de sedimentos grosseiros é o da peneiração.

Um peneiro para este tipo de análise sedimentológica consiste num suporte metálico (latão, alumínio, inox, etc.) cilíndrico que serve de suporte a uma rede (geralmente metálica mas que, nalguns casos, pode ser de outro material, designadamente plástico) de malha calibrada (fig. 13).



Fig. 13 - Peneiro utilizado em análise granulométrica. Neste caso trata-se de peneiro com rede inox de 62 μ .

Os peneiros estão concebidos para poderem ser encaixados uns nos outros de modo a formarem uma coluna de peneiração. Na parte superior desta coluna existe uma tampa para evitar perdas de material durante a peneiração, e na base encaixa-se um peneiro "cego", denominado "pan", destinado a receber as partículas menores que atravessaram toda a coluna sem serem retidos em nenhum dos peneiros.

A escolha da série de peneiros é função dos objectivos. Para análises rápidas utiliza-se, normalmente, uma série de peneiros (fig. 15) de ϕ em ϕ , isto é, peneiros com malhas de 2mm, 1mm, 0,5mm, 0,250mm, 0,125mm e 0,063mm. Para análises mais pormenorizadas utilizam-se séries de peneiros de 1/2 em 1/2 ϕ ou, mesmo, de 1/4 em 1/4 de ϕ . É extremamente raro utilizarem-se séries mais densas dada a morosidade e o trabalho que essas análises implicam.

Normalmente efectua-se a peneiração a seco. Todavia, para algumas aplicações especiais podem efectuar-se peneirações via húmida.

Para se efectuar a análise granulométrica há que garantir que a dimensão da população de partículas (isto é, o peso da amostra) é estatisticamente válida. Caso tal não aconteça, corre-se o risco dos resultados de todo o trabalho de análise granulométrica, bastante moroso, não terem significado.

O assunto tem sido estudado por vários autores. Há que garantir que o número de partículas a analisar é estatisticamente suficiente, o que não é fácil atendendo à heterometria dos sedimentos. Há certo consenso de que o peso da amostra a peneirar é função do elemento de maiores dimensões aí presente. Os resultados não apresentam, contudo, elevada convergência. Na figura 14 representam-se algumas curvas propostas por diferentes autores.

Antes de se efectuar a peneiração de grosseiros (areias e cascalhos), é normal passar a amostra, via húmida, por um peneiro de inox de 63 μ (4 ϕ), com o objectivo de retirar à amostra todas as partículas finas. No caso de se pretender efectuar a granulometria dos finos, o material que passa pelos filtros deve ser guardado. Se não se pretende efectuar essa análise, basta colocar o peneiro com a amostra debaixo de uma torneira um pouco aberta e, com uma vareta, remexer o sedimento até que a água que sai por baixo do peneiro seja clara e transparente, isto é, revele não ter já materiais em suspensão.

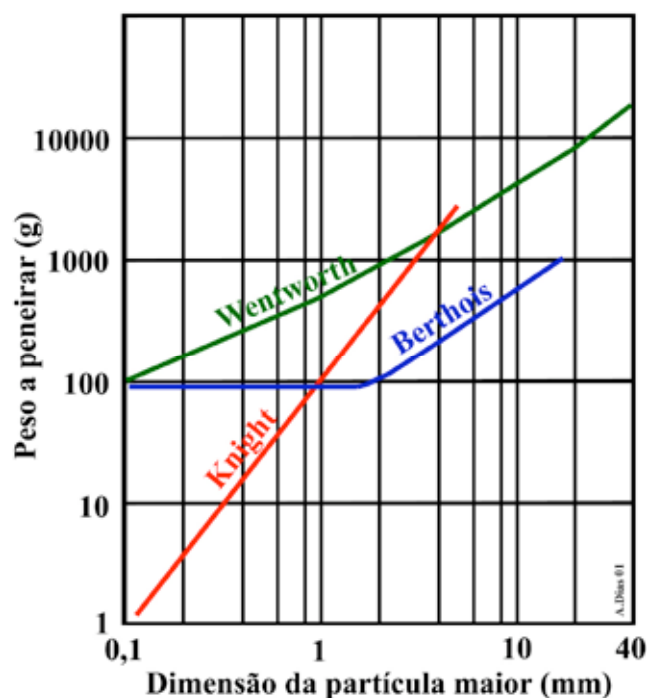


Fig. 14 - Propostas de diferentes autores para determinação do peso da amostra a peneirar em função do maior elemento presente no sedimento (adaptado de Carvalho, 1965).

A amostra a peneirar deve, então, ser sujeita a completa secagem. Utiliza-se, geralmente, para tal, uma estufa regulada para um temperatura relativamente baixa, da ordem dos 40 a 60°C.

Após secagem, a amostra deve ser cuidadosamente pesada de modo a poderem estimar-se eventuais perdas que possam ocorrer durante o processo de peneiração e de pesagem das fracções de peneiração.

A coluna de peneiração é agitada por um aparelho vibratório, designado por "agitador de peneiros" (fig. 15), o qual imprime aos peneiros movimentos de elevada frequência que viabilizam a peneiração das partículas. Em geral, os agitadores de peneiros imprimem simultaneamente movimentos verticais e horizontais.

O tempo de peneiração é função do peso da amostra a peneirar. Aceita-se, normalmente, que 10 a 15 minutos são suficientes para peneirar uma amostra média.

Após a peneiração há que pesar cuidadosamente o material retido em cada um dos filtros. São as fracções de peneiração. É normal que o peso total das fracções de peneiração seja um pouco inferior ao da amostra original,

devido a partículas que se perderam em todo o processo. São aceitáveis perdas até 1% do peso original.



Fig. 15 - Agitador de peneiros e coluna de peneiração utilizados no CIACOMAR (Univ. Algarve).

Antes de efectuar nova peneiração devem-se limpar cuidadosamente os peneiros, para o que frequentemente se utilizam aparelhos de ultra-sons. A finalidade desta operação é a de retirar das redes quaisquer partículas que aí possam estar presas e que poderiam ir contaminar a nova amostra a analisar.

III.2.2.2. Método da Sedimentação

a) Introdução

O método mais comum, mais divulgado e de montagem mais fácil para efectuar a análise granulométrica de sedimentos é, sem dúvida, o da granulometria por peneiração. Todavia, para análise laboratorial de elevado número de amostras, é desejável dispor de método rápido, que possua elevada acurácia e precisão de resultados e que, simultaneamente, elimine ao máximo a intervenção do elemento humano desde o início da análise até ao tratamento estatístico final dos dados. Estas foram algumas das razões que determinaram uma cada vez maior divulgação e utilização, principalmente na segunda metade do século XX, do método da granulometria por sedimentação.

A técnica de análise granulométrica de sedimentos por sedimentação das partículas no seio de um fluido não é, basicamente, um método novo. Efectivamente, já em 1915 Odén propunha método análogo embora, na altura, não tivesse sido objecto de grande aceitação. Alguns outros equipamentos deste tipo foram construídos nas décadas seguintes, designadamente o de van Veen (1936) e o de Emery (1938), embora a tecnologia então disponível não permitisse a existência de aparelhos de elevada precisão. Assim, apesar do reconhecimento da utilidade deste método, directamente complementar dos que eram mais utilizados na granulometria de finos (de onde ressalta, na altura, a pipetagem), não se verificou adesão significativa da comunidade científica.

O desinteresse pelo método parece ter surgido face às discrepâncias existentes entre os resultados das granulometrias efectuadas por peneiração e por sedimentação, discrepâncias essas derivadas não só dos diferentes parâmetros físicos medidos por cada um dos métodos, mas também devido à pequena sensibilidade da aparelhagem de medida existente na época, ao dimensionamento inadequado dos tubos de sedimentação, à necessidade de utilização de grandes quantidades de amostragem, e ao conhecimento imperfeito das leis que regem a queda das partículas no seio de um fluido.



Fig. 16 - Tubo de sedimentação (MacroGranometer) existente no CIACOMAR (Univ. Algarve),

Com o desenvolvimento tecnológico e científico, designadamente no campo da electrónica, verificado após a 2ª Guerra Mundial, foram-se criando, progressivamente, as condições necessárias à utilização prática do método de granulometria por sedimentação. Consequentemente, verifica-se, no decurso das décadas de 60 e 70, uma cada vez maior adopção da técnica envolvida.

Entre os argumentos apontados para utilização deste método em detrimento do da peneiração ressaltam os seguintes:

- maior rapidez, factor de grande importância, principalmente quando o estudo envolve grande número de amostras;
- a sedimentação das partículas na natureza (e correspondente granulometria dos sedimentos) é determinada mais pelo comportamento hidráulico que pelo diâmetro de peneiração;
- a intervenção humana e manuseamento da amostra até obtenção da curva granulométrica é, no método da sedimentação, bastante menor que no método da peneiração;
- a quantidade de amostra necessária é muito menor utilizando o sedimentómetro, sem, todavia, se diminuir o rigor estatístico dos resultados;
- possibilidade de, em qualquer altura, se poderem efectuar leituras das percentagens acumulativas a intervalos granulométricos diferentes, sem necessidade de nova análise da amostra;
- possibilidade de diminuir o intervalo de leitura dos dados até limites que, só com grande dispêndio de tempo e meios seriam atingidos com a peneiração.

Existem dois tipos básicos de aparelhagens que se socorrem de técnicas de sedimentação:

- Aparelhos que utilizam métodos de acumulação, nos quais a quantidade de material em sedimentação vai sendo medido volumetricamente (como os de Oden, 1915; van Veen, 1936, Emery, 1938 e Poole, 1957) ou gravimetricamente (como os de Doeglas, 1946; Plankeel, 1962; van Andel, 1964; Felix, 1969; Gibbs, 1972, 1974; Reed *et al.*, 1975; Flemming, 1977 e Dias & Monteiro, 1978).
- Aparelhos que utilizam métodos de decréscimo de concentração, nos quais a concentração do material em queda é medido por pressão, por absorção de radiação luminosa ou de raios X, ou por outros métodos análogos (como os de Weigner, 1978; Bascomb, 1968; Crowther, 1927; Knapp, 1934; Appel, 1953, Brezina, 1969; Swift *et al.*, 1971 e Nelsen, 1976).

Da análise do historial do método parece poder concluir-se que:

- a) as aparelhagens baseadas em medidas volumétricas caíram em desuso, ao passo que os outros tipos de aparelhagens ampliaram a gama de aceitação;
- b) as relações entre dimensionamento dos tubos de sedimentação, quantidade de amostra a utilizar, acurácia e precisão dos resultados são já bastante conhecidas, o que conduz a maior aceitação do método e, conseqüentemente, mais vasta adopção e utilização das técnicas envolvidas;
- c) verifica-se tendência generalizada para a utilização intensiva do tratamento automático dos dados com

aparelhagens electrónicas acopladas aos tubos de sedimentação.

b) Fundamentos Teóricos da Sedimentação

Uma partícula cai com velocidade uniforme (denominada velocidade terminal) no seio de um fluido quando as forças de impulsão e de atrito a que a partícula está sujeita igualam a força da gravidade. Para formas análogas, essa velocidade varia com as dimensões das partículas. A transformação do valor da velocidade terminal (ou velocidade de sedimentação como também é apelidada) no valor do diâmetro da partícula depende de múltiplos factores, nomeadamente do número de Reynolds, do atrito, do factor forma, das correntes de convecção induzidas no fluido, das interacções entre as partículas, das rugosidade da superfície das partículas, do efeito de parede, etc...

Apesar dos múltiplos trabalhos que, desde há mais de um século, têm sido efectuados com a finalidade de determinar as relações existentes entre a velocidade terminal e o diâmetro das partículas, bem como de compreender as relações existentes entre os muitos parâmetros físicos envolvidos na queda das partículas no seio de um fluido, não se conseguiu ainda obter, por via teórica, uma lei de queda geral que fosse inteiramente comprovada na prática, na gama de dimensões das partículas sedimentares, isto é, desde décimos de micra até centímetros. As duas leis teóricas fundamentais que traduzem a queda das partículas nas condições acima enunciadas são a Lei de Stokes, enunciada por este autor em 1854, e a Lei do Impacto, desenvolvida por Newton em 1687.

A Lei de Stokes baseia-se no princípio de que uma esfera, ao cair no seio de um fluido, está sujeita à actuação de duas forças de sinal contrário: a da resistência R_f , devida à viscosidade do fluido

$$R_f = 6 \pi r \eta v$$

e à força da gravidade

$$F_g = 4 \pi r^3 r_s g$$

cuja actuação é moderada pela impulsão, a qual é dada pelo princípio de Arquimedes

$$I = 4/3 \pi r^3 r_f g$$

Assumindo que a velocidade inicial da esfera é nula, só se verifica movimento quando a força gravitacional efectiva ($F_g - I$) supera a resistência R_f . A partícula estará, então, sujeita a movimento acelerado, até que a sua velocidade induz no fluido uma resistência que iguala exactamente a força gravitacional efectiva. A esfera entrará então em velocidade de queda constante (dita velocidade terminal).

Nas condições acima referidas, a equação que traduz o movimento pode ser expressa como

$$6 r \eta v = \frac{4}{3} r^3 \pi (\rho_s - \rho_f) g$$

sendo η o coeficiente de viscosidade do fluido, em poises (g/s.cm), r o raio da esfera em centímetros, v a velocidade terminal (cm/s), g a aceleração da gravidade (g/cm), ρ_s a densidade da esfera (g/cm), e ρ_f a densidade do fluido

(g/cm). Resolvendo a equação em ordem a v , obtêm-se a expressão clássica da Lei de Stokes:

$$v = \frac{2}{9} g \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\eta} r^2$$

Os limites de validade da Lei de Stokes são controversos. Muitos autores tomam como limite superior de validade o diâmetro $2,7\sigma$ ($= 153,9\mu$), embora Blanchard (1967) tenha chegado experimentalmente a valor bastante menor.

Segundo este investigador, a Lei de Stokes é apenas válida para condições em que o Número de Reynolds Re ($Re = 2 r v r_f / \nu$) é inferior a 0,02 ou seja, para esferas de quartzo, com diâmetro inferior a 25μ ($\simeq 5,3\sigma$), sedimentando em água.

Para partículas maiores, a resistência devida à viscosidade do fluido é pequena, podendo ser desprezada. A resistência será então devida ao impacto do líquido na esfera em queda, isto é, a queda da partícula obedecerá à Lei do Impacto de Newton:

$$v = \sqrt{\frac{4}{3} g \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} r}$$

As equações expressas não são comprovadas pela prática, principalmente no domínio granulométrico das areias (2mm a 62μ). Por essa razão têm sido aperfeiçoadas e adaptadas a diferentes circunstâncias por vários autores. Entre essas modificações ressalta a Equação de Rubey (1933) que combina as fórmulas das Leis de Stokes e do Impacto numa equação geral:

$$v = \frac{\sqrt{\frac{4}{3} g (\rho_s - \rho_f) r^3 + 9 \eta^2 - 3 \eta}}{\rho_f r}$$

A equação foi testada com dados obtidos por via experimental, verificando-se coincidência aceitável entre estes e aquela. Todavia, as partículas utilizadas não eram esféricas. Existe, portanto, subvalorização dos valores das velocidades de sedimentação determinadas em relação aos que se verificariam caso se tratasse de esferas. Consequentemente, comparando valores obtidos posteriormente para esferas de densidade 2,65 com valores teóricos determinados com a Equação de Rubey, verifica-se que esta subvaloriza os resultados no domínio da Lei de Impacto.

A principal dificuldade do estabelecimento de uma lei geral de queda que seja válida para um domínio suficientemente lato de diâmetros de partículas consiste no facto de que a velocidade terminal depende do coeficiente de arraste C_D (*drag coefficient*) que, por sua vez, varia com o Número de Reynolds (Re).

O conceito de arraste do fluido (*drag fluid*) baseia-se no reconhecimento de que, quando um fluido e um sólido apresentam movimento relativo, se desenvolvem forças que se opõem ao movimento, tendendo a restabelecer o equilíbrio. A equação de arraste (*drag*) pode ser expressa da forma seguinte (Fórmula 5).

$$F_D = C_D A \rho_f \frac{v^2}{2}$$

em que: F_D é a força de arraste que se opõe ao movimento, C_D é o coeficiente de arraste, A é a área do sólido projectada num plano normal ao movimento, r_f é a densidade do fluido e v a velocidade relativa sólido - fluido.

Explicitando C_D , obtêm-se a fórmula do coeficiente de arraste, concluindo-se que se trata de um coeficiente adimensional.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} A \rho_f v^2}$$

Tirando da expressão precedente o valor da velocidade:

$$v = \sqrt{\frac{2 F_D}{C_D A \rho_f}}$$

No caso de partículas sólidas em queda no seio de um fluido em repouso, pode afirmar-se que, quando a partícula entra em velocidade terminal, a força de arraste (*drag force*) iguala a força da gravidade, sendo, portanto, nula a resultante das forças que actuam o sólido. A partícula fica, por conseguinte, animada de movimento uniforme. Pode então escrever-se que:

$$v = \sqrt{\frac{2 (\rho_s - \rho_f) g a_3 d^3}{C_D \rho_f a_2 d^2}}$$

representando a_3 um factor de volume que, no caso específico da esfera, equivalerá a $p/6$, e a_2 um factor de área projectada em plano ortogonal ao movimento que, no caso da esfera, será $p/4$.

Simplificando,

$$v = \sqrt{\frac{2 (\rho_s - \rho_f) g a_3 d}{C_D \rho_f a_2}}$$

obtém-se uma equação geral que traduz a velocidade terminal de qualquer partícula sólida, homogénea, em queda no seio de fluido estático, de dimensões infinitas.

No caso das partículas apresentarem forma esférica facilmente se verificará que

$$v = \sqrt{\frac{4 (\rho_s - \rho_f) g d}{3 C_D \rho_f}}$$

O coeficiente de arraste no domínio da Lei de Stokes, domínio esse onde predominam as forças de viscosidade e o arraste é do tipo viscoso (ou seja, para Números de Reynolds inferiores a 0,1), é dado por:

$$C_D = \frac{24}{Re}$$

expressão esta deduzida teoricamente (Allen, 1970) e verificada experimentalmente. Para valores de Re maiores, os efeitos da inércia predominam sobre os viscosos, e o arraste devido à forma apresenta importância progressivamente maior. À medida que o Número de Reynolds aumenta, decresce gradualmente o valor de C_D . Para valores de Re entre 10^3 e 10^4 o valor de C_D , para corpos esféricos, torna-se aproximadamente igual a $L/2$ e a velocidade terminal aproximadamente proporcional à raiz quadrada do diâmetro da esfera.

Os valores obtidos com as equações teóricas não são frequentemente corroborados pela prática. Efectivamente, a

lei teórica pressupõe a queda de partículas sólidas, convexas e homogêneas, num fluido estático também homogêneo, de dimensões infinitas e livre de quaisquer interferências. Como é óbvio, na aplicação prática do método, tais condições não se verificam. Certo é que, padronizando as condições laboratoriais, se podem aceitar como constantes determinados parâmetros físicos, o que permite reduzir o número de variáveis a calcular. Todavia, os parâmetros físicos padronizáveis são função dos objectivos, e diferentes, caso se pretendam determinar densidades de partículas esféricas, diâmetro de esferas isoladas ou granulometrias de sedimentos.

No método da granulometria por sedimentação pretende-se determinar o diâmetro equivalente das partículas partindo da velocidade terminal.

As dificuldades encontradas ao tentar aplicar a lei geral a casos concretos, bem como a não concordância dos resultados obtidos por via prática com os determinados por via teórica, conduziram à tentativa de estabelecimento de expressões baseadas em elementos teórico-práticos ou de equações puramente empíricas, válidas só para certos domínios, mas cujos resultados fossem corroborados pela prática. Várias foram as equações propostas durante o século XX. Contudo, por via de regra, mais não são do que aproximações, válidas para certos domínios de diâmetro e forma das partículas, mas incorrectas para outros.

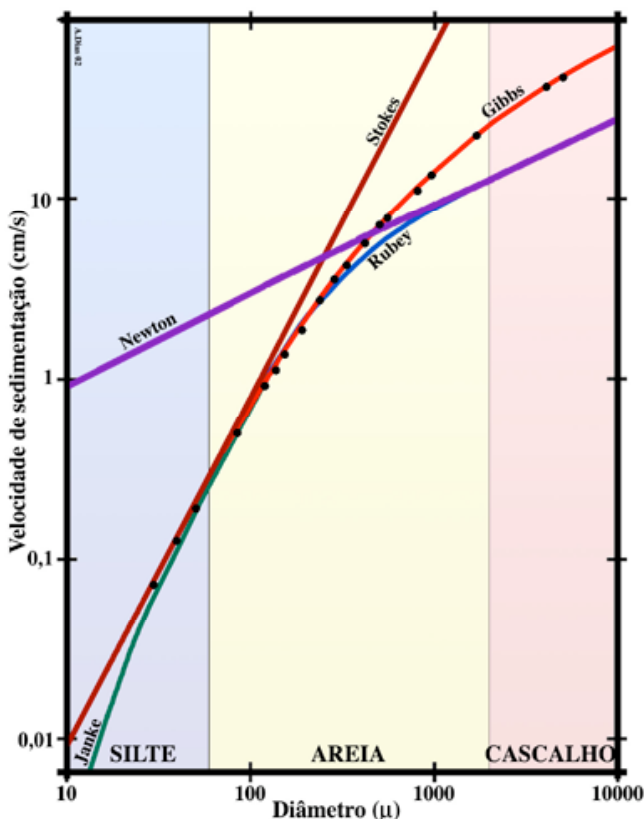


Fig. 17 Velocidade de sedimentação versus diâmetro de esferas com densidade 2,65. Os pontos negros correspondem aos valores observados por Gibbs *et al.* (1971). As linhas coloridas traduzem as equações de Stokes, de Newton (ou do Impacto), de Rubey, de Janke e de Gibbs *et al.* Adaptado de Gibbs *et al.* (1971).

Mais recentemente, Gibbs, Matthews & Link (1971) apresentaram uma boa aproximação da equação que traduz a queda das partículas em água, válida para partículas esféricas de 0,1 micra a 6 centímetros, a qual foi estabelecida empiricamente com base nas velocidades de sedimentação determinadas para 216 esferas de vidro de diferentes diâmetros

$$v = \frac{-3\eta + \sqrt{9\eta^2 + g r^2 (\rho_s - \rho_f) (0,015476 + 0,19841 r)}}{\rho_f (0,011607 + 0,14881 r)}$$

explicitando o raio:

$$r = \frac{0,055804 v^2 \rho_f + \sqrt{0,003114 v^4 \rho_f^2 + [g(\rho_s - \rho_f)] (4,5 \eta v + 0,08705 v^2 \rho_s)}}{(\rho_s - \rho_f)}$$

Para esferas com diâmetro inferior a 50μ a equação de Gibbs, Matthews & Link revela resultados análogos aos da Lei de Stokes. Para esferas com diâmetros superiores a 5mm a expressão gráfica da equação é paralela à da Lei do Impacto de Newton, embora apresente valores sensivelmente maiores. O domínio entre 5mm e 50μ é uma zona de transição entre as duas rectas que traduzem as Leis de Stokes e Newton (fig. 17). Grande parte dos sedimentómetros utilizam a expressão de Gibbs, Matthews & Link (1971).

c) Conceito de Diâmetro Equivalente

Os sedimentos naturais não são constituídos por conjuntos de partículas esféricas e de igual densidade, pressupostos exigíveis para, utilizando quaisquer das equações expostas, determinar o diâmetro da partícula. Verifica-se então, a necessidade de introduzir o conceito de diâmetro de sedimentação de uma partícula, o qual se define como sendo o diâmetro da esfera com densidade e velocidade terminal idênticas à da partícula.

Para sistematização e comodidade de trabalho utiliza-se ainda o conceito de diâmetro equivalente de uma partícula (Oden, 1915; Waddel, 1934), o qual é igual ao diâmetro da partícula esférica, de densidade pré-estabelecida que, no mesmo fluido, atinge velocidade terminal idêntica à da partícula. Geralmente toma-se como densidade de referência a do quartzo (2,65).

Utilizando os conceitos acima introduzidos, está-se apto a analisar granulometricamente qualquer sedimento, exprimindo as velocidades de queda em diâmetros equivalentes. É necessário, no entanto, ter sempre presente que as classes e os parâmetros granulométricos são determinados com base em diâmetros equivalentes, distintos, como é óbvio, dos diâmetros de peneiração tradicionalmente usados.

d) Velocidade Terminal e Início do Movimento

O método descrito baseia-se na medição do tempo de queda das partículas numa coluna de água, partindo do princípio de que a velocidade é constante. Porém, no instante $t = 0$ (introdução da amostra) a velocidade será $v \simeq 0$. As partículas apresentarão movimento acelerado até atingirem a velocidade terminal, momento a partir do qual entrarão em movimento uniforme. As velocidades determinadas praticamente, partindo do princípio de que a velocidade é

sempre constante, virão então afectadas de erro que subvalorizará o valor real.

Weysenhoff (1920) estudou o assunto em profundidade, tendo desenvolvido uma equação bastante complexa que permite o cálculo do tempo necessário para uma partícula esférica entrar em velocidade terminal. Tal intervalo de tempo, para esferas de diâmetro 0,05mm, por exemplo, é da ordem de 0,003 segundos. Calculando o erro introduzido nas velocidades determinadas praticamente, conclui-se que tal erro é desprezível, se o comprimento do trajecto de sedimentação for relativamente longo (maior do que um metro).

e) Sedimentómetros de Areias do tipo Gibbs

Os sedimentómetros de areias tipo Gibbs (fig. 18) são os mais divulgados. Os que existem (ou existiam) nos Serviços Geológicos de Portugal, no Instituto Hidrográfico e na Universidade do Algarve (CIACOMAR) são deste tipo.

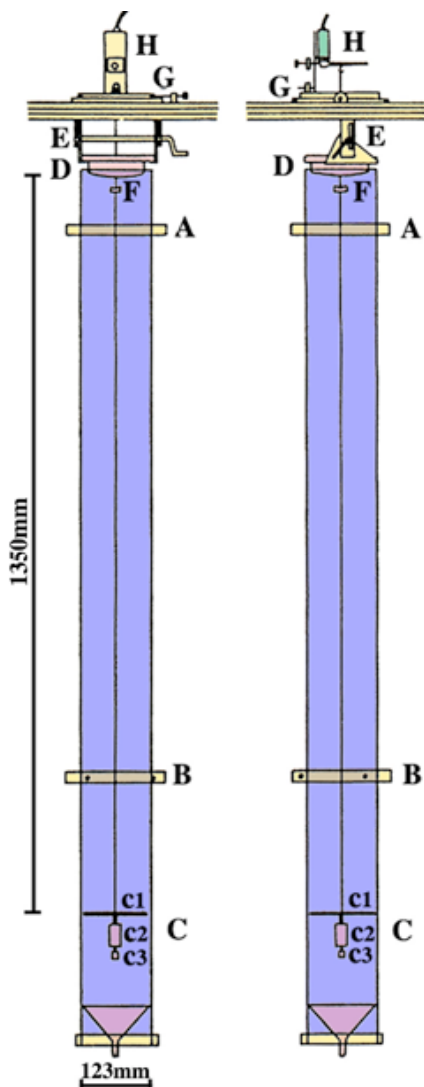


Fig. 18 Desenho esquemático do sedimentómetro (vistas frontal e lateral). A – Sistema cardan; B – Anel de fixação do tubo; C – Prato (c1), bóia (c2) e peso (c3); D – Porta-amostras; E – Sistema de descida do porta- amostras; F - Mira para centragem do fio de suporte; G – Sistema de centragem do fio; H – Célula de pressão, braço e contrapeso. Adaptado de Dias (1987).

São constituídos essencialmente por 3 partes:

- Tubo de sedimentação e acessórios
- Sistema de medição e amplificação
- Sistema de registo

A descrição que se segue corresponde ao sedimentómetro que existia nos Serviços Geológicos de Portugal, e é baseada em Dias & Monteiro (1978) e Dias (1987).

Tubo de Sedimentação

O tubo de sedimentação é constituído por cilindro oco, de vidro acrílico, com comprimento de 160 cm e diâmetro interno de 123 mm. A parte inferior é tapada por um funil ligado a tubo de borracha (munido de pinça de mola), por onde se efectua a drenagem do fluido e das areias utilizadas. O conjunto está suspenso de sistema Cardan, fixo na parte superior, cujo objectivo é manter a verticalidade do tubo.

Isolado do tubo propriamente dito, localizado em posição superior a este, existe o sistema de introdução da amostra. Fundamentalmente é composto pelo suporte do porta-amostras (duas calhas horizontais), pelo mecanismo de descida desse suporte (sistema da alavanca e cremalheiras) e pelo porta-amostras. Este é construído em vidro acrílico, compondo-se de base prismática quadrangular que vai apoiar no suporte supra-citado e de um cilindro de base ligeiramente convexa onde se distribui, por aderência, a amostra.

Também isolado do tubo principal e do mecanismo de introdução da amostra, existe o prato de recepção. Este tem diâmetro ligeiramente inferior ao do tubo (115 cm) e é composto pelo prato propriamente dito e por um sistema de bóia e peso (centrados com o eixo do prato e solidários com este) cuja função é o amortecimento das vibrações induzidas pelo impacto das partículas. O conjunto está suspenso de um dos ganchos do braço da célula de pressão por fio de aço inoxidável.

Existe ainda um mecanismo de centragem do fio que sustem o prato, formado por dois parafusos dispostos ortogonalmente que deslocam a placa onde está montada a célula, e por duas miras localizadas na parte superior do tubo. Este mecanismo permite deslocar o sistema até o fio estar perfeitamente centrado em relação ao tubo.

Sistema de Medição e Amplificação

É constituído por:

- Célula de pressão
- Braço da célula
- Leitor (Readout)

A célula de pressão utilizada é uma “Universal Transducing Cell Statham”, modelo UC2 (Green Cell), a qual permite medições de peso até 30g com a precisão de 0,01%. Acoplado à célula existe o braço de precisão (Micro-Sale Accessory, modelo UL5) munido de três ganchos que conferem ao braço capacidade de amplificação de 2, 5 e 10 vezes.

A célula está ligada a um leitor (Readout) de precisão (Statham, modelo SC10), o qual tem por função excitar a célula e receber o sinal dela proveniente. Todo o sistema de medição e amplificação está isolado dos restantes sistemas por amortecedores de espuma de borracha.

Funcionamento

Embora a utilização do tubo de sedimentação não se limite à análise de partículas da classe textural areia, o longo tempo requerido para análise de siltes e argilas torna este sedimentómetro inapropriado para esse fim.

É necessário quarterar em seguida a amostra até se obter quantidade tal que seja estatisticamente significativa mas que não seja de molde a falsear a curva interpretativa por interacção excessiva das partículas.

Este problema foi estudado por Gibbs (1972), que produziu um nomograma específico para o assunto (fig. 19).

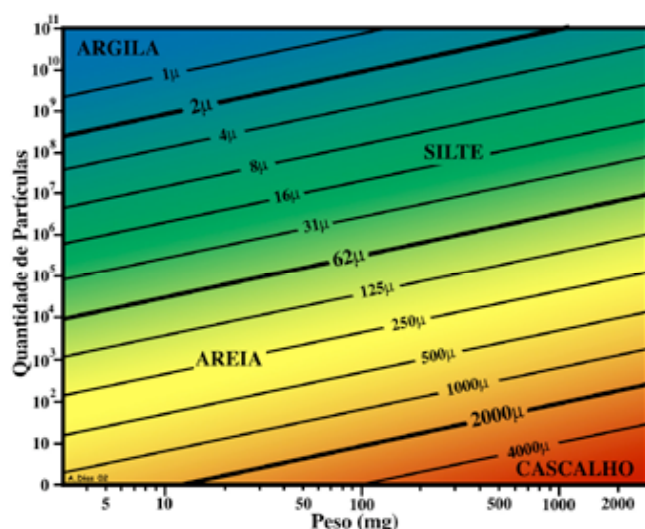


Fig. 19 - Nomograma para determinação prática do número de partículas ($d = 2,65$) em função do peso. Adaptado de Gibbs (1972).

Pela razão invocada, a amostra é preliminarmente passada pelos peneiros de malha 2mm e 63μ , obtendo-se, deste modo, amostra constituída somente por partículas da classe areia.

Para esferas de 63μ de diâmetro, é suficiente uma amostra com 0,1g (3×10^5 esferas), mas para esferas com 2mm é necessário um peso mínimo de 1g (100 esferas) para que a amostra seja estatisticamente aceitável. Por outro lado, amostras com esferas de 63μ e mais de 1g de peso revelam elevada inacurácia devido à interacção das partículas ao sedimentarem. Com base nestas considerações, adoptaram-se os pesos seguintes para as amostras:

Areia grosseira.....	1,3g a 1,7g
Areia media	0,8g a 1,3g
Areia fina	0,3g a 0,8g

Utilizando amostras com estes pesos, e atendendo ao diâmetro do tubo e à altura da queda, é de esperar uma precisão média de cerca de 2%.

Quarteada a amostra até se atingir a quantidade requerida, é esta distribuída uniformemente na superfície inferior do porta-amostras e humedecida com líquido humidificante (água com um pouco de detergente ou Kodak Photoflo) até ficar aderente.

O porta-amostas é então invertido no suporte próprio do mecanismo de descida da amostra, ficando rigorosamente horizontal.

Quando a amostra toca na superfície do fluido que enche o tubo (água destilada desgaseificada) verifica-se diminuição da tensão superficial e as partículas entram em queda. Nesse exacto momento, um parafuso regulável, solidário com o mecanismo de descida, prime um micro-interruptor ligado ao sistema de aquisição automática de dados, iniciando-se deste modo o registo. A amostra vai então sedimentando no prato localizado a uma distância de 135cm abaixo da superfície da água. O facto do prato ter diâmetro inferior ao do tubo evita que os grãos que caem junto à face interna deste (afectados pelo “efeito de parede”) se depositem no prato e sejam, conseqüentemente registados. As oscilações desenvolvidas pelo impacto dos grãos maiores no prato são parcialmente amortecidas pelo sistema de bóia e peso existente sob o prato propriamente dito.

À medida que a amostra vai sedimentando no prato, aumenta a tensão exercida no braço da célula. Conseqüentemente (por sistema de alavanca), verifica-se uma maior pressão no pino da célula a qual, por sua vez, debita maior voltagem para o leitor (Readout). O sinal saído deste é amplificado e registado. Obtém-se, deste modo, a curva acumulativa do peso em função do tempo.

A existência de dois transdutores de temperatura, um na parte superior, outro na parte inferior do tubo, permitem a determinação da temperatura média do fluido aquando da sedimentação.

III.2.3. Granulometria de Finos

III.2.3.1. Problemática da Granulometria de Finos

A granulometria das classes texturais finas, isto é, do silte e da argila, é problemática. Efectivamente, levantam-se várias questões que, até ao momento, não foram, ainda, satisfatoriamente resolvidas, designadamente:

- Como existe uma impossibilidade técnica de construir peneiros com as malhas adequadas às dimensões destas partículas, utilizam-se outros métodos granulométricos, geralmente baseados na velocidade de queda (também designada por velocidade de sedimentação ou velocidade terminal). Tal levanta muitos problemas quando se pretende estudar a distribuição granulométrica da totalidade do sedimento, pois que, nesse processo, se estão a misturar grandezas físicas distintas traduzidas nos diâmetros de peneiração (no que se refere às classes texturais grosseiras: cascalhos e areias) e nos diâmetros de sedimentação (deduzidos das velocidades de sedimentação, no que concerne às classes texturais finas: siltes e argilas). É evidente que, por via de regra, surgem inconsistências na zona da distribuição

granulométrica correspondente à junção dos dados provenientes dos dois métodos, principalmente no que se refere às areias muito finas e aos siltes grosseiros.

- b) O deficiente conhecimento científico da Lei de Queda das partículas constitui grave problema suplementar. Efectivamente, se para as partículas mais finas a Lei de Stokes parece ser plenamente satisfatória, já quando se entra no domínio das partículas menos finas (siltes, principalmente os médios e grosseiros) começam a surgir desvios a esta lei, tanto maiores quanto maior for o diâmetro da partícula. A utilização da Lei de Stokes a todo o domínio da argila e do silte introduz erros não quantificáveis até ao momento.
- c) Na análise granulométrica dos finos utilizam-se geralmente diâmetros de sedimentação. Contudo, o diâmetro de sedimentação é uma grandeza física teórica que, na realidade, não é mensurável. Na sua determinação assume-se que as partículas são perfeitamente esféricas, que a superfície das partículas é completamente lisa e regular, e que todas têm a mesma densidade. Não existe nenhuma regra que permita, através da velocidade de sedimentação, determinar um diâmetro mensurável das partículas. Consequentemente, a distribuição que se obtém pelo método da sedimentação é uma distribuição hipotética.

Acresce que o próprio significado da granulometria das partículas finas é extremamente questionável. Com efeito, em meios naturais, as partículas destas dimensões, principalmente as da classe textural argila, sofrem frequentes processos de aglutinação, floculação, dispersão, etc. Ao realizar-se a análise granulométrica tenta-se determinar a distribuição dos diâmetros das partículas individuais. Como, na Natureza, estas estão em estados de agregação variáveis, não existe correspondência entre o que se determina em laboratório e o que existe na realidade.

III.2.3.2. Influência do Dispersante

Como se referiu, a análise granulométrica de finos é efectuada, normalmente, após dispersão da amostra de sedimento, isto é, com as partículas individualizadas. Embora existam vários dispersantes disponíveis no mercado, os mais utilizados são o Hexametáfosfato de Sódio e o Calgon, em soluções da ordem de 0,5%.

As distribuições granulométricas são normalmente bastante diferentes consoante o material está ou não disperso. A influência do dispersante pode ser responsável por modificações de apenas algumas unidades percentuais a mais de 20%.

O efeito aludido é bem visível na figura 20, onde se estão expressos os resultados de duas análises granulométricas da mesma amostra, sem e com dispersante. O dispersante provoca um significativo aumento da quantidade de partículas no domínio inferior a 20μ , com correspondente diminuição no domínio superior a este diâmetro de sedimentação. Tal deve-se, obviamente, ao facto de, sem dispersante, muitas das partículas mais pequenas estarem aglomeradas (aglutinadas ou floculadas), constituindo partículas de maiores dimensões.

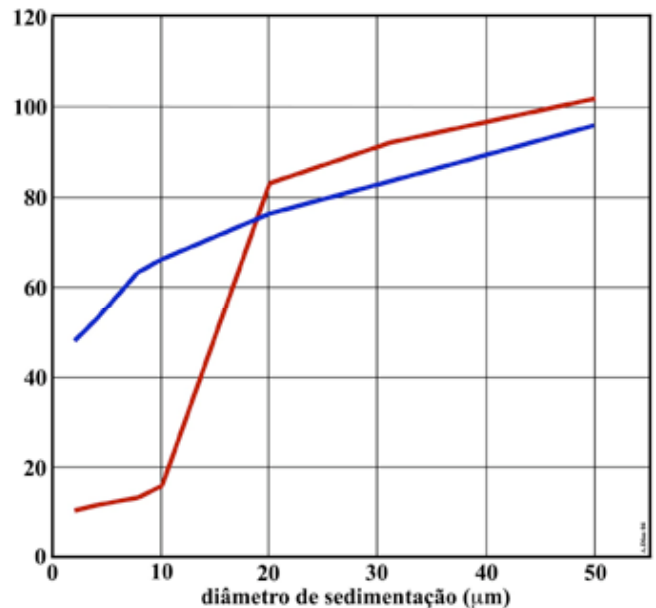


Fig. 20 - Comparação de duas análises granulométricas da mesma amostra efectuadas pelo método da pipetagem, sem utilização de dispersante (a vermelho), e após adição de dispersante. Adaptado de Skinner (2000).

Diferentes quantidades de dispersante provocam, também, em geral, pequenas alterações nos resultados, como se pode observar na figura 21, correspondentes a diferentes análises da mesma amostra, com percentagens diferentes de Calgon.

O aumento da concentração de dispersante provoca tendência para ampliação da percentagem de partículas mais finas. É de referir, porém, que excesso de dispersante tem, muitas vezes, efeito contrário, isto é, acaba por provocar aglutinação de partículas.

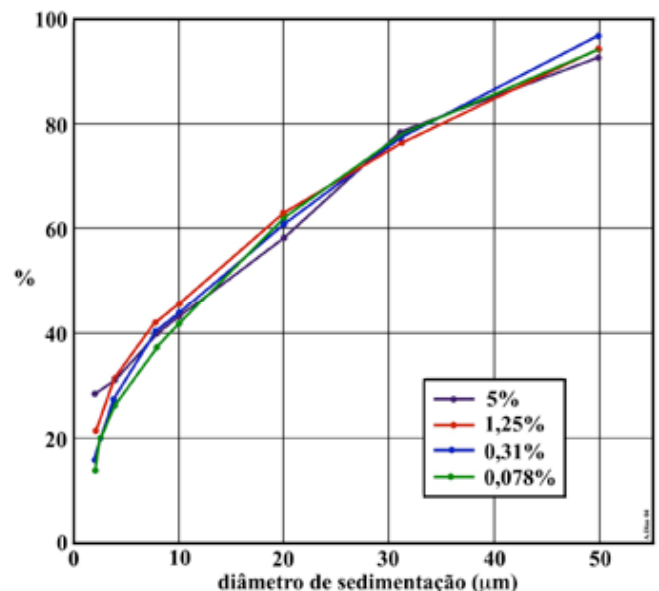


Fig. 21 - Efeito do acréscimo de dispersante (Calgon) na granulometria de sedimentos finos. Adaptado de Skinner (2000).

São vários os métodos classicamente empregues na determinação da granulometria das classes finas dos sedimentos. Alguns destes são referidos em seguida. É necessário ter em atenção, no entanto, que para cada método existe, em geral, grande variedade de equipamentos e de formas de aplicação.

III.2.3.3. Análise por Levigação

Na análise por levigação (fig. 22) separam-se, sucessivamente, as fracções mais finas da amostra, criando, para tal, correntes ascendentes. Normalmente utilizam-se séries de recipientes em que, em cada um, se deposita uma classe dimensional. A dimensão de cada recipiente e o fluxo hídrico têm que estar dimensionados por forma a efectivar-se a separação dimensional pretendida.

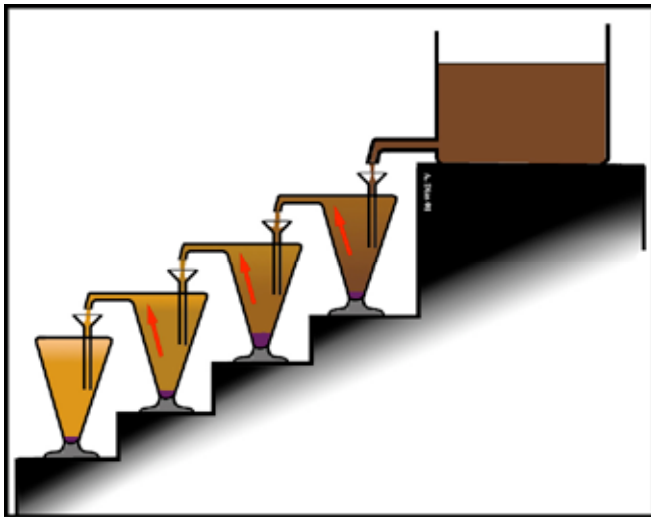


Fig. 22 - Aparelho de levigação de Schulze. Adaptado de Carvalho (1965).

III.2.3.4. Método da Pipetagem (Análise Descontínua por Sedimentação)

Neste método determina-se a quantidade de material fino existente em fracções dimensionais previamente estabelecidas, tirando proveito das velocidades de sedimentação de cada uma dessas fracções, delas retirando alíquotas por pipetagem.

A) Pré-Preparação da Amostra

Como procedimento normal, as classes finas sobre que se efectua a granulometria provém de uma separação prévia, utilizando peneiro de inox de 63μ (4ϕ) em via húmida, das classes grosseiras (cascalhos e areias) e das classes lutíticas (siltes e argilas). Com frequência, a quantidade de água com material fino resultante desta operação é grande, o que obriga a concentrar o material, isto é, reduzir a quantidade de água. Tal pode ser conseguido de várias formas. Dois dos métodos mais utilizados são a decantação, em que se deixa o material sedimentar até que a parte superior da água fique completamente transparente, procedendo então ao rejeito dessa água, e a utilização de velas porosas, isto é, de peças cerâmicas com porosidade desejavelmente inferior a 12ϕ ($0,24\mu$), ligadas a um sistema de vácuo; a água é assim extraída sem perda significativa de partículas.

Há toda a conveniência em se efectuar a "lavagem" da amostra, isto é, em retirar, tanto quanto possível, sais solúveis aí presentes. Utiliza-se para tal, obviamente, água destilada. No entanto, esta acção aumenta bastante o volume hídrico, pelo que implica novas operações de concentração da amostra. Em casos em que a presença de

sais é bastante elevada torna-se necessário proceder a repetidas operações de concentração da amostra.

B) Dispersão da Amostra

Antes de se efectuar a granulometria, a amostra é sujeita a dispersão e estabilização, com o objectivo de desaglutinar e desagregar as partículas ao máximo, por forma a que, desejavelmente, se obtenha uma suspensão em que as partículas estejam todas individualizadas e se mantenham, durante a análise, neste estado. Utilizam-se, para tal, substâncias alcalinizantes, com propriedades tamponizantes (estabilizadoras do pH), e que se combinam com os catiões plurivalentes subsistentes à lavagem.

Dois dos produtos mais utilizados são o Hexametáfosfato de Sódio e o Pirofosfato de Sódio. Em geral, para se obter uma suspensão dispersa e estabilizada, basta adicionar uma destas substâncias até se obter aproximadamente $\text{pH} = 8$. A amostra é vertida numa proveta de litro e, imediatamente antes da primeira colheita granulométrica, é agitada cuidadosamente até se ter a garantia que todas as partículas presentes se encontram em suspensão homogénea.

C) Pipetagem

Neste método determina-se a quantidade de material fino existente em fracções dimensionais previamente estabelecidas, tirando proveito das velocidades de sedimentação de cada uma dessas fracções, delas retirando alíquotas por pipetagem. Para tal, é necessário pipetar a alíquota a uma profundidade tal da proveta que garanta que, a esse nível, não existem já partículas maiores do que as da fracção pretendida, por já estarem em sedimentação a níveis mais profundos. Tal é conseguido aplicando a Lei de Stokes.

Na forma mais divulgada de aplicação deste método recorre-se a *Pipetas de Andreasen* (fig. 23).

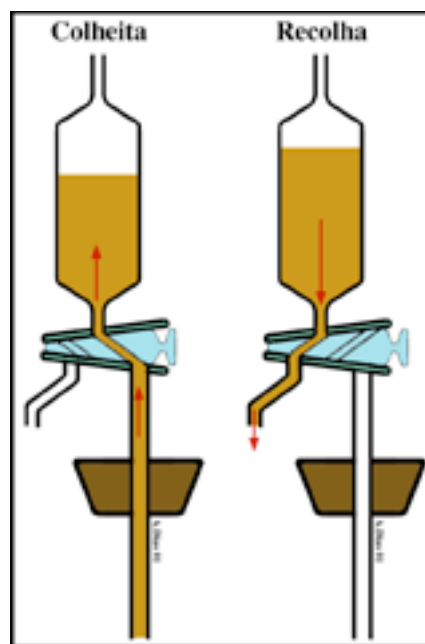


Fig. 23 - Esquema do funcionamento da pipeta de Andreasen

Tabela 5 - Tempos e profundidades de colheita para efectuar a granulometria de finos por pipetagem numa bateria de 6 provetas

h	m	s	Proveta 1	Proveta 2	Proveta 3	Proveta 4	Proveta 5	Proveta 6
0	-02	00	AGITAÇÃO					
0	00	00	4φ					
0	01	45	5φ					
0	07	00	6φ					
0	08	00	-	AGITAÇÃO				
0	10	00	-	4φ				
0	11	45	-	5φ				
0	17	00	-	6φ				
0	18	00	-	-	AGITAÇÃO			
0	20	00	-	-	4φ			
0	21	45	-	-	5φ			
0	27	00	-	-	6φ			
0	28	00	7φ	-	-			
0	33	00	-	-	-	AGITAÇÃO		
0	35	00	-	-	-	4φ		
0	36	45	-	-	-	5φ		
0	38	00	-	7φ	-	-		
0	42	00	-	-	-	6φ		
0	48	00	-	-	7φ	-		
1	03	00	-	-	-	7φ		
1	08	00	-	-	-	-	AGITAÇÃO	
1	10	11	-	-	-	-	4φ	
1	11	45	-	-	-	-	5φ	
1	17	00	-	-	-	-	6φ	
1	18	00	-	-	-	-	-	AGITAÇÃO
1	20	00	-	-	-	-	-	4φ
1	21	45	-	-	-	-	-	5φ
1	27	00	-	-	-	-	-	6φ
1	38	00	-	-	-	-	7φ	-
1	48	00	-	-	-	-	-	7f
1	50	00	8φ	-	-	-	-	-
2	00	00	-	8φ	-	-	-	-
2	10	00	-	-	8φ	-	-	-
2	25	00	-	-	-	8φ	-	-
3	00	00	-	-	-	-	8φ	-
3	10	00	-	-	-	-	-	8φ
7	28		9φ	-	-	-	-	-
7	38		-	9φ	-	-	-	-
7	48		-	-	9φ	-	-	-
8	03		-	-	-	9φ	-	-
8	38		-	-	-	-	9φ	-
8	48		-	-	-	-	-	9φ

Temperatura	16°C	20°C	24°C	28°C	32°C
Profundidade de colheita	8,0cm	9,5cm	10,0cm	11,0cm	12,0cm

Estas são constituídas por um recipiente superior, rigorosamente graduado (em geral aferido para recolhas de 10cm^3), ligado a uma rolha especial de vidro, com dois orifícios, os quais permitem a ligação do recipiente quer a um tubo de vidro mergulhado na proveta, quer ao tubo de saída. O tubo de vidro é mergulhado na proveta que contém o sedimento até que a extremidade se localize a uma profundidade pré-determinada, que é função das maiores dimensões da fracção granulométrica que se pretende amostrar. Nesta situação, procede-se á aspiração de uma alíquota com o volume desejado. Após a colheita, rodando a rolha especial, recolhe-se essa alíquota numa cápsula pré-pesada.



Fig. 24 -Bateria de pipetagem existente no CIACOMAR (Univ. Algarve).

Cada cápsula é posteriormente introduzida em estufa a baixa temperatura até completa evaporação da água e cuidadosamente pesada. A diferença de pesos entre a cápsula vazia (pré-pesada) e com material fornece directamente o peso dessa fracção granulométrica. Atendendo a que a análise completa é muito morosa, utilizam-se frequentemente baterias de provetas que permitem efectuar, em simultâneo, a análise granulométrica de várias amostras.

Como as características da água variam com a temperatura, as profundidades de colheita são, também, função da temperatura do fluido, pelo que a análise só deve ser efectuada quando essa temperatura está estabilizada, e deve-se garantir que a temperatura ambiente é invariante.

A alíquota colhida ao tempo t_0 contém partículas de todas as dimensões presentes na suspensão. A alíquota colhida ao tempo t_1 já não contém as partículas maiores (entre 4ϕ e 5ϕ se a pipetagem for de ϕ em ϕ) e, conseqüentemente, com

maior velocidade de sedimentação, pois mesmo as que se encontravam junto à superfície já se deslocaram em direcção ao fundo localizando-se abaixo da profundidade de colheita. A diferença entre os dois pesos fornece o peso da fracção 5ϕ (isto é, com partículas entre 4ϕ a 5ϕ).

Raciocínio análogo para todas as colheitas efectuadas permite determinar a distribuição granulométrica completa.

Como o processo é bastante moroso quando se pretende realizar a análise completa até aos 9ϕ , havendo muitos períodos de espera, tenta-se frequentemente rentabilizar o analista executando simultaneamente a análise de várias amostras. Utilizam-se, para tal, baterias de várias provetas (fig. 24). A tabela seguinte exemplifica os tempos e as profundidades de colheita para efectuar a granulometria de finos, de ϕ em ϕ , por pipetagem numa bateria de 6 provetas.

Têm sido efectuadas várias críticas ao método da pipetagem. Entre outras referem-se as relacionadas com o efeito de parede (que afecta as partículas que sedimentam muito próximo das paredes da proveta), com as interferências provocadas por movimentos brownianos, com eventuais movimentos de convecção térmica, com a forma irregular das partículas, com a geração de eventuais microcorrentes de densidade, etc. É, no entanto, o método mais divulgado, apesar de ser moroso e muito trabalhoso. É certo que vários equipamentos electrónicos permitem, actualmente, efectuar a análise de finos com muita rapidez, mas, em geral, os dados obtidos não são directamente comparáveis com fornecidos por outros métodos.

III.2.3.5. Análise Contínua por Sedimentação

Neste método determinam-se os valores acumulados do peso em função do tempo. Apresentam a vantagem de permitir conhecer a variação de distribuição granulométrica de forma contínua, sem necessidade de considerar fracções granulométricas forçosamente alargadas (como no caso da pipetagem).

Existem várias variantes deste método, as quais utilizam, com frequência, princípios distintos. Algumas dessas variantes são:

a) Balanças de Sedimentação

Este tipo de equipamentos foi originalmente concebido por Oden, mas posteriormente foram desenvolvidos vários outros (como os de Johnson, de Doeglas e de Martin) que simplificaram e aumentaram a precisão do método. Basicamente, estes equipamentos têm um prato de balança (ou ligado a um sensor de pressão) mergulhado no recipiente que contém a amostra em suspensão, e sobre o qual a amostra vai sedimentando. O registo automático do aumento de peso em função do tempo permite conhecer directamente a curva cumulativa. No entanto, o que realmente é determinado, são as velocidades de queda, sendo necessário assumir conversões velocidade de queda - diâmetro das partículas para chegar à distribuição granulométrica.

O mais correcto (e com maior significado ambiental) seria trabalhar directamente com as velocidades de sedimentação. Todavia, a dificuldade em criar imagens mentais das partículas com base nas velocidades de sedimentação, bem como a vulgarização extrema das granulometrias baseadas em diâmetros, tem inibido a aceitação generalizada das propostas que têm sido efectuadas nesse sentido.

b) Vasos Comunicantes

Estes equipamentos baseiam-se no princípio seguinte: dois líquidos diferentes colocados em dois vasos comunicantes definem, em cada vaso, alturas inversamente proporcionais às suas densidades. Como a densidade de uma suspensão diminui à medida que as partículas vão sedimentando, se ligarmos um vaso com a amostra homogeneizada em comunicação com outro com um líquido de densidade conhecida, pode determinar-se a distribuição granulométrica analisando as variações contínuas das alturas dos líquidos nos vasos.

Entre os vários equipamentos deste tipo podem referir-se os de Wiegner, de Zunker, de Kelly, de Oden e de Crowther.

c) Densímetros

Como a densidade da suspensão vai diminuindo continuamente à medida que as partículas vão sedimentando, o registo, pelo densímetro, dessa variação, em função do tempo, permite conhecer a distribuição granulométrica.

Entre os equipamentos deste tipo podem referir-se os de Bouyoucos e o de Mériaux.

d) Atenuação de Raios X

O equipamento denominado *SediGraph* (fig. 25), comercializado pela empresa Micromeritics, determina a granulometria dos sedimentos a partir da atenuação de um feixe de raios X que atravessa a amostra em suspensão. Tal como noutros métodos modernos, a análise é não destrutiva, e utiliza amostras bastante pequenas. A amostra é dispersa em 50ml de qualquer líquido que não absorva intensivamente os raios X (água destilada, glicóis, óleos minerais, álcoois, etc.).

Neste método, é determinada a intensidade de um feixe de raios X, estreito (menos de 0,2% da distancia de atravessamento), colimado horizontalmente, e que atravessa um meio líquido sem partículas em suspensão. Introduce-se, então, a amostra, em estado de suspensão homogénea no mesmo tipo de líquido em que foi efectuada a análise em branco. As partículas sólidas absorvem parte da energia dos raios X, sendo a intensidade do feixe determinado para estabelecer a escala de atenuação. Cessando a agitação da suspensão, as partículas começam a sedimentar, pelo que as partículas existentes na zona atravessada pelos raios X são, progressivamente, em menor quantidade e de menores dimensões. Consequentemente, existe menor absorção da energia do feixe, diminuindo progressivamente a atenuação. Na fase final, já não existem partículas na zona atravessada pelos raios X, pelo que a intensidade do feixe é análoga à medida inicialmente.



Fig. 25 - O SediGraph III 5120 da Micromeritics.

Como é evidente, o SediGraph determina a granulometria das partículas a partir das suas velocidades de sedimentação, aplicando a Lei de Stokes, o que é viabilizado pelo conhecimento da distância entre a zona atravessada pelos raios X e a superfície da mistura que contem a suspensão. A base deste método é, portanto, a mesma que é utilizada no método da pipetagem, com a diferença que, neste último, a análise é muito descontínua (em geral, de ϕ em ϕ), e no equipamento referenciado a análise é praticamente contínua.

O domínio de análise do SediGraph é entre 300μ e $0,1\mu$, sendo os resultados expressos em diâmetros equivalentes. Cada análise demora cerca de 20 minutos. Como é evidente, os resultados são directamente comparáveis com os obtidos pelo método da pipetagem (e outros que utilizem a velocidade de sedimentação e diâmetros equivalentes), sendo metodologicamente correcto reconstituir a distribuição granulométrica do sedimento quando a fracção grosseira foi analisada com um sedimentómetro de areias.

III.2.3.6. Outros métodos

a) Microscopia

Nesta técnica observam-se, directamente, as partículas, avaliando-se a sua dimensão através da sua imagem bidimensional. Tem a vantagem de, simultaneamente, se poder avaliar a forma das partículas e, eventualmente, deduzir a sua mineralogia. As medições podem ser efectuadas manualmente, ou automaticamente utilizando equipamento de processamento de imagem. Existe *software* dedicado que viabiliza a fácil determinação das dimensões, designadamente dos eixos maior e menor (fig. 26), bem como do diâmetro de Feret (comprimento do eixo que liga os pontos mais afastados do perímetro da partícula), do diâmetro de Martin (comprimento do eixo que divide a partícula em duas metades com áreas iguais), do diâmetro de Crofton (diâmetro médio de eixos aleatórios), do diâmetro equivalente (diâmetro do círculo com a mesma área da partícula), etc.

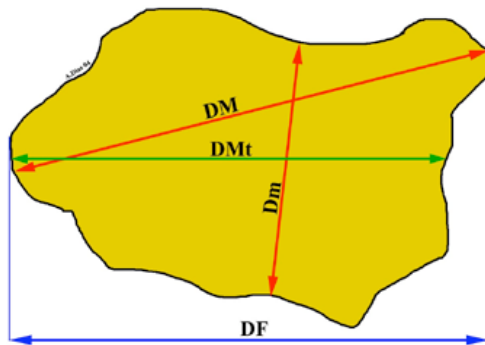


Fig. 26 - Alguns dos diâmetros que se podem definir na projecção bidimensional da partícula: DM – diâmetro maior; Dm – diâmetro menor, DMt – diâmetro de Martin; DF – diâmetro de Feret.

Tendo em atenção que, por exemplo, um grama de partículas com 10μ e densidade 2,5 corresponde a 769×10^6 partículas, compreende-se que esta técnica de medição individual não tenha grande divulgação.

Neste método, as partículas encontram-se, de certa forma, orientadas, pois que tendem a dispor-se com o eixo maior horizontal. Assim, a imagem bidimensional de uma partícula esférica confunde-se com a de uma partícula em forma de palheta. A análise dos resultados permite concluir que as medições efectuadas em imagens bidimensionais obtidas ao microscópio conduzem a resultados que sobrevalorizam, pelo menos em 25%, os obtidos por outros métodos.

b) Coulter Counter

Este equipamento foi, originalmente, desenhado para efectuar a contagem de células do sangue segundo as suas dimensões (Coulter, 1957; Berg, 1958). A análise desenvolve-se rapidamente, carecendo apenas de pequenas quantidades de material.

Basicamente, este equipamento consiste num reservatório, em que se encontra o líquido com as partículas, no qual está parcialmente mergulhado um pequeno tubo, na parte inferior do qual existe um pequeno orifício de diâmetro conhecido (fig. 27). Criando um diferencial de pressão entre o interior e o exterior do tubo, gera-se um fluxo que obriga as partículas a passarem pelo orifício aludido. A existência de eléctrodos de platina (para não electrolisarem a solução), mergulhados no líquido, no interior e no exterior do tubo, geram uma corrente eléctrica que passa, com o fluido, pela abertura. Sempre que uma partícula passa pela abertura verifica-se uma perturbação da corrente eléctrica, isto é, um súbito aumento da resistência.

Embora os Coulter Counters (fig. 28) tenham sido concebidos para análises ao sangue, começaram, na década de 70, a ser utilizados na determinação da granulometria dos sedimentos (p.ex.: McCave and Jarvis, 1973).

Como os orifícios dos tubos deste tipo de equipamento apenas conseguem determinar partículas cujo diâmetro seja 2% a 40% do diâmetro do orifício, utilizam-se, para a granulometria, pelo menos dois orifícios cujas gamas de determinação de diâmetros se sobreponham parcialmente. Por exemplo, para efectuar a granulometria da fracção fina

de um sedimento são necessários, pelo menos, dois orifícios, um com 200μ , que determina as partículas entre 64μ e 8μ , e outro com 30μ , para as partículas entre 12μ e $0,7\mu$. Como é evidente, os resultados das duas séries de detecções são matematicamente combinados para se obter a distribuição granulométrica completa da fracção fina do sedimento.

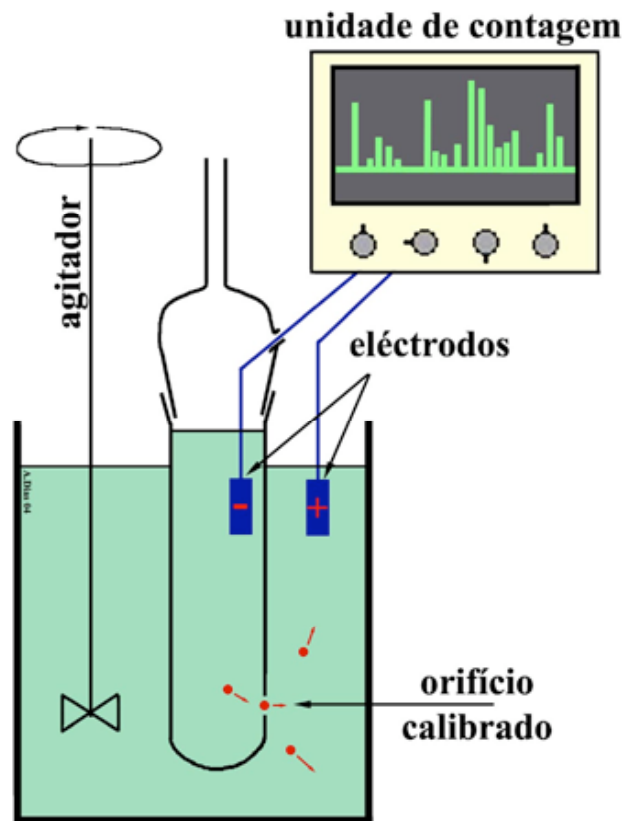


Fig. 27 - Esquema de funcionamento do Coulter Counter

Os Coulter Counters determinam uma propriedade das partículas que se pode assumir estar relacionada com o volume das partículas. Na realidade, as relações com o volume não são lineares. Esta falta de linearidade na resposta do equipamento é bem conhecida através das análises ao sangue, pois que os glóbulos vermelhos, que têm forma discoidal, apesar de terem dimensões bastante semelhantes, apresentam resistências eléctricas diferentes, consoante a posição que adquirem ao passar pelo orifício. Resposta parecida se obtém com os glóbulos brancos.



Fig. 28 - Um dos modelos de Coulter Counter

Assim, ao converter os resultados provenientes destes equipamentos em diâmetros (ou volumes), obtém-se uma distribuição que não é directamente comparável com quaisquer outros resultados obtidos por outros métodos.

Consequentemente, é metodologicamente errado misturar ou comparar dados obtidos com o Coulter Counter e com o método clássico da pipetagem (que, tendo como base as velocidades de sedimentação, trabalha com diâmetros equivalentes). De igual modo é, também, errado, estender a análise granulométrica para o domínio das areias, pois que a granulometria destas é efectuada ou por peneiração (determinando-se, assim, diâmetros de peneiração), ou por sedimentação (em que se determinam diâmetros equivalentes).

c) Difractometria Laser

Este método granulométrico, que mais correctamente se designa por LALLS – Low Angle Laser Light Scattering, baseia-se no princípio de que o ângulo de difracção é inversamente proporcional à dimensão da partícula. O equipamento deste tipo mais divulgado é o Malvern.

No funcionamento deste equipamento (fig. 29), um laser de He-Ne produz um feixe de luz monocromática com comprimento de onda $\lambda=0,63\mu\text{m}$, o qual ilumina um célula de medida onde se encontra o fluido com as partículas. A luz incidente é difractada pelas partículas, gerando-se um padrão de difracção estável, independente do movimento das partículas. Este padrão de difracção é focado, por uma lente focalizadora, para um detector fotoeléctrico constituído por um conjunto (16 ou 32) de detectores individuais de silicono foto-sensitivo. Produz-se, deste modo, um sinal proporcional à intensidade da luz incidente, o qual, após ser amplificado por um tubo fotomultiplicador, é transmitido a um computador que regista o padrão de difracção e realiza as integrações necessárias.

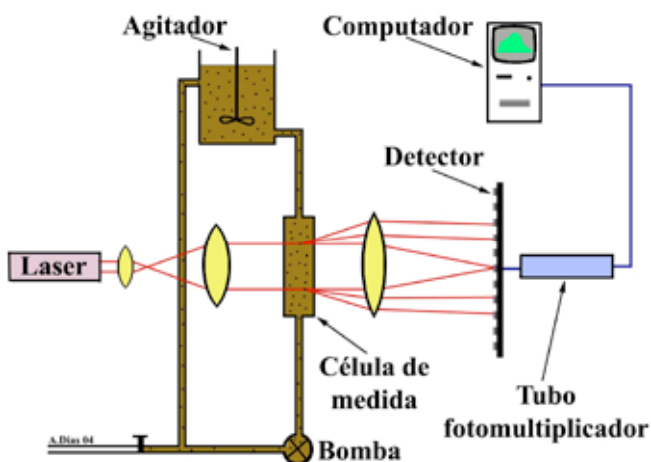


Fig. 29 - Esquema de funcionamento de um analisador por difracção laser.

Alguns equipamento modernos utilizam, na difracção, duas fontes para a difracção, com comprimentos de onda diferentes. Além do laser que emite luz coerente na banda do vermelho, outro, funcionando na banda do azul, e, consequentemente, com menor comprimento de onda, o que

permite maior resolução no que se refere às partículas com dimensões inferiores a um micra.

Teoricamente, este tipo de aparelhagem determina o volume das partículas, daí se deduzindo o seu raio. Como, normalmente, as partículas não são esféricas e têm densidades diferentes, este diâmetro não pode ser directamente correlacionado com o diâmetro de sedimentação.