

REGISTRO 23.1886
CLASSIF. 551.303
ORDEM 5361
DATA 06.02.85

FICHA CATALOGRÁFICA

(Preparada pelo Centro de Catalogação-na-fonte,
Câmara Brasileira do Livro, SP)

K43i Kenitiro, Suguio, 1937-
Introdução à sedimentologia. São Paulo, Ed-
gard Blücher, Ed. da Universidade de São Paulo,
1973.
p. ilustr.
Bibliografia.
1. Rochas sedimentares 2. Sedimentação e de-
pósito I. Título.

72-0519

CDD-551.303
552.5

Índices para catálogo sistemático:

1. Rochas sedimentares : Petrologia 552.5
2. Sedimentação : Geologia 551.303

INTRODUÇÃO À SEDIMENTOLOGIA

KENITIRO SUGUIO

*Professor Assistente Doutor, Departamento de
Paleontologia e Estratigrafia do Instituto de
Geociências Universidade de São Paulo.*



EDITORA EDGARD BLÜCHER Ltda.

EDITORA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

BIBLIOTECA CEL. ALFRE B. CARNEIRO
F U R J

proporção que a esfericidade. Uma partícula de quartzo com esfericidade 0,8 decanta com velocidade de cerca de 0,8 vezes a da esfera de quartzo com mesmo volume. Portanto, aplicando-se as leis de velocidade de queda às partículas sedimentares, não é necessário efetuarmos modificações no raciocínio, exceto reconhecer que partículas não-esféricas possuem velocidades de decantação menores que as correspondentes esferas perfeitas. Assumindo-se que a forma das partículas influa nas velocidades de decantação numa proporção direta, a lei de Stokes pode ser expressa do seguinte modo:

“A velocidade de sedimentação de partículas pequenas é diretamente proporcional à diferença de densidade entre a partícula e o fluido; inversamente proporcional à viscosidade do fluido; diretamente proporcional à esfericidade das partículas; e diretamente proporcional ao quadrado do raio da partícula”.

A lei do impacto pode ser analogamente modificada em função da influência devida à forma das partículas e expressa nos seguintes termos:

“A velocidade de decantação das partículas grandes é independente da viscosidade do fluido; é diretamente proporcional à raiz quadrada do raio da partícula; diretamente proporcional à esfericidade da partícula; e diretamente proporcional às diferenças de densidade da partícula e do fluido, dividido pela densidade do fluido”.

Comparando-se as duas leis, parece que, enquanto a razão de velocidade de decantação de partículas de silte ou argila é influenciada pela viscosidade do meio, as partículas maiores são independentes deste efeito. As velocidades de decantação, tanto das partículas grandes como das pequenas, são influenciadas pela densidade, esfericidade e diâmetro da partícula.

d) *Importância da velocidade de decantação*

A ação selecionadora de uma corrente está relacionada com a velocidade de decantação das partículas carregadas pela mesma. Se uma carga de silte e argila em suspensão for fornecida a uma lagoa com correntes muito lentas, as partículas argilosas podem ser carregadas até muito mais longe que as partículas silticas; além disso, se as condições de corrente permanecerem constantes, ocorrerá uma graduação regular (seleção) da granulometria a partir da fonte, porque as grosseiras são sedimentadas antes e as mais finas são levadas até mais longe da fonte.

Em contraste com as partículas finas, as grosseiras são decantadas ao fundo quase que imediatamente após o fornecimento, a menos que existam correntes ascendentes suficientemente fortes para conservá-las em suspensão.

Muitos problemas de interpretação de sedimentos estão relacionados ao fenômeno da velocidade de sedimentação. É possível, por exemplo, visualizar uma carga em suspensão onde partículas pequenas de alta esfericidade decantem antes que partículas maiores de menor esfericidade, aparecendo, por vezes, a falsa impressão de aumento da granulação no sentido de transporte dos sedimentos.

Areias micáceas compostas de grãos de quartzo de alta esfericidade e placas de mica de baixa esfericidade são muitas vezes difíceis de serem interpretadas, porque aparece em primeiro lugar o problema se a mica é primária ou secundária; se for primária, se a deposição ocorreu sob as mesmas condições da areia ou durante intervalos mais calmos entre as fases de deposição de camadas de areia. Tais problemas podem ser resolvidos por um estudo do tamanho, forma e densidade dos dois minerais em termos de suas velocidades relativas de decantação.

Da mesma maneira, o problema de conglomerados arenosos, em se saber se eles representam deposição simultânea de seixos e areia ou se os seixos foram primeiramente depositados e posteriormente houve infiltração da areia, pode ser resolvido pela aplicação das leis de velocidade de decantação.

Tão importante como as leis de velocidade de decantação, na interpretação global dos problemas sedimentares, é o movimento dos fluidos do meio transportador. Em quase todos os problemas de transporte e deposição de sedimentos, a interação entre partículas e o fluido em movimento controlam as características dos depósitos finais. Mas, como este assunto está fora do escopo deste livro, não será aqui tratado.

MÉTODOS DE ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS

A maior parte dos sedimentos é heterogênea em relação à sua constituição granulométrica, existindo freqüentemente partículas argilosas até areias grosseiras e muito grosseiras ou, ainda, grânulos e seixos. Este fato é verificado não somente com os sedimentos modernos ou antigos em trabalhos geológicos mas também com os solos examinados durante os ensaios de trabalhos pedológicos ou de mecânica de solos. Então, quase sempre é necessário combinar os métodos de análises, de maneira que os grosseiros sejam geralmente peneirados e os mais finos separados geralmente pelos diversos processos, que são baseados na lei de Stokes. Por conveniências práticas usa-se como limite das frações grossa e fina supramencionadas a granulação 1/16 mm (0,062 mm). Esta granulação corresponde ao extremo inferior (areia muito fina) de granulação para as diferentes classes de areias na classificação de Wentworth. Além disso, esta granulação está próxima do limite de aplicabilidade da lei de Stokes.

Em contraste com a ampla variedade de métodos disponíveis para os sedimentos mais finos, o processo do peneiramento permaneceu até hoje como praticamente método universal e absoluto na análise das frações arenosas. Mas alguns autores preferem usar elutriadores e tubos de sedimentação, em substituição às peneiras, para evitar dados compostos baseados em princípios completamente diferentes, ou seja, parcialmente do peneiramento e parcialmente de processos de sedimentação. Verifica-se, na prática, durante a construção de curvas acumulativas que ocorre uma quebra no ponto de junção de parte da curva resultante dos dados de peneiramento e de parte da curva obtida por processos de sedimentação. Então esta ocorre normal-

mente em torno do diâmetro 1/16 mm, que em muitos casos não chega a afetar o aproveitamento dos resultados, mas quaisquer feições incomuns em torno daquele diâmetro podem ser encaradas do ponto de vista de possíveis erros experimentais.

SEDIMENTOS GROSSEIROS

a) Método do peneiramento

Nas análises granulométricas sedimentológicas o limite 1/16 mm (0,062 mm) é normalmente escolhido como diâmetro conveniente para distinguir entre técnicas para sedimentos grosseiros e finos, mas este limite pode ser diferente para alguns trabalhos de geologia aplicada à engenharia civil (mecânica de solos) ou em trabalhos de pedologia.

Para se executar o peneiramento dispomos de peneiras de 8 pol de diâmetro de armação com 1 ou 2 pol de altura, possuindo telas com malhas padronizadas, que geralmente podem ser combinadas seguindo uma determinada escala granulométrica (por exemplo, escala de Wentworth). As telas são fabricadas de latão ou bronze fosforoso e as armações de alumínio ou latão. Um conjunto de peneiras pode ser montado colocando-se várias peneiras uma sobre a outra, por meio de encaixes especiais, com a malha aumentando de baixo para cima. Desta maneira, os grãos que permanecerem em uma determinada peneira, após o peneiramento, são maiores que a abertura da malha daquela peneira, mas menores que da peneira superposta.

Os grãos que passam através da peneira (grãos menores que a malha) são chamados "finos" ou "fração que passou", aqueles que permanecem (grãos maiores que a malha) são chamados de "fração grosseira" ou "fração residual". Geralmente não se consegue obter um peneiramento perfeito, isto é, passagem de 100% dos finos por uma determinada peneira. O grau de eficiência do peneiramento, expresso pela relação seguinte, é uma medida da precisão do peneiramento:

$$n = \frac{\text{"finos" peneirados}}{\text{"finos" adicionados}} \times 100\%$$

Embora aparentemente contraditório, longo tempo de peneiramento não significa que permita atingir eficiência de 100%, porque ocorrem imprecisões de fabricação nas malhas das peneiras e, aumentando-se o tempo de peneiramento, apreciável porção de "fração grosseira" também pode passar. Um bom peneiramento é aquele no qual a soma total das imprecisões causadas pelos finos, que são deixados para trás, e da fração grosseira, que passou, é a mínima possível. Então sempre existe um tempo ótimo de peneiramento.

b) Preparação e tamanho das amostras

O requisito mais importante para o peneiramento a seco é que o material, constituído de grãos individuais soltos (desagregação prévia, conforme foi

descrito no item "Preparação de arenitos"), esteja bem seco, porque com uma umidade superficial de cerca de 1 a 2% já estão presentes forças adesivas, que em grãos de menos de 1 mm de diâmetro atingem valores correspondentes ao peso do grão (Batel, 1960; *in* Müller, 1967).

Como o número de grãos por peso unitário é maior para materiais de granulações mais finas (de acordo com Schneiderhöhn, 1953; *in* Müller, 1967), 1 g de material com granulação 0,06 a 0,11 mm contém 1,2 milhão de grãos, enquanto que 1 g da fração 1,12 a 2,0 mm contém somente 214; portanto, amostras maiores são necessárias para materiais de granulações mais grosseiras. Para areias podem-se usar 100 g de material, o que facilita já os tratamentos posteriores, eliminando a necessidade de cálculos de porcentagem. Podem ser usados de 200 a 300 g de material para areias muito grosseiras, cuja granulação máxima esteja próxima do limite dos seixos (Schneiderhöhn). São geralmente suficientes 50 g de areias médias e 20 g de areias muito finas. Em amostras de seixos com diâmetro de cerca de 25 mm a amostra deveria ter 5 kg de peso total.

c) Efeito da granulometria, tamanho das amostras, forma dos grãos e abertura da malha sobre a eficiência no peneiramento; tempos de peneiramento

A probabilidade de permanência de pequenos grãos sobre uma peneira depende do tamanho da amostra, da distribuição granulométrica e do número de aberturas por área unitária (Batel, 1960; *in* Müller, 1967). Ainda, segundo este autor, a probabilidade de passagem dos grãos através das malhas da peneira aumenta quando a superfície é completamente recoberta com o material de peneiramento. Além disso, quanto maior for a proporção de grãos grosseiros na peneira, menos material fino será peneirado por unidade de tempo, porque as aberturas das malhas podem ser parcialmente ocupadas pelos grãos mais grossos. Quanto mais próxima for a granulometria do diâmetro da malha da peneira, tanto mais difícil se tornará a passagem dos grãos. Em malhas mais pequenas, a passagem das partículas é dificultada principalmente pelas forças de fricção e adesão.

Das observações acima segue-se que o tempo de peneiramento deve ser aumentado para obtenção de maior eficiência de peneiramento, quando o diâmetro da malha, peso específico dos grãos e a movimentação dos grãos são diminuídos e quando o tamanho da amostra, rugosidade superficial dos grãos, proporção dos grãos grosseiros e desvios da forma esférica dos grãos são aumentados. A conclusão natural é que eficiências mais altas de peneiramento são obtidas com o aumento do tempo de peneiramento, quando não levamos em consideração as imprecisões das aberturas das malhas das peneiras. Em algumas peneiras, conforme as malhas, a abertura real pode apresentar um desvio de mais de 30% em relação ao valor da abertura nominal.

Experiências efetuadas em numerosos laboratórios alemães por um "grupo de estudos de técnicas de laboratório" encontrou que a seguinte combinação surtia os melhores efeitos quanto à eficiência de peneiramento:

50 g de material submetido a peneiramento horizontal a seco durante 3 min mais 1 1/2 min de peneiramento manual, seguido de mais 3 min de peneiramento na máquina. O peneiramento manual é executado do seguinte modo: retira-se o jogo de peneiras da máquina, colocando-o sobre uma superfície absorvente de choques e batendo lateralmente com um martelo de borracha, ao mesmo tempo que giramos continuamente as peneiras.

Em peneiramentos a úmido, melhores resultados foram obtidos por Müller (1967) com 20 min de peneiramento em peneirador eletromagnético.

d) *Relação entre a forma dos grãos e a granulometria determinada pelo peneiramento*

Segundo Schneiderhöhn (1953; in Müller, 1967), a forma dos grãos tem um efeito decisivo na granulometria determinada pelo peneiramento. Em grãos, que possuem três eixos de comprimento iguais ($a = b = c$), a separação depende somente do diâmetro dos grãos. Em grãos, que são caracterizados por um eixo maior (c) e dois eixos menores de comprimentos iguais e perpendiculares entre si ($a = b \neq c$), a separação depende somente dos eixos menores. Portanto, o conceito de "granulometria" é claramente definido em duas direções neste caso. Com grãos que possuem as três perpendiculares entre si de comprimentos desiguais ($a \neq b \neq c$), o diâmetro que permite a passagem pelas malhas da peneira situa-se entre o maior e o menor (isto é, diâmetro médio). Portanto, a granulometria é claramente definida somente em uma direção. Ainda, segundo este autor, maior complicação surge do fato que, em malhas de aberturas quadradas, as diagonais equivalem a $\sqrt{2}$ vezes o comprimento dos lados ($d = s\sqrt{2}$). O resultado é que, em grãos que possuem os três diâmetros de comprimentos diferentes, aqueles, em que o diâmetro médio está entre s e $s\sqrt{2}$, podem também passar. Se for grande o número de grãos nesta situação em um sedimento, ocorrerá uma distorção da distribuição granulométrica para os grãos mais finos. Mas este fato é parcialmente contrabalançado pelo fato de a probabilidade de passagem através da peneira ser consideravelmente mais baixa para os grãos com três eixos, porque aqueles grãos, que são só ligeiramente menores que a correspondente malha, podem passar através dela em uma única posição: com o eixo maior perpendicular à superfície da tela.

e) *Métodos de sedimentação para areias*

Aplicação de processos de sedimentação para determinações granulométricas de areias tem sido freqüentemente sugerida (Emery, 1938; Poole, 1957; Zeigler, Whitney e Hayes, 1960). Entretanto, os erros são relativamente maiores quando comparados com os resultados dos peneiramentos. Esses erros são devidos à dependência da velocidade de queda da forma e propriedades de superfície dos grãos, das variações de densidades dos materiais individuais componentes dos sedimentos, etc. Esses métodos podem ser usados para comparação de rochas sedimentares diferentes de uma bacia de sedimentação ou como métodos expeditos de determinação.

SEDIMENTOS FINOS

Os vários métodos de sedimentação, que são usados nas análises granulométricas dos sedimentos finos, isto é, menores que 1/16 mm (0,062 mm) de diâmetro, dependem basicamente da lei de Stokes (1851). Esta lei permite calcular a resistência friccional exercida sobre uma partícula esférica em queda em meio fluido (líquido ou gás) calmo de sedimentação.

$$v = \frac{2}{9} \cdot g \frac{d_1 - d_2}{\eta} \cdot r^2,$$

onde

v = velocidade de queda da partícula ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$);

g = aceleração da gravidade ($980 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$);

d_1 = densidade da esfera em queda ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$);

d_2 = densidade do meio líquido ou gasoso de sedimentação ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$);

η = viscosidade do líquido ou gás ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$);

r = raio da esfera (cm).

A dedução da fórmula acima foi vista em "Lei de Stokes das velocidades de decantação".

Entre os métodos de sedimentação, que são baseados na lei de Stokes, podemos reconhecer os métodos diretos e os métodos indiretos de separação dos sedimentos em diferentes classes granulométricas. Entre as desvantagens dos métodos diretos temos que a completa separação é praticamente impossível e que, exceto quando se usa o método das centrífugas, as técnicas não são práticas para diâmetros inferiores a cerca de 0,01 mm. Os métodos indiretos são geralmente mais precisos e aplicáveis, sem muita dificuldade, a partículas com menos de 0,001 mm de diâmetro.

a) *Métodos diretos de separação*

1) *Decantação contínua*

As amostras são desagregadas em partículas individuais usando-se uma das técnicas anteriormente vistas (na parte de preparação de amostras), conforme a natureza do material. As partículas desagregadas são colocadas em suspensão aquosa em proveta graduada e verificado o problema da floculação. Então, se a amostra não apresentar o fenômeno da floculação, estará pronta para ser submetida à análise granulométrica pelo processo de sedimentação.

Inicia-se com a suspensão completamente homogeneizada, agitando-se violentamente o material no frasco, com a boca da proveta fechada com as mãos, ou com um dispositivo próprio de agitação. Deixando-se a suspensão em repouso durante um intervalo de tempo, uma parte do material será depositada no fundo, enquanto que os materiais mais finos permanecerão em suspensão. Então, sifonando-se a suspensão e recolhendo-se o material em outro recipiente, teremos a amostra fracionada em porções de granações

diferentes, isto é, uma, contendo partículas mais finas que aquelas passíveis de serem sedimentadas naquele espaço de tempo e a outra, com partículas mais grosseiras que foram sedimentadas decorrido aquele lapso de tempo.

Uma completa separação dos grãos raramente é efetuada e, para os trabalhos de maior precisão, são necessárias repetições de decantações sucessivas. Efetuando-se o mesmo tipo de operações com intervalos de tempos diferentes, podemos desdobrar as amostras em tantas frações granulométricas quantas desejarmos. O tempo necessário para decantação das partículas com um certo diâmetro é calculado pela lei de Stokes, tendo-se o espaço que os grãos irão percorrer até o fundo do recipiente (em cm) e as densidades constantes da fórmula de Stokes simplificada: $v = Cr^2$.

Os métodos de decantação contínua são os mais simples não só pelo aparelhamento necessário mas também pela facilidade de operação. O aparelhamento pode ser constituído de um conjunto de béqueres para receberem as várias frações de água com sedimento em suspensão, coletadas em tempos diferentes, e uma proveta de graduação até 11 ou um tubo de decantação especialmente construído, com uma saída lateral próxima à base do tubo. Quando a proveta for do tipo comum (apenas um cilindro de vidro graduado), precisaremos de um sifão.

Na prática, podemos proceder da seguinte maneira: uma certa quantidade de sedimento é pesada (o peso necessário depende da granulação), desagregada e dispersada de acordo com técnicas já vistas. Os grãos com diâmetros acima de 1/16 mm são separados da suspensão por peneiramento a úmido, porque estes não seguem a lei de Stokes. Então, a suspensão contendo somente partículas de diâmetro inferior a 1/16 mm é agitada até completa uniformização, tendo antes completado o volume da suspensão até 1 l. Depois da agitação, deixando-se a suspensão em repouso, as partículas decantam segundo a lei de Stokes e, assim, partículas com diâmetro de 1/32 mm deslocarão para baixo na suspensão, com velocidade de $0,0869 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. Portanto, para percorrer 1 cm levará 11,5 s e 3 min e 52 s para deslocar-se 20 cm. Então, decorrido este espaço de tempo após a uniformização da suspensão, por agitação do meio, o líquido será retirado até a profundidade de 20 cm por intermédio de um sifão de tubo de vidro provido de tubo de borracha. O líquido sifonado é colocado em um béquer. A proveta, contendo o restante das partículas, é novamente completada até 1 l, agitada para uniformizar a suspensão, e o processo todo é repetido pelo mesmo período de tempo, depois do qual o líquido é sifonado e juntado no mesmo béquer anterior. Este processo é repetido até que a suspensão fique perfeitamente clara até 20 cm de profundidade, quando decorridos 3 min e 52 s após a agitação. O número necessário de sedimentações, para que haja completa separação das partículas de um determinado intervalo granulométrico, depende do tamanho das partículas, do grau de dispersão e do tipo de material que está sendo analisado. Número maior de repetições é necessário em partículas mais finas em confronto com as mais grosseiras. Minerais de argila expansivos do tipo montmorillonita e vermiculita requerem maior número de sedi-

mentações do que, por exemplo, caolinita ou illita. Para separar completamente partículas inferiores a 2 microns são geralmente necessárias dez a vinte e cinco sedimentações. O material que ficou na proveta é então filtrado, seco e pesado, representando, o seu peso, a quantidade de material com granulometria no intervalo 1/16 a 1/32 mm de diâmetro contido na amostra em análise.

Para a separação das partículas do intervalo 1/32 a 1/64 mm, toma-se a suspensão do béquer (da operação anterior) e coloca-se novamente na proveta. A velocidade de queda das partículas de 1/64 mm de diâmetro é de 46 s por cm ou 7 min e 44 s para percorrer 10 cm na proveta. A água abaixo desta profundidade, depois de decorrido aquele intervalo de tempo, conterá partículas, que representam o intervalo granulométrico 1/32 a 1/64 mm de diâmetro.

Para a separação das partículas do intervalo 1/64 a 1/128 mm o tempo requerido para decantar 10 cm é 31 min, e assim procedemos da mesma maneira que nos casos anteriores até se obter a fração menor que 1/256 mm (argila), que ainda pode ser fracionada em intervalos menores, se houver interesse.

Numerosos autores têm introduzido o uso de dispositivos especiais para este processo de decantação. Geralmente estes dispositivos se limitam a tubos de decantação de vidro com saída de água facilitada, inserida nas profundidades especificadas de 10 e 20 cm, a partir da superfície da água com volume de 1 l, conforme os intervalos granulométricos em separação.

Na Alemanha, este método é um dos mais amplamente usados, porque permite completa separação do sedimento nas várias classes granulométricas componentes. O dispositivo usado é o chamado cilindro de Atterberg. Este é constituído de um cilindro com diâmetro interno mínimo de 5 cm e altura de 25 a 30 cm, provido lateralmente de um sifão, que é fechado por um tubo de borracha provido de uma presilha.

2) Decantação por centrífuga

Normalmente, granulações menores que 2 microns não são analisadas pelo processo normal da sedimentação devido à demora do processo de sedimentação e risco de grandes imprecisões por influência de vibrações, correntes de convecção, etc.

Quando se usa a sedimentação por centrífuga, a força que age sobre as partículas pode ser aumentada até mais de 750 000 vezes maior do que a da gravidade com o uso de ultracentrífugas (Sverdberg e Pedersen, 1940; in Müller, 1967). Neste caso, foi a lei de Stokes modificada e, de acordo com Sverdberg, toma a seguinte forma:

$$d = \frac{6}{\omega} \sqrt{\frac{\eta \ln \frac{S_2}{S_1}}{2(d_1 - d_2) \cdot t}}$$

onde

d = diâmetro da partícula em cm;

ω = velocidade angular = $\frac{2\pi \cdot \text{rotações}}{\text{segundo}}$;

η = viscosidade ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$);

S_2 = distância do eixo de rotação a partir do fundo dos "frascos" centrifugadores (cm);

S_1 = distância entre o eixo de rotação e o nível superior da suspensão (cm);

d_1 = densidade das partículas ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$);

d_2 = densidade do líquido ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$);

t = tempo (s).

Uma centrífuga especialmente construída para separação de grãos no intervalo entre 5 e 0,1 microns é o "sedimentômetro por centrifugação Gallenkamp" (*centrifugal sedimentometer*) fabricado pela Gallenkamp Towers Co., Londres. Neste equipamento as partículas de diferentes granulações podem ser depositadas e coletadas a distâncias variáveis a partir do eixo de rotação de um rotor cônico especial.

3) Método de elutriação

A separação das várias granulações pelo método de elutriação é feita em um meio de fluxo contínuo de corrente de ar ou água, que geralmente flui da base para o topo do aparelho. As partículas, que possuem velocidade de queda maior que a velocidade de fluxo da corrente ascendente, afundam, enquanto que as partículas com velocidade de queda menor são arrastadas para um outro recipiente através do líquido que extravasa pelo topo do aparelho.

Os cálculos para as velocidades de queda das partículas maiores que 0,05 mm, granulação mais adequada para aplicação do processo da elutriação, são feitos pela fórmula dada por Oseen e, para partículas menores que 0,05 mm, usa-se a fórmula de Stokes (ambas fórmulas já vistas).

Os processos de elutriação a úmido foram utilizados principalmente nos estudos de solos e para investigações de matérias-primas na indústria. Hoje em dia dá-se preferência para os processos de sedimentação e peneiramento em virtude da maior precisão desses métodos.

As principais fontes de erro na maior parte dos métodos de elutriação estão ligadas aos turbilhões causados pela forma do cilindro, diferenças nas densidades dentro dos materiais sob investigação e a dissolução dos carbonatos como resultado de grande quantidade de água requerida para elutriação.

A elutriação por correntes de ar (a seco) desempenha papel importante no tratamento prévio de minérios e na separação granulométrica de cimento, pigmento, etc. Este método é usado nos casos em que a separação úmida é

difícil ou completamente impossível (como no caso do cimento). Este método é menos usado em escala de laboratório.

b) Métodos indiretos de separação

1) Método da pipeta

Este método é baseado nas mudanças de concentração de partículas em uma suspensão originalmente uniforme, pela tomada de várias amostras com uma pipeta (em intervalos de tempo definidos), em profundidade que corresponde à do material que acabara de sedimentar naquele momento. As quantidades de materiais em cada uma das classes granulométricas são obtidas a partir das mudanças na concentração de material em suspensão (a determinação é feita pela pesagem do resíduo seco da pipetagem). Entre todos os métodos de análises granulométricas dos sedimentos finos (menor que 1/16 mm), o método da pipeta foi o que recebeu mais ampla aceitação em virtude da simplicidade de operação e do equipamento requerido.

Se uma suspensão for bem agitada, até que as partículas fiquem bem uniformemente distribuídas dentro de uma proveta graduada de 1 l de volume e, depois, deixando-a em repouso, todas as partículas que tiverem velocidade de sedimentação maior que h/t terão afundado até abaixo de um plano de profundidade h , no fim de um intervalo de tempo t . Todas as partículas, tendo uma velocidade de queda menor que h/t , entretanto, permanecerão em sua original concentração até a profundidade h , porque elas terão afundado somente uma fração daquela distância em tempo t . Uma pequena amostra é tomada com pipeta, da profundidade h no tempo t , e evaporada até secagem total. O peso do resíduo multiplicado por um fator de proporcionalidade, baseado na razão do volume da pipeta para o volume total da suspensão, representará a quantidade total de matéria que tem velocidade de decantação menor que h/t . Essa velocidade de decantação das partículas é calculada pela lei de Stokes.

Depois que a primeira amostra de pipeta é recolhida, a suspensão é novamente agitada e um período maior de tempo é dado para repouso, de modo que partículas de tamanho menor que intervalo anterior decante até a profundidade h . A segunda amostra de pipeta conterá um resíduo mais fino do que a primeira amostra em uma quantidade igual ao peso do material situado entre as duas medidas escolhidas ou velocidades de decantação. O processo pode ser repetido e, por simples subtração dos pesos dos resíduos sucessivos e cada vez mais finos (cada um multiplicado pelo fator de proporcionalidade), pode-se ter o peso do material em quaisquer intervalos granulométricos.

Se for escolhida a escala de Wentworth, o método da pipeta ficará restrito a um material mais fino que 1/16 mm (0,062 mm), e os mesmos tempos e profundidades especificados no processo de decantação contínua (já descrito) são usados para se colher amostras de suspensão com volumes de 10 cm³ ou 20 cm³. Após a homogeneização da suspensão, são colhidas amostras

de pipeta nos seguintes intervalos de tempos e profundidades, conforme a granulacão do material que se quer amostrar (veja a Tab. III, abaixo).

TABELA III – Tempos, profundidades e granulacões para análise granulométrica por pipetagem

Diâmetro (mm)	Profundidade (cm)	h	min	s
1/16 (0,062)	20	0	0	58
1/32 (0,031)	10	0	3	52
1/64 (0,016)	10	0	7	44
1/128 (0,008)	10	0	31	—
1/256 (0,004)	10	2	3	—
1/512 (0,002)	10	8	10	—
1/1 024 (0,001)	5	16	21	—
1/2 048 (0,0005)	5	65	25	—

Experiências têm mostrado que a profundidade de 10 cm para amostragem é inconveniente para algumas granulacões do material. Durante os primeiros momentos após a agitacão são observadas correntes irregulares, então parece desejável deixar passar tempo suficiente para que estas se acalmem, logo o primeiro valor de tempo de amostragem foi computado para 20 cm de profundidade. Do mesmo modo, os tempos requeridos para as partículas mais finas decantarem são muitos longos, então os instantes de amostragem foram computados para 5 cm de profundidade.

Depois que várias amostras de pipeta foram colhidas, e os béqueres levados à evaporação até se secarem completamente, o peso do resíduo contido em cada béquer é determinado por meio de uma balança analítica até duas a três casas decimais (em gramas). Para cada béquer a anotacão das pesagens pode ser feita como se segue:

Peso do béquer e resíduo	18,938 g
Peso do béquer vazio (prévio)	18,406 g
	<u>0,532 g</u>

O seguinte exemplo, com os diversos procedimentos na rotina de análise, mostra claramente o método: 1 l de suspensão, contendo 27,44 gramas de sedimento mais fino que 1/16 mm, foi dispersado com oxalato de sódio (antifloculante) de concentraçao N/100. O oxalato de sódio N/100 equivale a 0,67 g de oxalato de sódio por litro de suspensão ou 0,013 g por 20 cm³ de suspensão, então este valor deve ser subtraído do peso do resíduo contido em cada béquer para corrigir o erro devido ao agente dispersante (peptizante). O peso do béquer número 1 (representando material mais fino que 1/16 mm) é de 0,532 g de resíduo e o do béquer número 2, com material mais fino que 1/32 mm, é de 0,446 g de resíduo. Então, subtraindo-se 0,013 g de cada um dos valores teremos 0,519 e 0,433 g. O volume da pipeta, sendo de 20 cm³, corresponderá a 1/50 do volume total da suspensão, então cada um dos pesos encontrados deve ser multiplicado por 50 para converter os

pesos em termos do volume original. Após esta multiplicacão, uma tabela pode ser elaborada:

Peso do material mais fino que 1/16 mm	27,44 g
Peso do material mais fino que 1/32 mm	25,95 g
Diferença = quantidade de material na classe 1/16 a 1/32 mm	1,49 g
Peso do material mais fino que 1/32 mm	25,95 g
Peso do material mais fino que 1/64 mm	21,65 g
Diferença = quantidade de material na classe 1/32 a 1/64 mm	4,30 g

Esta conversão para o volume total, para se encontrar o peso total da fração na suspensão inicial de 1 000 ml, que é feita multiplicando-se os pesos dos resíduos em cada béquer por 50, pode ser feita após encontradas as quantidades (peso) de materiais de cada classe contidas em 20 cm³.

Os pesos de cada uma das frações granulométricas, cujos limites dependem da escala escolhida, são convertidos em porcentagens relativas ao peso total da amostra, para tratamento estatístico dos dados (veja a Tab. I). Se material mais grosseiro que 1/16 mm estiver presente, este será peneirado em classes e o resultado combinado com os dados de pipetagem que, em conjunto, expressam a distribuicão granulométrica da amostra.

Quando a análise granulométrica por pipetagem for feita com as frações grosseiras e finas juntas dentro da proveta, será necessário efetuarmos a eliminacão por lavagem das partículas mais finas que 0,062 mm, depois de terminada a pipetagem. Então o resíduo da lavagem, que permanece no tubo, é passado para um béquer e secado em estufa, sendo em seguida efetuado o peneiramento, quando o material estiver bem seco. Pode-se analisar somente a fração mais fina por pipetagem e, neste caso, a separacão da parte que vai ser peneirada, caso esteja presente, é efetuada anteriormente às pipetagens por peneiramento a úmido do material em peneira de malha 0,062 mm. Neste caso, a parte grosseira é levada diretamente para secagem em estufa, para efetuarmos posteriormente o peneiramento e as pesagens das frações.

2) Método do hidrômetro (densímetro)

O método do hidrômetro é baseado no mesmo princípio do processo da pipeta. A densidade de uma suspensão (e, portanto, seu conteúdo em material sólido) é medida a determinados intervalos de tempo, após iniciada a sedimentacão, com um hidrômetro imerso na suspensão. O método foi introduzido por Buoyoucos (1927) como processo de análise granulométrica.

A partir das densidades $d_{(t)}$ lidas no densímetro após um intervalo de sedimentacão t , a concentraçao $C_{(t)}$ é calculada pela fórmula.

$$C_{(t)} = \frac{d_1}{d_1 - d_2} \cdot (d_{(t)} - d_2),$$

onde

d_1 = densidade das partículas;

d_2 = densidade do líquido de sedimentacão.

TABELA IV - Análise granulométrica por pipetagem e peneiramento

Projeto: Foz do Rio Doce (ES)	Após a separação:
Amostra: GK0010/01	partículas 4,00-0,062: 68,6837 g
Antes da separação:	partículas menores 0,062: 37,0050 g
peso total inicial: 106,0000 g	peso total final: 105,6887 g
peso de seixos:	fator de correção: $P_i/P_f = 106,0000/105,6887$
Outros (CaCO ₃) etc.	$\cong 1$

PIPETAGEM

Granulometria	Tempo	Peso total	Peso do frasco	Pt-Pfr	P. Susp.	PSX 50
0,062-0,031	58 s	5,6327	4,8926	0,7401	0,0310	1,5500
0,031-0,016	3 min 52 s	5,6041	4,8950	0,7091	0,0062	0,3100
0,016-0,008	7 min 44 s	5,3640	4,6611	0,7029	0,0198	0,9900
0,008-0,004	31 min	5,6236	4,9405	0,6831	0,1076	5,3800
<0,004	2 h 3 s	5,3668	4,7913	0,5755	0,5755	28,7750

Cálculo de dados para curva acumulativa e histograma

Granulometria	Pesos	P. corrigidos	%	% acum
GRÂNULOS				
4,000-2,830	1,1120	1,2110	1,1424	1,1424
2,830-2,000	1,0000	1,0000	0,9495	2,0919
AREIAS				
2,000-1,410	6,4750	6,4750	6,1264	8,2183
1,410-1,000	7,6240	7,6240	7,2136	15,4319
1,000-0,707	13,7520	13,7520	13,0117	28,4436
0,707-0,500	9,4239	9,4239	8,9166	37,3602
0,500-0,354	13,6540	13,6540	12,9191	50,2793
0,354-0,250	8,5989	8,5989	8,1361	58,4154
0,250-0,177	4,5390	4,5390	4,2947	62,7101
0,177-0,125	1,6618	1,6618	1,5723	64,2824
0,125-0,088	0,7338	0,7338	0,6943	64,9767
0,088-0,062	0,0103	0,0103	0,0097	64,9864
<0,062	37,0050	37,0050	35,0132	99,9996
SILTES e ARGILAS				
0,062-0,031	1,5500	1,5500	1,4666	66,4530
0,031-0,016	0,3100	0,3100	0,2933	66,7463
0,016-0,008	0,9900	0,9900	0,9367	67,6830
0,008-0,004	5,3800	5,3800	5,0904	72,7734
<0,004	28,7750	28,7750	27,2262	99,9996
TOTAIS	105,6887	105,6887	99,9996	

Observação:.....

O peso total inicial da amostra foi de 106,0000 g e, após as separações, foi verificado que o erro durante o processamento foi insignificante, portanto não foi necessário efetuar qualquer tipo de correção, já que antifloculante também não foi empregado.

Essa folha de cálculo permite obter até as porcentagens acumuladas usadas nas construções de curvas acumulativas. Além disso, com os mesmos dados (porcentagens simples das diferentes classes que compõem o sedimento) podem ser construídos histogramas e curvas de frequência simples, conforme podem ser vistos nas Figs. 13, 14 e 15.

Este tipo de análise é bastante trabalhoso, principalmente quando de centenas a milhares de amostras devem ser processados. Para se abreviar o tempo de trabalho, pode-se trabalhar com o computador, quando então os pesos das diferentes frações são fornecidos diretamente e os outros cálculos são feitos com bastante rapidez.

Representação gráfica de análises granulométricas

A maior parte dos métodos de análises granulométricas determina as porcentagens em peso dos grãos em cada classe granulométrica nas amostras de sedimentos. Esses dados são em seguida convertidos em informações numéricas ou gráficas, que caracterizam as amostras analisadas, e servem para descrições texturais, para comparações entre amostras, para o desenvolvimento ou teste de comportamento dos sedimentos durante o transporte e deposição, para interpretação das condições de gênese e para mapeamento das variações das características sedimentológicas.

A representação gráfica é um dos primeiros passos em uma interpretação de quaisquer resultados de análises granulométricas de rochas sedimentares. Os gráficos, não somente representam os resultados visualmente mas também podem sugerir novas linhas de conduta das pesquisas a serem efetuadas.

A maior parte dos gráficos envolve a representação de um conjunto de dados em função do outro, em geral por meio de um ponto para cada par de observações. É convencional escolher dois eixos coordenados a ângulo reto entre si, que são usados como eixos de referência.

ESCOLHA DOS VALORES DEPENDENTES, INDEPENDENTES E DA ESCALA

É uma convenção matemática bem estabelecida que as variáveis dependentes sejam lançadas ao longo do eixo Y e as variáveis independentes ao longo do eixo X. A variável independente cresce ou diminui em quantidades arbitrariamente escolhidas e a dependente é medida em cada um desses dados valores. Por exemplo, se o conteúdo em minerais pesados é estudado em uma série linear de amostras, a distância entre as amostras é escolhida arbitrariamente, e o conteúdo em minerais dessas amostras é estudado.