

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Geotecnia

Ensaio de Laboratório em Geologia

N. Gandolfi
A.B. Paraguassu
J.E. Rodrigues
L. Marino
F. Mattiello

São Carlos, abril de 2002

APOSTILA

@187e

e.1

sysno Lt 1569300

I N D I C E

I. INTRODUÇÃO	1
II. MINERAIS E ROCHAS	3
1. Generalidades	3
2. Classificação das rochas	4
III. EXTRAÇÃO E EMPREGO DOS MATERIAIS NATURAIS	7
1. Produto de rocha natural	7
2. Produto de rocha preparada	9
IV. MICROSCOPIA ÓPTICA	12
1. Preparação de lâminas	13
2. Exame de lâminas	14
V. ANÁLISE SEDIMENTOLÓGICA	16
1. Coleta de material	17
2. Quarteação	17
3. Secagem	17
4. Desagregação	17
5. Separação da fração arenosa	19
6. Separação da fração silte-argila	19
7. Representação gráfica	22
8. Análise do arredondamento	23
9. Análise da esfericidade	24
10. Análise mineralógica	24
VI. DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE	25
1. Introdução	25
2. Métodos de determinação	27
VII. ENSAIOS DE COMPRESSÃO	32
1. Introdução	32
2. Ensaio de compressão simples	33
3. Determinação do índice de resistência à carga pontual	39

VIII. POROSIDADE E PERMEABILIDADE	46
1. Porosidade	46
2. Permeabilidade	48
IX. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA	60
X. ENSAIOS EM MATERIAIS NATURAIS USADOS COMO AGREGADOS	61
1. Resistência ao desgaste e ao impacto	62
2. Ensaio de alteração e de alterabilidade	69
3. Ensaio com frasco Chapman	81
4. Ensaio com frasco Le Chatelier	89
5. Impurezas orgânicas	91
6. Ensaio do equivalente de areia	93
XI. ARGILAS	100
1. Introdução	100
2. Importância dos minerais de argila	101
3. Origem dos argilo-minerais	101
4. Fatores que determinam as propriedades das argilas	103
5. Classificação, nomenclatura e estrutura (noções)	104
6. Estudo dos grupos de argilo-minerais	108
7. Plasticidade das argilas	110
8. Algumas aplicações importantes dos materiais argilosos	111
9. Engenharia e solos	114
10. Orientação das partículas nos solos argilosos	115
11. Métodos de análise	117
XII. BIBLIOGRAFIA	133

I. INTRODUÇÃO

Nos nossos dias, com o crescente avanço da tecnologia, os materiais naturais vem sendo cada vez mais empregados nas obras de engenharia e na indústria de transformação. A aplicação das diversas matérias primas está condicionada às suas propriedades mecânicas e químicas, cujo conhecimento é necessário quando desejamos selecionar materiais para um determinado fim.

O material pode ser empregado diretamente como é extraído ou depois de submetido a beneficiamento. No primeiro caso, encontramos os depósitos superficiais usados como material de empréstimo para aterros em estradas e na construção de barragens de terra; no segundo caso, temos: as britas, a areia selecionada, as rochas trabalhadas na forma de lajes e blocos e as matérias primas para as indústrias de cerâmica e de cimento, etc.

Além disso, existe o caso do solos e rochas que servem de suporte para fundações. Neste caso, necessitamos conhecer as propriedades desses materiais nas condições em que se encontram na natureza. Por exemplo, com relação ao solo de fundação de uma barragem necessitamos conhecer a resistência ao cisalhamento, a permeabilidade e a compressibilidade, que são elementos fundamentais na escolha do local do projeto.

Fazemos a identificação dos materiais empregando métodos que variam de acordo com a natureza do material analisado e o fim a que se destina. Como tais materiais geralmente são constituídos de uma mistura de diversas partículas menores (cristalinas ou não), ora devem ser analisadas as partículas separadamente e ora como um todo. Por exemplo, quando analisamos a granulometria de uma areia para uso em filtros, obtemos resultados como um todo. Todavia, a sua utilização para esta finalidade, dependerá de uma análise específica das características de solubilidade dos minerais encontrados na areia que constitui uma propriedade indesejável nos materiais para tal aplicação. Na identificação dos materiais, normalmente empregamos análise química e termodiferencial, microscopia óptica e eletrônica, e raio-X.

As propriedades dos materiais são determinadas pelos ensaios de laboratório efetuados em amostras que deverão

ser representativas de uma jazida ou maciço rochoso. A amostragem pode ser efetuada tanto em superfície como na sub-superfície e segue técnicas padronizadas, que variam de acordo com o tipo de rocha e a finalidade a que se destina.

A fim de facilitar a compreensão da linguagem utilizada em laboratório, apresentamos abaixo uma terminologia sucinta relativa a instrumentos de medição.

Indicador - Ponteiro, marca luminosa, superfície livre de um líquido, estilete ou outro indicativo que, pela sua posição em relação à escala, assinala o valor da grandeza medida ou o equilíbrio de um instrumento de zero.

Escala - Conjunto de marcas (associado ou não a uma numeração) em relação ao qual se observa a posição do índice ou dos pontos do diagrama por ele traçado no registro.

Divisão da escala - Parte da escala limitada por duas marcas consecutivas.

Comprimento da escala - Comprimento da linha de referência da escala, compreendido entre os pontos médios das marcas extremas da escala.

Mínimo valor da escala - Menor valor da grandeza a medir para cuja indicação a escala está graduada.

Máximo valor da escala - Maior valor da grandeza a medir para cuja indicação a escala está graduada.

Campo de medição do instrumento - Conjunto de valores da grandeza que podem ser medidos com o instrumento.

Alcance do instrumento - Limite superior do campo de medição do instrumento.

Sensibilidade - Menor variação do valor da grandeza a medir que pode ser observada ou registrada.

Fidelidade - Reprodutibilidade dos resultados das medições de dado valor da grandeza, feitas em épocas diferentes e em condições determinadas.

Estabilidade - Reprodutibilidade dos resultados das medi-

ções de dado valor de grandeza, feitas em épocas diferentes e em condições determinadas.

Constância - Reprodutibilidade dos resultados das medições de dado valor de grandeza, feitas em condições variáveis dentro dos limites especificados.

Precisão - Aproximação entre as indicações do instrumento e os verdadeiros valores da grandeza.

II. MINERAIS E ROCHAS

1. Generalidades

Minerais - Mineral é um elemento químico ou uma combinação química, formado mediante um processo inorgânico natural. É um corpo homogêneo em virtude de ser constituído internamente por uma estrutura tridimensional ordenada, característica do estado sólido, ou seja, estrutura cristalina. Um material somente adquire a forma geométrica regular de um cristal quando as condições em que é formado permitem o desenvolvimento de faces planas e polidas.

De uma maneira geral, os minerais podem se formar por: resfriamento do magma (material em estado de fusão encontrado no interior da crosta), resfriamento de soluções ou gases magmáticos, evaporação de soluções salinas, reações entre substâncias e intemperismo (ataque do ar e da água sobre minerais na formação de novos minerais).

Para o reconhecimento exato de um mineral, dispomos de inúmeros processos, por meio dos quais podemos determinar tanto sua estrutura cristalina quanto sua composição química. Dentre eles, citamos: cristalografia por difração de Raios X e microscopia óptica e eletrônica, conjugados com análise química.

Rochas - Rocha é qualquer massa que constitui parte essencial da crosta terrestre. De acordo com o número de espécies de minerais que entram em sua composição, as rochas podem ser: uniminerálicas, quando formadas somente por uma espécie mineral, como por exemplo o mármore, o anfibolito etc., ou pluriminerálicas, que são as mais comuns, quando contêm duas ou mais espécies minerais como acontece com o granito, o basalto, etc.

Muito embora o número de minerais existentes seja consideravelmente grande, os que comumente ocorrem como formadores de rochas são relativamente poucos. Assim, podemos citar como mais comuns: quartzo, feldspatos, micas, anfibólio, piroxênios, olivinas, calcita, dolomita, magnetita, limonita, pirita, granada, gipsita e os minerais de argila.

Devemos levar em consideração que certos fenômenos geológicos influem nas propriedades principais das rochas. Dessa forma, dobramentos, escorregamentos, fraturas, diaclases, foliações, etc., modificam uma rocha influenciando por exemplo no seu uso, como acontece quando empregada como material de construção.

Em alguns casos, é quase impossível delimitarmos distintamente certos tipos de rochas que sofreram diversas transformações, as quais permitem o surgimento de novos componentes, perda dos essenciais, mudanças de estruturas, etc. É em vista desses problemas que necessitamos estudar detalhadamente um maciço rochoso que desejamos explorar.

Como veremos no ítem IV, referente a microscopia óptica, em trabalhos rotineiros de determinação petrográfica - examinamos as rochas ao microscópio polarizador em secções delgadas de aproximadamente 0,03mm de espessura, montadas com Balsamo do Canadá em lâminas de vidro constituindo assim as lâminas petrográficas.

2. Classificação das Rochas

De acordo com sua origem, classificamos as rochas em três grandes grupos: ígneas, sedimentares e metamórficas.

Rochas Ígneas - são aquelas formadas por material em estado de fusão (magma), que se consolidou por resfriamento. Ex:- granitos, diabásios, sienitos, etc.

Rochas sedimentares - são as resultantes da acumulação de materiais derivados de outras rochas pré-existentes. Ex:- arenitos, argilitos, etc.

Rochas metamórficas - são as rochas que primariamente se originaram das magmáticas ou sedimentares, e que foram sub-

metidas a pressões e/ou temperaturas elevadas. Ex:- gnaisses, mármores e quartzitos, etc.

A fim de podermos classificar uma rocha num dos grupos anteriormente referidos, com recursos apenas macroscópicos, necessitamos observar uma série de características na amostra. Antes de considerarmos tais características, devemos lembrar que:

- as observações em relação à cor se aplicam mais adequadamente às rochas ígneas;
- quando os grãos (que são as partes componentes da rocha) forem finos, numa observação macroscópica, torna-se difícil a distinção entre espécies minerais;
- quando os grãos forem visíveis macroscópicamente, devemos procurar identificá-los dentro das limitações existentes.

A. Rochas Ígneas

De acordo com a velocidade de resfriamento do magma, podemos considerar o seguinte: quando o resfriamento é lento, os íons se combinam formando minerais grandes que se destacam na massa rochosa; quando é rápido, não se formam minerais grandes, havendo até casos extremos em que o magma se consolida no estado vítreo (amorfo).

Dependendo da profundidade de consolidação do magma, na crosta terrestre, as rochas ígneas resultantes podem ser:

Intrusivas ou plutônicas - formadas a grandes profundidades. Geralmente apresentam uma granulação grossa e só aparecem à superfície por erosão das partes sobrejacentes. Um exemplo é o granito, em cuja constituição mineralógica entram quartzo, feldspato e mica ou hornblenda. O aspecto geral apresentado por esses minerais, nesta rocha, é o seguinte: o quartzo aparece como vidro moído, de cor acinzentada; o feldspato é de cor cinza, creme ou avermelhada e a biotita ou a hornblenda tem coloração escura.

Extrusivas ou vulcânicas - formadas pela consolidação do magma que atinge a superfície; apresentam granulação muito fina ou são vítreas. Basalto é o exemplo mais comum, sendo vulgarmen-

te denominado de "pedra ferro". Devido a consolidação se dar na superfície, seus minerais são pequenos e comumente não podem ser vistos a olho nu. O basalto é composto normalmente por feldspato, piroxênio e magnetita. Algumas vezes pode apresentar um grande número de vazios (vesículas), geralmente de formas arredondadas.

B. Rochas sedimentares

Por serem rochas formadas pela acumulação de materiais resultantes da desagregação de outras pré-existentes, geralmente revelam as seguintes características:

a. apresentam-se formadas por fragmentos de tamanhos variáveis, dependendo do transporte do material ter sido feito por água, gelo ou vento;

b. exibem ou não estratificação (planos com coloração e/ou granulação diferentes);

c. mostram-se formadas por partículas arredondadas ou angulares, unidas ou não por cimento. Tal cimento pode ser constituído comumente por argila, sílica, carbonato ou óxidos de ferro.

d. as rochas sedimentares as vezes contêm restos de plantas ou animais (rochas de origem orgânica), podendo ser algumas vezes observados em exame macroscópico;

e. certas rochas formam-se por precipitação química em ambiente aquoso (rochas sedimentares de origem química), como a gipsita, o calcário estalactítico, etc.

C. Rochas metamórficas

Como são rochas formadas a partir de outras que foram submetidas a pressões e/ou a temperaturas elevadas, podem apresentar algumas das seguintes feições características:

a. foliação resultante do desenvolvimento mais ou menos paralelo de minerais placóides, prismáticos e alongados, podendo ser contínua (como nos xistos) ou descontínua (como nos gnais e em alguns quartzitos).

b. fragmentos maiores soldados por partículas finas do

mesmo material, como nas "brechas metamórficas", que são rochas formadas durante os falhamentos da crosta; não confundir com as "brechas sedimentares", pois estas apresentam partículas maiores soldadas por um cimento qualquer, desenvolvido num processo sedimentar.

c. No caso de mármore há, entretanto, maior porcentagem de minerais granulares em relação aos lamelares.

III. EXTRAÇÃO E EMPREGO DOS MATERIAIS NATURAIS

Dentre todas as matérias primas extraídas da crosta terrestre, as empregadas na construção civil ocupam o primeiro lugar em tonelagem. Para formarmos uma idéia de quantidade, entre brita, areia e cascalho usados para diversos fins, só nos Estados Unidos, foram consumidos perto de 1,8 bilhões de toneladas em 1967.

Os materiais de construção podem ser classificados em dois grupos: produto de rocha natural e produto de rocha preparada.

1. *Produto da Rocha Natural:* rochas de construção, rocha britada, areia e cascalho.

A. Rocha de Construção

Nesta classe, enquadraremos todas as rochas extraídas na forma de blocos, lajes, etc., que são empregadas em revestimentos, ornamentação e pisos, devendo portanto possuir algumas qualidades como beleza e durabilidade. Mármore, granitos, quartzitos, gnaisses e arenitos, constituem os principais tipos de rochas de construção.

A extração dessas rochas tem que ser feita com cuidados especiais para obtermos blocos e lajes com dimensões adequadas. No maciço rochoso a ser explorado, necessitamos fazer um estudo prévio do sistema de fraturamento e estratificação, porque justamente essas discontinuidades servirão como planos de desmontes. No caso dos quartzitos estratificados, a extração se faz através de cunhas e alavancas aplicadas nestes planos e muitas vezes como explosivos de baixa potência. No caso dos granitos, os blocos podem ser retirados através de uma sé-

rie de furos verticais e horizontais alinhados e estreitamente espaçados, e também com o uso de explosivos de baixa potência.

Empregamos procedimento semelhante, ou então usamos cabos e serras especiais para rochas, para extrair blocos de mármore, que posteriormente são serrados em várias placas.

Os blocos de pequena dimensão são retirados com explosivos potentes, e em seguida transportados para britadores (geralmente de mandíbula) que os trituram em fragmentos de várias dimensões, e logo após selecionados granulometricamente através de peneiras. As rochas comumente usadas são: basalto, diabásio, granito, calcáreo, dolomitos e alguns gnaisses. O emprego dessas rochas como brita numa determinada região além das características de qualidade, depende da proximidade do local de consumo, que é um fator econômico fundamental devido ao alto custo do transporte.

Usamos as britas geralmente como agregado para concreto e como base e leito de rodovias. As qualidades exigidas como agregado em concreto, são as seguintes: resistência mecânica adequada, inércia química (sem pirita, enxofre e matéria orgânica), ausência de argilas, grande variação nas dimensões dos fragmentos, baixa porosidade, alta densidade e superfícies rugosas. Para aplicação em rodovias, além dessas propriedades, o material deve ter boa adesividade asfáltica, alta resistência ao desgaste e à compressão (superior a 2.000kg/cm^2).

C. Areia e Cascalho

São materiais detritícos resultantes da decomposição de rochas que sofreram processo de intemperismo e que se acumularam em depósitos sedimentares pela ação de agentes transportadores naturais. As partículas arenosas são as de dimensões compreendidas entre 0,062mm a 2,000mm e os cascalhos são as maiores que 2,000mm. Como areia e cascalho constituem materiais detritícos, são muito resistentes aos processos normais de intemperismo. Salvo condições especiais, geralmente são constituídos de granulos de quartzo (areia) e fragmentos de quartzo, de arenitos silicificados e de quartzitos (cascalho).

A areia é extraída diretamente do depósito, atra

vés de pás, máquinas escavadeiras ou ainda com dragas.

A aplicação da areia é muito ampla, sendo determinada principalmente pela sua distribuição granulométrica e pureza. Como exemplo de suas aplicações, além da construção civil, citamos: fundição (moldes), filtros e abrasivos.

em função do tamanho dos grãos, da distribuição granulométrica e dos tipos de impurezas. As areias grossas com pouco teor de argila, são usadas em concretos; areias finas com relativo teor de argila são empregadas em argamassas. As areias usadas em concreto, entre outras especificações, não podem conter grande quantidade de feldspato, de calcedônica, de sílica amorfa, etc., pois reagem com o cimento alterando suas propriedades.

Nos filtros, as propriedades mais importantes são: seleção granulométrica, arredondamento e ausência de materiais solúveis (sais).

As areias empregadas na confecção de moldes para fundição devem possuir as seguintes características: distribuição granulométrica adequada, tal que 50% a 70% dos grãos caiam num pequeno intervalo de tamanho, pouca quantidade de argila, boa permeabilidade e refratariedade.

2. Produto de Rocha Preparada: cimento, cal, gesso, vidro e materiais que empregam argilas.

A. Cimento

O cimento utilizado na construção civil é o tipo Portland, cujas composições variam de acordo com suas aplicações, tratando-se basicamente de uma mistura adequada de pó calcário e argila. Ele é preparado através do aquecimento de uma pasta de calcário e argilas intimamente misturados, até o início da fusão (1400°C - 1600°C), resultando nos seguintes compostos anidros: silicato bicálcico e tricálcico, aluminato tricálcico e ferro aluminato tetracálcico. A este material chamado "clinker", depois de resfriado e moído é adicionado uma pequena proporção de gipso a fim de retardar o seu tempo de pega.

O endurecimento se dá em presença de água, devido a hidratação dos compostos anidros que são mais solúveis, resultando cristais hidratados.

O calcário empregado na fabricação do cimento deve ter baixo teor de magnésio, que compõe o mineral dolomita $Ca.Mg(CO_3)_2$. A magnésia (MgO), em quantidades superiores a certos limites, atua como agente expansivo não dando estabilidade de volume às argamassas e aos concretos. Muitas vezes, os calcários usados para cimento contêm argilas como impurezas e já nas proporções adequadas para fabricação, constituindo assim misturas naturais.

B. Cal

Preparada a partir de calcários ou calcários dolomíticos, por calcinação a uma temperatura inferior ao início da fusão e que depende do tipo de calcário empregado (850-1000°C). O produto resultante da decomposição térmica é CaO e impurezas, conforme a reação simplificada.



$$CaCO_3 = 100g ; CaO = 56g ; CO_2 = 44g$$

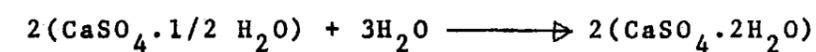
Fazendo as relações das massas envolvidas na reação, verificamos que há uma redução de 44% da massa original (CaCO₃) devido ao despreendimento do gás carbônico (CO₂). Isso ocasiona uma redução do volume inicial em 12% a 20%, resultando num produto (cal virgem) muito poroso, com grande capacidade de absorção de gases e alta reatividade com a água. A hidratação da cal virgem produz a cal hidratada, segundo a reação: $CaO + H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2 + calor$, que é usada na preparação de argamassas.

Os calcários comumente apresentam como impurezas, a dolomita $CaMg(CO_3)_2$ e as argilas. A dolomita, da mesma maneira que o carbonato de cálcio, por calcinação, passa a MgO na cal virgem, pois também é um aglomerante, porém seu endurecimento é muito lento.

Para produzirmos argamassas o hidróxido de cálcio é misturado com areia fina, que já contém certo teor em argila. O seu endurecimento se processa inicialmente pela perda de água e reação simultânea do $Ca(OH)_2$ com o CO_2 existente no ar, formando novamente $CaCO_3$. O fenômeno é chamado de recarbonatação e é acompanhado de um aumento de volume.

C. Gesso

O gesso é o produto obtido pela desidratação total ou parcial da gipsita ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). Com o aquecimento a 107°C, provocamos o despreendimento da água fracamente combinada e obtemos o hemidrato (gesso rápido ou gesso de Paris); a 200°C, obtemos o gesso anidro, que é altamente higroscópico, absorvendo rapidamente umidade e se transformando no hemidrato. Obtemos o gesso de pavimentação ou de endurecimento lento através do aquecimento do gesso a temperaturas entre 1000°C-1200°C, quando ocorre a dissociação em CaO e SO_3 . No Brasil, o gesso de Paris é o único empregado na construção. Devemos o endurecimento de qualquer tipo de gesso à combinação com água e despreendimento de calor através da seguinte reação:



Na construção, comumente empregamos o gesso de Paris em revestimentos internos (estruque), em argamassa composta - denominada rebôco lustroso e no preparo de produtos pré-fabricados. Todavia, sua aplicação mais importante ainda é na fabricação do cimento Portland, onde atua como agente regulador do tempo de pega.

D. Materiais que empregam argilas

Chamamos de argilas os materiais naturais de granulões inferiores a 0,004mm, no estado de dispersão, e formados na superfície da Terra por processo de intemperismo. Os depósitos de argilas podem ser de tipos: residual, quando ocorre acumulação no local da rocha alterada "in situ", ou transportado, quando a acumulação do material se dá noutro local, após um processo de transporte.

A composição química das partículas de argila é muito variada, sendo constituída principalmente por silicatos de alumínio hidratados, contendo magnésio e ferro e algumas vezes

metais alcalinos e alcalinos terrosos.

Na construção civil, as argilas entram na fabricação de tijolos, telhas, manilhas, azulejos, louças sanitárias, etc. Além disso, as aplicações das argilas são as mais variadas possíveis, dependendo das suas propriedades tecnológicas, como exemplo, citamos: sondagem para petróleo, fabricação de cimento, refinação de óleo, indústrias de papel e de borracha, inseticidas e pigmentos. Mais detalhes sobre argilas serão vistos no capítulo "XI - Argilas".

E. Vidro

Na fabricação do vidro, a areia deve ser de granulação específica, variando de 0,6 a 0,1mm e de pureza elevada, - praticamente composta apenas por grãos de quartzo (SiO_2); a presença de óxidos de ferro, chumbo, etc., provocam o seu escurecimento. Obtemos o vidro comum fundindo uma mistura de quartzo e carbonato de sódio ou sulfato de sódio. Há vidros especiais como o tipo pirex que é uma mistura de sílica, borax e alumina a qual, após a fusão, produz um borossilicato de alumínio que contém apenas 4% de metais alcalinos ou alcalino-terrosos.

IV. MICROSCOPIA ÓPTICA

A microscopia óptica, como método de identificação de substâncias cristalinas, é baseada na interferência que sofre a luz polarizada ao atravessar o retículo cristalino dos minerais. Ao microscópio que estuda as propriedades ópticas dos cristais, chamamos de microscópio petrográfico ou de polarização (Fig. 1). É semelhante ao microscópio comum, porém dotado de dois dispositivos de polarização da luz, sendo um (polarizador) colocado entre a amostra e a fonte de luz e outro (analisador) entre a objetiva e a ocular.

Existe também uma lente que pode ser interposta entre o analisador e a ocular (lente de Bertrand), que permite observação de figuras de interferência. A ocular desses microscópios possui retículo e a platina é dotada de movimento de rotação em torno do eixo óptico, tendo a borda graduada em graus.

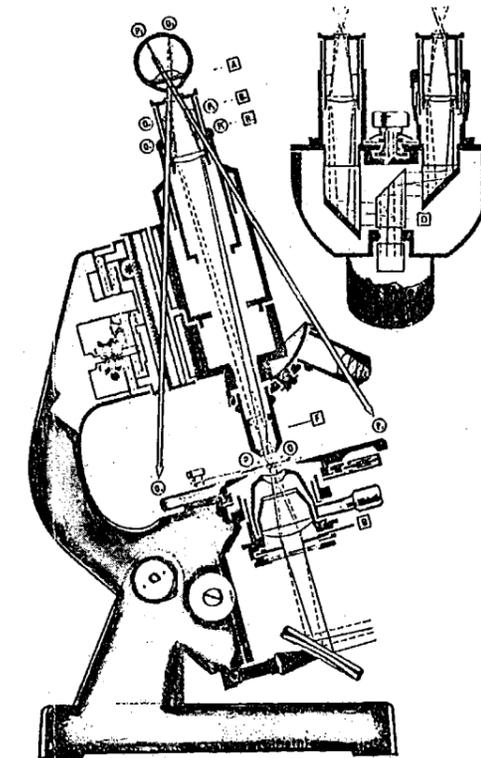


Figura 1
Microscópio Polarizador

Para observação ao microscópio, os minerais são montados em lâminas de vidro. As lâminas para identificação de rochas e minerais podem ser feitas de duas maneiras: em seções delgadas de rochas ou usando as partículas minerais soltas. O primeiro caso é o de rochas que possuem boa coesão, permitindo-nos serrá-las em fatias; o outro, usamos para rochas de baixa coerência ou sedimentos soltos.

1. Preparação de lâminas

A. Seções delgadas

Serramos a rocha de forma a obter uma fatia de faces planas e paralelas, variando de 2mm a 5mm, usando para isso, uma serra diamantada específica. Em seguida, colamos uma das faces da fatia sobre uma lâmina de vidro e desgastamos a outra face até atingir uma espessura em torno de 0,03mm, e finalmente colamos sobre a amostra uma fina lâmina de vidro (lâminula).

Para polimento e desgaste da fatia de rocha, utilizamos o abrasivo "carborundum" (SiC), iniciando a operação com o de granulação mais grossa (180) e terminando com o mais fino (1000).

A cola que usamos neste processo é uma resina especial que possui o mesmo índice de refração que o vidro, para evitar refrações indesejáveis de raio luminoso ao atravessar o conjunto vidro-cola-rocha. Entre os adesivos, normalmente o mais usado é o bálsamo do Canadá, fazemos sua aplicação à quente e a solidificação se dá por resfriamento. Para limpeza e acabamento da lâmina, usamos xilol, que é um solvente do bálsamo.

B. Lâminas de fragmentos

A confecção é muito mais simples que a anterior e consta do seguinte: colocamos o bálsamo aquecido na lâmina de vidro, sobre ele os fragmentos de minerais e em seguida cobrimos com a lâminula. Este tipo de lâmina, evidentemente, só é usado para observações de minerais transparentes e de pequena espessura, cerca de 0,2mm.

Examinamos as lâminas de seções delgadas e de fragmentos no microscópio petrográfico, onde a luz polarizada passando através dos minerais sofre fenômenos de interferência, que variam com a espécie mineral e sua posição em relação ao raio luminoso. São, portanto, observações dos raios refratados pelo mineral. No caso de minerais opacos (metálicos) observamos os raios refletidos; tal técnica consiste essencialmente de polimento de uma superfície e a sua observação em microscópios de luz refletida, muito usados em Metalografia.

2. Exame de lâminas ao microscópio

Os minerais, como são constituídos internamente por uma estrutura tridimensional ordenada, provocam modificações nas características da luz polarizada que os atravessa.

Estas modificações são, devidas entre outras causas, ao sistema cristalino a que pertence o mineral. Como vimos em aulas teóricas do Curso de Geologia Geral, os minerais podem ser enquadrados em 7 sistemas cristalinos; cúbico, hexagonal, tetragonal, trigonal, ortorômbico, monoclinico e triclinico.

Se um raio de luz incide perpendicularmente na face de um cristal, do sistema cúbico, sofre apenas fenômeno de refração simples. Observamos este fenômeno no microscópio petro-

gráfico como uma ausência de luz no campo ocupado pelo mineral, caso o analisador estiver colocado no caminho do raio luminoso. A explicação deste fato é a seguinte: como a luz que incidiu no cristal está polarizada segundo uma direção e o cristal apenas produziu um fenômeno de refração simples, o raio emergente continua vibrando na mesma direção. Este raio, ao ser recebido pelo analisador, é absorvido porque a direção de passagem por este dispositivo é a 90° em relação ao plano de vibração da luz que passou pelo polarizador. Estes cristais são chamados isotrópicos e entre eles podemos citar, como exemplos, a fluorita, o diamante, a granada e etc.

Se o mesmo raio atravessar um cristal do sistema trigonal (como por exemplo a calcita), tanto normal como inclinadamente, sofrerá fenômeno de dupla refração. Um dos raios, o chamado ordinário, atravessará o cristal como se ele fosse isotropo, podendo ser absorvido no analisador; o outro chamado de extraordinário, sofrerá um desvio que permitirá sua observação na ocular do microscópio. Os planos de polarização dos raios são ortogonais e chamamos tais cristais de anisotrópicos.

Existe, nos minerais anisotrópicos, direção segundo a qual o raio incidente atravessa o cristal sem sofrer mudança no plano de vibração. A essa direção, denominamos eixo óptico do cristal e os minerais que possuem um eixo óptico são chamados uniaxiais e os com dois eixos, biaxiais.

Os minerais que se cristalizam nos sistemas tetragonal, hexagonal e trigonal, pertencem ao grupo dos anisotrópicos uniaxiais; os dos sistemas monoclinico, triclinico e ortorômbico pertencem ao grupo dos anisotrópicos biaxiais.

Necessitamos distinguir o sinal óptico dos cristais uniaxiais e biaxiais. Assim, nos uniaxiais, o cristal é positivo quando o índice de refração do raio extraordinário é maior do que o do raio ordinário, como no quartzo; caso contrário, o cristal é negativo, como na calcita. No caso dos cristais biaxiais, o conceito de sinal óptico está ligado ao valor do ângulo entre os eixos ópticos, sendo positivo quando menor que 90° (gipso, por exemplo) e negativo quando for maior que este valor (ortoclásio, por exemplo).

Alguns minerais, durante a cristalização, tem a -

tendência de se unirem formando dois ou mais cristais da mesma espécie. É o que chamamos de geminação e que constitui, muitas vezes, uma das características principais para identificação de certos minerais. Como exemplo, citamos a geminação polissintética dos cristais de plagioclásio, resultantes da justaposição de uma série de finíssimas lâminas, que formam um conjunto no qual não distinguimos os indivíduos isoladamente.

Quando analisamos minerais ao microscópio, além dos fenômenos já descritos, fazemos outras observações como: coloração, tamanho, forma, clivagem, índice de refração e etc.

Citamos como exemplos, as características de alguns minerais mais comuns quando observados ao microscópio:

Ortoclásio: incolor, cristais prismáticos, clivagem perfeita e paralela, relevo baixo, extinção paralela, geminação segundo lei de Carlsbad, biaxial negativo.

Albita: incolor, cristais aproximadamente tabulares, clivagem perfeita, relevo baixo, extinção não paralela, geminação polissintética, biaxial positivo.

Biotita: marron, cristais placóides, clivagem perfeita, relevo alto, extinção paralela, biaxial negativo.

Quartzo: incolor, cristais prismáticos, sem clivagem, relevo baixo, extinção paralela, uniaxial positivo.

Piroxênios: incolor, cristais prismáticos, clivagem perfeita, relevo alto, extinção paralela, biaxial positivo.

Calcita: incolor, agregados cristalinos, clivagem perfeita, relevo alto, uniaxial negativo.

V. ANÁLISE SEDIMENTOLÓGICA

Os sedimentos que constituem materiais largamente empregados na construção civil, ocorrem na natureza formando rochas ou massas incoerentes. A análise granulométrica de um sedimento é importante tanto para caracterizá-lo fisicamente quanto para fazer inferências a respeito do ambiente que reinou na época de sua deposição. Portanto, não podemos definir um

sedimento apenas como grosso, médio ou fino, mas sim representá-lo através de curvas de frequência de tamanhos de grãos. Obtemos estas curvas, resultantes da análise granulométrica, a partir da separação das diversas classes de granulações que constituem os sedimentos. Quando as partículas do sedimento não estão cimentadas ou muito compactadas, o procedimento é simplificado, entretanto, quando elas se encontram cimentadas formando uma rocha, necessitamos de uma etapa inicial de desagregação.

Damos a seguir as etapas do processo de análise granulométrica, sendo que maiores detalhes poderão ser encontrados na apostila do curso optativo de Sedimentologia.

1. *Coleta de material* (de acordo com os critérios próprios de amostragem de sedimentos)

2. *Quarteação*

É a redução da amostra à quantidade ideal, quer para transporte (amostra de campo), quer para o processamento em laboratório. Esta operação é feita com o auxílio de dispositivo denominado quarteador (o mais comum é o tipo Jones), eliminando o fator de escolha que pode influir nos resultados obtidos. Na quarteação em laboratório, reduzimos a amostra a certas quantidades de acordo com a natureza do sedimento. Assim:

para material predominantemente arenoso, aproximadamente 60g;
para material predominantemente silteoso, aproximadamente 30g;
para material predominantemente argiloso, aproximadamente 10g.

Como na quarteação o sedimento já sofre uma primeira desagregação mecânica, devemos tomar cuidados especiais para evitar a quebra dos grãos.

3. *Secagem*

Executamos a secagem em estufa à temperatura de aproximadamente 100°C, durante 3 horas. A temperatura não deve ultrapassar 115°C, para não provocar a saída de água de constituição das argilas. Após a secagem o material é resfriado e pesado.

4. *Desagregação*

As rochas sedimentares podem apresentar, como cimento, diversos materiais. Dependendo do tipo de cimento, devemos -

proceder à desagregação e posteriormente, fazer o estudo granulométrico normal.

A. *Cimento silicoso* - desagregação difícil, requerendo - técnica especializada. Normalmente o estudamos em secção delgada ou em uma ou mais superfícies polidas em planos diferentes, dependendo da orientação dos grãos.

B. *Cimento carbonático* - usamos HCl, 1:5 (a quente, se for cimento dolomítico), tendo o cuidado de examinar a possível existência de fósseis calcários, o que fazemos sob uma lupa de forte aumento. Cuidados especiais devemos tomar quando existem fragmentos clásticos de calcário, que poderão ser destruídos. Caso existam, e se a cimentação não for muito intensa, tentamos a desagregação mediante fervura em solução concentrada de soda.

C. *Cimento argiloso* - deixamos os fragmentos da rocha dentro da água por várias horas. Caso o cimento amoleça, realizamos a desagregação manualmente ou com um bastão de borracha resistente. Caso contrário, fervemos durante 15 a 30 minutos em solução supersaturada de sulfato de sódio ou qualquer outro sal que tenha alta expansão quando cristalizado. A cristalização - destes sais nos interstícios da rocha gera fortes tensões capazes de provocar a separação dos grãos. Se necessário, repetimos a operação, terminando com uma forte agitação do material - em batadeira elétrica.

D. *Cimento limonítico* - fervemos os fragmentos em ácido - clorídrico 1:3, juntamente com vários glóbulos de estanho metálico ou zinco. O hidrogênio nascente liberado, solubiliza os hidróxidos de ferro.

E. *Cimento piritoso* - dissolvemos com HNO₃, caso seja necessário eliminar a pirita autígena (formada "in loco") junto a grãos já desagregados, aquecemos o material num bico de Bunsen e retiramos a pirita com um imã, pois quando aquecida torna-se magnética.

F. *Cimento betuminoso* - removemos com éter, xilol ou álcool. O pirobetume requer aquecimento.

Colocamos o material assim desagregado numa cuba, adicionamos uma pequena quantidade de água e também aproximada-

mente 5ml de solução diluída de amoníaco para ajudar a defloculação da argila.

5. *Separação da fração arenosa*

Colocamos o material em uma peneira de 0,062mm, lavamos com água e recolhemos o que passou pela peneira numa proveta graduada (1 litro), na qual efetuaremos a separação das frações silte e argila. Secamos o material constituído pela fração arenosa que fica retido na peneira e o colocamos em uma bateria de peneiras dispostas segundo a escala granulométrica escolhida. Efetuamos o peneiramento em uma máquina tipo Ro-Tap, tomando os cuidados necessários para controlar o tempo de peneiramento no aparelho, pois diversos fatores podem aumentar a quantidade de material das frações mais finas em detrimento das mais grossas, falseando assim os resultados da análise granulométrica. Normalmente, tais fontes de erro durante o peneiramento são: atrito entre os grãos; minerais que apresentam clivagem podendo se quebrar nesses planos de menor resistência; presença de grãos com diferentes durezas.

6. *Separação das frações silte e argila*

Recolhemos o material que passou pela peneira numa proveta para investigações das frações granulométricas silte e argila, que podemos fazer utilizando os processos da pipetagem volumétrica, do hidrômetro, da balança de sedimentação e do sedimentômetro fotoelétrico (encontramos detalhes sobre estes - processos na apostila da disciplina optativa de Sedimentologia).

A. *Método da pipeta de Andreasen*

No caso do material recolhido na proveta apresentar flocos, adicionamos mais 5ml de solução de hidróxido de amônia. Se ainda continuar a apresentar flocos, devemos experimentar outros antifloculantes como: hexametáfosfato de sódio, silicato de sódio e oxalato de sódio.

Fundamentalmente, a pipetagem volumétrica se baseia na queda livre de partículas em meio líquido, de onde são retirados volumes constantes da suspensão, a uma profundidade -

previamente fixada e a intervalos de tempos também pré-fixados (Lei de Stokes). Os primeiros volumes da suspensão conterão as partículas maiores e os últimos as partículas de diâmetros menores. Secamos essas quantidades retiradas em estufa (100-105°C) e os seus resíduos representam as quantidades dos sólidos em suspensão.

Pesamos tais resíduos em balança com precisão até 0,005g e as diferenças sucessivas entre as frações de maior e menor diâmetro, representam o peso real das partículas de uma determinada fração granulométrica.

Através de cálculos de porcentagens, obtemos os valores das frações siltosas e argilosas que, somadas aos valores encontrados no peneiramento das frações arenosas, constituem a distribuição granulométrica de todo o sedimento. Para maior facilidade de cálculos, os valores são colocados na Tabela I. O exemplo a seguir mostra como se procede para calcular as diversas frações granulométricas contidas na suspensão aquosa.

PIPETAGEM													
Diâmetro das partículas		Prof.	Tempo			Frasco	Peso mat. pipetado			Peso		Porcentagem	
φ	mm		H	M	S		Bruto	Frasco	Part. 20 ml	Part. em 1ℓ	Inter. em 1ℓ	Inter. s/cot.	Acumulada
+4,0	0,0625	20			58	1.							
+4,5	0,0442	20		1	56	2							
+5,0	0,0312	10		1	56	3							
+5,5	0,0221	10		3	52	4							
+6,0	0,0156	10		7	44	5							
+6,5	0,0110	10		15	-	6							
+7,0	0,0078	10		31	-	7							
+7,5	0,0055	10	1	1	-	8							
+8,0	0,0039	10	2	3	-	9							
+8,5	0,00276	10	4	5	-	10							
Total		-	-	-	-	-							

Tabela I

Registro dos dados da pipetagem. $\phi = -\log_2 d$, onde d é o diâmetro expresso em milímetros.

EXEMPLO:

- agitamos e marcamos o tempo;
- 58 segundos após, introduzimos a pipeta até 20cm, coletamos 20cm³ de suspensão (tomando o cuidado para evitar turbilhonamento); nessa operação estamos coletando um conjunto de partículas de 0,062mm para baixo;
- na segunda operação, após 1'58", coletamos as partículas de 0,044mm para baixo e assim sucessivamente.

Por diferença, saberemos qual a quantidade de partículas na fração entre 0,062mm-0,044mm, contida em 20cm³. Recalculamos então para um litro, que constituia o volume inicial do ensaio.

B. Método do hidrômetro (Densímetro)

Por esse método, medimos a densidade da suspensão em intervalos de tempo pré-estabelecidos, durante a sedimentação do material, usando um hidrômetro imerso na suspensão. Em cada leitura do densímetro, medimos a temperatura da suspensão - que influencia o processo. A partir da densidade, por fórmulas, calculamos sua concentração e através de curvas e fórmulas determinamos a granulometria e a distribuição das classes granulométricas em porcentagens.

C. Método da balança de sedimentação

Dentro do recipiente de sedimentação há um prato que recebe material em queda contínua e a balança apresenta um braço no qual uma pena se move 0,08cm sobre uma folha de registro a cada 2mg de material que se deposita sobre o referido - prato. Assim obtemos um gráfico contínuo de pesos crescentes em função do tempo. Através de tabelas, baseadas na Lei de Stokes, determinamos a curva acumulativa do material ensaiado.

D. Método fotoelétrico

Durante a queda do material no frasco de sedimentação, a suspensão é atravessada por feixes de luz. Dependendo das mudanças de absorvância da suspensão, os feixes a atraves-

sam com maior ou menor facilidade. A intensidade da luz é medida por uma fotocélula e registrada continuamente por um estilete.

Dentre vários métodos citados, o da pipetagem é o que mais empregamos em geologia, enquanto que o do hidrômetro é o de rotina em Mecânica dos Solos. Quando comparamos os dois processos verificamos que, para concentrações entre 6 a 25 g/l, ambos os métodos são resultados similares; para concentrações menores que 6 g/l, a pipeta é mais precisa e para concentrações maiores que 25 g/l, o hidrômetro fornece resultados mais satisfatórios.

7. Representação gráfica

Nos ensaios de análise granulométrica, geralmente determinamos as porcentagens em peso de cada classe do sedimento. Lançamos os dados obtidos em um gráfico que possibilita a interpretação da natureza geológica dos sedimentos.

Os tipos de gráficos mais usados são: histogramas, curvas de frequência simples e curvas de frequência acumulada.

A utilização de cada um desses tipos de representação é determinada pela medida que se faz em uma amostra. Como exemplo, citamos as curvas de frequência simples que permitem visualizar com maior facilidade algumas propriedades da distribuição do sedimento como a Assimetria (S_{K_I}) e Curtose (K_G).

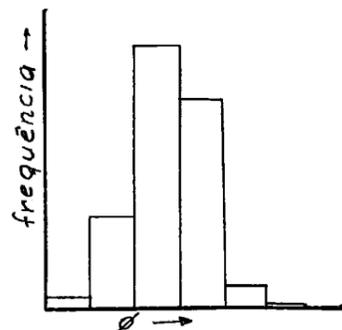


Figura 2



Figura 3

As curvas acumulativas também permitem uma fácil visualização da distribuição granulométrica dos sedimentos. De las podemos extrair facilmente as porcentagens acima (% retida) e abaixo (% que passa) de um determinado diâmetro do material.

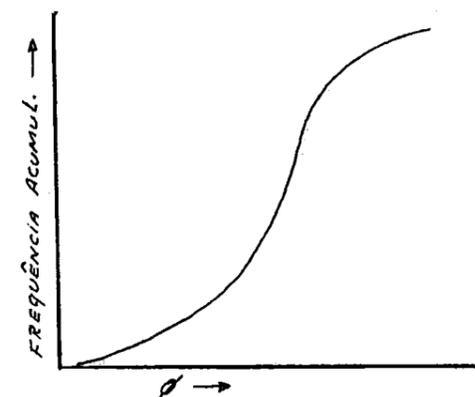


Figura 4

Curva de Frequência Acumulada

8. Análise do arredondamento

Efetuamos a determinação do arredondamento na fração de maior frequência do sedimento, utilizando lupa binocular ou projeção óptica das partículas.

A. Grau de arredondamento segundo Wadell

Quando os grãos dos sedimentos são de granulação correspondente à areia, colocamos uma porção deles sobre uma lâmina e projetamos numa tela, a fim de comparar com valores padronizados e aplicar a fórmula:

$$P = \frac{\sum r}{RN}$$

onde: P - grau de arredondamento; r - raio de curvatura dos cantos; R - raio do círculo máximo inscrito e N - número de curvaturas convexas da borda do grão.

Segundo esse método, classificamos o grau de arredondamento dos grãos segundo faixas, como segue: angular - 0,0

a 0,15; subangular - 0,15 a 0,25; subarredondado - 0,25 a 0,40;

B. Grau de arredondamento por comparação visual

O método de Wadell é muito preciso porém trabalho so e demorado. Assim, o processo que mais usamos é o de comparação de cada grão com formas tabeladas, também com lupa binocular ou projeção óptica. Fazendo tal estudo para cada classe granulométrica, pois os valores de arredondamento de um sedimento podem ser diferentes para cada classe.

Por esse método, o número de partículas analisadas deve ser de aproximadamente 200; o que nos permite um estudo estatístico através de histogramas ou curvas de frequência. Tal estudo de arredondamento, nos auxilia nas inferências sobre o sedimento no que diz respeito ao tipo de transporte, à distância da origem e a seleção.

9. Análise da esfericidade

Esfericidade é uma grandeza que relaciona a forma da partícula com uma esfera perfeita.

$$\text{Esfericidade} = \sqrt[3]{\frac{\text{Vol. partícula}}{\text{Vol. da esfera que circunscribe a partícula}}}$$

Visualizamos a esfericidade de uma partícula admitindo um grão colocado dentro de uma esfera de vidro com o tamanho exato para contê-lo. Um grão quase esférico ocupará quase totalmente o volume interno, enquanto que uma partícula discóide preencherá apenas parte deste volume.

Existem vários métodos para análise da esfericidade, no entanto, o que mais usamos é o da comparação visual, com tabelas padrões, que pode ser feito simultaneamente com o estudo do arredondamento.

Podemos estimar a esfericidade dentro de cada classe granulométrica, pela contagem de aproximadamente 50 grãos em cada uma. Com os dados obtidos, construímos gráficos para a interpretação estatística da distribuição.

10. Análise mineralógica

As rochas sedimentares tem minerais tanto com den

sidades baixas como quartzo, feldspatos, micas, como com densidades mais altas como magnetita, turmalina, zircão e etc. Aos últimos chamamos minerais "pesados" e ocorrem, normalmente em pequenas porcentagens (aproximadamente 3%).

No método mais empregado para a separação dos minerais "pesados", utilizamos líquidos de densidades elevadas, como bromofórmio, cuja densidade é 2,87. Examinamos e identificamos tanto os minerais pesados como os leves por microscopia óptica.

Um outro processo mais prático e rápido para a separação de minerais de um sedimento é o da "Permeabilidade Magnética". Nesse processo utilizamos equipamento separador que consta basicamente de um potente eletroímã que cria um campo magnético com intensidade controlável atuante sobre os grãos minerais que passam por esse campo através de uma canaleta vibrátil com inclinação também ajustável.

Quando os minerais são submetidos à ação de um campo magnético, sabemos que eles apresentam diferentes susceptibilidades magnéticas e podem ser agrupados em 4 classes: magnetismo forte, médio, fraco e não magnéticos. Quando queremos separar uma classe de minerais, ajustamos tanto a inclinação da canaleta como a intensidade do campo magnético criado, obtendo, assim, resultados bastante satisfatórios.

VI. DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE

1. Introdução

As densidades dos materiais encontrados na crosta terrestre variam com a composição mineralógica e com o grau de compactação, o diabásio apresenta maior densidade que o granito devido à presença de minerais ferro-magnesianos mais densos que os silico-aluminosos do granito. De uma maneira geral, as rochas ígneas escuras apresentam maior densidade que as de coloração clara, o que também está relacionado com a composição mineralógica, uma vez que os minerais ferros-magnesianos são de coloração escura.

Num mesmo tipo de rocha, podemos ter diferentes -

densidades devido a presença de maior ou menor quantidade de água e de vazios. Chamamos de densidade aparente do material rochoso, a relação entre a sua massa e seu volume, incluindo a água e os vazios. Na densidade absoluta, entretanto, consideramos somente o volume das partículas minerais.

Chamamos densidade relativa (ρ_r) de um material, a razão entre sua massa específica (ρ) e a de outro corpo, tomado para termo da comparação. Normalmente, para sólidos e líquidos, o corpo tomado para comparação é a água destilada, isenta de ar, à temperatura de 4°C, cuja massa específica (ρ_a) é igual a 1g/cm³.

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_a}$$

ρ_r - massa específica relativa
 ρ - massa específica ou densidade absoluta
 ρ_a - massa específica da água (1g/cm³)

A densidade aparente das rochas é sempre menor - que a densidade absoluta média dos seus componentes minerais, devido ao fato do grau de compactação nunca atingir o valor máximo, que seria aquele onde não existisse espaço entre as partículas.

Necessitamos conhecer os valores das densidades - dos materiais para podermos fazer transformações de volume em peso de um determinado agregado quando utilizado em obras de engenharia.

As rochas normalmente são submetidas a esforços de compressão e a resistência, por sua vez, tem relações com a densidade aparente. Dados experimentais demonstram que a resistência à compressão cresce com a densidade aparente.

Nos casos onde a massa específica de um corpo é relativamente menor do que a massa específica dos pesos padrões de comparação, devemos fazer correção levando em conta o efeito do empuxo do ar. Não é o nosso caso, pois trabalhamos com minerais e massas rochosas, cujas massas específicas são relativamente altas.

2. Métodos de Determinação

A. Picnômetro

O picnômetro consta de um frasco pequeno e de um tubo capilar no qual existe uma marca de referência do volume - do frasco. Picnômetros mais completos possuem termômetro acoplado ao conjunto, para tomada de temperatura. O corpo sólido, cuja densidade se deseja conhecer, deve ser triturado em pequenos pedaços de forma que possam ser introduzidos no frasco. A sequência das operações para determinação da densidade de sólidos, usando o picnômetro, são as seguintes:

- a - determinamos a massa m_1 do picnômetro, cheio de água destilada até o traço de referência;
- b - determinamos a massa m_2 do corpo de prova;
- c - determinamos a massa m_3 do picnômetro cheio de água destilada, contendo no seu interior o corpo de prova.

Logo, a densidade vale:

$$\rho = \frac{m_2}{(m_1 + m_2) - m_3}$$

Devemos eliminar todas as bolhas de ar que tendem a ficar aderidas ao material, principalmente se ele for pulverulento.

Nos casos de materiais solúveis n'água, escolhemos um líquido com densidade conhecida ρ_l , no qual o material - seja insolúvel. Desta maneira, determinamos a densidade ρ' do material em relação a ρ_l .

$$\rho = \rho' \cdot \rho_l$$

As densidades dos materiais são geralmente determinadas em relação a água na temperatura ambiente (20°C). Quando desejamos maior precisão nas medidas, construímos uma curva de calibração do picnômetro para termos a média dos valores a várias temperaturas.

B. Balança hidrostática

A balança hidrostática consta essencialmente de - uma balança analítica dotada de dispositivo adequado para mergulhar a amostra n'água. No nosso caso, usaremos uma balança elétrica (Metler), que já possui o dispositivo de fixação da amostra (Fig. 5, A e B).

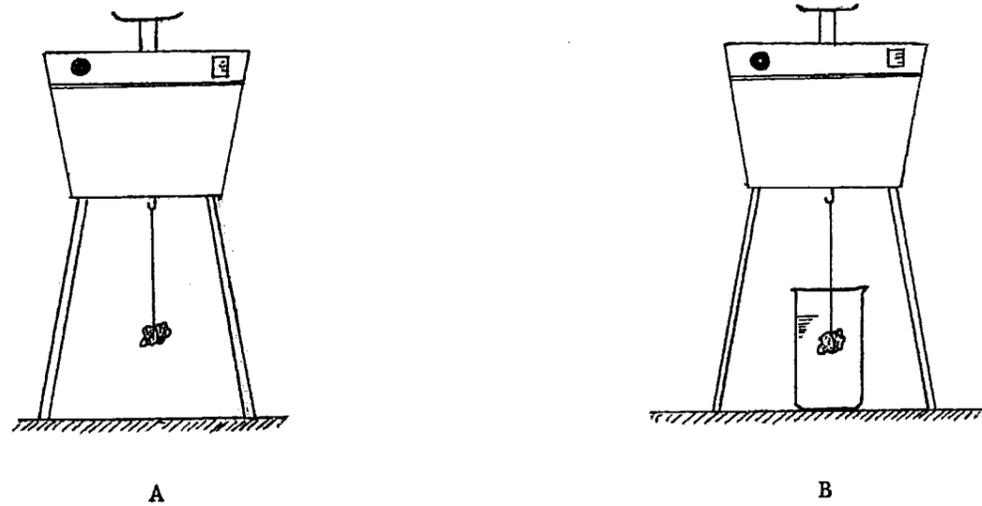


Figura 5

Balança Metler. A amostra ao ar, B imersa na água

Necessitamos das seguintes operações para a determinação da densidade:

- a - determinamos a massa m_1 da amostra pendurada por um fio, como mostra a figura 5.A;
- b - mergulhamos a amostra num frasco contendo água e fazemos a leitura m_2 da massa da amostra submersa, como mostra a figura 5.B.

Nesta operação, tomamos o cuidado para que o corpo não toque nas paredes do frasco e que esteja livre de bolhas de ar na sua superfície. Calculamos a densidade pela fórmula:

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2}$$

C. Balança Mohr-Westphal

A balança de Mohr-Westphal é uma simplificação da balança hidrostática, sendo construída de tal modo, que na determinação da densidade de líquidos, fornece leitura direta do valor da densidade. A balança contém acessórios, com os quais determinamos a densidade de sólidos, cujo procedimento descrevemos a seguir:

a. colocamos o prato de pesos no gancho do braço da balança; no gancho do prato prendemos o cestinho que conterá os corpos de prova;

b. equilibramos a balança ao ar, através do acréscimo de m gramas no prato da balança;

c. colocamos os corpos sólidos no cestinho e para obtermos novamente o equilíbrio, necessitamos retirar alguma massa do prato; assim, a massa dos sólidos será p ;

d. mergulhamos o cestinho em água destilada e tanto os corpos sólidos como o cestinho sofrerão empuxo, que será compensado com a colocação de uma massa aferida adequada pendurada no gancho do prato; para estabelecermos o equilíbrio, devemos manter no prato uma certa massa p' .

A partir disso, calculamos a densidade dos sólidos pela fórmula:

$$\rho = \frac{p}{p' - (m - p)}$$

D. Balança de Stöbe

A balança de "Stöbe" baseia-se no princípio de alavanca e consta essencialmente de uma haste rígida graduada, com dois pontos fixos: um para pendurarmos a amostra e outro de apoio para a haste. Devido ao seu princípio de funcionamento, com ela evitamos muitas operações de pesagem, comparativamente à balança hidrostática comum. Apresentamos o procedimento para determinação da densidade de rochas através das figuras 6, 7 e 8.

a. Nivelamento

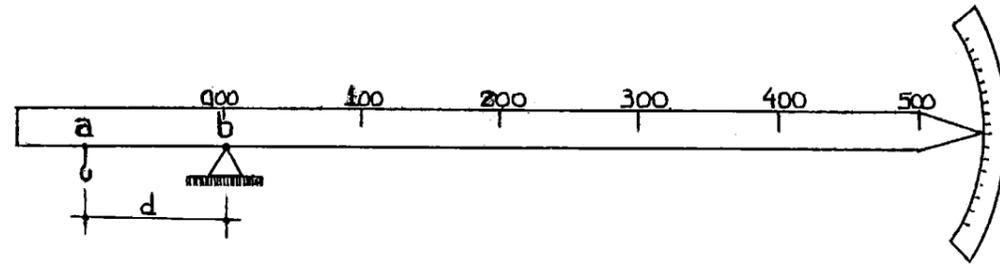


Figura 6

Nivelamento da haste

- a. ponto para fixação da amostra
- b. ponto de apoio da haste
- d. distância entre os apoios (fixa)

b. Determinação da massa da amostra

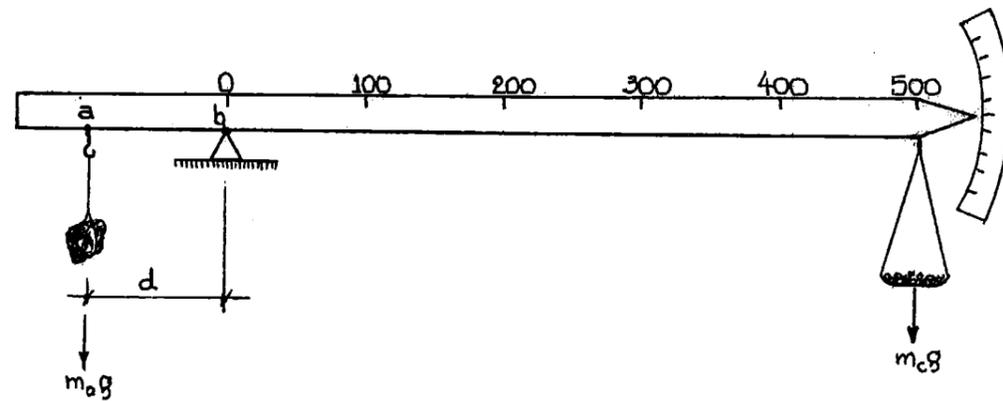


Figura 7

Equilíbrio amostra fora da água

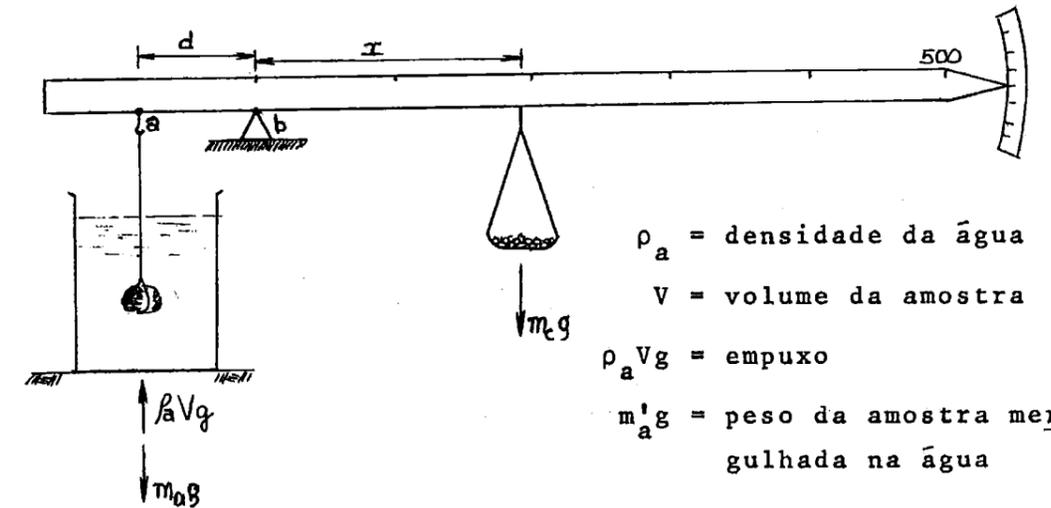
- m_a - massa da amostra
- m_c - massa do cavalete + tara

No equilíbrio:

$$\Sigma M(0) = 0 \quad m_a g \cdot d = m_c g 500 \quad \therefore \quad m_a = \frac{500 m_c}{d} \quad (1)$$

a. Amostra mergulhada n'água

Para encontrarmos a nova posição de equilíbrio, quando a amostra está mergulhada na água, deslocamos o cesto + tara para a esquerda, até uma distância x , a partir do ponto b .



- ρ_a = densidade da água
- V = volume da amostra
- $\rho_a V g$ = empuxo
- $m'_a g$ = peso da amostra mergulhada na água

Figura 8

Equilíbrio da amostra dentro da água

O peso da amostra mergulhada na água será:

$m'_a g = m_a g - \rho_a V g$, quando usamos água destilada podemos fazer $\rho_a = 1 \text{ g/cm}^3$ e então, o volume da amostra será $V = m_a - m'_a$. Como a densidade é dada por $\rho = m_a / V$, teremos:

$$\rho = \frac{m_a}{m_a - m'_a} \quad (2)$$

Para expressarmos a massa da amostra mergulhada n'água em função da massa do cavalete mais a tara e das distâncias, fazemos, no equilíbrio, a $\Sigma M(0) = 0$, ou seja, $m'_a d = m_c \cdot x$ onde x é a leitura na escala. Assim teremos:

$$m'_a = \frac{m_c \cdot x}{d} \quad (3)$$

Levando os resultados (1) e (3) em (2) teremos:

$$\rho = \frac{500 m_c / d}{(500 m_c / d) - (m_c \cdot x / d)} = \frac{500}{500 - x} \quad \therefore \quad \rho = \frac{1}{1 - \frac{x}{500}} \quad (4)$$

Para maior facilidade na determinação da densidade, encontramos tabelados os valores de ρ em função de x .

Desta maneira, com apenas duas operações, determinamos a densidade de uma amostra.

d. Procedimento

- nivelamos a balança através do seu fio de prumo;
- equilibramos sem o cavalete;
- colocamos o cavalete na posição 500 da haste;
- penduramos a amostra no ponto a ;
- equilibramos nessa posição com a adição de massas no prato do cavalete;
- suspendemos suavemente a cuba de água mergulhando toda a amostra;
- deslocamos o cavalete para a esquerda até atingir nova posição de equilíbrio;
- lemos o valor x na escala da haste, correspondente à posição do cavalete e procuramos a densidade na tabela ou calculamos com o uso da fórmula (4).

OBSERVAÇÕES

- a massa mínima da amostra deve ser de 300g, isto porque amostras menores não permitem o equilíbrio da balança com o cavalete na posição correta;
- tomar cuidado para que a amostra, após mergulhada na água, fique totalmente imersa e sem tocar nas paredes do recipiente;
- evitar a formação de bolhas de ar ao redor da amostra.

Como exemplo, daremos alguns valores da densidade de rochas para se ter uma idéia da ordem de grandeza: Arenito Botucatu 2,3; Quartzito 2,5; Granito 2,6 e Basalto 2,8.

VII. ENSAIOS DE COMPRESSÃO

1. Introdução

Comumente, a necessidade de se conhecer as proprie

dades das rochas quanto à Engenharia é de importância fundamental.

Dessa forma, desenvolveram-se inúmeros ensaios de laboratório visando a determinação de propriedades mecânicas das rochas, tais como: resistência à tração, resistência à compressão simples, propriedades de tensão-deformação sob compressão simples, etc.

Com relação aos ensaios de compressão devemos considerar dois tipos fundamentais: ensaio de compressão simples e triaxial.

No ensaio de compressão simples (também denominado "uniaxial" ou "não confinado"), submetemos um corpo de prova de rocha a forças compressivas axiais conhecidas, medindo simultaneamente as deformações resultantes.

No ensaio de compressão triaxial (ou confinado), a superfície lateral de um corpo de prova de rocha permanece sob pressão hidrostática constante, ao mesmo tempo que aplicamos axialmente uma carga compressiva. Tem por finalidade estimar as características mecânicas de uma rocha submetida a solicitações triaxiais, tentando-se assim uma representação da situação de confinamento existente num maciço rochoso.

Realizamos apenas ensaios de compressão simples, face às características do equipamento existente no Laboratório.

A fim de simplificar a aplicação dos conceitos da teoria da elasticidade, consideramos a rocha ensaiada como um material elástico, homogêneo e isotrópico, muito embora não o seja.

Os fatores que afetam os resultados do ensaio de compressão simples são: orientação da amostra quanto à estratificação ou sistemas de fraturamento; vazios orientados ou microfaturas; tamanho do corpo de prova; saturação do corpo de prova.

2. Ensaio de Compressão Simples

Basicamente, o ensaio de compressão simples consiste em submetermos um corpo de prova de rocha, com dimensões e

geometria bem definidos, a tensões axiais de compressão em um equipamento de carga adequado e medirmos sobre ele as deformações resultantes que permitirão determinar as características mecânicas.

Assim, as características mecânicas obtidas a partir de ensaios rápidos em compressão simples são:

- módulo de elasticidade, que é uma constante elástica de material e que exprime a relação entre a tensão principal num ponto e a deformação principal correspondente, quando submetido a um estado de tensão simples;
- coeficiente de Poisson, também é uma constante elástica do material e que exprime uma relação entre a deformação transversal e a deformação longitudinal do corpo de prova sob estado de tensão simples;
- resistência à ruptura por compressão, é a tensão nominal de ruptura do material por compressão axial.

Num ensaio lento de compressão simples, submetemos o corpo de prova a uma força compressiva axial constante e periodicamente determinamos as deformações resultantes, conhecendo-se assim a velocidade de deformação do material (deformação no tempo, à carga constante).

A. Amostragem

Realizamos os ensaios com corpos de prova de formas cilíndrica ou prismática sendo que os primeiros geralmente são provenientes de testemunhos de sondagem e os últimos obtidos em laboratório, a partir de blocos de amostragem.

Quando obtemos o material a ser ensaiado a partir de testemunhos de sondagem, necessitamos de cuidados especiais não só com a perfuração como também com o manuseio dos testemunhos, além de indicações claras e precisas de localização dos furos e profundidade onde retiramos o corpo de prova. O comprimento do testemunho enviado para ensaio deve ser tal que permita a obtenção de corpos de prova com altura mínima igual a 2,5 vezes o diâmetro.

Quando o material é retirado em blocos para futu-

ra preparação de prismas para ensaios, devemos cuidar para que: sejam representativos do maciço em estudo, tenham formas aproximadamente cúbicas e dimensões compatíveis com o número de corpos de prova a serem preparados; é recomendável a extração em galerias e sem o uso de explosivos ou processo violento que possa abalar a rocha; finalmente, tais blocos devem ter suas orientações espaciais no maciço perfeitamente definidas.

B. Equipamento de ensaio

É constituído por: a) equipamento de carga, representado por alavancas, molas helicoidais e mais frequentemente, prensas hidráulicas; b) equipamento de medição das deformações, normalmente são usados extensômetros mecânicos, extensômetros elétricos de resistência e indicadores de deformações (manuais ou automáticos).

C. Preparação de corpos de prova

Para preparar os corpos de prova a serem ensaiados, usamos normalmente coroa diamantada, serra diamantada e disco de polimento.

Nos corpos de prova prismáticos, a secção transversal será quadrada e as superfícies laterais planas e paralelas duas a duas. Os topos deverão ser planos, paralelos entre si e perpendiculares às faces laterais. Quando se tratar de corpos cilíndricos, os topos deverão ser perpendiculares ao eixo longitudinal. Em ambos os casos, a altura deverá ser 2,5 a 3 vezes a dimensão transversal. Especial atenção devemos dedicar aos topos, para que sejam absolutamente planos e paralelos, a fim de obtermos melhor distribuição da tensão.

D. Aplicação de extensômetros

A seguir fazemos a aplicação de extensômetros aos corpos de prova, a qual será por ajustagem quando os extensômetros forem mecânicos ou por colagem quando elétricos de resistência. Caso pretendamos determinar o módulo de elasticidade, necessitamos medir apenas as extensões longitudinais; todavia, quando interessa determinar o coeficiente de Poisson, necessitamos medir também as deformações transversais.

Para montagem dos extensômetros mecânicos, necessitamos colocar pequenas chapas de cobre ou outro metal macio, nos pontos de fixação nos corpos de prova e que tem a finalidade de evitar escorregamentos dos extensômetros que provocariam medições falsas. Tais pontos de fixação devem estar afastados dos topos, a uma distância não inferior à metade da dimensão transversal do corpo de prova, como mostra a Figura 9.



Figura 9

Distribuição de tensões no corpo de prova

Os extensômetros elétricos de resistência são constituídos fundamentalmente por um enrolamento de condutor sensível, ligado a uma base de suporte (de papel ou plástico). Baseiam seu funcionamento na variação de resistência elétrica que um condutor apresenta ao se deformar.

Em ensaios com rochas, usamos normalmente extensômetros elétricos de pequena base, com o comprimento variando de 7 a 25mm, sendo que a grade sensível é plana e feita com um fio metálico de aproximadamente 0,2-0,3mm de diâmetro.

Como dissemos, a sua fixação no corpo de prova é por colagem e para tanto a superfície da rocha deve estar bem limpa, perfeitamente isenta de gordura. Além disso, deve ter

uma certa rugosidade, conseguida como lixa fina, tal que permita uma perfeita aderência. Normalmente utilizamos colas de dois tipos: nitro-celulósica, como a "Duco" e termo-reativas, como "Araldite" e "Marmoplast".

O uso de cola "Duco" é aconselhável para extensômetros com base de papel e para ensaios em ambientes de temperatura e umidade normais. Não recomendamos seu uso em ensaios de longa duração, porque as suas propriedades se alteram com o tempo.

Procedimento de Colagem:

- com o dedo, espalhamos fina camada de cola, tanto na superfície de colagem do extensômetro, quanto no corpo de prova (este já previamente marcado para tal fim);
- aplicamos o extensômetro sobre o corpo de prova, rolando o dedo polegar com pequena pressão, o que permite realizar a remoção do excesso de cola, bem como a expulsão de quaisquer bolhas de ar porventura existentes na camada de colagem;
- caso a superfície do corpo de prova seja muito porosa, devemos aplicar previamente uma camada de cola, que depois de seca regularizamos com lixa fina;
- quando a cola seca rapidamente (Duco ou Marmoplast), devemos manter o dedo bem pressionado sobre o extensômetro durante o tempo de colagem; caso contrário (Araldite), devemos manter comprimido o extensômetro com uma placa de borracha esponjosa, por meio de um grampo ou outro processo até a secagem completa. Durante a colagem, a superposição do extensômetro por um pedaço de celofane evitará que o excesso de cola grude nos dedos ou na placa de borracha.

Quando pretendemos determinar o módulo de elasticidade, usamos montar dois extensômetros no sentido longitudinal; quando queremos também o coeficiente de Poisson, necessitamos montar mais dois outros extensômetros no sentido transversal. Sendo um corpo de prova prismático, os extensômetros longitudinais, são montados nos centros de duas faces laterais opostas, e os transversais semelhantemente nas outras duas faces laterais. Nos corpos de prova cilíndricos, montamos os extensômetros de maneira semelhante, ao meio de geratrizes diametralmente opostas.

E. Técnica de ensaio

Como equipamento de carga utilizamos prensa hidráulica. Assim, com o corpo de prova devidamente preparado para ensaio deveremos centrá-lo perfeitamente no prato da prensa e sobre seu topo montaremos uma rótula a fim de garantir a axialidade da força aplicada.

Aplicaremos a carga progressiva e constantemente, sem choques, variando dentro dos limites de 5 a 10kgf/cm² por segundo, em apenas um ciclo de carregamento e até chegar à ruptura ou, em vários ciclos de carga-descarga, dependendo se o objetivo do ensaio seja determinar unicamente a resistência a compressão ou também a obtenção do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson.

Assim, para o segundo caso, realizamos normalmente dois ou três ciclos de carga e descarga, tal que a tensão máxima de cada ciclo não exceda a metade da tensão de ruptura estimada para a rocha em ensaio. Em cada ciclo, fazemos medições das deformações resultantes a intervalos regulares de tensão aplicada. Ao atingirmos a tensão máxima do ciclo e ao seu final, após a descarga, devemos fazer duas a três medidas da deformação espaçadas de pelo menos 5 minutos.

Quando pretendemos chegar à determinação da tensão de ruptura e estamos trabalhando com extensômetros mecânicos, devemos retirá-los antes do final violento do ensaio, caso contrário serão danificados.

F. Resultados

Calculamos os valores de módulo de elasticidade (E) e do coeficiente de Poisson (ν), através das expressões:

$$E = \frac{\sigma_z}{\epsilon_z} = \frac{F_z}{S \epsilon_z} \quad \nu = - \frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = - \frac{\epsilon_y}{\epsilon_z}$$

onde:

σ_z - tensão (kgf/cm²) aplicada;

F_z - força (kgf) aplicada no instante em que ocorrem as extensões ϵ ;

S - área (cm²) da secção reta inicial do corpo de prova;

ϵ_z - deformação longitudinal;

ϵ_x e ϵ_y - deformações transversais.

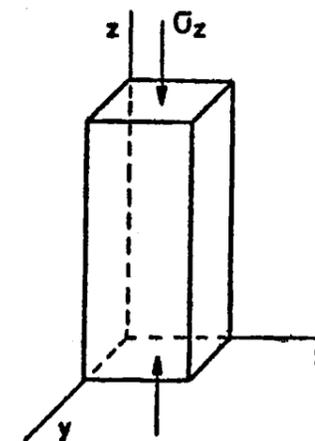


Figura 10

Orientação da tensão aplicada no corpo de prova

Com os valores das tensões e das deformações respectivas, construímos gráficos, tendo as tensões nas ordenadas e as deformações nas abcissas, que utilizamos largamente na apresentação de tais ensaios.

Calculamos a resistência à compressão (σ_R), pela relação da força (F_R) que provocou a ruptura e a secção transversal inicial (S) do corpo de prova.

A deformação unitária (ϵ), é a variação de comprimento verificada na unidade de comprimento. Assim, $\epsilon = \Delta l / l$, em que: Δl - deformação medida l - base de medição. Como ϵ em geral é muito pequeno, exprimimos seu valor em 10^{-6} .

3. Determinação do Índice de Resistência à Carga Pontual

A. Finalidade

Entendemos este ensaio como um método para medir a resistência de amostras de rocha no campo, usando equipamento portátil. Amostras, tanto nas formas de testemunho de sondagem

(ensaios "diametral" ou "axial") como de fragmentos (ensaio de "fragmento irregular"), são rompidas pela aplicação de uma carga concentrada, usando um par de compressores cônicos de metal.

B. Equipamento

O equipamento para ensaio incorpora um sistema de carga, outro de medição da carga necessária para romper a amostra e um terceiro de medição da distância entre os dois pontos de contato dos compressores cônicos.

O sistema de carga deve ser adaptável para permitir o ensaio com amostras de tamanho variando de 25 a 100mm, para as quais se requer normalmente, uma capacidade de carga da ordem de 5.000kgf.

Para transmitir carga à amostra, usamos um par de compressores cônicos de metal, truncados esfericamente (Fig. 11), que devem ser endurecidos para que não se danifiquem durante os ensaios. Alinhamos cuidadosamente os compressores segundo um eixo vertical, assim devendo permanecerem durante o ensaio, não se permitindo o uso da rótula ou outro componente não rígido.

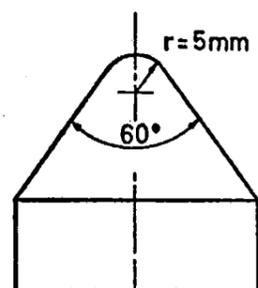


Figura 11

Dimensões dos compressores cônicos

O equipamento de carga deve ser resistente ao choque hidráulico e à vibração e manter a precisão de medida durante o ensaio. Deve estar munido de um ponteiro indicador da carga máxima de ruptura.

O equipamento de medição indica a distância entre os pontos de contato dos compressores cônicos; deve permitir teste e ajuste de zero e ser suficientemente robusto para manter a precisão durante o ensaio.

C. Procedimento

Em trabalhos de rotina, ensaiamos amostras com teor de umidade próximo do seu estado natural. Para classificação mais precisa e comparação entre amostras, devemos mantê-las estocadas em ambiente a $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e a $50\% \pm 5\%$ de umidade, por um período de 5-6 dias que antecedem os ensaios; nesse caso, as amostras devem estar preferencialmente na forma de testemunhos de sondagem.

a. Ensaio diametral

Testemunhos de sondagem com um quociente entre o comprimento e o diâmetro maior que 1,4 são apropriados para o ensaio diametral. Preferencialmente, devemos ensaiar dez ou mais espécimes por amostra, dependendo da quantidade de testemunhos obtidos e da uniformidade da rocha amostrada.

Colocamos a amostra na prensa e damos carga até que os compressores cônicos toquem o testemunho diametralmente, com a garantia de que a distância L entre o ponto de contato e a extremidade mais próxima seja no máximo $0,7D$, sendo D o diâmetro do testemunho (Figura 12). Registramos o valor D e procedemos à aplicação de carga até à ruptura, anotando também a carga

comprimento e o diâmetro de $1,1 \pm 0,05$. Assim, no ensaio diametral, podemos usar testemunhos longos, que por sua vez produzem espécimes adequados para o ensaio axial. Preferencialmente, devemos ensaiar dez ou mais espécimes por amostra, dependendo da quantidade de testemunhos obtidos e da uniformidade da rocha amostrada.

Colocamos a amostra na prensa, e damos carga até

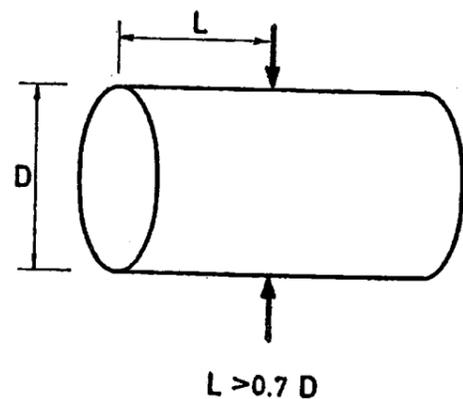


Figura 12
Ensaio diametral

que os compressores cônicos toquem no testemunho já axialmente orientado (Figura 13). Registramos a distância D e procedemos ao carregamento até à ruptura, anotando também a carga P de ruptura. Repetimos tal procedimento para os espécimes restantes da amostra.

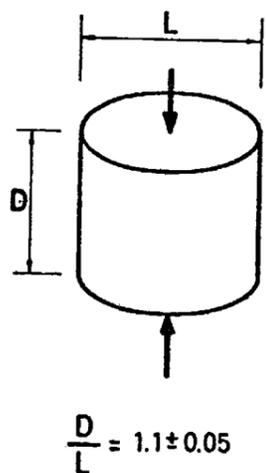


Figura 13
Ensaio axial

c. Ensaio com fragmentos irregulares

Selecionamos fragmentos de rocha (Figura 14) com diâmetro aproximado de 50mm com um quociente entre o diâmetro -

maior e o diâmetro menor entre 1,0 a 1,4 e os ajustamos usando uma técnica conveniente. Devemos ensaiar, pelo menos, vinte fragmentos por amostra.

Colocamos cada fragmento na prensa, damos carga até os compressores cônicos tocarem a amostra ao longo do seu diâmetro mais longo e livre de cunhas e cantos. Registramos a distância D e carregamos até à ruptura, anotando a carga P de ruptura. Repetimos o procedimento para os demais fragmentos da amostra.

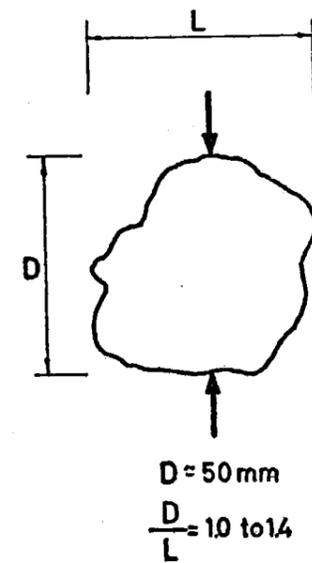


Figura 14
Ensaio em fragmento irregular

d. Rochas anisotrópicas

Em rochas com acamamento, xistosidade ou outras direções preferencias observáveis, fazemos ensaios ao longo das direções de maior e de menor resistência. Por exemplo, quando ensaiamos testemunhos com estratificação horizontal, os ensaios diametrais normalmente dão um conjunto de valores abaixo do limite de resistência, isto é, da resistência medida perpendicularmente aos planos de fraqueza.

Devemos tomar cuidado para assegurar que a aplicação de carga se faça estritamente ao longo ou perpendicularmente aos planos de fraqueza. Devemos ajustar o espaçamento do ensaio diametral a fim de podermos usar os pedaços dele resultantes no ensaio axial. Notamos que, no ensaio axial, a distância entre os compressores cônicos é medida perpendicularmente aos planos de fraqueza e não necessariamente segundo o eixo do tes-

temunho. Procedimento semelhante devemos seguir nos ensaios com fragmentos irregulares.

D. Cálculos

a. calculamos o Índice de Resistência de Carga Pontual- I_g , pela relação P/D^2 ;

b. para classificação, devemos usar o Índice $I_g(50)$, obtido a partir do I_g e corrigido para o diâmetro padrão de 50mm, através do gráfico de correção (Figura 15);

c. encontramos o valor médio a partir de um conjunto de resultados, pelo descarte sistemático dos valores mais altos e mais baixos, até permanecerem somente dois. A média aritmética destes, será adotada como valor médio;

d. no ensaio diametral, onde o diâmetro D dos testemunhos é efetivamente constante, podemos determinar inicialmente o valor médio da carga de ruptura P, depois calculamos o índice adequado e finalmente fazemos a correção para o tamanho. - Nos ensaios axiais e com fragmentos irregulares, todavia, devemos obter e corrigir o índice para cada amostra; calculamos depois, o valor médio dos resultados corrigidos;

e. Calculamos o Índice Anisotrópico de Resistência- $I_a(50)$, pela relação entre os índices médios de resistência perpendicular e paralelo aos planos de fraqueza. Para rochas isotropas, o índice $I_a(50)$ assume valores próximos a 1,0 e valores maiores para rochas anisotropas.

E. Relatório

1. devemos tabular separadamente os resultados para os ensaios diametral, axial e de fragmentos irregulares, perpendiculares ou paralelos aos planos de fraqueza, sendo que o relatório deve conter as seguintes informações para cada amostra ensaiada:

- número da amostra e localização, condições de umidade e de estocagem, se possível com valores numéricos e descrição da orientação e da natureza de quaisquer planos de fraqueza presentes na rocha.

- valores da carga de ruptura P e distância D entre os compres-

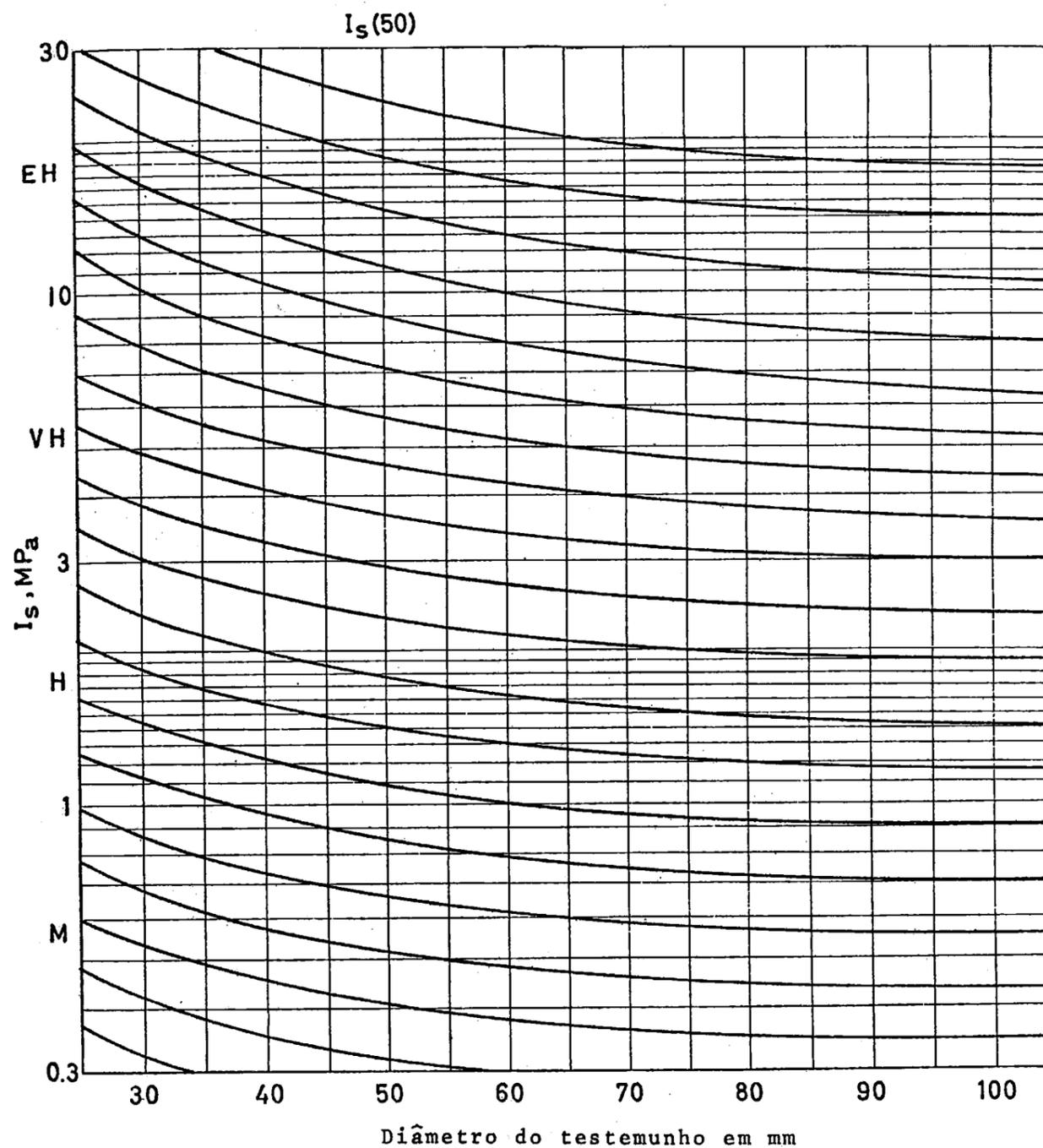


Figura 15
Gráfico para correção de tamanho - Ensaio de carga puntual

sores cônicos para cada ensaio.

- valores calculados de I_s e $I_s(50)$ para cada ensaio. Podemos omitir estes valores no caso do ensaio diametral, relatando apenas o valor médio da carga de ruptura P.
- valores médios para $I_s(50)$ paralelo e perpendicular aos planos de fraqueza, juntamente com o índice anisotrópico de resistência $I_a(50)$ calculado.

F. Notas

a. este ensaio constitui um procedimento simples para classificação de rochas no campo e podemos modificá-lo quando for necessário superar limitações práticas. Devemos anotar claramente tais modificações no relatório do ensaio.

b. podemos correlacionar a resistência à carga pontual com outros ensaios de resistência. Assim, podemos usar, por exemplo, a seguinte correlação: Resistência à Compressão Uniaxial = $24 \times I_s(50)$.

c. este tipo de ensaio ainda não se acha normalizado, todavia constitui uma sugestão oficial da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas, preparada pela sua Comissão de Uniformização de Ensaio de Laboratório e de Campo.

VIII. POROSIDADE E PERMEABILIDADE

1. Porosidade

Quando examinamos algumas rochas, notamos a existência de vazios entre as partículas que as compõem e que esses orifícios são relativamente pequenos comparados com as dimensões da região observada. Definimos a *porosidade total* ou simplesmente *porosidade* de um sólido como a fração do seu volume total que é constituída por vazios, geralmente expressa em porcentagem. Esse tipo de porosidade pode ser determinada com o conhecimento da densidade do sólido, livre de poros, e da densidade de um fluido que esteja ocupando seus vazios.

A porosidade de uma rocha pode ser devida aos espaços intergranulares, comum nas rochas sedimentares, ou aos espaços originados por fraturamento e xistosidade, nas rochas cris-

talinas.

Para realçar a importância do estudo da porosidade nas rochas, citamos o caso dos depósitos de água ou petróleo que estão intimamente relacionados com a porosidade e com as possibilidades de fluxo do reservatório.

A porosidade é chamada efetiva quando os vazios estão interligados. Os sedimentos inconsolidados, areia por exemplo, tem porosidades total e efetiva iguais; entretanto, os arenitos apresentam porosidade efetiva tanto menor que a total quanto maior for o grau de cimentação.

Os fatores que influenciam a porosidade das rochas estão relacionados à seleção, à forma, à compactação, à disposição, ao tamanho e forma das partículas, assim como ao grau de cimentação e aos fenômenos de dissolução.

A porosidade é maior em sedimentos que possuem partículas bem selecionadas, porque os espaços entre as partículas não se encontram preenchidos pelas de menor tamanho. É também maior quanto mais arredondadas e esféricas forem as partículas. Os sedimentos menos compactados e cujas partículas de formas achatadas estão dispostas caoticamente, possuem maior porosidade, assim, por exemplo, uma argila pode ter porosidade até 85%. Quanto menor o tamanho das partículas, maior é a porosidade. Assim encontramos para areia grossa, valores de porosidade em torno de 40% e para areia muito fina, em torno de 50%.

A porosidade diminui com o aumento do grau de cimentação, entretanto, aumenta devido a fenômenos de dissolução, com a percolação das águas subterrâneas.

Na determinação da porosidade de materiais rochosos, necessitamos dividi-los em duas classes: coerentes e incoerentes. Para os materiais coerentes, os métodos que mais empregamos são: flutuação, porosímetro de Buckman, balança de Westphal, volumímetro de Russel e etc. Com relação aos materiais incoerentes, devemos aplicar técnicas especiais, principalmente durante a amostragem, para não perturbarmos a disposição dos grãos. Neste caso, fazemos a determinação da porosidade provocando a saturação com água da amostra indeformada e medimos o volume gasto para a completa saturação.

Quando estudamos materiais incoerentes para construção, areia por exemplo, a porosidade é chamada coeficiente de vazios (C_v). Neste caso, a porosidade é efetiva porque todos os vazios se interligam. O coeficiente de vazios é determinado experimentalmente. Não devemos confundir-lo com o Índice de Vazios, usado comumente em Mecânica dos Solos e obtido através de cálculos onde levamos em conta o peso específico natural do solo (partículas + água), peso específico das partículas e a umidade natural do solo.

2. Permeabilidade

Sabemos que o fluxo de um fluido qualquer, através de um meio poroso, ocorre por mecanismo de filtração. Quando comparamos o fluxo através de rochas com poros independentes e com poros interconectados, verificamos um baixo fluxo para as primeiras e alto para as do segundo tipo, embora ambas possuam a mesma porosidade total. Como já vimos, podemos definir a porosidade efetiva como sendo o volume dos poros que contribuem para a passagem do fluido através de um sólido poroso.

Algumas rochas, como o basalto vesicular, podem possuir uma alta porosidade total e permitir apenas um baixo fluxo, isso indicando que a maioria de seus poros são independentes (Figura 16). Por outro lado, a porosidade efetiva da areia é muito alta e permite a fácil percolação de fluidos (Figura 17). Concluimos então que a porosidade num sólido, originada por deficiência na cimentação ou sinterização entre partículas que o compõem, é o tipo de porosidade que melhor contribui para a percolação de fluidos.



Figura 16
Poros independentes

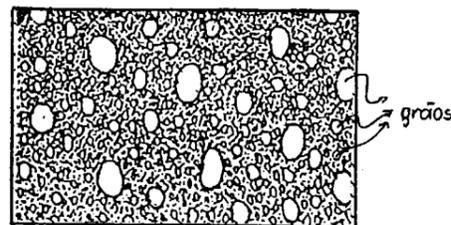


Figura 17
Poros interconectados

Vários são os fatores que influem na permeabilidade de das rochas, tais como:

- Tamanho dos grãos - considerando que os vazios dos materiais de baixa coerência estão interligados entre si, podemos imaginá-los formando tubos capilares; então, a velocidade de percolação d'água nos interstícios será proporcional ao quadrado da dimensão dos vazios. Essa afirmação decorre da equação de Poiseuille, que exprime a velocidade de um fluido em tubos capilares. Por outro lado, sabemos que as dimensões dos vazios são proporcionais aos tamanhos dos grãos que as formam. Logo, podemos dizer que para grãos do mesmo tamanho, a permeabilidade varia, a grosso modo, com o quadrado do tamanho dos grãos.
- Temperatura e viscosidade da água - a Lei de Darcy nos mostra que a vazão de um fluido, através de um meio, é inversamente proporcional a sua viscosidade. Por sua vez, este parâmetro varia inversamente com a temperatura; ou seja, aumentando a temperatura diminui a viscosidade, e assim, a permeabilidade aumenta com a temperatura.
- Outros fatores - arranjo estrutural dos grãos (estratificação), grau de saturação (ar nos vazios), etc.

O conhecimento da permeabilidade de materiais é muito importante em diversos projetos de engenharia, como no de barragens, onde devemos conhecer as perdas de água por percolação nos seus elementos, no de engenharia de estradas e nos problemas relativos a obtenção de água subterrânea.

A. Lei de Darcy

Darcy foi o primeiro a efetuar experiências nesse campo. Usou filtros de areia, através dos quais fazia água percolar segundo a direção vertical. Em síntese, verificou que a velocidade de percolação é diretamente proporcional à área da secção transversal (constante ao longo da espessura) e à diferença de pressões estabelecidas entre a secção de entrada e de saída do fluido e inversamente proporcional a espessura do filtro.

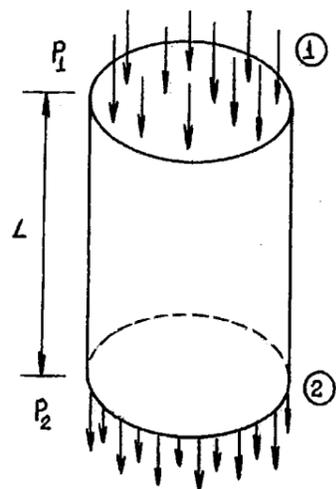


Figura 18

Esquema da experiência de Darcy

O fluido escoá de (1) para (2), Figura 18; K_T é chamado de coeficiente de permeabilidade e depende das propriedades do meio e do fluido usado, sendo identificado como:

$$K_T = \frac{K}{\eta}$$

onde K é uma constante empírica denominada permeabilidade do meio poroso e η é a viscosidade do fluido. Portanto, a lei pode ser enunciada da seguinte maneira:

$$Q = \frac{K}{\eta} A \frac{(P_1 - P_2)}{L}$$

A lei de Darcy é válida:

- a. para fluidos homogêneos;
- b. quando não há interação entre o fluido e o meio poroso;
- c. quando a seção transversal é constante ao longo do corpo poroso;
- d. quando usamos gás como fluido e a pressões relativamente baixas.

B. Medida da permeabilidade

A medida da permeabilidade de sólidos porosos é relativamente simples, desde que seja uma repetição da experiência

cia de Darcy. Uma amostra cilíndrica (ou com outra forma adequada) é confinada em um recipiente de modo a permitir fluxo somente na direção normal à seção transversal do sólido poroso (portanto, a superfície lateral deve estar completamente impermeabilizada). Como a viscosidade é função da temperatura (além de outras características intrínsecas do fluido), devemos conhecer sua variação.

Se as condições de validade da lei de Darcy forem respeitadas, obtemos a permeabilidade do sólido através da seguinte expressão:

$$K = \frac{\eta L Q}{A (P_1 - P_2)} \tag{I}$$

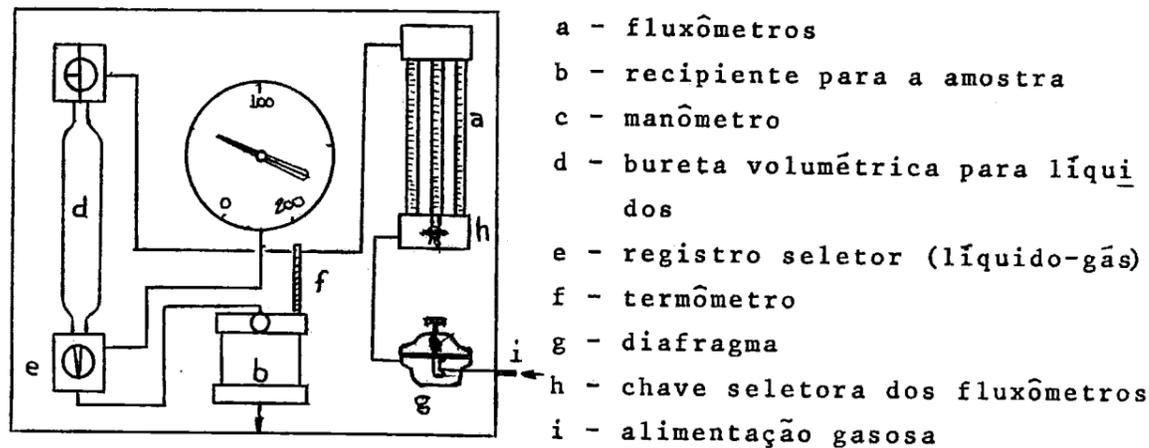
Um corpo de rocha, com 1cm^2 de seção transversal e 1cm de comprimento, possui permeabilidade de 1 darcy quando deixa passar 1cm^3 por segundo de um fluido com viscosidade de 1 centipoise, estando submetido à pressão de 1 atm entre seus extremos.

a. Ensaio de permeabilidade em materiais coerentes (Rochas)

Determinamos a permeabilidade de rochas, em corpos de prova cilíndricos ou prismáticos com base retangular, usando o Permeômetro Universal "Ruska" (Figura 19). Os cilíndricos são obtidos com brocas especiais diamantadas, do tipo usado para extração de testemunhos de sondagens. Os prismáticos, com o auxílio de serra circular, também diamantada. As dimensões dos corpos de prova são determinadas pelo tipo do recipiente para confinamento e do acessório para impermeabilização da superfície lateral. Com o permeômetro "Ruska", determinamos a permeabilidade de sólidos porosos, usando gás ou líquido como fluido.

a₁ - Determinação de permeabilidade usando gás (ar)

O corpo de prova de rocha, com forma adequada, é colocado em b (Figura 19), com sua superfície lateral impermeabilizada pelo recipiente de borracha. O gás é injetado no sis-



- a - fluxômetros
- b - recipiente para a amostra
- c - manômetro
- d - bureta volumétrica para líquidos
- e - registro seletor (líquido-gás)
- f - termômetro
- g - diafragma
- h - chave seletora dos fluxômetros
- i - alimentação gasosa

Figura 19

Esquema do Permeâmetro Universal "Ruska"

tema em i e a pressão é controlada através do diafragma g. Conforme a ordem de grandeza da vazão, selecionamos o fluxômetro adequado; para esta seleção devemos tomar cuidado com a esfera do fluxômetro, pois uma alta vazão provocará um choque entre a esfera e a parte superior do tubo de vidro do fluxômetro, podendo danificá-lo. Assim, devemos usar inicialmente o fluxômetro de maior capacidade ou seja, aquele com diâmetro interno maior. Para cada fluxômetro, necessitamos de uma curva de calibração, que acompanha o permeâmetro.

Fazemos a seleção do medidor, com a respectiva pressão de calibração, quando o fluxo for estabilizado e tomamos o valor da escala correspondente ao plano diametral da esfera. Com o auxílio da Figura 20, obtemos a vazão. Registramos a temperatura do gás e procuramos, no gráfico da Figura 21, o valor da viscosidade.

Determinamos a área A da secção transversal e o comprimento L do corpo de prova.

Com o uso direto da fórmula I e para η medido em centipoise, Q em cm^3/s , L em cm, A em cm^2 e P em atmosferas absolutas, calculamos a permeabilidade em darcy.

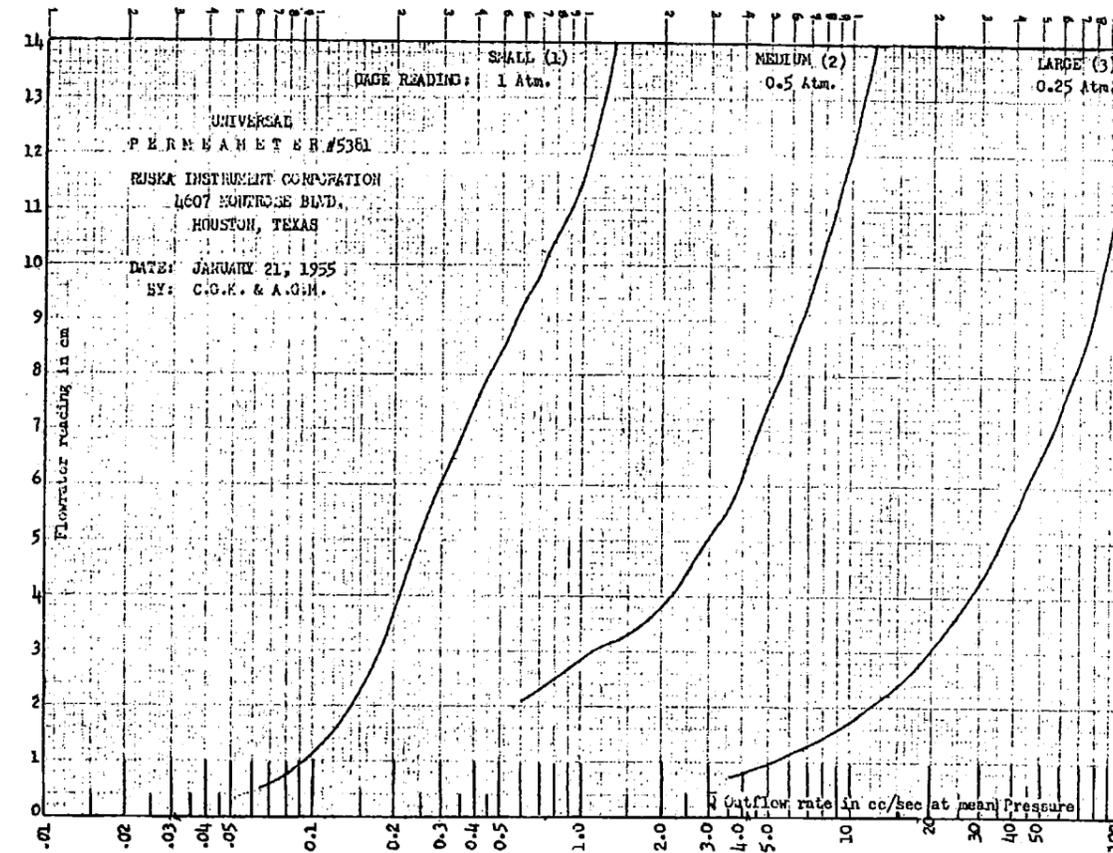


Figura 20

Curvas de calibração dos fluxímetros

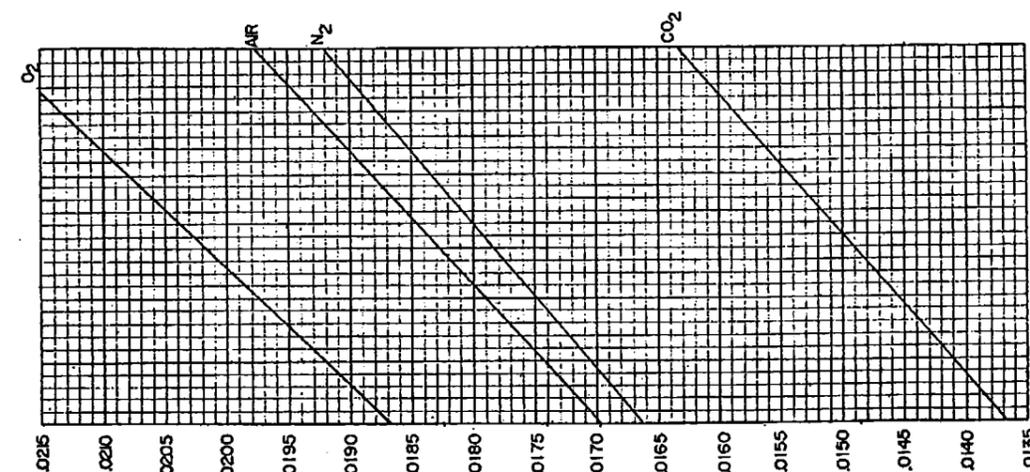


Figura 21

Varição da viscosidade com a temperatura

a₂ - Determinação da permeabilidade usando água

Como no caso anterior, os corpos de prova devem ter forma cilíndrica ou prismática com suas superfícies impermeabilizadas para evitarmos fluxo do fluido através delas. O esquema do equipamento é quase idêntico ao usado para determinação da permeabilidade à gás (ar) e está mostrado na Figura 19.a.

O corpo de prova deve ser saturado com água antes de ser colocado no dispositivo (b), em seguida, com registros - seletores (e) na posição "fill" e (c) na posição "líquido", enchemos a bureta (d) com água a um nível acima da marca superior de referência e fechamos a válvula do dispositivo de confinamento do corpo de prova. Com o auxílio do diafragma (a), fazemos a seleção da pressão do ar, lida em (f), que forçará pela parte superior da bureta, a água escoar pelo corpo, estando a válvula (e) na posição "discharge". Com auxílio de um cronômetro marcamos o tempo necessário para o escoamento do volume de água contido na bureta; disparando o cronômetro quando o nível d'água atingir a marca de referência superior e parando-o quando o nível atingir a referência inferior. Com estes dados, determinamos a vazão Q e conhecendo-se a viscosidade da água na temperatura do ensaio, calculamos a permeabilidade usando a fórmula I.

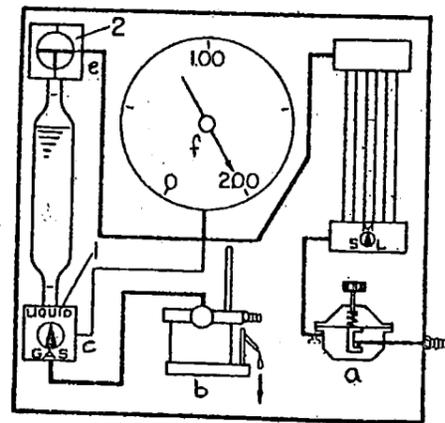


Figura 19.a
Esquema do permeâmetro "Ruska"

Devemos determinar as permeabilidades de algumas rochas com características estruturais e texturais diferentes, a fim de estabelecermos correlações. Por exemplo: alguns quartzitos cuja porosidade efetiva é grande; arenitos cimentados, com porosidade efetiva menor e arenitos estratificados, com características texturais diferentes nos planos de estratificação, onde é importante o sentido de corte da rocha para obtenção do corpo de prova, como observamos na Figura 22.

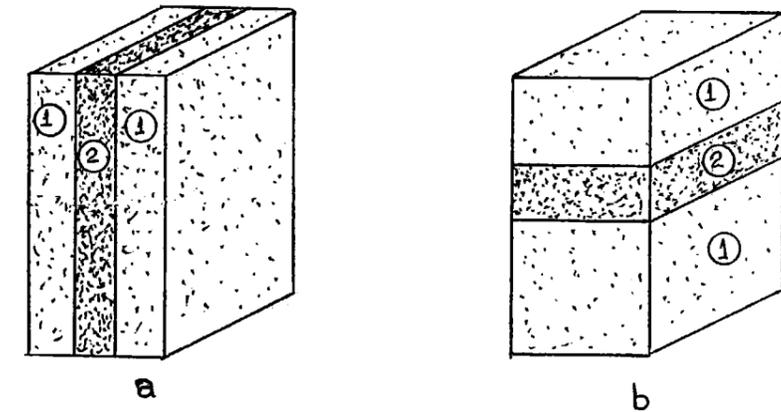


Figura 22
Corpos de prova de arenito estratificado, onde: estrato (1) mais permeável que estrato (2).

No corpo a, a permeabilidade é maior que no corpo b, porque o fluxo se dá ao longo do estrato (1), de maior permeabilidade, muito embora sejam corpos de prova extraídos de uma mesma rocha.

A permeabilidade das rochas é muito variável e depende de diversos fatores, como já vimos desde o estudo da porosidade. Um valor é considerado bom, por exemplo, para rocha reservat6ria de petr6leo, quando varia de 10 a 100 milidarcys.

b. Ensaio de permeabilidade em material de baixa coerência

Para medirmos a permeabilidade de materiais de baixa coerência, há dois tipos de ensaios mais comumente usados, e a escolha de um deles será feita levando em conta o tipo de material sedimentar ou solo a ser ensaiado. Assim, para solos com permeabilidade alta (arenosos), o mais indicado é o "ensaio com permeâmetro de carga constante" (Figura 23) e, para os de baixa permeabilidade, o "ensaio de carga variável". A escolha do método devemos à precisão das medidas que obtemos quando determinamos o volume (carga constante) ou a velocidade (carga variável) do fluido percolado.

Nesta prática, faremos o ensaio à carga constante, levando em conta a sua maior facilidade de execução. Outros de

podem ser vistos na disciplina optativa "Ensaio Especiais de Mecânica dos Solos".

b₁ - Preparação da amostra

Podemos realizar o ensaio tanto em corpos de prova retirados de amostras indeformadas, como também em corpos de prova moldados em laboratório, sob determinadas condições.

Dos blocos de solos indeformados, retiramos uma amostra de maneira que possa ser transformada num cilindro de dimensões aproximadas de 5cm de diâmetro e 8cm de altura. Quando for corpo de prova moldado, também deverá ter as mesmas dimensões.

Com o auxílio de um paquímetro, determinamos três medidas da altura do corpo de prova em planos diferentes e calculamos os valores médios. Esquematizamos a técnica de colocação do corpo de prova no permeâmetro na Figura 24.

b₂ - Procedimento do ensaio

Necessitamos primeiramente eliminar o ar existente nos poros, fazendo a água percolar através do corpo de prova, durante o tempo necessário para provocar sua saturação.

A saturação ocorre quando, para intervalos de tem

po iguais, os volumes de água percolada são iguais.

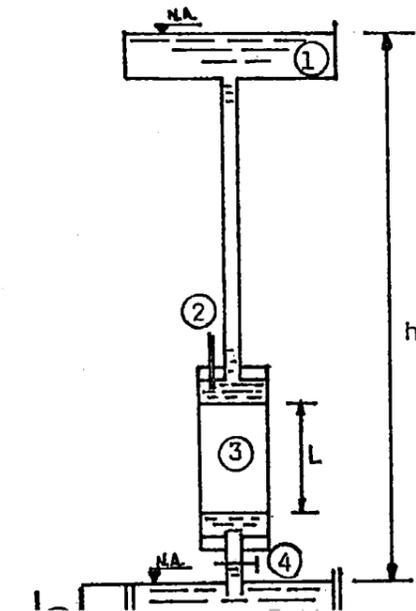


Figura 23
Permeâmetro de carga constante

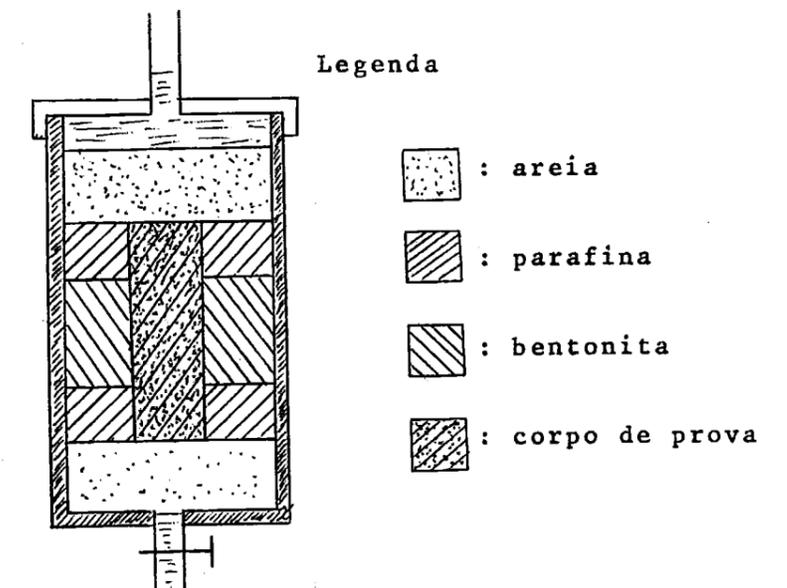


Figura 24
Esquema do corpo de prova

Descrevemos o ensaio com o auxílio da Figura 23:

- fechamos a saída d'água (torneira 4);
- providenciamos para que o nível d'água do reservatório supe-

- rior permaneça constante durante todo o ensaio;
- determinamos a altura h entre o nível d'água no reservatório superior e o nível d'água no reservatório inferior;
- abrimos a torneira 4, dando início ao escoamento d'água através do corpo de prova e no mesmo instante iniciamos a contagem do tempo;
- na proveta graduada 6, recolhemos a água que percolar através do corpo de prova; após a obtenção de um volume satisfatório, interrompemos o escoamento (fechando a torneira 4) e determinamos o volume d'água e o tempo de percolação (devemos determinar a temperatura da água durante o ensaio).

b₃ - Cálculo do coeficiente de permeabilidade (K_T), em cm/s, pela fórmula:

$$K_T = \frac{V L}{A h t}$$

onde:

- V - volume d'água percolado no intervalo de tempo t (cm³)
- L - altura do corpo de prova (cm)
- A - área do corpo de prova (cm²)
- h - altura da carga d'água (cm)
- t - tempo de percolação (s)
- T - temperatura média da água durante o ensaio (°C)
- K_T - coeficiente de permeabilidade (cm.seg⁻¹) a T °C

O coeficiente de permeabilidade deve ser expresso por convenção, à temperatura de 20°C, através da relação:

$$K_{20} = K_T \frac{\eta_T}{\eta_{20}}$$

η_T - viscosidade da água a T °C

η_{20} - viscosidade da água a 20°C

Para simplificação dos cálculos, encontramos a relação η_T/η_{20} na Figura 25, obtida a partir da Tabela II.

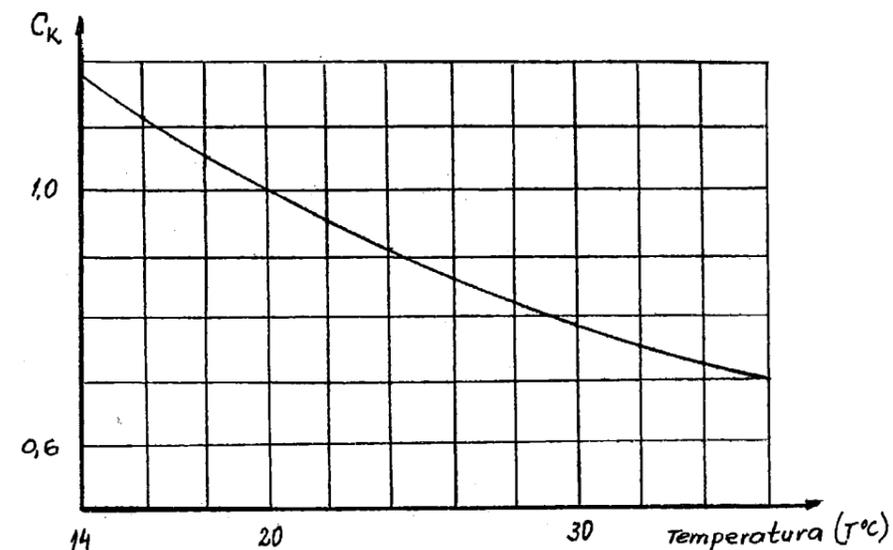


Figura 25
 $\eta_T/\eta_{20} = C_K$ em função da temperatura

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	18,29	17,66	17,06	16,51	15,98	15,48	15,02	14,57	14,14	13,74
10	13,55	12,99	12,63	12,29	11,98	11,67	11,37	11,09	10,81	10,54
20	10,20	10,03	9,80	9,56	9,34	9,12	8,92	8,71	8,52	8,34
30	8,15	7,98	7,82	7,65	7,50	7,35	7,20	7,05	6,92	6,79
40	6,66	6,54	6,42	6,30	6,19	6,09	5,98	5,88	5,79	5,68
50	5,59	5,50	5,42	5,34	5,25	5,12	5,09	5,01	4,93	4,86
60	4,79	4,72	4,65	4,58	4,51	4,45	4,39	4,32	4,27	4,21
70	4,15	4,10	4,03	3,98	3,93	3,88	3,83	3,78	3,73	3,69
80	3,64	3,60	3,55	3,50	3,46	3,42	3,38	3,34	3,30	3,26
90	3,23	3,19	3,16	3,12	3,09	3,05	3,02	2,99	2,95	2,92
100	2,89	2,87	2,84	2,81	2,78	2,75	2,72	2,69	2,67	2,64

Tabela II
Viscosidade da água (η) em (g x s/cm²)x10⁻⁶

Com o Permeâmetro "Ruska" determinamos especificamente a permeabilidade (K) através da relação:

$$K = \frac{\eta L Q}{A (P_1 - P_2)}$$

Todavia, no permeâmetro de carga constante, o que determinamos é o coeficiente de permeabilidade (K_T), pela relação:

$$K_T = \frac{VL}{Aht}$$

Em trabalhos de Geologia, quando tratamos de permeabilidade de rocha reservat6ria de petr6leo ou 6gua subterr6nea, expressamos o valor de K (permeabilidade, em milidarcy). Entretanto, em engenharia civil a "permeabilidade" é expressa comumente em valores de K_T (coeficiente de permeabilidade) em cm/s. Para um mesmo material não fazemos a transformação de valores de K em K_T , porque K se refere as características de porosidade do material e é independente das propriedades físicas do fluido percolante, enquanto K_T varia com K e com as propriedades físicas do fluido.

IX. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE 6GUA

Definimos a absorção de 6gua como sendo a massa de 6gua absorvida por unidade de massa da amostra seca, durante um certo tempo, expressa em porcentagem. A absorção é influenciada pela porosidade e pelo grau de alteração do material rochoso. Assim, rochas de mesmo tipo possuem absorção tanto maior quanto mais alteradas estiverem.

Segundo a norma M47 do IPT, devemos ensaiar um número mínimo de 5 corpos de prova, sem uma forma específica e de dimensões compreendidas entre 2 e 3 polegadas. Colocamos os corpos de prova em estufa a 105°C, durante 24 horas, esfriamos em ambiente seco e obtemos o peso (P_s). A seguir, mantemo-los imersos em 6gua nas condições normais de pressão e temperatura, durante 48 horas. Depois, enxugamos as suas superfícies com um pano absorvente e determinamos os pesos, (P_a). Calculamos a absorção através da fórmula:

$$A_b = \frac{P_a - P_s}{P_s} \cdot 100 (\%)$$

onde, P_s - peso do corpo de prova seco

P_a - peso do corpo de prova saturado

X. ENSAIOS EM MATERIAIS NATURAIS USADOS COMO AGREGADOS

Classificamos os produtos de rocha natural usados como agregado em: agregados graúdos e miúdos. Entre os primeiros, estão o cascalho (pedregulho) ou "pedra" britada de rochas estáveis, que contém no máximo 15% de fragmentos menores que 4,8mm. Entre os agregados miúdos, encontramos as areias e os pedriscos resultantes da britagem de rochas estáveis, com tamanho de partículas tais que no máximo 15% ficam retidas na peneira de 4,8mm.

Como aplicações mais importantes nas obras de engenharia civil, citamos; aditivo na composição de material para revestimento betuminoso e componente granular e inerte na preparação de argamassas e concretos.

Quando usamos agregados de boa qualidade nas argamassas e concretos, melhoramos algumas propriedades importantes, tais como a retração, o aumento na resistência ao desgaste e resistência aos esforços mecânicos, porque apresentam resistência mecânica superior a pasta do aglomerante. Há também interesse econômico, pois, seu preço é menor que o da pasta.

Os agregados destinados à preparação de concreto, para obras de importância, devem apresentar determinadas características fixadas pela Especificação Brasileira EB-4, sem o que rejeitamos o lote.

Nos agregados graúdos, realizamos os ensaios de resistência e de alteração. Entre os primeiros, temos: abrasão "Los Angeles", desgaste a úmido, impacto Treton e escler6metro de Schmidt. Nos de alteração, temos: teste de Olson, ciclagem com solução de sulfato de s6dio e lixiviação contínua em "Soxhlet".

Nos agregados miúdos fazemos as seguintes determi-
nações: pesos específicos real e aparente, coeficiente de vazios,
umidade, equivalente em areia e matéria orgânica.

1. Resistência ao Desgaste e ao Impacto

A. Ensaio de Abrasão "Los Angeles"

Nas aplicações dos agregados como material de cons-
trução, as ações do desgaste por atrito e por impacto geralmen-
te aparecem combinadas, podendo, em alguns casos ocorrerem iso-
ladamente. É fácil de perceber que, quando um grão é quebrado
por impacto, gera nova superfície de atrito, aumentando o des-
gaste. O ensaio de abrasão "los Angeles" mede a resistência do
agregado submetido simultaneamente ao desgaste por atrito e por
impacto; associa, portanto, duas características muito importan-
tes, como quando os usamos em pavimentação. Os dados que obte-
mos por este método são mais significativos do que aqueles obti-
dos em outros ensaios que consideram separadamente as duas ações,
pois simula melhor os esforços a que, na prática, submetemos o
agregado.

O ensaio consiste em submeter certa quantidade de
agregado (brita ou pedregulho), com uma determinada granulome-
tria, aos choques e desgaste quando colocado num tambor que gi-
ra a uma velocidade pré-estabelecida. Há uma granulometria mais
adequada para cada tipo de aplicação dos agregados e o ensaio -
deve ser executado no material como será aplicado na prática; as-
sim, com este objetivo, há diversas graduações já constantes da
Tabela III.

No caso de caracterização geral de um agregado, fa-
zemos o ensaio nas graduações B e E. Quando uma única gradua-
ção não cobrir toda a faixa granulométrica do agregado, devemos
escolher várias frações de maneira a compor as graduações B e E.

Os efeitos dos choques entre as partículas dos a-
gregado é acentuado por impactos de esferas de ferro fundido, -
com dimensões e massa padronizadas, que colocamos no tambor. O
número de esferas varia com a graduação do agregado, decrescen-
do a medida que os fragmentos se tornam mais fáceis de serem
quebrados, ou seja, a medida que diminui o tamanho dos fragmen-

tos que compõem a graduação. O número de revoluções do tambor,
para amostras de 5kg é de 500, passando para 1000, quando a a-
mostra for de 10kg. Todos os dados padronizados para o ensaio
são constantes da Tabela III.

Depois de ensaiarmos o material, lavamos, peneira-
mos, secamos e pesamos. Definimos o valor da abrasão "Los Ange-
les" como o quociente entre a massa do material que passa pela
peneira de malha quadrada de 1,68mm e a massa total da amostra,
expresso em porcentagem.

$$A_n = \frac{M_n - M'_n}{M_n} \cdot 100$$

M_n - massa da amostra seca colocada na máquina; M'_n - massa da
amostra lavada e seca após o ensaio e n - graduação da amostra.

Os valores de abrasão, para as diversas graduações
obtidas de amostras constituídas de fragmentos de uma mesma ro-
cha, variam de acordo com a forma das partículas. Eles serão -
maiores para as partículas que apresentam formas alongadas ou la-
melares e menores para as de forma aproximadamente cúbicas. Is-
to quer dizer que os agregados de forma cúbica são os mais indi-
cados para uso.

O máximo valor fixado pelo DER é de 40% para bri-
tas usadas em pavimentação, supondo-se sua durabilidade por um
prazo de 20 anos, em condições de tráfego normal. Para pedregu-
lhos, o valor máximo é de 50%. Consideramos boas as britas com
valores de abrasão em torno de 18%.

Equipamento

- a. máquina de abrasão (Figura 26);
- b. balança com capacidade mínima de 10kg e sensibilidade de 1g;
- c. bandeja metálica de 70 x 50 x 5cm;
- d. pá de cabo curto;
- e. estufa que mantém a temperatura entre 105° e 110°C;
- f. peneiras de malhas quadradas, com as seguintes aberturas nomi-
nais em mm: 76,2 - 63,5 - 50,8 - 38,1 - 25,4 - 19,1 - 12,7 -
9,52 - 6,35 - 4,76 - 2,38 e 1,68.

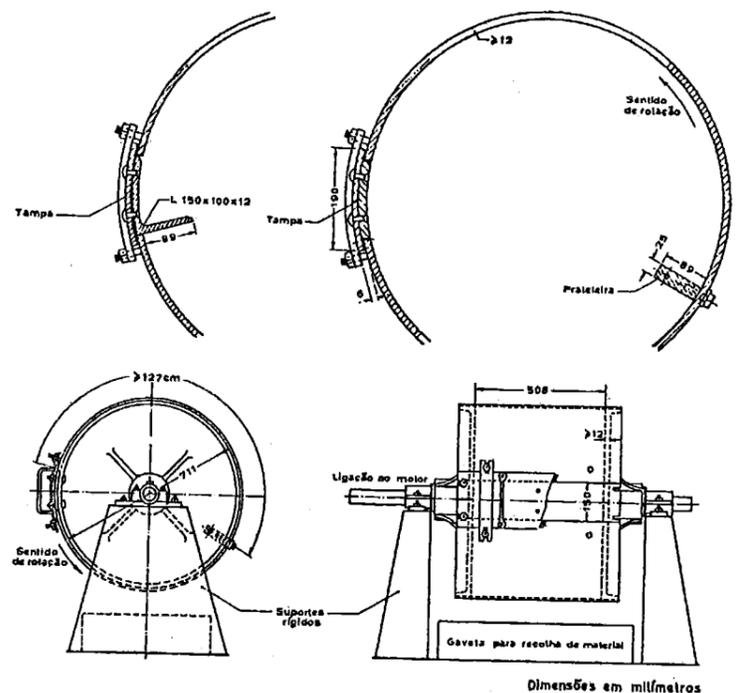


Figura 26

Esquema da máquina para o ensaio de Abrasão "Los Angeles"

Preparação da Amostra e Ensaio

- escolhemos a graduação da amostra para o ensaio, dependendo da finalidade a que se propõe utilizar o agregado;
- fixamos a graduação e secamos a amostra em bandejas a uma temperatura de 105°C;
- após a secagem, peneiramos o agregado e quarteamos as porções retidas nas diferentes peneiras, obtendo assim a amostra da graduação escolhida;
- determinamos as massas das frações da graduação escolhida, (com aproximação de 1 grama) e levando em conta as especificações de massas bem como de carga abrasiva constantes da Tabela III;
- colocamos a amostra, com a respectiva carga abrasiva, no tambor previamente limpo;
- giramos o tambor por 500 revoluções, à velocidade de 30 a 33 r.p.m.;

DETERMINAÇÃO DA ABRASÃO LOS ANGELES DE AGREGADOS															SÉRIE _____	
															Nº DO ALUNO _____	
															NOME _____	
PREPARAÇÃO DA AMOSTRA																
Peneiras-Abertas, m m		MASSAS DA AMOSTRA EM g														
Material que passa	Material retido	GRAD. A		GRAD. B		GRAD. C		GRAD. D		GRAD. E		GRAD. F		GRAD. G		
		Necess.	Obtida	Necess.	Obtida	Necess.	Obtida	Necess.	Obtida	Necess.	Obtida	Necess.	Obtida	Necess.	Obtida	
76,2	63,5	—	—	—	—	—	—	—	—	2500 ± 80	—	—	—	—	—	—
63,5	50,8	—	—	—	—	—	—	—	—	2500 ± 80	—	—	—	—	—	—
50,8	38,1	—	—	—	—	—	—	—	—	5000 ± 100	—	—	—	—	—	—
38,1	25,4	± 25 1250	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5000 ± 100
25,4	19,1	± 25 1250	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5000 ± 100
19,1	12,7	± 25 1250	—	± 80 2500	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12,7	9,52	± 25 1250	—	± 80 2500	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9,52	6,35	—	—	—	—	± 80 2500	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6,35	4,76	—	—	—	—	± 80 2500	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,76	2,38	—	—	—	—	—	—	± 100 5000	—	—	—	—	—	—	—	—
Massa total		± 100 5000	$m_A =$	± 100 5000	$m_B =$	± 100 5000	$m_C =$	± 100 5000	$m_D =$	± 200 10000	$m_E =$	± 200 10000	$m_F =$	± 200 10000	$m_G =$	
CARGA ABRASIVA N.º de esferas		12	11	8	6	12	12	12								
EXECUÇÃO DO ENSAIO																
GRAD. A	Massa da amostra seca, colocada na máquina														$m_A =$	
	Massa da amostra lavada e seca, após o ensaio														$m'_A =$	
	ABRASÃO LOS ANGELES - $A_A = \frac{m_A - m'_A}{m_A} \times 100 = \dots \times 100 = \dots \times 100 =$															
GRAD. B	Massa da amostra seca, colocada na máquina														$m_B =$	
	Massa da amostra lavada e seca, após o ensaio														$m'_B =$	
	ABRASÃO LOS ANGELES - $A_B = \frac{m_B - m'_B}{m_B} \times 100 = \dots \times 100 = \dots \times 100 =$															
GRAD. C	Massa da amostra seca, colocada na máquina														$m_C =$	
	Massa da amostra lavada e seca, após o ensaio														$m'_C =$	
	ABRASÃO LOS ANGELES - $A_C = \frac{m_C - m'_C}{m_C} \times 100 = \dots \times 100 = \dots \times 100 =$															
GRAD. D	Massa da amostra seca, colocada na máquina														$m_D =$	
	Massa da amostra lavada e seca, após o ensaio														$m'_D =$	
	ABRASÃO LOS ANGELES - $A_D = \frac{m_D - m'_D}{m_D} \times 100 = \dots \times 100 = \dots \times 100 =$															
GRAD. E	Massa da amostra seca, colocada na máquina														$m_E =$	
	Massa da amostra lavada e seca, após o ensaio														$m'_E =$	
	ABRASÃO LOS ANGELES - $A_E = \frac{m_E - m'_E}{m_E} \times 100 = \dots \times 100 = \dots \times 100 =$															
GRAD. F	Massa da amostra seca, colocada na máquina														$m_F =$	
	Massa da amostra lavada e seca, após o ensaio														$m'_F =$	
	ABRASÃO LOS ANGELES - $A_F = \frac{m_F - m'_F}{m_F} \times 100 = \dots \times 100 = \dots \times 100 =$															
GRAD. G	Massa da amostra seca, colocada na máquina														$m_G =$	
	Massa da amostra lavada e seca, após o ensaio														$m'_G =$	
	ABRASÃO LOS ANGELES - $A_G = \frac{m_G - m'_G}{m_G} \times 100 = \dots \times 100 = \dots \times 100 =$															
INICIO:		FIM:		OPERADOR		OBSERVAÇÕES:										
/ /		/ /		a _____												

Tabela III

- g. retiramos o agregado do tambor e passamos na peneira 1,68mm;
- h. lavamos o material retido na peneira e em seguida colocamos na bandeja para secagem em estufa, à temperatura de 105°C, durante um tempo mínimo de 3 horas;
- i. pesamos o material depois de seco, obtendo o valor M'_a .

Calculamos a abrasão "Los Angeles" do agregado, - com aproximação de 1%. pela fórmula:

$$A_n = \frac{M_n - M'_n}{M_n} \times 100$$

onde:

A_n - abrasão "Los Angeles" da graduação n; n - graduação escolhida (A, B, C, D); M_n - massa total da amostra seca colocada no tambor; M'_n - massa da amostra lavada e seca, retida na peneira 1,68mm.

B. Desgaste a úmido

A finalidade deste ensaio é indicar a resistência apresentada por fragmentos de rocha, ao enfraquecimento e desintegração por atrito mútuo, quando os submetemos a modificações no seu conteúdo de água. Mede a velocidade de fragmentação de uma rocha, quando a submetemos a um ciclo padronizado de secagem e umedecimento.

Fazemos o ensaio com 10 fragmentos de rocha, cada um pesando de 40g a 60g, previamente secos em estufa, e que colocamos num tambor giratório de 10 cm de altura por 14cm de diâmetro. Este tambor tem sua superfície curva feita de chapa de aço inoxidável perfurada, com orifícios de 2mm de diâmetro, como mostra a figura 27. Mergulhamos até o seu nível médio, em uma cuba contendo água e o giramos com velocidade de 20 rpm, durante 10 minutos. Assim, o material fino, produzido pelo desgaste, passa através dos furos da chapa do tambor. Calculamos o índice de desgaste a úmido, por:

$$I_d = \frac{\text{peso a seco, da rocha retida do tambor}}{\text{peso a seco da rocha antes do ensaio}} \times 100$$

Este índice terá valor 0 (zero) quando a rocha se desfaz totalmente e 100% quando ela se mantém intacta.

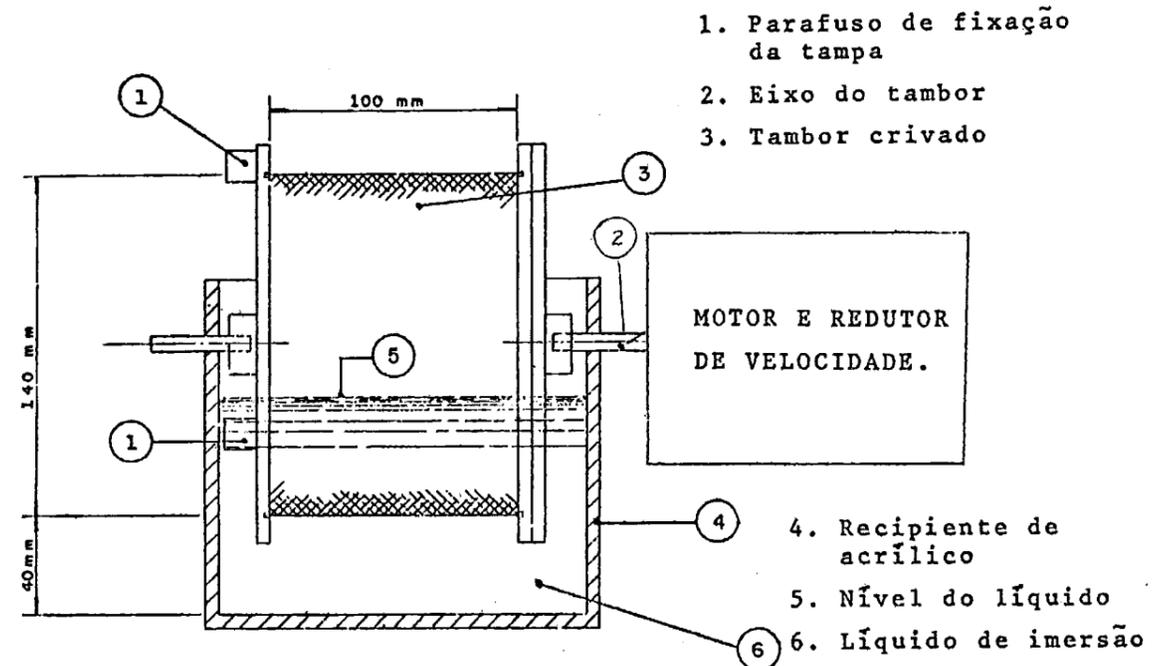


Figura 27

Esquema de equipamento para ensaio de desgaste a úmido

Procedimento

- a. selecionamos 10 fragmentos aproximadamente equidimensionais, cada um pesando entre 40-60g, de tal modo a dar um peso total entre 450 a 550g;
- b. colocamos a amostra no tambor previamente limpo e secamos o conjunto em estufa a 105°C, até constância de peso; registramos o peso do tambor mais amostra (P_1);
- c. fechamos o tambor e o acoplamos ao motor (Figura 27); colocamos o líquido de umedecimento no recipiente, até cerca de 20mm abaixo do eixo do tambor;
- d. deixamos o tambor girar a 20 rpm, durante 10 minutos; em seguida, desacoplamos o tambor, removemos a tampa e colocamos o tambor mais a porção retida, na estufa; quando o material estiver completamente seco (constância de peso), registramos o peso do conjunto (P_2);

e. com o conhecimento do peso do tambor limpo e seco (P), calculamos o valor do índice de desgaste a úmido:

$$I_d = \frac{P_2 - P}{P_1 - P} \cdot 100$$

Podemos executar o ensaio também com outros líquidos, como por exemplo, ácidos diluídos, etileno glicol, água salgada, etc.

C. Resistência ao impacto Treton

A resistência de rochas ao impacto é influenciada primariamente pelas suas características petrográficas. Nas rochas ígneas e metamórficas não xistosas, a resistência é grande porque seus minerais, em geral, estão fortemente interligados. Numa mesma rocha ígnea, por exemplo, a resistência será menor - quanto maiores forem seus minerais. Isto porque o aumento da granulação ocasiona a diminuição da superfície específica dos grãos, enfraquecendo as ligações entre eles e, além disso, acentua a influência da clivagem e dos planos de geminação dos minerais.

O ensaio de impacto Treton é bastante simples e os valores obtidos são muito importantes nos casos de utilização do material rochoso em pavimentos de rodovias e pistas de aeroportos, onde submetemos o agregado a impactos repetidos.

O impacto Treton consiste em submeter 20 fragmentos de rocha, entre as dimensões 3/4" (19,05mm) - 5/8" (15,87mm), e secos em estufa a 105°C, com peso P₁ depois de lavados por 24 horas, a 10 impactos de um peso de 15,583kg caindo em queda livre de uma altura de 384mm (Figura 28). Após o ensaio, lavamos o material em água corrente na peneira nº 12, de 0,065" (1,65mm), até que suas superfícies estejam livres de pó. Secamos o material em estufa, a 105°C por 24 horas, deixamos esfriar e determinamos o peso P₂.

Para cada rocha a ser ensaiada, devemos fazer três determinações. A resistência ao impacto Treton é a relação porcentual entre as diferenças do peso inicial e final, pelo peso inicial:

$$T = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \cdot 100$$

onde, P₁ - peso inicial dos fragmentos

P₂ - peso final dos fragmentos

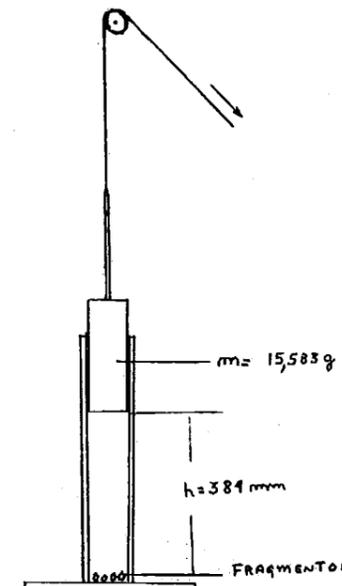


Figura 28

Esquema do equipamento para o ensaio Treton

2. Ensaio de Alteração e de Alterabilidade

A. Introdução

O problema de alteração de rochas em engenharia civil deve ser levado em conta, não apenas quando estas são utilizadas como material de construção, como também quando, "in situ", constituem fundações de uma obra. A alteração deve ser considerada também nos casos de túneis e taludes cuja estabilidade é de suma importância na segurança das construções próximas a eles.

Como material de construção, a alterabilidade das rochas pode ter efeitos na segurança, na economia e na estética

da obra.

Definimos alteração de uma rocha como sendo a modificação da resistência ou da permeabilidade da rocha, ou ainda das características de textura e cor da sua superfície, podendo tais modificações ocorrerem isoladas ou conjuntamente.

Chamamos de meteorização a alteração causada pelos agentes atmosféricos. A meteorização é então o "apodrecimento" "in situ" de uma rocha endógena que foi levada a condições exógenas. A meteorização é função do meio ambiente, especialmente das condições climáticas. De um modo geral, consideramos na meteorização a incidência de ações físicas e de ações químicas:

físicas: expansão devida a efeitos térmicos (amplitude térmica dia-noite ou sazonal); expansão por descompressão: expansão por congelamento da água contida nos poros, nos vazios e nas fissuras; ações mecânicas da água de circulação e dos ventos; ações mecânicas devido a atividade de seres vivos.

químicas: dissolução, oxidação, redução, oxidação-hidratação, hidratação, hidratação-hidrólise.

Um outro tipo de alteração, é o da eflorescência que consiste em um depósito superficial de sais transportados - em solução no interior da rocha.

Definimos o estado de alteração de uma rocha como sendo a situação da rocha no respectivo processo de alteração.

Alterabilidade de uma rocha é a velocidade de evolução no tempo do estado de alteração da rocha.

Chamamos de erosão a desagregação e perda de material da superfície de um terreno ou de uma obra, causadas por águas correntes, ondas, geleiras ou ventos.

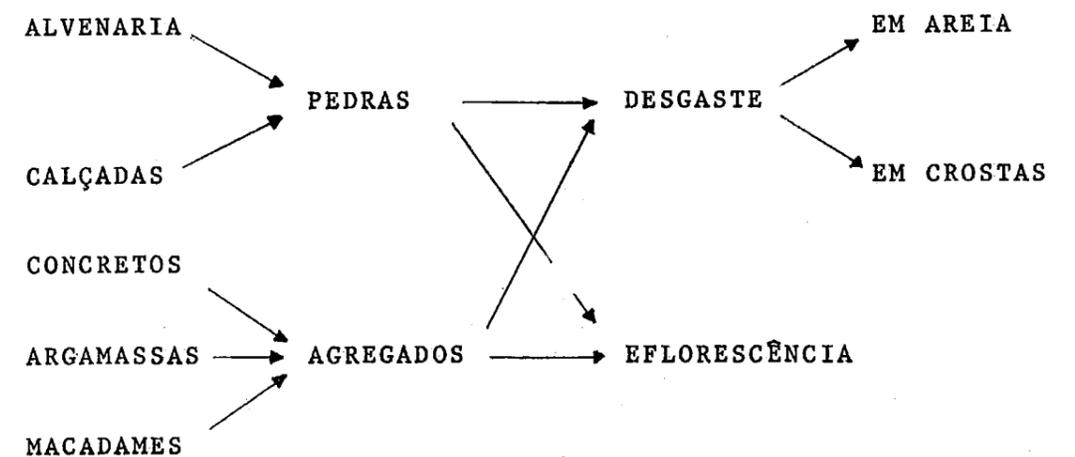
De acordo com essas definições, a meteorização é um processo particular de alteração, e portanto pode-se falar em alteração sem saber se ela é devida a agentes atmosféricos - ou a outros agentes. A alteração não modifica o contorno da rocha, pelo menos de forma sensível, mas apenas enfraquece ou modifica a cor e o aspecto textural. É a erosão que, removendo -

material, modifica a geometria do terreno e obras. A alteração facilita a erosão, mas a erosão pode ocorrer sem alteração e, também, a erosão facilita a alteração, mas esta pode existir - sem aquela.

a. Casos típicos de alteração

Aplicamos as rochas, como material, sob as formas de pedras em alvenaria e calçadas e, sob a forma de agregados - em concretos, mistura betuminosa, macadames, bases granulares - ou misturas filtrantes.

Resumimos no quadro abaixo as alterações típicas:



b. Identificação do estado de alteração

Os mecanismos de alteração são essencialmente dois: a desagregação por fissuração e a perda de material por dissolução ou por erosão interna.

Os efeitos diretos desses mecanismos são: a perda de peso, o aumento da porosidade da rocha acessível à água, isto é, da sua absorção e a expansão associada a essa absorção.

O peso é influenciado apenas pela perda de material e por constituir característica indicadora, específica desse mecanismo de alteração. A absorção é influenciada tanto pela perda de material como pela desagregação e por isto não pode servir como característica específica de apenas um desses mecanismos, - quando ambos ocorrem.

A expansão é apenas influenciada pela desagregação e por isso pode ser utilizada como característica indicadora específica desse mecanismo de alteração.

Além dessas características indicadores diretas da alteração, há outras indiretas que são consequências como: a densidade, a resistência mecânica e a permeabilidade.

As especificações inglesas (BS) e americanas (ASTM e AASHTO) se apoiam na densidade e na absorção para definir o estado de alteração dos agregados para concretos e macadames.

A expansão tem sido menos usada, possivelmente porque se trata de ensaio mais delicado uma vez que, as expansões a medir são muito pequenas em rochas relativamente sãs. Alguns laboratórios, como o LNEC, tem procurado desenvolver este ensaio. Outros procuram desenvolver ensaios para a determinação da porosidade e da permeabilidade.

Outra maneira de identificação do estado de alteração de uma rocha é a petrográfica que caracteriza

terabilidade;

- comparação da alterabilidade da rocha a estudar com a de rochas cujo comportamento conhecemos;
- observação do comportamento dos maciços rochosos "in situ" (em fundações de barragens, em taludes, em túneis, etc.) para armazenarmos informações que nos permitam a comparação.

Os ensaios que utilizam o envelhecimento estão normalizados e são muito empregados. Os ensaios de gelo e degelo em ciclos repetidos, e os de imersão em solução e secagem, são exemplos típicos de ensaios de envelhecimento acelerado em que o parâmetro medido é a perda de material após um determinado número de ciclos. Os ensaios que executaremos em laboratório, são os seguintes: imersão em etilenoglicol e secagem; imersão em sulfato de sódio e secagem; lixiviação contínua

B. Ensaio de Alteração por Imersão em Etilenoglicol e Se-

c. Alterabilidade

O estudo da alterabilidade apresenta três dificuldades principais:

- conhecimento das condições de alteração, principalmente nas fundações de barragens, em que as condições de fundação e o estado de tensão tem que ser reproduzidos no laboratório;
- a grande demora dos ensaios, para que em tais condições, a amostra se altere suficientemente a fim de obtermos uma diferença Δi mensurável;
- especificação do parâmetro i que mede o estado de alteração.

Existem alguns recursos para contornar tais dificuldades:

- envelhecimento acelerado, isto é, a utilização de condições de alteração suficientemente severas para aumentarmos a al

terabilidade. Devido a sua alta polaridade e a tensão superficial, acredita-se que o etilenoglicol também provoque contrações e expansões ao penetrar nas microfissuras existentes nas rochas.

O ensaio de alteração pela imersão de fragmentos de rochas de 3/4" (19,05mm) a 1" (25,4mm) em etilenoglicol, durante 15 dias, e a comparação dos resultados com amostra não en-saiada da mesma rocha, é denominado "Olson Test". Esse ensaio é o adotado pela "U.S. Corps of Engineers".

C. Ensaio de Alteração por Imersão em Solução Saturada de Sulfato de Sódio ou de Sulfato de Magnésio

Certos sais, quando se cristalizam ou se hidratam nos vazios de uma rocha, devido ao estado de confinamento, produzem pressões muito elevadas que chegam a fragmentá-la. Este fenômeno de expansão de sais é usado para testar o estado de alteração de rochas, Quanto mais alterada estiver uma rocha, maior

será sua porosidade, portanto haverá maior capacidade de absorver soluções. Neste caso, se provocarmos a cristalização de uma solução saturada de sulfato de sódio nos seus poros, os cristais ao se desenvolverem, geram pressões por aumento de volume, podendo provocar a sua desagregação.

A seguir, daremos o procedimento para este ensaio, segundo uma norma preconizada pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil-Portugal, LNEC, E238-1970.

a. Resumo do processo

Apreciação quantitativa (por peneiramento e determinação da perda de massa) e qualitativa (por observação visual) da alteração sofrida pelo agregado, quando submetido alternadamente a imersões numa solução saturada de sulfato de sódio ou de sulfato de magnésio e a secagem em estufa.

b. Reagente

Utilizamos uma das seguintes soluções:

b₁. Solução saturada de sulfato de sódio - dissolvemos sulfato de sódio puro em água mantida a 25-30°C, agitamos vigorosamente até se atingir a saturação, revelada pela permanência de cristais não dissolvidos. Podemos usar sal anidro ou sal hidratado ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), utilizando 350g do primeiro ou 750g do segundo para cada decímetro cúbico de água. Na ocasião do ensaio, a densidade da solução a $21 \pm 1^\circ\text{C}$ deve estar compreendida entre 1,151 e 1,174.

A mesma solução podemos utilizar em vários ensaios, desde que não se apresente alterada e a sua densidade satisfaça aos valores indicados; no caso de simples turvação, filtramos e, se necessário, acertamos a densidade.

b₂. Solução saturada de sulfato de magnésio - dissolvemos sulfato de magnésio puro em água mantida a 25-30°C, agitamos vigorosamente até se atingir a saturação, revelada pela permanência de cristais não dissolvidos. Podemos usar sal anidro ou sal hidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), utilizando 350g do primeiro ou 1400g do segundo para cada decímetro cúbico de água.

Na ocasião do ensaio, a densidade da solução a $21 \pm 1^\circ\text{C}$ deve estar compreendida entre 1,295 e 1,308.

c. Equipamentos

c₁. Peneiras ASTM de malha quadrada com as seguintes aberturas: 90,5mm, 64,0mm, 50,8mm, 38,1mm, 32,0mm, 25,4mm, 19,0mm, 16,0mm, 12,7mm, 9,51mm, 8,00mm, 4,76mm (nº 4), 4,00mm (nº 5), 2,38mm (nº 8), 1,19mm (nº 16), 0,595mm (nº 30) e 0,297mm (nº 50).

c₂. Cestos ou recipientes similares, para imersão da amostra na solução, que permitam a fácil penetração e posterior drenagem da solução sem perda significativa de material.

c₃. Recipientes para conter a solução durante o ensaio, com forma e dimensões que permitam efetuar a imersão dos fragmentos nas condições especificadas no item e.

c₄. Dispositivo capaz de manter a solução, com a amostra imersa à temperatura de $21 \pm 1^\circ\text{C}$.

c₅. Estufa para secagem a $105-110^\circ\text{C}$.

c₆. Balança com capacidade não inferior a 10kg, para pesagens com limites de $\pm 1\text{g}$.

c₇. Balança com capacidade não inferior a 500g, para pesagens com limites de erro de $\pm 0,1\text{g}$.

c₈. Densímetro apropriado para a determinação da densidade da solução de sulfato de sódio ou de sulfato de magnésio.

d. Amostras

Se a amostra de agregado para ensaio não for acompanhada da indicação da sua composição granulométrica, é necessário procedermos a determinação desta de acordo com a especificação LNEC aplicável.

Consideramos separadamente o material que passa na peneira de 4,76mm (agregado fino) e o material que é retido nessa peneira (agregado grosso).

Se, porém, o material de granulometria superior a 4,76mm passar todo na peneira de 9,51mm consideramos, para efeitos do ensaio, como agregado fino.

d₁. Agregado fino

Tomamos uma porção de material que, após lavagem

e secagem, permita obter pelo menos 100g de cada uma das frações granulométricas adiante indicadas; não são consideradas as frações que correspondam a menos de 5% da porção tomada.

Lavamos o material dentro da peneira de 0,297mm, para eliminar o agregado de dimensão inferior, e secamos na estufa a 105-110°C até massa constante.

Peneiramos o agregado de modo a fazer uma separação aproximada nas seguintes frações:

- 9,51/4,76mm
- 4,76/2,38mm
- 2,38/1,19mm
- 1,19/0,595mm
- 0,595/0,297mm

De cada uma destas frações (excluídas as que correspondam a menos de 5%), tomamos cerca de 110g, peneiramos nas peneiras que as limitam inferiormente. Pesamos 100g do material retido em cada peneira, não aproveitando o que tiver ficado preso nas malhas.

Colocamos a amostra num dos recipientes referidos em c₂.

d₂. Agregado grosso

Tomamos uma porção de agregado grosso (material retido na peneira de 4,76mm) que, após lavagem e secagem, nos permita obter amostras com as massas e composições indicadas na Tabela IV, não consideramos as frações (1.^a coluna) que correspondam a menos de 5% da porção tomada.

Lavamos o material e secamos na estufa a 105-110°C até massa constante.

Separamos por peneiramento as diferentes frações granulométricas que se juntam para formar frações com a composição indicada na Tabela IV. Anotamos as massas das frações e, nas de granulometria superior a 19,0mm, procedemos a contagem das partículas que constituem cada uma delas.

Colocamos cada amostra num dos recipientes referidos em c₂.

e. Técnica

Agitamos vigorosamente a solução de sulfato - sódio ou de sulfato de magnésio, quebrando qualquer depósito de cristais aglutinados existente, e mantemos à temperatura de 21 ± 1°C durante pelo menos 48h, agitando de vez em quando. Verificamos se a densidade da solução está dentro dos limites referidos na secção b.

Imergimos os cestos tendo em conta as seguintes condições: o volume de solução deve ser pelo menos igual a cinco vezes o volume da amostra imersa; a parte superior dos fragmentos deve ficar pelo menos 1,5cm abaixo da superfície do líquido. No caso de agregados muito leves, devemos colocar uma rede metálica sobre os fragmentos para os manter imersos.

Tapamos o recipiente para evitar a evaporação e a entrada de substâncias estranhas, e deixamos as amostras em imersão durante 16 a 18h, à temperatura de 21 ± 1°C.

Decorrido aquele período, retiramos os cestos da solução, deixamos escorrer durante 10 a 20 minutos e colocamos na estufa previamente levada a 105-110°C. Em relação a cada amostra, consideramos terminada a secagem quando a diferença entre duas pesagens consecutivas, intervaladas de não menos de 4h e não mais de 18h, for inferior a 0,1g - no caso de agregado grosso, antes de efetuarmos pesagens, devemos deixar esfriar os fragmentos até a temperatura ambiente.

Realizamos cinco ciclos completos de imersão e secagem, a menos que outro número tenha sido explicitamente indicado.

Após cada período de imersão, devemos observar os fragmentos de granulometria superior a 19,0mm, a fim de verificarmos se houve fissuração, esfoliação, fragmentação, esfarelamento ou qualquer outro tipo de alteração. No fim da última imersão, devemos anotar o número de partículas que sofreram cada uma dessas modificações; se tal não for possível, anotamos apenas o número total de partículas que sofreram alteração.

Frações granulométricas	Composição da amostra		Massa da amostra g
	Frações mm	Massas g	
90,5/64,0			7000 ± 1000
64,0/38,1	64,0/50,8	3000 ± 300	5000 ± 300
	50,8/38,1	2000 ± 200	
38,1/19,0	38,1/25,4	1000 ± 50	1500 ± 50
	25,4/19,0	500 ± 30	
19,0/9,51	19,0/12,7	670 ± 10	1000 ± 10
	12,7/9,51	300 ± 5	
9,51/4,76			300 ± 5

Tabela IV

Concluído o último ciclo de imersão e secagem, lavamos os fragmentos dentro dos cestos com água corrente, até que esta saia praticamente isenta de sulfatos (a adição de cloreto de bário à água de lavagem não deve produzir turvação superior à obtida na água corrente).

Secamos os fragmentos na estufa até massa constante.

Frações ensaiadas mm	Peneiras mm
90,5/64,0	50,8
64,0/38,1	32,0
38,1/19,0	16,0
19,0/9,51	8,0
9,51/4,76	4,0

Tabela V

Peneiramos separadamente todas as frações: as de agregado fino nas peneiras que tinham ficado retidas antes do ensaio e os de agregado grosso nas peneiras indica-

das na Tabela V.

Pesamos o material retido em cada uma das peneiras e anotamos as massas obtidas.

f. Resultados

O ensaio fornece resultados quantitativos (perdas de massa, em porcentagem) e resultados qualitativos (alterações verificadas). Estes últimos só se referem às frações de granulometria superior a 19,0mm.

Os resultados devem ser acompanhados da indicação de solução utilizada (sulfato de sódio ou sulfato de magnésio) e do número de ciclos de imersão e secagem efetuados.

f₁. Resultados quantitativos

Consideramos separadamente os resultados referentes ao agregado fino e ao agregado grosso.

Sendo, para o agregado fino (ou para o agregado grosso):

g_i - porcentagens das respectivas frações granulométricas - referidas à massa do agregado fino (ou do agregado grosso), calculadas a partir da composição granulométrica do material;

m_i - massas iniciais das amostras;

m'_i - massas das amostras após o peneiramento final; as perdas das amostras, em porcentagem, são:

$$P_i = \frac{m_i - m'_i}{m_i} \times 100$$

e a perda do agregado fino (ou do agregado grosso), em porcentagem, é:

$$P = \sum \frac{g_i}{100} P_i$$

Os valores das perdas relativas às frações que não foram submetidas a ensaio obedecem às seguintes condições:

- as perdas das frações de granulometria inferior a 0,297mm - consideram-se nulas;
- para as frações cuja porcentagem é inferior a 5%, tomamos para valor da perda a média das perdas das frações contíguas - ou, na ausência de uma destas, o valor da perda da outra.

Apresentamos os valores das perdas, expressos em porcentagem, arredondados a um décimo.

f₂. Resultados qualitativos

Para cada uma das amostras de granulometria superior a 19,0mm indicamos:

- o número inicial de partículas;
- o número de partículas que sofreram alterações, tais como: - fissuração, esfoliação, fragmentação ou esfarelamento, discriminando, se possível, o número das que sofreram cada uma dessas alterações.

D. Ensaio de Alteração por Lixiviação Contínua com Extrator "Soxhlet"

Com o extrator Soxhlet, tentamos simular no laboratório as condições naturais de alteração, mas em velocidade muito maior, graças à temperatura mais elevada (cerca de 70°C) e à velocidade de percolação da água também muito maior. Este método além de determinar a resistência a alteração de rochas, permite também uma previsão da queda de resistência mecânica, principalmente de agregados susceptíveis a ação química da água.

Um extrator Soxhlet (Figura 29), consta essencialmente de um balão, tubo extrator, e uma unidade de condensação. Um ciclo, no extrator, consta basicamente do seguinte: a água evaporada no balão, devido a uma unidade de aquecimento - controlável (manta aquecedora com regulador de voltagem) condensa, precipita sobre a amostra e infiltra nos fragmentos. Quando a água atinge o nível do sifão, é sifonada de volta para o balão, recomeçando o ciclo. No interior deste aparelho, distinguimos duas regiões: zona atmosférica, onde as amostras nunca estão submersas e a velocidade de percolação da água é mui-

to grande; zona de flutuação do nível da água, onde as amostras permanecem imersas e emersas.

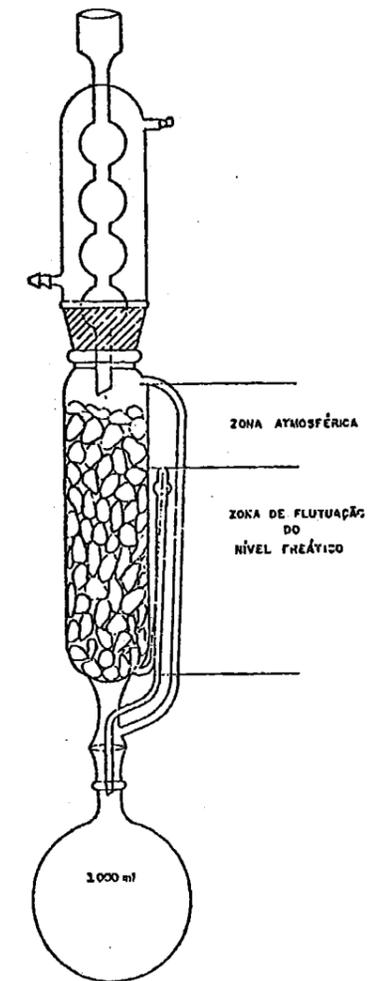


Figura 29
Extrator Soxhlet

Para que as condições de alteração sejam aproximadamente uniformes, a quantidade de amostra nunca deverá ultrapassar a altura do sifão, no tubo extrator.

Após um certo número de ciclos, a amostra é retirada, secada e examinado o seu estado de alteração. Quando - houver interêsse em prever também a resistência mecânica da rocha, retiramos amostras de cada fração para ensaios, após um número pré-estabelecido de ciclos no extrator.

3. Ensaio com Frasco Chapman

Com relação aos agregados miúdos, a norma EB-4 - impõe condições relativamente à natureza, à composição granulo

métrica, às substâncias nocivas (torrões de argila, material carbonoso, etc.) e às impurezas orgânicas. As constantes físicas dos agregados miúdos de interesse para o engenheiro são: peso específico aparente e real, umidade e coeficiente de vazios.

A. *Peso específico real - γ_r*

É a relação entre o peso do agregado e o volume de seus grãos, não considerando o volume dos espaços intergranulares (volume de vazios).

$$\gamma_r = \frac{P}{V_{ch}}$$

Efetuamos a sua determinação com o frasco de Chapman, quando se trata de areia grossa. Quando o material é finamente pulverizado, por exemplo areia fina, cimento, material de preenchimento, etc. e para maior precisão, utilizamos o frasco de Le Chatelier. O frasco de Chapman consiste de uma proveta graduada, possuindo na parte inferior dois bulbos, sendo que entre eles existe um traço que assinala o volume de 200ml, Figura 30.

Adotamos para esse ensaio o método M-9 do IPT, que utiliza 500g de areia em um volume de 200ml de água.

Chamando de L o volume final, temos:

$$L = 200 + \frac{500}{\gamma_r} \therefore \gamma_r = \frac{500}{L-200}$$

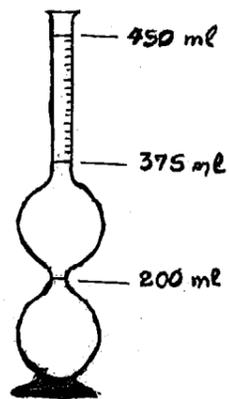


Figura 30
Frasco de Chapman

Método para determinação do peso específico real aproximado de agregados miúdos - M9 (IPT) - Norma IPT-M-9

Objetivo: Este método tem por objetivo indicar o procedimento para a determinação do peso específico real aproximado de agregados miúdos.

Aparelhos: Empregamos os seguintes aparelhos:

Balança - com capacidade mínima de 1kg e sensibilidade de 1g ou menos.

Frasco - de vidro e graduado, como indicamos na Figura 30.

Preparação de amostras: Devemos escolher a amostra de material destinada ao ensaio de acordo com o critério estabelecido no método para preparação de amostras de agregados M4.

Secamos a amostra ao ar até atingir constância de peso.

Processo: Colocamos água no frasco até a divisão 200cm³ e, em seguida introduzimos, cuidadosamente, 500g de areia seca e agitamos para a eliminação total das bolhas de ar. A leitura do nível atingido pela água no gargalo do frasco dar-nos-á o volume, em cm³, ocupado pelo conjunto água-areia.

Cálculo: Calculamos o peso específico real, aproximado do agregado miúdo pela fórmula:

$$\gamma = \frac{500}{V - 200}$$
, na qual V representa o volume, em

cm³, lido no gargalo do frasco para o conjunto água-areia.

Tolerância: Duas determinações consecutivas de γ , feitas com amostras do mesmo agregado miúdo, não devem diferir de mais de 0,05g/cm³.

B. *Determinação da Umidade e da Absorção*

O conhecimento do teor de umidade é muito impor-

tante para os agregados miúdos, especialmente as areias, que geralmente são entregues nas obras com certo teor de umidade, adquirido durante o processo de extração (sucção a úmido) ou posteriormente pela chuva. Duas razões ilustram a importância do conhecimento dessa característica: uma é a correção da quantidade de água de amassamento; outra é a correção da quantidade de agregados, pois quando medido em peso, o teor de umidade influi diretamente, e indiretamente, quando medido em volume. A Figura 31, ilustra os fenômenos de absorção e de umidade superficial.

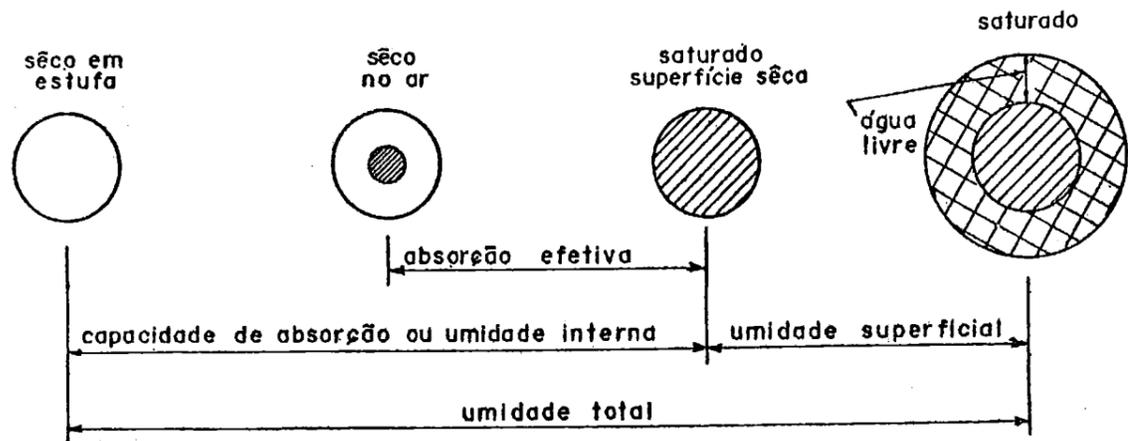


Figura 31

Absorção de umidade por fragmentos

Definimos coeficiente de umidade (ch) como sendo o número que multiplicado pelo peso seco do agregado (P_s) dê o peso d'água superficial (P_a) livre, presente no agregado. Sendo P_h o peso do agregado úmido, temos:

$$\begin{aligned} ch \cdot P_s &= P_a \\ ch \cdot P_s &= P_h - P_s \\ ch &= \frac{P_h - P_s}{P_s} \quad (1) \end{aligned}$$

A umidade é normalmente expressa em porcentagem:

$$HZ = \frac{P_h - P_s}{P_s} \cdot 100 \quad (2)$$

O método mais comumente empregado na determinação da umidade superficial é o Método M-12 do IPT, que utiliza o frasco de Chapman.

Segundo esse método, colocamos água no frasco - até a marca dos 200ml e adicionamos 500 gramas da amostra de areia úmida. Antes de efetuar a leitura do volume final no garfo graduado, agitamos o frasco para eliminar as bolhas de ar que porventura ficaram aderidas aos grãos, Figura 30.

Chamando de L leitura do volume final, V volume real da areia seca, v volume da água superficial, P_s peso da areia seca, γ_r , peso específico real da areia, P_h peso da areia úmida (500g) e H porcentagem de umidade, temos:

$$L = 200 + V + v \quad (3)$$

como:

$$v = \frac{P_s}{\gamma_r} \quad (4) \quad \text{e} \quad v = \frac{H \cdot P_s}{100} \quad (5)$$

De (2) temos $P_s = \frac{100}{100 + H} \cdot P_h$, que substituímos em (4) e (5), resultando:

$$V = \frac{100}{100 + H} \cdot \frac{P_h}{\gamma_r} \quad (6) \quad \text{e} \quad v = \frac{H}{100 + H} \cdot P_h \quad (7)$$

Substituindo (6) e (7) em (3), temos:

$$\begin{aligned} L &= 200 + \frac{100}{100 + H} \cdot \frac{P_h}{\gamma_r} + \frac{H}{100 + H} \cdot P_h \dots \\ H &= \frac{100 P_h - 100 \gamma_r (L - 200)}{\gamma_r (L - 200 - P_h)} \end{aligned}$$

Sendo $P_h = 500$ e multiplicando o numerador e denominador por (-1), temos:

$$HZ = \frac{\gamma_r (L - 200) - 500}{\gamma_r (700 - L)} \cdot 100$$

Método de Determinação da Umidade Superficial em Agregados Miúdos - M12 (IPT)

Objetivo: Este método tem por objetivo indicar o modo de proceder à determinação da quantidade aproximada de umidade

de superficial porventura presente no agregado miúdo.

Aparelhos: Empregamos os seguintes aparelhos:

Balança - a balança deve ter capacidade mínima de 1kg e sensibilidade de 1g ou menos.

Frasco - o frasco graduado de vidro deve ser semelhante ao indicado na Figura 30.

Preparação das amostras: Coletamos uma amostra de 500g de material úmido destinado ao ensaio, de acordo com o critério estabelecido no método para preparação de amostras de agregados - M4.

Devemos fazer a separação e a pesagem da amostra rapidamente com o objetivo de evitar, tanto quanto possível, as perdas de água por evaporação.

Processo: Colocamos água no frasco até a divisão 200cm³ e em seguida introduzimos, cuidadosamente, as 500g de areia úmida no frasco e depois o agitamos para a eliminação total de bolhas de ar. A leitura do nível atingido pela água no gargalo do frasco dar-nos-á o volume, em cm³, ocupado pelo conjunto água-areia.

Umidade superficial: Calculamos a umidade superficial presente

de material seco, pela fórmula:

$$V = 200 - \frac{500}{D}$$

umidade superficial =

$$\frac{700 - V}{V}$$

na qual V representa o volume (cm³) da água no gargalo do frasco para o conjunto água areia e D o peso específico absoluto aproximado (g/cm³) do agregado miúdo.

Obtemos o peso específico absoluto aproximado do agregado miúdo pela aplicação do "Método para determinação do peso específico absoluto aproximado de agregado miúdo - M9".

Tolerância: Duas determinações consecutivas, feitas com amostras da mesma areia e colhidas ao mesmo tempo, não de

C. Coeficiente de vazios

Denominamos coeficiente de vazios (c_v) ao número que multiplicado pelo volume total do agregado fornece o volume de vazios existentes neste mesmo agregado.

$$c_v \cdot V_t = V_v \quad \text{onde:} \quad \begin{array}{l} V_t - \text{volume total} \\ V_v - \text{volume de vazios} \end{array}$$

Para uma determinada amostra, o volume de grãos é constante, porém o volume de vazios varia com o teor de umidade. O coeficiente de vazios da areia úmida cresce à medida que aumenta a umidade, atingindo um valor máximo e depois decresce até que a água seja suficiente para ocupar integralmente os vazios da areia; neste ponto, o c_v é igual ao da areia seca. Tal aumento de volume é causado pelo afastamento dos grãos devido a película de água introduzida entre eles. Nestas condições a areia é denominada inundada. Este fato permite a determinação do c_v através do frasco de Chapman, que descreveremos na parte experimental.

Procedimento utilizando o frasco Chapman

Determinamos o peso do frasco seco adicionamos

aproximadamente 400cm³ de água e areia em pequenas quantidades até que os dois níveis (água-areia) coincidam aproximadamente. Alternadamente, adicionamos água e areia em pequenos volumes até que o traço de referência de 400ml seja atingido com coincidência de ambos os níveis. A diferença entre o peso do conjunto (frasco+água+areia)

e o peso do frasco representará o peso de 400cm³ de areia inundada. Obtemos o acamamento da areia por queda natural, quando a colocamos no frasco. Devemos evitar vibrações e choques no frasco durante o seu enchimento.

Chamando de:

P - peso dos 400 cm³ de areia inundada

γ_r - peso específico real da areia

V_r - volume real da areia (volume dos grãos)

c_v - coeficiente de vazios

P_2 - peso da água

$$\gamma_{ap} = \gamma_r (1 - c_v) (1 - c_h)$$

Por meio do γ_{ap} , podemos saber a quantidade de peso para volume e vice-versa, bem como calcular a quantidade

Como:

$$P = P_1 + P_2 \quad (1) \quad \text{e} \quad \gamma_r = \frac{P_1}{V_1} \quad \therefore \quad P_1 = V_1 \gamma_r$$

$$\text{e} \quad V_1 = 400 - V_2 \quad \text{e} \quad V_2 = c_v \cdot 400, \quad \text{assim} \quad V_1 = 400 - 400 c_v$$

4. Ensaio com o Frasco de Le Chatelier

Este Método fixa o modo pelo qual determinamos a quantidade de material a ser utilizada, como cimento, solo, material de enchimento, etc.

2 2

Substituindo (2) e (3) em (1), temos:

$$P = \gamma_r (400 - 400 c_v) + 400 c_v$$

donde:

- frasco de Le Chatelier (Figura 32);
- querosene ou nafta livres de água, tendo uma densidade maior que 62° A.P.I.;
- balança com capacidade de 200g, sensível a 0,01g;
- termômetro graduado em 0,2°C, de 0° a 50°C;

ou

$$c_v = \frac{400 \gamma_r - P}{400 \gamma_r} \cdot 100$$

B. Ensaio

- colocamos no frasco Le Chatelier um dos líquidos mencionados no item 2b em quantidade tal que seu nível superior fique a uma distância de 1-2 cm da borda superior do frasco;
- enxugamos as paredes internas do frasco, e se necessário. Colocamos o frasco no banho d'água de acordo com a alínea (a) e fazemos a primeira leitura do nível superior do líquido;
- retiramos o frasco do banho e colocamos nele, em pequenas porções, cerca de 60g do material em ensaio. Devemos cuidar para que, com esta operação, o líquido não ultrapasse a faixa superior da graduação do frasco e que o material não adira as paredes do frasco, acima do líquido;
- arrolhamos o frasco, colocamo-lo numa posição inclinada

O peso específico aparente é a relação entre o peso e o volume total do agregado

$$\gamma_{ap} = \frac{P}{V} \quad (\text{g/cm}^3)$$

Podemos calcular em função do peso específico real, do coeficiente de vazios e do coeficiente de umidade através da seguinte fórmula:

círculo horizontal, com o fim de expulsar o ar contido no

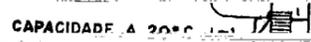
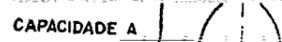
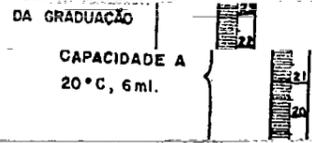


Figura 32
Frasco de Le Chatelier

material. Isto conseguimos quando não mais aparecerem bolhas de ar na superfície do líquido. A seguir colocamos o frasco no banho, tendo em vista fazermos a leitura final.

NOTA - se colocamos uma quantidade apropriada de material no frasco, o nível do líquido deverá estar, em sua posição final, em um ponto da faixa superior da graduação.

e) o frasco deve permanecer no banho de temperatura constante, durante um intervalo de tempo suficiente para fazermos as leituras sem que as temperaturas do banho e do conteúdo do frasco, difiram de mais de 0,2°C. Verificamos a leitura, até que seja constante, para assegurar que o conteúdo do frasco alcançou a temperatura do banho d'água.

C. Cálculos e resultados

A diferença entre as leituras inicial e final representa o volume do líquido deslocado pelo material ensaiado, calculamos a massa específica real pela fórmula:

$\frac{\text{massa deslocada}}{\text{volume do líquido deslocado}}$

Determinações em duplicata da massa específica -

creto.

Se a areia possui um teor de matéria orgânica superior a 300 ppm, em termos de ácido tânico, será uma areia suspeita. Neste caso, a resistência e/ou a durabilidade do concreto poderão ser afetadas. Devemos então submeter o agregado ou ao ensaio de qualidade especificado na Norma Brasileira MB-95, ou ao método adotado pelo DNER-DPT-M55-64.

-Método de Determinação de Impurezas Orgânicas em Areia
DNER-DPT-M55-64

A. Objetivo

Este método fixa o modo pelo qual devemos fazer a avaliação colorimétrica das impurezas orgânicas nas areias.

O seu principal valor está em chamar a atenção sobre a necessidade de um estudo especial que nos permita avaliar o grau de nocividade da matéria orgânica presente numa areia, que o ensaio acuse como suspeita.

B. Aparelhagem

A aparelhagem necessária é a seguinte:

- a) balança com capacidade de 2kg, sensível a 1g;
- b) frasco de vidro, tipo Erlenmeyer, com capacidade de 500ml;
- c) balão volumétrico, de vidro, com capacidade de 1000ml;
- d) balão volumétrico, com capacidade de 100ml;
- e) colorímetro;
- f) tubo de ensaio;
- g) funil de vidro;
- h) pipeta de vidro, graduada em 1ml e capacidade de 10ml.

C. Soluções

As seguintes soluções são necessárias à execução do ensaio:

- a) solução de hidróxido de sódio a 3% - Dissolvemos 30g de hidróxido de sódio em água destilada e completamos o volume de 100ml, em balão volumétrico;
- b) solução de ácido tânico a 2% - Dissolvemos 2g de ácido tânico em 10ml de álcool e completamos o volume de 100ml com água destilada, em balão volumétrico;
- c) solução padrão - Adicionamos 3ml da solução de ácido tânico a 2% com 97ml da solução de hidróxido de sódio a 3%. Devemos preparar esta solução na hora do ensaio.

D. Amostra

Devemos obter uma amostra representativa, seca, de cerca de 200g, da areia em ensaio.

E. Ensaio

- a) num frasco Erlenmeyer (ou recipiente semelhante), adicionamos, a 200g de areia seca, 100ml da solução de hidróxido de sódio: agitamos vigorosamente o frasco até completarmos a remoção do ar existente na areia e deixamos em repouso durante 24 horas;

- b) em outro frasco Erlenmeyer, colocamos 100ml da solução padrão (recentemente preparada; agitamos e deixamos também em repouso, ao abrigo da luz, durante 24 horas;
- c) findo o prazo indicado, filtramos as duas soluções e procedemos à comparação das intensidades de cor das mesmas; esta apreciação, fazemos em colorímetro ou visualmente, comparando espessuras iguais das soluções.

F. Resultados

Anotamos, como resultado, se a solução que está em contato com a areia apresenta coloração mais ou menos intensa que a solução padrão.

6. Ensaio do Equivalente de Areia

A. Introdução

A maioria das cascalheiras apresentam quantidades variáveis de materiais finos que, por sua vez, podem ser de naturezas diferentes, desde a areia fina até a argila, sendo que estas frações frequentemente não se apresentam uniformemente distribuídas. O excesso de argila é, em geral, prejudicial ao comportamento dos agregados, quer nas bases de cascalho, nas misturas betuminosas ou no concreto.

Os processos de análise granulométrica vistos no item 6 (pipetagem, hidrômetro, fotoextinção, etc.) são em geral trabalhosos e devemos executá-los em laboratório. Entretanto, muitas vezes é necessário que o engenheiro de campo possa verificar com rapidez a presença de quantidades nocivas de materiais argilosos a fim de decidir sobre a aplicabilidade do agregado.

O ensaio do equivalente de areia constitui um meio rápido para separar as partículas finas das de maiores dimensões estabelecendo a proporção entre elas. O volume da argila existente no agregado é expandido em função da quantidade presente. As proporções em volume dos componentes da mistura é que determinam suas propriedades.

Objetivo

Este método fixa o modo pelo qual determinamos o equivalente de areia de solos ou de agregados miúdos.

Definição

O equivalente de areia (EA) é uma relação volumétrica que corresponde à razão entre a altura do nível superior da areia e a altura do nível superior da suspensão argilosa de uma determinada quantidade de solo ou de agregado miúdo, numa proveta, em condições estabelecidas neste método.

Aparelhagem

A aparelhagem necessária é a seguinte:

- a) peneira de 4,8mm, de acordo com a especificação "Peneiras - de malhas quadradas para análise granulométrica de solos", ABNT-EB-22R;
- b) proveta cilíndrica, transparente, de vidro ou matéria plástica, de 32mm de diâmetro interno e cerca de 43cm de altura, graduada de 2 em 2mm, até pelo menos 38cm, a partir da base, ou apresentando dois círculos de referência a 10cm e a 38cm, a partir da base, (Figura 33);
- c) tubo lavador de cobre ou latão, de 6,4mm de diâmetro externo e 50cm de comprimento; a extremidade inferior é fechada em forma de cunha, tendo dois orifícios de 1mm de diâmetro, perfurados nas faces da cunha e junto à ponta;
- d) garrafão com capacidade de 5 litros, dotado de sifão constituído de rolha de borracha com dois furos e de um tubo de cobre dobrado; colocamos o garrafão 90cm acima da mesa de trabalho;
- e) tubo de borracha de 5mm de diâmetro interno, com uma pinça de Mohr ou dispositivo similar, para interromper o escoamento, usamos este tubo para ligar o tubo lavador ao sifão;
- f) pistão constituído por uma haste metálica de 46cm de comprimento, tendo na extremidade inferior uma sapata cônica de

25,4mm de diâmetro (Figura 33); a sapata possui três pequenos parafusos de ajustagem que permitem centrá-la, com folga, na proveta; um disco perfurado, que se adapta ao tampo da proveta, serve de guia para a haste; prendemos um lastro cilíndrico à extremidade da haste para completar junto com o pistão o peso de 1kg;

- g) recipiente de medida, com capacidade de 88ml;
- h) funil para colocar o solo na proveta.

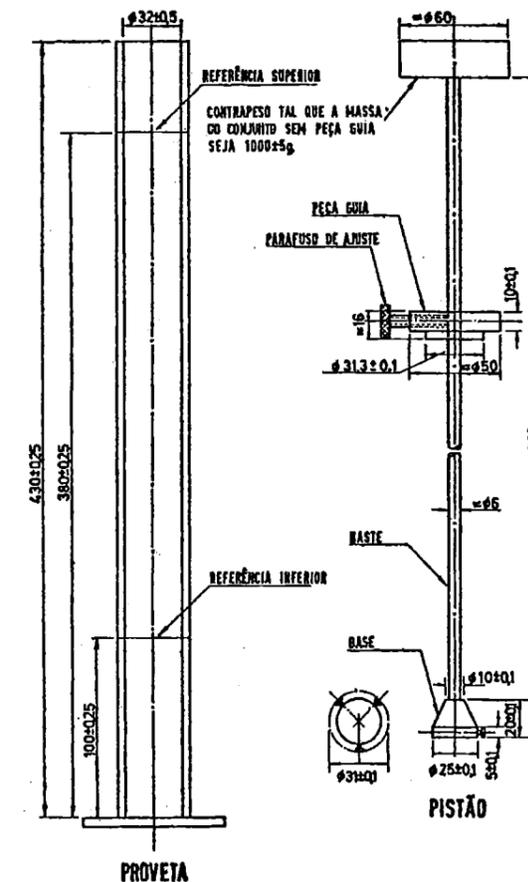


Figura 33
Conjunto para determinação do equivalente de areia

Reagentes e Soluções

- a) Solução concentrada - para 5 litros de solução concentrada, necessitamos de:
557g de cloreto de cálcio anidro;

2510g (2010ml) de glicerina USP;
57,5g (55ml) de solução de formaldeído a 40%, em volume.

Dissolvemos o cloreto de cálcio em 2 litros de água destilada, agitando energicamente a solução; esfriamos a solução e filtramos através do papel Whatman nº 12 ou equivalente; adicionamos a glicerina e o formaldeído à solução filtrada, misturando bem e com cuidado; completamos 5 litros de solução com água destilada ou água corrente limpa.

b) *Solução de trabalho* - diluímos 125ml da solução concentrada em água destilada ou corrente limpa, até completar 5 litros, misturando cuidadosamente; verificamos a água duvidosa comparando os resultados dos ensaios de equivalente de areia - em amostras idênticas, empregando soluções preparadas com essa água duvidosa e com água destilada.

-Amostra

Obtemos a amostra com o material que passa na peneira de 4,8mm. Se a amostra inicial não estiver úmida, devemos umidecê-la antes do peneiramento. Se o agregado graúdo apresentar finos aderentes que não possamos desprender durante o peneiramento, devemos secá-lo e esfregá-lo com as mãos, juntando os finos resultantes ao material que passou na peneira.

-Ensaio

- a) abrimos a pinça do tubo de ligação; acionamos o sifão, soprando no tampo do garrafão que contém a solução, através de um pequeno tubo; verificado o escoamento da solução, fechamos a pinça;
- b) sifonamos a solução de trabalho para a proveta, até que atinja o traço de referência a 10cm da base;
- c) transferimos para a proveta, com auxílio do funil, o conteúdo de um recipiente de medida cheio de amostra preparada e rasada à superfície; o conteúdo do recipiente corresponde a cerca de 110g de material solto; batemos no fundo da proveta firmemente com a palma da mão, várias vezes, a fim de deslocar as bolhas de ar e ajudar a molhar a amostra. Deixamos, a seguir, a proveta em repouso durante 10 minutos;

- d) após o período de 10 minutos, tapamos a proveta com a rolha de borracha e agitamos a mesma vigorosamente, num movimento alternado, horizontalmente. Executamos 90 ciclos em aproximadamente 30 segundos, com um deslocamento de cerca de 20cm. Cada ciclo compreende um movimento completo de vai-vém. A fim de agitar satisfatoriamente a amostra como antes foi especificado, devemos deslocar apenas os antebraços;
- e) retiramos a rolha e introduzimos o tubo lavador; lavamos rapidamente as paredes e imediatamente inserimos o tubo até o fundo da proveta; agitamos levemente com o tubo lavador a camada de areia para levantar o material argiloso eventualmente existente; acompanhamos esta operação com leve giro da proveta; quando o líquido atingir o círculo de referência superior da proveta (a 38cm da base), suspendemos o tubo lavador lentamente sem pararmos o escoamento constante; regulamos o escoamento pouco antes de retirarmos completamente o tubo e ajustamos o nível naquele traço de referência; deixamos repousar 20 minutos sem perturbação, pois qualquer vibração ou movimento da proveta durante esse período interferirá com a velocidade normal de sedimentação da argila em suspensão e será causa de erro no resultado;
- f) após o período de 20 minutos, determinamos o nível superior da suspensão argilosa e lemos com precisão de 2mm;
- g) introduzimos o pistão cuidadosamente na proveta até assentar completamente na areia; giramos a haste ligeiramente, sem empurrá-la para baixo, até que um dos parafusos de ajustagem seja visível; nessa posição, deslocamos o disco que corre na haste até que ele assente na boca da proveta, fixando-o à haste por meio de um parafuso nele existente; determinamos o nível do centro dos parafusos de ajustagem e adotamo-lo como leitura correspondente ao nível superior da areia; este nível podemos também determinar, medindo a distância entre o tampo do disco que se apoia na boca da proveta e a base inferior do peso cilíndrico, e subtraindo desta, a mesma distância medida quando a sapata está assentada no fundo da proveta. Chamamos esta diferença de constante do conjunto pistão-proveta e ela pode ser diferente para cada conjunto.

Imediatamente após o ensaio, lavamos a proveta, não a deixando sob a ação da luz direta do sol mais que o ne-

cessário.

Cálculos

Calculamos o equivalente de areia como segue:

$$EA = \frac{\text{leitura no t\^o da areia}}{\text{leitura no t\^o da argila}} \times 100$$

ou

$$EA = \frac{D_2 - K}{380 - d_1} \times 100$$

em que:

- d₁ - distância do traço de referência superior da proveta ao nível da suspensão argilosa, em mm;
- d₂ - distância do t\^o do disco (apoiado na boca da proveta) à base inferior do cilindro do pist\~ao, quando a sapata estiver apoiada na areia, em mm;
- k - constante do aparelho (caso particular da distância d₂), quando a sapata do pist\~ao estiver assentada no fundo da proveta, em mm.

C. Coment\~arios

a) Tamanho e forma das part\~iculas

Para as areias grossas e finas, com quantidades apreci\~aveis de gr\~aos angulares, a altura do n\~ivel da fração arenosa determinada sem auxílio do pist\~ao é muito pr\~oxima daquela com o peso do pist\~ao; porém, se a areia for muito fina o pist\~ao afundará consideravelmente. Compreendemos, então, que uma areia fina e bem limpa, mesmo que desprovida de finos pl\~asticos, pode fornecer valores de EA inferiores a 100, desde que o pist\~ao afunde. Neste caso, o EA não tem relação com a plasticidade do solo, mas sim com a sua granulação. Isto parece ter sido previsto, pelo emprego do pist\~ao com peso relativamente alto, porque acentua a inconveniência do emprego de areia muito finas e de gr\~aos arredondados, na construção de estradas.

Fazemos o ensaio do EA com o material que passa

pela peneira 4,76mm (agregado miúdo), sendo que separamos as part\~iculas de tamanho superior. Na separação, estas part\~iculas poderão estar recobertas por uma camada de finos aderentes e quanto mais aderente mais pl\~astica será. É, pois conveniente desprender essa camada e só excluir do ensaio o material maior que 4,76mm, perfeitamente limpo.

b) Umidade

A quantidade de material ensaiado varia como seu teor de umidade. Para evitar esse inconveniente, determinamos o EA com o material pr\~eviaemente s\~eco.

c) Especificações de materiais baseados no EA

Nos Estados Unidos:

- material para base granular EA>30
- material miúdo para "road-mix" EA>45
- agregado miúdo para concreto asf\~altico EA>55
- areia para concreto de cimento EA>80

Na França, as especificações para camadas de base estabilizada mec\~anicamente adotam as faixas granulom\~etricas e fixam valores para o EA como contr\~ole da plasticidade, em função da porcentagem de elementos de tamanho inferior a 80,0 microns(peneira 200), da seguinte maneira:

- EA>30, finos<9%
- EA>35, finos entre 9 e 12%
- EA>40, finos entre 12 e 15%

Para misturas betuminosas:

- areia para concreto asf\~altico EA>55
- areia para pr\~e-misturados densos EA>40

XI. ARGILAS

1. Introdução

A argila é um material natural, terroso, de granulagem fina, que geralmente adquire, quando umedecido com água, certa plasticidade. A plasticidade é uma propriedade reológica que se refere à deformação sob pressão que permanece quando a pressão cessa de atuar. As argilas são essencialmente formadas por silicatos hidratados de ferro, alumínio e magnésio. As análises químicas das argilas mostram que elas são constituídas fundamentalmente de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e água (H_2O) e frequentemente com apreciável quantidade de ferro, de elementos alcalinos e de alcalinos terrosos.

Todas as argilas são compostas de partículas extremamente "finas", de um número relativamente restrito de minerais, hoje conhecidos como minerais de argila ou argilo-minerais. No estudo sedimentológico dos componentes dos sedimentos clásticos, a fração argilosa é aquela constituída pela menores partículas. A tendência, na Geologia, é seguir a escala granulométrica de Wentworth que dá 4 micra como limite superior da fração granulométrica argilosa. Em outras áreas que investigam as propriedades dos solos, costuma-se propor o limite de 2 micra, portanto há divergência considerável na terminologia das argilas nos diversos setores que as utilizam. Entretanto, não existe uma fronteira nítida, indicada por uma descontinuidade marcante marcante, que separe os minerais de argila e outras que não o são, nos sedimentos argilosos.

Usamos a designação folhelho para as argilas laminadas ou estratificadas naturais, podendo ter a mesma consistência das argilas em geral ou ser completamente adensado e duro.

Alguns autores denominam argilito ao material argiloso, finamente granulado que se apresenta endurecido (coeso) e compacto em grandes massas (maciço). Ele difere do folhelho por ser homogeneamente maciço, isto é, não estratificado.

Uma argila qualquer pode ser constituída de partículas de um só argilo-mineral ou de uma mistura de diversos argilos-minerais. Pode conter ainda outros minerais, tais co-

mo: matérias orgânicas solúveis ou coloidalmente associadas e partículas de outros minerais como quartzo, mica, pirita, etc.

2. Importância dos Minerais de Argila

Dentre as inúmeras aplicações práticas das argilas, destacamos como de grande importância o uso em: prospecções geológicas, agricultura, mecânica dos solos, cerâmica e outras indústrias, como por exemplo, petróleo, borracha, papel, etc.

Para mostrar a importância do estudo dos argilo-minerais, damos a seguir alguns exemplos das suas principais aplicações.

Nas argamassas refratárias, usamos argilas como material ligante dos tijolos e peças refratárias. Utilizamos como material de construção, na fabricação de tijolos comuns, telhas e ladrilhos cerâmicos; como pigmento de carga, na indústria de tintas e vernizes; como catalizadores, principalmente no "cracking" do petróleo; como matéria prima fundamental, na fabricação do cimento Portland; dispersões de certos argilo-minerais, nos poços de petróleo como "lama de perfuração", na indústria do papel e dos produtos de borracha; na fabricação de tijolos refratários; na fabricação de louça sanitária; na obtenção de isolantes térmicos; na fabricação de porcelanas isolantes (não condutoras de eletricidade); nas minas de lápis; na fabricação do vidro, etc.

3. Origem dos Argilo-Minerais

A. Por alteração hidrotermal

A ação dos gases quentes, especialmente de vapor superaquecido ou soluções aquosas quentes, leva à alteração de rochas e conseqüentemente à formação de argilo-minerais. Assim, aplicamos o nome alteração hidrotermal a todos os processos que ocorreram em fase líquida, geralmente aquosa, acima da temperatura ambiente.

A ação da água superaquecida sobre pegmatitos, granitos e gnaisses leva à formação de depósitos de caulins primários. Nesse processo, os feldspatos sódico-potássicos se

decompõem, sendo o sódico dissolvido em primeiro lugar e depois o potássico, pelas águas ácidas, formando-se a caulinita como o argilo mineral predominante na constituição dos caulins primários residuais. Em condições, nas quais a movimentação das águas de lixiviação é restrita, o potássio pode ser mobilizado parcialmente, sendo a quantidade retida no sistema responsável pela formação de mica muscovita finamente dividida, também chamada sericita, que embora de dimensões reduzidas, ainda pode ser observada a olho nú, o que a diferencia dos argilos-minerais. A sericita comumente ocorre nos filitos que são rochas de baixo grau de metamorfismo, como em Itapeva, Belo Horizonte e São Roque.

Normalmente, os depósitos de caulins primários, são de origem hidrotermal. Em um depósito de origem hidrotermal, os minerais ferro-magnesianos (anfíbólios, piroxênios e turmalinas) são preservados em relação aos feldspatos; exemplo disso, é o caso dos caulins primários de Perus (SP).

B. Decomposição por intemperismo

Neste processo de decomposição, normalmente por ação das águas de chuvas e águas em movimento, e que ocorre em temperaturas próximas à ambiente, os minerais ferro-magnesianos se decompõem em primeiro lugar, seguindo-se os feldspatos e depois as micas, numa ordem inversa à série de cristalização do magma.

Se a movimentação das águas for restrita, os minerais ferro-magnesianos darão origem às montmorilonitas ou argilo-minerais de camadas mistas e os feldspatos, à caulinita, quando há possibilidade de eliminação total do potássio. Se a drenagem das águas for fácil, a tendência dos minerais ferro-magnesianos é formar os hidróxidos de alumínio e ferro, enquanto os feldspatos podem dar origem à haloisita (ou misturas de caulinita e haloisita) e ao hidróxido de alumínio. Como exemplo disso, citamos os caulins tabulares (mistura de caulinita e haloisita) de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais.

Os feldspatos cálcicos (constituídos predominantemente por anortita) dão origem a haloisita. Um caso interessante a ser mencionado é o de que, em jazidas de caulim de Cornwall, ocorrem nódulos de montmorilonita formados a partir de concentrações de anfíbólios e piroxênios nos pegmatitos graníticos. Deve ser também o caso dos nódulos róseos e brancos

(montmorilonita) e verdes (nontronita), encontrados dentro dos caulins de Sacomã, Via Anhanguera, Perus e Embu-Guassu (SP).

Nesse processo de alteração por intemperismo, a sílica pode ser deixada residualmente, ou então, levada em forma dissolvida (ácido ortosilícico) ou coloidal (forma polimerizada do ácido ortosilícico), principalmente em águas alcalinas.

4. Fatores que Determinam as Propriedades das Argilas

Descrevemos, a seguir, os fatores que determinam as propriedades dos materiais argilosos e que devemos conhecer para podermos descrever o material ou caracterizá-lo satisfatoriamente:

- a) Tipo e teor do argilo-mineral ou argilo-minerais presentes. Devemos determinar todos os componentes, pois sabemos que uma quantidade mínima de um desses elementos pode ser de grande importância. Por exemplo: duas argilas idênticas, se a uma delas adicionarmos 5% de montmorilonita, esta terá certas propriedades bem diferentes daquela que não possui montmorilonita.
- b) Tipo e teor de outros minerais - São abundantes, em certos materiais argilosos: calcita, dolomita, escamas de mica, piritita, feldspatos, gipsita e outros minerais. Para o analista de solos, sob o ponto de vista da mecânica dos solos, é de grande importância a determinação da existência de material siltoso no mesmo, pois que, sua presença modifica acen tuadamente certas propriedades físicas do solo (partículas entre 2μ e 60μ).
- c) Capacidade de troca iônica dos argilo-minerais e dos sais solúveis eventualmente presentes.
- d) Tipo e teor de matéria orgânica presente - De um modo geral encontramos a matéria orgânica sob as duas modalidades seguintes:
 - como fragmentos de folhas, gravetos, tecidos lenhosos macerados, etc., desde partículas visíveis a olho nú até partículas de dimensões coloidais que agem como pigmento do material argiloso;

- moléculas orgânicas mais ou menos complexas, absorvidas - em certas zonas dos cristalitos dos minerais de argila.

A matéria orgânica finamente dividida pode funcionar como pigmento, dando uma coloração que varia desde o cinzento até o preto. Uma pequena porcentagem de matéria orgânica pode mostrar efeito de pigmentação muito acentuado. Entretanto, não existe relação direta entre a cor e o teor de matéria orgânica.

e) Textura - Referimo-nos à distribuição granulométrica das partículas componentes, à forma das mesmas e ao arranjo no espaço. Quando estudamos a fração argilosa não podemos classificar granulometricamente as diferentes frações através de um método mecânico de fracionamento (com o uso de peneiras). Fazemos a classificação através de um meio líquido, geralmente aquoso, baseando-nos na teoria da sedimentação, que segue os preceitos da Lei de Stokes.

5. Classificação, Nomenclatura e Estruturas (Noções)

As rochas sofrem alterações físico-químicas por intemperismo, produzindo geralmente pequenos minerais, formados de cristalitos achatados e macios ao tato, sendo a caulinita o mais abundante.

Os minerais de argila normalmente aparecem associados a outros minerais, representados por partículas de quartzo, feldspatos inalterados, mica, etc. A fração argilosa é comum e arbitrariamente entendida como a porção cujas partículas sejam, conforme o caso, menores que 4 ou 2µ.

Até poucos anos atrás, havia dúvidas se a fração argilosa era ou não constituída de minerais cristalinos. Entretanto, com os modernos métodos de análise mineralógica, principalmente os de Raios-X, sabemos que eles são, com raras exceções, cristalinos.

Evidentemente, as propriedades do material argiloso como um todo, estão vinculadas à estrutura, à composição, à forma e à textura dos argilo-minerais, sendo estas características de grande importância em fundações de edifícios de barragens, como também em material de construção

de estradas de rodagem, em taludes, em barragens de terra, etc.

Alguns autores dividem os argilo-minerais em duas classes principais:

A. Classe da caulinita

As espécies pertencentes a esta classe apresentam a estrutura fundamental do tipo 1-1, isto é, uma folha bidimensional de tetraedros de sílica "ligada" a uma folha bidimensional de gibsita, $Al(OH)_3$, Figura 34.

A fórmula da caulinita e unidade repetitiva na sua estrutura é $Al_2(OH)_4Si_2O_5$.

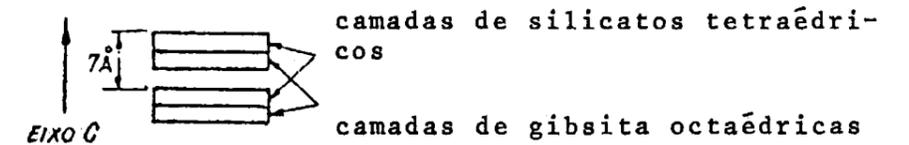


Figura 34
Estrutura da Caulinita

B. Classe da Pirofilita

Os argilo-minerais pertencentes a esta classe apresentam a estrutura básica da pirofilita, que tem retículo cristalino do tipo 2-1, isto é, duas folhas bidimensionais de tetraedros de sílica e uma folha de gibsita ou de brucita, $Mg(OH)_2$, Figura 35.

A unidade básica da pirofilita é $Al_2(OH)_2Si_4O_{10}$.

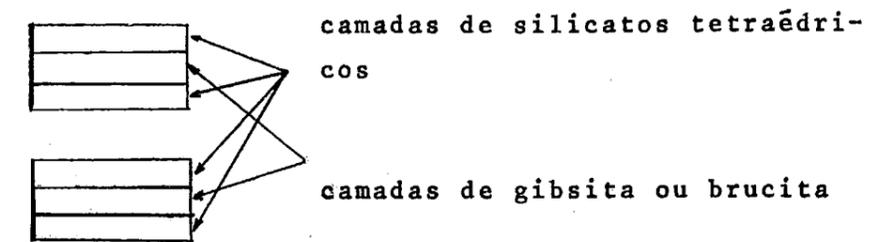


Figura 35
Estrutura da Pirofilita

Derivam desta estrutura, pela substituição dos íons das camadas de sílica e gipsita, o grupo da montmorilonita e o grupo das micas hidratadas, Figura 36.

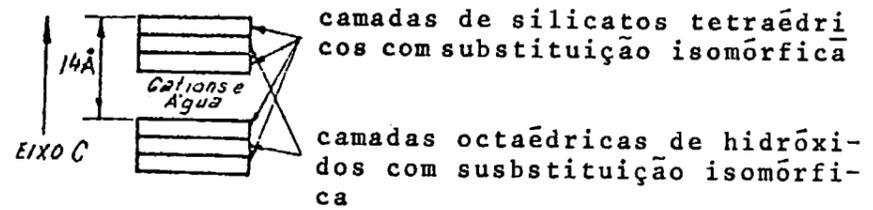


Figura 36

Estrutura da Montmorilonita

Alguns autores, classificam os argilo-minerais - em cinco grupos, dos quais quatro são cristalinos e um não cristalino (amorfo).

I. Grupo amorfo

- a) grupo das alofanas

II. Grupo cristalino

- a) tipo de duas camadas (Figura 34)

- 1. Equidimensionais - grupo da caulinita: caulinita, dickita, nacrita.
- 2. Alongados - grupo da haloisita

- b) tipo de três camadas (Figura 35)

- 1. Retículos expansivos
 - equidimensionais - grupo da montmorilonita: montmorilonita, sauconita, etc.
 - alongados - grupo da montmorilonita: nontronita, saponita, hectorita, etc.
- 2. Retículos não expansivos - grupo da illita (Figura 37)

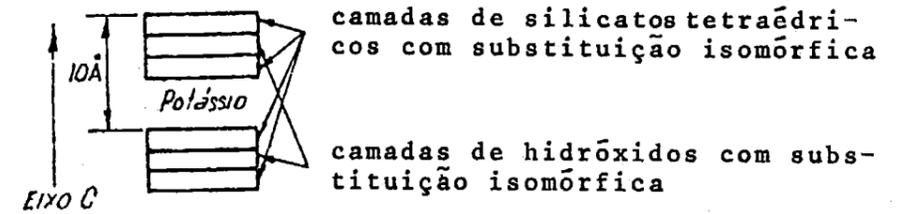


Figura 37

Estrutura da Illita

- c) tipos de camadas mistas regulares (empilhamento ordenado de camadas alternadas de diferentes tipos) Figura 38.

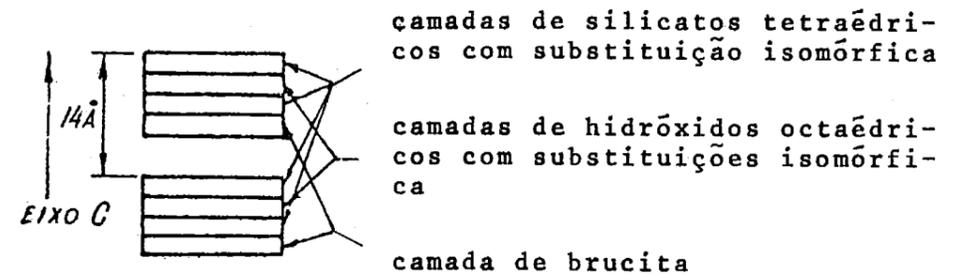


Figura 38

Estrutura Mista

- d) tipos de estrutura em cadeia - atapulgita, sepiolita e paliogorskita.

Resumindo, enquadrámos os minerais de argila nos cinco grupos seguintes, sendo quatro cristalinos e um amorfo.

- 1) Grupo da caulinita
- 2) Grupo da montmorilonita
- 3) Grupo das micas hidratadas ou grupo da illita e bravaisita
- 4) Grupo da atapulgita
- 5) Grupo das alofanas (amorfo)

6. Estudo dos Grupos de Argilo-Minerais

A. Grupo das Alofanas

Os minerais de argila do grupo das alofanas são amorfos em relação ao comportamento à difração dos Raios-X. Parece muito provável que as alofanas sejam grupamentos ou aglomerados de tetraedros de sílica (silício em coordenação tetraédrica com o oxigênio) e de octaedros de gipsita ou brucita (cátions metálicos em coordenação octaédrica com as hidroxilas) distribuídos caoticamente sem nenhuma simetria no conjunto global dos agrupamentos.

O estudo das alofanas não é muito fácil em virtude da dificuldade que se apresenta na separação desses materiais quando misturados com cristalitos de outros constituintes argilosos.

B. Grupo da Caulinita

A estrutura da caulinita resulta da combinação de uma camada simples de sílica tetraédrica com uma camada simples de alumina-octaédrica (gipsita) de tal modo que, na unidade resultante, as "pontas" dos tetraedros de sílica e um dos planos atômicos da camada de gipsita formam um plano comum (com íons de oxigênio que são compartilhados).

Os argilo-minerais do grupo da caulinita consistem de camadas unitárias lamelares do tipo acima descrito. No empilhamento, duas lamelas ficam face a face, uma pelo plano dos oxigênios, das bases dos tetraedros de sílica e outra pelo plano das hidroxilas das camadas de gipsita. Resulta, dessa superposição dos planos O^{-2} e OH^{-} das unidades lamelares adjacentes, que tais microlamelas estão unidas ou ligadas entre si de modo razoavelmente intenso pelas forças de ligação do tipo ponte de hidrogênio. O plano entre essas lamelas é um plano de clivagem. Como esse tipo de ligação é relativamente forte, as placas são dificilmente dissociáveis e o mineral é estável; além disso, a água não pode penetrar entre as placas, não havendo portanto, inchamento ou contração celular desse material.

C. Grupo das Montmorilonitas e das Ilitas

A estrutura da unidade fundamental das montmorilonitas é duas camadas tetraédricas de sílica com uma camada central de alumina octaédrica (gipsita).

As camadas tetraédricas e octaédricas estão combinadas de tal forma que os vértices dos tetraedros de cada camada de sílica e um dos planos de hidroxilas da folha de gipsita formam um plano "atômico".

No empilhamento das unidades "sílica-alumina-sílica" os planos de oxigênio de cada unidade se defrontam face a face, o que significa uma ligação fraca e uma clivagem fácil entre as mesmas.

A característica primordial das estruturas montmoriloníticas é o fato de que, moléculas d'água ou outras moléculas polares, como certas moléculas orgânicas, podem penetrar com certa facilidade entre as camadas unitárias "sílica-alumina-sílica", provocando expansão do retículo. As camadas são separadas por quantidade variável d'água, o que traz como consequência uma variação da dimensão segundo a direção perpendicular ao plano das camadas. O mineral pode expandir-se ou contrair-se segundo essa direção e pode, em presença de quantidade abundante de água, fracionar-se em camadas unitárias extremamente finas de aproximadamente $9,5^{\circ}A$ de espessura.

A montmorilonita e os argilo-minerais de seu grupo são susceptíveis de um grande número de substituições possíveis dos cátions nas camadas octaédricas, podendo-se atribuir a essas substituições a grande variação das espécies e certas propriedades de muitos tipos desse grupo mineral.

As substituições que se processam dentro do retículo sempre provocam um desequilíbrio de cargas e consequentemente das forças de interação, resultando daí o elevado poder de adsorção de íons dos minerais desse grupo. O poder de expansão do retículo, bem como o de adsorção de íons, emprestam ao mineral propriedades plásticas e outras propriedades físicas muito peculiares e não comuns, propriedades essas que têm grande importância na utilização das argilas e dos solos que

contêm esses tipos de argilo-minerais.

A unidade unitária do grupo das ilitas é a mesma da montmorilonita, exceto no fato de que alguns cátions silício são sempre substituídos por alumínio, sendo que o "deficit" de carga positiva é contrabalançado, nos espaços entre as unidades, pelo cátion K^+ .

Algumas ilitas apresentam semelhança estrutural com a mica biotita; outras, com a muscovita.

As placas de ilita possuem posição relativamente fixa, não podendo a água interpor-se entre as camadas. Seu retículo não é expansivo.

7. Plasticidade das Argilas

Plasticidade é a propriedade mais acentuada e característica de uma argila, permitindo formar prontamente os objetos e produtos industriais.

É uma propriedade de certos sistemas, em virtude da qual ele mantém a sua forma, de modo permanente, mesmo sob a ação de pequenos esforços de deformação.

Algumas teorias foram aventadas para explicar o mecanismo da plasticidade das argilas. Assim, há autores que admitem que a argila se torna plástica devido ao filme de água que envolve as suas partículas. Esse filme permite às partículas deslizar umas sobre as outras, podendo a argila, em consequência disso, ser moldada sem que haja perda de coesão.

O grau de plasticidade de uma argila depende das características do filme d'água, quanto à orientação, à densidade e à espessura. A densidade, por sua vez, é maior ou menor, segundo o agrupamento das camadas de moléculas d'água, o que depende do grau de umidade. A espessura do filme d'água, é influenciada pela natureza dos íons adsorvidos existentes na argila.

Dessa forma, vimos que a argila é constituída, de um modo geral, por argilo-minerais anisodimensionais em lamínelas, escamas e plaquetas ripiformes muito pequenas ($\leq 4\mu$).

Os átomos de oxigênio da superfície mineral estão dispostos, como já vimos, num arranjo ordenado ou numa configuração reticulada. Consequentemente, a isto corresponderá também uma distribuição reticulada de carga e das forças residuais de valência. Quando a água é adsorvida, aquelas forças induzirão nas moléculas d'água um arranjo também ordenado, o que é natural. Isto é favorecido pela natureza das moléculas d'água da superfície, que concorre para que tal arranjo seja possível.

As partículas de argila ficam como envolvidas por um envelope de água. A plasticidade depende grandemente das características dessa camada envolvente (da espessura, densidade e orientação).

A plasticidade é consequência não só de uma força de aglutinação entre as partículas que tende a dar coesão à massa como um todo, mas é também consequência da existência da película de água adsorvida, que depois de certa espessura funciona como lubrificante, tornando-as mais móveis e deslocáveis.

A deformação plástica é a soma do movimento recíproco dos cristalitos, de tal forma que o movimento se dá realmente na película d'água.

Cada tipo de argilo-mineral apresenta uma habilidade em fixar a água adsorvida, variando com a natureza do ion adsorvido.

Praticamente não há dúvida de que a força com que a água fica presa à superfície dos argilo-minerais, seja o fator predominante que determina as propriedades plásticas e de coesão nas argilas. Entendemos então por que a quantidade de água a ser adicionada a uma certa massa de argila é absorvida, para obtenção de uma plasticidade ótima, deve ser convenientemente dosada, conforme a natureza do material argiloso.

8. Algumas Aplicações Importantes dos Materiais Argilosos

A. Materiais de Construção

As argilas, tais como são encontradas no solo, servem para fabricação de grande parte dos materiais de construção civil, como tijolos, ladrilhos, telhas, etc.

As principais operações de fabricação dos materiais estruturais de argila são: extração e preparo da argila, formação de peças, secagem e cozimento.

B. Cerâmica Branca

É o ramo da cerâmica industrial que fabrica produtos de cor branca, como por exemplo porcelana, peças sanitárias e louças. A principal característica da matéria prima é que apresente, após a "queima", cor branca. A porcelana é o mais nobre dos produtos da cerâmica branca e quando altamente vitrificada, torna-se translúcida em pequenas espessuras.

C. Porcelana para velas de ignição dos motores de combustão interna

As severas condições de choque térmico, de temperatura elevada e variações bruscas de pressão dos gases a que submetemos o material isolante das velas de ignição, obrigam a execução de programas intensos de pesquisa a fim de melhorar as características da porcelana para este tipo de aplicação. Necessitamos de duas propriedades importantes para este tipo de aplicação: alta resistência ao choque térmico e baixa condutividade elétrica em temperaturas elevadas. Os requisitos para alta resistência ao choque térmico são: alta resistência mecânica; alta condutividade térmica e baixa dilatação térmica.

Denominamos os tipos de materiais de velas de ignição com base no seu principal constituinte: corindon (base de alumina 87-100%); mulítico (fase predominante é a mulita - $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$); espinélio (rico em óxido de alumínio com óxido de magnésio presente); zircão (contém zirconita, $ZrSiO_4$).

D. Materiais cerâmicos isolantes para alta frequência

As porcelanas de composição ternária convencionais são satisfatórias como materiais isolantes elétricos para baixa frequência (60 ciclos/s).

Nas frequências elevadas, encontradas em muitos circuitos eletrônicos, as perdas dielétricas exigem novos tipos de composição para que fiquem reduzidas ao mínimo possível.

Obtemos as composições que dão excelentes resultados com a esteatita, mineral do grupo do talco e que apresenta a seguinte composição: $Mg_3(OH)_2Si_4O_{10}$. Essa espécie mineralógica é o constituinte fundamental da "pedra sabão", podendo ser acinzentada ou esverdeada, folheada ou xistosa ou ainda maciça.

E. Moldes para fundição

Um dos métodos de dar forma aos metais consiste vazarmos o metal ou liga metálica fundida nos moldes feitos de mistura de areia e argila. Empregamos uma grande quantidade de certos tipos de argila com esta finalidade, a qual atua como material aglutinante dos grãos de areia. Para tal fim, empregamos argilas bentoníticas, cauliníticas e ilíticas.

F. Lama de perfuração dos Poços de Petróleo

Usamos certas argilas, em dispersão aquosa, para tal fim, necessitamos de argilas com determinadas propriedades específicas como: devem ser tixotrópicas (pastosas quando em repouso), ter viscosidade controlável, ser capazes de prover um revestimento impenetrável e relativamente delgado nas paredes do poço. Além dessas propriedades, devem: permitir pressão hidrostática suficiente para evitar escape violento de gases, água ou petróleo; lubrificar e resfriar a broca e carrear pedaços de rocha da perfuração.

As bentonitas que contêm montmorilonitas sódicas são as que melhor se prestam para tal aplicação. Usamos argilas como a atalpigita em locais onde encontramos água salina.

G. Argila na indústria da borracha

Empregamos grande quantidade de argilas na indústria da borracha e verificamos que só as argilas caulinitas dão excelentes resultados com relação a resistência a abrasão necessária a tais produtos.

H. Argila na Indústria do Papel

Empregamos a maior parte da produção mundial de caulinita refinada na indústria do papel, tanto para incorporá-lo

(como componente do corpo da folha do papel), como para seu revestimento superficial (como pigmento que, misturado com um adesivo, é espalhado como um filme ou camada lisa e macia na superfície da folha).

É muito importante, no segundo caso, o tamanho das partículas, a cor da argila e suas características reológicas.

Praticamente, toda argila para papel é um caulim puro e não deve conter montmorilonita.

9. Engenharia e Solos

Grande número dos problemas do engenheiro liga-se, de certo modo ao solo. O conhecimento dos argilo-minerais de um solo permite ao engenheiro não só melhorar a interpretação dos ensaios de laboratório (Mecânica dos Solos) como também estabelecer um critério para possíveis modificações ou controle das propriedades indesejáveis.

Um solo contendo teor elevado de montmorilonita, apresenta expansões e contrações elevadas com a variação do teor de água. De fato, é preciso saber porque um solo, sob ação de carga, age desta ou, daquela maneira quando sujeito a variação do nível do lençol d'água. Com relação às rochas do Grupo Tubarão que ocorre, por exemplo, em Campinas, Piracicaba e Itú, e às da Formação Bauru, devemos ter o cuidado na sua aplicação em aterros, barragens, etc., devido a presença de argila do grupo da montmorilonita.

Enquadramos, nesse grupo de solos, as bentonitas e as argilas e solos bentoníticos. Por outro lado, devemos estudar a presença de características estruturais que podem ser prejudiciais, através da estrutura e textura dos solos em corpos de prova indeformados.

Podemos aumentar a impermeabilidade de um solo, particularmente quando este contém montmorilonita, provocando a troca dos cátions presentes pelo Na⁺ inundando, por exemplo, a área considerada com água salgada. Inversamente, se desejamos aumentar a permeabilidade de um solo, isso conseguimos com a troca do sódio pelo cálcio, etc.

A composição argilo-mineral de um solo é de grande importância quando se trata da estabilização da capa de rolamento de uma estrada por meio de solo-cimento.

10. Orientação das Partículas nos Solos Argilosos

A orientação das partículas tem grande importância no comportamento dos solos argilosos. Algumas das diferenças de comportamento registradas em ensaios de cisalhamento, adensamento, inchamento, contração, permeabilidade, compactação, etc., podemos corretamente interpretar e explicar em função das diferenças estruturais.

De um modo geral, admitimos a existência de dois tipos fundamentais de orientação: floculada (contato de extremidade com face, Figura 39) e dispersa (contato de face com face, Figura 40).

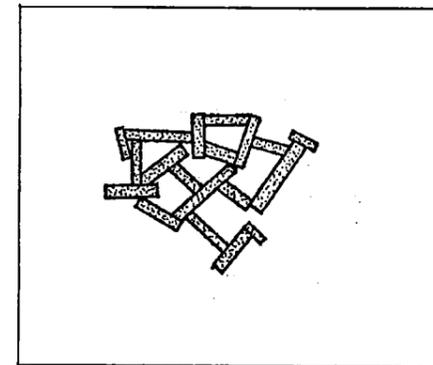


Figura 39
Partículas floculadas

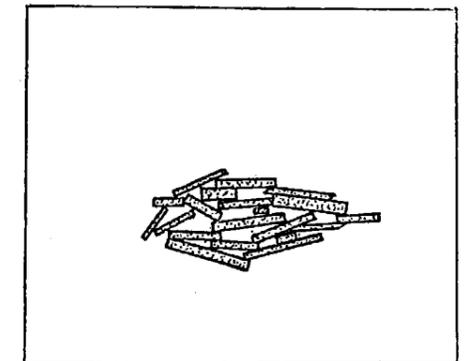


Figura 40
Partículas dispersas

Quando há predominância das forças atrativas, a estrutura é floclada e quando há predominância das forças repulsivas, a estrutura em geral é dispersa.

Vários fatores estão ligados a esta orientação das partículas, que é afetada por diversos fenômenos provenientes

tes dos esforços a que estão submetidos os materiais:

a) meio de deposição do solo: conforme o meio, as argilas sedimentares naturais apresentam diferentes tipos de orientação, por exemplo, em meio marinho de deposição, devido a maior concentração iônica da água do mar, as partículas não ficam sujeitas as forças repulsivas e podem se agregar sob a forma floculada. A deposição em água pura favorece a forma dispersa.

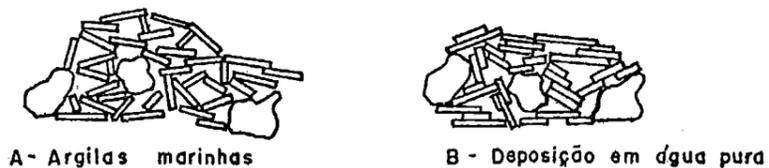


Figura 41

Estrutura das argilas sedimentares

b) adensamento: modifica a estrutura das argilas, orientando-as de forma a constituir uma estrutura dispersa.

Isto devemos ao fato de que as forças repulsivas terão de equilibrar as forças atrativas e as forças exteriores. Se houver um acréscimo nas forças exteriores, a distância média entre as partículas diminuirá de uma quantidade necessária para induzir um aumento das forças repulsivas suficiente para equilibrar o acréscimo das forças exteriores. Isto faz com que as partículas se tornem mais dispersas.

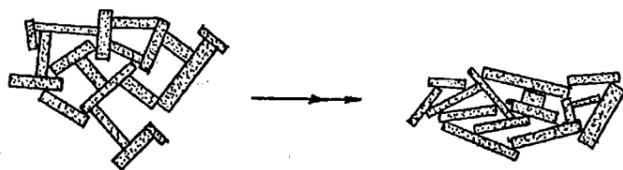


Figura 42

Influência do adensamento na orientação das partículas

c) cisalhamento: o cisalhamento altera a estrutura das argilas, na zona perturbada pelas deformações, dando-lhe orientação dispersa.

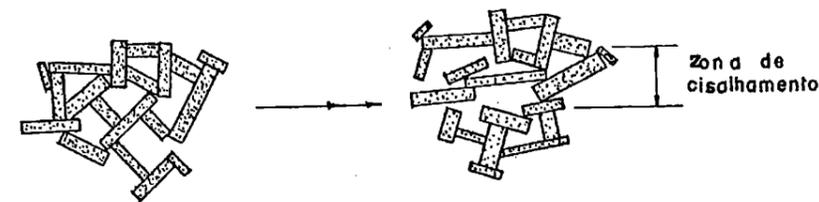


Figura 43

Influência do cisalhamento na orientação das partículas

d) amolgamento: o amolgamento, introduzindo deformações cisalhantes no material, modifica a sua estrutura, formando conjuntos de partículas orientadas mais ou menos paralelas, dispostas ao acaso. Essa é a causa provável da perda de resistência da argila, fenômeno conhecido por "sensibilidade" da argila.

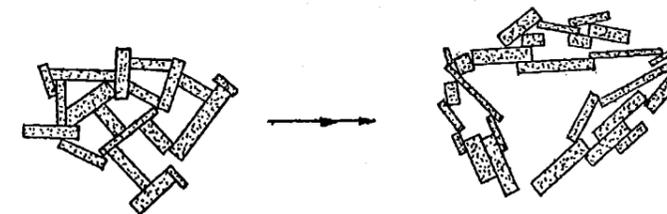


Figura 44

Influência do amolgamento na orientação das partículas

e) compactação: nos solos compactados, a energia e a umidade de compactação tem grande influência na orientação das partículas. Os solos compactados, com baixo teor de umidade, apresentam estrutura floculada. Com o aumento da umidade, as partículas adquirem orientação dispersa.

11. Métodos de Análise

A. Análise termo-diferencial

a. Introdução

O método da análise termo-diferencial tem sido

de grande utilidade porque registra, através de gráficos, a existência de processos endoenergéticos e exoenergéticos que ocorrem durante o aquecimento do material argiloso. Esses registros, por exemplo, revelam a saída da água de constituição mineral (água-hidroxila) formando novos arranjos atômicos (iônicos), o que equivale a dizer: a formação de novas fases e mudanças destas em outras.

Nos gráficos obtidos através do aparelho de análise termo-diferencial, registramos:

- a temperatura em que processamos as reações ou transformações térmicas, quando aquecemos o material com certa velocidade constante;
- a intensidade dessas reações.

Apresentamos essas transformações ou mudanças de duas maneiras:

- reações endotérmicas características, devidas à desidratação e à perda parcial da estrutura cristalina;
- reações exotérmicas, devidas à formação de novas fases em temperaturas elevadas.

O método é aplicável a qualquer material que sofra modificações físico-químicas (reações térmicas) durante o aumento de temperatura. Essas mudanças geralmente começam abruptamente e se completam num intervalo de temperatura relativamente curto. Daí, como resultado, obtemos os "picos", assim denominados nos gráficos das análises termo-diferenciais.

b. Descrição sumária dos princípios de funcionamento do aparelho

Colocamos uma amostra a ser estudada (~ 0,5g) num pequeno orifício de um bloco de níquel, platina ou cerâmica. Em outro orifício contíguo, colocamos uma amostra de material inerte, isto é, de material que não sofre reações térmicas no intervalo da ascensão da temperatura durante a análise. Um material inerte que usamos para essa finalidade é o α - Al_2O_3 (óxido de alumínio calcinado). Apresentamos o circuito esquemático dos dois pares termoelétricos, na Figura 45.

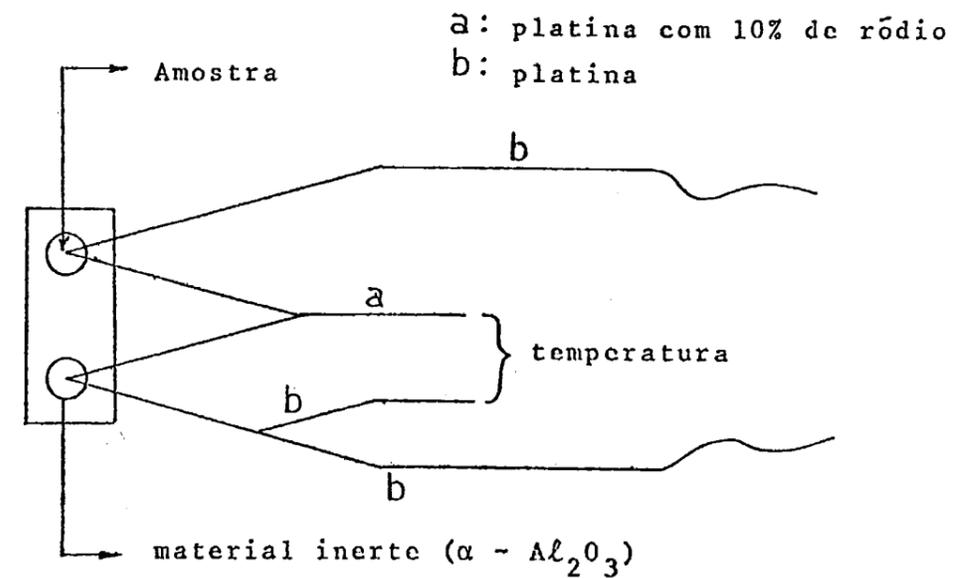


Figura 45

Circuito esquemático dos pares termoelétricos do Aparelho de ADT

Colocamos a junta de um dos pares dentro da amostra, no seu centro, e a outra ponta no centro do material inerte. Colocamos o pequeno bloco suporte contendo a amostra a ser analisada, o material inerte e os pares termoelétricos dentro de um forno, cujo aquecimento regulamos de modo a aumentar sua temperatura com velocidade uniforme, dentro de uma escala de 10 a 15° por minuto. A temperatura desse material inerte cresce regularmente à medida que a temperatura do forno aumenta. Quando na amostra ocorrer um processo físico-químico endotérmico, a sua temperatura será menor que a do material inerte, resultando no circuito termoelétrico (denominado diferencial) uma diferença de forças-eletromotrizes que corresponde àquela diferença de temperatura. Isto persiste durante o intervalo de tempo em que ocorre o fenômeno endotérmico, até que termine a reação. Quando não houver reação alguma na amostra, a temperatura em ambas as juntas será sempre a mesma, isto é, existe um equilíbrio de temperatura entre a amostra e o material inerte, não ocorrendo portanto, forças eletro-motrizes.

Registramos a diferença de temperatura geralmente em função da temperatura do forno; esta por sua vez, corresponde à determinada para o material inerte. O registro dessas diferenças fazemos manualmente, com auxílio de um galvanômetro

ou, automaticamente, com auxílio de registrador eletrônico.

A direção da força eletro-motriz no circuito depende da temperatura da amostra ser mais alta ou mais baixa - que a do material inerte. Consequentemente, o mecanismo de registro mover-se-á em direções opostas, conforme os processos - físico-químicos sejam endotérmicos ou exotérmicos.

Na construção de curvas, por convenção, colocamos as deflexões devidas aos picos endotérmicos abaixo da linha base e as devidas aos picos exotérmicos, acima.

As Figuras 46 e 47 mostram como exemplo, um termograma modelo, com algumas curvas características do material, relacionando o efeito de algumas variáveis que influem na análise, tais como: tamanho do pico e temperatura de reação com o tamanho das partículas da amostra.

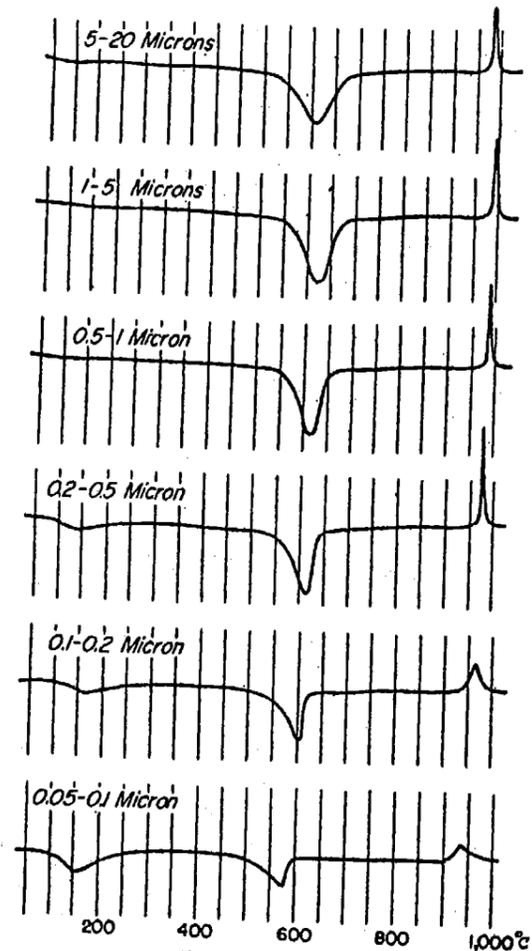


Figura 46

Variação nos picos das análises térmicas devido à influência do tamanho das partículas.

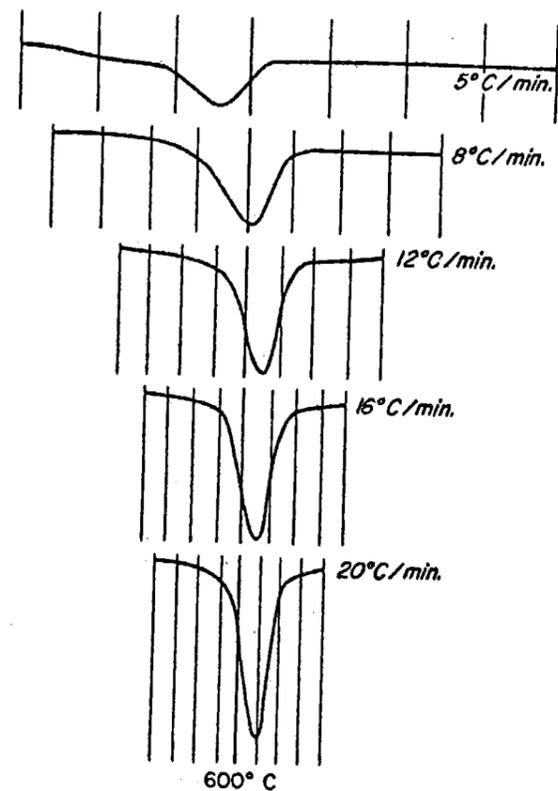


Figura 47

Variação nos picos da análise devido à variação de aquecimento.

Na Figura 48, mostramos alguns termogramas característicos de algumas argilas. As curvas A e B são de caulinita e quando comparadas entre si apresentam um pequeno deslocamento do pico em torno de 600°C devido ao grau de cristalização.

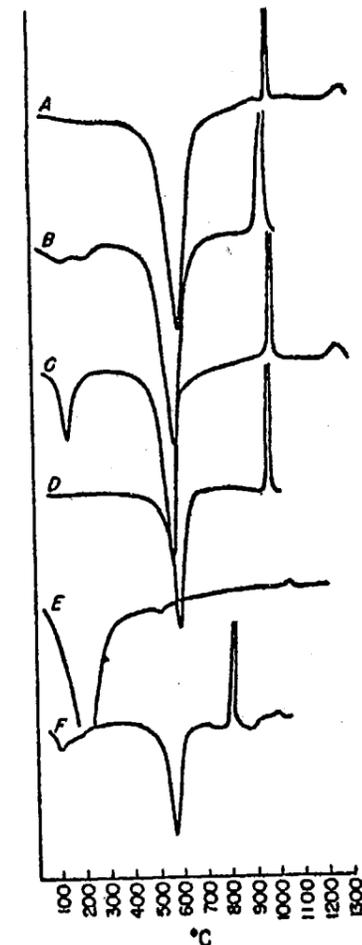


Figura 48

Curvas termo diferenciais: (A) caulinita, Geórgia, bem cristalizadas; (B) caulinita, Illinois, pobremente cristalizada; (C) haloisita, Indiana, (D) anauxita, Ione, California; (E) alofana, Bedford, Indiana, (F) alofana, Iyo, Japão.

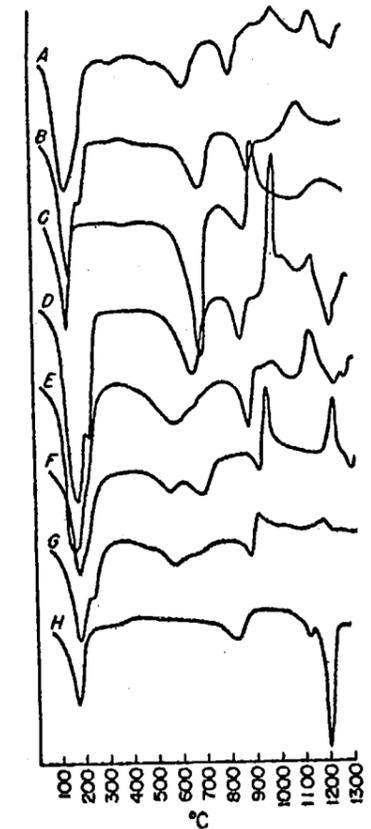


Figura 49

Curvas termo diferenciais: (A) montmorilonita, Otay, California, (B) montmorilonita, Tatatilla, México, (C) montmorilonita, Upton, Wyoming, (D) montmorilonita, Cheto, Arizona, (E) montmorilonita, Pontotoc, Mississippi, (F) montmorilonita, Palmer, Arkansas, (G) nontronita, Howard County, Arkansas, (H) hectorita, Hector, California.

A Figura 49, apresenta os termogramas de montmorilonitas de diversas procedências, nontronita e hectorita.

A Figura 50, apresenta os termogramas de algumas micas, ilita e glauconita.

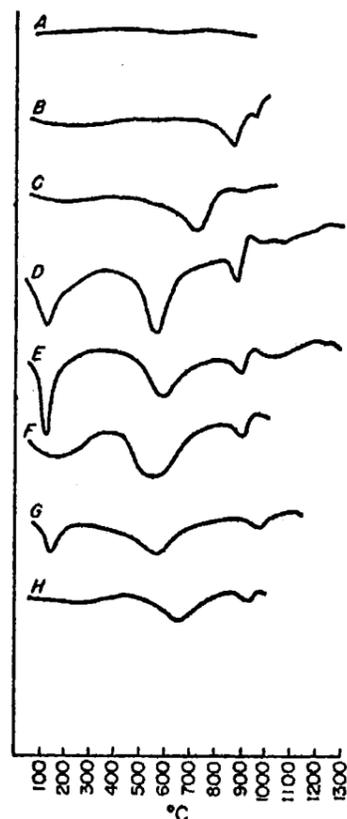


Figura 50

Curvas termo diferenciais: (A) biotita, Universidade de Illinois, (B) muscovita, Universidade de Illinois, (C) muscovita, Bryman, California (fração <math><1\mu</math>), (D) ilita, Fithian, Illinois, (E) ilita, Grundy County, Illinois, (F) ilita, Thebes, Illinois, (G) glauconita, New Jersey, (H) glauconita, Washington.

B. Método da fotografia do pó na difração de raio-X, usando a câmara de Debye-Scherrer.

a. Introdução

Nesse método usamos feixe de raio-X monocromático, usualmente a radiação K-alfa, incidente num material policristalino, na forma de pó. De todos os métodos de difração -

de raio-X, é o mais usado, devido as seguintes características: necessita de pequena quantidade de material pulverizado; grava os feixes difratados sobre praticamente toda faixa possível de ângulos de difração e emprega equipamento e método simples.

Quando detetamos o feixe difratado por filme fotográfico, integramos as intensidades de todos os feixes difratados durante todo o tempo da exposição permitindo até a detecção das intensidades mais fracas.

Uma câmara de Debye-Scherrer típica consiste de um dispositivo cilíndrico para um filme, que é mantido, através de meios apropriados, em contato com a superfície interna da câmara.

Um feixe estreito de raio-X entra na câmara através de um colimador e irradia a amostra, que está localizada no centro da câmara e em geral gira continuamente. Tal rotação permite que um número maior de partículas contribua para a difração. Ilustramos a geometria do dispositivo de Debye-Scherrer na Figura 48.

Nesse arranjo, temos:

$$\frac{2\theta}{\pi} = \frac{S/2}{\omega}$$

Quando colocamos uma amostra pulverizada no caminho de um feixe de raio-X, alguns dos grãos estarão orientados para satisfazer a lei de Bragg.

$$n \lambda = 2d \sin \theta$$

onde:

- n - ordem de reflexão
- λ - comprimento de onda dos raios-X monocromáticos
- d - espaçamento interplanar do cristal
- θ - ângulo de difração de Bragg

Para cada grupo de planos de distância interplanar d ocorre difração na direção que faz ângulo de 2θ como o feixe transmitido. Essas difrações formam um cone com ângulo de abertura 4θ . Quando arranjamos uma faixa estreita de filme ci

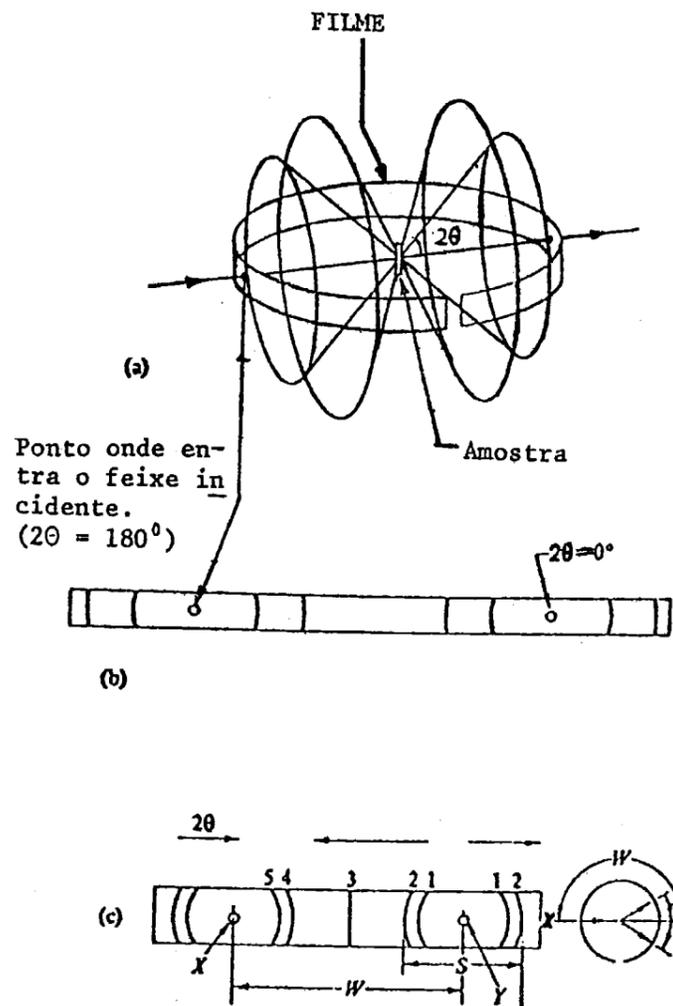


Figura 51

Método do pó de Debye-Scherrer, (a) posição relativa do filme para a amostra e feixe incidente, (b) aparência do filme quando estendido, e (c) modo de carregar o filme na câmara.

lindricamente em torno da amostra, interceptamos os cones pelo filme e eles aparecem como arcos. Então, a distância entre arcos correspondentes (S), é dada por: $S = (R) (4\theta)$, onde R é o raio da câmara, expresso na mesma unidade de S e θ expresso em radianos.

Portanto:
$$\theta = \frac{S}{4R}$$

ou ainda:
$$\Delta S = (R) (\Delta 4\theta)$$

Isto significa que, para um dado $\Delta 4\theta$, a separação das linhas no filme (ΔS), aumenta com o raio R da câmara.

Então, usamos convencionalmente um diâmetro de câmara de 5,73cm para trabalhos de rotina e de 11,46 cm para estudos mais precisos. Esses diâmetros são convenientes desde que desprezamos o encolhimento do filme; a medida do filme, com uma escala milimétrica, fornece diretamente os valores de θ em graus.

Na escolha da radiação, devemos lembrar que os raios-X de menores comprimentos de onda são mais energéticos - que os de maior comprimento e assim terão maior poder de penetração. De acordo com a lei de Bragg, quanto menor o comprimento de onda, menor é o ângulo de Bragg de uma dada reflexão. Desta maneira, diminuindo o comprimento de onda da radiação, - transferimos todas as reflexões para ângulos de Bragg menores, aumentando o número de linhas gravadas.

b. Procedimento experimental

b₁ - Preparação da amostra

As amostras de material policristalino devem ter tamanho da malha 325 ou 44 micra. Considerando que as argilas possuem tamanho de partículas menores, devemos apenas desagregar as amostras.

As linhas de difração serão mais largas se o tamanho das partículas for muito pequeno (<1000Å).

Misturamos alguns miligramas do pó com colódio e rolamos o material de maneira a constituir um palito de aproximadamente 1/2mm de diâmetro e 10mm de comprimento. Às vezes colocamos a amostra dentro de um tubo capilar especialmente - construído para este fim.

b₂ - Processamento do filme

Após um tempo de exposição adequado (1-10h), abrimos a câmara em uma sala escura e retiramos o filme e o revelamos. Nele executamos as medidas necessárias e fazemos a identificação por método comparativo com franjas padrões dos diversos argilo-minerais.

C. Método do difratograma por raio-X

O registro das linhas de interferência de difração por este método é obtido por uma fotomultiplicadora acoplada a um registrador gráfico. O esquema da Figura 52 mostra - simplificadamente o princípio do equipamento utilizado.

A radiação K - alfa é gerada no tubo (A) colimada por uma fenda (B), geralmente 1° , que incide na amostra (C) onde sofre as difrações, sendo as mesmas novamente colimadas - para incidir na fotomultiplicadora (D). Esta unidade, através de um dispositivo adequado, percorre um semi-círculo em torno da amostra (C) a uma velocidade de 1° por minuto, conforme mostra a Figura 52. O sinal gerado na fotomultiplicadora, é amplificado por um conjunto eletrônico (E) que por sua vez envia-os a um registrador (F), cuja velocidade de corrida do papel é de 30 polegadas por hora. Na folha de registro faz-se - constar também o registro em graus da posição da fotomultiplicadora. Desta maneira podem ser associados os picos aos respectivos ângulos de difração.

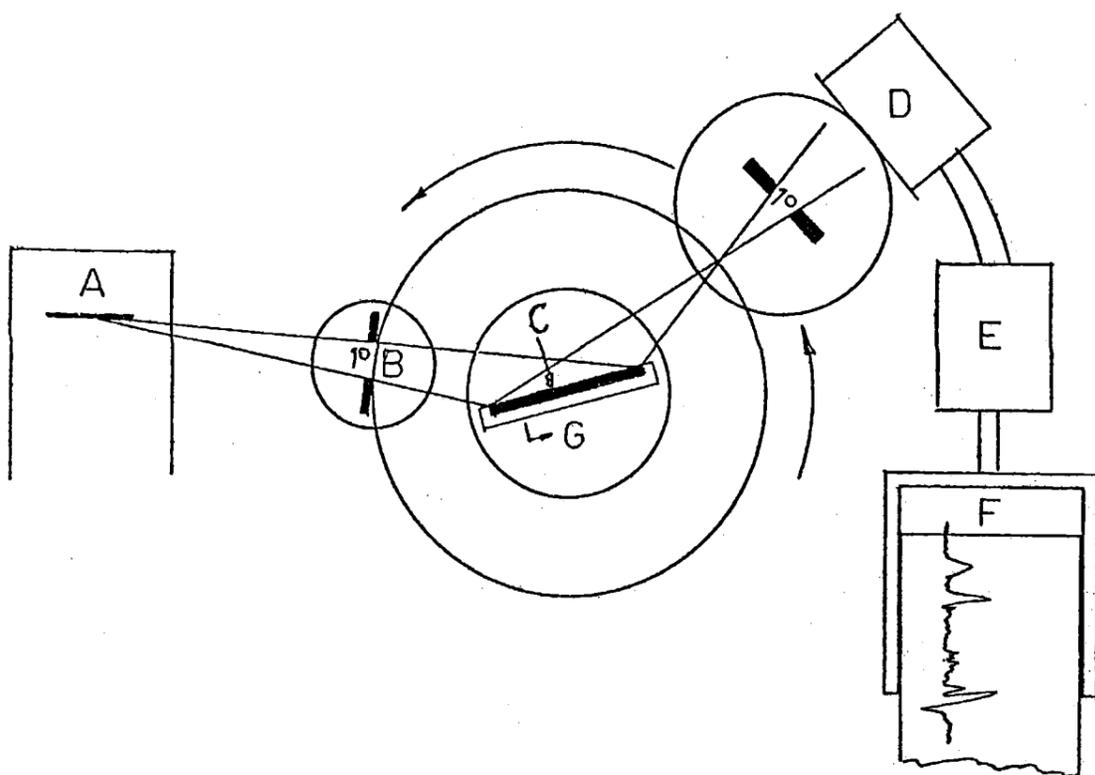


Figura 52

Esquema de um difratômetro de raio-X

A Figura 53, mostra como exemplo, um difratograma com picos de montmorilonita, em torno de 6° , sendo os mais

característicos deste grupo, os que estão em torno de 20° . A altura de 26° nota-se um pico que representa o quartzo.

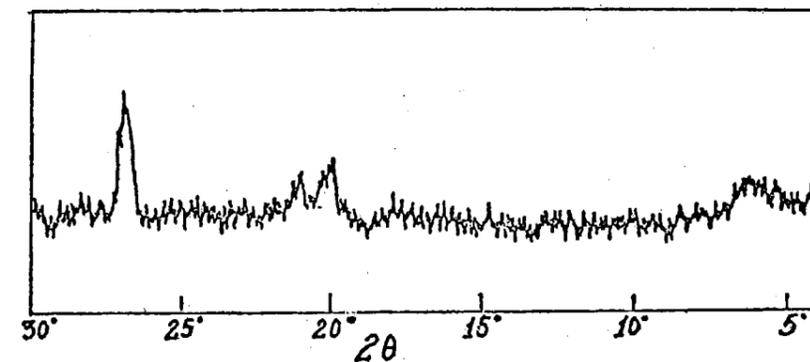


Figura 53

Exemplo de um difratograma

As amostras policristalinas a serem analisadas - por este método, devem ter tamanho de grãos menores ou iguais a $0,147\text{mm}$, correspondentes à malha da peneira de 100 meshes.

Considerando que as argilas possuem tamanho de - partículas menores que a medida acima citada, as amostras poderão ser somente desagregadas. O material pulverizado é colocado no suporte de alumínio (G), aplainadas e compactadas a fim de se obter orientação preferencial e conseqüentemente maior intensidade nos picos. O suporte (G) contendo a amostra, é fixada na base do difratômetro sendo esta submetida à radiação.

D. Microscopia eletrônica

a. Introdução

O tamanho das partículas argilosas não permite - seu estudo através do melhor microscópio polarizante. Os microscópios eletrônicos comuns desenvolvem aumento em torno de 20.000 vezes e possibilitam tal estudo; considerando as ampliações fotográficas, conseguimos ainda triplicar o aumento do microscópio. Assim, um micron ($0,000\ 001\text{m}$) passa a ser representado no papel, por um a três centímetros, segundo o grau de ampliação utilizado.

Para as argilas, os dois meios mais modernos de

estudo, os raios-X e o microscópio eletrônico se completam, pois, o primeiro fornece o arranjo dos átomos no cristal enquanto que o microscópio eletrônico fornece a forma ou contorno das partículas.

A observação da imagem no microscópio eletrônico é indireta, pois, o olho humano só é sensível a luz. Entretanto, há outras formas de energia, com determinadas características, que são capazes de formar uma imagem e impressionar uma chapa fotográfica, como por exemplo, os eletrons.

Os eletrons são emitidos quando uma descarga elétrica atravessa um gás a baixa pressão. Os raios que saem do polo negativo ou catodo, são constituídos por eletrons e podem iluminar uma placa fluorescente ou impressionar uma chapa fotográfica.

Desde que campos magnéticos desviam os eletrons, utilizamos bobinas magnéticas como lentes para dirigir os feixes eletrônicos.

Dirigimos o feixe eletrônico para o objeto, que deve ser muito delgado porque os eletrons precisam atravessá-lo sem perder velocidade, a fim de obtermos uma imagem nítida.

b. Preparação da amostra

A fim de obtermos uma amostra adequada para observação ao microscópio eletrônico, depositamos a argila em camada fina sobre colódio ou outro material semelhante. Uma grade metálica (aço ou cobre eletrolítico) deve servir de suporte.

No caso das argilas, de partículas excessivamente finas, principalmente do grupo das montmorilonitas, primeiro devemos dispersar cuidadosamente a amostra, a fim de evitar a formação de agregados compactos de argila. Fazemos a dispersão na água com auxílio de um eletrólito, como o hidróxido de amonio, por exemplo, após o que se pipeta um pouco da suspensão para a preparação da lâmina. Alguns autores, preferem examinar frações segundo determinados tamanhos. Existem técnicas especiais para a montagem como por exemplo: deposição simples, por envolvimento e outras técnicas mais recentes.

c. Algumas características das argilas ao microscópio eletrônico

O microscópio eletrônico revela a forma das partículas argilosas. As formas que observamos são: lâminas ou placas de contornos muito regulares, regulares e irregulares; bastonetes ou fitas não muito finas; bastonetes de pontas irregulares, estriadas no comprimento e terminações elípticas; fibras mais ou menos alongadas, etc.

c₁. Grupo da caulinita

Caulinita: apresenta formas de placas hexagonais ou pseudo-hexagonais, mas mesmo estas últimas são superiores - em forma às placas de montmorilonitas; outros estudos mostraram que além da forma hexagonal, há possibilidade de outras modificações, como por exemplo cristais bem formados com alongação marcada numa direção e placas mal cristalizadas; outras vezes apresentam crescimento vermicular.

Anauxita: parece consistir de uma caulinita com camadas extras de sílica e mostra ao microscópio eletrônico - placas anedrais com alguma semelhança às de caulinita.

Diquita: cristais hexagonais excepcionalmente - grandes e bem cristalizados, muitas vezes alongados.

Nacrita: formas de placas irregulares e bastante arredondadas.

Alofana: mostra a forma típica das partículas coloidais (amorfa); particular nodosas e arredondadas, características de um colóide ao secar.

Haloisita: constitui tubos ôcos e o fato de serem ôcos, devemos a estriação longitudinal frequente e sobretudo pelas secções redondas das extremidades dos tubos.

c₂. Grupo da montmorilonita

Montmorilonita: fornece eletrografia apresentando placas irregulares de contornos indecisos (característica atribuída às propriedades ativas de sua superfície).

Nontronita: formas bastante curtas e achatadas.

Saponita: mostra eletrografia semelhante à da montmorilonita.

c₃. Grupo da *ilita*

As *ilitas*, devido a sua composição variável, não apresentam linhas características do seu grupo ao microscópio eletrônico.

c₄. Grupo das argilas fibrosas

Atapulgita: fibras isoladas ou agrupadas, às vezes as partículas são maiores, semelhantes a bastonetes bastante alongados embora mais estreitos e compridos do que os de *haloisita* e não parecem ser ôcos como nesta última.

Sepiolita: estrutura fibrosa ou lamelar de acordo com as duas ocorrências de *sepiolita*, fibrosa ou maciça; a forma fibrosa mostra tubos alongados estriados, que são supostamente ôcos analogamente aos da *haloisita*.

d. Resumo das formas das partículas argilosas ao microscópio eletrônico

Caulinita - placas hexagonais; *nacríta* - placas arredondadas; *diquita* - placas muito irregulares; *haloisita* - tubos ôcos; *alofana* - nódulos arredondados; *montmorilonita* - fitas curtas e largas; *saponita* - placas irregulares; *hectorita* - fitas curtas e estreitas; *ilita* - placas irregulares; *atapulgita* - fibras ou bastonetes alongados; *sepiolita* - fibras ou placas.

E. Identificação com corantes orgânicos

a. Preliminares

O teste basicamente consiste na mudança de coloração de reagentes orgânicos (corantes) quando em contato com a argila. Os mais comuns desses reagentes são: benzidina, safranina Y e verde malaquita.

Existem três mecanismos prováveis que podem gerar a mudança de coloração dos reagentes:

- a₁. Mudança das características estruturais dos reagentes devida a condição do meio onde se encontram;
- a₂. Permuta de íons ou radicais entre os reagentes e o material a ser identificado;
- a₃. Reações de oxidação e de redução.

Devido às características dos mecanismos citados, impurezas comumente encontradas em argilas podem provocar a ocorrência de qualquer um desses fenômenos. A presença de FeO, Fe₂O₃ e TiO₂, altera completamente os resultados do teste. Para evitarmos essa interferência, devemos tratar previamente a amostra com ácido clorídrico à quente, provocando a solubilização e consequente eliminação dos óxidos metálicos além do que destruímos todos os radicais de caráter básico possivelmente existentes nas amostras.

Após esse tratamento a amostra estará num meio de caráter extremamente ácido; se essa condição não for completamente eliminada, poderá ocorrer o mecanismo indicado em a₁. Assim, necessitamos submeter a amostra a intensa lavagem até a completa eliminação do ácido.

b. Testes

b₁. Reagentes

Solução aquosa saturada de benzidina; solução saturada de safranina Y em nitrobenzeno; solução saturada de verde malaquita em nitrobenzeno e ácido clorídrico concentrado.

b₂. Procedimento

Tratamento prévio das amostras com HCl

Tomamos uma pequena quantidade da amostra pulverizada e colocamos num bequer, adicionamos ácido clorídrico concentrado e aquecemos até 50°C. Após duas horas de ataque, retiramos do aquecimento, adicionamos água destilada quente e filtramos. Lavamos o resíduo com água destilada por tantas vezes quantas forem necessárias para que o filtrado dê reação negativa de cloretos. Para isso usamos como reagente, o nitrato de prata que através da reação $AgNO_3 + HCl \rightarrow AgCl + NaNO_3$, indicará

a presença do HCl pela formação de um precipitado de coloração branca (AgCl), facilmente observável na solução. Após a constatação da ausência do HCl no filtrado, retiramos o papel de filtro com o resíduo do funil, colocamos num bequer e secamos em estufa (100°C) por aproximadamente 6 horas. Assim, a amostra estará pronta para observarmos a reação com os corantes orgânicos especificados.

Teste com benzidina

Tomamos uma pequena quantidade do material a ser analisado com a ponta de uma espátula e colocamos sobre uma lâmina de vidro. Deixamos cair sobre a amostra algumas gotas de benzidina e com o auxílio da ponta da espátula ou de uma baqueta de vidro, homogeneizamos a mistura (evitar excesso da solução de benzidina). Deixamos em repouso por 6 minutos e observamos a coloração desenvolvida (a olho nú). Examinamos ao microscópio, colocando uma lamínula sobre o material. Caso não tenha ocorrido reação, esperamos mais duas horas e observamos novamente.

Teste com safranina e verde malaquita

Tomamos duas pequenas porções da amostra e colocamos sobre duas lâminas de vidro e tratamos com safranina Y e malaquita. Esperamos por dois minutos e observamos as colorações. Colocamos uma lamínula sobre cada material e examinamos com auxílio do microscópio. Convém lembrar que o tempo decorrido entre a adição dos reagentes e a observação ao microscópio não ultrapasse 15 ou 20 minutos.

c. Resultados do teste

Reagente	Argilas	Observação a olho nú	
		olho nu	microscópio
Benzidina	Caulinita	não reage	não reage
	Bentonita (montmorilonita)	azul claro	azul claro+partículas do corante
Safranina Y	Caulinita	vermelho	vermelho (pleocroísmo)
	Bentonita (montmorilonita)	vermelho-púrpura violeta	vermelho-púrpura (pleocroísmo)
Verde malaquita	Caulinita	verde claro	verde
	Bentonita (montmorilonita)	verde	vermelho - verde púrpura - verde (pleocroísmo)

XII. BIBLIOGRAFIA

- AIRES, L. Barros - Alteração e Alterabilidade de Rochas Ígneas. Lisboa, LNEC, 1971
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. 1972, Part 10
- BIENIAWSKI, Z.T. & FRANKLIN, J.A. - Suggested Methods for Determining the Uniaxial, Compressive Strength of Rock Materials and the Point Load Strength Index. Lisboa, LNEC, 1972
- BROSCH, Carlos Dias - Areias de Fundição. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1952. Bol. 44
- DANA-HURLBUT - Manual de Mineralogia. 2ª edição, Barcelona, Editorial Reverté, 1960
- DUNCAN, N. - Engineering Geology and Mechanics. London, Leonard Hill, 1969, v. 1 e 2
- ERNST, W.G. - Minerais e Rochas. São Paulo, Edgard Blücher - Ltda., 1971
- GRIM, R.E. - Clay Mineralogy. New York, McGraw-Hill, 1953

- JAEGER, C. - Rock Mechanics and Engineering. Cambridge, University Press, 1972
- KLOCKMANN, F. & RAMDOHR, P. - Tratado de Mineralogia. 12.^a ed. Barcelona, Editorial Gustavo Gilli, 1947
- KRUMBEIN, W.C. & SLOSS, L.L. - Stratigraphy and Sedimentation. San Francisco, W.H. Freeman, 1951
- MATERIAIS de Construção Civil. Departamento de Arquitetura e Planejamento-EESC-USP, 1973, 1.^a parte
- MELLO, Victor F.B. de & SILVEIRA, Evelyn B.S. - Estrutura das Argilas. São Carlos, EESC-USP, 1965
- NASCIMENTO, Ulpio - O Problema da Alterabilidade das Rochas em Engenharia Civil. Lisboa, LNEC, 1970
- NOGUEIRA, J.B. - Mecânica dos Solos. São Carlos, EESC-USP, 1973
- PARAGUASSU, A.B.; GANDOLFI, N.; LANDIM, P.M.B. - Curso Prático de Geologia Geral. São Carlos, EESC-USP, 1973
- PIZZARO, R.A. - Materiais de Construção. Rio de Janeiro, UFRJ.
- ROCHA, Francisco Xavier Pires da - Geologia Aplicada. Porto Alegre, Escola de Geologia da Universidade do Rio Grande do Sul, 1963, v. 2
- ROGERS, Austin F. & KERR, Paul F. - Optical Mineralogy. 2.^a ed. New York and London, McGraw-Hill, 1942
- SKINNER, Brian J. - Recursos Minerais da Terra. São Paulo, - Edgard Blücher Ltda., 1970
- SUGUIO, Kenitiro - Introdução à Sedimentologia. São Paulo, Edgard Blücher Ltda., 1973
- TSUCHIYAMA, Getulio K. - Areia. São Paulo, Escola Politécnica-USP, 1973
- VISCONTI, Yvone Stourdzé - Argilas e Minerais Afins. Rio de Janeiro, Instituto Nacional de Tecnologia, 1951
- WAHLSTRON, Ernest E. - Optical Crystallography. 2.^a ed., New York, John Wiley & Sons, 1954
- YOSHIDA, Riuti - Contribuição ao Conhecimento de Características Tecnológicas de Materiais Rochosos. São Paulo, Instituto de Geociências-USP, 1972

APOSTILA
G187e
e.1

Gandolfi, Nilson
Ensaio de Laboratório em
Geologia

Data Retirada	Assinatura	Data Devolução

APOSTILA
G187e
e.1

Universidade de São Paulo
CAMPUS DE SÃO CARLOS
Escola de Engenharia de São Carlos

Biblioteca Central