

CAPÍTULO 16

Agregados para a Construção Civil

Márcio Muniz de Farias, PhD

Ennio Marques Palmeira, PhD
Universidade de Brasília-UnB
e-mail: muniz@unb.br; palmeira@unb.br

1 Introdução

Agregados são fragmentos de rochas, popularmente denominados como “pedras” e “areias”. Fragmentos de rochas com tamanho e propriedades adequadas são utilizados em quase todas as obras de infra-estrutura civil, como em edificações, pavimentação, barragens e saneamento. Estes materiais incluem, por exemplo, blocos, pedras, pedregulhos, cascalhos, seixos, britas, pedriscos, areias etc. A faixa de tamanho destes fragmentos é bastante ampla, desde blocos com dezenas de centímetros, como os “enrocamentos” usados em barragens, até partículas milimétricas, como os “agregados” usados na confecção de concreto para a maioria das edificações.

Fragmentos de tamanhos relativamente uniformes podem ser utilizados para construção de muros e estruturas de contenção, por exemplo. Em outras aplicações, como em bases rodoviárias, é necessário utilizar uma mistura de fragmentos de diversos tamanhos, de modo a ganhar mais estabilidade ou resistência, o que se denomina estabilização granulométrica. Maior estabilidade também pode ser alcançada adicionando-se algum tipo de material aglomerante à mistura de agregados, como o cimento usado na fabricação de “concreto de cimento Portland”, ou o cimento asfáltico usado na produção de “concreto betuminoso”.

Materiais pétreos, isolados ou estabilizados, são o material de construção mais empregado na engenharia civil. Portanto, é necessário classificar estes materiais e determinar suas principais propriedades de engenharia, bem como especificar limites de aceitabilidade para o bom desempenho de uma obra. Entretanto, esta não é uma tarefa muito simples uma vez que há muitas classificações, dependendo da aplicação específica. Da mesma forma, uma dada propriedade que seja relevante para utilização de um agregado como componente de um concreto de cimento Portland, pode não ser relevante para aplicação como base rodoviária. Ainda que uma mesma propriedade (resistência, por exemplo) seja importante para duas aplicações diferentes é de se esperar que valores limite de aceitabilidade sejam diferentes em cada caso.

De todos os modos, este capítulo apresenta uma classificação genérica e define as principais propriedades dos agregados. Para tanto, resolveu-se citar inicialmente as propriedades das rochas de origem, para depois analisar os fragmentos isolados e a depois uma mistura de partículas. A seguir, os limites e particularidades para utilização de agregados em grandes obras de infra-estrutura, tais como pavimentação e estruturas de contenção, serão explorados em itens separados. Aplicações em edificações, tais como pedras de revestimento, argamassas e concreto de cimento Portland, serão tratadas por outros autores em capítulos específicos deste livro¹.

¹ Ver capítulos 11 e 15.

2 Rochas

Embora este capítulo trate mais especificamente de agregados ou fragmentos de rocha, estes herdarão a mineralogia e muitas das propriedades físicas e mecânicas da rocha mãe, a partir da qual foram obtidos. Estas propriedades são influenciadas desde a formação da rocha e alteradas pelos processos de intemperismo aos quais estas são submetidas. Quanto à gênese, as rochas podem ser classificadas em três grandes grupos: ígneas (ou magmáticas), sedimentares e metamórficas.

As rochas ígneas ou magmáticas são formadas pela consolidação do magma por resfriamento. Quando este resfriamento se dá na superfície da crosta terrestre, estas rochas são ditas extrusivas, a exemplo do que ocorre com o basalto. Caso o resfriamento ocorra a grandes profundidades têm-se as rochas intrusivas, a exemplo do granito. Há ainda o caso de rochas que se resfriam em profundidades intermediárias, as rochas subvulcânicas ou hipoabissais, a exemplo do diabásio. Quanto maior a profundidade, mais lento o resfriamento, o que permite maior cristalização dos minerais, resultando geralmente em rochas mais resistentes e melhores agregados.

As rochas sedimentares formam-se por três processos principais: (a) pela deposição (sedimentação) das partículas originadas pela erosão de outras rochas e neste caso são conhecidas como rochas sedimentares clásticas ou detríticas; (b) pela precipitação de substâncias em solução e, neste caso, são ditas rochas sedimentares químicas; ou (c) pela deposição dos materiais de origem orgânica, as quais em geral não são de interesse na construção civil. As rochas sedimentares detríticas são menos resistentes que as rochas ígneas. Sua coesão depende do tipo de agente cimentante, que pode ser óxido de ferro, carbonato ou sílica cristalina, aumentando a coesão nesta ordem. Estas rochas são altamente anisotrópicas, isto é, suas propriedades físicas e mecânicas dependem da direção em que são medidas em relação ao plano de sedimentação. São exemplos clássicos de rochas sedimentares detríticas o arenito, o siltito e o argilito. Rochas sedimentares químicas são formadas pela precipitação de sais a partir de soluções aquosas saturadas (p.ex. evaporito) ou pela atividade de organismos em ambientes marinhos (p.ex. calcário). O calcário é a rocha sedimentar química mais comum no Brasil. Os calcários contêm minerais em quantidades acima de 30% de carbonato de cálcio (calcita, CaCO_3). Quando o mineral predominante é a dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ou $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) a rocha calcária é denominada calcário dolomítico.

Rochas metamórficas são formadas a partir de outros tipos de rochas (ígneas, sedimentares, ou mesmo outras rochas metamórficas), quando submetidas a elevadas temperaturas e pressões no interior da terra, num processo denominado metamorfismo. As características finais da rocha metamórfica dependem da rocha original e do grau de intemperismo (alto, médio ou baixo). Como exemplos de rochas metamórficas de baixo grau de intemperismo têm-se o filito e a ardósia, resultantes da transformação de siltitos e argilitos, respectivamente. Os xistos são rochas oriundas da metamorfização de médio grau de argilitos. O mármore, o quartzito e o gnaisse são exemplos de rochas metamórficas que podem resultar de intemperismo de baixo ou alto grau, gerando rochas com propriedades muito variáveis. O mármore é proveniente da transformação de calcários e dolomitos; o quartzito é formado a partir de arenitos ou veios de quartzo; já o gnaisse pode ser formado a partir de vários tipos de rochas ígneas ou sedimentares.

3 Fragmentos de Rochas e Frações Granulométricas

Fragmentos de rochas são pedaços da rocha intacta, provenientes de desagregação natural devido aos agentes de intemperismo, ou da desagregação artificial por um processo mecânico qualquer. Estes fragmentos são popularmente conhecidos como “pedra”. Entretanto recebem denominações específicas de acordo com suas dimensões

representativas, enquadradas em determinadas “classes texturais” ou “frações granulométricas”. O termo textura refere-se ao tamanho dos grãos, no caso de fragmentos, e também ao tamanho dos minerais no caso de rochas intactas (neste caso também se usa o termo granulação).

As denominações granulométricas variam bastante entre leigos, geólogos e engenheiros. Mesmo entre os engenheiros há diferentes denominações dependendo do tipo de aplicação específica (edificações, pavimentação etc).

3.1 Frações Granulométricas

Para fins de terminologia é comum dividir os materiais granulares, do ponto de vista exclusivamente textural, em diversas frações. Entretanto, os limites superiores e inferiores de cada classe são arbitrários e variam conforme a origem do agregado (natural ou artificial) e de acordo com os critérios e necessidades das organizações tecnológicas e normativas de cada país.

No Brasil, os profissionais mais ligados à construção civil tendem a seguir terminologia da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), enquanto que no meio rodoviário tende-se a adotar a terminologia do DNIT, ex-DNER (Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes). Os geotécnicos, em geral, tendem a usar a nomenclatura do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) da ASTM (American Society for Testing and Materials).

3.1.1 Classes texturais para materiais naturais

As principais classes texturais para solos e materiais naturais em geral, de acordo com a terminologia das normas NBR 7225 e NBR 6502 (ABNT 1993, 1995), do Manual de Pavimentação (DNIT, 2006a) e da norma ASTM D 2487 (ASTM 2006), são mostradas no Quadro 1.

Quadro 1. Classes texturais para materiais naturais segundo várias normas (dimensões em mm).

Classe textural	NBR 7225	NBR 6502	DNIT (2006a)	ASTM D 2487
Matação	> 100	> 200	250 – 1000	
Pedra de mão	–	60 – 200	75 – 250	
Pedregulho	2 – 100	2 – 60	2 – 75	4,8 – 75
Areia	0,075 – 2	0,060 – 2	0,075 – 2	0,075 – 4,8
Silte		0,002 – 0,060	0,005 – 0,075	< 0,075 (IP _≥ 4)*
Argila		< 0,002	< 0,005 mm	< 0,075 (IP<4)

*IP = Índice de Plasticidade.

Há várias discrepâncias nos limites das diversas classes. Com relação a areias e pedregulhos também há diferentes sub-divisões classificando em finos (F), médios (M), grossos (G) e muito grossos. Também não há concordância com relação aos limites destas sub-divisões com pode ser visualizado Figura 1.

Alguns termos específicos têm conotação mais ligada à origem, mineralogia, ou forma de fragmentação. Os termos “areia” e “argila” muitas vezes também são usados com uma conotação não granulométrica e sim mineralogia. Engenheiros geralmente associam “areia” com grãos de quartzo, uma vez que este realmente é o mineral mais presente em areias naturais. O termo argila também é usado indiscriminadamente para se referir a “argilo-minerais”. Em caso de dúvida o mais aconselhável é usar os termos “fração areia” e “fração argila” quando se referir à granulometria.

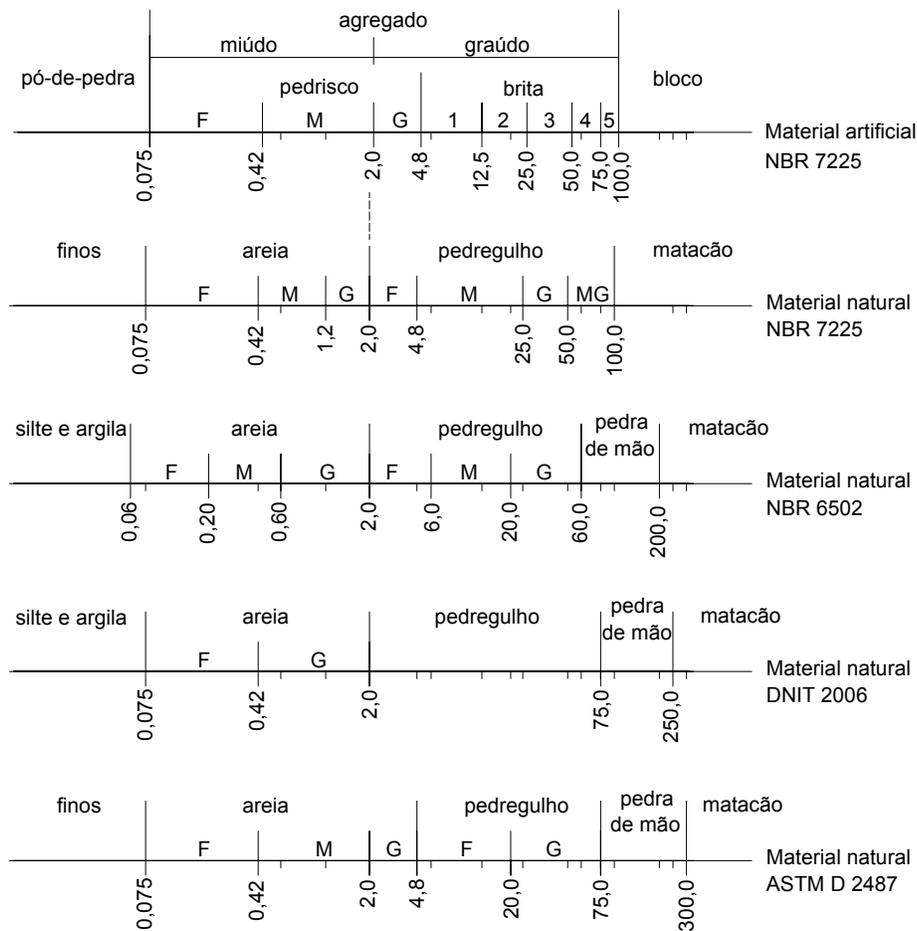


Figura 1. Comparação entre as classes texturais segundo várias normas.

Os termos “cascalho e seixo” também são associados a fragmentos com tamanhos característicos na fração pedregulho ou um pouco maior (até 100 mm). Quando os grãos têm forma arredondada, são denominados “seixos” (seixo rolado, p.ex.). Já o termo cascalho se refere a partículas com dimensões de 4,8 a 100 mm, mas não têm conotação quanto à forma ou arredondamento (cascalho laterítico, p.ex.).

3.1.2 Classes texturais para materiais processados

O termo “brita” ou “pedra britada” se refere a materiais provenientes da fragmentação mecânica de rochas. O intervalo de dimensões é da ordem de 4,8 a 100 mm, segundo a norma NBR 7225 (ABNT 1993). Diz-se que a brita é “graduada” quando estão presentes fragmentos de várias dimensões numa seqüência contínua. Fala-se em britada “numerada” ou classificada, quando os fragmentos se encontram em faixas granulométricas definidas pela abertura de duas peneiras consecutivas (FRAZÃO 2002). Os termos usados para materiais granulares artificiais, segundo a NBR 7225 são mostrados na parte superior da Figura 1.

A fração de material britado com diâmetro entre 0,075 mm e 4,8 mm, ou parte desta fração dependendo do órgão, é também referido como areia artificial, areia de brita ou areia britada. Novamente os limites entre as classes de areia fina, média e grossa não são muito precisos.

O material menor que 0,075 mm é também chamado de material pulverulento e a NBR 7225 se refere a esta fração como pó de pedra. As definições de pedrisco e pó de

pedra também são confusas. O Manual de Pavimentação (DNIT 2006a) define pedrisco como material proveniente da britagem de pedra com diâmetro entre 2,0 mm e 6,4 mm e pó-de-pedra como o material com diâmetro < 2,0 mm. Distingue ainda o processamento manual da rocha bruta e usa as seguintes denominações:

- Pedra afeiçãoada: pedra bruta trabalhada para determinados fins, tais como, paralelepípedo, meios-fios etc;
- Pedra marroada: pedra bruta fragmentada por meio de “marrão” (espécie de martelo grande de ferro, marreta), com dimensões tais que possa ser manuseada.
- Pedra não marroada: fragmento de rocha não trabalhada, ou rocha bruta. Outros termos comuns são, acordo com Bauer (2000), são:
- Bica corrida: Material britado no estado em que se encontra na saída do britador. É dita primária quando deixa o britador primário e tem graduação aproximada de 0 a 300 mm, e dita secundária, quando deixa o britador secundário, com graduação aproximada de 0 a 76 mm.
- Rachão: material britado que passa no britador primário e é retido na peneira de 76 mm. É a fração acima de 76 mm da bica corrida primária. Tem as mesmas dimensões de pedra de mão.

A pedra britada tem várias aplicações em engenharia conforme sua granulometria. Pedrisco e pó-de-pedra são usados principalmente em massas asfálticas, a brita 1 (mais nobre) é usada concretos bombeados, a brita 2 em bases e sub-bases rodoviárias e grandes volumes de concreto, a brita 3 é utilizada em lastro ferroviário. Blocos maiores do tipo rachão são usados em colchões drenantes e muros de gravidade. Fragmentos ainda maiores são usados como enrocamento de barragens.

3.1.3 Agregados

A norma NBR 7225 (ABNT 1993) define agregado como o material com propriedades adequadas, natural ou obtido por fragmentação artificial de pedra, de dimensão nominal máxima inferior a 100 mm e de dimensão nominal mínima igual ou superior a 0,075 mm. Nesta faixa de tamanho os agregados são ainda divididos em graúdos e miúdos, sendo o limite entre estes grupos o diâmetro de 4,8 mm, conforme ilustrado na Figura 1.

Para a norma NBR 7211: Agregado para Concreto – Especificação (ABNT 2005), o termo agregado miúdo se refere a fragmentos com dimensões nominais compreendidas entre 0,150 mm (ou 150 µm) e 4,75 mm, enquanto que agregados graúdos se referem a grãos com dimensões entre 4,75 mm e 75 mm.

Em algumas publicações do meio rodoviário a distinção entre agregado graúdo e miúdo é limitada pela dimensão de 2,0 mm (peneira #10). É graúdo o agregado retido na peneira #10 (britas, pedregulhos etc) e miúdo tudo que passa na #10 e fica retido na # 200 com abertura de 0,075 mm (areia, pó de pedra etc). Define-se ainda filer ou material de enchimento como o que passa pelo menos 65% na # 200. Nesta classe se incluem finos não plásticos, tais como cal extinta, cimento Portland e pó de chaminé, os quais são usados para alterar a viscosidade do ligante asfáltico em misturas asfálticas.

3.2 Características dos Agregados

Conhecer as características dos agregados é fundamental para a perfeita dosagem de concretos hidráulicos ou betuminosos. Também é imprescindível para escolher os materiais e misturas granulares a serem usados em camadas de bases de pavimentos, lastros de ferrovias ou em outras estruturas de interesse de engenharia.

As propriedades do concreto (hidráulico ou betuminoso) dependem da massa específica aparente, da porosidade, da composição granulométrica, da forma e da textura

dos agregados. A composição mineralógica dos agregados, bem como sua porosidade, afeta a resistência, a compressibilidade e sanidade dos concretos endurecidos. O consumo de cimento Portland ou de ligante betuminoso é altamente dependente da superfície específica e da porosidade dos grãos de agregados.

As características do agregado dependem da microestrutura da rocha matriz, expressas pela sua porosidade, massa específica e composição mineralógica; bem como de sua exposição prévia (grau de intemperismo) e das condicionantes do processo de fabricação, tais como uso de explosivos, tipo de britadores etc. De acordo com estes condicionantes as propriedades dos agregados podem ser divididas em três grupos (MEHTA & MONTEIRO 1994):

- Características dependentes da porosidade: massa específica aparente, absorção de água, resistência, módulo de elasticidade e sanidade;
- Características dependentes da composição química e mineralógica: resistência, módulo de elasticidade, substâncias deletérias presentes e cargas elétricas;
- Características dependentes das condições prévias e condicionantes de fabricação: tamanho, forma e textura das partículas.

Algumas propriedades físicas são definidas para a uma partícula individual, mas, na maior parte dos casos, são determinadas para um conjunto ou massa de partículas dentro de dada classe granulométrica, representando um valor médio para aquela faixa. Em geral, há ocedimentos específicos para agregados graúdos e para agregados miúdos.

3.2.1 Índices Físicos

Alguns índices físicos revelam propriedades inerentes a um dado material, ou seu estado e estrutura atuais. Muitas destas propriedades são especificadas, estabelecendo-se limites de aceitação ou rejeição do material para uma dada aplicação. Dentre os índices físicos mais importantes em um agregado citam-se: umidade, absorção, massa específica e porosidade aparente.

Estes índices são determinados com base em ensaios normatizados, os quais são geralmente realizados sobre uma amostra de agregados numa dada classe granulométrica mais ou menos uniforme.

3.2.1.1 Absorção e umidade

Umidade refere-se ao teor de água presente em um material. Pode-se definir umidade em termos volumétricos ou gravimétricos, sendo esta última mais comum. Assim **umidade** é definida como relação percentual entre a massa de água contida em uma amostra e a massa da amostra totalmente seca (massa de sólidos):

$$w = \frac{M_{\text{água}}}{M_{\text{sólidos}}} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

Quanto à condição de umidade, uma amostra pode se encontrar em quatro situações diferentes, ilustradas na Figura 2: (a) condição ambiente ou seca ao ar; (b) condição saturada com superfície úmida; (c) condição saturada com superfície seca (SSS); e (d) condição completamente seca.

Na condição ambiente uma amostra sempre absorve alguma quantidade de água, seja da chuva, do lençol freático ou do próprio ar, porém raramente esta quantidade de água é suficiente para saturar a amostra, ou seja, para preencher totalmente os seus vazios inter comunicantes. Mesmo quando se seca a amostra ao ar, a amostra geralmente ainda mantém alguma umidade, dita higroscópica.

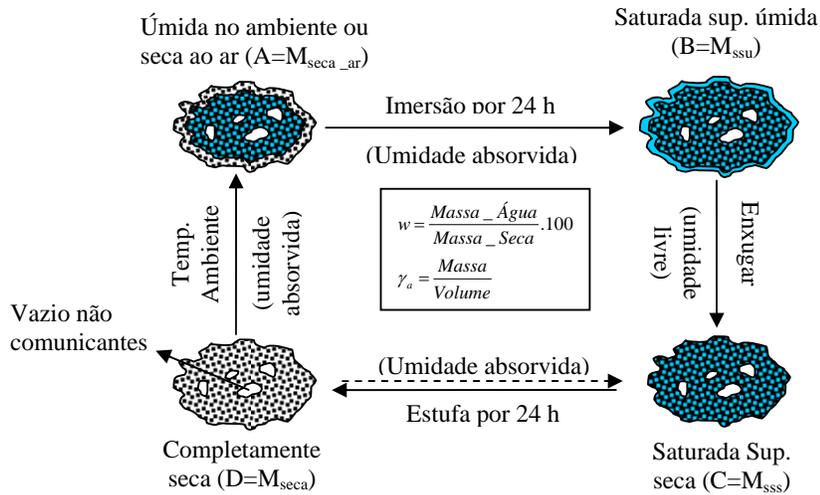


Figura 2. Teor de umidade e absorção.

A amostra é dita saturada, quando todos os seus vazios comunicantes (entre grãos e nos grãos) estão preenchidos com água. Considera-se que uma amostra esteja saturada, após imersão em água por 24 horas. Entretanto, mesmo nestas condições podem restar bolhas de ar oclusas nos vazios e eventualmente deve-se recorrer a outros métodos, como o uso de vácuo e agitação para se livrar totalmente das bolhas.

Os grãos de agregado de uma amostra saturada, quando retirados da água, além da água absorvida nos poros internos mantêm uma película de água em sua superfície que determina o que se chama de umidade livre. Nesta condição as partículas são consideradas saturadas com superfície úmida (SSU). A umidade livre pode ser eliminada, secando-se a amostra com um pano absorvente ou sob a ação de uma suave corrente de ar e, assim, as partículas passam à condição dita saturada com superfície seca (SSS).

Uma amostra é considerada totalmente seca, quando se livra de toda a umidade. Para fins práticos, considera-se a amostra totalmente seca após ficar em estufa a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ até constância de peso, o que geralmente se observa após 24 horas. Neste caso tem-se a massa da amostra igual à massa de sólidos ($M_{\text{sólidos}} = M_{\text{seca}}$).

Pode-se definir o teor de umidade para qualquer situação da amostra: natural, seca ao ar, totalmente seca, totalmente saturada, partículas saturadas com superfície úmida ou partículas saturadas com superfície seca. A massa de água é determinada pela diferença entre o peso da amostra (sólidos e água) e o peso da amostra totalmente seca.

Absorção é uma medida de umidade para a amostra com partículas na condição saturada com superfície seca (SSS), ou seja, a absorção mede a quantidade de água que pode preencher os poros comunicantes nos grãos de uma massa de agregados:

$$a = \frac{M_{\text{sss}} - M_{\text{seca}}}{M_{\text{seca}}} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

A absorção do agregado está diretamente relacionada com a quantidade os vazios comunicantes ou porosidade aparente dos grãos sólidos. Os valores da absorção das rochas ígneas e metamórficas, geralmente são inferiores a 0,5% e raramente excedem 1,0%. Alguns tipos de basalto são exceção e podem ter alta absorção. As rochas sedimentares têm maior capacidade de absorção. Agregados lateríticos ou lateritas são altamente porosos e a absorção de água chega facilmente aos 10% (MOIZINHO 2007).

3.2.1.2 Massa Específica

Define-se massa específica (γ) como a relação entre a massa (M) e o volume (V) de um material. Da mesma forma que umidade, pode-se definir massa específica para o material em diversas condições, tomando a massa (M) correspondente (úmida natural, seca ao ar, grãos saturados com superfície úmida, grãos saturados com superfície seca, totalmente saturada ou totalmente seca). Para caracterizar um agregado, independentemente de seu teor de umidade, deve-se tomar sua massa completamente seca. Por outro lado, o volume ocupado pelo material pode se referir ao volume real (V_r) ocupado pelos sólidos, descontando-se todos os vazios permeáveis (nos grãos e entre grãos), ou ao volume aparente (V_a), o qual inclui todos os vazios permeáveis. Desta forma distingue-se entre massa específica real ou absoluta de um agregado (γ_r) e massa específica aparente (γ_a):

$$\gamma_r = \frac{M}{V_r} \quad ; \quad \gamma_a = \frac{M}{V_a} \quad (\text{Eq. 3})$$

A definição massa específica real (γ_r) geralmente não considera os poros não comunicantes internos aos grãos. Para eliminar o efeito destes poros totalmente fechados, o material deveria ser pulverizado, o que é bastante trabalhoso e sensível ao tamanho a que os fragmentos foram reduzidos (MOIZINHO 2007).

O volume real ocupado pelos grãos é obtido do volume de água deslocado pelos sólidos. A massa específica dos sólidos em agregados miúdos usados em pavimentação é calculada de acordo com norma ME 194 (DNIT 1998a), que indica o uso do frasco de Chapman (um frasco de vidro graduado com dois bulbos e um gargalo graduado) para a determinação do volume ocupado pelos vazios. Para agregados miúdos usados em concretos hidráulicos, a norma NBR NM 52 (ABNT 2003) substituiu o frasco de Chapman por um novo tipo de frasco com volume aferido.

Para agregados graúdos usados em pavimentação a massa específica e a absorção são determinadas de acordo com a norma ME 195 (DNIT 1997a), a qual prescreve o uso da balança hidrostática para a determinação do volume de sólidos.

O Quadro 2 apresenta a massa específica de agregados de diversos grupos de rochas (NEVILLE 1997). A maioria tem massa específica de partículas entre 2,60 e 2,70 g/cm³. O basalto apresenta valores médios um pouco mais elevados em função da presença comum de ferro. Concreções lateríticas, descontando-se os poros internos, ultrapassam uma massa específica real de 3,00 g/cm³ em função dos altos teores de óxidos de ferro e de alumínio (MOIZINHO, 2007).

Quadro 2. Valores de Massa Específica de algumas rochas mais comuns (NEVILLE 1997).

Grupo	Massa Específica do agregado (g/cm ³)	Intervalo de valores (g/cm ³)
Basalto	2,80	2,60 – 3,00
Granito	2,69	2,60 – 3,00
Arenito	2,69	2,60 – 2,90
Calcário	2,66	2,50 – 2,80
Quartzito	2,62	2,60 – 2,70
Lateritas*	3,17	3,00 – 3,30

(*) Fonte: Moizinho (2007)

3.2.2 Resistência a Esforços Mecânicos

Os agregados são sujeitos a esforços mecânicos de compressão, tração e flexão, transmitidos pelos carregamentos externos atuantes na estrutura na qual foram utilizados. Os agregados usados em construção também estão sujeitos a esforços de impacto,

esmagamento, desgaste e abrasão. Há vários ensaios que tentam reproduzir cada um destes esforços, sendo o ensaio de abrasão o mais comum.

Os agregados usados em concretos, ou em camadas granulares de pavimentos, em lastros de rodovias, e em aterros em geral devem resistir aos esforços de abrasão a que estão sujeitos tanto durante o processo construtivo, quanto em serviço. O ensaio mais utilizado no Brasil para verificar a resistência do agregado a estas solicitações é o de “Abrasão Los Angeles”, normatizado pela NBR 6465 (ABNT 1984) e ME 035 para aplicações rodoviárias (DNIT 1998b).

O ensaio usa um tambor giratório feito de aço de alta dureza. Uma amostra de agregado de massa M_1 , numa certa faixa granulométrica, é introduzida no tambor juntamente com certo número de esferas de aço padronizadas. O número de esferas e a massa a ser utilizada no ensaio por faixa granulométrica é prescrito na norma. O tambor gira a 33 rpm durante 15 ou 30 minutos, dependendo da graduação da amostra. O tambor possui aletas internas que capturam os agregados e esferas, os quais caem por gravidade quando atingem a parte mais alta (Figura 3). Desta forma a amostra de agregados é triturada, tanto pela ação do atrito (com outros fragmentos, com as paredes internas do tambor e com as esferas) como pelo impacto da queda das esferas.

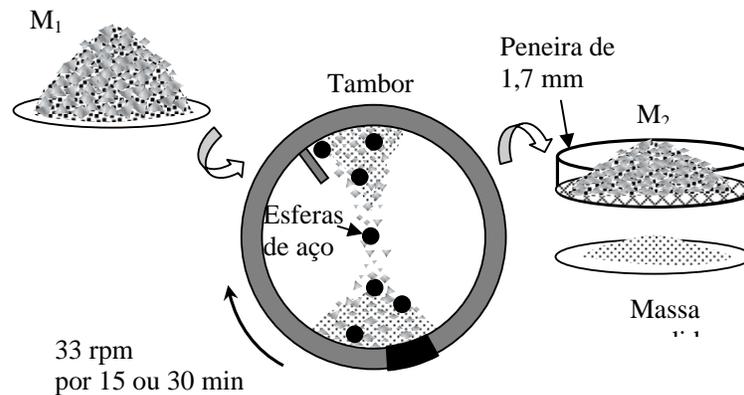


Figura 3. Ilustração do ensaio Los Angeles.

Ao final do ensaio, os agregados são retirados do tambor e peneirados numa peneira com malha de abertura de 1,7 mm, restando uma massa M_2 retida nesta peneira. O “Desgaste Los Angeles” é calculado como a perda de massa percentual pela seguinte expressão:

$$LA = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 4})$$

Quanto menor o valor do desgaste Los Angeles, melhor é o material. Em complemento ao ensaio de abrasão, também é realizado o ensaio de resistência ao esmagamento (ME 197, DNIT 1997b).

3.2.3 Forma dos grãos e textura superficial

A forma dos agregados se refere à sua geometria tridimensional. Como é difícil representar corpos tridimensionais irregulares, é mais conveniente definir certas características geométricas destes corpos, tais como alongamento, achatamento, cubicidade, esfericidade, angulosidade etc.

A rocha submetida à fragmentação mecânica produz fragmentos com diferentes tamanhos e formas. A forma dos agregados é bastante influenciada pela estrutura e textura da rocha mãe. Rochas de estrutura maciça, como os basaltos compactos, geralmente produzem britas de forma cúbica. Por outro lado, rochas com estrutura

xistosa, como é típico em rochas sedimentares e alguns tipos de rochas metamórficas formadas a partir destas, geralmente produzem fragmentos de formas alongadas e lamelares. O processo de britagem também influencia no formato dos agregados.

Há diversos métodos para avaliação da forma de agregados. Alguns são diretos e se baseiam em medidas de um número significativo de partículas, usando-se um paquímetro, como descrito nas normas NBR 7809 e NBR 6954 (ABNT 1983; ABNT 1989). Outros métodos são indiretos e usam gabaritos comparativos, ou uma série de peneiras e crivos de formatos e aberturas diversas.

A norma NBR 7809 define o grau de cubicidade do agregado graúdo, usando duas dimensões obtidas com o Método do Paquímetro (ABNT 1983). Por outro lado a NBR 6954 usa três dimensões para definir duas relações entre lados do agregado (ABNT 1989). Imaginando-se uma partícula inscrita em um paralelepípedo imaginário, toma-se a sua dimensão maior (comprimento, A), sua dimensão intermediária (largura, B) e sua dimensão menor (espessura, C). O alongamento é medido pela relação espessura/largura (C/B) e o achatamento ou lameridade é medido pela relação largura/comprimento (B/A). Tomando-se estas duas medidas em conjunto, define-se as seguintes formas: cúbica ($B/A > 0,5$ e $C/B > 0,5$), alongada ($B/A < 0,5$ e $C/B > 0,5$), lamelar ($B/A > 0,5$ e $C/B < 0,5$) e alongada-lamelar ($B/A < 0,5$ e $C/B < 0,5$). A Figura 4(a) resume esta classificação.

A norma rodoviária ME 086 (DNIT 1994a) define o índice de forma com base em uma série de peneiras com crivos de abertura circular e um conjunto de redutores. Utiliza-se uma fórmula baseada nos pesos retidos nestes crivos para o cálculo do índice de forma.

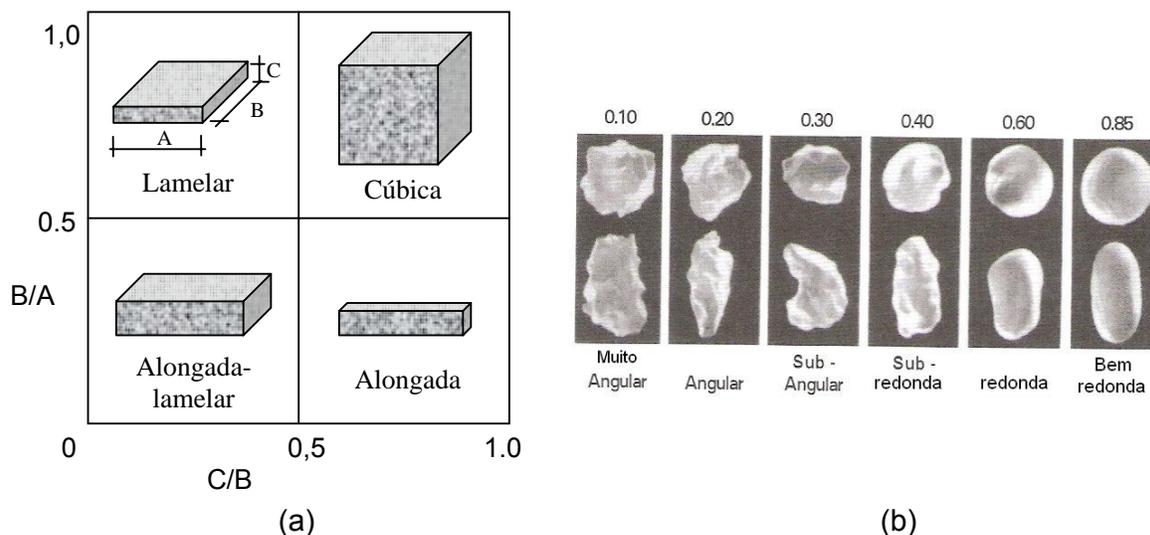


Figura 4. (a) Formas dos Agregados; (b) Arredondamento (POWERS 1953).

Deve-se atentar para o fato de que a forma das partículas britadas varia de acordo com seu tamanho. Grãos menores geralmente são mais alongados. Para os agregados graúdos, deve-se dar preferência à forma equidimensional. Partículas que se distanciam desta forma tendem a ter maior área superficial. Partículas alongadas ou lamelares tendem a se acomodar segundo um plano e se rompem em flexão quando compactadas, funcionando como pequenas vigas bi-apoiadas sobre outras partículas. Em concretos hidráulicos, partículas lamelares podem prejudicar a durabilidade, devido à acumulação de bolhas de ar e água de exsudação sob elas (NEVILLE 1997). É indesejável a presença de mais de 10% a 15% de partículas alongadas em concreto.

A classificação da Figura 4(a) a rigor determina uma relação de dimensões. Uma partícula com uma relação $B/A=C/B=1$ é equidimensional, mas não se pode dizer se a partícula é cúbica ou esférica. O **arredondamento** representa a agudeza ou angulosidade

das arestas ou cantos das partículas. Segundo Neville (1997), o arredondamento depende da resistência à abrasão da rocha mãe e das ações a que esta foi submetida. Em caso de agregados britados, depende da natureza do mineral e do tipo de britador.

Com relação ao arredondamento, Powers (1953) classifica as partículas como: bem arredondada (esférica), arredondada, sub-arredondada, sub-angulosa, angulosa e muito angulosa (ver Figura 4(b)). Do ponto de vista de resistência, as partículas angulosas são preferíveis, pois implicam num melhor entrosamento (também dito imbricamento) entre as partículas individuais. Por outro lado, partículas angulosas têm maior área superficial e exigem uma maior quantidade de água para a mesma trabalhabilidade em concretos hidráulicos.

A **textura superficial** do agregado tem influência sobre sua aderência com a pasta de cimento Portland e com o ligante betuminoso. A classificação da textura superficial se baseia no grau de polimento da superfície das partículas. A norma inglesa BS 812 (BSI 1975) distingue as seguintes texturas superficiais: vítrea, granulosa, áspera, cristalina e alveolar. Agregados com textura mais áspera favorecem a aderência com a pasta de cimento ou com o cimento asfáltico. Isto influencia na resistência do concreto (hidráulico ou betuminoso), principalmente quando submetidos à flexão.

3.2.4 Superfície específica

Superfície específica (S_e) é a relação entre a superfície e o volume de uma partícula sólida. Embora este conceito seja tradicionalmente volumétrico, por razões práticas, prefere-se exprimir esta relação em termos de massa, ou seja (S'_e):

$$S_e = \frac{S}{V} \quad \text{ou} \quad S'_e = \frac{S}{M} = \frac{S}{\gamma_g V} \quad (\text{Eq. 5})$$

em que S é área da superfície, V é volume do grão e γ_g é a massa específica do grão. A superfície específica volumétrica (S_e) é expressa em m^2/m^3 e a gravimétrica (S'_e) é expressa em m^2/kg .

Para uma partícula esférica com diâmetro D tem-se $S_e=6/D$; enquanto que para uma cúbica de lado L , $S_e=6/L$. Tomando-se duas partículas, uma esférica e outra cúbica, com o mesmo volume, isto é $L = D\sqrt[3]{\pi/6}$, então pode-se determinar que a superfície específica da partícula esférica é aproximadamente 90% daquela da partícula cúbica.

Em todos os casos a superfície específica é inversamente proporcional à dimensão “nominal” da partícula. Tomando-se, por exemplo, 1 kg de uma rocha com massa específica de $2,65 \text{ g/cm}^3$ é possível moldar um corpo de prova cúbico com $0,3354 \text{ m}$ de lado, ou seja, com uma superfície de $0,675 \text{ m}^2$, ou um quadrado com $0,822 \text{ m}$ de lado. Se dividirmos o lado por 3 em cada direção, a superfície específica triplica (ver Figura 5). Se dividirmos cada lado do cubo original por 10, para obtermos partículas do tamanho de brita 3 ($L=33,54 \text{ mm}$), o mesmo quilo do material equivaleria a uma área de $6,75 \text{ m}^2$, ou um pequeno quarto. O mesmo peso com partículas de areia grossa ($L=3,354 \text{ mm}$) tem superfície equivalente a um pequeno apartamento ($67,5 \text{ m}^2$). Se as partículas tiverem dimensão de silte ($L=0,033 \text{ mm}$), a superfície de um quilo de material é equivalente à de um campo de futebol. O mesmo quilo de argila ($L=0,003 \text{ mm}$) já equivaleria a uma área de 67502 m^2 , ou aproximadamente 10 campos de futebol.

Do exemplo acima, pode-se perceber a importância da superfície específica dos agregados na dosagem de concretos. O consumo de água de molhagem em concretos de cimento Portland é de cerca de 10 litros por metros cúbicos para partículas com diâmetro de 38 a 76 mm (brita 3-4), cuja superfície específica média é de $105 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Este consumo sobe para 300 litros por metros cúbicos para partículas com diâmetro de 0,15 a 0,30 mm

(areia fina), cuja superfície específica média é de $26670 \text{ m}^2/\text{m}^3$. O consumo de ligante asfáltico também aumenta muito com o conteúdo de partículas finas na massa de concreto betuminoso.

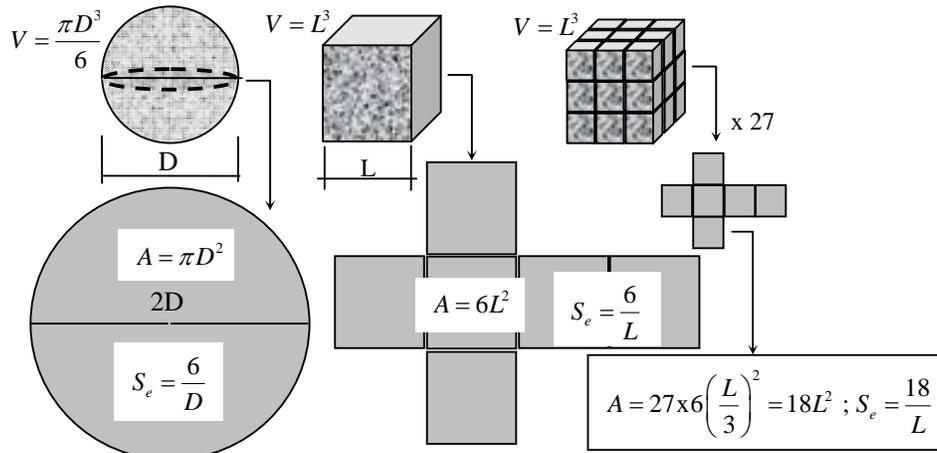


Figura 5. Superfície específica de partículas esférica e cúbica.

3.2.5 Análise Mineralógica

A análise mineralogia dos agregados para uso uma obra de engenharia civil ajuda a identificar: (a) a presença de minerais deletérios ou nocivos; (b) propriedades físico-químicas dependentes da composição mineralógica e que interferem com as propriedades de ligantes betuminosos; (c) o estado de alteração e durabilidade.

Substâncias deletérias podem incluir impurezas orgânicas, finos argilosos, torrões de argila e partículas friáveis, material pulverulento, além de outros, como sais e minerais reativos. Impurezas orgânicas podem influir nas reações de hidratação do cimento em concretos hidráulicos. Materiais finos podem formar uma película superficial nos agregados, prejudicando a aderência com a pasta de concreto ou com o ligante asfáltico. Materiais pulverulentos não plásticos, nem sempre são nocivos, desde que sejam sãos e inertes; porém devem ser evitados em quantidades excessivas, pois, devido à grande superfície específica, aumentam bastante o consumo de asfalto em concretos betuminosos, bem como aumentam a demanda de água em concretos hidráulicos. Além disto, certos minerais dos agregados podem reagir com os álcalis presentes no cimento.

3.2.5.1 Impurezas orgânicas

Deve-se averiguar a presença de compostos orgânicos nocivos em areias a serem usadas em argamassas e concretos (de cimento Portland ou betuminoso). A norma ME 055 (DNIT 1995) fixa o procedimento para identificação destes materiais por colorimetria.

Para o ensaio são previamente preparadas duas soluções: uma de hidróxido de sódio a 3% em água destilada, e outra, chamada de solução padrão, que usa 3 ml de ácido tânico a 2% em álcool mais 97 ml da solução de hidróxido de sódio a 3%. A seguir uma amostra de 200 g do agregado seco ao ar é colocada em um recipiente, ao qual se adiciona 100 ml da solução de hidróxido de sódio, agitando-se a mistura vigorosamente. O recipiente com o agregado na solução é deixado em repouso durante 24 horas. Ao mesmo tempo um outro recipiente com 100 ml da solução padrão também é deixado em repouso por 24 horas. Após este prazo, as duas soluções são filtradas em papel filtro qualitativo e recolhidas cada uma delas em tubos, para a comparação das cores.

Caso a amostra colhida da solução da mistura com agregado seja mais escura que a solução padrão, é um indicativo da presença de compostos orgânicos nocivos na areia. Ensaio posteriores devem ser realizados visando a aceitação ou rejeição do material.

3.2.5.2 Finos argilosos

Agregados miúdos usados em concreto betuminoso ou argamassas asfálticas como AAUQ (Areia Asfalto Usinada a Quente) devem ser livres de finos argilosos. Uma medida desta quantidade de finos é dada pelo ensaio de Equivalente de Areia de acordo com a norma rodoviária ME 054 (DNIT 1997c). Neste ensaio a fração que passa na peneira de 4,8 mm é agitada energeticamente em uma proveta graduada, contendo uma solução padronizada. O material é então deixado em repouso por 20 minutos enquanto a areia se assenta no fundo da proveta e a fração argilosa fica em suspensão. Determina-se na proveta graduada a leitura no topo da areia e a leitura no topo da argila em suspensão. O Equivalente de Areia (EA) é dado pela relação em percentagem entre estes dois volumes:

$$EA = \frac{\text{Leitura no topo da areia}}{\text{Leitura no topo da argila}} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 6})$$

Quanto maior o valor de EA, mais livre de finos argilosos será o agregado miúdo.

3.2.5.3 Torrões de argila e partículas friáveis

A determinação da quantidade de torrões de argila e partículas friáveis é normatizado na NBR 7218 (ABNT 1987a). Para os agregados miúdos, toma-se uma amostra retida na peneira de 1,18 mm; enquanto os agregados graúdos são divididos em diferentes amostras retidas nas peneiras de 4,8 mm, 9,5 mm, 19,0 mm e 37,5 mm. A massa de cada amostra é especificada na norma. Cada amostra seca é pesada (M_i) e depois espalhada em um recipiente inoxidável com dimensões suficientes para formar uma camada delgada de agregado no fundo do recipiente. A seguir cobre-se a amostra com água destilada e deixa em repouso por $24 \text{ h} \pm 4 \text{ h}$. Posteriormente, tenta-se romper as partículas de cada amostra, pressionando-as entre os dedos indicador e polegar. Todas as partículas que possam ser rompidas desta forma são classificadas como torrões de argila ou partículas friáveis. A seguir cada amostra é recolhida e os detritos são separados por peneiramento úmido nas peneiras previamente listadas, vertendo-se um jarro de água sobre a peneira enquanto se agita manualmente. As partículas retidas em cada peneira são removidas cuidadosamente e depois secas em estufa até constância de massa.

Após esfriar, cada amostra é pesada novamente (M_2), e calcula-se a diferença de massa percentual em cada peneira, $p=100 \cdot (M_1 - M_2) / M_1$. O teor de torrões de argila e partículas friáveis no agregado miúdo é dado pela perda de massa na peneira de 1,18 mm. Para os agregados graúdos, toma-se a média ponderada das perdas nas diversas peneiras, tomando-se como fator de ponderação as percentagens retidas em cada peneira na composição original do agregado graúdo.

3.2.5.4 Material pulverulento

Material pulverulento é constituído por todas as partículas minerais com dimensões inferiores a 0,075 mm, inclusive os materiais solúveis em água, presentes no agregado. As normas NBR 7219 (ABNT 1987b) e ME 266 (DNIT 1997c), fixam os procedimentos da determinação do teor de materiais pulverulentos em agregados para concretos.

O ensaio toma duas amostras com massas definidas em função da dimensão máxima característica do agregado. As amostras são secas em estufa, pesadas para a determinação da massa inicial (M_i), e depois colocadas em um recipiente de vidro com

água limpa. O material é cuidadosamente agitado com um bastão para provocar a separação e suspensão das partículas finas. A água com a suspensão e depois vertida sobre um conjunto com as peneiras de 1,2 mm e 0,075 mm. O material retido nas peneiras é colocado de volta no recipiente e o processo de lavagem é repetido até que a água de lavagem se torne visualmente limpa em comparação com a lavagem original. Ao final do processo, a amostra é novamente seca em estufa e determinada a massa final (M_f). O teor de materiais pulverulentos é dado pela diferença de massa percentual, $100 \cdot (M_i - M_f) / M_i$. Toma-se o valor médio das duas amostras, sendo que os valores individuais não devem diferir entre si em mais de 0,5% para agregados graúdos ou 1% para agregados miúdos.

3.2.5.5 Partículas Reativas

Um problema que tem demandado vários estudos se deve a reações entre agregados e a pasta de cimento. Uma análise detalhada destas reações está fora do escopo deste capítulo. Entretanto, citam-se as chamadas reações álcali-silica e álcali-carbonato. Na primeira, os álcalis do cimento atacam certos tipos de sílicas reativas que podem estar presentes nos agregados, formando um gel que pode destruir a aderência entre o agregado e a pasta de cimento. Por outro lado, as reações álcali-carbonato ocorrem entre alguns agregados calcários dolomíticos e os álcalis do cimento.

A presença de sais, comuns em areias dragadas do mar e em areias de desertos, também deve ser evitada. Os sais podem corroer a armadura de aço em concreto armado, além de absorver umidade, provocando depósitos de aspecto desagradável na superfície do concreto (NEVILLE 1997).

3.2.5.6 Durabilidade

O ensaio de **durabilidade** visa determinar a resistência à desintegração dos agregados sujeitos à ação do tempo. Isto é muito importante em rochas que apresentam minerais poucos estáveis, como é o caso de alguns tipos de basaltos alterados, muito comuns no Brasil.

A norma ME 089 (DNIT 1994b) apresenta o procedimento para avaliação da durabilidade de agregado pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. O ensaio começa com a análise granulométrica do agregado, dividido em duas frações: a parte graúda com material retido na peneira de 4,8 mm; e parte miúda. Para cada fração isoladamente são tomadas pesos definidos de amostras entre as várias peneiras da série normal. Estas amostras são imersas na solução por um período de 16 a 18 horas na temperatura de $21 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. Após a imersão a amostra é retirada da solução e drenada por 15 ± 5 minutos, e em seguida colocada para secar em estufa a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ a $110 \text{ }^\circ\text{C}$ até constância de peso. Após a secagem, a amostra é esfriada até a temperatura ambiente.

O processo de imersão e secagem alternada constitui um ciclo, o qual é repetido até o número desejado de ciclos. Geralmente são tomados cinco ciclos (Figura 6). Este processo acelera a desintegração da amostra, simulando o efeito do tempo. Após o número de ciclos desejado, as frações maiores são examinadas qualitativamente, procurando-se identificar visualmente sinais de fendilhamento, desintegração, esmagamento, quebra, laminagem etc.

Tanto a fração graúda quanto a miúda são novamente pesadas e calcula-se a perda de massa em relação ao peso original de amostra retida em cada peneira da série normal. O valor da durabilidade para a fração graúda e miúda é dado pela média ponderada das perdas entre cada peneira da série normal na fração, tomando-se como fator de ponderação as percentagens retidas em cada peneira na análise granulométrica original.

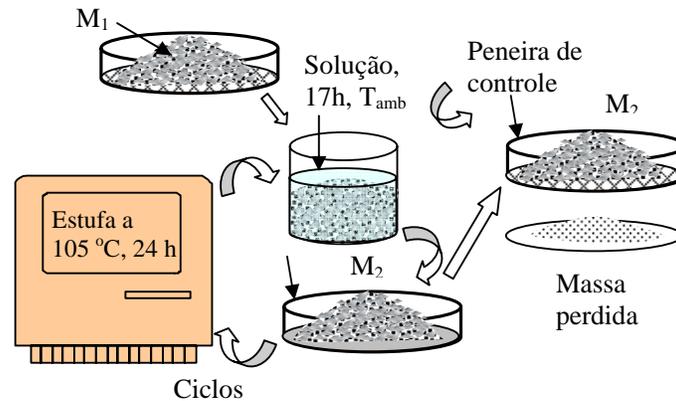


Figura 6. Ilustração do Ensaio de Durabilidade.

A norma aconselha ainda que se misturem novamente os agregados após o processo de desintegração acelerada e que se faça nova análise granulométrica para se determinar a variação no “módulo de finura”.

3.2.6 Cargas superficiais

Ao se fragmentar uma rocha, devido à sua estrutura interna, a superfície do agregado tende a apresentar fracas cargas eletrostáticas, de acordo com a natureza da rocha. Rochas vulcânicas ácidas, com teor de sílica (SiO_2) acima de 65%, tendem a gerar agregados com cargas eletronegativas; enquanto rochas básicas ($\% \text{SiO}_2 < 55\%$) geralmente são eletropositivas (SANTANA 1993). São exemplos de agregados eletronegativos: granito, gnaiss, arenito e areias quartzosas. São eletropositivos o calcário e o basalto, entre outros. A Figura 7 mostra a relação entre a carga de algumas rochas e o teor de sílica ou de álcalis.

A carga na superfície do agregado influencia na aderência entre este e o agente cimentante. Isto é particularmente importante quando se usa emulsões asfálticas, nas quais os glóbulos de asfalto possuem cargas positivas (emulsões catiônicas) ou negativas (emulsões aniônicas). As cargas dos agregados e emulsões podem ser medidas com um aparelho chamado “Zeta Meter”².

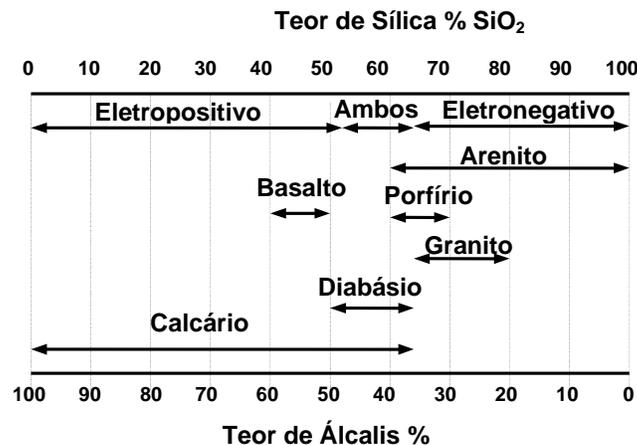


Figura 7. Agregados eletropositivos e eletronegativos.

² Ver Capítulo 14 – Determinação do potencial zeta.

4 Mistura de Partículas de Vários Tamanhos

Partículas de um mesmo tamanho raramente são usadas para compor o corpo de um aterro, base rodoviária ou um concreto (hidráulico ou betuminoso). Isto porque uma massa com partículas de mesmo tamanho deixa muitos vazios internos e apresenta uma baixa estabilidade, isto é, pouca resistência aos esforços solicitantes. Por outro lado, quando se deseja facilitar o fluxo de água através de uma camada granular, como no caso de problemas de drenagem, estes vazios são necessários e materiais granulares com tamanho uniforme são utilizados.

4.1 Granulometria

O estudo da distribuição dos diversos tamanhos de grãos numa massa de materiais granulares é chamado de **análise granulométrica**.

O tamanho dos fragmentos de rocha pode ser medido diretamente ou indiretamente por meio de ensaios de peneiramento e sedimentação. A medição direta com trena se aplica aos fragmentos individuais maiores que 750 mm. O peneiramento é usado para agregados graúdos e miúdos. A sedimentação é usada para a determinação indireta do tamanho de partículas finas ($< 0,075$ mm).

A distribuição granulométrica fornece a proporção relativa, em percentagem, das massas dos fragmentos com tamanhos em diferentes faixas granulométricas, em relação ao peso total da amostra.

A determinação da distribuição granulométrica por peneiramento de agregados para concreto é normatizada pela NBR 7217 (ABNT 1987c). As peneiras padronizadas têm aberturas quadradas, sendo usadas duas séries: a série normal e a série intermediária. Compõem a série normal as peneiras com aberturas de: 76 mm, 38 mm, 19 mm, 9,5 mm, 4,8 mm, 2,4 mm, 1,2 mm, 0,6 mm, 0,3 mm e 0,15 mm. As peneiras intermediárias são usadas apenas para auxiliar na elaboração da curva granulométrica e compreendem as aberturas de: 64 mm, 50 mm, 32 mm, 25 mm, 12,5 mm e 6,2 mm.

Os laboratórios de Pavimentação, de acordo com as normas ME 051 e ME 080 (DNIT 1994c, 1994d) costumam usar as peneiras da série ASTM (American Society for Testing and Materials). As peneiras mais utilizadas têm as seguintes aberturas (entre parênteses, valores em polegada ou a numeração #): 50,8 mm (2"), 38,1 mm (1 ½"), 25,4 mm (1"), 19,1 mm (¾"), 9,5 mm (3/8"), 4,8 mm (# 4), 2,09 mm (# 10), 0,42 mm (# 40), 0,15 mm (# 100) e 0,075 mm (# 200).

4.1.2 Curvas Granulométricas

O resultado da análise granulométrica é mais facilmente interpretado graficamente com o auxílio de curvas granulométricas. Nestas curvas as ordenadas representam as porcentagens acumuladas passantes e a abscissa mostra a abertura das peneiras ou diâmetro dos grãos em escala logarítmica. Note que as aberturas das peneiras da série normal obedecem a uma progressão geométrica de razão 2 e, portanto, ficam igualmente espaçadas num gráfico logarítmico.

Quanto à forma da curva granulométrica existem várias denominações. Diz-se que uma curva é **contínua** quando apresenta partículas de todos os diâmetros intermediários desde um valor mínimo (d_o) até um valor máximo (D); apresentam a forma de um "S" suave e alongado na horizontal, \curvearrowright . Em contraposição, diz-se que a curva é **descontínua** ("gap graded") se faltar alguma fração intermediária. Neste caso a curva tende a apresentar um patamar horizontal na fração ausente. Uma curva é dita **uniforme** quando a maior parte das partículas pertence a apenas uma fração granulométrica, com $d_o \approx 0,5D$. Curvas uniformes apresentam uma forma de integral \int , ou um "S" alongado na vertical, e são típicas de agregados do tipo "macadame". A Figura 8 ilustra vários tipos de curvas.

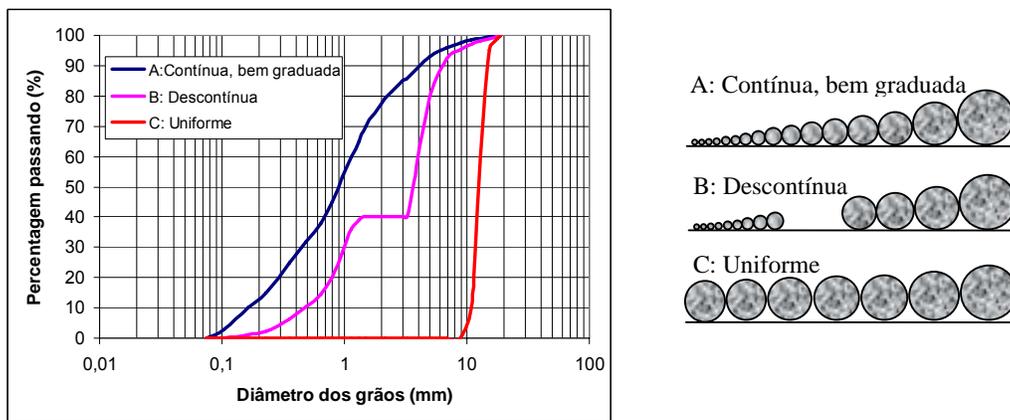


Figura 8. Exemplos de curvas granulométricas.

Uma curva contínua pode ser razoavelmente aproximada por uma expressão matemática do tipo:

$$p(d) = \left(\frac{d - d_o}{D - d_o} \right)^n \quad (\text{Eq. 7})$$

em que é “ p ” é a porcentagem acumulada passante na peneira de diâmetro “ d ” e “ n ” é um expoente entre 0 e 1. Diâmetro máximo (D) é abertura da malha da menor peneira na qual passam, no mínimo, 95% do material. O diâmetro mínimo (d_o) é abertura da malha da maior peneira na qual passam, no máximo, 5% do material.

Uma curva contínua é dita **bem graduada** entre os limites d_o e D , quando as frações menores existem em quantidade suficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores, propiciando o menor volume de vazios possível. Uma curva bem graduada possui um expoente “ n ” em torno de 0,5. Dentre estas é famosa e bastante utilizada a curva de Fuller em que $d_o = 0$ (ou a peneira de 0,075 mm, para fins práticos):

$$p(d) = \left(\frac{d}{D_{\max}} \right)^{0,5} \quad (\text{Eq. 8})$$

Valores de $n < 0,35$ indicam excesso de finos e valores de $n > 0,55$ indicam falta de finos. A curva de Fuller, além de bem graduada é também dita **densa** ou **fechada**. O termo fechado neste caso se refere à textura superficial da massa de concreto, a qual resulta mais lisa quando há boa quantidade de finos ($d_o \approx 0$) e $0,35 < n < 0,55$. Por outro lado diz-se que a graduação é **aberta**, resultando numa textura superficial rugosa, quando não há finos suficientes ($0,55 < n < 0,75$). Uma curva é do tipo “macadame”, quando é uniforme com $d_o \approx 0,5D$ e $n \approx 1,0$ (DNIT 2006a).

Às vezes é conveniente expressar algumas características da curva granulométrica por meio de índices ou parâmetros, dentre os quais se destacam:

- **Módulo de finura:** corresponde à soma das porcentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal, dividida por 100. Este número é interpretado como o tamanho médio ponderado da peneira na qual o material é retido. Quanto mais grosso for o agregado, maior o módulo de finura da curva. Este parâmetro é bastante usado nas especificações de agregados para concreto de cimento Portland;
- **Dimensão máxima característica:** corresponde à abertura nominal, em milímetro, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa;

- *Diâmetro efetivo* (d_{10}): é o diâmetro da peneira na qual a percentagem passante acumulada é de 10%:
- *Diâmetro médio* (d_{50}): é o diâmetro da peneira na qual a percentagem passante acumulada é de 50%:
- Coeficiente de uniformidade (C_u): é definido com a razão $C_u = d_{60}/d_{10}$. Esta relação expressa o alongamento horizontal da curva granulométrica e, portanto, a “não uniformidade” da curva. Areias com C_u menores que 2 são consideradas uniformes.
- Coeficiente de curvatura (C_c): é definido com a razão $C_c = (d_{30})^2/d_{10}.d_{60}$. Este coeficiente detecta melhor o formato da curva granulométrica e é usado juntamente com o C_u para definir se um material é bem graduado ou mal graduado. Uma areia, por exemplo, é considerada bem graduada se tiver $C_u > 6$ e $1 < C_c < 3$.

Alguns destes parâmetros são usados em correlações empíricas, outros são usados para especificação de materiais granulares e também em sistemas de classificação.

Um índice muito utilizado em pavimentação é o Índice de Grupo (IG), que combina a percentagem de material passando na peneira # 200 (p_{200}) e os limites de consistência (LL e IP) da fração fina do material de acordo com a expressão:

$$IG = 0,2a + 0,005ac + 0,01bd \quad (\text{Eq. 9})$$

em que $a = p_{200} - 35$, limitado ao intervalo $0 < a < 40$; $b = p_{200} - 15$, limitado ao intervalo $0 < b < 40$; $c = LL - 35$, limitado ao intervalo $0 < c < 20$; $d = IP - 10$, limitado ao intervalo $0 < d < 20$. Os limites de consistência, Limite de Liquidez LL e Limite Plasticidade LP, são determinados de acordo com as normas ME 122 e ME 082 (DNIT 1994e, 1994f), respectivamente, e IP é o Índice de Plasticidade dado por $IP = LL - LP$. O índice de grupo IG varia de 0 a 20 e valores próximos a zero indicam a ausência de finos plásticos

4.2 Índices Físicos

Da mesma forma que para uma fração granulométrica ou uma amostra da rocha são, alguns índices físicos são usados para caracterizar o estado do arranjo das partículas numa dada massa de mistura de agregados. Dentre os vários índices citam-se os mais importantes: teor de umidade, absorção, massa específica dos grãos, porosidade e índice de vazios.

A rigor os conceitos físicos e as definições de umidade, absorção, massa específica e porosidade são os mesmos para um conjunto de partículas de diferentes tamanhos, para uma massa de partículas uniformes ou para um único fragmento de rocha. Entretanto, para um conjunto de partículas, os valores destas propriedades refletirão uma espécie de média das propriedades dos diversos fragmentos individuais. Em certas propriedades prevalecem os valores dos agregados graúdos e em outras as propriedades dos agregados miúdos.

4.2.1 Massa específica

A massa específica (real) dos grãos de uma mistura de agregados é fundamental para a dosagem de concretos betuminosos, embora seja de pouco uso em concretos de cimento Portland. A amostra de agregados é dividida em diversas frações. A massa específica de uma mistura de partículas de agregados (γ_m) é calculada pela seguinte média:

$$\gamma_m = \frac{1}{\frac{p_1}{\gamma_1} + \frac{p_2}{\gamma_2} + \dots + \frac{p_n}{\gamma_n}} \quad (\text{Eq. 10})$$

em que γ_i e p_i são a massa específica e a percentagem retida para cada fração individual.

Uma grandeza mais utilizada é a massa específica aparente dos agregados (referindo-se à mistura), também designada de massa unitária na dosagem de concretos. A massa unitária é definida pela relação entre a massa do conjunto de agregados e o volume que ele ocupa, incluindo os todos vazios permeáveis:

$$\gamma_a = \frac{M}{V} \quad (\text{Eq. 11})$$

Esta grandeza pode ser determinada em laboratório com os agregados soltos ou compactados de acordo com as normas da NBR 7251 (ABNT 1982) e NBR NM 45 (ABNT 2006). Em campo a massa específica aparente dos agregados é determinada pelo método do Frasco de Areia de acordo com a norma ME 092 (DNIT 1994g). A massa específica aparente pode ser calculada para qualquer situação de umidade desejada (totalmente seca, seca ao ar, natural úmida, saturada etc).

4.2.2 Porosidade e índice de vazios

A quantidade relativa de vazios num dado volume de agregados é medida pela porosidade (n) ou pelo índice de vazios (e). A porosidade é a relação entre o volume ocupado pelos vazios (V_v) e o volume ocupado por toda a amostra de agregados (V); enquanto que o índice de vazios é a relação entre o volume de vazios (V_v) e o volume ocupado apenas pelas partículas sólidas de agregados (V_s). Como ($V=V_v+V_s$) estas grandezas são relacionadas entre si, de acordo com:

$$n = \frac{V_v}{V} \quad ; \quad e = \frac{V_v}{V_s} \quad ; \quad n = \frac{e}{1+e} \quad (\text{Eq. 12})$$

A porosidade é geralmente expressa em percentagem e é sempre menor que 100%. O índice de vazios é geralmente expresso como um número decimal.

4.2.3 Absorção e teor de umidade

A absorção de água pelos agregados tem a mesma definição que a apresentada na Equação (Eq. 2). Geralmente o ensaio de absorção é feito apenas com agregados maiores e representará uma média da absorção das várias faixas constituintes da mistura. A absorção da mistura de partículas é dada pela média ponderada das absorções de cada fração:

$$a = \frac{1}{100} (p_1 a_1 + p_2 a_2 + \dots + p_n a_n) \quad (\text{Eq. 13})$$

em que a_i e p_i são a absorção e percentagem retida para cada fração individual.

Enquanto absorção mede a quantidade de água na condição saturada seca superficialmente (SSS), a umidade (w) mede a quantidade de água na condição real. O teor de umidade é obtido pesando-se a mistura de agregado no estado úmido (M_u) e depois no estado seco (M_s) após 24 horas em estufa:

$$w = \frac{M_u - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 14})$$

O teor de umidade é expresso em percentagem e é normatizado pela ME 196 para agregados graúdos (DNIT 1998c) e pela ME 213 para solos (DNIT 1994h). Também há outros procedimentos para obtenção rápida da umidade em campo como o método do "Speedy", ME 052 (DNIT 1994i).

4.2.4 Superfície específica do conjunto de partículas

A superfície específica do conjunto de partículas é dada pela média ponderada das superfícies específicas para cada fração granulométrica:

$$S_e = \frac{1}{100} (p_1 S_{e1} + p_2 S_{e2} + \dots + p_n S_{en}) \quad (\text{Eq. 15})$$

em que a superfície específica para uma fração entre duas peneiras de diâmetros d_1 e d_2 é calculada tomando-se um diâmetro equivalente d dado pela média geométrica dos limites da fração, $d = \sqrt{d_1 d_2}$.

4.3 Compacidade e Compactação

Os índices físicos de massa unitária, porosidade e índice vazios são de certa forma medidas da compacidade do arranjo de todas as partículas sólidas de uma mistura de agregados. Assim a mistura será tão mais compactada quanto mais próxima a massa unitária for da massa específica dos grãos, ou quanto menor for a porosidade e o índice de vazios. Estas grandezas definem o estado atual de compacidade da mistura. Medidas relativas de compacidade podem ser obtidas comparando-se o estado atual com os estados extremos quando a mistura estiver no seu estado mais fofo (γ_{\min} ou e_{\max}) ou mais denso (γ_{\max} ou e_{\min}).

A densidade relativa de uma mistura de agregados pode ser aumentada pelo processo de compactação mecânica. Em agregados úmidos esta compactação pode ser feita por impacto, esmagamento ou vibração, utilizando-se geralmente rolos compactadores ou outros equipamentos apropriados no campo. Em laboratório a compactação é geralmente realizada por impacto, utilizando um pistão com uma massa padrão o qual cai de uma determinada altura várias vezes sobre uma amostra. Em concreto de cimento Portland fresco, realiza-se o “adensamento” por meio de vibração.

A compactação dos agregados soltos é controlada pelo teor de umidade da mistura e pelo nível de energia de compactação utilizado. O teor de umidade facilita o processo de compactação até certo valor ótimo (w_{ot}), para o qual se atinge uma massa específica aparente seca máxima ($\gamma_{d\max}$). Para teores de umidade mais elevados, parte da energia de compactação passa a ser absorvida pela água nos poros, obtendo-se valores mais baixos de massa específica. A Figura 9 mostra uma curva de compactação típica obtida em laboratório, com o teor de umidade no eixo das abscissas e a massa específica aparente seca no eixo das ordenadas.

A energia de compactação (E) em laboratório depende do peso (P) do pistão utilizado, de sua altura de queda (h), do número de golpes do pistão por camada (n) e do número de camadas (N) de compactação. Há três níveis padronizados, denominados em ordem crescente de energia: Proctor Normal (método A), Proctor Intermediário (método B) e Proctor Modificado (método C). O ensaio de compactação Proctor é padronizado, segundo a ME 129 (DNIT 1994j).

Em campo, a energia de compactação é controlada pelo peso dos rolos, pressão dos pneus (se pneumáticos), frequência de vibração (se vibratórios) e número de passadas. A norma ME 092 (DNIT 1994g) fixa as diretrizes para controle de compactação de obras rodoviárias. Para uma dada energia, define-se Grau de Compactação como a relação percentual entre massa específica aparente seca medida no campo (γ_{d_campo}) e a massa específica aparente seca máxima ($\gamma_{d\max}$) medida em laboratório.

$$GC = \frac{\gamma_{d_campo}}{\gamma_{d\max_lab}} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 16})$$

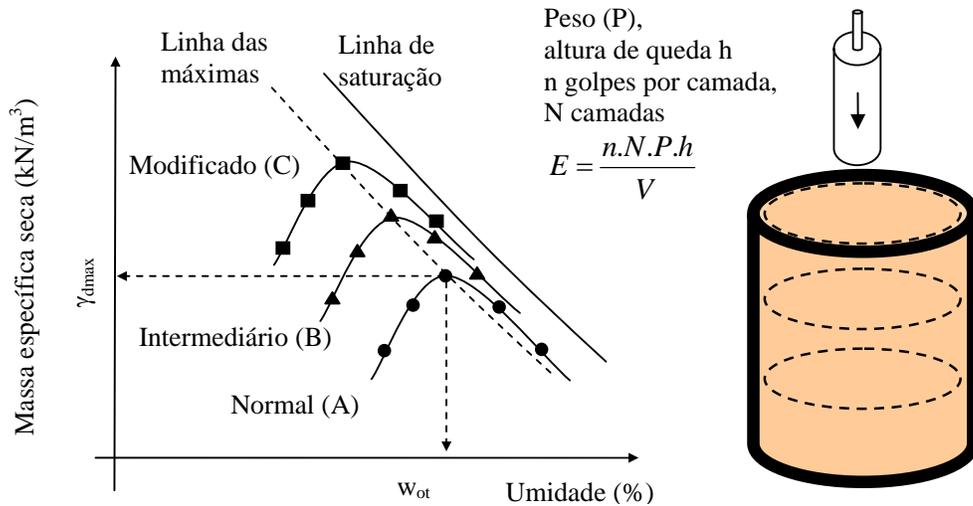


Figura 9. Esquema do ensaio de compactação.

4.4 Estabilidade e Estabilização

4.4.1 Estabilidade

Uma massa de partículas granulares, submetida a esforços externos, fica sujeita a esforços normais e cisalhantes atuantes em um plano qualquer passando pelo seu interior (Figura 10) para que satisfaça às condições de equilíbrio. A menos que os esforços externos sejam isotrópicos (isto é, iguais em todas as direções) sempre haverá planos onde as tensões cisalhantes atuantes (τ_a) internamente serão não nulas. Portanto, a massa de partículas deve exibir certa resistência ao cisalhamento (τ_r), de modo a não se romper ao longo deste plano. Isto é, a condição para que não haja ruptura é que $\tau_a \leq \tau_r$. A maior ou menor proximidade da condição de ruptura, ou estabilidade, é medida por um fator de segurança (FS) contra a ruptura por cisalhamento dado pela relação:

$$FS = \frac{\tau_r}{\tau_a} \tag{Eq. 17}$$

Desta forma um FS=1,0, significa que o material está na iminência de ruptura, enquanto que um FS=2,0 significa que o material ainda resistiria a tensões cisalhantes duas vezes superiores à que está submetido no momento. O FS não pode ser menor que 1,0, pois isto implica que o corpo já teria rompido.

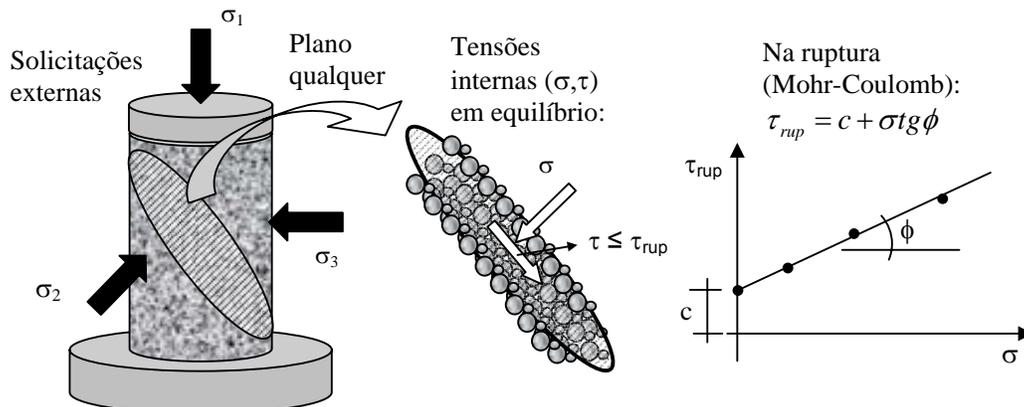


Figura 10. Condição de estabilidade e critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

4.4.1.1 Resistência ao Cisalhamento

A resistência ao cisalhamento ao longo de um plano no interior de um corpo puramente granular é basicamente friccional, isto é, deve-se ao atrito interno entre suas partículas. Para um bloco que desliza sobre uma superfície rugosa qualquer, a força de atrito (f) é proporcional à força normal (N), e a constante de proporcionalidade é o chamado coeficiente de atrito (μ), ou seja, $f = \mu N$. O mesmo ocorre quando se considera duas porções de um material granular deslizando uma sobre a outra. Neste caso o coeficiente de atrito (μ) é expresso como a tangente de um ângulo ($\mu = \text{tg}\phi$), sendo ϕ chamado ângulo de atrito interno. Dividindo as forças de atrito (f) e normal (N) pela área (A) em que estão atuando, obtêm-se as tensões: normal (σ) e cisalhante (τ) e a equação de resistência ao cisalhamento de um material puramente granular é dada por:

$$\tau_r = \sigma \cdot \text{tg}\phi \quad (\text{Eq. 18})$$

Portanto, a estabilidade de um material granular, sujeito a um esforço externo, depende basicamente de seu ângulo de atrito interno (ϕ). O ângulo de atrito interno é função principalmente da rugosidade ou textura superficial das partículas e do grau de intertravamento ou imbricamento entre as partículas. A rugosidade depende da natureza das partículas e está ligada à mineralogia da rocha mãe. O imbricamento depende basicamente da forma dos grãos e da compacidade dos agregados.

4.4.2 Estabilização

Estabilização é qualquer processo que aumente a estabilidade ou resistência ao cisalhamento de uma massa de partículas. A estabilização pode ser mecânica, granulométrica ou físico-química.

A estabilização mecânica visa reduzir os espaços vazios entre as partículas e é conseguido por meio do processo de compactação no caso de camadas de base granular, aterros granulares e concreto betuminoso, ou por meio de vibração ou adensamento no caso de concreto de cimento Portland fresco.

A estabilização granulométrica é obtida misturando-se agregados de vários tamanhos, de modo que os vazios entre agregados maiores sejam preenchidos por agregados menores, numa gradação de tamanho contínua, gerando o que se chama de uma curva de distribuição granulométrica **bem graduada**. Desta forma reduzem-se os vazios e aumenta-se o imbricamento entre os grãos, sendo este processo complementado com a compactação mecânica.

A estabilização físico-química é obtida conferindo-se ao material uma parcela extra de resistência ao cisalhamento, chamada de coesão (c), a qual é independente da tensão normal (σ). A coesão é obtida aglutinando-se as partículas de agregado por meio de um agente cimentante. Quando este agente é um aglomerante hidráulico, como o cimento Portland, tem-se uma estabilização química, ativada por reações na presença de água. Quando se usa o cimento asfáltico (ou outro material betuminoso) tem-se um processo de aglutinação físico, obtido pelo envolvimento dos grãos de agregado pelo asfalto aquecido (ou liquefeito) e posterior adesão após o resfriamento. A equação de resistência ao cisalhamento ganha assim um termo adicional, a coesão (c), e passa a ser escrita de forma mais completa pelo que se denomina como critério de ruptura de Mohr-Coulomb (ver Figura 10), como a seguir:

$$\tau_r = c + \sigma \cdot \text{tg}\phi \quad (\text{Eq. 19})$$

4.5 Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas mais relevantes de um maciço de agregados compactado, como um aterro ou uma camada de base granular, estão relacionadas com sua resistência ao cisalhamento e sua deformabilidade.

4.5.1 Resistência ao Cisalhamento de Agregados

A forma mais apropriada de medir resistência ao cisalhamento é por meio de ensaios que permitam obter diretamente os parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb, quais sejam, a coesão (c) e o ângulo de atrito (ϕ). Em solos e agregados miúdos é relativamente comum realizar ensaios deste tipo, como por exemplo, o ensaio de Cisalhamento Direto e o Ensaio Triaxial. Entretanto, as dimensões dos equipamentos e o nível de tensões exigidas geralmente dificultam ou inviabilizam estes ensaios para agregados graúdos e enrocamentos.

4.5.2 Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR)

A medida de “resistência” mais comumente utilizada para o dimensionamento de pavimentos rodoviários e aeroportuários quer empreguem solos ou agregados britados em suas camadas, é o Índice de Suporte Califórnia, ISC (ou CBR – California Bearing Ratio – na sigla inglês, que é mais utilizada).

O ensaio de CBR é normatizado na ME 049 (DNIT 1994k). Inicialmente é determinada a curva de compactação para a energia desejada, moldando-se no mínimo 5 corpos de prova em umidades diferentes. Para cada umidade, ou mais frequentemente apenas para a umidade ótima, o corpo de prova compactado é deixado em imersão em água por quatro dias, para medir sua expansão. Esta é dada pelo aumento percentual na altura do corpo de prova, devido à saturação e eventual presença indesejável de minerais expansivos.

Após o período de imersão, o corpo de prova é levado para uma prensa padronizada, onde um pistão penetra a uma dada velocidade (1,27 mm/min) em contato com uma certa área (A) na superfície da amostra. Registram-se as forças (F) e as penetrações (d) ao longo do ensaio de modo a traçar uma curva de pressão ($p=F/A$) versus penetração (Figura 11).

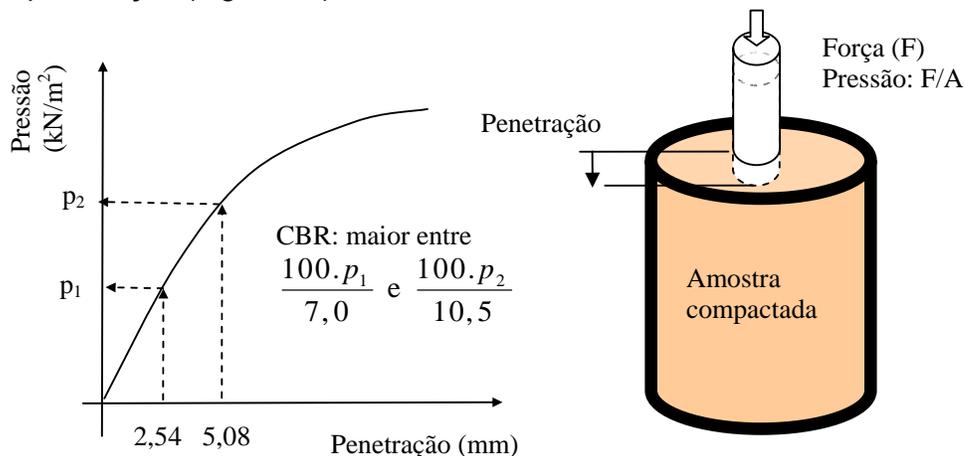


Figura 11. Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR).

Após eventuais correções nesta curva, se necessário e de acordo com a norma, determinam-se as pressões p_1 e p_2 , necessárias para penetrações de 2,54 mm e 5,08 mm (0,1 e 0,2 polegadas), respectivamente. O CBR é o maior valor entre as relações de p_1/p_{1p} e p_2/p_{2p} , onde p_{1p} e p_{2p} são as pressões necessárias para provocar as mesmas penetrações de 2,54 mm e 5,08 mm, respectivamente, numa brita padrão considerada de excelente qualidade à época em que o ensaio foi inventado:

$$CBR = \frac{P_{1(\text{medido})}}{P_{1(\text{padrão})}} \cdot 100 \quad \text{ou} \quad CBR = \frac{P_{2(\text{medido})}}{P_{2(\text{padrão})}} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 20})$$

O valor de CBR é expresso em percentagem e não raramente excede 100%, caso a agregado utilizado seja de melhor qualidade do que a brita considerada padrão. A pressão de referência para a brita padrão é 7,0 kN/m² para a penetração de 2,54 mm e 10,5 kN/m² para a penetração de 5,08 mm.

Há controvérsias sobre que medida de “resistência” o CBR expressaria devido ao modo de solitação, o qual é uma espécie de punção. Além do mais, não se trata de um ensaio de ruptura e sim um índice de pressão para uma dada deformação, portanto, uma medida de “deformabilidade”.

4.5.3 Deformabilidade dos Agregados

Medidas de deformabilidade são fundamentais prever o comportamento de aterros. Neste caso o carregamento, majoritariamente devido ao peso próprio, é estático. Outras medidas deformabilidade, sob condições de carregamento dinâmico e cíclico, são necessárias para caracterizar o comportamento dos agregados e dimensionar estruturas de pavimentos (rodoviários, aeroportuários ou ferroviários) com métodos mais racionais, ditos “mecanísticos”.

O parâmetro de deformabilidade mais utilizado para rochas e concretos é o Módulo de Elasticidade. Infelizmente, materiais granulares não coesivos, como agregados e enrocamentos, têm comportamento altamente não-linear. Desta forma não existe um “módulo de elasticidade” único, mas vários módulos que dependem dos níveis de tensão confinante (dado pela tensão principal menor, σ_3), e dos níveis de tensão desvio (dado pela diferença entre as tensões principal maior e menor, $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$), atuantes em “cada ponto” do maciço. Desta forma, o uso de um módulo de elasticidade secante, requer a definição de um ponto com tensões “representativas” daquelas atuantes em média no maciço. Valores de módulos podem ser obtidos em laboratório a partir de ensaios triaxiais estáticos com diferentes níveis de tensão confinante. Ainda assim, a determinação em campo ou em laboratório destes módulos de elasticidade é um tanto questionável e foge ao alcance deste livro.

Para carregamentos cíclicos, o material tende a se comportar elasticamente após vários ciclos de carregamento e descarregamento, como é típico do esforço gerado pelo tráfego em pavimentos. Neste caso, o mais apropriado é utilizar o chamado **Módulo de Resiliência** (MR), cujo ensaio é padronizado pela norma ME 131 (DNIT 1994). O módulo de resiliência é obtido em ensaios triaxiais cíclicos, onde um corpo de prova cilíndrico é submetido a vários ciclos de carregamento na frequência de 1 Hz para diferentes tensões confinantes (σ_3) e diferentes níveis de tensão desvio ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$). Após o material entrar na fase elástica, o Módulo de Resiliência é definido como:

$$MR = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\varepsilon_e} \quad (\text{Eq. 21})$$

em que ε_e é a deformação axial elástica ou recuperável.

Ainda que o módulo de resiliência seja um módulo elástico, trata-se de uma grandeza altamente não linear, dependendo tanto das tensões confinantes com das tensões desvio. Vários modelos não lineares podem ser encontrados na literatura e atualmente há uma tendência no Brasil de se adotar um modelo misto do tipo:

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (\text{Eq. 22})$$

em que k_1 , k_2 e k_3 são parâmetros dos materiais. Medina e Motta (2005) discutem várias destas relações e oferecem alguns valores destas constantes para algumas britas utilizadas no Brasil.

4.6 Propriedades Hidráulicas

Em problemas envolvendo fluxo, drenagem, filtragem e infiltrações é fundamental conhecer as propriedades hidráulicas dos agregados, misturas ou concretos envolvidos. A principal propriedade hidráulica de um material é sua condutividade hidráulica ou permeabilidade (k).

A permeabilidade é uma constante que expressa a proporcionalidade entre a velocidade de fluxo (v) e o gradiente hidráulico (i), de acordo com a lei de Darcy ($v=k.i$). Esta constante mede a facilidade com que a água percola através dos poros do material. A determinação da permeabilidade pode ser feita em campo ou em laboratório.

Embora haja procedimentos bem definidos para a determinação de permeabilidade, esta é a grandeza de engenharia com maior faixa de variação. O valor do coeficiente permeabilidade é altamente dependente do volume de vazios do material. Seu valor pode variar de 100 cm/s em agregados graúdos até 10^{-8} cm/s ou menos em argilas.

Na ausência de ensaios e no caso de areias puras para drenagem é comum adotar a fórmula empírica de Hazen, segundo a qual:

$$k = C(d_{10})^2 \quad (\text{Eq. 23})$$

em que C é um coeficiente que varia entre 100 e 150, d_{10} é o diâmetro efetivo (para o qual passam 10% das partículas em peso) em centímetros e k é a permeabilidade em cm/s.

5 Agregados para Pavimentação

Pavimentos rodoviários, aeroportuários ou ferroviários, do ponto de vista estrutural, são camadas de materiais construídas após a terraplanagem e que se destinam a resistir e distribuir ao subleito os esforços produzidos pelo tráfego. Por terraplanagem entende-se todo o conjunto de operações de movimentação de terra e rochas, visando a conformar a superfície do terreno com as especificações do projeto geométrico de uma via. A superfície do terraplano é o leito e todo o maciço abaixo dela é chamado de subleito. O subleito é, portanto, a fundação de um pavimento, não se constituindo uma parte ou camada do pavimento propriamente dito.

5.1 Pavimento Rodoviário

Um pavimento rodoviário sempre tem uma camada chamada de **base**, a qual é o principal componente estrutural que recebe as cargas do tráfego, absorve as tensões e transmite os esforços às camadas inferiores em valores compatíveis com sua resistência. A camada de base pode ser composta de materiais granulares incoesivos ou materiais granulares aglutinados por algum agente cimentante. Os materiais granulares utilizados são solos naturais, agregados, ou uma mistura destes, atendendo a certas especificações. Eventualmente, por motivos econômicos, a camada de base pode ser dividida e a porção inferior, de menor qualidade, é chamada de **sub-base**.

Para que uma rodovia seja considerada pavimentada, sua superfície deve ter coesão suficiente para resistir aos esforços horizontais do tráfego. Para tal finalidade pode-se utilizar uma camada adicional, chamada de revestimento. Esta camada pode ser **flexível**, constituída de concreto asfáltico, ou **rígida**, constituída por placas de concreto de cimento Portland. A Figura 12 ilustra a estrutura típica de um pavimento rodoviário.

No caso de pavimentos rígidos, as placas de concreto têm tanto a função de revestimento, quanto a função estrutural principal de resistir aos esforços verticais do tráfego. Portanto, a placa de concreto tem as funções de revestimento e base, podendo ser assente diretamente no subleito ou sobre uma camada de sub-base. Neste caso, esta

camada de sub-base geralmente não tem função estrutural, servindo mais para evitar a saída de finos do subleito (bombeamento) pelo espaço entre as juntas das placas de concreto. A camada de sub-base geralmente é granular, podendo também ser constituída de concreto compactado a rolo (CCR).

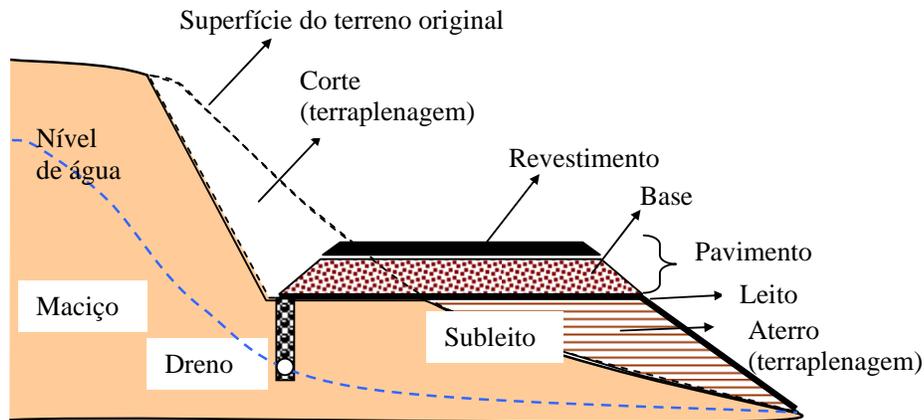


Figura 12. Componentes típicos na estrutura de um pavimento rodoviário.

Portanto, grandes quantidades de agregados são utilizadas em pavimentação rodoviária como partes constituintes de bases e sub-bases granulares e como camadas de revestimento rígido ou flexível. Em todos os casos os agregados devem atender a certas especificações quanto às suas propriedades de engenharia.

5.1.1 Agregados nas camadas de sub-base e base rodoviária

As especificações ES 301 e ES 303 (DNIT 1997e, 1997f) fixam a sistemática de execução, bem como os requisitos para os materiais concernentes para emprego, respectivamente, em sub-bases e bases estabilizadas granulometricamente. Bases e sub-bases com adição de cal ou cimento³ ou em concreto constam de outras especificações e não serão abordadas neste capítulo.

Quanto ao material de sub-base estabilizada granulometricamente, a ES 301 (DNIT 1997e) faz as seguintes exigências principais:

- Os constituintes podem ser solos, misturas de solos, misturas de solos e materiais britados, escórias ou produtos totais de britagem;
- O material deve ter índice de grupo (IG) igual a zero, o que implica, na ausência de finos plásticos (argila);
- A fração retida na # 10 (2,0 mm) deve ser constituída de partículas duras, isentas de fragmentos moles, material orgânico ou outras substâncias prejudiciais;
- O Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR) deve ser superior a 20% e a expansão inferior a 1,0% (Compactação métodos B ou C, pelo ME 129, DNIT 1994j; e CBR pelo ME 049, DNIT 1994k).

Quanto ao material de base estabilizada granulometricamente, a ES 303 (DNIT 1997f) faz as seguintes exigências principais:

- Os constituintes são solos, misturas de solos, escória, misturas de solos e materiais britados ou produtos provenientes de britagem;

³ Ver Capítulo 25 - Solo-cimento e solo-cal para maiores detalhes sobre o assunto.

- Granulometria enquadrada numa faixa específica (A a F) de acordo com o tráfego estimado (ver a norma para ter as faixas discriminadas);
- Para rodovias de tráfego moderado a leve o CBR devera ser superior a 60% e a expansão no máximo 0,5% com a energia de compactação Proctor Intermediária (Método B, ME 129, DNIT 1994j);
- Para rodovias de tráfego pesado, o CBR devera ser superior a 80% e a energia de compactação será a Proctor Modificada (Método C, ME 129, DNIT 1994j);
- O agregado retido na # 10 (2,0 mm) deve ser constituído de partículas duras e resistentes, isentas de fragmentos moles, alongados ou achatados, isento de matéria vegetal ou outras substâncias prejudiciais. O desgaste Los Angeles ME 035 (DNIT 1998b) não deverá ultrapassar a 55%.

5.1.2 Agregados na camada de revestimento asfáltico

Existem diferentes tipos de mistura entre agregados e materiais betuminosos para constituir a camada de revestimento flexível. Os materiais betuminosos são tratados no Capítulo 39 deste livro e os tipos de mistura asfáltica no Capítulo 42. Cada tipo de mistura tem suas especificações e tecnologias particulares. Os dois tipos de mistura mais utilizados no Brasil são o Concreto Asfáltico (ou Betuminoso) Usinado a Quente (CAUQ ou CBUQ) em rodovias de tráfego pesado e os tratamentos superfícies duplos ou simples (TSD e TSS) em casos de rodovias com tráfego médio a leve.

A principal especificação dos agregados para a camada de revestimento asfáltico é quanto à sua granulometria. Nos concretos asfálticos (CAUQ) a granulometria dos agregados deve ser enquadrada em certas faixas granulométricas, dependendo do tráfego. Para tráfego pesado, as faixas mais comuns são a “C” e a “B”. A faixa “C” é a mais bem graduada de todas, com um diâmetro máximo $D=19$ mm ($3/4$ ”), diâmetro mínimo $d_{0\%}\approx 0$ e um expoente “n” em torno de 0,5, portanto, próximo à curva teórica de Fuller. A faixa “B” tem granulometria um pouco mais aberta. Ambas as faixas pressupõem uma mistura de agregados graúdos e miúdos para o perfeito enquadramento das curvas granulométricas.

Da mesma forma que para a camada de base é possível, por razões econômicas, dividir a camada de revestimento asfáltico em duas (ou mais): a camada inferior, geralmente de menor qualidade é chamada de camada de ligação ou binder; enquanto que a mais superficial é chamada de camada de rolamento.

A norma ES 031 (DNIT 2006b) fixa as especificações para agregados miúdos e graúdos para uso em concretos asfálticos usinados a quente. Os materiais constituintes do concreto asfáltico são: agregado graúdo, agregado miúdo, material de enchimento (fíler) e ligante asfáltico. Todos devem atender às especificações aprovadas pelo DNIT.

ES 031 (DNIT 2006b) estabelece que o agregado graúdo deve atender às seguintes características:

- pode ser pedra britada, escória, seixo rolado preferencialmente britado ou outro material indicado nas Especificações Complementares;
- desgaste Los Angeles igual ou inferior a 50% (ME 035, DNIT 1998b);
- índice de forma superior a 0,5 (ME 086, DNIT 1994a);
- durabilidade: perda inferior a 12% (ME 089 DNIT 1994b) após cinco ciclos.

Para o agregado miúdo, a ES 031 (DNIT 2006b) estabelece as seguintes características:

- pode ser areia, pó-de-pedra ou uma mistura de ambos, ou outro material indicado nas Especificações Complementares. As partículas individuais devem ser resistentes, e livres de torrões de argila ou substâncias nocivas.
- o equivalente de areia deve ser igual ou superior a 55% (ME 054, DNIT 1997c).

A ES 031 (DNIT 2006b) especifica ainda as seguintes exigências para o fíler (material de enchimento):

- quando da aplicação deve estar seco e isento de grumos;
- ser constituído de minerais finamente divididos, tais como cimento Portland, cal extinta, pó calcário, cinza volante, de acordo com a norma EM 367 (DNIT 1997g);
- deve atender à seguinte granulometria (ME 083, DNIT 1994m): 100% passando na # 40 (0,42 mm), 95-100% passando na # 80 (0,18 mm) e 65-100% passando na # 200 (0,075 mm).

A composição da mistura de agregados graúdos, miúdos e filler deve ser nas faixas “A”, “B” ou “C”, descritas na ES 031 (DNIT 2006b), sendo a faixa “A” exclusiva para a camada de ligação (binder), a faixa “B” para camada de ligação ou de rolamento e a faixa “C” para a camada de rolamento.

5.1.3 Agregados na camada de revestimento rígido

A norma PRO 054 (DNIT 2004a) descreve os procedimentos para estudo de traços e ensaios para caracterização de materiais para pavimentos rígidos. Esta norma fixa que a dimensão máxima do agregado graúdo deve ser de 1/5 a 1/4 da espessura da placa de concreto e nunca superior a 50 mm, portanto, limitado à brita 3 no máximo.

A Especificação de Material EM 037 (DNIT 1997h) apresenta os requisitos exigidos para a produção e recepção de agregado graúdo para emprego em concreto de cimento Portland destinado a obras rodoviárias. As principais exigências são listadas a seguir:

- Composição (Exame Petrográfico NBR 7389, ABNT 1992): minerais duros, duráveis e limpos, sem substâncias que afetem a hidratação do cimento, proteção da armadura ou durabilidade;
- Material Deletério (Ensaio de reação álcali-agregado): ausência de materiais deletérios;
- Granulometria (ME 083, DNIT 1994m): de acordo com tabela especificada na norma;
- Torrões de argila e partículas friáveis (NBR 7218, ABNT 1987a):
 - concreto cuja aparência é importante: < 1%;
 - concreto submetido a desgaste superficial : < 2%;
 - demais concretos: < 3%;
- Material pulverulento (ME 266, DNIT 1997d): < 1,0 % em peso;
- Materiais carbonosos (ASTM C 123, ASTM 2004):
 - concreto cuja aparência é importante: < 0,5%;
 - demais concretos: < 1%;
- Abrasão Los Angeles (ME 035, DNIT 1998b): < 50%;
- Resistência ao esmagamento (ME 197, DNIT 1997b):
 - concreto submetido a desgaste superficial: < 65%;
 - demais concretos: < 55%;
- Durabilidade (ME 089, DNIT 1994b): perda em 5 ciclos de imersão-secagem em solução de sulfato de sódio ou magnésio inferior a 12%.

As especificações para o agregado miúdo constam da EM 038 (DNIT 1997i) e as principais são listadas a seguir:

- Composição (Exame Petrográfico NBR 7389, ABNT 1992): minerais duros, duráveis e limpos, sem substâncias que afetem a hidratação do cimento, proteção da armadura ou durabilidade;
- Material Deletério (Ensaio de reação álcali-agregado): ausência de materiais deletérios;
- Granulometria (ME 083, DNIT 1994m): de acordo com tabela especificada na norma;
 - Peneiras da série normal: de 0,015 a 9,5 mm;
 - Não deve possuir mais de 45% passando em qualquer peneira e retido na seguinte;
 - Módulo de Finura entre 2,3 e 3,1, sem variar mais que 0,2 para material de mesma origem;

- Torrões de argila (NBR 7218, ABNT 1987a): < 1,5 %;
- Material pulverulento (ME 266, DNIT 1997d);
 - concreto submetido a desgaste superficial: < 3,0%;
 - demais concretos: < 5%;
- Materiais carbonosos (ASTM C 123, ASTM 2004):
 - concreto cuja aparência é importante: < 0,5%;
 - demais concretos: < 1%;
- Impurezas orgânicas (Ensaio colorimétrico ME 055, DNIT 1995): não deve apresentar solução mais escura que a solução padrão. Caso contrário, fazer ensaio de qualidade;
- Ensaio de qualidade (Resistência à compressão, NBR 7221, ABNT 1987d): resistência em cada idade superior a 85% da obtida com corpos de prova com argamassa padrão;
- Durabilidade (ME 089, DNIT 1994b): perda em 5 ciclos de imersão-secagem em solução de sulfato de sódio ou magnésio inferior a 10%.

6 Agregados para Estruturas de Contenção

Os agregados são materiais extremamente comuns na execução de obras de estruturas de contenção. Podem ser utilizados na confecção da estrutura propriamente dita ou fazerem parte de componentes destas, como sistemas de drenagem ou filtros. A Figura 13 apresenta algumas estruturas de contenção típicas. Nesse item são apresentados os requisitos exigidos dos agregados quando utilizados como materiais de construção em obras de contenção.

concreto ciclópico ou concreto (armado ou não)

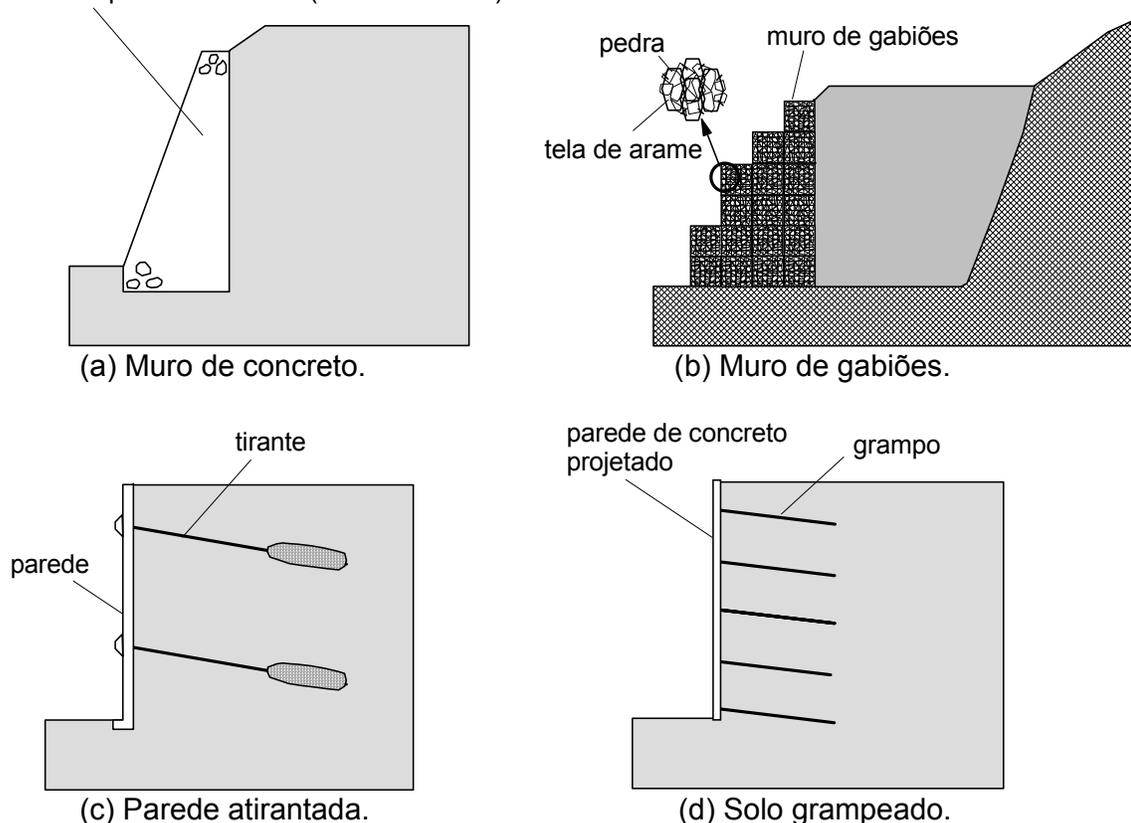


Figura 13. Algumas estruturas de contenção típicas.

6.1 Agregados para Execução de Estruturas de Contenção

Existem diversos tipos de estruturas de contenção e a maioria delas envolve algum tipo de utilização de agregados. Nas estruturas com componentes em concreto armado, o agregado miúdo deverá consistir de areia natural, formada unicamente por grãos de quartzo (GeoRio 1999). O agregado graúdo deve ser constituído de pedra britada oriunda de rocha sã. Seu emprego no concreto deve ser feito com a mistura em proporções convenientes, obedecendo às prescrições estabelecidas quanto ao traço e granulometrias dos materiais. O cascalho só poderá ser empregado quando especificado no projeto e aprovado com base em resultados de ensaios de laboratório. As propriedades dos agregados devem obedecer às especificações da norma NBR 7211 (ABNT 2005) e devem ser armazenados separadamente, isolados do terreno natural por assoalho de madeira ou camada de concreto magro (GeoRio 1999).

A pedra-de-mão para utilização em concreto ciclópico deverá ser oriunda de rocha sã, com qualidade idêntica à exigida para a pedra britada do agregado graúdo. As pedras devem ser isentas de incrustações nocivas e ter dimensão máxima inferior a 30 cm e serem menores que a metade da dimensão mínima do elemento a ser construído.

A água utilizada para os serviços de concretagem não deve conter substâncias agressivas aos agregados. Os limites de matéria orgânica, resíduos sólidos, sulfatos, cloretos e açúcar devem obedecer ao estabelecido na norma NBR 6118 (ABNT 2003).

Algumas obras de contenção utilizam concreto projetado como face da estrutura ou para revestimento superficial do maciço. Neste caso, a brita a ser utilizada deve ser formada por pedregulhos naturais ou pedra britada, oriundas de rochas estáveis, com diâmetro máximo do agregado inferior a 10 mm (GeoRio 1999). Isto possibilita a se obter uma superfície razoavelmente plana e de forma a se evitar segregação durante o processo de bombeamento. A areia deve ter origem de quartzo ou artificial, proveniente do britamento de rochas estáveis e teor de umidade entre 3 e 7% em caso de processo de jateamento de concreto por via seca (ABNT 2005).

Nas estruturas de contenção do tipo muros de gabiões devem ser utilizados pedra-de-mão ou seixos rolados. Recomenda-se que as pedras-de-mão tenham procedência granítica. O peso específico da estrutura em gabiões, após preenchida, não deve ser inferior a 17 kN/m^3 . Devem ser excluídos os materiais com baixo peso específico ou que se fragmentem com facilidade (GeoRio 1999).

Na construção de revestimentos para canais, barragens em terra e escadas dissipadoras podem ser aplicados colchões do tipo Reno. Estes colchões são estruturas retangulares caracterizadas por sua grande área e pequena espessura, fabricados com malha hexagonal de arames. Quando instalados e cheios de pedra os Colchões Reno se convertem em elementos estruturais drenantes de alta flexibilidade. Quando da utilização de colchões Reno, recomenda-se que a camada de pedras seja compacta e com peso específico não inferior 20 kN/m^3 (AGOSTINI et al. 1985).

6.2 Agregados para Dispositivos de Drenagem Interna de Estruturas de Contenção

Os agregados são utilizados em drenos e filtros de obras de contenção, visando facilitar a saída da água do maciço, com a manutenção da sua estabilidade interna. Para um filtro funcionar a contento, faz-se necessária uma transição granulométrica adequada entre materiais no filtro e compatibilidade deste com o solo de base, como esquematizado na Figura 14. Os agregados, particularmente as areias e britas, podem ser utilizados na confecção de dispositivos de drenagem chamados de barbacãs, e de colchões drenantes de estruturas de contenção, como mostrado na Figura 15. Podem ser agregados compostos ou não, contendo pedregulho natural ou britado. Devem ser formados de

partículas resistentes e duráveis, limpas e isentas de finos, matéria orgânica e substâncias agressivas que possam comprometer a sua durabilidade ou desempenho.

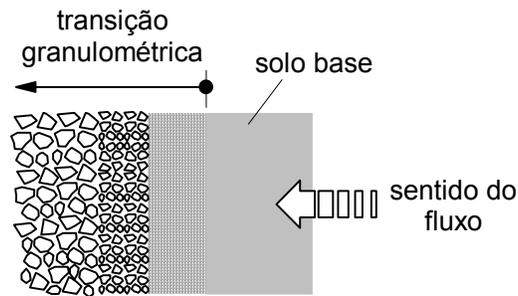


Figura 14. Transição granulométrica em um filtro.

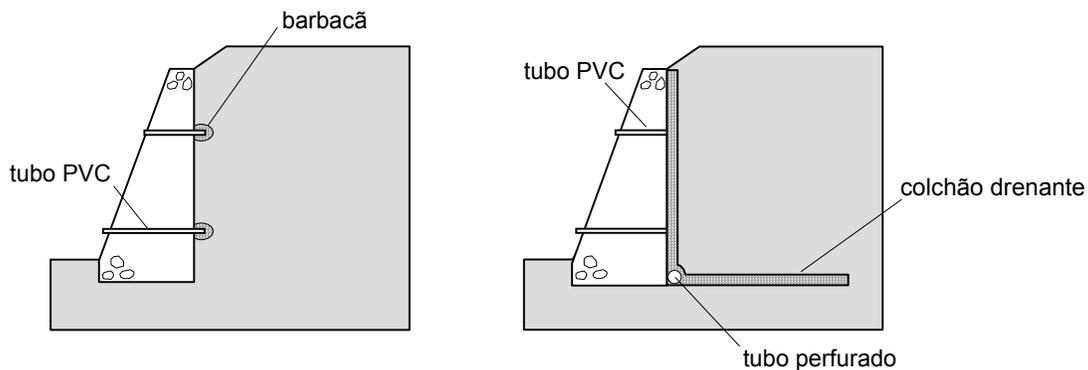


Figura 15. Sistemas de drenagem típicos em obras de contenção.

Segundo a GeoRio (1999) os agregados utilizados como elementos drenantes devem apresentar desgaste inferior a 50% no ensaio de abrasão Los Angeles e perdas inferiores a 10% no ensaio de durabilidade, em face do sulfato de sódio, após cinco ciclos.

O material filtrante também deve ser composto de elementos duráveis e sua granulometria estabelecida de forma a atender aos critérios de filtro para o solo de base. A espessura do filtro não deve ser inferior a 20 cm, para construção manual, ou 45 cm, no caso de utilização de máquinas (GeoRio 1999).

A composição granulométrica do material de filtro deve ser estabelecida de forma a que o sistema mantenha sua permeabilidade elevada e a capacidade de retenção dos grãos do solo de base. O Quadro 3 e o Quadro 4 apresentam, respectivamente, as condições a serem atendidas quanto às características granulométricas de materiais de filtro e valores típicos de coeficientes de permeabilidade.

O material filtrante para envolvimento e o material de enchimento para os drenos subterrâneos construídos com tubos porosos de concreto deverão consistir de partículas limpas, resistentes e duráveis de areia, pedregulho ou pedra britada, isentos de matéria orgânica, torrões de argila ou outros materiais deletérios. O material filtrante deverá obedecer a faixa granulométrica apresentada no Quadro 5.

Especificações e recomendações adicionais sobre sistemas de drenagem podem ser encontradas nas normas ES 015 (DNIT 2004b) e ES 016/2004 (DNIT 2004c) e em GeoRio (1999) e Gerscovich e Costa (2004).

Quadro 3. Critério de Dimensionamento de Filtros (GCO 1984, GeoRio 1999).

Regra	Requisito Atendido
$D_{15 \text{ Filtro}} \leq 5 D_{85 \text{ Solo}}$	Estabilidade (os poros devem ser pequenos o suficiente para evitar carreamento de material e entupimento)
$D_{15 \text{ Filtro}} \leq 40 D_{15 \text{ Solo}}$ ou, no caso de solos uniformes, $\frac{D_{60 \text{ Solo}}}{D_{10 \text{ Solo}}} < 4$	
$D_{15 \text{ Filtro}} \leq 20 D_{15 \text{ Solo}}$	
$D_{50 \text{ Filtro}} \leq 25 D_{50 \text{ Solo}}$	
A granulometria do material do filtro não deve ser descontínua	
$D_{15 \text{ Filtro}} > 5 D_{15 \text{ Solo}}$	Permeabilidade (a permeabilidade do filtro deve ser superior à do solo a ser drenado).
Não mais do que 5% passa na peneira # 200 e o solo deve ser granular não coesivo	
Coeficiente de uniformidade: $4 \leq \frac{D_{60 \text{ Filtro}}}{D_{10 \text{ Filtro}}} \leq 20$	Segregação (o filtro não deve ficar segregado ou contaminado durante a execução)
Dimensão máxima da partícula igual a 50 mm.	
Aberturas circulares: $\frac{D_{85 \text{ Filtro}}}{d} \geq 1 \text{ a } 2$	Não entupimento do tubo de drenagem.
Ranhuradas: $\frac{D_{85 \text{ Filtro}}}{d} \geq 1,2 \text{ a } 2$	

Notas:

- (1) $D_{15 \text{ Filtro}}$ = diâmetro dos grãos do solo do filtro correspondente à porcentagem igual a 15% do material que passa;
- (2) $D_{85 \text{ Solo}}$ = diâmetro dos grãos do solo a drenar correspondente à porcentagem igual a 85% do material que passa;
- (3) d = diâmetro do furo ou abertura da ranhura de tubo de drenagem;
- (4) A determinação da granulometria do solo de base e do material de filtro deve ser obtida sem o uso de dispersantes.
- (5) A espessura do filtro não deve ser inferior a 30 cm, para construção manual, ou 45 cm, no caso de utilização de máquinas.

Quadro 4. Valores médios de permeabilidade (DNIT 1990).

Material	Granulometria (cm)	k (cm/s)
Brita 5	7,5 a 10	100
Brita 4	5 a 7,5	80
Brita 3	2,5 a 5	45
Brita 2	2 a 2,5	25
Brita 1	1 a 2	15
Brita 0	0,5 a 1	5
Areia grossa	0,2 a 0,5	10^{-1}
Areia fina	0,005 a 0,04	10^{-3}
Silte	0,0005 a 0,005	10^{-5}
Argila	< 0,0005	10^{-8}

Nota: k = coeficiente de permeabilidade.

Quadro 5. Faixa granulométrica para material filtrante de drenos subterrâneos construídos com tubos porosos de concreto (DNIT 2005).

Peneiras (mm)	Porcentagem em massa, passando (%)
9,5	100
4,8	95 – 100
1,2	45 – 80
0,3	10 - 30
0,15	2 - 10

7 Referências

- AGOSTINI, R.; CONTE, A.; MALAGUTI, G.; PAPETTI, A. 1985. **Revestimentos flexíveis em colchões Reno e Gabiões nos canais e cursos de água canalizados**. Maccaferri Gabiões do Brasil Ltda., 119 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS STANDARDS – ASTM 2004. C 123: Standard Test Method for Lightweight Particles in Aggregate.
- _____. – ASTM 2006. D 2487: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT 1982. NBR 7251: Agregado em estado solto - determinação da massa unitária. Rio de Janeiro.
- _____. – ABNT 1983. NBR 7809: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro.
- _____. – ABNT 1984. NBR 6465 (MB-170): Agregados - Determinação da Abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro.
- _____. – ABNT 1987a. NBR 7218: Agregados - determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro.
- _____. – ABNT 1987b. NBR 7219: Agregados - Determinação do teor de materiais pulverulentos. Rio de Janeiro.
- _____. – ABNT 1987c. NBR 7217: Agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro.
- _____. – ABNT 1987d. NBR 7221 (MB 95): Agregados - Ensaio de Qualidade de Agregado Miúdo. Rio de Janeiro.
- _____. – ABNT 1989. NBR 6954: Lastro-padrão - Determinação da forma do material. Rio de Janeiro.
- _____. – ABNT 1992. NBR 7389: Apreciação petrográfica de materiais naturais para utilização como agregado em concreto. Rio de Janeiro.
- _____. – ABNT 1993. NBR 7225 (TB-16): Materiais de Pedra e Agregados Naturais. Rio de Janeiro.
- _____. – ABNT 1995. NBR 6502 (TB 3): Rochas e Solos. Rio de Janeiro.
- _____. – ABNT 2003. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto armado. Rio de Janeiro.
- _____. – ABNT 2005. NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro.
- _____. – ABNT 2006. NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro.
- BAUER, L.A.F. 2000. **Materiais de Construção 1**. Editora LTC, Rio de Janeiro.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION 1975. Methods for Determination of Particle Size and Shape, BS 812: Part 1.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT 1990. **Manual de drenagem de rodovias**. IPR, Rio de Janeiro, 414 p.
- _____. 1994a. ME 086: Agregado - determinação do índice de forma. IPR, Rio de Janeiro.
- _____. 1994b. ME 089: Agregados - avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. IPR, Rio de Janeiro.
- _____. 1994c. ME 051: Solos - análise granulométrica. IPR, Rio de Janeiro.
- _____. 1994d. ME 080: Solos - análise granulométrica por peneiramento. IPR, Rio de Janeiro.
- _____. 1994e. ME 122: Solos - determinação do limite de liquidez - método de referência e método expedito. IPR, Rio de Janeiro.
- _____. 1994f. ME 082: Solos - determinação do limite de plasticidade. IPR, Rio de Janeiro.

- _____. 1994g. ME 092: Solo - determinação da massa específica aparente, "in situ", com emprego do frasco de areia. IPR, Rio de Janeiro.
- _____. 1994h. ME 213: Solos - determinação do teor de umidade. IPR, Rio de Janeiro.
- _____. 1994i. ME 052: Solos e agregados miúdos - determinação da umidade pelo método expedito "Speedy". IPR, Rio de Janeiro.
- _____. 1994j. ME 129: Solos - compactação utilizando amostras não trabalhadas. IPR, Rio de Janeiro.
- _____. 1994k. ME 049. Solos - determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. IPR, Rio de Janeiro.
- _____. 1994l. ME 131. Solos - determinação do módulo de resiliência. IPR, Rio de Janeiro.
- _____. 1994m. ME 083: Agregados – análise granulométrica. IPR, Rio de Janeiro.
- _____. 1995. ME 055: Areia - determinação de impurezas orgânicas. IPR, Rio de Janeiro.
- _____. 1997a. ME 195: Agregados - determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. IPR, Rio de Janeiro.
- _____. 1997b. ME 197: Agregados - Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos. IPR, Rio de Janeiro.
- _____. 1997c. ME 054: Equivalente de areia. IPR, Rio de Janeiro.
- _____. 1997d. ME 266: Agregados - determinação do teor de materiais pulverulentos. IPR, Rio de Janeiro.
- _____. 1997e. ES 301: Pavimentação - sub-base estabilizada granulometricamente. IPR, Rio de Janeiro.
- _____. 1997f. ES 303: Pavimentação - base estabilizada granulometricamente.
- _____. 1997g. EM 367: Material de enchimento para misturas betuminosas. IPR, Rio de Janeiro.
- _____. 1997h. EM 037: Agregado graúdo para concreto de cimento. IPR, Rio de Janeiro.
- _____. 1997i. EM 038: Agregado miúdo para concreto de cimento. IPR, Rio de Janeiro.
- _____. 1998a. ME 194: Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. IPR, Rio de Janeiro.
- _____. 1998b. ME 035: Agregados – Determinação da abrasão "Los Angeles". IPR, Rio de Janeiro.
- _____. 1998c. ME 196: Agregados - determinação do teor de umidade total, por secagem, em agregado graúdo. IPR, Rio de Janeiro.
- _____. 2004a. PRO 054: Pavimento rígido – Estudos de traços de concreto e ensaios de caracterização de materiais. IPR, Rio de Janeiro.
- _____. 2004b. ES 015: Drenagem – Drenos subterrâneo. IPR, Rio de Janeiro.
- _____. 2004c. ES 016: Drenagem – Drenos sub-subterrâneos. IPR, Rio de Janeiro.
- _____. 2006. **Manual de Pavimentação**. Departamento Nacional de Infra-estrutura e Transportes, Publicação IPR-719, 3ª ed., Rio de Janeiro.
- _____. 2006b. ES 031: Pavimentos flexíveis – concreto asfáltico. IPR, Rio de Janeiro.
- FRAZÃO, E.B. 2002. **Tecnologia de Rochas na Construção Civil**. ABGE, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, São Paulo, SP.
- GCO 1984. **Geotechnical Manual for Slopes**. Geotechnical Control Office, Engineering Development Department, Hong Kong, 294 p.
- GEORIO 1999. **Manual Técnico de Encostas**. Fundação GeoRio, J.A.R. Ortigão e A. Sayão Editores, Rio de Janeiro, RJ.
- GERSCOVICH, D.; COSTA, H. 2004. Drainage and Surface Protection. **Handbook of Slope Stabilisation**, J.A.R. Ortigão and A. Sayão Editors, Springer-Verlag, Berlin, p. 148-211.
- MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. 1994. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. Ed. Pini, São Paulo, SP.
- MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. 2005. **Mecânica dos Pavimentos**. 2ª ed., Rio de Janeiro.

- MOIZINHO, J.C. 2007. **Caracterização e Uso de Agregados Lateríticos do Distrito Federal e do Estado de Roraima em CBUQ**. Tese de doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 287 p.
- NEVILLE, A.M. 1997. **Propriedades do Concreto**. Ed. Pini, 2ª ed., São Paulo, SP.
- POWERS, M.C. 1953. Comparison Chart for Visual Estimation of Roundness. **Jour. Sed. Pet.** v. 23, pp. 117-119.
- SANTANA, H. 1993. **Manual de Pré-misturados a Frio**. IBP, Instituto Brasileiro de Petróleo, Comissão de Asfalto, Rio de Janeiro.