

Questões de revisão

1. O que são minerais secundários e quais os principais tipos?
2. Qual a diferença entre clivagem e fratura?
3. Descreva cinco propriedades utilizadas para a identificação visual dos minerais.
4. Qual a classe dos minerais mais comuns na natureza, ou seja, dos minerais formadores de rocha. Descreva cinco minerais desta classe, e em que tipo de rocha podem ser encontrados.
5. Para se familiarizar com as rochas, faça um levantamento dos tipos mais frequentes ao seu redor ou em uma marmoraria (estabelecimento onde se vendem rochas ornamentais ou para revestimento, em bruto ou trabalhadas) e liste suas principais características com o auxílio das tabelas, figuras, e da descrição das rochas referida no texto, como cor, dureza, textura, estrutura, composição.
6. A estrutura e textura das rochas é de grande importância para a geologia de engenharia. Como são geradas e qual sua influência nas propriedades da rocha.
7. As rochas encontram-se classificadas em três grandes grupos. Como estes se relacionam? Cite cinco características distintivas entre as rochas pertencentes a estes três grupos.
8. Faça uma pesquisa sobre a importância dos argilominerais em Geologia de Engenharia e Ambiental. Relacione as informações encontradas neste Capítulo com outras do livro, principalmente com o Capítulo 7.

Bibliografia recomendada

- Klein, C.; Dutrow, B. 2012. *Manual de ciência dos minerais*. Tradução e revisão técnica Rualdo Menegat. 23. ed. Porto Alegre: Bookman. 716p.
- Matula, M. 1981. Rock and soil description and classification for engineering geological mapping: Report by the IAEG Commission on Engineering Geological Mapping. *Bull IAEG*, v. 24, p. 235-274.
- Polmerol, C.; Lagabrielle, Y.; Renard, M.; Guillot, S. 2013. *Princípios de geologia: técnicas, modelos e teorias*. Tradução Maria Lidia Vignol Lelarge. Revisão técnica Rualdo Menegat e Maria Lidia Vignol Lelarge. 14. ed. Porto Alegre: Bookman. 1017p.

- Teixeira, W.; Fairchild, T.R.; Toledo, M.C.M.; Taioli, F. (Orgs.). 2009. *Decifrando a Terra*. 2.ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional. 623p.
- Willians, H.; Turner, F.J.; Gilbert, C.M. 1970. *Petrografia: uma introdução ao estudo das rochas em seções delgadas*. São Paulo: Polígono. 445p.

Indicação de sítios

- IGCE/UNESP – <http://www.rc.unesp.br/igce/petrologia/nardy/nobaclamiro.html>.
- IUGS – *Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks (SCMR)* – <https://www.bgs.ac.uk/scmr/products.html>.
- Palavras-chave:** mineral, rocha, *minerals*, *rocks*.

CAPÍTULO 7

CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS E DE MATERIAIS ROCHOSOS PARA CONSTRUÇÃO

CONTEÚDO

- 1 **As rochas na construção civil**
 - 1.1 Agregados naturais, artificiais e reciclados
 - 1.2 Rochas para revestimento
 - 2 **Usos dos materiais rochosos na construção civil**
 - 2.1 Agregados
 - 2.2 Rochas para revestimento
 - 3 **Ensaio e análises**
 - 3.1 Importância da amostragem e da preparação para ensaios
 - 3.2 Petrografia
 - 3.3 Reatividade potencial
 - 3.4 Adesividade
 - 3.5 Densidade aparente, porosidade e absorção de água
 - 3.6 Outros ensaios para caracterização de agregados
 - 3.7 Outros ensaios para caracterização de rochas para revestimento
 - 4 **Especificações**
 - 5 **Alteração e alterabilidade**
- Resumo/Questões de revisão/Bibliografia recomendada/Indicação de sítios

Extração da pedra "Preto São Gabriel" (biotita norito), Colatina (ES). Foto: Maria Heloisa B. O. Frasca

7 CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS E DE MATERIAIS ROCHOSOS PARA CONSTRUÇÃO

Maria Heloisa Barros de Oliveira Frascá
Antenor Braga Paraguassu

Os materiais rochosos são os mais antigos materiais de construção que o ser humano pôde dispor. O período da Idade da Pedra é considerado o marco inicial de suas atividades, e desde então, a pedra (produto obtido de um maciço rochoso por ação manual ou mecânica ou, ainda, por processos naturais) tem tido uma importância inestimável na História da humanidade. Inúmeras construções em pedra persistem desde estas épocas, mesmo sofrendo as agressões do intemperismo, das ações antrópicas e das catástrofes naturais.

Na Antiguidade, a pedra foi usada na forma bruta ou pouco trabalhada, mas com a industrialização e inovações tecnológicas, atualmente pode ser empregada nas mais variadas formas, nas diversas finalidades. É utilizada na forma granular, sem e com ligantes (asfáltico ou cimento), em pavimentos ou como parte integrante do concreto, o qual é usado nas mais variadas obras de engenharia. Seja como agregados ou blocos de enrocamento ou como rochas para revestimento, os diferentes usos dos materiais rochosos podem ser devidamente orientados pelo conjunto das normas elaboradas pelas diversas instituições nacionais (ABNT

1

As rochas na construção civil

Os mais variados materiais rochosos podem ser empregados na construção civil, sendo preferencialmente utilizadas as denominadas “rochas duras” (que englobam os granitos, basaltos, gnaisses, calcários, mármore e outras), principalmente por suas maiores resistências mecânicas e durabilidade.

No entanto, quando se trata de agregados, é importante salientar que, muitas vezes, não há opção de escolha dos materiais, tendo-se que trabalhar com aqueles disponíveis na região onde a obra está sendo implantada, muitas vezes locais com ocorrência de rochas brandas (arenitos, siltitos, argilitos) ou de rochas alteradas. É o caso do uso de lateritas em pavimentação, na região Norte do Brasil, por indisponibilidade de materiais rochosos tradicionalmente utilizados, como os granitos.

Entretanto, com a adoção de medidas de segurança adequadas (uso de aditivos, de materiais alternativos, entre outros) é possível se empregar os mais diferentes materiais rochosos na construção civil.

As principais formas em que as rochas são aplicadas na construção civil são:

- **granular:** pedra britada, pedrisco, areia (natural, artificial ou de britagem), pó de pedra, cascalho e outros, usados na fabricação do concreto, em filtros e drenos em obras civis, como materiais de transições em barragens de terra e de enrocamento, lastro de ferrovia etc.;

¹ Este Capítulo foi publicado com o título Materiais Rochosos para Construção no livro “Geologia de Engenharia” da ABGE (Oliveira e Brito, 1998), tendo por autores Ely Borges Frazão e Antenor Braga Paraguassu.

– Associação Brasileira de Normas Técnicas, DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) e internacionais (ASTM – American Society for Testing and Materials, DIN – Deutsches Institut für Normung, BSI – British Standards Institution, AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials).

Casos de insucesso no uso dos materiais rochosos, tais como a degradação de concreto (devido à reação dos álcalis do cimento com minerais reativos no agregado); a desagregação de rochas basálticas em enrocamentos (devido à expansão de certos argilominerais presentes na rocha); ou o manchamento, escamação e até desagregação de rochas usadas no revestimento de pisos e paredes, constituíram e continuam sendo uma fonte importante de aprendizado, promovendo o avanço do conhecimento com relação às características desejáveis destes materiais para o uso planejado, e solicitações daí decorrentes.

Assim, este Capítulo¹ está essencialmente voltado para os materiais rochosos, focando especialmente nos usos como agregados e rochas para revestimento.

- **blocos:** usados como elementos estruturais em barramento de água ou como proteção de taludes, encostas e portos marítimos, em enrocamentos, em muros de arrimo, como paralelepípedos para pavimentação, guias ou ainda, como alvenaria em edificações;
- **placas:** usadas em revestimentos de pisos, paredes e fachadas.

O material rochoso na forma granular é denominado **agregado**. Na forma de placas são conhecidos como **rochas** ou **pedras ornamentais**, podendo também receber a designação de pedras dimensionadas ou aparelhadas.

1.1 Agregados naturais, artificiais e reciclados

Os **agregados** são materiais granulares sem forma e volume definidos, com dimensões e propriedades adequadas para uso em obras de engenharia civil, nas quais podem ter seus componentes unidos por ligantes como nos concretos hidráulico e asfáltico, ou ser usados sem ligante, como em lastro de ferrovias, enrocamentos, drenos e filtros.

Podem ser classificados levando-se em conta a origem, a densidade e o tamanho dos fragmentos. A classificação proposta pela ABNT NBR 7211:2009 apresenta as seguintes definições:

- **agregado natural:** material pétreo granular que pode ser utilizado tal e qual encontrado na natureza, podendo ser submetido à lavagem, classificação ou britagem (Figura 7.1);
- **agregado artificial:** material granular resultante de processo industrial envolvendo alteração mineralógica, química ou físico-química da matéria-prima

original, para uso como agregado em concreto ou argamassa, como os agregados de argila calcinada (também conhecidos como *pellets*) e as escórias de aciaria;

- **agregado miúdo:** agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm;
- **areia:** agregado originado por processos naturais ou artificiais de desintegração de rochas ou proveniente de processos industriais. É chamada de **areia natural** se resultante de ação de agentes da natureza, de **areia artificial** quando proveniente de processos industriais, de **areia reciclada**, quando proveniente de processos de reciclagem, e de **areia de britagem**, quando proveniente do processo de cominuição mecânica de rocha, conforme normas específicas;
- **pedra britada** ou **brita:** agregado graúdo originado pela cominuição mecânica de rocha;
- **agregado graúdo:** agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm.



(a)



(b)

Figura 7.1 Ilustração de lavra para pedra britada (a) e de equipamento de classificação granulométrica do agregado após a britagem (b). Fotos: Maria Heloisa B. O. Frascá

1.1.1 Agregados reciclados

Embora não constituam o foco deste capítulo, cuja ênfase é nos materiais rochosos naturais, não pode ser negligenciado o volume de resíduos sólidos atualmente gerados, destacadamente os resíduos de construção e demolição (também conhecidos como RCD²), e a importância da reutilização destes como agregados reciclados (Figura 7.2).



(a)



(b)

Figura 7.2 Pilha resíduos de construção e demolição em central de transbordo e reciclagem (a) e aspecto da área de britagem e classificação (b). Fotos: Maria Heloisa B. O. Frascá

Enquanto a ABNT NBR 15116:2004 define **agregado reciclado** como material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção ou demolição de obras civis, que apresenta características técnicas para aplicação em obras de edificação e infraestrutura, a ABNT NBR 7211:2009

² A ABNT NBR 15116:2004 define **resíduos de construção civil** (RCD) como resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil e os resultantes da preparação de escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto, solo, rocha, madeira, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfálticos, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, calça ou metralha.

tem uma abordagem mais ampla definindo-o como material granular obtido de processos de reciclagem de rejeitos ou subprodutos da produção industrial, mineração ou de construção ou demolição da construção civil, incluindo agregados recuperados de concreto fresco por lavagem.

Este é um interessante exemplo da diversificação que um mesmo termo pode ter, conforme a fonte de consulta e reforça a importância de sempre buscar publicações, normas e legislação diferentes e atuais ao se utilizar a terminologia relativa ao emprego de agregados na construção civil.

Os usos normalizados destes agregados, até o momento, são em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural, cujos requisitos encontram-se em ABNT NBR 15116:2004. Sua utilização é obrigatória em obras e pavimentações de vias públicas de vários municípios, incluindo o de São Paulo (SP), que orienta este uso na Especificação de Serviço PMSP/SP ETS - 001/2003 "Camadas de reforço de subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregados reciclados de resíduos sólidos de construção civil".

2

Usos dos materiais rochosos na construção civil

As rochas são utilizadas como material de construção por sua disponibilidade e características, que permitem que atendam as funções definidas para os diferentes usos. Os agregados e rochas para revestimento devem atender alguns requisitos, baseados em suas propriedades intrínsecas (vide Capítulo 6 - Minerais e Rochas), para apresentarem o desempenho desejado na aplicação a que se destinam.

As principais funções dos materiais rochosos nos diversos usos em que são empregados como agregados (Frazão, 2002) e rochas para revestimentos (Frazão, 2002; Frascá, 2013, 2017) estão brevemente descritos a seguir.

2.1 Agregados

2.1.1 Agregados para concreto

O **concreto** é um produto da mistura, em proporções convenientes, de agregados (grãos e miúdos), um aglomerante (**cimento Portland**³) e água. A mistura deve, inicialmente, ter plasticidade adequada para facilitar o manuseio e, ao longo do tempo, adquirir coesão e resistência mecânica em decorrência da formação de novos minerais em resposta às reações do aglomerante com a água (Andriolo, 2015).

Quando se emprega somente o agregado miúdo (areia natural, artificial ou de brita) com um aglomerante (cimento Portland e/ou cal hidratada) tem-se a **argamassa**. As argamassas de cimento (Fiorito, 1994) são usadas em alvenarias de alicerce, chapisco, nos revestimentos onde as condições de impermeabilidade são requisitadas, como reservatórios de água. As argamassas de cal são utilizadas

³ **Cimento Portland**: denominação convencional mundial para o cimento, material que é um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação da água. Resulta da sinterização a 1450 °C, de uma mistura em proporções adequadas, de calcário finamente moído e argila (clinker Portland), com presença de sulfato de cálcio e eventuais aditivos (Battagin e Battagin, 2010).

1.2 Rochas para revestimento

Embora outrora utilizada na forma de blocos de dimensões variadas, como alvenaria na construção de edificações, a aplicação atualmente mais importante das rochas ornamentais na construção civil é no revestimento de pisos, paredes e fachadas de edificações, para a qual são mais corretamente designadas de **rochas ou pedras para revestimento**.

As rochas para revestimento são componentes de construção, com formas e geometrias geralmente regulares, que se destinam ao embelezamento e proteção das edificações, além de lhes proporcionar funcionalidade. As formas mais comuns em que são aplicadas (ABNT NBR 15012:2013) são:

- **chapa**: material rochoso de formato laminar, com espessura menor que 40 mm, de contorno aproximadamente regular, obtida após a serragem dos blocos;
- **placa**: porção de rocha produto da serragem de blocos;
- **laje**: corpo rochoso, em estado natural, com comprimento e largura acentuadamente maiores que a espessura;
- **ladrilho**: componente com geometria e dimensões padronizadas, obtido de uma chapa. O ladrilho tem duas superfícies paralelas.

para emboço e reboco, pela sua plasticidade e condições favoráveis de endurecimento.

As principais funções do agregado (Petrucci, 2003) são resistir aos esforços solicitantes, ao desgaste, às variações de volume, à ação das intempéries e reduzir os custos do concreto, pela economia de cimento.

2.1.2 Agregados para pavimentos

Pavimento é a estrutura construída sobre terraplanagem, podendo ser classificado em **flexível** e **rígido**:

- **flexível**: constituído por camadas que não trabalham à tração; correspondendo àqueles formados por um revestimento asfáltico delgado sobre camadas de agregados (Figura 7.3);
- **rígido**: formado predominantemente por camadas que trabalham à tração. É o caso de pavimentos de concreto hidráulico.

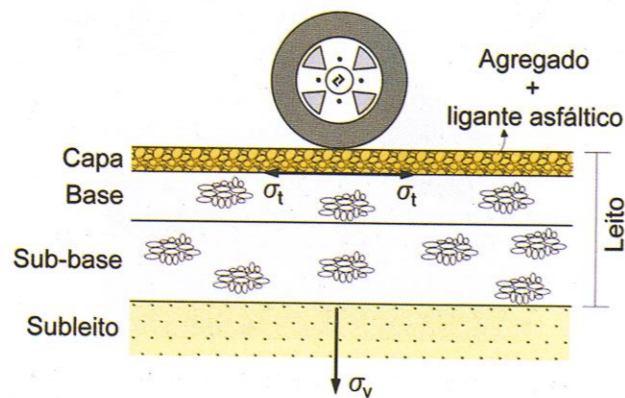


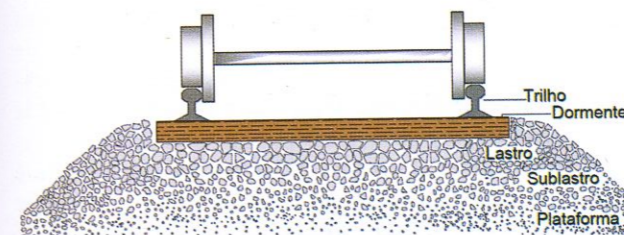
Figura 7.3 Esquema de pavimento asfáltico de uma rodovia exibindo a distribuição de tensões.

As principais funções do agregado (Souza, 1976 apud Frazão, 2002) são: resistir aos esforços verticais provenientes do tráfego e distribuí-los para as fundações, resistir aos esforços horizontais (cisalhantes) tornando mais durável a superfície de rolamento, e melhorar as condições de rolamento no que se refere ao conforto e à segurança dos veículos.

2.1.3 Agregados para lastro de ferrovias

Lastro de ferrovia é um corpo granular, com distribuição granulométrica conveniente, sobre o qual se assentam os dormentes que, por sua vez, suportam os trilhos (Figura 7.4), de forma a cumprir as seguintes funções:

- proporcionar uma base sólida aos dormentes, distribuindo as cargas de maneira uniforme, sobre toda a superfície da plataforma;
- preencher os vazios entre os dormentes, evitando seu deslocamento quando da passagem das composições e assegurando uma boa drenagem, e impedindo a instabilização dos dormentes, caso a plataforma fique saturada em água.



(a)



(b)

Figura 7.4 Seção de uma via férrea, na qual estão representados os agregados que gradam do graúdo (lastro), para o médio (sublastro) até as partículas miúdas do solo compactado da plataforma. Abaixo, via férrea e a disposição dos agregados. Foto: M.H.B.O. Frascá.

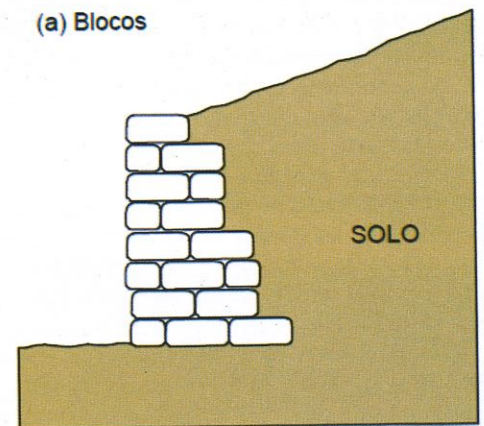
2.1.4 Uso em enrocamento

Enrocamento é um elemento de uma obra civil constituído de blocos de rocha, de dimensões variadas, construído sem ligante. Neste uso, o agregado tem a função de:

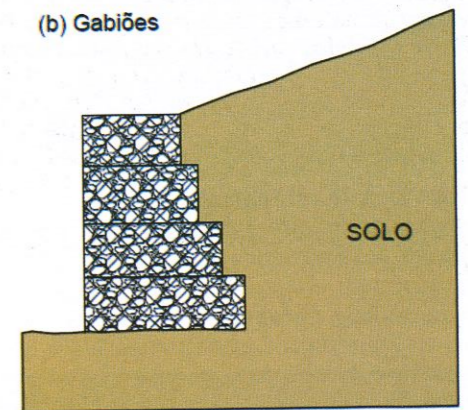
- proteger aterros de terra compactada em estradas, taludes costeiros, quebra-mar, taludes de barragem

de terra, base e pilares de pontes contra a erosão provocada pela água ou impacto das ondas, constituindo elemento de transição para evitar carreamento de partículas, pela ação de chuvas ou por desagregação provocada pelo umedecimento e secagem;

- compor muros de arrimo para estabilização de taludes e aterros na forma de simples justaposição de blocos ou gabiões, em que pedras são acondicionadas em gaiolas metálicas (Figura 7.5);
- constituir barramento provisório (como ensecadeiras na fase de construção de barragens), ou barramento definitivo (quando complementado por face impermeável de concreto ou outro material).



(a)



(b)

Figura 7.5 Muros de arrimo com blocos (a) e com gabiões (b).

Em obras de pavimentação, como rodovias, ferrovias e aeroportos, e de contenção, como barragens, os agregados podem ser usados associados a materiais geossintéticos (geotêxteis), que incrementarão as funções de proteger o substrato e promover a drenagem.

2.1.5 Uso em drenos e filtros

Drenos e filtros são corpos granulares, com distribuição granulométrica conveniente. O uso de agregados em drenos e filtros de obras de contenção tem como objetivo facilitar a saída de água do maciço e manter a estabilidade interna da estrutura (Farias e Palmeira, 2010).

Nesta aplicação os agregados tem a função de:

- criar meio poroso que garanta a interceptação de fluxos preferenciais de água, eventualmente existentes nas estruturas, para conduzi-los favoravelmente;
- promover a drenagem, com redução das subpressões que seriam prejudiciais à obra de engenharia.

2.1.6 Principais propriedades requeridas para agregados usados na construção civil.

A composição mineralógica, distribuição granulométrica, forma e resistência mecânica do agregado são algumas das principais propriedades exigidas para a seleção destes para os diferentes usos na construção civil, cada qual exibindo maior ou menor importância a depender da finalidade.

- Composição mineralógica:** em geral é desejável ausência de minerais expansíveis ou potencialmente alteráveis por ação da água ou do calor, para se evitar a desagregação da rocha ante os ciclos de saturação e secagem, promovidos pelas mudanças do nível da água em barragens ou pelas solicitações climáticas.
- no concreto:** agregados devem ser compostos por grãos de minerais duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos e não devem conter substâncias de natureza e em quantidade que possam afetar a hidratação e o endurecimento do cimento, a proteção da armadura contra a corrosão, a durabilidade, ou quando requerido, o aspecto visual externo do concreto (ABNT NBR 7211:2009).
- em pavimentos:** minerais ou fragmentos de rochas compostas por minerais com características que garantam boa adesividade aos ligantes asfálticos.
- filtros e drenos:** partículas resistentes e duráveis, limpas e isentas de finos, matéria orgânica e substâncias agressivas que possam comprometer a durabilidade ou desempenho (Farias e Palmeira, 2010), ou seja, modificar o índice de vazios necessário a uma boa drenagem.
- Distribuição granulométrica:** permite avaliar as principais aplicações dos agregados, pois para cada tipo de uso é requerida uma determinada distribuição.
- no concreto:** a distribuição granulométrica aliada à uniformidade dimensional das partículas fornecem boa trabalhabilidade e boa compactação, além de diminuir o consumo de cimento e água e imprimir alta resistência ao concreto perante as solicitações mecânicas de impacto ou compressão.
- em enrocamento:** deve ser adequada para evitar que as partículas do solo sejam carregadas através dos vazios
- filtros e drenos:** deve fornecer maior permeabilidade ao agregado do que ao material a ser protegido, permitindo a livre passagem da água.
- Forma dos fragmentos:** deve propiciar um bom imbricamento dos grãos para garantir uma adequada resistência mecânica
- em pavimentos:** forma equidimensional dos fragmentos também permite diminuir o consumo de ligante e resistir às solicitações mecânicas de impacto ou compressão.
- Resistência mecânica:** em geral é desejável alta resistência mecânica para suportar solicitações de compressão, impacto, cisalhamento e desgaste decorrentes tanto dos diferentes processos construtivo, quanto em serviço.

- **no concreto:** resistência suficiente para suportar as solicitações durante a preparação do concreto e os esforços solicitantes sobre o concreto endurecido
- **em pavimentos:** tenacidade e alta resistência ao desgaste para superar as solicitações promovidas pelo avanço das rodas dos veículos; alta resistência à compressão, para resistir aos esforços verticais provocados pelo peso das composições e distribuí-los eficientemente para o subleito da estrada.
- **em ferrovias:** alta tenacidade, para suportar e resistir ao impacto dos instrumentos de compactação do lastro, devido à passagem das composições; alta resistência ao desgaste, para suportar as ações de atrito, e consequente desagregação, devido à passagem das composições e à movimentação horizontal dos trilhos.

2.2 Rochas para revestimento

O revestimento de edificações, seja de fachadas ou pisos e paredes em interiores ou exteriores, é a principal aplicação atual das rochas ornamentais na construção civil, para a qual são especificamente designadas de rochas para revestimento. Compreendem os produtos do desmonte de materiais rochosos em blocos, seu subsequente desdobramento em chapas, processamento e corte em placas e ladrilhos (Frasca, 2013).

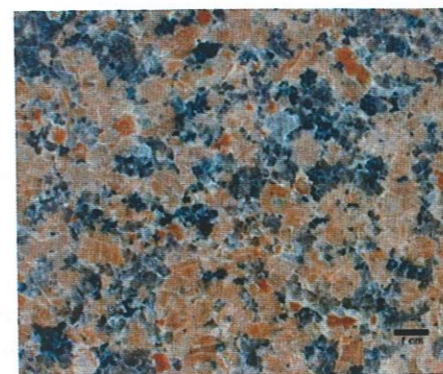
Em quaisquer aplicações em revestimento, a rocha é selecionada por seu aspecto estético (Figura 7.6), que deve ser conjugada às suas propriedades tecnológicas visando se atingir a durabilidade desejada em uso. Dentre estas propriedades destaca-se:

- baixa **dilatação térmica**, para garantir a estabilidade do revestimento, em exteriores;
- resistência ao **desgaste**, quando usadas em pisos de alto tráfego;
- resistência à **flexão**, quando utilizadas em pisos suspensos ou em revestimentos de fachadas fixados por insertos metálicos;
- baixa **alterabilidade**, de forma a resistir aos agentes intempéricos quando usados em revestimentos de exteriores.

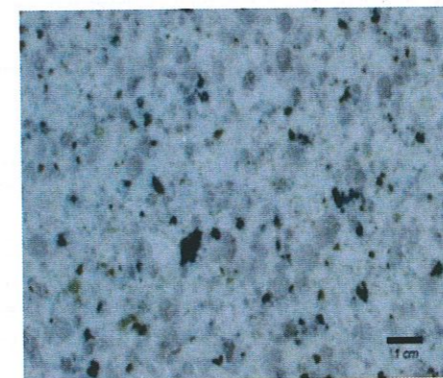
As pedras podem também exercer função estrutural quando empregadas em pisos suspensos, nos quais as placas se apoiam pelos quatro cantos em pedestais, ficando suspensas em relação ao solo.

No revestimento de fachadas (Figura 7.7), em especial, as rochas têm a função de promover isolamento (ou conforto) térmico na edificação e de proteger as estruturas do intemperismo.

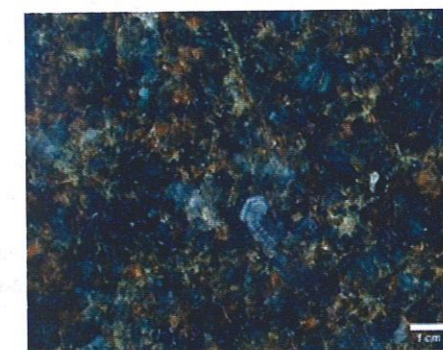
Atualmente, no Brasil, há um grupo de rochas bastante exploradas e de alto valor agregado, que são as designadas "rochas exóticas" (Figura 7.8), que tipicamente apresentam aspecto estético diferenciado, ocorrência geológica relativamente rara, seja de natureza ígnea, metamórfica ou sedimentar e produção limitada. Por geralmente exibirem estruturação muito heterogênea e baixas resistências mecânicas e, principalmente quanto aos esforços fletores, quando beneficiadas na forma de placas necessitam serem reforçadas com resina epóxi e tela de fibra de vidro, ou de náilon.



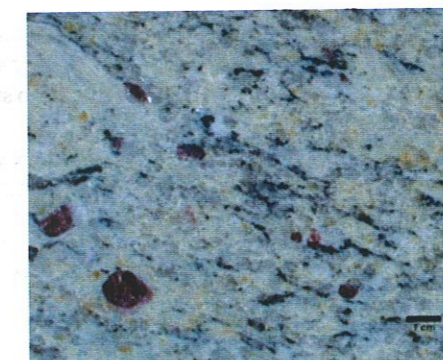
(a)



(b)

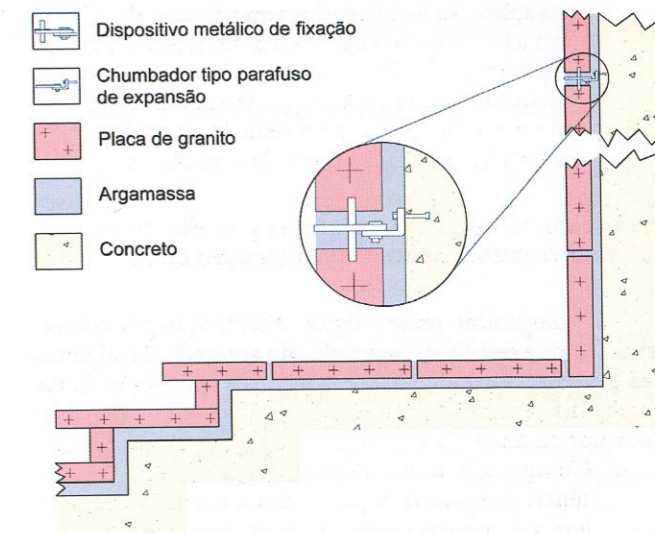


(c)



(d)

Figura 7.6 Diferentes aspectos e cores de rochas para revestimento "clássicas": (a) Vermelho Capão Bonito (biotita sienogranito); (b) Branco Ceará (albite granito); (c) Verde Labrador (charnockito com granada); (d) Santa Cecília (biotita gnaiss monzogranítico com granada e sillimanita). (Fotos: Maria Heloisa B. O. Frasca).



(a)



(b)

Figura 7.7 Tipos de revestimento de uma edificação com placas de rocha (a) e exemplo de fachada revestida com placas de rocha granítica fixadas por insertos metálicos (b). (Foto: M.H.B.O. Frasca).



Figura 7.8 Aspecto raro de rocha designada "exótica" (Foto: Maria Heloisa B.O. Frasca).

A seleção e o emprego dos materiais rochosos na construção civil são baseados nas suas propriedades físicas, mecânicas e petrográficas, cujo conhecimento é fornecido por meio da prévia caracterização tecnológica, que envolve ensaios e análises laboratoriais e de campo (no caso de amostras de sondagens sugerimos consultar o Capítulo 14 – Investigações Geotécnicas e Geoambientais, Monticeli e Tressoldi, 2013 e Delatim et al., 2013). Esta caracterização é de importância fundamental, uma vez que os materiais utilizáveis em construção civil são de natureza diversificada e, por consequência, as suas propriedades são também diferenciadas, o que se reflete nos valores obtidos nos ensaios.

Muitas vezes, por questões de prazo ou de orçamento, se recorre ao conhecimento prévio das propriedades do material rochoso, disponível na literatura ou em trabalhos anteriores. Porém não é uma prática aconselhável, pois é muito importante o conhecimento das propriedades do material

efetivamente em uso, para que sejam adotadas as medidas de segurança cabíveis, conforme o tipo de aplicação, além de subsidiar com maior eficiência, o dimensionamento das obras e permitir previsão mais realista do seu desempenho.

Os procedimentos para execução dos ensaios e análises são normalizados por várias instituições, como as já citadas ABNT, DNIT (ex-DNER), ASTM, AASHTO, BSI e DIN. Ressalta-se que os ensaios e análises aqui listados também se aplicam aos agregados reciclados, especialmente quando usados em concreto ou como base e sub-base de pavimentos.

A amostragem de materiais rochosos para ensaios, a terminologia usada e as especificações ou requisitos também são, em grande parte, normalizados.

A uniformização da terminologia usada para os diferentes tipos de materiais e formas de emprego na construção civil é muito importante, sendo objeto de várias normas (Tabela 7.1).

Normas ABNT contendo terminologia para agregados e rochas ornamentais.

Norma	Objetivo
Agregados (ABNT NBR 9935:2011)	Define os termos relativos a agregados empregados em concreto e argamassa de cimento Portland
Cimento, concreto e agregados (ABNT NBR NM 2:2000)	Apresenta os termos fundamentais e gerais utilizados na área de cimentos, concretos e agregados nos idiomas: português, espanhol e inglês
Constituintes mineralógicos dos agregados naturais (ABNT NBR NM 66:1998)	Define os termos empregados na descrição dos constituintes mineralógicos dos agregados naturais utilizados no concreto
Rochas para revestimentos de edificações (ABNT NBR 15012:2013)	Define os termos referentes à geologia dos materiais rochosos, destacando os principais tipos petrográficos, suas texturas e estruturas

Nota: NM: norma Mercosul

O elenco de propriedades a serem conhecidas, e principais normas adotadas para sua determinação – e que servirão de base para os ensaios aqui descritos –, conforme o

material (agregados para concreto ou rochas para revestimento) está relacionado nas Tabelas 7.2 e 7.3.

Normas ABNT e DNIT utilizadas para determinação das propriedades tecnológicas de agregados rochosos.

Propriedades	ABNT	DNIT
Distribuição granulométrica	NBR NM 248:2003	DNER-ME 083/98
Material fino	NBR NM 46:2003	DNER-ME 266/97
Argila em torrões e materiais friáveis	NBR 7218:2010	-
Teor de partículas leves	NBR 9936:2013	-
Impurezas orgânicas (agregado miúdo)	NBR NM 49:2001 – método colorimétrico	DNER-ME 055/95
Forma	NBR 7809:2008 – método do paquímetro	DNER-ME 086/94 – método do peneiramento
Massa específica e absorção de água	NBR NM 53:2009	DNER-ME 197/97
Umidade	-	DNER-ME 196/98
Massa específica (agregado miúdo)	NBR NM 52:2009	DNER-ME 194/98
Densidade real (agregado miúdo)	-	DNER-ME 084/95
Absorção de água (agregado miúdo)	NBR NM 30:2001	DNER-ME 081/96
Inchamento* (agregado miúdo)	NBR 6467:2006	DNER-ME 192/97
Massa unitária e volume de vazios	NBR NM 45:2006	DNER-ME 152/95
Sais, cloretos e sulfatos solúveis	NBR 9917:2009	-
Abrasão	NBR NM 51:2001	DNER-ME 035/98
Esmagamento	NBR 9938:2013	DNER-ME 197/97
Impacto Treton	-	DNER-ME 399/99

* Inchamento: fenômeno da variação do volume provocado pela absorção de água livre pelos grãos do agregado.

Normas brasileiras utilizadas para determinação das propriedades tecnológicas de rochas para revestimento e equivalentes internacionais.

Ensaio	Norma ABNT	Normas internacionais	
		ASTM	CEN*
Análise petrográfica	ABNT NBR 15845:2015 – Parte 1	ASTM C1721-09	EN 12407:2007
Densidade aparente, porosidade aparente e absorção d'água	ABNT NBR 15845:2015 – Parte 2	ASTM C97/C97M-09 ASTM C121-09 (ardósias)	EN 1936:2006 EN 13755:2008
Compressão uniaxial	ABNT NBR 15845:2015 – Parte 5	ASTM C170-14	EN 1926:2006
Módulo de ruptura	ABNT NBR 15845:2015 – Parte 6	ASTM C99-09	EN 12372:1999
Flexão	ABNT NBR 15845:2015 – Parte 7	ASTM C880 -09 ASTM C120-09 (ardósias)	EN 13161:2008
Dilatação térmica linear	ABNT NBR 15845:2015 – Parte 3	-	EN 14581:2004
Desgaste abrasivo**	ABNT NBR 12042:1992 (Amsler)	ASTM C241-13 (tráfego de pedestres) ASTM C1353-09 (Taber)	EN 14157:2004
Impacto de corpo duro	ABNT NBR 15845:2015 – Parte 8	-	EN 14158:2004
Congelamento de degelo	ABNT NBR 15845:2015 – Parte 4	-	-
Velocidade de propagação de ondas	-	ASTM D2845-08	EN 14579:2004

*CEN: Comitê Europeu de Normalização (European Committee for Standardization).

**Tratam-se de normas com mesmas finalidades, mas cujos resultados não são equivalentes.

No caso de pavimentos rodoviários, os ensaios requeridos e a normalização adotada estão a cargo do DNIT, DER (Departamento de Estradas de Rodagem) e também das prefeituras. Como exemplo, cita-se o DNIT, que disponibiliza eletronicamente tanto a relação dos ensaios que requer, como o conteúdo integral das normas.

Em enrocamentos e filtros de barragens, nos quais além dos agregados são empregados geossintéticos, existem normas específicas para avaliação do seu desempenho.

3.1 Importância da amostragem e da preparação para ensaios

A execução dos ensaios e análises deve ser precedida de amostragem criteriosa dos materiais a serem estudados. Um correto procedimento de amostragem é o primeiro passo para garantir a confiabilidade dos resultados, pois estes dependem da representatividade do material a ser caracterizado. Além disso, as amostras devem ser coletadas em volumes suficientes para atender aos estudos a serem realizados.

Mais importante, ainda, é a compreensão do significado dos termos a serem adotados para designar ou classificar os materiais, bem como para o entendimento daqueles constantes das normas destinadas à execução dos ensaios e análises.

Para a realização de ensaios tecnológicos em agregados e rochas ornamentais, a amostragem deve ser realizada pelo produtor, preferencialmente acompanhado por um técnico do laboratório, e ser a mais representativa possível do material a ser explorado, inclusive contendo as variações mais comuns (Frasca, 2013).

Os agregados destinados à fabricação de concreto têm tanto os procedimentos de amostragem (ABNT NBR NM 26:2009) como os de redução (quarteação e outros) da amostra de campo para ensaios laboratoriais (NBR NM 27:2001) normalizados.

Relativamente às rochas ornamentais, Frasca (2013) orienta que a amostra a ser encaminhada aos laboratórios deve corresponder a dois cubos, informalmente denominados bloquetes, com 30 cm a 35 cm de arestas, livre de fraturas ou quebras e devidamente identificados. Devem ser

obtidos na frente de lavra ou do maciço rochoso e não devem constituir sobras do processo de beneficiamento (aparas, casqueiros etc.). Caso a rocha a ser caracterizada apresente estruturação, as amostras devem ser retiradas de acordo com o indicado na Figura 7.9.

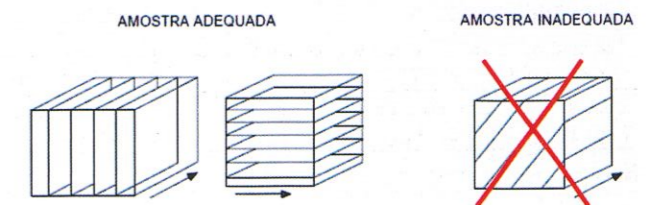


Figura 7.9 Orientação para a amostragem de rochas com estruturação gnáissica. A seta indica o sentido do alinhamento dos minerais. (Desenho: Fabiano C. Navarro) (Fonte: Frasca (2013), modificada).

A rigorosa preparação dos corpos de prova para quaisquer ensaios é fundamental, não só para a obtenção correta do valor do parâmetro desejado, como para possibilitar a avaliação e comparação de valores obtidos para materiais semelhantes em laboratórios diferentes ou pelo mesmo laboratório em épocas distintas.

A ASTM publicou em 2014 (ASTM C1799/C1799M-14 – *Standard Guide to Dimension Stone Test Specimen Sampling and Preparation*), guia para a amostragem, seleção, preparação e acondicionamento de amostras que serão usadas para testar as propriedades da rocha ornamental, bem como contém as recomendações básicas para a preparação de corpo de prova e informações sobre as variáveis que devem ser consideradas.

3.2 Petrografia

As análises petrográficas são realizadas mediante o exame sob lupa, caso dos agregados miúdos, e de seções delgadas de rochas em microscópicos de luz polarizada (microscópios petrográficos). Compreendem a determinação e

a quantificação dos minerais constituintes e suas inter-relações, descrição dos padrões de alteração, deformação e outros. São normalizadas, no caso de estudo de rochas para revestimento, agregados para concreto e outros, pela ABNT.

3.2.1 Agregados miúdos (areia)

A análise petrográfica do agregado miúdo para concreto (ABNT NBR 7389-1:2009) é feita por observação de frações granulométricas selecionadas (> 6,3 mm, > 4,8 mm, > 1,2 mm, > 0,6 mm, > 0,3 mm e > 0,15 mm) sob lupa estereoscópica e identificação e quantificação das **fases minerais** presentes em cada fração, conforme sua potencial reatividade com o concreto, bem como da avaliação da forma dos grãos (angulosa, subangulosa, subarredondada ou arredondada).

Fases minerais:

- **inócuos:** quartzo, feldspatos, minerais ferromagnesianos (piroxênio, anfibólio), fragmentos de rocha (granito, calcário), turmalina;
- **potencialmente deletérios:** quartzo policristalino, quartzito, argilito;
- **deletérios⁴:** matéria orgânica, opala (sílica amorfa), calcedônia (sílica microcristalina) piritita, limonita, gipso;
- **friáveis:** minerais alterados, torrões de argila, mica, concreções limoníticas.

A presença e/ou determinadas porcentagens de torrões de argila, minerais friáveis, deletérios e potencialmente deletérios e outros pode limitar a utilização do agregado ou requerer estudos mais aprofundados. As especificações da ABNT encontram-se na Tabela 7.4.

Especificações ABNT para agregados.

Propriedade	Agregados - concreto (NBR 7211)		Agregados - lastro ferroviário (NBR 5564)
	Graúdo	Miúdo	
Resistência ao desgaste (abrasão Los Angeles) (ABNT NBR NM 51)	< 50%	n.a.	máx. 30%
Resistência ao choque (índice de tenacidade Treton)*	n.e.	n.a.	máx. 25%
Massa específica aparente*	n.e.	n.e.	mín. 2 500 kg/m ³
Porosidade aparente*	n.e.	n.e.	máx. 1,5%
Absorção de água*	n.e.	n.e.	máx. 0,8%
Forma média das partículas*	n.e.	n.e.	cúbica
Índice de forma (ABNT NBR 7809)	< 3	n.a.	n.e.
Partículas não cúbicas*	-	-	máx. 15%
Materiais carbonosos (ASTM C 123)	máx. 0,5% (ca) máx. 1,0% (cna)	máx. 0,5% (ca) máx. 1,0% (cna)	n.e.
Impurezas orgânicas (ABNT NBR NM 49)	n.e.	Coloração da solução mais clara que a padrão	n.e.
Material pulverulento (ABNT NBR NM 46)	n.e.	n.e.	máx. 1%
Torrões de argila e material friável (ABNT NBR 7218)	máx. 1,0% (ca) máx. 2,0% (csds) máx. 3,0% (oc)	máx. 3,0%	máx. 0,5%
Fragmentos macios e friáveis*	n.e.	n.e.	máx. 5%
Material fino que passa através da peneira 75 µm (ABNT NBR NM 46)	máx. 1,0%	máx. 3,0% (csds) máx. 5,0% (cpds)	n.e.
Teor de cloretos (ABNT NBR 9917/14832)	n.e.	< 0,2% (cs) < 0,1% (car) < 0,01% (cp)	n.e.
Teor de sulfatos solúveis (ABNT NBR 9917)	n.e.	< 0,1%	n.e.
Granulometria	ver norma	ver norma	ver norma
Compressão uniaxial*	n.e.	n.a.	100 MPa
Resistência à intempérie*	n.e.	n.e.	máx. 10%

Nota: n.e. = não especificado; n.a. = não se aplica; ca = concreto aparente, cna = concreto não aparente, csds = concreto sujeito a desgaste superficial, oc = outros concretos, cs = concreto simples, car = concreto armado, cp = concreto protendido

* procedimentos apresentados em anexos à norma ABNT NBR 5564:2011.

Na ausência de normalização específica, recomenda-se seguir os mesmos procedimentos para a análise de areia para uso em argamassa.

3.2.2 Agregados graúdos e rochas para revestimento

A análise petrográfica estabelece a classificação da rocha e compreende a descrição macroscópica (estruturação, cor) e microscópica (mineralogia, textura, granulação), com

ênfase em características que possam influenciar o comportamento mecânico e a durabilidade sob as condições de uso a que a rocha será submetida, tais como: minerais potencialmente deletérios, estado de alteração dos minerais, feições de deformação, padrão de microfissuramento e outros (Frasca, 2013).

⁴ Minerais deletérios: constituem aqueles que podem provocar efeitos prejudiciais quando da sua utilização caso, por exemplo, do seu uso em agregado para concreto. Vide item 3.3 a seguir.

A petrografia é muito importante para análise dos dados tecnológicos, frequentemente esclarecendo as diferenças nas propriedades físicas e/ou mecânicas de rochas aparentemente semelhantes. Também é essencial para caracterizar e diagnosticar deteriorações em rochas ou no concreto.

A natureza petrográfica e o estado de alteração podem ser condicionantes para a utilização do agregado, evidenciando a potencialidade da reatividade dos álcalis do cimento com minerais componentes da rocha ou a maior ou menor capacidade do asfalto fixar na superfície da partícula.

Os procedimentos para descrição petrográfica de agregados graúdos e rochas para revestimento contemplam a descrição de feições como cor, estruturação da rocha, granulação, microfissuramento, grau de alteração, minerais de alteração ou potencialmente alteráveis e tipos de minerais de preenchimento de fraturas. São objeto de várias normas nacionais, de diferentes entidades, cada qual enfocando as características distintas para o uso pretendido da rocha (ABNT NBR 15845-1:2015 - rochas para revestimento; DNER-IE 006/94 - materiais rochosos usados em rodovias; ABNT NBR 7389-2:2009 - agregado graúdo para concreto).

Adicionalmente, a norma ABNT NBR 7389-2:2009 estabelece método para a identificação e estimativa das fases minerais deletérias: quartzo microgranular, calcedônia, quartzo deformado, clorofeita, zeólita, vidro vulcânico, vidro devitrificado, opala.

3.3 Reatividade potencial

Reações entre os álcalis do cimento Portland e determinados componentes em alguns tipos de agregados, designadas de **reações álcali-agregado**, podem resultar na expansão e fraturamento do concreto, por exposição à umidade, ao longo do tempo, devido à formação de produtos gelatinosos, expansíveis. Provocam, assim, a degradação das estruturas em concreto e, conseqüentemente, da obra.

Dependendo da natureza do componente reativo, são reconhecidos dois tipos de reações (ASTM C1778:2014): (a) **reação álcali-silica**, que envolve vários tipos de minerais silicosos amorfos (ex. chert, opala, calcedônia, cristobalita, tridimita e vidro vulcânico) e também, quartzo microcristalino, geralmente resultante da deformação da rocha por processos tectônicos; (b) **reação álcali-carbonato**, que envolve rochas carbonáticas contendo dolomita.

É importante ressaltar, como apontado pela ASTM C1778: 2014, que o risco para ocorrência de reações álcali-agregado depende da natureza do projeto, sendo significativo para as estruturas expostas a umidade contínua, como barramentos de reservatórios de água ou usinas hidrelétricas.

O prejuízo decorrente da ocorrência de reação álcali-agregado (essencialmente álcali-silica) em barragens de concreto fez com que, atualmente, a investigação petrográfica e a realização de ensaios laboratoriais voltados à simulação da patologia e para a seleção de aditivos sejam rotineiros em projetos de barragens.

A norma ABNT NBR 15577:2008 "Agregados - Reatividade álcali-agregado", em seis partes, trata dos vários aspectos ligados a esta patologia, entre eles o estabelecimento de requisitos para uso de agregados em concreto, tendo em vista as medidas necessárias para evitar a ocorrência de reações expansivas deletérias devidas à reação álcali-agregado, e prescreve a amostragem e os métodos de ensaios necessários à verificação desses requisitos (determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado e em

prismas de concreto). Relativamente à análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto, contempla a quantificação de quartzo microgranular e a medição do ângulo de extinção ondulante do quartzo (<15°, 15-30°, >30°).

3.4 Adesividade

Dependendo da natureza petrográfica e do estado de alteração, o agregado poderá apresentar maior ou menor capacidade de fixar o asfalto na sua superfície.

Os agregados provenientes da britagem de rochas não-quartzosas (por exemplo, basaltos) têm maior afinidade com o asfalto do que os de rochas quartzosas (por exemplo, granitos). Para garantir a adesividade satisfatória, neste caso, há necessidade de se introduzir aditivos no asfalto, que dão maior eficiência na adesão asfalto/agregado.

A adesividade é determinada em laboratório, pela verificação da resistência ao descolamento da película de asfalto em amostra de agregado, que previamente seca, foi imersa em produto asfáltico padrão. A resistência ao descolamento da película de asfalto é verificada visualmente e o resultado é expresso, qualitativamente: adesividade satisfatória ou adesividade insatisfatória.

3.5 Densidade aparente, porosidade e absorção de água

A determinação da **densidade aparente** da rocha tem importância para o cálculo do traço do concreto e na avaliação do peso do agregado ou de uma placa de revestimento, para seu transporte, colocação, etc. Reflete o estado de sanidade do material, pois rochas alteradas apresentam massas específicas menores que as das mesmas no estado inalterado (rocha sã), constituindo-se num importante elemento para análise dos dados da caracterização tecnológica.

A **porosidade** da rocha, que está relacionada aos espaços entre grãos, nas rochas sedimentares, e às microfissuras e/ou presença de minerais alterados ou de alteração, nas rochas ígneas e metamórficas, tem influência direta na resistência do agregado e da placa de revestimento. Influi também na quantidade de água para confeccionar o concreto, pois uma rocha que apresente alta porosidade apresentará alta absorção de água e, com isto, deverá conduzir a um maior consumo de água e de cimento na elaboração do concreto.

A alta permeabilidade da rocha poderá, ainda, propiciar ataque dos seus minerais pela própria água ou por outros agentes químicos, uma vez que a área de contato solução-mineral torna-se maior.

Enquanto a **absorção** mede a quantidade de água na condição saturada, a umidade mede a quantidade de água na condição real, obtida pesando-se a rocha ou a mistura de agregado no estado natural e depois de secas em estufa por 24 horas (Farias e Palmeira, 2010).

Os valores da absorção de água e porosidade são correlacionáveis com os de resistência mecânica, sendo que os valores de resistência mecânica tendem a decrescer à medida que a porosidade e absorção de água aumentam.

Estes parâmetros são determináveis pela pesagem de corpos de prova nos estados seco, saturado e saturado em condição submersa, por meio das seguintes relações:

- **densidade aparente** (ρ_a), em kg/m³

$$\rho_a = \frac{M_{sec}}{(M_{sat} - M_{sub})} \times 1000 \quad (\text{Eq. 7.1})$$

NOTA: Valor assumido para a densidade aparente da água = 1 000 kg/m³.

- **porosidade aparente** (η_a), em porcentagem.

$$\eta_a = \frac{(M_{sat} - M_{sec})}{(M_{sat} - M_{sub})} \times 100 \quad (\text{Eq. 7.2})$$

- **absorção de água** (α_a), em porcentagem.

$$\alpha_a = \frac{(M_{sat} - M_{sec})}{M_{sec}} \times 100 \quad (\text{Eq. 7.3})$$

onde:

M_{sec} : massa seca (g);
 M_{sat} : massa saturada (g);
 M_{sub} : massa submersa (g).

3.6 Outros ensaios para caracterização de agregados

Além dos ensaios citados há outros ensaios importantes para a caracterização tecnológica de agregados, especialmente para uso na elaboração de concreto, que constitui o maior uso destes materiais em volume e valor. Sugere-se consultar também Andriolo (2015).

3.6.1 Distribuição granulométrica

A distribuição granulométrica do agregado é obtida por peneiramento em um conjunto de peneiras sucessivas (que atendem a ABNT NBR NM ISO 3310-1:1997), em duas séries, conforme definidas na ABNT NBR 7211:2009, com as seguintes aberturas nominais: a série normal (75 mm, 37,5 mm, 19 mm, 9,5 mm, 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 600 μ m, 300 μ m, 150 μ m) e a série intermediária (63 mm, 50 mm, 31,5 mm, 25 mm, 12,5 mm, 6,3 mm). De acordo com Sbrighi Neto (2011), os limites granulométricos do agregado miúdo bem como as variações permitidas para o **módulo de finura**⁵ são importantes por diversas razões, principalmente na trabalhabilidade e no custo do concreto.

Os agregados graúdos (pedra britada e seixos) são comumente classificados pela dimensão nominal do intervalo de peneiras (diâmetro máximo e mínimo) em que os grãos ou fragmentos retidos respondem por porcentagem igual ou superior a 95%: brita 0 (4,8-9,5 mm), brita 1 (9,5-19 mm), brita 2 (19-25 mm), brita 3 (25-50 mm), brita 4 (50-76 mm), brita 5 (78-100 mm) (Frazão, 2002).

Os limites de granulometria para a classificação de agregados em graúdos ou miúdos pode variar, conforme

⁵ **Módulo de finura** – MF: soma das porcentagens retidas acumuladas na série normal de peneiras dividido por 100.

a aplicação ou o órgão normalizador (vide ABNT NBR 7211:2009 e DNER EM 037/97).

3.6.2 Substâncias nocivas

Alguns componentes dos agregados graúdos e miúdos podem ser nocivos ao concreto (e argamassas, em geral), como a presença de material carbonoso, impurezas orgânicas, sais solúveis (cloreto de sódio, por exemplo, comum em areias marinhas), torrões de argila e material friável, partículas muito finas (< 75 μ m) e outros.

Torrões de argila, impurezas orgânicas e demais materiais friáveis eventualmente presentes podem afetar a resistência do concreto, além de provocar a formação de cavidades originadas pela remoção, com o tempo, de materiais friáveis concentrados.

Os sais solúveis, quando associados aos agregados, provocam mudanças na pega e no endurecimento do concreto (e argamassas), além de promover sua deterioração.

3.6.3 Massa unitária

Quando os agregados são compactados no lastro de uma ferrovia ou, então, misturados com cimento e água para produzir um concreto hidráulico, resultará um determinado índice de vazios que dependerá da distribuição granulométrica e da forma das partículas. O arranjo resultante terá influência na resistência do produto e na economia de ligante.

Esta informação é fornecida pela determinação da massa unitária resultante da relação da massa do agregado, no estado compactado ou solto, em um recipiente-padrão, pelo volume deste recipiente.

3.6.4 Forma dos fragmentos

Na caracterização tecnológica de agregados, uma importante propriedade a ser conhecida é a forma apresentada pelos seus fragmentos, especialmente quando obtidos por processos de fragmentação mecânica de rochas (britagem), pois o material resultante tem formas e tamanhos variados, devido à estruturação da rocha, além das condições de britagem, que exerce influência marcante na forma dos fragmentos.

Uma estrutura “maciça”, como a apresentada por granitos e basaltos compactos, determina uma maior frequência da forma cúbica no material britado. Entretanto, em rochas com estrutura xistosa ou gnáissica, o produto britado, comumente, apresenta formas alongadas (ou prismáticas) e lamelares (ou achatadas).

A determinação da forma do fragmento de rochas pode ser feita de diversas maneiras, sendo a mais comum a técnica de medir o comprimento (a), a largura (b) e a espessura (c) do fragmento, inscritos em um paralelogramo e estabelecer as relações entre estes parâmetros. (Figura 7.10). Procedimentos do ensaio são descritos no Anexo A da norma ABNT NBR 5564:2011 e em Frazão (2002).

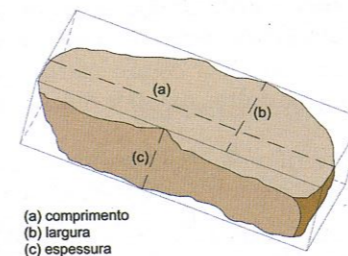


Figura 7.10 Medidas para a determinação da forma dos agregados e classificação da forma dos fragmentos, segundo ABNT NBR 5564:2011.

Relação b/a	Relação c/b	Classificação da forma
$\geq 0,5$	$\geq 0,5$	Cúbica
$< 0,5$	$\geq 0,5$	Alongada
$\geq 0,5$	$< 0,5$	Lamelar
$< 0,5$	$< 0,5$	Alongada-Lamelar

3.6.5 Abrasão

Os materiais rochosos, na forma granular, destinados ao uso como agregado para concretos (hidráulico e asfáltico) e lastro de ferrovia poderão estar sujeitos ao desgaste e ao impacto, tanto na fase de preparação dos concretos como na socagem do lastro, além das solicitações do tráfego. Para verificar a resistência dos agregados a estas solicitações, o ensaio comumente utilizado é o de abrasão na máquina Los Angeles.

Neste ensaio, uma amostra, com granulometria e massa pré-fixada, é introduzida em um tambor de aço, juntamente com esferas também de aço, com massa entre 390 g e 445 g. O tambor girará a uma velocidade entre 30 rpm e 33 rpm até completar 500 rotações (para as graduações A, B, C e D) ou 1000 rotações (para as graduações E, F e G). Detalhes do ensaio e do equipamento podem ser encontrados em DNER-ME 035/98.

O resultado será expresso em porcentagem da relação entre a massa de material passante na peneira de abertura 1,7 mm com a massa inicial. Quanto maior a porcentagem, menor será a resistência do agregado.

3.6.6 Esmagamento

Os agregados, quando usados em pavimento asfáltico ou lastro de ferrovia, sofrem carregamentos do tipo compressional pela ação do peso e do tráfego de veículos, podendo se desagregar ou produzir pó pela quebra de cantos e arestas.

De acordo com a ABNT NBR 9938:2013 e Frazão (2002), esta situação é simulada pelo ensaio de esmagamento em que o agregado, na dimensão entre 12,5 e 9,5 mm, é compactado de maneira padronizada, em um cilindro rígido de aço e submetido a carregamento até alcançar 40 t.

O resultado é apresentado pela média de dois ensaios e expresso pela porcentagem de material desagregado, com dimensões menores que a abertura da malha de 2,4 mm, em relação à massa inicial.

3.7 Outros ensaios para caracterização de rochas para revestimento

A estrutura da rocha é uma feição muito relevante na resistência mecânica das rochas, visto que tem influência

⁶ A norma ABNT NM 51:2001 define seis graduações (A a G), cada qual consistindo em misturas de faixas granulométricas específicas (variando entre 75 mm e 2,36 mm), ora mais fina (ex. D = 5000 \pm 10 g de material passante na peneira 4,76 mm e retido na peneira 2,36 mm), ora mais grossa, abrangendo também intermediárias, procurando representar a faixa granulométrica do agregado a ser caracterizado.

direta nesta propriedade. A estrutura maciça, usual nas rochas ígneas, confere características físico-mecânicas constantes em todas as direções, ou seja, **isotropia**. A isorientação mineral e as deformações tectônicas de parte das rochas metamórficas, e algumas estruturas (acamamento, por exemplo) de rochas sedimentares, atribui-lhes **anisotropia**.

3.7.1 Compressão uniaxial

A resistência de um material rochoso a esforços de compressão é um índice de qualidade importante para qualificá-lo para todos os tipos de uso, especialmente para exercer função estrutural. O ensaio de compressão é executado em corpos de prova regulares (cúbicos ou cilíndricos), que são submetidos a cargas lentas e progressivas até que ocorra a sua ruptura. O resultado é expresso pela relação entre a força que provoca a ruptura e a área de carregamento dos corpos de prova:

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (\text{Eq. 7.4})$$

onde:

σ_c = tensão de ruptura na compressão (MPa);
 P = força máxima de ruptura (kN);
 A = área da face do corpo de prova submetida a carregamento (m²).

3.7.2 Flexão

As placas de revestimento de edificações, particularmente as fixadas por ancoragem metálica, sem argamassa, sofrem a ação da força dos ventos, principalmente nas grandes alturas, submetendo-as à flexão. Solicitações à flexão ocorrem também, no manuseio e transporte de placas, no uso em degraus de escadas e em tampos de pias e balcões. Em se tratando do emprego de placas em pisos suspensos a resistência à flexão é decisiva na escolha da rocha.

A resistência à flexão pode ser determinada por dois métodos de ensaio (Figura 7.11):

- **módulo de ruptura ou flexão por carregamento em três pontos:** que simula a solicitações de flexão em rochas empregadas em edificações (por cargas ou outros esforços) ocorrem principalmente quando são utilizadas como telhas (ardósias), pisos elevados, degraus de escadas, tampos de pias e balcões. Permite, então, avaliar a aptidão para uso em revestimento, ou elemento estrutural, possibilitando o cálculo de parâmetros, como espessura.
- **flexão por carregamento em quatro pontos:** que simula os esforços flexores em placas de rocha, com

espessura predeterminada, no caso simulando efeito do vento em placas de rocha fixadas em fachadas com ancoragens metálicas. Por isso é obrigatório em rochas destinadas a esse fim, preferencialmente em amostras com as mesmas características (tamanho, espessura e acabamento) daquelas que serão utilizadas na obra.

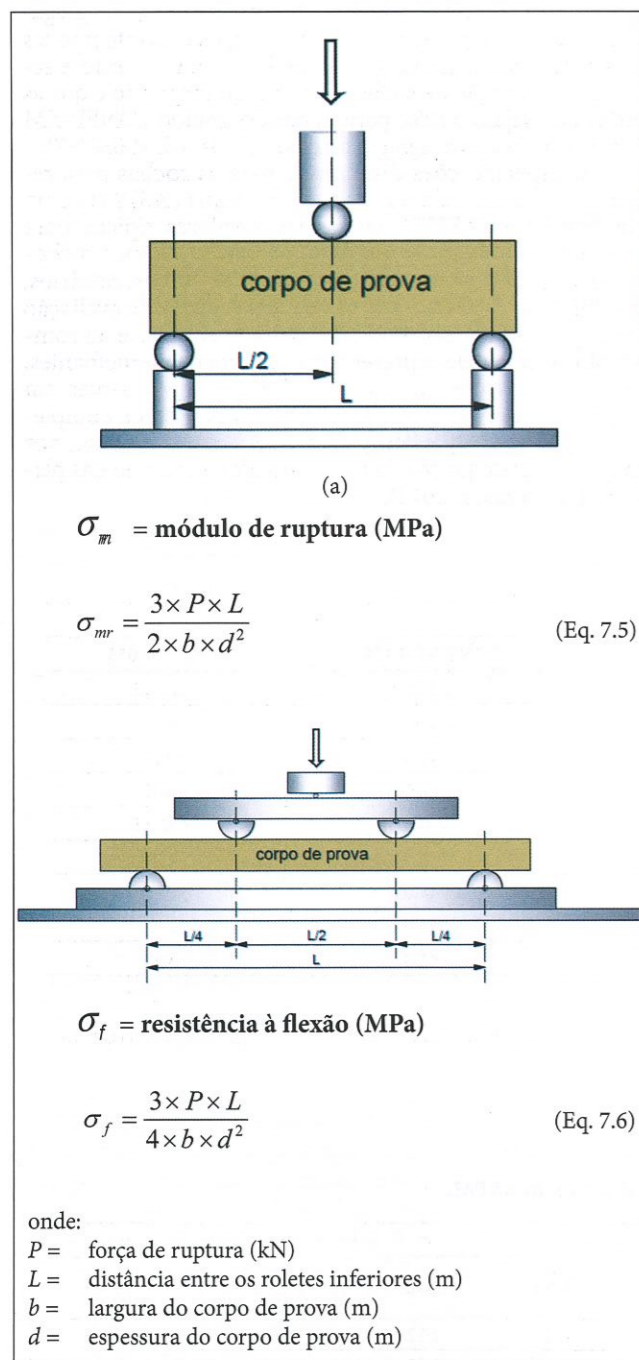


Figura 7.11 Esquema dos ensaios de módulo de ruptura (a) e de flexão por carregamento em quatro pontos (b), conforme recomendado na norma ABNT NBR 15845-6:2015 e ABNT NBR 15845-7:2015, respectivamente. Fonte: Frascá, 2013 modificada.

3.7.3 Desgaste por atrito

Quando o material rochoso se destina ao uso como piso de edificações ou de unidades industriais, haverá a

solicitação de desgaste por atrito devido ao tráfego de pedestres ou ao rolar e deslizar de cargas. A rocha deverá, para resistir a estes esforços, apresentar coesão satisfatória e ser constituída de minerais, de dureza capaz de suportar as solicitações de desgaste.

Os ensaios para verificação desta propriedade são diversos. No Brasil, o mais comum é aquele efetuado na máquina Amsler, na qual dois corpos de prova, na forma de placas, são submetidos simultaneamente ao desgaste, por areia quartzosa, em uma pista giratória circular de aço.

O desgaste é determinado pela redução de altura do corpo de prova para os percursos de 500 e 1.000 m. Os resultados são expressos em milímetros e correspondem à média aritmética dos valores de desgaste dos dois corpos de prova. Detalhes do ensaio e do equipamento podem ser encontrados na ABNT NBR 9938:2013 e em Quitete (2002).

3.7.4 Dilatação térmica linear

As rochas, como a maioria dos materiais de construção, apresentam variação de volume com a variação de temperatura. Este comportamento é, em especial, importante em revestimentos com pedras, seja em pisos, seja em paredes, em exteriores. Assim, na colocação das placas devem ser previstas juntas para evitar que, pela dilatação, uma placa se encoste na outra, provocando tensionamento entre elas, o que pode resultar no descolamento e até queda das mesmas. Para o estabelecimento do espaço das juntas é importante conhecer o coeficiente de dilatação térmica das rochas.

O coeficiente de dilatação térmica linear é calculado pela razão entre o valor do incremento do comprimento de um corpo de prova e o produto do valor do seu comprimento original pela faixa de temperatura adotada nos ensaios (em geral, variando de 0 a 50°C), expresso em mm/m.°C.

3.7.5 Tenacidade

Quando o material rochoso se destina ao revestimento de pisos é realizado e ensaio de resistência ao impacto de corpo duro, que consiste na queda progressiva de uma esfera de aço de 1 kg, a partir de 20 cm e a intervalos de 5 cm, até que ocorra a ruptura, sobre uma placa de rocha assentada sobre areia.

O resultado é expresso pela energia de ruptura assim calculada:

$$W = m \times g \times h \quad (\text{Eq. 7.7})$$

onde:
W = energia de ruptura (J);
m = massa da esfera (kg);
g = aceleração da gravidade (9,806 m/s²);
h = altura média de ruptura (m).

4

Especificações

As especificações são referências qualitativas e/ou quantitativas estabelecidas com o objetivo de permitir a avaliação da qualidade dos materiais rochosos para atender às exigências de um projeto e/ou orientar a seleção dos materiais mais apropriados para uso na construção civil. Constituem-se na proposição de valores limites, máximos e mínimos, para as propriedades determinadas nos diferentes materiais rochosos, com o objetivo de auxiliar a avaliação da qualidade tecnológica das rochas, independentemente, em princípio, do tipo de utilização futura. O estabelecimento de especificações tem sido alvo de trabalho de várias comissões e de publicações no âmbito da ABNT, DNIT, ASTM e CEN.

Os valores especificados pela ABNT para a seleção de materiais a serem usados como agregados em concreto e lastro ferroviário, e os valores especificados para agregado para concreto (hidráulico e asfáltico) pelo DNIT encontram-se na Tabela 7.4, anteriormente apresentada.

O DNIT (DNER-ME 089/94) determina que o agregado destinado ao emprego em concreto exposto às intempéries seja submetido ao ensaio de durabilidade por imersão e secagem com solução de sulfato de sódio ou magnésio e que as perdas não sejam >12%, para agregado graúdo (DNER-EM 037/97) e >10%, para agregado miúdo (DNER-EM 038/97).

As especificações disponíveis para as rochas para revestimento, tanto pela normativa americana (ASTM) como pela brasileira (ABNT), estabelecem valores típicos para propriedades físicas e mecânicas de grandes grupos rochosos (Tabela 7.5 – granitos e Tabela 7.6 – mármore, calcários, travertinos, arenitos/quartzitos) visando orientar a avaliação tecnológica de um determinado material com base na comparação com aqueles apresentados por rochas semelhantes. Assim, em caso de características muito discrepantes em relação às esperadas, recomenda-se investigações complementares ou alterações no projeto arquitetônico, como, por exemplo, a readequação da espessura e/ou tamanho das placas pétreas (Frascá, 2013).

Especificações para granitos*, segundo ABNT e ASTM.

Propriedade	Norma	
	ABNT NBR 15844	ASTM C 615
Densidade aparente (kg/m ³)	>2.550	≥2.560
Porosidade aparente (%)	1,0	n.e.
Absorção d'água (%)	<0,4	≤0,4
Compressão uniaxial (MPa)	>100	≥131
Módulo de ruptura (carregamento em três pontos) (MPa)	>10,0	≥10,34
Flexão (carregamento em quatro pontos) (MPa)	>8,0	≥ 8,27
Coefficiente de dilatação térmica linear [10 ⁻³ mm/(m.°C)]	<8,0	n.e.
Impacto de corpo duro (m)	>0,3	n.e.
Desgaste Amsler (mm/1000 m)	<1,0	n.e.

Nota: n.e. = não especificado.

* Granito (denominação comercial): conjunto de rochas silicáticas granulares e compactas, de estrutura orientada ou não, independente de sua classificação petrográfica (ABNT NBR 15012:2013).

Especificações para mármore, calcários, travertinos, arenitos e quartzitos, segundo ASTM.

Norma	Tipo de Rocha	Uso	ρ	α	σ _c	σ _{trf}	σ _f
ASTM C 503	Calcita Mármore	Exterior	≥2.595	≤0,20	≥52	≥7	≥7
	Dolomita Mármore		≥2.800				
ASTM C 568	Calcário	I – Baixa densidade	≥1.760	≤12	≥12	≥2,9	n.e.
		II – Média densidade	≥2.160	≤7,5	≥28	≥3,4	
		III – Alta densidade	≥2.560	≤3	≥55	≥6,9	
ASTM C 1527	Travertino	I – Exterior	≥2.305	≤2,5	≥52	≥6,9	≥6,9
		II – Interior					
ASTM C 616	Arenito	I – Arenito (≥60% sílica livre)	≥2.003	£8	≥27,6	≥2,4	n.e.
		II – Arenito quartzítico (≥90% sílica livre),	≥2.400	≤3	≥68,9	≥6,9	
		III – Quartzito (≥95% sílica livre)	≥2.560	≤1	≥137,9	≥13,9	

Nota: ρ = densidade aparente (kg/m³); α = absorção d'água (%); σ_c = resistência à compressão uniaxial (MPa); σ_{trf} = resistência à tração na flexão (MPa); σ_f = resistência à flexão (MPa); n.e. = não especificado.

Estas especificações, por fornecerem os valores típicos dos diferentes grupos rochosos, também fornecem valiosas informações sobre as características diferenciais destes litotipos.

Relativamente às ardósias as normas ASTM C 629:2015 e ASTM C 406:2015 fornecem as especificações para pisos e telhados, respectivamente.

A normativa europeia não estabelece especificações, mas sim os requisitos (dimensionais, físicos e mecânicos) para a utilização de rochas ornamentais nas diferentes

aplicações (revestimento de pisos, de fachadas e até pedras utilizadas em meio fio e pavimentos). São determinados a partir do conhecimento das propriedades tecnológicas da rocha mediante ensaios laboratoriais, com o intuito de garantir estatisticamente os valores característicos e as propriedades do produto, conforme o uso e projeto arquitetônico a que se destinam. Também estabelece procedimentos de controle de fornecimento e recepção em obras.

5

Alteração e alterabilidade

A **alteração** corresponde aos processos naturais de intemperismo que as rochas estão submetidas. Estes mecanismos podem ser físicos, que se manifestam pela desagregação, que leva à perda da coesão e à progressiva individualização dos constituintes minerais; ou químicos, resultando na decomposição, que implica em modificações progressivas na natureza dos minerais. A combinação destes dois mecanismos é, porém, frequente e a predominância de um sobre o outro dependerá sempre das condições ambientais. (Frazão, 2012).

No entanto, ao serem utilizadas na construção civil, os materiais rochosos são expostos a condições ambientais diferentes daquelas em que se encontravam na natureza, bem como a novas solicitações de uso, as quais também passarão a atuar na sua alteração.

A **alterabilidade** é, então, definida como a aptidão da rocha em se alterar em função do tempo, mas, neste caso considerado em escala humana, ou seja, em períodos de dias a anos, nos quais os fenômenos ocorrem concomitantemente ao uso e às obras de engenharia (Aires-Barros, 1991), sendo função de:

- características intrínsecas da rocha (tipo e natureza da rocha, grau e tipo de alteração dos minerais, do grau de fissuramento, porosidade e configuração do sistema poroso e outros);
- fatores extrínsecos, relacionados às características ambientais em que ocorre a alteração (temperatura, pH, umidade) e das solicitações da situação de uso, sendo que para estes, não são relevantes só a intensidade, mas também o caráter cíclico;
- tempo.

Ensaio de alteração acelerada em agregados.

Ensaio	Método/objetivo
Saturação em solução de sulfato de sódio ou de magnésio (DNER-ME 089/94)	Ciclos de saturação em solução de sulfato de sódio ou de magnésio, e secagem em estufa, visando verificar a resistência dos agregados à expansão, decorrente da cristalização dos sais nos poros. Quanto mais alterado for o agregado, maior será sua porosidade e, conseqüentemente, maior será a possibilidade de desagregação.
Saturação em água (não normalizado)	Ciclos de saturação em água e secagem em estufa buscam comprovar a resistência dos minerais do agregado à ação hidrolítica e às variações de temperatura.
Imersão em solução de etileno-glicol (não normalizado)	Imersão em etileno-glicol para caracterizar a suscetibilidade de argilominerais eventualmente presentes nos agregados, a se expandirem pela ação do etileno-glicol absorvido e, assim, causarem desagregação.

Ensaio de alteração acelerada em rochas ornamentais.

Ensaio	Objetivo
Congelamento e degelo (EN 12371 e ABNT NBR 15845:2015 - Parte 3)	Verificação da eventual queda de resistência da rocha (por ensaios mecânicos) após 25 ciclos de congelamento e de degelo.
Choque térmico (EN 14066)	Verificação da eventual queda de resistência da rocha (por ensaios mecânicos) após simulação de variações térmicas bruscas que propiciem dilatação e contração constantes (Frasca; Yamamoto 2010)
Exposição a atmosferas salinas (EN 14147)	Simulação, em câmaras climáticas, de ambientes marítimos ricos em sais e potencialmente degradadores e verificação visual das modificações decorrentes (Frasca, 2003).
Imersão parcial em solução ácida (EN 13919)	Imersão parcial de corpos de prova em soluções de natureza ácida (ácido sulfúrico) para simulação da cristalização de sais (eflorescências e subeflorescências) na face polida dos ladrilhos (Frasca, 2003).
Saturação e secagem em solução salina (EN 12370)	Consiste em número determinado de ciclos de imersão de corpos de prova em solução salina e secagem em estufa. Rochas porosas (arenitos, por exemplo) podem se desintegrar antes do final do ensaio. Pouco apropriado para granitos.

Resumo

Na Engenharia, trabalha-se com uma grande variedade de tipos rochosos com características intrínsecas (mineralogia, textura, estrutura) praticamente exclusivas, dependentes das condições particulares de formação de cada corpo rochoso, que por sua vez condicionam suas propriedades tecnológicas. O conhecimento destas propriedades por meio de ensaios laboratoriais e de campo é essencial para o projeto, planejamento e execução de obras, nos mais apropriados padrões de qualidade, custos e prazos.

Os principais usos da rocha na construção civil, seja como agregado (para pavimento, lastro de ferrovias, enrocamento, drenos e filtros), seja como rocha para revestimento (fachadas, pisos e paredes), são apresentados, com ênfase nas funções dos materiais rochosos nestas aplicações e nas propriedades requeridas para o desempenho adequado sob as condições de uso a que serão submetidos.

A determinação das diferentes propriedades é objeto de extensa normalização, sendo aqui destacadas as normas (ABNT e outras) e os ensaios laboratoriais mais rotineiros para identificar a presença de minerais deletérios e caracterizar as principais propriedades, como densidade, absorção de água, compressão uniaxial, dilatação térmica e outros. Algumas das especificações que norteiam a análise dos resultados obtidos nestes ensaios são mostradas, especificações essas que aprovam ou limitam a utilização dos materiais.

E, finalmente, são apresentados e discutidos os conceitos de alterabilidade de rochas e os ensaios de alteração acelerada destinados à previsão de alterações do material rochoso em situações de uso selecionadas.

Questões de revisão

1. Descreva as principais formas de aplicação das rochas na construção civil.
2. De que maneira são definidos os agregados reciclados visando seu uso na construção civil?
3. Conceitue rochas para revestimento e mencione suas formas mais comuns de aplicação.
4. As principais aplicações de agregados na construção civil são: na elaboração de concretos, em pavimentos, lastros de ferrovias, enrocamentos, drenos e filtros. Explique cada um destes usos e as respectivas funções dos agregados.
5. Relacione alguns aspectos da composição mineralógica, distribuição granulométrica, forma e resistência mecânica dos agregados em suas diferentes funções descritas na questão anterior.
6. Descreva as principais propriedades requeridas para se obter durabilidade adequada de rochas em revestimento de edificações.
7. Explique os principais procedimentos da caracterização petrográfica para utilizar rochas em revestimentos e agregados para elaboração de concreto.
8. Os ensaios de reatividade potencial e de adesividade são importantes para utilização dos agregados em concreto e em pavimentos, respectivamente. Como estes ensaios são realizados?
9. Descreva resumidamente os principais ensaios de caracterização tecnológica de agregados para concreto, exemplificando com alguns valores mínimos recomendados pela normativa brasileira (ABNT).
10. Quais são os principais ensaios de caracterização para rochas de revestimentos? Faça uma breve descrição, exemplificando com alguns valores mínimos recomendados pelas normativas americana (ASTM) e brasileira (ABNT).

Bibliografia recomendada

- Farias, M.M.; Palmeira, E.M. 2010. Agregados para construção civil. In: Isaia, G.C. (Ed.). *Materiais de construção e princípios de ciência e engenharia de materiais*. 2. ed. São Paulo: Ibracon. v. 1, p. 483-525.
- Frazão, E.B. 2002. *Tecnologia de rochas na construção civil*. São Paulo: ABGE. 132p.
- Frazão, E.B. 2012. *Alteração de rochas como critério de seleção de agregados*. São Paulo: ABGE. 123p.
- Frasca, M.H.B.O. 2010. Rocha como material de construção. In: Isaia, G.C. (Ed.). *Materiais de construção e princípios de ciência e engenharia de materiais*. 2.ed. São Paulo: Ibracon. v. 1, p. 439-481.
- Petrucci, E.G.R. 2003. *Materiais de construção*. 12. ed. São Carlos: Globo. 435p.

Indicação de sítios

- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) (http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/relacao_de_normas_vigentes.pdf)
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) <https://www.abntcatalogo.com.br/normagrid.aspx>.
- American Society for Testings and Materials (ASTM) <https://www.astm.org/>.
- European Committee for Standardization (CEN) <https://www.cen.eu/Pages/default.aspx>.
- Palavras-chave:** agregados, materiais rochosos para a construção rochas para revestimento, *aggregates, rock materials for construction, building stones*.

CAPÍTULO 8

ESTRUTURAS E ESTADO DE TENSÕES DE MACIÇOS ROCHOSOS

CONTEÚDO

- 1 **Conceitos básicos**
 - 1.1 Maciço rochoso
 - 1.2 Estruturas: descontinuidades geomecânicas e geohidráulicas
 - 1.3 Homogeneidade e anisotropia
 - 1.4 Efeito de escala
- 2 **Classificação das estruturas**
 - 2.1 Estruturas tectônicas: dobras, foliações, lineações, *boudins*, bandas e zonas de cisalhamento, juntas, falhas, diques e veios
 - 2.2 Estruturas atectônicas
- 3 **Comportamento mecânico dos maciços rochosos**
 - 3.1 Comportamento rúptil
 - 3.2 Comportamento dúctil
- 4 **Procedimentos para levantamento e análise das estruturas e descontinuidades**
 - 4.1 Levantamento estrutural
 - 4.2 Propriedades das descontinuidades: orientação, persistência, espaçamento, irregularidade e rugosidade, abertura e preenchimento
 - 4.3 Levantamento das propriedades
 - 4.4 Projeção estereográfica
 - 4.5 Modelos estruturais
- 5 **Tensões**
 - 5.1 Tensão e campo de tensões
 - 5.2 Terminologia e conceitos de tensão: tensões naturais, influências secundárias no estado de tensão e tensões induzidas em engenharia
 - 5.3 Métodos de determinação de tensões: avaliações sismológicas, avaliações geoestruturais, eliptização da seção horizontal de poços profundos, técnicas principais de medição
 - 5.4. Exemplos de qualificação e quantificação de tensões

Resumo/Questões de revisão/Bibliografia recomendada/Indicação de sítios

Migmatito bandado, mostrando forte anisotropia. Juarez Távora, PA. Foto: G. Campanha / Sérgio William de Oliveira