

4

AGREGADOS

Prof. Dr. Sérgio Cirelli Angulo

- 4.1 Contextualização, 68**
- 4.2 Produção, Tipos de Agregados e Usos, 69**
- 4.3 Manuseio e Amostragem, 74**
- 4.4 Caracterização, 76**
- 4.5 Efeito dos Agregados nos Materiais Clementícios, 89**
- 4.6 Considerações Finais, 91**

4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Agregados são matérias-primas minerais de grande importância para a sociedade. São materiais granulares, com faixas de tamanho estabelecidas (agregados graúdos, de 4,75 a 75 mm; agregados miúdos, de 0,075 a 4,75 mm, ABNT NBR 9935:2024), utilizados na pavimentação, em lastros de ferrovias, obras geotécnicas, concretos, argamassas e em construções em geral.

Como os principais mercados consumidores no Brasil estão próximos a jazidas de rochas ígneas (granitos e basaltos), essas matérias-primas são as mais empregadas para a obtenção dos agregados graúdos (dimensão maior que 4,8 mm). Rochas metamórficas, como calcários, são também utilizadas, dependendo da região, assim como rochas sedimentares, como arenitos, que possuem mercados específicos. Com relação aos agregados miúdos, a areia de quartzo é a mais utilizada, obtida por dragagem de leitos de rio; em regiões metropolitanas, em razão da elevada demanda, são também extraídas areias de cavas secas (desmonte de barrancos).

Existem também outros tipos de agregados utilizados para fins específicos, como agregados leves, obtidos industrialmente por calcinação de argilas em temperatura de aproximadamente 1200 °C, para reduzir o peso de certas peças de concreto armado, ou pesados, usados como barreira de radiação em hospitais.

O consumo de agregados *per capita* tem relação com o PIB *per capita* da população. Nações mais ricas consomem mais agregados. Em 2012, alguns países

europeus e os Estados Unidos chegaram a consumir de 6 a 10 t/hab. por ano (La Serna; Resende, 2012; Krausmann *et al.*, 2018). No Brasil, o consumo nos estados mais industrializados ou grandes regiões metropolitanas chegou a cerca de 4 t/hab. por ano, próximo à média global de extração de agregados (Miatto *et al.*, 2017). É certamente o material mais consumido pelo setor de construção e representa grande parte do estoque de materiais nos edifícios e infraestrutura das cidades (Hashimoto *et al.*, 2007; Tanikawa; Hashimoto, 2009). Em cada metro quadrado de habitação popular, estima-se um consumo de 1,36 tonelada de agregados; ou a cada quilômetro de estrada pavimentada, há 9800 toneladas de agregados (Ifram, 2011). Em 2021, a demanda por agregado no Brasil chegou a 660 milhões de toneladas (Fig. 4.1). Agregados miúdos (< 4,8 mm) representaram cerca de 385 milhões (58 % do total), enquanto os agregados graúdos (> 4,8 mm), outros 275 milhões aproximadamente (42 % restantes).

Uma característica do mercado de agregados é o custo de transporte, chegando a ser superior ao custo de produção. Por isso, os agregados são obtidos a partir de rochas ou minerais abundantes (quartzo, feldspato) disponíveis na crosta terrestre (Sbrigui, 2011). Do ponto de vista global, os agregados são considerados, nos livros clássicos de materiais de construção, como um bem praticamente inesgotável, apesar de sua natureza não renovável. Porém, em diversas localidades do mundo, o esgotamento de jazidas de agregados é observado

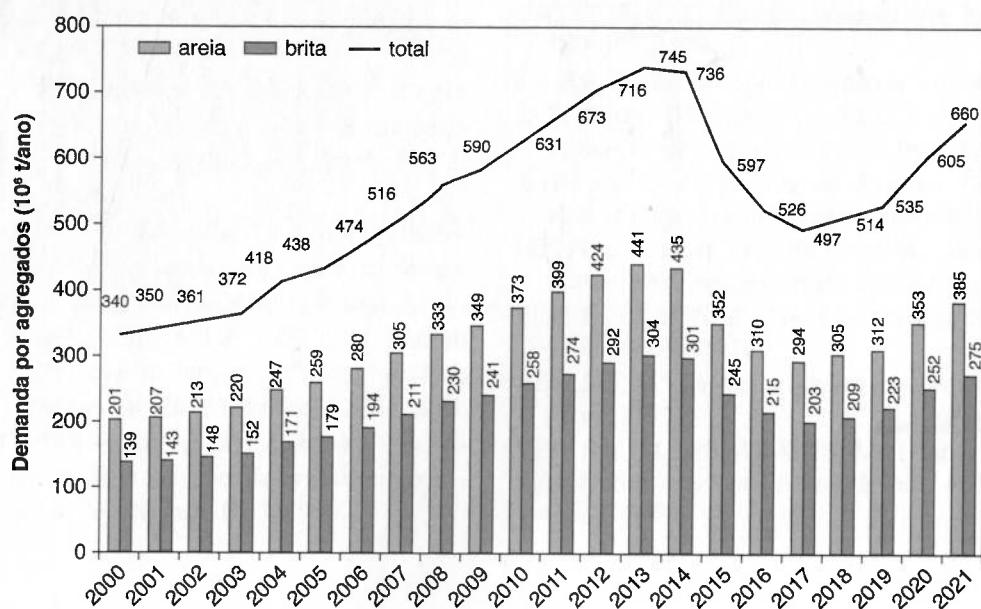


FIGURA 4.1 Demanda por agregados no Brasil. Fonte: dados extraídos da Associação Nacional de Entidades de Produtores de Agregados para Construção (Anepac).

localmente. Van der Meulen *et al.* (2005) apontaram o esgotamento do estoque de britas e a necessidade de importação desses materiais na Holanda. Navios de britas são, hoje, importados da Noruega para abastecer esse país. Em razão da escassez de agregados naturais, é também um dos países líderes no consumo de agregados reciclados obtidos pela reciclagem dos resíduos de construção e demolição (RCD), reaproveitando mais de 90 % de todo o volume desse resíduo. Na região de Paris, na França, o esgotamento de agregados em escala regional foi apontado por Habert *et al.* (2010). Países como Holanda, Bélgica, Suíça, Dinamarca e França importam mais agregados do que exportam (Tab. 4.1). Hoje, agregados reciclados são utilizados por motivos ambientais e econômicos em locais onde há escassez de agregados naturais; particularmente, no Brasil, o uso chega a quase 20 % da massa de todo RCD gerado no país (Angulo *et al.*, 2022).

Mesmo em um país de larga extensão, como o Brasil, há carência de certos tipos de agregados em determinadas regiões (La Serna; Resende, 2012). Em estados como o Amazonas e o Acre, não há afloramentos rochosos, o que torna escassa a presença de agregados britados. Isso implica custos elevados (Angulo *et al.*, 2022) e pode mais do que dobrar as emissões de CO₂ relacionadas com a produção do concreto (Pacheco *et al.*, 2022). Em Goiânia e nas regiões metropolitanas da região Sudeste, como a de São Paulo (RMSP), Rio de Janeiro e Porto Alegre, existe carência de areia de rio. Internacionalmente, aceita-se que as pedreiras possam se distanciar até 50 km do mercado consumidor, situação semelhante à encontrada na RMSP [Fig. 4.2(a)]. As minerações de areia que atendem a RMSP chegam a se distanciar cerca de 150 km entre o local de produção e o centro geométrico dela [Fig. 4.2(b)]. Cerca de 140.000 toneladas diárias de agregados são transportadas na RMSP, o que equivale a aproximadamente 22.000 caminhões por dia (ANEpac, 2010).

Agregados são bens de consumo de baixo valor econômico, que sofrem bastante influência do custo

do frete, consequência do aumento da distância de transporte envolvida entre o fabricante e o consumidor. Assim, agregados britados são mais caros nas regiões Norte e Nordeste (acima de R\$ 70/m³, preço no ano-base de 2012), enquanto a areia extraída do leito de rio é mais cara nas regiões Sul e Sudeste (acima de R\$ 50/m³) (La Serna; Resende, 2012).

No Brasil, há cerca de 2343 empresas de agregados com uma diferença marcante. O setor de brita possui menor quantidade de empresas de pequeno porte (IBRAM, 2011) e é mais verticalizado (La Serna; Resende, 2012). Já no setor de areia ocorre o oposto, isto é, há grande quantidade de empresas de pequeno porte atuando nesse mercado. Há muitas pedreiras que, hoje, pertencem a grupos cimenteiros, que também controlam concreteiras e fábricas de argamassa. Atualmente, a maior parte dos agregados, seja areia, seja brita, é consumida em materiais cimentícios (La Serna; Resende, 2012).

Para a seleção de fornecedores, pode-se utilizar a “Ferramenta dos 6 Passos” do Conselho Nacional de Construção Sustentável (CBCS).¹ Combater o consumo de areia produzida informalmente é muito importante, porque essas empresas não contribuem com impostos, não recuperam áreas degradadas e (sub)empregam a mão de obra.

4.2 PRODUÇÃO, TIPOS DE AGREGADOS E USOS

No Brasil, 85 % dos agregados britados são provenientes de granitos, 10 % de rocha calcária e 5 % de basaltos. Agregados calcários são produzidos nos estados de MG, GO, BA e RJ, e os basaltos são mais comuns na região Sul (PR e RS).

As britas são produzidas em quatro etapas, conforme mostra a Figura 4.3.

¹ Disponível em: <http://www.cbc.org.br/website/>. Acesso em: 12 set. 2024.

TABELA 4.1 Relação entre importação e exportação de agregados em alguns países europeus

Países	Importação de agregados (10 ⁶ t/ano)	Exportação de agregados (10 ⁶ t/ano)
Holanda	45	15
Bélgica	20	12
Suíça	6	0,5
Dinamarca	4	1
França	10	9

Fonte: Bleischwitz e Bahn-Walkowiak (2006).

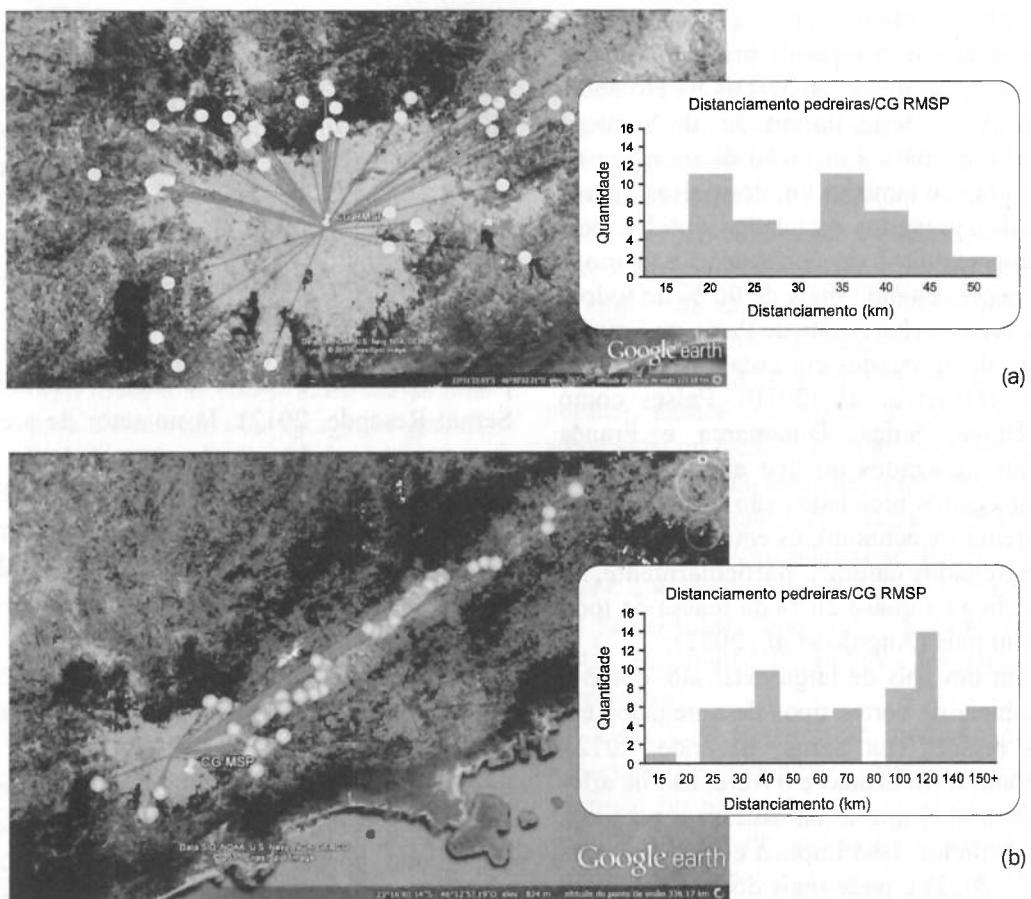


FIGURA 4.2 Localização das principais (a) pedreiras e (b) areeiros na RMSP.
Fonte: extraída de Falcão et al. (2013).

Pedreiras não demandam uso intensivo de áreas. Na Europa, as pedreiras usam menos que 0,5 % da área disponível desse continente (Bleischwitz; Bahn-Walkowiak, 2006). A extração se inicia com a decapagem, que remove o estéril (solo e rocha alterada), não utilizado para a produção dos agregados britados. Há poucas informações sobre o volume de estéril produzido nas pedreiras. Em pedreiras de pequeno porte (cerca de 6000 t/mês), esse volume pode chegar a 24 % do total produzido (GEOMAC, 2012). Essa quantidade de resíduo (*hidden flow*), apesar de extremamente importante, geralmente não é incluída nos inventários de impactos ambientais e estudos de avaliação do ciclo de vida (ACV) de produtos da construção (Bleischwitz; Bahn-Walkowiak, 2006).

As bancadas de rochas (granito ou calcário) são desmontadas, por meio de diversos furos feitos com perfuratriz, nos quais são colocados explosivos. Os blocos de rocha, quando ainda em grandes dimensões, são reduzidos com rompedores hidráulicos acoplados em escavadeiras. O material fragmentado é alimentado em caminhões fora de estrada (de grande

porte), que seguem alimentando o processo de britagem e peneiramento. A britagem é realizada em três a quatro estágios, empregando diferentes tipos de britadores. Britadores primários são geralmente de grande dimensão e capacidade produtiva; por isso, são do tipo giratório ou de mandíbulas (Chaves, 2002). Britadores secundários são geralmente de impacto, porque conseguem reduzir de cinco a oito vezes a dimensão do material na alimentação, melhor condição que a anterior.

O gasto energético estimado em uma pedreira que produz cerca de 653 t/h de brita é de 9880 MJ/h (Tab. 4.2). Cerca da metade é originada no processo de britagem, que demanda maior uso de energia.

Valor similar foi encontrado em Jullien et al. (2012). Uma pedreira chega a gastar 15 MJ/t agregado. Valores similares (6 a 30 MJ/t agregado) são encontrados em dissertações, artigos ou declaração ambiental internacional de agregados (Souza, 2012; Jullien et al., 2012; Holcim, 2014). Resultados de emissão de CO₂ por tonelada de agregado produzido costumam ser baixos, inferiores a 5 kg de CO₂/t de agregado, para distâncias de transporte inferiores a



FIGURA 4.3 Processamento das britas.

50 km, ou 30 kg/t de agregado, para distâncias de transporte acima de 150 km (Pacheco *et al.*, 2022). Dados recentes associados à emissão de CO₂ na fabricação dos agregados podem ser obtidos na plataforma Sidac.

A pedreira produz material particulado próximo à região de operação dos britadores, peneiradores e pontos de descarga, sendo necessário, portanto, o uso de abatedores de poeira. O consumo de água nas pedreiras europeias pode chegar a um metro cúbico por tonelada de agregado (Holcim, 2014).

Diversos tipos de agregados britados são produzidos (Tab. 4.3). Os agregados britados de maior dimensão (100-50 mm) – o rachão – são muito usados em filtros de drenagem, gabiões e muros de contenção. Agregados para lastros ferroviários têm dimensão entre 50 e 19 mm. Agregados com dimensão inferior a 31 mm (contendo ou não mistura com solo) são usados na pavimentação. Em materiais cimentícios, são usadas britas com dimensão entre 31,5 e

4,75 mm, assim como areias provenientes da britagem (< 4,8 mm). Pedrisco (mistura de brita e areia) e areia são geralmente produzidos com britador de impacto de eixo vertical (VSI), que permite obter agregados miúdos (areia de britagem) com formato mais esférico (Bengtsson; Evertsson, 2006), usados, em grande parte, como materiais cimentícios.

O uso dos agregados britados para confecção de concretos e argamassas corresponde a 50 % do total produzido, enquanto o uso dos agregados em pavimentação e geotécnica corresponde a 40 % do total.

No Brasil, a extração de areia² é feita predominantemente em cava submersa (em leito de rios), com exceção da Região Metropolitana de São Paulo, na qual predomina a extração via cava seca em regiões de várzeas (La Serna; Resende, 2012). A intensa extração de areia no Vale do Paraíba e no Rio Tietê tem sido controlada pelos órgãos ambientais.

² <http://anepac.org.br/wp/agregados/areia/>. Acesso em: 12 set. 2024.

TABELA 4.2 Estimativa do gasto energético com equipamentos de desmonte, processo e transporte em uma pedreira da RMSP

Equipamentos de desmonte	Combustível (litros/h)	Densidade (kg/litro)	Poder calorífico (MJ/kg)	Energia (MJ/h)
1 perfuratriz (compressor)	35,12	0,825	43,3	1255
Equipamentos de processo	Potência (kW)	Eficiência	Energia (kWh) (*)	Energia (MJ/h)
1 alimentador vibratório	3	0,8	4	12
1 britador de mandíbula (abertura 160 mm)	200	0,9	222	722
1 peneirador (tela 32 mm)	45	0,9	50	163
2 britadores cônicos (aberturas 39 e 21 mm)	2 × 315	0,9	700	2275
1 peneirador (telas 22, 12 e 5 mm)	45	0,9	50	163
1 britador de eixo vertical (VSI)	220	0,9	244	794
20 transportadores de correia	6 × 20	0,85	141	459
Equipamentos de transporte	Combustível (litros/h)	Densidade (kg/litro)	Poder calorífico (MJ/kg)	Energia (MJ/h)
1 escavadeira	40	0,825	43,3	1429
3 pás-carregadeira	54	0,825	43,3	1929
Caminhões (12 m ³)	19	0,825	43,3	679

(*) Potência × eficiência × 1 hora.

TABELA 4.3 Principais tipos de agregados produzidos por britagem e usos na construção civil

Origem	Agregados britados	Dimensão (mm)	Usos
Rochas ígneas (granitos, basaltos)	Rachão	100-75 75-50	Gabiões, muros de contenção Filtros de drenagem
Rochas metamórficas (calcário)	Brita graduada	< 31,5 < 31,5	Sub-bases de pavimentos Bases de pavimentos
	Brita	50-19 31,5-19,0 25,0-9,0 12,5-4,75	Lastro ferroviário e reforço de subleito Concretos Misturas asfálticas Lastros
	Areia	< 4,75	Concretos, argamassas, assentamento de tubos e blocos intertravados

As extrações de areia geram danos em áreas de preservação permanentes, próximas às cidades, assim como assoreamento do rio perto de locais de captação de água (CONAMA, 2006; Bueno, 2010; La Serna; Resende, 2012).

A extração em leito de rio (Fig. 4.4) usa uma bomba para sucção da areia do fundo do rio. Essa polpa é transportada até a margem do rio, onde segue em dutos, por bombeamento, até uma peneira, na qual são realizados o desaguamento e a separação entre o cascalho e a areia. O material sedimentar contém alguma presença de argila, que geralmente fica

concentrada na água acumulada perto do local de processo, retornando ao rio.

A extração em cava seca extrai a areia de terrenos sedimentares perto do rio, mas precisa de jatos de água com alta pressão para desagregar os barrancos de areia e obter maior quantidade desse material. Como esse processo contém mais argila misturada com a areia, são necessárias operações de processo capazes de lavar e desagregar a argila, de modo a evitar a existência de partículas friáveis com a areia de quartzo. A classificação de tamanho da areia pode ser feita em classificadores horizontais,

Cava submersa (leito de rio)

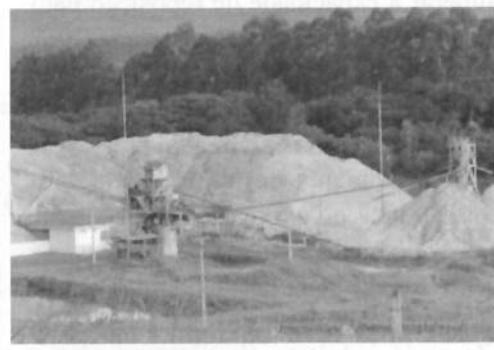
1) Dragagem: usada para a sucção da areia do leito do rio (cava submersa).



2) Desaguamento e classificação: a polpa de areia é bombeada até a peneira, ocorrendo desaguamento e separação do cascalho ($> 4,8 \text{ mm}$). Ciclones separam a areia em outras faixas granulométricas (grossa, média, fina).

Cava seca

1) Desmonte hidráulico: desagregação com água de maciços contendo rochas sedimentares e planícies fluviais.



2) Desaguamento e classificação: a polpa de areia é bombeada até uma peneira, ocorrendo desaguamento e separação do cascalho. Ciclones separam a areia em outras faixas granulométricas.

FIGURA 4.4 Beneficiamento das areias. Fonte: fotos cedidas pela Mineração de Areia Vale do Rio Grande e pela Mineração Saara Extração e Comércio de Minérios.

classificadores espirais ou ciclones, dependendo das faixas granulométricas de areia que se pretende comercializar. Em outros países, já se percebe a importância da produção de areias com faixas granulométricas mais estreitas (Chaves; Whitaker, 2009), permitindo um conjunto granular com menor índice de vazios e economia de pasta de cimento para uso em materiais cimentícios, estratégia fundamental para se reduzir os custos econômicos e os impactos ambientais desses materiais.

O gasto energético estimado em um areeiro que produz cerca de 90 t/h de areia é de 2665 MJ/h (Tab. 4.4), algo em torno de 30 MJ/t (três vezes superior ao de uma pedreira) ou por tipo de areia (10 MJ/t). Estima-se que 70 % desse gasto sejam originados no bombeamento, etapa em que o uso de combustível

fóssil e de energia é mais intensivo. Resultados de emissão de CO₂ por tonelada de areia costumam também ser baixos, < 5 kg CO₂/t de agregado (Souza, 2012), mas superiores aos dos agregados britados.

O transporte dos agregados entre 50 e 150 km nas cidades chega a aumentar em quase três vezes a emissão de CO₂ dos agregados (Souza, 2012), mas vale recordar que, mesmo assim, as emissões dos agregados são muitas vezes inferiores às do cimento (~ 600 kg CO₂/t). Isso explica por que o consumo de cimento é o principal parâmetro para a pegada de carbono do concreto. Por outro lado, emissões de SOx em função da queima dos combustíveis fósseis nas grandes cidades são eventos localizados e causam danos bem mais sérios à saúde humana (Gonçalves; Martins, 2008), em uma escala

TABELA 4.4 Estimativa do gasto energético com bombeamento e peneiramento em um areeiro (cava submersa) da RMSP

Equipamentos de processo	Combustível (litro/h)	Densidade (kg/litro)	Poder calorífico (MJ/kg)	Energia (MJ/h)
1 draga	25	0,825	43,3	893,1
1 bomba de sucção de água	10	0,825	43,3	357,2
2 bombas de fluxo	20	0,825	43,3	714,5
1 escavadeira	19,20	0,825	43,3	685,9
1 carregadeira	15,00	0,825	43,3	535,8
Equipamentos de processo	Potência (kW)	Eficiência	Energia (kWh)	Energia (MJ/h)
1 peneirador	5	0,9	4,5	14,7

de impacto ambiental muitas vezes superior à contribuição desse material para a mudança climática.

Hoje, sabe-se também que a extração de areia de rio pode superar a capacidade de deposição natural do rio (Jordan *et al.*, 2019; Marques *et al.*, 2012; Padmalal; Maya, 2014), tornando-se uma atividade insustentável (UNEP, 2019). A extração excessiva de areia de rio pode causar danos ambientais sérios aos rios, que envolvem aumento de turbidez, alteração da demanda bioquímica de oxigênio, salinização da água-doce e perda de biodiversidade.

Praticamente toda a areia produzida também se destina à produção de argamassas e concretos. Como a produção de areia e brita é praticamente igual, pode-se admitir que 2/3 da produção são destinados a materiais cimentícios e 1/3 para a pavimentação. O mercado de revenda de brita ensacada em lojas de materiais de construção (consumidor formiga) é pequeno (10 %), mas quando se trata de areia ensacada, o percentual é bem maior.

4.3 MANUSEIO E AMOSTRAGEM

Os agregados, por serem materiais particulados, podem segregar durante o manuseio (estoque, transporte, descarga, uso) (Tang; Puri, 2004). A segregação é um fenômeno que ocorre, com mais frequência, quando os agregados possuem dimensões acima de 0,1 mm, pois, nessa dimensão, inexistem forças de coesão capazes de manter unidas as partículas de diferentes tamanhos. A mesma ocorre durante carga, transporte e descarga dos agregados. Durante a descarga por transportadores de correia ou pás carregadeiras, ocorre o deslocamento em maiores distâncias das partículas maiores (Ottino; Khakhar, 2000; Brock; May; Renegar, 2011; Nohl; Domnick, 2000). O material estocado se torna heterogêneo

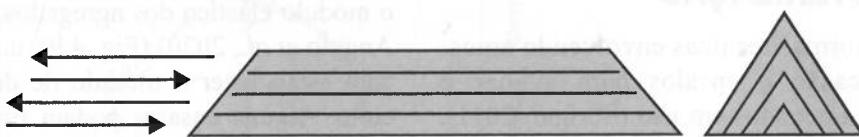
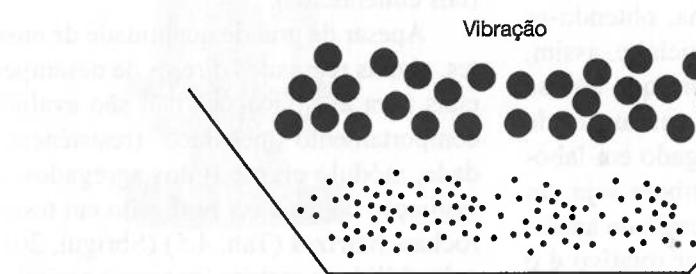
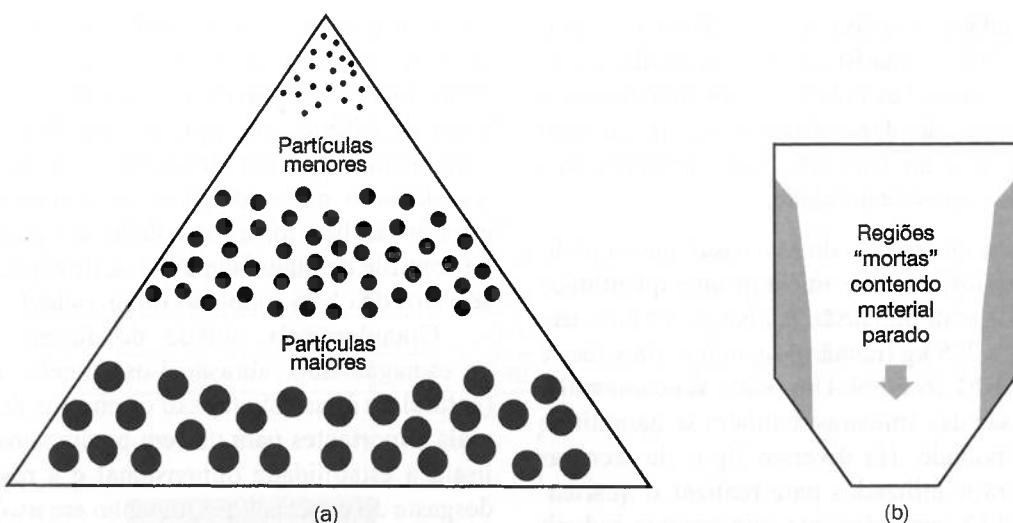
[Fig. 4.5(a)], apresentando distribuição granulométrica diferente em função da posição que o material é coletado.

A descarga do material no interior dos silos de armazenagem também pode gerar segregação (Brock; May; Renegar, 2011). Silos geralmente precisam ser carregados, de maneira centralizada e com fluxo totalmente vertical, contendo mais de um ponto de descarga. A abertura de silos na alimentação (parte superior) deve ser grande o suficiente para permitir a descarga de grande quantidade de material, mas geralmente se reduz concentricamente, evitando-se a existência de regiões que não se movimentam e ficam estagnadas (Engblom *et al.*, 2012) [Fig. 4.5(b)]. Mudanças na geometria dos silos de modo a minimizar a segregação podem ser encontradas em Tang e Puri (2004).

Durante o transporte, a segregação também ocorre, pois os finos (< 0,1 mm) possuem coesão e se mantêm aglomerados, impedindo que as partículas maiores afundem. Nesse caso, ocorre uma concentração de partículas maiores na superfície – efeito conhecido como *Brazilian nut effect* (Fig. 4.6) (Kudrolli, 2004; Nohl; Domnick, 2000).

Como a manipulação dos agregados (estoque, transporte e uso) pode resultar em agregados com características variáveis, é fundamental adotar práticas industriais que minimizem esses problemas (Brock; May; Renegar, 2011; Nohl; Domnick, 2000):

- retirada do material em várias localidades da pilha, gerando um efeito de mistura;
- formação de pilhas de homogeneização constituídas de diversas camadas (Fig. 4.7), usando transportador telescópico com correia e tomada de seções homogêneas desse material, com uso de escavadeiras. Os custos associados com equipamentos e horas de operadores podem ser elevados.



Além disso, a produção de agregados deve ser dividida em lotes, em que se “presume” que, em cada lote, o material foi produzido sob condições uniformes. A “qualidade” do lote precisa ser atestada por uma série de ensaios de caracterização, os quais devem ser realizados em amostras que representem todo o lote de produção. A representatividade de uma amostra deve ser garantida da seguinte forma (Petersen *et al.*, 2005):

- coletar uma quantidade mínima de material (em kg), capaz de garantir a representatividade. Quanto mais heterogêneo e maior a dimensão do

material, maior será a quantidade de massa para coletar uma amostra representativa (Angulo *et al.*, 2010);

- não coletar as amostras em pilhas de grandes dimensões, pois pode comprometer a confiabilidade estatística. A amostra precisa ser obtida, considerando-se três dimensões representativas (comprimento, largura e altura). O ideal seria coletar a amostra em transportadores de correia, pois a coleta da amostra praticamente não é influenciada pela largura nem pela altura, apenas pelo comprimento;

- nunca coletar a amostra de uma única vez, pois a confiabilidade estatística está vinculada a uma série de “eventos” de coleta. Assim, assegura-se a aleatoriedade, não dependendo do tempo ou local de coleta, e a amostra não fica “tendenciosa”, garantindo representatividade.

Nos países integrantes do Mercosul, para a realização dos ensaios, deve-se amostrar uma quantidade de 40 kg (brita com dimensão abaixo de 19 mm, uso em concreto) a 225 kg (rachão), segundo estabelece a ABNT NBR NM 26:2009. Um ponto fundamental é reduzir a massa das amostras, também se garantindo a representatividade. Há diversos tipos de técnicas ou equipamentos utilizados para realizar o quarteamento (Fig. 4.8), procedimento que procura reduzir a amostra de particulados garantindo a representatividade. O quarteamento manual consiste em: (1) pré-misturar o material, procurando homogeneizá-lo, (2) achatar a pilha mudando o seu formato cônico para tronco cônico, (3) dividir a pilha em quatro partes e (4) tomar as partes opostas da pilha, obtendo-se uma amostra com metade da massa inicial e, assim, sucessivamente. É usado em locais em que não se dispõe de laboratórios de controle. O quarteador de rifles (do tipo Jones) é o mais empregado em laboratórios de controle de qualidade. Embora seja um equipamento mais caro, gera menos erros de amostragem (Petersen, 2004). O amostrador rotativo é o mais preciso deles. Os dois primeiros procedimentos são recomendados pela ABNT NBR NM 27:2001.

4.4 CARACTERIZAÇÃO

Há cerca de 30 normas técnicas envolvendo amostragem, classificação e ensaios para avaliar o desempenho dos agregados em uso (Sbrigui, 2011).

Os ensaios são geralmente realizados para finalidades distintas, quais sejam: selecionar fontes de agregados para uso; formular misturas; e qualificar o material, a partir de critérios mínimos de qualidade. Como eles variam em função das aplicações, cabe ao engenheiro selecionar o mais adequado. Em alguns casos, os ensaios são listados e controlados em procedimentos de controle de qualidade e fichas de especificação de serviços de obras (públicas ou privadas).

Granulometria, índice de forma, resistência ao esmagamento, abrasão Los Angeles e ciclagem (natural ou água/estuda) são os ensaios de agregados mais importantes para uso em pavimentos, pois analisam a estabilidade dimensional e a resistência ao desgaste do material (desempenho em uso). Granulometria, massa unitária, inchamento, massa específica, absorção de água e reação álcali-sílica são ensaios de agregados destinados a argamassas e concretos, pois analisam a estabilidade química, porosidade e área superficial (que afeta a demanda de água dos materiais cimentícios).

Apesar da grande quantidade de ensaios existentes, alguns requisitos diretos de desempenho e essenciais para as aplicações não são avaliados, como o comportamento mecânico (resistência, deformabilidade, módulo elástico) dos agregados. Esse tipo de avaliação chega a ser realizado em testemunhos das rochas-matrizes (Tab. 4.5) (Sbrigui, 2011), mas tem aplicabilidade restrita, porque a resistência dos particulados muda em função de suas dimensões (Tavares; King, 1998; Unland; Szczelina, 2004; Cavarretta; Sullivan, 2012). Esforços recentes têm sido feitos para desenvolver um método capaz de determinar o módulo elástico dos agregados (Silva *et al.*, 2019; Angulo *et al.*, 2020) (Fig. 4.9), um parâmetro crucial para estabelecer o módulo de deformação do concreto. Alguns ensaios podem estar correlacionados

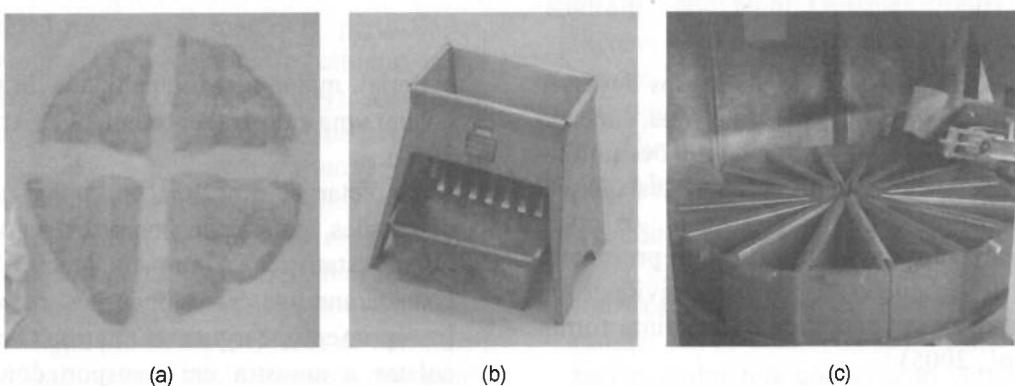


FIGURA 4.8 Tipos de quarteadores utilizados para a redução de amostras:
 (a) quarteamento manual; (b) quarteador por rifles (do tipo Jones); e
 (c) amostrador rotativo.

TABELA 4.5 Características físico-mecânicas das rochas utilizadas na produção de agregados britados

Tipo de rocha	Resistência à compressão do testemunho (MPa)			Módulo elástico (GPa)	Absorção de água 24 h (%)	Massa específica (kg/dm³)
	Média	Máxima	Mínima			
Granito	150	240	100	40-70	0,1-0,8	2,6-2,7
Basalto	220	280	180	60-100	0,1-0,6	2,75-2,95
Gnaisse	150	240	100	40-70	0,2-0,8	2,55-2,70
Calcário	120	200	90	30-50	0,2-4,5	2,60-2,80
Quartzito	260	400	130	50-100	0,1-0,8	2,55-2,70
Arenito	70	150	50	20-40	1,2-8,5	2,20-2,40

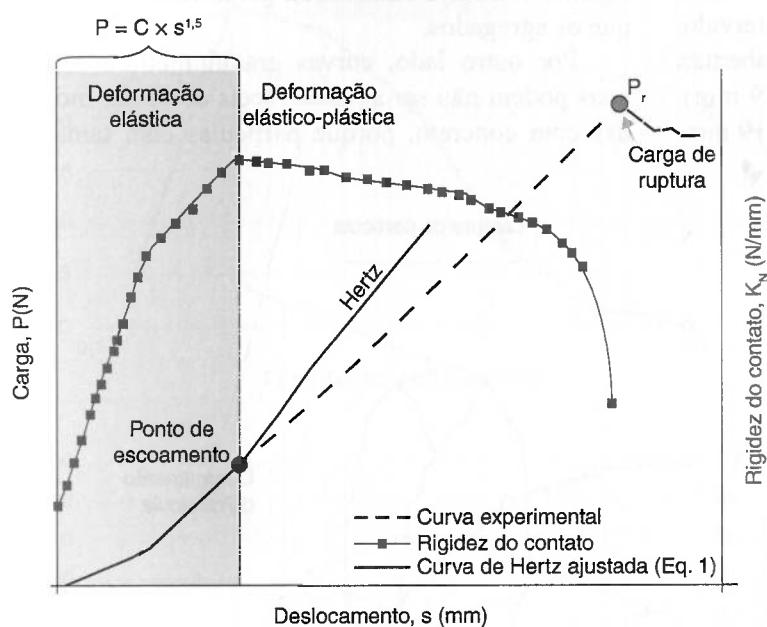
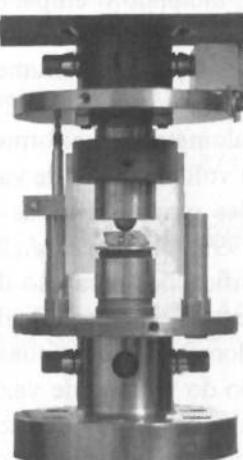


FIGURA 4.9 Método para determinar o módulo elástico do agregado (Silva et al., 2019; Angulo et al., 2020).

entre si, por exemplo, a distribuição granulométrica, forma, índice de vazios e área superficial, e outros podem ser dispensáveis.

Uma boa descrição dos ensaios utilizados para se caracterizar os agregados para uso em

pavimentação pode ser encontrada em Bernucci et al. (2010) e não serão objeto de discussão neste capítulo. Serão abordados aqui apenas os principais ensaios utilizados para se caracterizar os agregados para uso em materiais cimentícios. As características

mínimas requeridas para uma areia ser utilizada com essa finalidade podem ser controladas pela ABNT NBR 7211:2022.

4.4.1 Distribuição Granulométrica

A distribuição granulométrica dos agregados é obtida geralmente pelo ensaio de peneiramento (ABNT NM 248:2003). O ensaio de peneiramento consiste em agrupar um conjunto de peneiras com telas de diferentes aberturas. As peneiras devem ser ordenadas, a partir de um recipiente de fundo, da menor para a maior malha de abertura (#) [Fig. 4.10(a)]. A amostra dos agregados é alimentada no conjunto de peneiras. O peneirador contém um motor mecânico, responsável pela vibração do conjunto de peneiras apoiado sobre ele.

Uma curiosidade é que o ensaio não determina exatamente o tamanho do agregado, porque, para isso, seria necessário informar as três dimensões (comprimento, largura e espessura). O ensaio de peneiramento classifica apenas a largura do agregado [Fig. 4.10(b)] (Mora *et al.*, 1998; Kwan *et al.*, 1999). A largura obtida na análise de imagem é utilizada para correlacionar o ensaio de peneiramento com o realizado por análise de imagem (Hawlitschek *et al.*, 2013). Em qualquer dos métodos empregados, essa largura não é um valor preciso, e sim um intervalo, porque o agregado passará por uma tela de abertura de peneira (-19 mm) e será retido em outra ($+9 \text{ mm}$). Nesse caso, a largura do agregado seria $-19 + 9 \text{ mm}$.

Quanto mais estreito esse intervalo, mais precisa será a determinação da largura do agregado.

Após a britagem, os agregados se caracterizam por apresentar uma distribuição normal de tamanho de partículas. Por isso, os resultados de massa retida após o ensaio de peneiramento (Tab. 4.6) são convertidos em uma distribuição normal de valores de massa, cujo total corresponde a 100 %. Graficamente, a distribuição granulométrica é representada na forma discreta ou acumulada (Fig. 4.11).

As distribuições granulométricas podem ser de um único tamanho (uniformes ou monodispersas) ou de tamanhos variados (contínuas ou polidispersas), afetando o empacotamento do conjunto granular dentro de determinado volume e, consequentemente, o seu volume de vazios (Larrard, 1999; Oliveira *et al.*, 2000; PCA, 2003). Distribuições granulométricas uniformes (Fig. 4.12) resultarão em um volume maior de vazios, se comparado às distribuições granulométricas contínuas (Fig. 4.12) (Larrard, 1999; Oliveira *et al.*, 2000).

Especificações para uso de agregados em concreto (ou em pavimentação) adotam geralmente curvas granulométricas contínuas. O motivo principal é a redução do volume de vazios, conferindo maior resistência a cargas ou reduzindo o consumo dos ligantes (cimento ou asfalto), geralmente mais caros que os agregados.

Por outro lado, curvas granulométricas contínuas podem não ser as mais fáceis de serem moldadas com concreto, porque partículas com tamanho

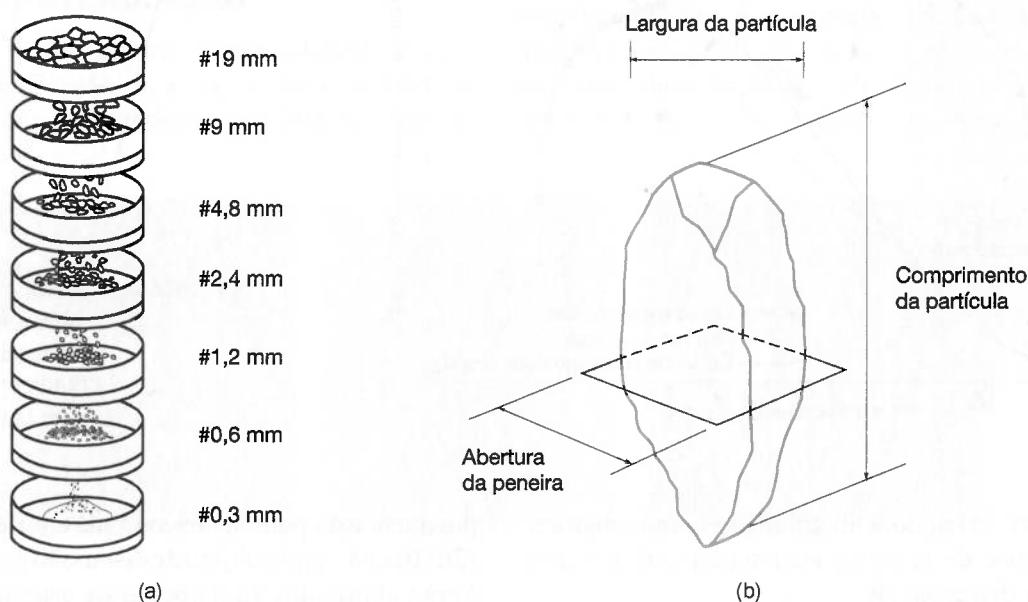
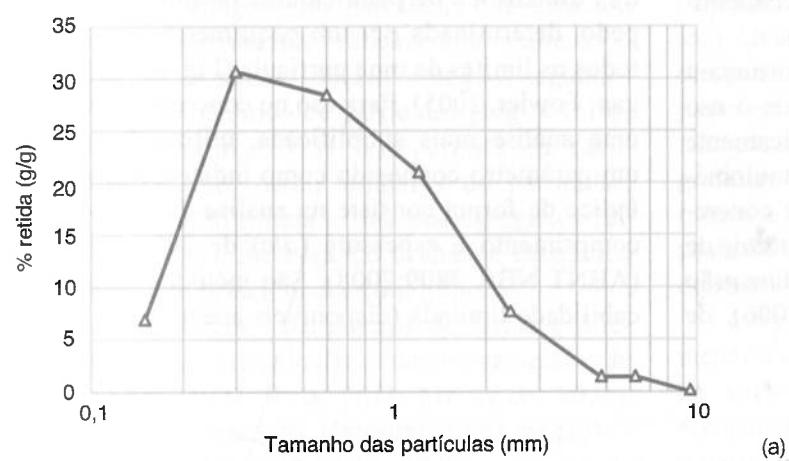


FIGURA 4.10 (a) Sequência de peneiras no ensaio de peneiramento; (b) dimensão da partícula que fica retida na tela da peneira. Fonte: adaptada de Kwan *et al.* (1999).

TABELA 4.6 Resultados do ensaio de peneiramento

Abertura da malha (mm)	Massa retida (g)	Massa retida (% g/g)	Massa retida acumulada (% g/g)	Massa passante acumulada (% g/g)
9,5	0,0	0,0	0,0	(100 - 0,0) = 100,0
6,3	6,7	$[(6,7/470,9) \times 100] = 1,4$	1,4	(100 - 1,4) = 98,6
4,8	6,5	$[(6,5/470,9) \times 100] = 1,4$	(1,4 + 1,4) = 2,8	(100 - 2,8) = 97,2
2,4	35,8	$[(35,8/470,9) \times 100] = 7,6$	(2,8 + 7,6) = 10,4	(100 - 10,4) = 89,6
1,2	98,7	$[(98,7/470,9) \times 100] = 21,0$	(10,4 + 21,0) = 31,4	(100 - 31,4) = 68,6
0,6	133,7	$[(133,7/470,9) \times 100] = 28,4$	(31,4 + 28,4) = 59,8	(100 - 59,8) = 40,2
0,3	144,8	$[(144,8/470,9) \times 100] = 30,7$	(59,8 + 30,7) = 90,5	(100 - 90,5) = 9,5
0,15	32,5	$[(32,5/470,9) \times 100] = 6,9$	(90,5 + 6,9) = 97,4	(100 - 97,4) = 2,6
-0,15	12,2	$[(12,2/470,9) \times 100] = 2,6$	(97,4 + 2,6) = 100,0	(100 - 100,0) = 0,0
Soma	470,9	$[(470,9/470,9) \times 100] = 100,0$	-	-

Observação: o módulo de finura de um agregado é calculado pela soma das massas retidas acumuladas na série de peneiras normal (todas apresentadas na tabela, com exceção da # 6,3 mm), dividida por 100.



(a)

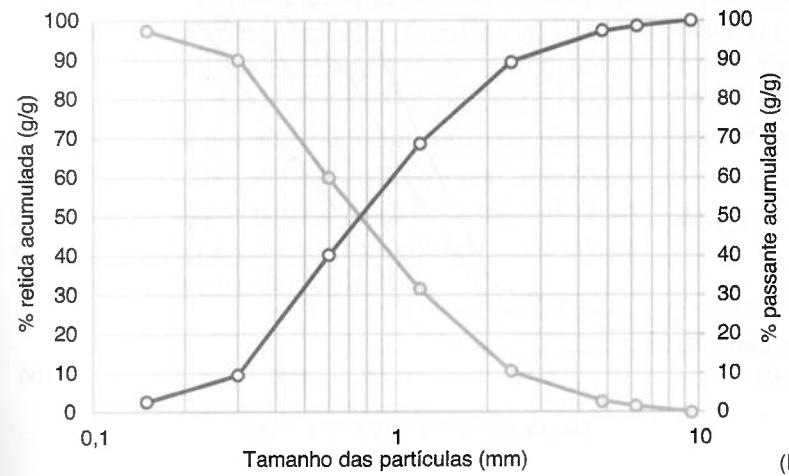


FIGURA 4.11 Distribuição granulométrica
(a) discreta e
(b) acumulada dos agregados.

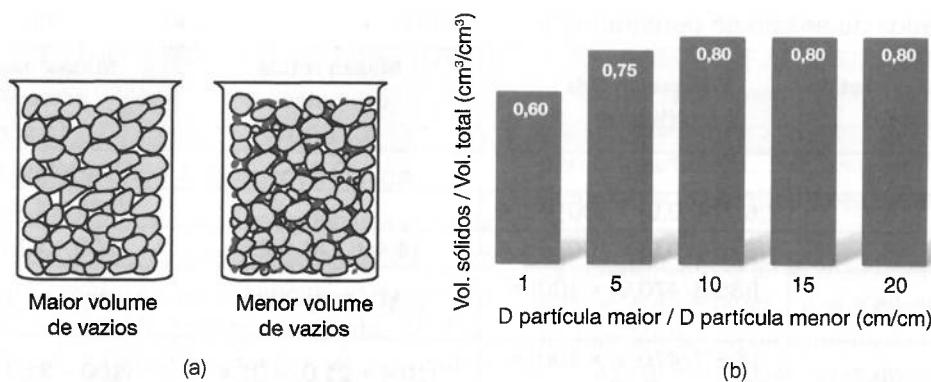


FIGURA 4.12 (a) Distribuição granulométrica e o volume de vazios. Fonte: adaptada de PCA (2003); (b) influência do tamanho das partículas na densidade relativa de empacotamento. Fonte: adaptada de Oliveira (2000).

imediatamente inferior àquelas maiores atrapalham a movimentação das partículas (Oliveira *et al.*, 2000). Para que as partículas de tamanho inferior consigam se compactar ou se movimentar mais facilmente, deve existir uma razão de 10 entre elas [Fig. 4.12(b)]. Assim, granulometrias descontínuas, com ausência de determinados tamanhos de partículas, facilitam a mobilidade do conjunto, implicando outros benefícios (por exemplo, redução de consumo de cimento, menor energia de compactação em materiais cimentícios) (Oliveira *et al.*, 2000; Damineli, 2013).

Normas brasileiras ou estrangeiras costumam recomendar faixas granulométricas nas quais o uso se torna tecnicamente adequado e economicamente atrativo. São exemplificadas as faixas granulométricas das areias utilizadas na confecção de concretos (Fig. 4.13). Na execução de peças estruturais de concreto armado, é fundamental limitar a dimensão máxima do agregado (Mehta; Monteiro, 2006), de

modo que não obstrua a passagem livre do concreto entre as armaduras, evitando a formação de defeitos de concretagem. O pedido de concreto à central dosadora de concreto deve ser feito estabelecendo-se a dimensão máxima do agregado.

4.4.2 Forma

A forma de uma partícula é expressa com base nas três dimensões perpendiculares de um paralelepípedo, determinada por um paquímetro, que inclui todos os limites de uma partícula (Fig. 4.14) (Erdo-gan; Fowler, 2005). Para uso no concreto, realiza-se uma análise mais simplificada, utilizando apenas um parâmetro conhecido como índice de forma. O índice de forma consiste na análise da razão entre comprimento e espessura (a/c) de 200 partículas (ABNT NBR 7809:2008). São métodos com aplicabilidade limitada (disponíveis apenas para fração

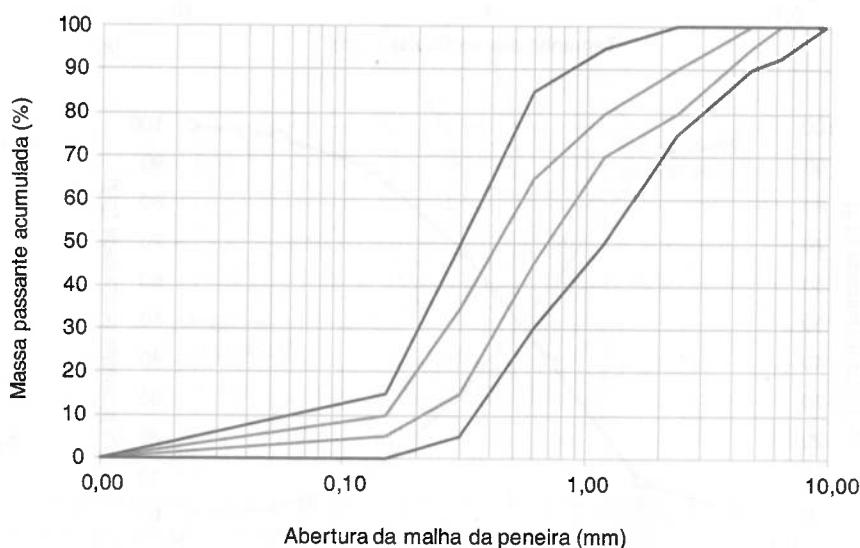


FIGURA 4.13 Faixas granulométricas das areias recomendadas para uso em concretos (ABNT NBR 7211:2022).

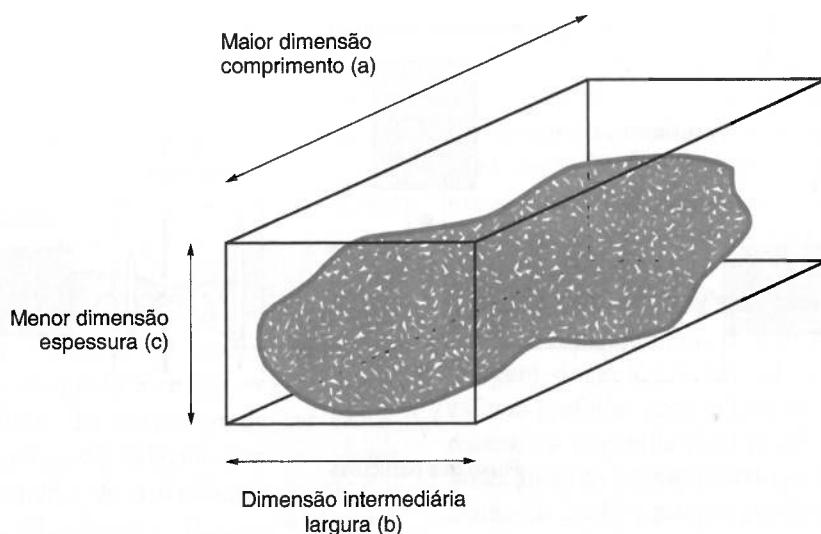


FIGURA 4.14 Classificação da forma da partícula segundo suas dimensões.
Fonte: adaptada de Erdogan e Fowler (2005).

graúda > 4,8 mm), demorados e diversos, especialmente enquanto não existir um consenso mundial sobre os critérios e métodos mais adequados para medir a forma (ACI, 2007).

Recentemente, o uso de técnicas com base na análise de imagem das partículas tem ganhado aceitação, especialmente aquelas que realizam a aquisição de imagens (50-280 imagens/segundo) por um fluxo dinâmico de partículas [Fig. 4.15(a)] (Hawlitschek *et al.*, 2013). Isso permite, em curto espaço de tempo, medir milhares de partículas, inclusive a fração miúda e fina dos agregados (de 4,8 mm a 1 µm), melhorando a análise estatística dos parâmetros relacionados com a forma.

Existem diversos parâmetros de forma e diferentes fórmulas para calcular o mesmo parâmetro de forma (Allen, 1997; Russ, 2011; Loz *et al.*, 2021). Esfericidade e aspecto (largura/comprimento) – expressos pelas Equações (4.1) e (4.2), e disponíveis nos equipamentos comerciais de análise de imagem por fluxo dinâmico de partículas (Camsizer da Retsch e QicPic da empresa Sympatec) – são considerados os mais importantes à medida que conseguem mostrar quão arredondadas ou alongadas são as partículas [Fig. 4.15(b)]. No entanto, como essa tecnologia ainda não consegue representar tridimensionalmente as partículas, não é possível determinar a espessura das partículas nem a lamelaridade.

$$\text{Esfericidade} = \left(\frac{4\pi A}{P^2} \right) \quad (4.1)$$

$$\text{Aspecto} = \left(\frac{b}{a} \right) = \frac{x_{\min}}{F e_{\max}} \quad (4.2)$$

A forma das partículas afeta o empacotamento dos agregados (Oliveira *et al.*, 2000; Mendes, 2008). Para partículas de dimensões similares (monodispersas), quanto maior a esfericidade (arredondamento) das partículas, maior será o empacotamento do conjunto granular [Fig. 4.16(a)]. Partículas lamelares ou alongadas prejudicam o empacotamento do conjunto granular, criando vazios e tornando os concretos menos econômicos, em razão do maior volume de pasta de cimento necessário para preencher os vazios deixados pelos agregados.

Para partículas com formato semelhante, quanto menor a dimensão das partículas, maior será o índice de vazios resultante no conjunto granular [Fig. 4.16(b)] (Tristão, 2005). Isso porque quanto menor a partícula, maior será a área superficial dela, ocorrendo maior incidência de contatos e afastamento entre as partículas. A variabilidade dos parâmetros de forma ainda é pouco investigada em função da dificuldade de se obter grande número de determinações e garantir representatividade estatística.

4.4.3 Porosidade Intergranular (Volume de Vazios)

O ensaio de massa unitária (realizado manualmente) (NM 45:2006) ou o ensaio de *tap density* (realizado com compactação mecânica) (Webb, 2001), nas Figuras 4.17(a) e (b), respectivamente, são os mais

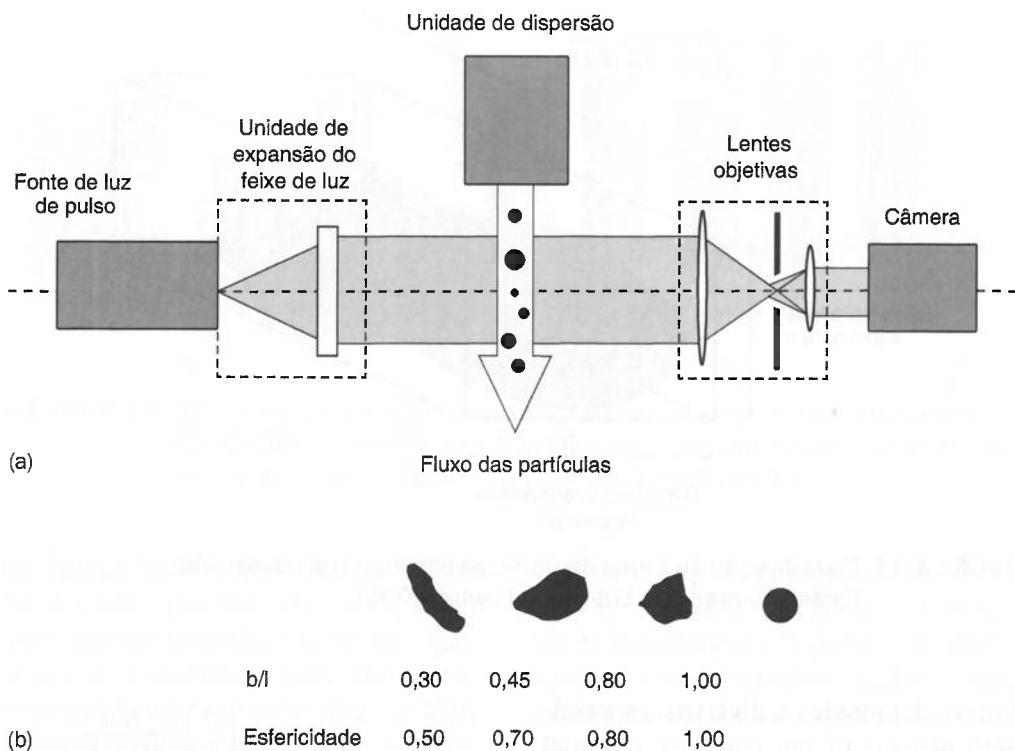


FIGURA 4.15 (a) Aquisição de imagens por fluxo dinâmico de partículas. Fonte: adaptada de Witt; Kohler; List (2004); (b) uso dos parâmetros esfericidade e aspecto para caracterizar a forma 2D das partículas. Fonte: adaptada de Hawlitschek et al. (2013).

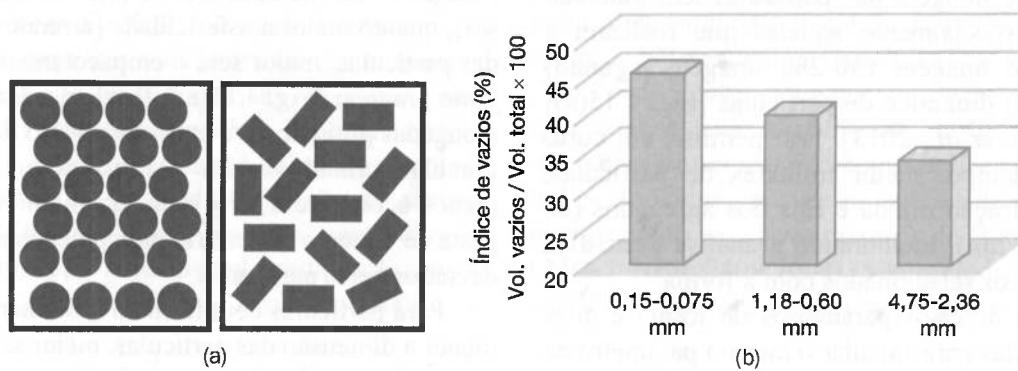


FIGURA 4.16 (a) Forma das partículas e o índice de vazios. Fonte: adaptada de Oliveira et al. (2000); (b) redução do índice de vazios com partículas esféricas de mesmo tamanho. Fonte: adaptada de Tristão (2005).

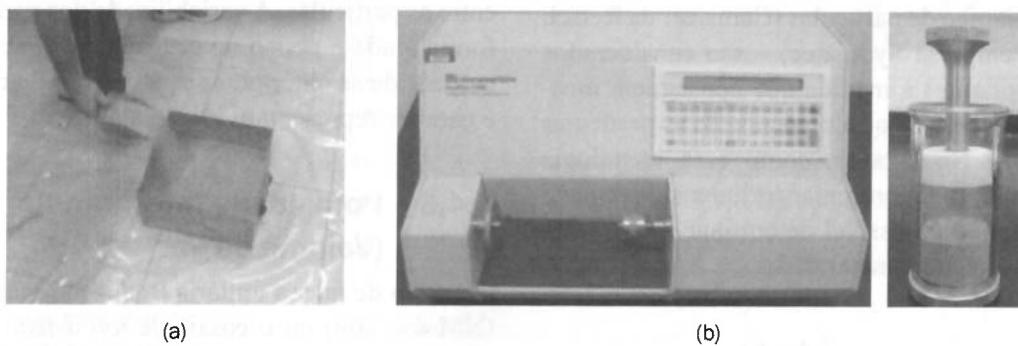


FIGURA 4.17 (a) Ensaio de massa unitária determinado manualmente; (b) ensaio de *tap density*, utilizando equipamento mecânico que padroniza o número de golpes que garantem a compactação do material.

utilizados para se caracterizar o empacotamento dos agregados. A massa unitária MU é expressa pela massa de agregados M necessária para preencher totalmente o volume V de um recipiente-padrão, a partir da seguinte expressão: $MU (\text{kg/m}^3) = M (\text{kg}) / V (\text{m}^3)$. Quanto maior a massa unitária, menor o volume de vazios intergranulares. Para se determinar o volume de vazios, é preciso se conhecer o volume de sólidos. O volume de sólidos só é determinado quando se realiza o ensaio de massa específica ($V_{\text{sólidos}} = M/ME$), comentado a seguir. A porosidade intergranular³ (volume de vazios) pode ser calculada, em porcentagem, pela relação entre o volume de sólidos e o volume do recipiente: $V_v (\%) = [(V_{\text{recipiente}} - V_{\text{sólidos}})/V_{\text{recipiente}}] \cdot V_{\text{recipiente}} = M/MU$. Assim, o volume de vazios fica expresso pela seguinte expressão: $V_v (\%) = [(1 - MU/ME)]$.

Esse tipo de ensaio é utilizado em estudos de dosagem em que se procura determinar o volume mínimo de ligantes que deve ser utilizado com os agregados nas formulações de misturas cimentícias. Misturas entre britas de diferentes tamanhos ou entre britas e areias são estudadas em dosagens de concreto, selecionando-se aquelas com maiores massas unitárias ou menores índices de vazios. A seleção de agregados com formato esférico e regular tem também grande impacto na redução do volume de pasta necessário para conferir fluidez constante aos materiais cimentícios (Tristão, 2005).

Embora os agregados pouco contribuam para as emissões de CO_2 dos materiais cimentícios (argamasas e concretos), estudos recentes mostram que a distribuição granulométrica descontínua deles também é fundamental para se produzir materiais cimentícios com baixa pegada de carbono (Damineli *et al.*, 2013). O empacotamento dos agregados é fundamental para se reduzir o volume de pasta necessário à fluidez do concreto. Fíleres, inertes como os agregados, são também essenciais para empacotar a pasta de cimento, desde que controlada sua área superficial. Baixo consumo de água implica baixo consumo de cimento para uma dada resistência.

4.4.4 Área Superficial

A área superficial é geralmente determinada por adsorção de camadas de gás nitrogênio na superfície

³ Na área de solos e geotécnica, utiliza-se uma definição conhecida como índice de vazios [$I_v = V_{\text{poros}}/V_{\text{sólidos}}$]. Esse conceito não é análogo ao de volume de vazios ou porosidade intergranular [$V_v = V_{\text{poros}}/(V_{\text{poros}} + V_{\text{sólidos}})$].

da amostra (Webb; Orr, 1997). O cálculo é realizado pelo método BET. Agregados são materiais que não possuem área superficial tão elevada quanto finos, apresentando problemas operacionais para se realizar as medições em razão da pouca representatividade de massa e dos limites de detecção do equipamento. Para viabilizar a determinação, demanda-se uso de portamostras maiores ($> 50 \text{ g}$) e medição com outros tipos de gases (criptônio, água). A área superficial pode ser estimada por granulometria a *laser* ou por análise de imagem dinâmica, admitindo-se as partículas como esferas perfeitas com diâmetros equivalentes às áreas destas, ou elipsoide (Loz *et al.*, 2021). Esse primeiro procedimento é simplificado para estimar a área (erros acima de 20 %); porque geralmente se desprezam as mudanças de forma dos agregados e a existência de poros intragranulares. A área dos poros dos agregados é computada no cálculo da área superficial específica pela técnica de adsortometria de gás ou pela técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio.

A área superficial é geralmente expressa em metro quadrado por grama de material. A área superficial dos agregados aumenta exponencialmente com a redução do tamanho das partículas (Tab. 4.7). Uma redução de 10 vezes no tamanho resultou em um aumento de área de 25 vezes.

Há poucos dados disponíveis sobre a determinação da área superficial de agregados, embora seja extremamente relevante para se compreender suas influências no estado fresco dos materiais cimentícios (Oliveira *et al.*, 2000; Romano *et al.*, 2011). A área superficial volumétrica dos agregados (m^2/dm^3), produto da área superficial (m^2/kg) pela massa específica aparente (kg/dm^3), representa a quantidade de área de superfície de agregados que deve ser encoberta pela pasta de cimento, para um dado volume de agregado (Loz, 2020). Tentativas recentes

TABELA 4.7 Influência do tipo de areia (natural ou britada) e da granulometria na área superficial (m^2/kg) dela, estimada pela granulometria a *laser*

Fração granulométrica (em mm)	Área superficial da areia de rlo (m^2/kg)
4,75-2,36	1,1840
2,36-1,18	1,9227
1,18-0,600	4,4241
0,600-0,300	7,4518
0,300-0,150	17,4786
0,150-0,075	44,6583

Fonte: extraída de Tristão (2005).

de estabelecer esse tipo de medida foram realizadas usando técnica de escaneamento 3D de partículas, ou técnica com base em interferometria de luz (Loz, 2020). O volume de pasta de cimento deve ser suficiente para preencher o volume de vazios intergranulares resultantes do empacotamento e molhar toda a superfície do agregado, garantindo uma distância mínima de separação de partículas (MPT e IPS), capaz de conferir condições reológicas adequadas aos materiais cimentícios (Rebmann, 2016).

Na ausência de uma caracterização completa e detalhada dos agregados, em função da grande influência da área superficial dos finos (materiais inferiores a 75 µm, que possuem distribuição de tamanho de partículas semelhantes ao cimento), são encontradas correlações empíricas para cada tipo de agregado, relacionando-se consumo de água no concreto (ou na argamassa) e teor de materiais finos presentes nos agregados (Weidmann, 2008), que podem ser úteis para estudos de dosagem desses materiais cimentícios.

4.4.5 Umidade e Inchamento

A umidade, quando presente na superfície dos agregados, acarreta o afastamento dos grãos, alterando o seu volume aparente. A água na superfície dos grãos se interconecta em função da tensão superficial, gerando maior afastamento entre as partículas (Fig. 4.18). Isso ocasiona o aumento de volume úmido. O inchamento é a relação obtida entre o volume úmido e o volume seco. Quanto maior o contato entre as

partículas e maior a quantidade de partículas, maior será o inchamento. Assim, o inchamento será significativo apenas para a fração areia, e maior em uma areia fina (~1,5 vez) se comparado ao de uma areia grossa (~1,20 vez). Existe um teor crítico de umidade⁴ no qual o volume úmido fica praticamente constante, até voltar a cair, quando o volume de água é tal que preenche todos os vazios intergranulares presentes nos agregados.

Esse ensaio tem utilidade em situações nas quais as quantidades de areia utilizadas nos materiais cimentícios são dosadas em volume (por exemplo, argamassas, fábricas de blocos de concreto pequenas) e esses materiais estão estocados ao céu aberto. Usar areia úmida no lugar da seca em uma dosagem em volume pode ocasionar uma redução de metade da massa dessa areia prevista. Além de não disponibilizar os materiais no volume previsto, os materiais cimentícios irão retrair mais, fluidificar mais e ser menos resistentes. O excesso de água certamente irá aumentar a relação água/cimento, causando um aumento da porosidade e redução da resistência do material. Em uma fábrica de concreto seco, em que os teores de água das misturas não ultrapassam 6 % dos materiais secos, pode levar à perda dos lotes de produção (em razão de falhas na moldagem).

4.4.6 Porosidade Intragranular (Absorção de Água)

Agregados, até mesmo os mais densos, possuem alguma porosidade. Com a escassez de fontes de agregados naturais, é comum a incorporação de agregados reciclados, principalmente aqueles obtidos pela reciclagem de resíduos de construção e demolição. Esses agregados, inclusive de outros tipos, são mais porosos que os naturais. Assim, torna-se fundamental, em qualquer processo de controle de qualidade dos agregados, o controle de sua porosidade. Cada partícula do agregado tem uma porosidade, devendo um conjunto de partículas apresentar uma distribuição de valores. Embora relevante, a caracterização utilizada para os agregados é simplificada e acaba geralmente se determinando a porosidade média, válida para um conjunto de partículas, obtido a partir de uma massa mínima definida em norma.

Embora a porosidade possa ser determinada pela técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio, geralmente é determinada, de forma indireta, pela absorção de água (ensaio de simples realização). A absorção de água representa a massa de água

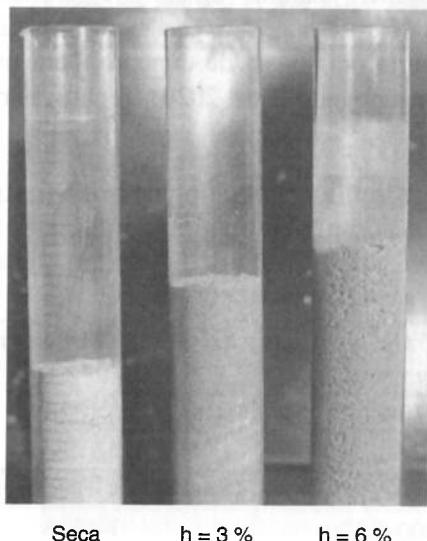


FIGURA 4.18 Inchamento da areia com diferentes teores de umidade.

⁴ U (%) = [(Massa úmida – Massa seca) / Massa seca].

absorvida nos poros do agregado, durante 24 horas, sob pressão atmosférica,⁵ na condição saturado com superfície seca (SSS) (Fig. 4.19). A absorção de água é expressa pela seguinte fórmula: AA (%) = [(Massa SSS – Massa seca)/Massa seca] × 100.

Nos agregados graúdos, essa condição é determinada por secagem com pano [Fig. 4.20(a)], ao passo que nos agregados miúdos, essa condição é determinada pelo ângulo de repouso das partículas. Quando se atinge a condição SSS, o agregado moldado pelo cone se desagrega [Fig. 4.20(b)].

Há diversos outros métodos em pesquisa para se determinar a condição SSS dos agregados de forma menos subjetiva (essa depende essencialmente das impressões do operador), sem desagregação

⁵ Se a pressão fosse maior, certamente o valor de absorção de água seria maior. Medidas usando pressão negativa de vácuo de agregados imersos em água ou longos períodos indicam que este valor chega a dobrar (Schouenborg *et al.*, 2004).

excessiva dos agregados (por causa do manuseio durante a realização do ensaio) (Dias, 2004; Kandhal; Mallick; Huner, 2000; Miller *et al.*, 2014) ou de forma mais rápida (Damineli, 2007; Mills-Beale *et al.*, 2009). Para os problemas de subjetividade e desagregação das amostras, são utilizados métodos centrífugos ou com base no controle de umidade do ambiente de secagem com a amostra. Os métodos rápidos são o uso de vácuo, para acelerar o processo de saturação dos poros com água, ou acelerar o processo de secagem com micro-ondas. Essas técnicas são importantes e mais utilizadas para os agregados porosos, como os agregados leves e os reciclados (de resíduos de construção e demolição).

Os agregados porosos, em virtude do fenômeno de absorção de água, interferem nas características reológicas dos materiais cimentícios (Poon *et al.*, 2004). Em alguns casos, é interessante determinar a cinética de absorção de água (absorção de água no tempo) (Fig. 4.21), definindo-se um teor de água a

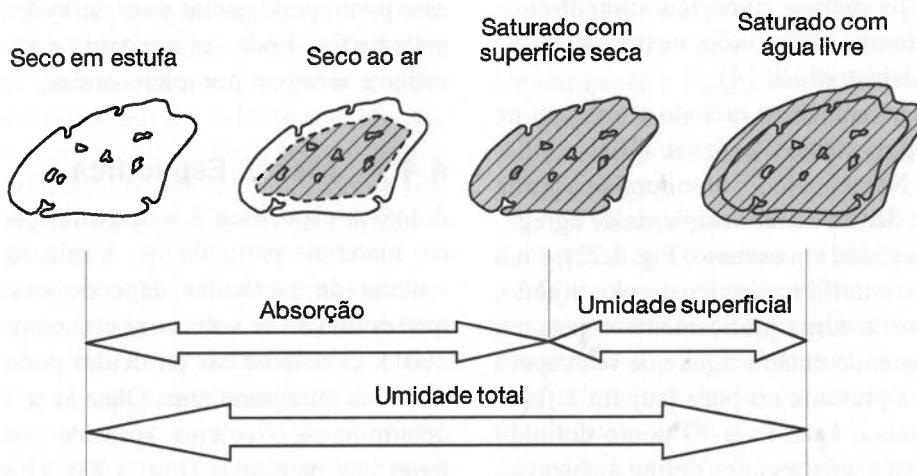


FIGURA 4.19 Absorção de água e definição do agregado na condição saturado com superfície seca. Fonte: adaptada de Neville e Brooks (2013).

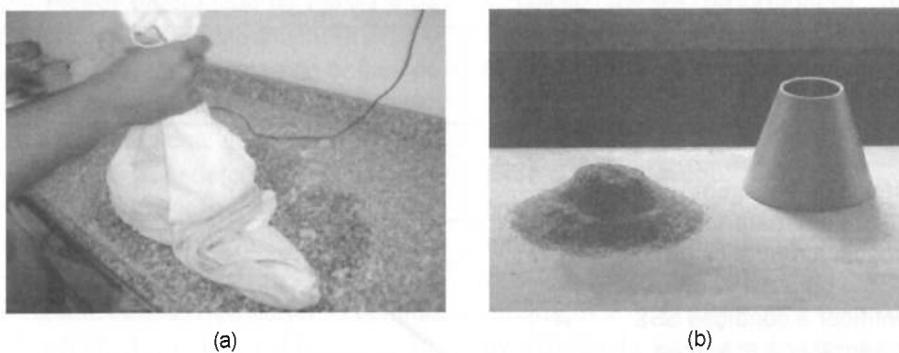


FIGURA 4.20 (a) Secagem dos agregados graúdos com pano;
(b) desmoronamento dos agregados miúdos para determinação na condição saturado com superfície seca.

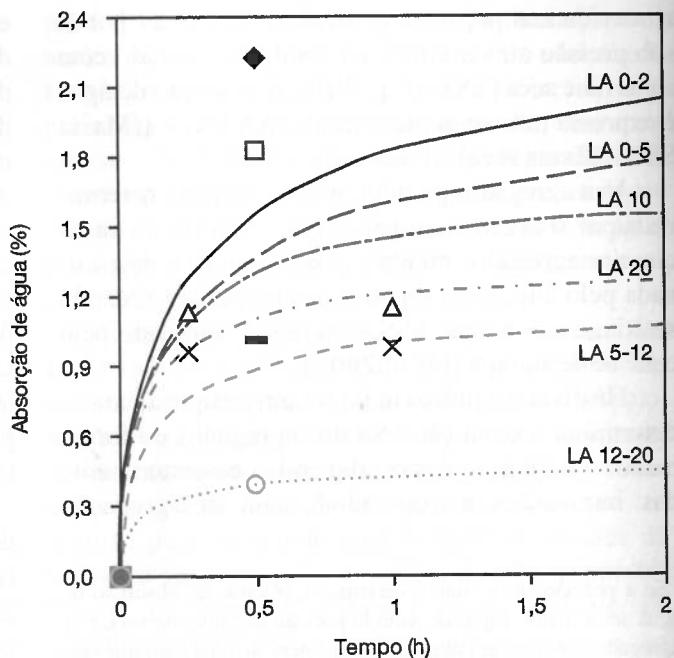


FIGURA 4.21 Cinética de absorção de água (absorção de água no tempo).
Fonte: adaptada de Klein et al. (2014).

ser utilizado na pré-saturação do agregado, antes da mistura com os demais materiais cimentícios, equivalente ao tempo envolvido nessa operação (Carrijo, 2005; Klein et al., 2014).

Vale comentar também o método com base na secagem de corpos sólidos porosos (Dias, 2004; Damineli, 2007). Nesse método, monitora-se a perda de água no tempo dentro de um recipiente de agregados com água superficial em excesso (Fig. 4.22). Uma vez que se atinge o equilíbrio térmico desse conjunto, a taxa de secagem se torna praticamente constante, sofrendo queda, quando então a água que se evapora passa a ser a água presente no poro (sujeito à força capilar), e não mais a água livre. O ponto definido pela mudança desses dois regimes define a absorção

de água. Não se manipula diretamente o material e esse ponto pode passar a ser definido por um critério matemático. Pode ser acelerado com saturação com vácuo e secagem por micro-ondas.

4.4.7 Massa Específica

A massa específica é a determinação da densidade em materiais particulados. A relação entre massa e volume de partículas depende essencialmente de qual definição de volume se está empregando (Webb, 2001). O volume das partículas pode ou não incluir os poros intragranulares. Quando se inclui os poros, determina-se o volume aparente (ou volume envelope) das partículas (Fig. 4.23). Quando se exclui

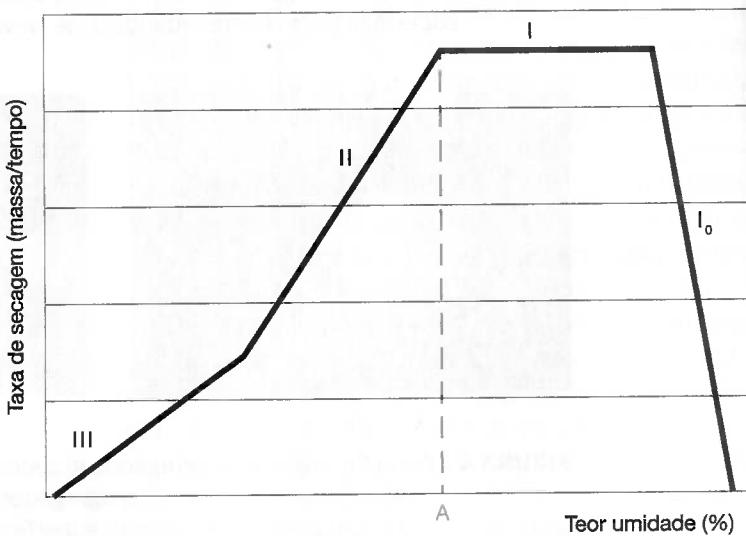


FIGURA 4.22 Cinética de secagem de água em materiais porosos. A mudança do evento I para o II permite identificar a condição SSS e determinar a absorção de água. Fonte: adaptada de Dias (2004) e Damineli (2007).

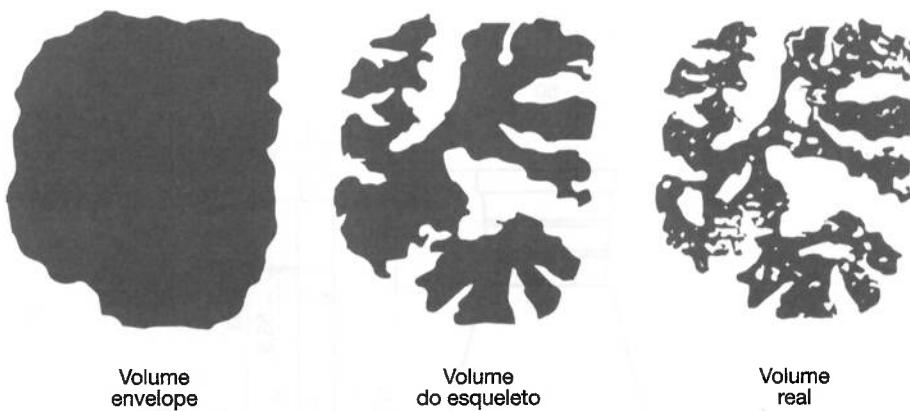


FIGURA 4.23 Volume de partículas considerado nas determinações de massa específica dos agregados. Fonte: adaptada de Webb (2001).

esse volume, determina-se o volume real (excludo-se os poros acessíveis à água pela superfície das partículas). O volume real das partículas pode ainda ser diferenciado de acordo com as definições, se incluídos os poros abertos (acessíveis à água) ou fechados (inacessíveis à água) das partículas. O volume real (esqueleto) é aquele que, em conjunto com o volume de sólidos, inclui os poros fechados (inacessíveis ao meio de saturação). Para se diferenciar o volume esqueleto do volume real efetivo, deve-se moer o material até destruir toda a porosidade fechada existente. Nesse caso, o volume real (efetivo) será apenas aquele constituído por material efetivamente sólido.

Para se determinar a massa específica dos agregados, são utilizados dois métodos clássicos: picnômetro e balança hidrostática. O ensaio do picnômetro é usado para as areias, enquanto a balança hidrostática é empregada para as britas. As britas, em razão de suas grandes dimensões, possuem grandes vazios intergranulares entre as partículas, permitindo mais facilmente a saída de bolhas de ar. O mesmo não acontece com as areias, que requerem a realização de um ensaio com menor quantidade de massa e de maneira mais cuidadosa, demandando, inclusive, o uso de bomba de vácuo, para a remoção de bolhas de ar que ficam apreendidas no material.

O picnômetro é um recipiente que possui volume aferido. No ensaio, inicialmente determina-se a massa de sólidos e do picnômetro cheio de água (NM 52:2003). Em seguida, são adicionados no picnômetro os agregados não porosos e o volume de água necessário para completar o volume. Pesa-se o conjunto. O volume de sólidos é igual a $[(M_{\text{amostra}} + M_{\text{pic}} + M_{\text{cheio de água}}) - (M_{\text{amostra}} + M_{\text{pic}} - M_{\text{água faltante}})] / \text{densidade da água}$ (1 kg/dm^3). A massa específica real (kg/dm^3) é igual a $M_{\text{sólidos}} / V_{\text{sólidos}}$.

Para se determinar o volume aparente, faz-se necessário realizar primeiramente o ensaio de absorção de água. O volume de poros intragranulares é determinado pela M água absorvida no agregado/ densidade da água (1 kg/dm^3). Os agregados porosos devem ser, em seguida, adicionados no picnômetro na condição SSS, para evitar alterações no volume de água previsto no ensaio realizado com o picnômetro. Determina-se o $V_{\text{sólidos}}$, conforme comentado antes. O volume aparente é calculado pela soma do $V_{\text{poros}} + V_{\text{sólidos}}$. A massa específica aparente (kg/dm^3) é igual a $M_{\text{sólidos}} / V_{\text{aparente}}$.

Na balança hidrostática (NM 53:2003), o $V_{\text{sólidos}}$ das partículas é determinado pela lei de empuxo (Fig. 4.24), sendo equivalente a $[(\text{massa seca} - \text{massa submersa}) / \text{densidade da água}]$ (Damineli, 2007). Para se determinar o volume aparente, deve-se também realizar primeiro o ensaio de absorção de água, encontrando-se na condição SSS. O V_{aparente} ($V_{\text{sólidos}} + V_{\text{poros}}$) é igual a $[(\text{massa SSS} - \text{massa submersa}) / \text{densidade da água}]$ (1 kg/dm^3).

Alguns equipamentos instrumentais comercialmente disponíveis podem reduzir o tempo de caracterização dessas propriedades, por eliminar essa necessidade de pré-saturar os agregados em água. O primeiro deles é a picnometria de gás hélio, que determina o volume de sólidos por inserção de gás hélio, em vez da água, em uma célula de dimensão padronizada (Webb; Orr, 1997). A determinação consiste em encher uma célula de referência, com uma pressão de referência, e, em seguida, alimentar este gás em outra célula que contém o sólido, determinando-se a pressão que permanece nesta célula de referência. A partir da relação entre as pressões e o volume de referência da célula, determina-se o volume de sólidos ($P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$), em condição controlada de temperatura.

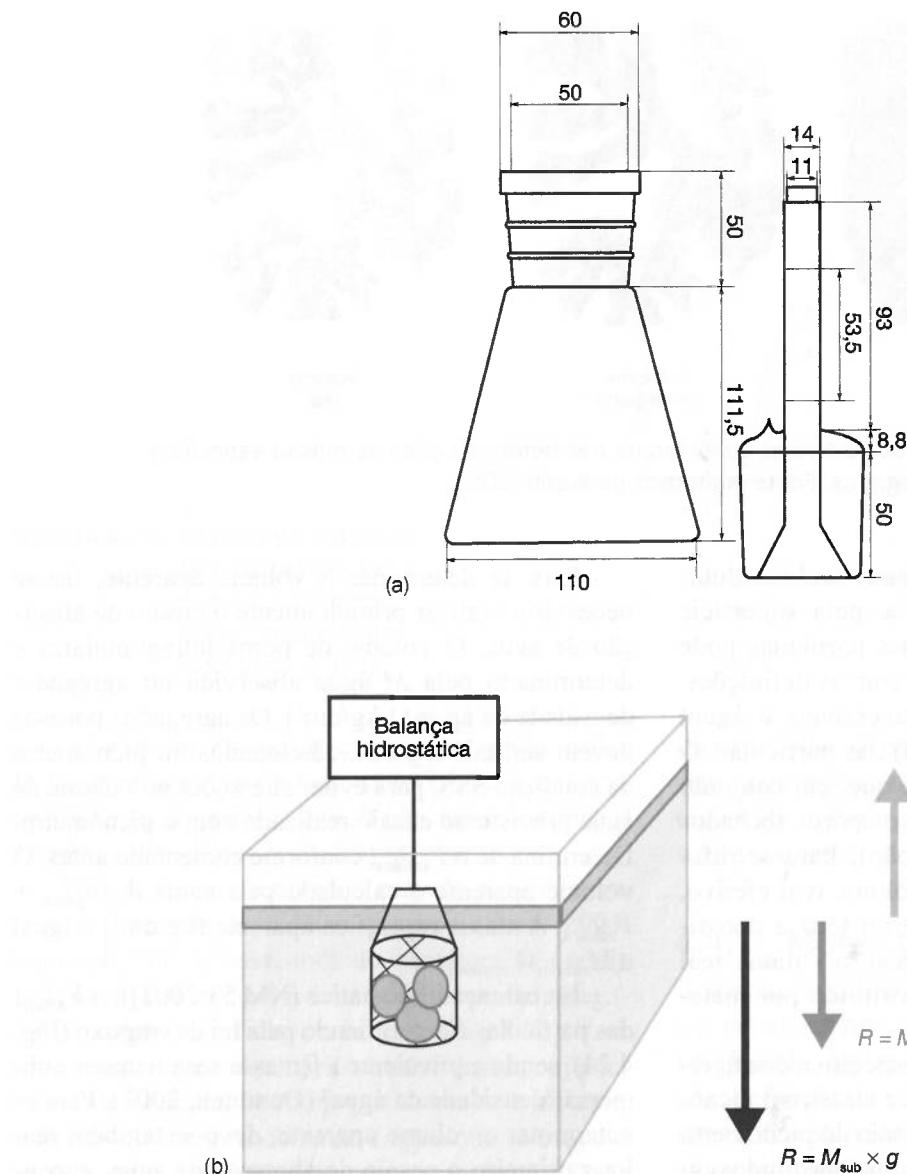


FIGURA 4.24 (a) Picnômetro utilizado na determinação da massa específica da areia;
 (b) balança hidrostática para a determinação da massa específica da brita.

O segundo equipamento é o picnômetro GeoPyc®, da empresa Micromeritics, que determina o volume aparente (envelope), por meio de um pó ultrafino (Dry-Flo®), no lugar da água (Webb, 2001). Este método é adequado para grãos acima de 2 mm. O tempo necessário para determinação dos volumes por estes métodos é inferior a 30 minutos (com agregados já secos), tempo certamente inferior ao de outros métodos já comentados. No picnômetro de pó (GeoPyc®), realiza-se um processo de compactação controlado (Fig. 4.25), com um material fino (Dry-Flo®). Determina-se uma distância do pistão até a superfície do pó. Em seguida, a massa das partículas é determinada e elas são adicionadas no cilindro, determinando-se novamente a distância do pistão até a superfície

do pó. A diferença de distância (h) permite o cálculo do volume aparente, composto pelos poros e sólidos presentes nas partículas ($V_a = \pi r^2 h$).

A combinação desses dois métodos instrumentais permite caracterizar as massas específicas nas condições aparente (MEA) e real (MER) em, no máximo, 2 horas de trabalho (Angulo *et al.*, 2012), considerando-se que a eliminação de uma umidade residual do material pode ser realizada em aproximadamente 1 hora. A relação entre duas propriedades estima a porosidade intragranular [Eq. (4.3)], com maior precisão, em função do uso do gás hélio sob pressão.

$$\text{Porosidade (\%)} = \left(\frac{V_{\text{poros}}}{V_{\text{poros}} + V_{\text{sólidos}}} \right) \times 100 \quad (I)$$

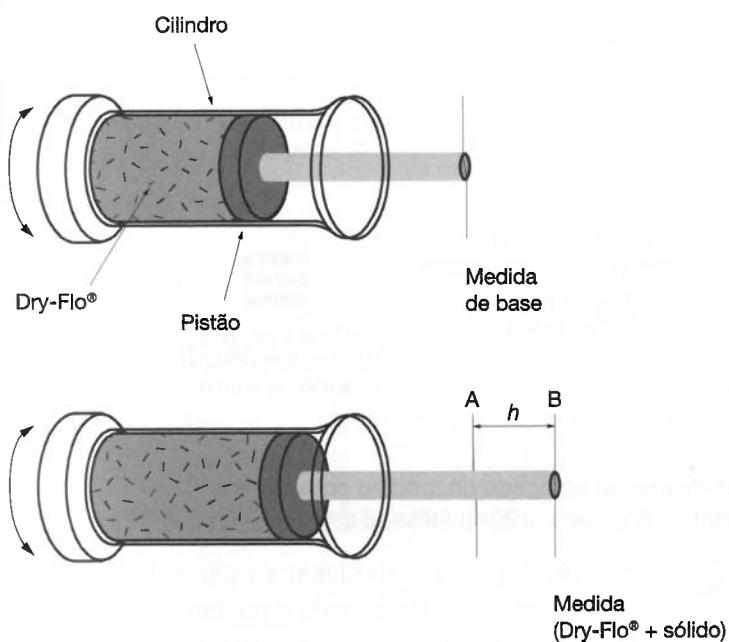


FIGURA 4.25 Princípio de medida de massa específica pelo picnômetro GeoPyc®.

$$\text{Porosidade (\%)} = \left(\frac{\frac{M_{\text{seca}} - M_{\text{seca}}}{\frac{MEA - MER}{MEA}}}{\frac{M_{\text{seca}}}{MEA}} \right) \times 100 \quad (\text{II})$$

$$\text{Porosidade (\%)} = \left(\frac{\frac{1 - 1}{MEA - MER}}{\frac{1}{MEA}} \right) \times 100 \quad (\text{III})$$

$$\text{Porosidade (\%)} = \left(1 - \frac{MEA}{MER} \right) \times 100 \quad (4.3)$$

4.5 EFEITO DOS AGREGADOS NOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Além de influenciarem nas propriedades dos materiais cimentícios no estado fresco (aumento da demanda de água no concreto em virtude da porosidade inter(intra)granular e área superficial) dos agregados, estes também influenciam nas propriedades dos materiais cimentícios no estado endurecido. O agregado natural (pouco poroso), por ser mais rígido que a pasta de cimento, é fundamental para reduzir a retração, aumentar o módulo de elástico (Fig. 4.26) e reduzir a fluência dos materiais cimentícios (Neville; Brooks, 2013). Quanto maior o volume de agregados naturais nos materiais cimentícios, menor será a retração, maior o módulo de deformação e menor a fluência dos materiais cimentícios

(Neville; Brooks, 2013; Alexander; Mindess, 2005). A seleção do tipo de agregado natural é fundamental para se definir essas características. Concretos de elevada resistência requerem também agregados selecionados, de resistência elevada, pois podem limitar a resistência do material (Larrard, 1999) (Fig. 4.27). A resistência do concreto depende da resistência da matriz. Essa resistência está vinculada, essencialmente, ao volume e à resistência de pasta de cimento usado no preenchimento dos vazios deixados pelos agregados. A resistência da pasta de cimento não é igual à da matriz, porque os agregados geram efeito de confinamento no compósito, sob compressão. Quando a resistência do concreto atinge a resistência do agregado, a resistência dessa fase passa a limitar a resistência do concreto.

Por outro lado, os agregados porosos (leves, reciclados) reduzem a resistência mecânica e o módulo elástico dos materiais cimentícios, assim como aumentam a retração, quando usados em substituição aos agregados naturais (não porosos).

Com relação à durabilidade, os agregados podem conter fases amorfas constituídas por silício e alumínio, que se solubilizam lentamente e reagem com os álcalis do cimento, formando produtos expansivos que ocasionam fissuração em peças de concreto (Mehta; Monteiro, 2006) (Fig. 4.28). Existe um conjunto de normas brasileiras dedicadas ao assunto, sendo possível testar o potencial expansivo do agregado com o tipo de cimento específico, inclusive formas de mitigar com adição de pozolanas e finos.

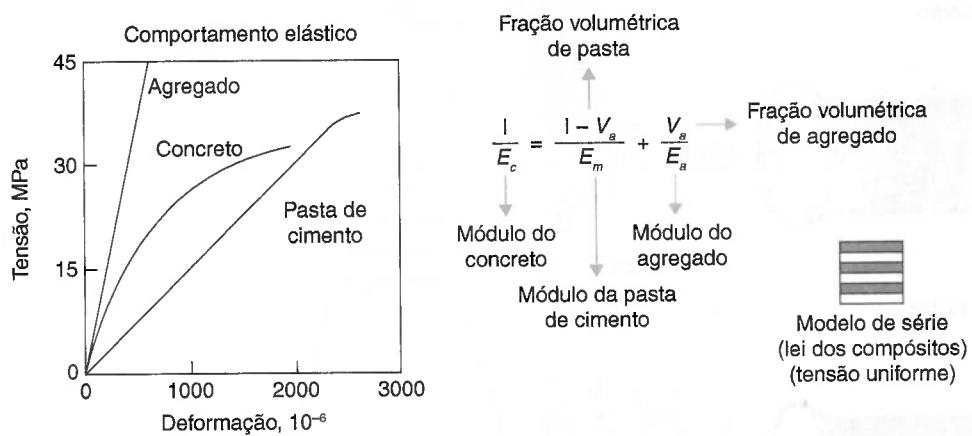


FIGURA 4.26 Influência do módulo e volume do agregado no módulo do concreto.
Fonte: adaptada de Mehta e Monteiro (2006); Alexander (2005).

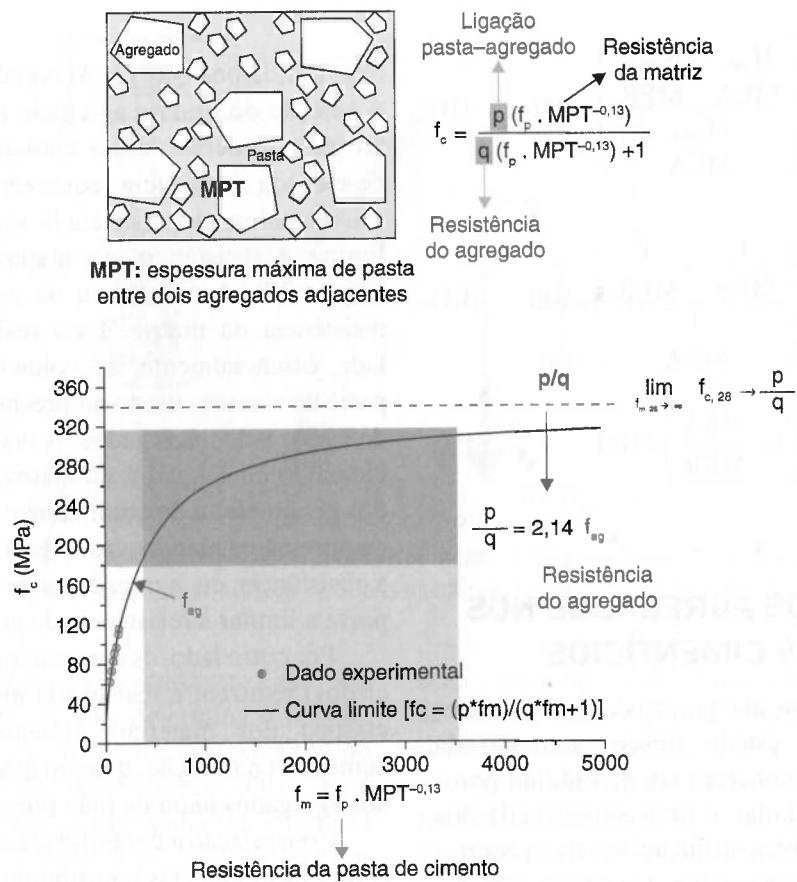


FIGURA 4.27 Efeito da pasta de cimento e dos agregados na resistência à compressão do concreto, segundo o modelo de Larrard. Fonte: adaptada de Larrard (1999); Silva (2022).

Os ensaios têm caráter preventivo, evitando o problema; ou seja, deve-se realizar ensaio petrográfico ou esses relacionados com o desempenho (expansão

de argamassas e concretos) antes da aplicação definitiva do material na obra, como geralmente ocorre em grandes obras de barragem.

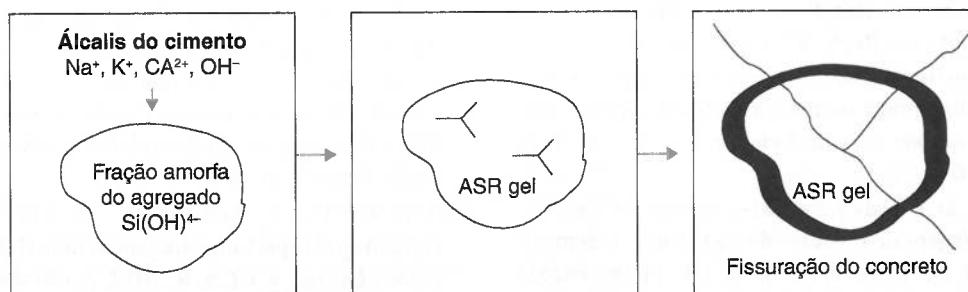


FIGURA 4.28 Mecanismo da expansão e fissuração da reação dos álcalis do cimento com a fração amorfá (contendo silício e alumínio) dos agregados. Fonte: adaptada de Figueira et al. (2019).

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os agregados são os materiais mais utilizados na construção e correspondem a quase todo o estoque de material presente nas edificações e obras de infraestrutura. O consumo *per capita* desse material é muito elevado em países em desenvolvimento ou desenvolvidos (> 4 t/hab. por ano) e, por isso, acarreta o esgotamento regionalizado de jazidas em grandes cidades ou regiões com condições geológicas não favoráveis. Mais da metade da produção dos agregados é destinada ao uso como materiais cimentícios (argamassas e concretos). A sua extração gera resíduos (estéreos) pouco perceptíveis nas cidades. Não se trata de material que requer uso intensivo de energia ou de geração de CO₂ na sua produção, mas não só expõe trabalhadores a materiais particulados, sendo obrigatório o uso de equipamentos de proteção individual (EPIs), bem como pode causar danos ambientais irreversíveis em leitos de rios. Seu transporte, embora se dê por grandes distâncias, não contribui significativamente na geração de CO₂, mas sim para problemas ambientais localizados relativos às emissões de SO_x (qualidade do ar urbano) e chuvas ácidas em centros urbanos.

O uso desse material requer sua divisão em lotes de produção e, consequentemente, as formas de manipulação geram heterogeneidade de suas características, devendo-se adotar procedimentos adequados de estoque, manipulação e amostragem do material. Há cerca de 30 normas técnicas envolvendo amostragem, classificação e ensaios para avaliar o desempenho dos agregados em uso, as quais variam em função das aplicações. Cabe ao engenheiro selecionar os ensaios ou controlar esse material por fichas de especificação e controle de qualidade de serviços de obras. O uso dos agregados em materiais cimentícios requer, principalmente, a caracterização das seguintes características: distribuição granulométrica, forma, porosidade (inter e

intragranular), área superficial específica e massa específica. Essas características são utilizadas para se dosar materiais cimentícios com índice de vazios reduzidos e com mobilidade facilitada (baixo consumo de água), compatíveis com os requisitos esperados de desempenho mecânico, deformabilidade reduzida no concreto. A seleção dessas características é fundamental para se produzir materiais cimentícios ecoeficientes, de menor custo, melhor desempenho ambiental e, em decorrência, com baixa pegada de carbono. O módulo elástico do agregado é fundamental para definir o módulo de deformação do concreto estrutural e deve ser mais bem controlado, assim como a resistência do agregado limita a resistência do concreto. Com relação ao aspecto de durabilidade, os agregados à base de silicatos não devem conter fração amorfá, porque podem desenvolver reação com os álcalis do cimento. Ensaios podem medir a expansão potencial do concreto, e as possíveis formas de mitigá-lo com pozolanas, finos, de modo a tornar viável o uso do material.

BIBLIOGRAFIA

- ALLEN, T. *Particle Size Measurement – Volume 1: Powder sampling and*. [s.l.] Springer, 1997.
- ALEXANDER, M. G.; MINDESS, S. *Aggregates in concrete*. London; New York: Taylor & Francis, 2005.
- ALMEIDA, S. L. M.; LUZ, A. B. *Manual de agregados para a construção civil*. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral, Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT), 2009.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *Aggregates for concrete. ACI Education Bulletin E1-07*, 2007, Michigan.
- ANGULO, S. C.; SILVA, R. B.; OLIVEIRA, V. L.; ULSSEN, C. Caracterização das propriedades físicas dos agregados graúdos de RCD reciclados por picnometria de pó e de gás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 54., 2012, Maceió. *Anais...* Maceió: Ibracon, 2012.

- ANGULO, S. C.; CARRIJO, P. M.; FIGUEIREDO, A. D.; CHAVES, A. P.; JOHN, V. M. On the classification of mixed construction and demolition waste aggregate by porosity and its impact on the mechanical performance of concrete. *Materials and Structures*, v. 43, n. 4, p. 519-528, 2010.
- ANGULO, S. C. et al. (eds.). *Pesquisa setorial ABRECON 2020: a reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil*. [s.l.] Universidade de São Paulo. Escola Politécnica, 2022.
- ANGULO, S. C. et al. Probability distributions of mechanical properties of natural aggregates using a simple method. *Construction and Building Materials*, v. 233, p. 117269, fev. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO. *Areia & Brita*, n. 52, Anepac, 2010. Disponível em: <https://anepac.org.br/revistas/edicao-52-2010-nov-dez/>. Acesso em: 2 set. 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação*. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7809: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro*. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9935: Agregados – Terminologia*. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15116: Agregados de resíduos sólidos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- BENGTSSON, M.; EVERSSON, C. M. Measuring characteristics of aggregate material from vertical shaft impact crushers. *Minerals Engineering*, v. 19, p. 1479-1486, 2006.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Agregados. In: *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. 3. ed. Rio de Janeiro: Petrobras/Proasfalto, 2010, p. 114-154.
- BLEISCHWITZ, R.; BAHN-WALKOWIAK, B. European aggregates industry: a case for sectoral strategies. In: *Berlin Conference on the Human Dimensions of Global Environmental Change*, Berlin, 2006.
- BROCK, J. D.; MAY, J. D.; RENEGAR, G. *Segregation: causes and cures*. Tennessee: Astec Industries, 2011.
- BUENO, R. I. S. *Aproveitamento da areia gerada em obra de desassoreamento: caso Rio Paraibuna/SP*. 2010. 110 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- CAMARINI, G. *Materiais de construção: apresentações*. São Paulo: Universidade Estadual de Campinas, 2011.
- CARRIJO, P. M. *Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto*. 2005. 129 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- CASTRO, A. L. *Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho*. 2007. 334 p. Tese (Doutorado) – Interunidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- CAVARRETTA, I.; SULLIVAN, O. The mechanics of rigid irregular particles subject to uniaxial compression. *Géotechnique*, v. 62, n. 8, 2012, p. 681-692. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1680/geot.10.P.102>. Acesso em: 05 fev. 2025.
- CHAVES, A. P. *Teoria e prática do tratamento de minérios*. 2. ed. São Paulo: Signus, v. 1, 2002.
- CHAVES, A. P.; WHITAKER, W. Operações de beneficiamento de areia. In: *Manual de agregados para a construção civil*. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral, Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT), 2009.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 369: Dispõe sobre os casos excepcionais, de utilidade pública, interesse social ou baixo impacto ambiental, que possibilitam a intervenção ou supressão de vegetação em Área de Preservação Permanente – APP. 2006. Disponível em: <http://www.mma.gov.br>. Acesso em: 12 set. 2024.
- CUCHIERATO, G. *Caracterização tecnológica de resíduos da mineração de agregados da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), visando seu aproveitamento econômico*. 2000. 201 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- DAMINELI, B. L. *Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas*. 2013. 265 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- DAMINELI, B. L. *Estudo de métodos para caracterização de propriedades físicas de agregados graúdos de resíduo de construção e demolição reciclados*. 2007. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- DAMINELI, B. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Lower binder intensity eco-efficient concretes. In: *Eco-efficient concrete*. Woodhead Publishing in Civil and Structural Engineering. Pacheco-Torgal, Jalali, Labrincha, John (Ed.), 2013. p. 26-41, 2007.
- DIAS, J. F. *Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo*. 2004. 268 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- ENGBLOM, N.; SAXÉN, H.; ZEVENHOVEN, R.; NYLANDER, H.; ENSTAD, G. G. Segregation of construction materials in silos. Part 1: Experimental findings on different scales. *Particulate Science and Technology*, v. 30, p. 145-160, 2012.

- ERDOGAN, S. T.; FOWLER, D. W. Determination of aggregate shape properties using x-ray tomographic methods and the effect of shape on concrete rheology. *Research Report ICAR 106-1*. International Center for Aggregates, The University of Texas at Austin, 2005.
- FALCÃO, C. M. B. B.; SOUZA, D. M. O. M.; FERREIRA, J. Z.; MATAR, M. R.; SOUZA, R. R. 188p. 2013. *Análise da qualidade do investimento e emissões de CO₂ associadas à produção de agregados reciclados na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP)*. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- FIGUEIRA, R. B. et al. Alkali-silica reaction in concrete: Mechanisms, mitigation and test methods. *Construction and Building Materials*, v. 222, p. 903-931, out. 2019.
- FRAZÃO, E. B. Panorama da produção e aproveitamento de agregados para construção. In: *Programa de capacitação de gestores de empresas mineradoras de agregados para a construção civil*. Ministério de Minas e Energia, 2006.
- GEOMAC. *Estudo Ambiental lavra de granito com beneficiamento e canteiro industrial*. 2012. 128 p. Disponível em: <http://licenciamento.ibama.gov.br>. Acesso em: 12 set. 2024.
- GONÇALVES, J. M. F.; MARTINS, G. Consumo de energia e emissão de gases do efeito estufa no transporte de cargas no Brasil. *Brasil Engenharia*, p. 70-76, ago. 2008.
- HABERT, G.; BOUZIDI, Y.; CHEN, C.; JULLIEN, A. Development of a depletion indicator for natural resources used in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 54, p. 364-376, 2010.
- HASHIMOTO, S.; TANIKAWA, H.; MORIGUCHI, Y. Where will large amounts of materials accumulated within the economy go? A material flow analysis of construction minerals for Japan. *Waste Management*, v. 27, p. 1725-1738, 2007.
- HAWLITSCHKEK, G. et al. Análise de imagens por fluxo dinâmico de partículas. *Brasil Mineral*, São Paulo, v. 1, n. 329, p. 82-85, maio 2013.
- HOLCIM. *Environment Product Declaration of Aggregates*. Romênia, 2014. Disponível em: <http://www.holcim.ro/>. Acesso em: 12 set. 2024.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). *Informações e análises da economia mineral brasileira*. 6. ed. Brasília: Ibram, 2011. Disponível em: <http://www.ibram.org.br>. Acesso em: 12 set. 2024.
- JORDAN, C. et al. Sand mining in the Mekong Delta revisited - current scales of local sediment deficits. *Scientific Reports*, v. 9, n. 1, p. 17823, dez. 2019.
- JULLIEN, A.; PROUST, C.; MARTAUD, T.; RAYS-SAC, E.; ROPERT, C. Variability in the environmental impacts of aggregate production. *Resources, Conservation and Recycling*, n. 62, p. 1-13, 2012.
- KANDHAL, P.; MALLICK, R.; HUNER, M. Measuring Bulk-Specific Gravity of Fine Aggregates: development of New Test Method Transp. *Journal of Transportation Research Board*, v. 1721, p. 81-90, jan. 2000.
- KLEIN, N. S.; AGUADO, A.; TORALLES-CARBONARI, B.; REAL, L. V. Prediction of the water absorption by aggregates over time: modelling through the use of value function and experimental validation. *Construction and Building Materials*, p. 213-220, 2014.
- KRAUSMANN, F. et al. From resource extraction to outflows of wastes and emissions: The socioeconomic metabolism of the global economy, 1900-2015. *Global Environmental Change*, v. 52, p. 131-140, set. 2018.
- KUDROLLI, A. Size separation in vibrated granular matter. *Rep. Prog. Phys.* v. 67, n. 209–247, 2004.
- KWAN, A. K. H. et al. Particle shape analysis of coarse aggregate using Digital Image Processing. *Cement and Concrete Research*, v. 29, p. 1403-10, 1999.
- LA SERRA, H. A.; REZENDE, M. M. *Agregados para a construção civil*. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), 2012. Disponível em: <http://www.anepac.org.br>. Acesso em: 12 set. 2024.
- LARRARD, F. de. *Concrete mixture proportioning: a scientific approach*. London: E & FN Spon, 1999.
- LIST, J.; KÖHLER, U.; WITT, W. Innovations in Dynamic Image Analysis: down to 1 μm. In: WORLD Congress on Particle Technology (WCPT6). *Proceedings*. Nuremberg, Germany: SPE, 2010.
- LOZ, P. H. F. Avaliação multiescala da rugosidade de agregados graúdos naturais. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.
- LOZ, P. H. F. et al. Use of a 3D Structured-Light Scanner to Determine Volume, Surface Area, and Shape of Aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 33, n. 9, p. 04021240, set. 2021.
- MARQUES, E. D. et al. Influence of acid sand pit lakes in surrounding groundwater chemistry, Sepetiba sedimentary basin, Rio de Janeiro, Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 112, p. 306-321, jan. 2012.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete: microstructure, properties and materials*. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2006.
- MENDES, T. M. *Influência do coeficiente de atrito entre os agregados e da viscosidade da matriz no comportamento reológico de suspensões concentradas heterogêneas*. 2008. 103 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- MIATTO, A. et al. Global patterns and trends for non-metallic minerals used for construction: global non-metallic minerals account. *Journal of Industrial Ecology*, v. 21, n. 4, p. 924-937, ago. 2017.
- MILLER, A. E.; BARRETT, T. J.; ZANDER, A. R.; WEISS, W. J. Using a centrifuge to determine moisture properties of lightweight fine aggregate for use in internal curing. *Advances in Civil Engineering Materials*, v. 3, n. 1, 2014.
- MILLS-BEALE, J.; YOU, Z.; WILLIAMS, R. C.; DAI, Q. Determining the specific gravities of coarse aggregates utilizing vacuum saturation approach.

- Construct and Building Materials*, v. 23, n. 3, p. 1316-1322, mar. 2009.
- MORA, C. F.; KWAN, A. K. H.; CHAN, H. C. Particle size distribution analysis of coarse aggregate using digital image processing. *Cement and Concrete Research*, v. 28, n. 6, p. 921-932, 1998.
- NEVILLE, A.; BROOKS, J. J. *Tecnologia do concreto*. 2. ed. São Paulo: Bookman, 2013.
- NOHL, J.; DOMNICK, B. *Stockpile segregation*. Technical Paper T-551. Morris, Minnesota: Superior Industries, 2000.
- NORMA MERCOSUL (NM). NM 26: Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2009.
- NORMA MERCOSUL (NM). NM 27: Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.
- NORMA MERCOSUL (NM). NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- NORMA MERCOSUL (NM). NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.
- NORMA MERCOSUL (NM). NM 53: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.
- NORMA MERCOSUL (NM). NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. *Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico*. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000.
- OTTINO, J. M.; KHAKHAR, D. V. Mixing and Segregation of Granular Materials. *Annual Review of Fluids Mechanical*, n. 32, p. 55-91, 2000.
- PACHECO, A. A. L. et al. Transportation impact on CO₂ emissions of concrete: a case study in Rio Branco/Brazil. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, v. 15, n. 6, p. e15609, 2022.
- PADMALAL, D.; MAYA, K. *Sand Mining*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014.
- PETERSEN, L.; DAHL, C. K.; ESBENSEN, K. H. Representative mass reduction in sampling—a critical survey of techniques and hardware. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, v. 74, n. 95–114, 2004.
- PETERSEN, L. et al. Representative sampling for reliable data analysis: Theory of Sampling. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, n. 77, p. 261-277, 2005.
- POON, C. S. et al. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, n. 34, p. 31-36, 2004.
- PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). Aggregates for concrete. In: *Design and control of concrete mixes*. 14. ed. Illinois: PCA, 2003. p. 79-103.
- REBMAN, M. S.; HAWLITSCHER, G.; CARMO, R.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G. Efeito da forma dos agregados graúdos sobre o comportamento no estado fresco de concreto autoadensável com baixo consumo de cimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 54., 2012, Maceió. *Anais...* Maceió, AL: Ibracon, 2012.
- REBMAN, M. S. *Robustez de concretos com baixo consumo de cimento Portland: desvios no proporcionamento e variabilidade granulométrica e morfológica dos agregados*. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.
- ROMANO, R. C.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G. Propriedades do concreto no estado fresco. *Concreto: Ciência e Tecnologia*, v. 1, São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2011.
- RUSS, J. C. *The image processing handbook*. 6. ed. United States: CRC Press, 2011.
- SBRIGUI, C. Agregados naturais, britados e artificiais para concreto. In: *Concreto: Ciência e Tecnologia*, v. 1, São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2011.
- SCHOUENBORG, B.; AURSTAD, J.; PETURSSON, P. Test methods adapted to alternative aggregates. In: *Proceedings of International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*, Barcelona, 2004, p. 1154.
- SISTEMA DE INFORMAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL DA CONSTRUÇÃO (SIDAC). Disponível em: <https://sidac.org.br/>. Acesso em: 12 set. 2024.
- SILVA, N. V. et al. Improved method to measure the strength and elastic modulus of single aggregate particles. *Materials and Structures*, v. 52, n. 4, p. 77, ago. 2019.
- SILVA, N. V. *Propriedades mecânicas das fases e seus efeitos no comportamento mecânico do concreto*. 2022. 197 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.
- SOUZA, A. *Avaliação do ciclo de vida da areia em mineração de pequeno porte na região de São José do Rio Preto/SP*. 2012. 121 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2012.
- SOUZA, M. P. R. *Avaliação das emissões de CO₂ antrópico associadas ao processo de produção do concreto, durante a construção de um edifício comercial, na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP)*. 2012. 127 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 2012.
- TANG, P.; PURI, V. M. Methods for minimizing segregation: a review. *Particulate Science and Technology*, n. 22, p. 321-327, 2004.
- TANIKAWA, H.; HASHIMOTO, S. Urban stock over time: spatial material stock analysis using 4d-GIS. *Building Research & Information*, v. 37, n. 5-6, p. 483-502, 2009.
- TAVARES, L. M.; KING, R. P. Single-particle fracture under impact loading. *International Journal of Mineral Processing*, v. 54, p. 1-28, 1998.

- TRISTÃO, F. A. *Influência dos parâmetros texturais das areias nas propriedades das argamassas mistas de revestimento*. 2005. 234 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2005.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). *Sand and sustainability: finding new solutions for environmental governance of global sand resources*. 2019. [S.L: S.N]. Disponível em: <https://unepgrid.ch/en/activity/sand>. Acesso em: 12 set. 2024.
- UNLAND, G.; SZCZELINA, P. Coarse crushing of brittle rocks by compression. *International Journal of Mineral Processing*, v. 74S, p. S209-S217, 2004.
- VAN DER MEULEN, M. J.; GESSEL, S. F.; VELDKAMP, J. G. Aggregate resources in the Netherlands. *Netherlands Journal of Geosciences*, n. 84, v. 4, p. 379-387, 2005.
- WEBB, P. A.; ORR, C. *Analytical methods in fine particle technology*. Micromeritics Instrument Corp. Norcross, 1997.
- WEBB, P. A. *Volume and density determinations for particle technologists*. Micromeritics Instrument Corp. Norcross, 2001.
- WEIDMANN, D. F. *Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento Portland*. 2008. 295 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2008.
- WITT, W.; KOHLER, U.; LIST, J. Direct imaging of very fast particles opens the application of the powerful (dry) dispersion for size and shape characterization. PARTEC 2004. *Anais...* In: PARTEC. Nürnberg: 2004.