

CAPÍTULO

5

NORMAS TÉCNICAS E CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS AGREGADOS

Adão Benvindo da Luz
Engenheiro de Minas pela UFPE, Doutor em
Engenharia Mineral pela USP
Prof. Visitante do Departamento de Geologia-UFRJ
Pesquisador Titular do CETEM/MCTI

Salvador Luiz Matos de Almeida
Engenheiro Metalurgista pela UFRJ, Doutor em
Engenharia Mineral pela USP
Pesquisador Titular do CETEM/MCTI

1. NORMAS TÉCNICAS

Para atender aos requisitos da indústria de construção civil, os agregados devem ser previamente submetidos a uma caracterização tecnológica, de forma a avaliar as suas principais propriedades físicas, mecânicas, petrográficas/mineralógicas, químicas, visando as suas diferentes aplicações: concreto hidráulico, lastro de ferrovia, pavimentos betuminosos, enrocamento, argamassa, meio filtrante, drenagem, controle de erosão etc. (SMITH & COLLIS, 2001; LOEMCO, 2003).

Nessa caracterização tecnológica, para obter resultados confiáveis e reprodutíveis, torna-se necessário a utilização de procedimentos laboratoriais normalizados que, no caso do Brasil são as Normas ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), homologadas pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial-INMETRO. Existem outras instituições internacionais (ASTM, DIN, BS) que servem como referência para a realização dos ensaios tecnológicos com os agregados, no entanto, no presente trabalho, focaremos as Normas ABNT.

Segundo Frazão (2007), outra forma também de avaliar a qualidade de uma rocha é usar informações do seu desempenho apresentado em obras e compará-lo com os resultados obtidos em ensaios de laboratório.

A partir das Normas ABNT e de Normas do DNER (DNIT), são relacionados os principais ensaios (Tabela 1) utilizados na caracterização tecnológica de agregados para a construção civil. Pelas características físico-químicas desses ensaios, estes podem ser classificados (SMITH & COLLIS, 2001; CLAUDE, 2000) em: Ensaios físicos; Ensaios mecânicos e Ensaios químicos.

Tabela 1 – Normas de caracterização tecnológica de agregados para os principais usos na construção civil.

Propriedades	Usos		
	Concreto hidráulico	Concreto betuminoso	Lastro
Amostragem	NBR NM 26	nn	NBR 11541
Terminologia	NBR 7225/9935/9942	NBR 6502	nn
Petrografia de materiais naturais	NBR 7389	NBR 7389	nn
Granulometria	NBR 7217	NBR 7217	nn
Materiais Pulverulentos	NBR 7219	np	NBR 7219
Impurezas orgânicas	NBR NM 49/7221	np	NBR 7220
Argilas e torrões e materiais friáveis	NBR 7218	np	NBR 7218
Massa específica, porosidade e absorção d'água	NBR 6458	NBR 6458	NBR 6458

Tabela 1 – Normas de caracterização tecnológica de agregados para os principais usos na construção civil. (Continuação).

Propriedades	Usos		
	Concreto hidráulico	Concreto betuminoso	Lastro
Forma	NBR 7809	ME 86	NBR 6954
Massa unitária	NBR 7251/7810	np	nn
Adesividade	np	NBR 12583/12584	np
Reatividade	NBR 9773/9771/10340	np	np
Sais solúveis	NBR 9917	np	np
Alterabilidade	NBR 12696/12697	ME 89	NBR 7702
Abrasão	NBR 6465	NBR 6465	NBR 6465
Impacto	nn	nn	NBR 8938
Esmagamento	NBR 9938	ME 42	nn
Compressão	nn	nn	NBR 6953
Polimento			BS.812 Parte 114

Frazão (2007) modificado e atualizado

Notas: NBR = Norma ABNT homologada pelo INMETRO; ME e IE = Norma DNER; nn = não normalizada; np = não pertinente; NM = Norma Mercosul elaborada no âmbito do Comitê Setorial Mercosul.

2. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

As propriedades e o comportamento de muitos materiais (concreto, argamassa, cimento etc) preparados com agregados, dependem da natureza da rocha (mineralogia, propriedades mecânicas e físicas), das condições de lavra e processamento (características geométricas e distribuição granulométrica) e das proporções que entra cada um dos agregados. A caracterização tecnológica dos agregados para determinar as suas propriedades visando ao seu uso na construção civil, é de vital importância, visto que os ensaios de laboratório têm dupla finalidade – quantificar as propriedades físicas, mecânicas e químicas, de forma a orientar a dosagem correta do concreto e de outros materiais e antecipar seu comportamento futuro, quando em serviço (TOURENQ & DENIS, 2000; LOEMCO, 2003; FRAZÃO, 2002; FRAZÃO, 2007).

Gomes & Romualdo (2002) propuseram uma metodologia de avaliação de materiais rochosos visando ao seu uso como agregados na construção civil. São usados dois módulos principais, um destes aborda uma análise qualitativa sobre as informações geológicas e geotécnicas tradicionais e mais simples de serem obtidas e o outro módulo se apropria em resultados de ensaios tecnológicos de forma a avaliar quantitativamente os materiais. Por fim, estes são classificados em 4 níveis hierárquicos de qualidade, para orientar os usuários.

Esses mesmos autores relacionam algumas características consideradas indispensáveis quando do uso de agregados, em particular em misturas de concreto de cimento *Portland* e ligantes betuminosos, como apresentado a seguir:

- Tamanho das partículas;
- Forma das partículas;
- Textura superficial;
- Porosidade;
- Estrutura dos poros;
- Densidade;
- Variação volumétrica;
- Condutividade térmica;
- Grau de fraturamento;
- Resistência;
- Reação álcali-sílica;
- Reação álcali carbonato;
- Presença de minerais metálicos;
- Presença de sulfetos;
- Presença de zeólitas e
- Presença de periclásio

2.1. Propriedades que Influenciam as Características Tecnológicas dos Agregados

- Petrografia e composição mineralógica:
 - matéria orgânica;
 - sais minerais;
 - partículas finas ou material pulverulento < 75 µm;
 - partículas macias e friáveis;
 - minerais reativos (reações álcali agregado, álcali-sílica, álcali-silicato, álcali-carbonato);
 - argilas em torrões e materiais friáveis;
 - grau de alterabilidade;
 - textura;
 - forma do grão;
 - granulometria;
 - natureza do cimento da rocha;
 - porosidade;
 - permeabilidade;
 - adesividade;
 - absorção e retenção de água.

2.1.1 - Petrografia e Composição Mineralógica (NBR 7389)

Segundo Soles (1984), a petrografia é a principal ferramenta usada para caracterização de agregados e concretos e consta de estudos da composição e textura das rochas e sua classificação. Esses estudos fornecem informações úteis para prever o comportamento dos agregados, o seu beneficiamento, quando necessário, e identificar as causas das falhas no concreto.

Um estudo petrográfico de uma rocha tem como objetivo: i) classificar a rocha; ii) auxiliar na avaliação do desempenho do agregado; iii) identificar os potenciais constituintes deletérios presentes (SMITH & COLLIS, 2001). Esse estudo fornece informações importantes sobre sua composição mineralógica, textura, tamanho dos grãos, se estes estão inter-relacionados ou encontram-se isolados em uma pasta homogênea ou simplesmente se a forma desses grãos é lamelar ou apresenta porosidade, grau de fraturamento das rochas que determina o comportamento desta no processo de britagem e grau de alteração dos minerais. Num exame macroscópico, uma rocha pode parecer pouco alterada, no entanto numa análise em lâmina delgada, observam-se minerais parcialmente alterados. Essas informações fornecem dados importantes para a classificação da rocha e subsídios quanto à sua aplicação (BERTOLINO *et al.*, 2012; LOEMCO, 2003; FRAZÃO, 2007).

Matéria Orgânica NBR NM 49/7221

A matéria orgânica poderá ocorrer nos agregados, principalmente na areia natural, sendo resultante da decomposição de vegetais, formando húmus, lodo orgânico, turfa etc. Quando presente em quantidades significativas (> 300 ppm), o seu uso em argamassa ou concreto poderá causar um desfiguramento, sem, no entanto, afetar a durabilidade. Essas impurezas orgânicas poderão ser separadas em um líquido denso de densidade abaixo de 2, no qual a matéria orgânica flutuará, facilitando a sua separação, para identificação. Pode ser considerado mais sério, a presença de compostos orgânicos que contribuem para retardar ou inibir a hidratação do cimento Portland (SMITH & COLLIS, 2001). O importante não é determinar o orgânico total, mas o tipo de orgânico que controla o retardamento da pega e do endurecimento do concreto. (SMITH & COLLIS, 2001).

Essa norma NBR NM 49 apresenta o método de determinação colorimétrica de impurezas orgânicas em agregado miúdo (areia) destinado ao preparo de concreto. Esta consiste, basicamente, em comparar a cor de uma solução aquosa de hidróxido de sódio, na qual o agregado foi imerso, com a cor de uma solução padrão à base de hidróxido de sódio e ácido tânico. Esclarecemos que esta norma não determina substâncias orgânicas como óleos, graxas e parafinas.

Material Pulverulento ou Partículas Finas (NBR 7219)

São materiais de granulometria inferior a 0,074 mm (< 200 malhas), inclusive os materiais solúveis presentes no agregado. A natureza desse material, dependendo da proporção que ocorra no agregado miúdo (areia), poderá influenciar significativamente as propriedades do concreto. As proporções de argilas (< 2 µm) e silte (2 a 75 µm) influenciam as propriedades da areia. Quando essas argilas estão dispersas ou na forma de torrões contendo minerais que incham na presença de água, poderão trazer problemas na aplicação do concreto. Um dos principais efeitos deletérios desse material pulverulento é aumentar a demanda de água para o concreto, de forma a atingir uma determinada trabalhabilidade. A norma ASTM impõe um limite de 7% de material pulverulento ou 5% se o concreto é sujeito a abrasão.

No caso desse material pulverulento encontrar-se na granulometria de silte (2 a 75 µm), considera-se menos prejudicial e não chega a interferir na cristalização dos produtos do cimento, não influencia na aderência e poderá até mesmo apresentar vantagens, corrigindo a distribuição granulométrica do agregado miúdo (areia) ou do cimento.

Quando o material pulverulento recobre as partículas de areia, impede que sobre estas ocorra a cristalização dos componentes do cimento, contribuindo para reduzir a sua compressão uniaxial em 20 a 30% e ainda mais na resistência à tração.

No caso do material pulverulento ser calcário, poderá apresentar vantagem, aumentando a tensão de ruptura na compressão do concreto em valores de até 10%, caso os finos representem 7% (peso) sobre a massa do cimento.

Sais Minerais (NBR 9917)

A presença de sais nos agregados pode ser avaliada pela NBR 9917. Os principais minerais e compostos prejudiciais ao concreto são os sais de chumbo e zinco, os óxidos de ferro, sulfatos, sulfetos e cloretos. Os sais minerais, quando presente nos agregados, provocam mudanças na pega e no endurecimento da pasta, contribuindo também para deteriorar o concreto (FRAZÃO, 2002 e 2007).

Segundo, ainda, este autor, os cloretos podem estar presentes no agregado ou vir da água em contato com o concreto. Esses contribuem para alterar a pega e a velocidade de endurecimento do concreto, no entanto não reagem com os componentes de cimento e em face disto, são considerados como não danosos para o concreto comum. Por outro lado, quando se trata de concreto armado, os cloretos reagem com a armadura do concreto, provocando redução do aço. Enquanto a corrosão provocada pelos sulfetos é classificada como pontual, a provocada pelos cloretos é generalizada.

Os sulfetos de ferro (pirita, marcassita e pirrotita) são, com frequência, encontrados nos agregados naturais. Sabe-se que a marcassita normalmente ocorre em rochas sedimentares e que esta se oxida muito rápido, para formar ácido sulfúrico e hidróxidos de ferro. O ácido provoca corrosão no aço do concreto armado ou protendido e, portanto, a presença da marcassita é extremamente indesejável no agregado. Esses sulfetos – marcassita, pirita e pirrotita, podem provocar mudanças de volume expansivas no concreto, provocando fissura e expansões localizadas (SELMO, 1994).

Segundo ainda esta mesma autora, os sulfatos – gipsita e anidrita podem ser encontrados com a areia e o pedregulho e, se presentes no agregado, aumentam a possibilidade de ataque, por sulfatos, ao concreto (SELMO, 1994).

Minerais Reativos (NBR 9773/9771/10340)

Têm sido investigadas, por muitos anos, as diversas formas de reação que ocorrem no concreto, entre os agregados e hidróxidos alcalinos proveniente da mistura do concreto. Os mecanismos físico-químicos envolvidos são complexos e as pesquisas prosseguem para compreender e revelar novas características.

As reações mais prejudiciais entre o cimento e os agregados, na preparação do concreto, são as reações denominadas de álcali-sílica, álcali-silicato e álcali-carbonato. Estas ocorrem quando estão presentes, no agregado, minerais do grupo da sílica, como opala, calcedônia, ou do grupo dos silicatos como vermiculita, ilita, esmectita e do grupo dos carbonatos como dolomita. Os principais efeitos da reatividade álcali-agregado são aquelas que provocam a expansão e quebra do concreto. Como consequência, tem-se o desalinhamento da estrutura, ameaçando a integridade estrutural (SMITH & COLLIS, 2001).

Reação álcali-agregado -RAA

Em 2004, ocorre o colapso do edifício Areia Branca, na Praia de Piedade, região metropolitana de Recife. Este fato chamou bastante a atenção do setor de construção civil, levando o CREA-PE a designar uma comissão para estudar as causas que contribuíram para o desabamento do edifício Areia Branca. Uma das primeiras constatações dessa Comissão é que este fenômeno (reação álcali-agregado) tem sido pouco estudado pelo meio técnico. Consiste de uma reação química lenta, na qual alguns constituintes do agregado, na presença de água, reagem com hidróxidos alcalinos provenientes do cimento ou de outras fontes, formando um gel expansivo (CICHINELLI, 2010).

Segundo especialistas consultados pela Comissão do CREA-PE, os casos registrados na literatura sobre colapsos repentinos de estrutura, como consequência do fenômeno de reações álcali-agregado, são relativamente raros. Esta reação ocorre em períodos longos de pelos menos 60 anos.

As principais causas da *RAA* são a ocorrência de uma quantidade mínima de álcalis do cimento ou de outras fontes, existência de minerais reativos no agregado e a presença da água. O principal sintoma da *RAA* no concreto é a fissuração, muito embora esta possa também estar relacionada a outras causas como retração por secagem ou por origem térmica, ataque de sulfatos e carregamento relacionado ao dimensionamento das peças (CICHINELLI, 2010).

Reação álcali-sílica

A ruptura do concreto resultante da sua expansão pode ser o resultado de reações entre determinados minerais no agregado e metais alcalinos (sódio e potássio) presentes no cimento. A reação mais conhecida é a de álcali-silica, onde os produtos (silicatos alcalinos) formados ocupam maior volume, gerando tensões que provocam o rompimento da estrutura do concreto. Essa reação poderá ocorrer quando o agregado contém sílica mal cristalizada, na forma de tridimita, cristobalita, opala, calcedônia, ou na forma vítrea (SMITH & COLLIS, 2001).

Essas reações poderão ser evitadas, controlando o teor de álcalis no cimento e sempre que possível, evitar o uso de agregados que contenham minerais reativos. Para tal, é da maior importância que os agregados tenham sido submetidos a uma rigorosa caracterização petrográfica e mineralógica, além dos ensaios de reatividade recomendados pelas normas ABNT. Há três métodos para avaliar o potencial de reatividade alcalina de um agregado: i) identificação das formas de sílica potencialmente reativa – estudo completo de petrografia e mineralogia; ii) medir diretamente a expansão como é feito no teste de barra da argamassa e no teste de prisma do concreto; iii) os diferentes testes, por exemplo, usando tratamento com hidróxido de sódio para identificar a reatividade do concreto (SMITH & COLLIS, 2001; FRAZÃO, 2007).

Reação álcali-carbonato

As reações álcali-carbonato são menos comuns e envolvem rochas carbonáticas do tipo dolomita. As reações resultantes da presença de rochas carbonáticas podem ser tanto expansivas quanto não expansivas. A presença de dolomita em proporções significativas é deletéria.

Reação álcali-silicato

Esta se refere às reações envolvendo filossilicatos tais como vermiculita, clorita e mica presentes em rochas do tipo filito, argilito etc. Sabe-se que as reações são bastante difíceis de serem caracterizadas, no entanto podem ser expansivas. Em algumas situações, a principal causa da expansão pode ser atribuída à formação e inchamento de um gel álcali-silicato, associado à presença de sílica, em granulometria muito fina disseminada na rocha (SMITH & COLLIS, 2001).

Argilas em Torrões e Materiais Friáveis (NBR 7218)

De acordo com esta norma, definem-se argilas em torrões e materiais friáveis, como partículas que poderão ocorrer nos agregados e são passíveis de serem desfeitas pela pressão entre os dedos polegar e indicador. Essas, por apresentarem baixa resistência mecânica, contribuem para modificar as propriedades físicas do concreto. Como indesejável, pode ser registrado, ainda, o caso desses torrões conterem argilominerais do grupo da esmectita, que se hidratam muito facilmente, resultando numa alta capacidade de inchamento (BALTAR *et al.*, 2003; LUZ & OLIVEIRA, 2008).

2.1.2 - Grau de Alterabilidade (NBR 7389)

No estudo de caracterização petrográfica de materiais naturais para utilização em concreto, deve-se, de acordo com a NBR 7389, avaliar a integridade dos grãos minerais contidos no agregado e classificar a amostra estudada de acordo com o Quadro 1.

Quadro 1 – Avaliação do grau de alteração.

Grau de alteração	Características
Rocha sã	Os minerais essenciais conservam suas características de cor e brilho. A rocha, a olho nu, não apresenta evidências de alteração.
Rocha pouco alterada	A rocha ainda apresenta sua integridade física praticamente preservada, porém observam-se aspectos incipientes de alteração nos seus constituintes mineralógicos.
Rocha alterada	Os minerais essenciais não conservam mais suas características de cor e brilho. São expressivos os aspectos relativos à friabilidade, porosidade, fissuração e diminuição da massa específica. Alguns minerais podem servir como elemento-índice para avaliação da alteração: feldspatos amarelados, impregnados por óxidos de ferro e parcialmente pulverulentos; minerais ferromagnesianos apresentam-se parcial ou totalmente oxidados.

Fonte: NBR 7389

2.1.3 - Forma do Grão (NBR 7809/6954 e ME) e Textura Superficial

A forma e a textura dos agregados tem mais influência nas propriedades do concreto quando no estado fresco, do que no concreto endurecido. Quando se compara as partículas lisas e arredondadas, com as partículas de textura áspera, angulosas e alongadas, estas demandam mais pasta de cimento para produzir misturas trabalháveis, aumentando portanto os custos do concreto (SELMO, 1994).

As rochas ao serem britadas adquirem diferentes formas (Figura 1A e 1B) e estas refletem as suas características petrológicas e petrográficas. Por exemplo, quartzitos, gnaisses, arenitos estratificados e xistos produzem formas lamelares. Os basaltos, quando compactos, produzem agregados de forma cúbica.

Partículas formadas por atrito perdem os vértices. Este é o caso de areias de depósitos eólicos e areias de pedregulho de leitos de rio, que apresentam, geralmente, uma forma arredondada. Rochas intrusivas britadas apresentam vértices e arestas bem definidas e são classificadas quanto à sua forma, como angulosas. Rochas calcárias estratificadas, arenitos e folhelhos, geralmente produzem fragmentos alongados e achatados, em particular quando é usado britador de mandíbula no seu beneficiamento (SELMO, 1994).

A forma dos agregados tem uma importância muito significativa para o concreto de cimento Portland e quando apresenta elevada cubicidade, melhora a trabalhabilidade do concreto; no caso do concreto betuminoso, o menor índice de vazio do agregado, aumenta a compactação do lastro ferroviário e do enrocamento de barragem (FRAZÃO, 2007).

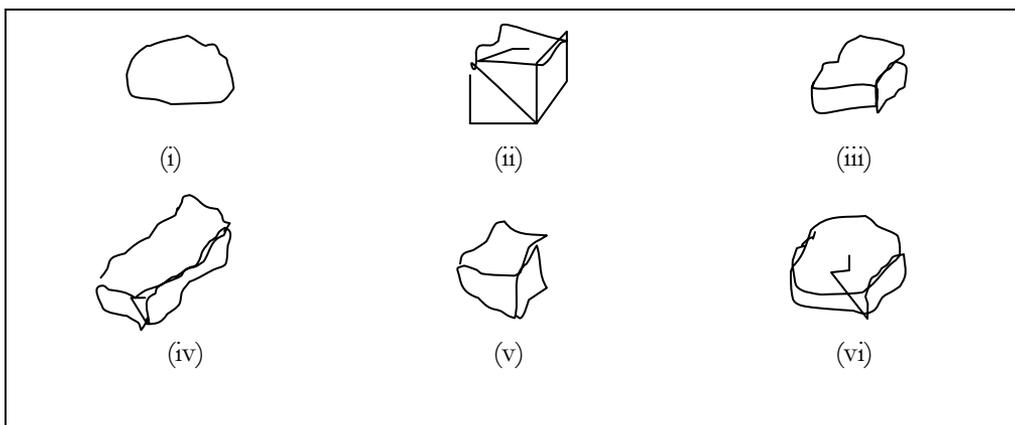


Figura 1A – Diferentes formas dos grãos de um agregado: i) arredondada; ii) cúbica; iii) prismática; iv) alongada; v) angular, vi) lamelar.



Figura 1B – Agregado de Calcário da Formação Bambuí, empresa Brita Verde, São José da Lapa-MG.

Os procedimentos para determinar a forma dos grãos de um agregado, baseiam-se na medida direta de suas dimensões. A largura do grão geralmente representa o tamanho do agregado, já que corresponde à menor dimensão da peneira que deixa passar a partícula.

Avalia-se a textura superficial de um agregado, pelo grau de quanto a superfície do agregado é lisa ou áspera. Essa avaliação é feita de forma visual e depende da dureza, granulação e porosidade da rocha matriz e de quanto ficou exposta a ação de atrito. Há evidências de que a resistência do concreto, principalmente a resistência à flexão, pode ser influenciada pela textura do agregado.

2.1.4 - Granulometria (NBR 7217)

A granulometria dos agregados é uma propriedade muito importante, visto que no concreto de cimento Portland, pavimento betuminoso, lastro de ferrovia, filtro e enrocamento são usados na forma granular.

A distribuição granulométrica do agregado tem uma relação significativa com o índice de vazio do agregado e influenciará no grau de compactação do concreto e do pavimento. Quanto menor o índice de vazios do agregado, menor o consumo de cimento no concreto hidráulico e menor o consumo de betume no concreto betuminoso para pavimento. No caso de lastro ferroviário e de enrocamento, quanto menor o índice de vazio, menor permeabilidade.

A análise granulométrica é realizada por peneiramento a seco usando equipamento mecânico vibratório (Foto 1) ou manual. Os resultados são expressos em % (peso) retido em cada fração ou retido acumulado. Segundo a Norma ABNT (NBR 7217), são usadas duas séries de peneiras, sendo uma denomina normal e a outra auxiliar, com aberturas intermediárias, para auxiliar na elaboração da curva granulométrica. A escala mais usada no Brasil (Tabela 2) e no mundo é a Série Tyler, com malhas de abertura quadrada, razão de escala $r = \sqrt{2}(1,414)$, abertura de referência de 74 μm (CORREIA, 2010).

Tabela 2 – Série de peneiras usadas no Brasil para realização de análise granulométrica em agregados da construção civil.

Serie Normal -#(mm)	Série Intermediária -#(mm)
150	-
-	100
76	-
-	50
38	-
-	25
19	-
-	12,5
9,5	-
-	6,3

Tabela 2 – Série de peneiras usadas no Brasil para realização de análise granulométrica em agregados da construção civil. (Continuação).

Serie Normal -#(mm)	Série Intermediária -#(mm)
4,8	-
2,4	-
1,2	-
0,6	-
0,3	-
0.15	-

Na Tabela 3 encontra-se uma análise granulométrica realizada com uma areia lavada do Rio Guandu e a determinação do módulo de finura.

Tabela 3 – Análise granulométrica com uma areia lavada do Rio Guandu-RJ.

Malha	Retido (g)	% (peso) retido	% (peso) retido acumulado	Σ % (peso) retido acumulado
4	7,25	0,73	0,73	0,73
8	46,28	4,64	5,37	6,09
14	238,8	23,94	29,30	35,39
28	249,34	24,99	54,29	89,69
48	270,1	27,07	81,36	173,05
100	139,55	13,99	95,35	266,40
-100	46,37	4,65	-	Módulo de finura 266,40:100=2,66
Total	997,69	100	100	



Foto 1 – Peneirador tipo Ro-TAP para análise granulométrica a seco.

A análise granulométrica é uma informação muito importante para a caracterização tecnológica do agregado. Nessa, duas informações básicas são obtidas: i) o tamanho máximo dos fragmentos é aquele que apresenta 5% (peso) de material retido; ii) determinação do módulo de finura (MF) - a soma da % peso retido acumulada em cada uma das peneiras da série normal, dividido por 100. Com esta informação, as areias (agregado miúdo) são classificadas para uso em concreto em:

Areia Módulo de Finura

Grossa (MF > 3,9)

Média (3,9 > MF > 2,4)

Fina (MF < 2,4)

2.1.5 - Ensaio Físicos

Porosidade, Massa Unitária, Massa Específica e Absorção de Água (NBR 6458/7251/7810).

Porosidade - Define-se porosidade de uma rocha, como a relação entre o volume de poros e o volume total da rocha, expresso em percentagem. A avaliação da porosidade de uma rocha é da maior importância, visto que esta influencia a circulação de fluidos no interior da rocha, condicionando as suas diversas propriedades hídricas: permeabilidade, absorção de água, umidade, dessorção, sucção capilar etc. Essas propriedades podem influenciar a degradação das características físicas da rocha (LOEMCO, 2003).

Massa Unitária - Também conhecida por densidade aparente (bulk density) de um agregado, reflete, em parte, seu conteúdo de vazio de um determinado grau de compactação, sendo uma medida indireta da forma e granulometria do agregado. A massa unitária dos agregados varia entre 1200 a 1800 kg/m³ para um agregado normal e 500 a 1000 kg/m³ para um agregado leve. Estas propriedades são importantes na formulação das misturas de volume para proporções em peso, nas misturadoras de concreto (SMITH & COLLIS, 2001).

Massa Específica - A terminologia dos agregados (NBR 9935) define dois tipos de massa específica:

- massa específica na condição seca, como a relação entre a massa do agregado seco e o seu volume, excluídos os vazios permeáveis;
- massa específica na condição saturada superfície seca, como a relação entre a massa do agregado na condição saturada superfície seca e seu volume, excluídos os vazios permeáveis.

Absorção e Retenção de Água - Esta se define como o volume de poros da rocha acessível a água. É determinada pela diferença de peso entre o agregado saturado e o seu peso seco. A absorção de água pode ser considerada também como uma medida indireta da permeabilidade de um agregado que, de certa forma, pode

estar relacionada com outra propriedade física, tal como esforço mecânico, retração etc. e sua potencial durabilidade. São relações imprecisas, mas em geral quanto menos água absorve o agregado, tende a ser mais resistente às forças mecânicas e ao intemperismo (SMITH & COLLIS, 2001). Uma absorção de água < 1% é considerada aceitável.

Um agregado poderá se expandir por três razões: i) a água absorvida pelo agregado congela, aumentando assim o volume total do agregado; ii) a água é adsorvida por fase higroscópica, aumentando assim o seu volume; iii) reações entre cimento e agregado produzem compostos higroscópicos (SOLES, 1984).

Congelamento de água absorvida - Este problema de aumento de volume no agregado é comum em rochas de fraca ligação, tamanhos de grãos variáveis e baixa porosidade, tais como folhelho, siltitos e arenitos impuros de baixo grau de endurecimento (compactação). Isto pode ser previsto pela cor, friabilidade e mineralogia, no entanto a resistência ao congelamento ou descongelamento é melhor avaliado por testes de absorção (ASTM C-127, C-128).

a) Adesividade aos Ligantes Betuminosos (NBR 12583/12584)

Esta é uma propriedade da maior importância para os agregados usados no concreto betuminoso para pavimentação de estradas e ruas. Esse é também conhecido como asfalto – produto obtido pela compactação de agregados minerais com o subproduto da torre de destilação de petróleo, o qual é definido como cimento asfáltico de petróleo. Estudos realizados por (MURGICH *et al.*, 1995) e citado por (RIBEIRO *et al.*, 2005) identificaram duas estruturas principais no cimento asfáltico de petróleo – os asfaltenos e os maltenos. Estudos realizados por este autor sobre a interação entre os constituintes dos cimentos asfálticos de petróleo e os agregados minerais, na formulação do asfalto, indicaram que os asfaltenos são os responsáveis principais pela adsorção cimento asfáltico de petróleo-agregados minerais e que a presença dos maltenos prejudica a adsorção.

É necessário que o ligante molhe o agregado, recobrando-o totalmente e que haja resistência ao descolamento do ligante pela ação da água e o tráfego, passível de deixar o agregado descoberto. Na adesividade do agregado aos ligantes hidrocarbonetos, há indicações da influência de fatores tanto físicos (textura e porosidade do agregado, viscosidade e tensão superficial do ligante, espessura da película do ligante etc) quanto químico (constituintes do ligante e o tipo de agregado mineral) (LOEMCO, 2003).

A adesividade é um fenômeno eletrostático e por isso torna-se uma propriedade específica que depende do tipo de ligante e do tipo de rocha. Ligantes betuminosos (levemente carregados de cargas negativas) aderem melhor a rochas carregadas positivamente, tais como rochas básicas ígneas e

metamórficas, dolomitos, calcários, bauxitos etc. Ligantes aos quais são adicionados agentes catiônicos (tais como aminas) melhoram as propriedades de adesão sobre rochas ácidas carregadas negativamente (SMITH & COLLIS, 2001).

Segundo Frazão (2007) existem dois métodos específicos de avaliação da adesividade de misturas betuminosas sobre agregados: método Riedel-Weber e o método RRL.

b) Polimento (BS 812 Parte 114)

Este ensaio reproduz de forma acelerada, o polimento que é submetido o agregado sob a ação de tráfego real nas estradas, resultando em um coeficiente polido mantendo uma correlação com o coeficiente de resistência ao deslizamento que se mede sobre os pavimentos, o que reflete o grau de deslizamento da superfície.

O equipamento de polimento acelerado simula a ação de pneus sobre amostras de agregado sobre resina de poliéster montada em moldes padrão de um aro de aço que gira (Foto 2).



Foto 2 – Máquina de polimento acelerado.

Tenacidade

A propriedade que a rocha tem de resistir a impacto ou choque mecânico por essa sobre um corpo sólido, é denominada de tenacidade. Quando o agregado destina-se ao uso em lastro ferroviário e pista de pouso de aviões, a tenacidade passa a ser uma propriedade da maior importância.

A resistência ao impacto (NBR 8938) é realizada por meio do ensaio *Trenton*, no qual fragmentos de rochas são golpeados dez vezes por um cilindro metálico que se desloca em queda livre, através de um tubo guia, também metálico (Foto 3) Os resultados são expressos em % em peso, abaixo de uma granulometria preestabelecida. (FRAZÃO, 2007).



Foto 3 – Equipamento para teste de impacto de agregado.

Propriedades Térmicas

O concreto pode sofrer contração e expansão devido às variações de temperatura. Quando aquecido, o concreto se expande uniformemente, se a temperatura varia de 0-60°C. Um dos fatores que mais afetam o coeficiente térmico de expansão linear do concreto, é o tipo de agregado. Como o concreto é constituído essencialmente de agregado, a sua expansão depende da composição mineralógica do agregado. O coeficiente de expansão para minerais silicosos como o quartzo é de 12 microtensões/°C, superior a calcita (1 – 5 microtensões/°C) presente nos calcários. A expansão térmica do concreto aumenta quando a rocha do agregado tem maior conteúdo de sílica (SMITH & COLLIS, 2001).

Desgaste Abrasão (NBR 6465)

Segundo esta Norma, Abrasão *Los Angeles* é o desgaste sofrido pelo agregado, quando colocado com uma carga abrasiva, submetida a um determinado número de rotações desta máquina (Foto 4) à velocidade de 30 a 33 rpm.

Neste teste, o agregado é submetido a uma combinação de atrição e impacto, sendo este último mais significativo. Os índices da abrasão *Los Angeles* são influenciados pelas mesmas características geológicas e *clásticas* que afetam os testes de impacto e de britagem, expressos na forma de índices de britagem e impacto (SMITH & COLLIS, 2001). Segundo este mesmo autor, há uma correlação entre os valores de abrasão *Los Angeles* e britagem.

No caso do agregado, na forma de fragmento, ser usado para concreto, lastro de ferrovia e em pavimento de estrada ou de rua, estará sujeito a desgaste tanto no processo construtivo quanto em serviço. Sendo assim, a técnica usada para avaliar o potencial de desgaste dos agregados, é o ensaio de abrasão *Los Angeles*.



Foto 4 – Medidor de Abrasão *Los Angels*.

Esmagamento (NBR 9938 e ME 42)

Neste ensaio de esmagamento, também denominado de ensaio de impacto, uma amostra padrão, na granulometria entre 10 e 14 mm, é submetida a cargas descontínuas na forma de 15 sopros de um martelo ou pistão (Foto 3) com peso de 13,5 a 14,1 kg, caindo de uma altura de $381,5 \pm 6,5$ mm (BS 812). A amostra sofre uma degradação produzindo finos. O material desagregado é peneirado em 2,36 mm. O material passante em % peso, em relação ao material inicial, é o valor de impacto do agregado e usado como um indicador da resistência à granulação.

Compressão Uniaxial (NBR 6953)

Esse ensaio é normalizado e poderá ser realizado em uma rocha testemunho de 1". A correlação estabelecida entre o desempenho da rocha na forma intacta e a forma do agregado, não é consistente.

Quando uma rocha é submetida a um esforço superior ao que esta pode suportar, a rocha se rompe. Esse esforço é representado por um valor denominado de tensão de ruptura.

Para realização desse ensaio, coloca-se um corpo de prova entre os pratos de uma prensa mecânica, que comprime esse corpo de prova até que ocorra a sua ruptura (Foto 5).

Esses ensaios se prestam para caracterizar a rocha quando esta se destina ao uso com agregados.



Foto 5 – Compressão uni-axial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALTAR, C. A. M.; Luz, A. B.; Oliveira, C. H.; Aranha, I. B. (2003). Caracterização e Modificação Superficial de Bentonitas Brasileiras. In: Insumos Minerais para Perfuração de Poços de Petróleo, Carlos Adolpho M. Baltar e Adão B. Luz (Editores), p. 21-46, CETEM/UFPE, 2003.
- BERTOLINO, L. C.; Palermo, Nely; Bertolino, A. V. F. A. (2012). Geologia. In: Manual de Agregados da Construção Civil Adão B. Luz e Salvador Almeida (Editores), Nesta publicação.
- CICHINELLI, G. C. (2010). Álcali-agregado: Reação Perigosa (www.revistatechne.com.br)
- CORREIA, J. G. (2010). Classificação e Peneiramento. In: Tratamento de Minérios 5ª Edição, Adão B. Luz, João A. Sampaio e Silvia Cristina A. França (Editores), Capítulo 6, p. 257 - 296, CETEM/MCT, 2010.
- FRAZÃO, E. B. (2002). Caracterização tecnológica das rochas. In: Tecnologia de Rochas na Construção Civil, Capítulo 7, p. 33-84, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental.
- FRAZÃO, E. B. (2007). Tecnologia para a produção e utilização de agregados. In: Agregados para a construção civil no Brasil, Capítulo 1, p. 25-74. Marcos Bartasson Tannús e João César Cardoso do Carmo (organizadores), Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral – MME, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC.
- GOMES, R. L.; Rodrigues, J. E. (2002). Sistema de avaliação de materiais rochosos para uso como agregados. p. 24-32, Revista Areia e Brita, abril/maio/junho, nº 18, publicação trimestral da ANEPAC.
- LOEMCO - Laboratorio Oficial para Ensayos de Materiales de Construcción (2003). Aridos: Manual de Prospección, Explotación y Aplicaciones; Capítulo 15 – Propiedades Básicas de Los Aridos, p. 343-357; Capítulo 17-Aridos para Drenaje, Filtración y Control de La Erosión, p. 393-404; Carlos López Jimeno (Editor), Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas da Universidad Politécnica de Madrid, 2003.
- LUZ, A. B.; Oliveira, C. H. (2008). Argila – Bentonita. In: Rochas e Minerai Industriais-Usos e Especificações, Adão B. Luz e Fernando Lins (Editores), Capítulo 11, p. 239-263, CETEM/MCT, 2008.
- RIBEIRO, R. C. C.; Correia, J. C. G.; Seidl, P. R. (2005). Interação entre Cimentos Asfálticos e seus Constituintes com agregados Minerai na formação do Alfalto. Série Tecnologia Mineral, nº 84-CETEM/MCT, 2005.
- SELMO, S. M. S. (1994). Agregados. In: Concreto – Estrutura, Propriedades e Materiais, Capítulo 7, p. 239-272, P. kumar Mehta e Paulo J. M. Monteiro (Editores), São Paulo, 1994.

- SMITH, M. R.; Collis, L. (2001). Description and Classification of Aggregates, Chapter 6, p. 145-168; Sampling and Testing, Chapter 7, p. 167-197; Aggregates for Concrete; Chapter 8, p. 199-223; Aggregates in bituminous bound construction material, Chapter 11, p. 255-284. In: Aggregates - Sand, gravel, and crushed rock aggregates for construction purposes, Edited by M. R. Smith and L. Collis, Third Edition, Published by The Geological Society London, 2001.
- SOLES, A. J. (1984). Mineral Aggregates and Concrete Instability. In: Process Mineralogy III, Edited by William Petruck., Society of Mining Engineering - AIME, New York, 1984, Chapter 9, p. 119-135.
- TAURENQ, C.; Denis, A.(2000). Properties of Aggregates – Tests and Specifications. In: Aggregates, Louis Primel and Claude Tourenq (Editors), p. 109-142, Rotterdam/Brookfield 2000.