

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



BÉTONS UFSC

AULA PRÁTICA: DOSAGEM E MOLDAGEM DE CONCRETO

Apostila referente à aula prática sobre dosagem de concreto e moldagem de corpo de prova apresentada na VI Semana Acadêmica de Engenharia Civil.

Autor: Lucas Lopes Vitali.



DPTO. ENGENHARIA CIVIL



CALEC



SEMANA ACADÊMICA DE ENG. CIVIL

Florianópolis
2018

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
1.1. JUSTIFICATIVA	7
1.2. OBJETIVOS	7
2. AGREGADO MIÚDO.....	8
2.1. DEFINIÇÃO	8
2.2. PROPRIEDADES FÍSICAS.....	9
2.2.1. Composição granulométrica	9
2.2.2. Umidade	13
2.2.3. Massas específicas	14
2.2.4. Inchamento	15
2.3. SUBSTÂNCIAS NOCIVAS.....	17
2.4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	18
2.4.1. Massas específicas	18
2.4.2. Umidade e absorção	21
2.4.3. Inchamento	23
3. AGREGADO GRAÚDO.....	24
3.1. DEFINIÇÃO	24
3.2. PROPRIEDADES MECÂNCIAS	24
3.2.1. Resistência.....	24
3.2.2. Dureza	24
3.2.3. Desgaste	25
3.3. PRINCIPAIS ROCHAS EM SC	25
3.3.1. Granito	25
3.3.2. Basalto.....	25
3.4. PROPRIEDADES FÍSICAS.....	26
3.4.1. Análise granulométrica	26
3.4.2. Forma dos grãos.....	28
3.4.3. Massas específicas	29
3.4.4. Porosidade.....	29
3.5. SUBSTÂNCIAS NOCIVAS.....	30
3.6. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	30
3.6.1. Massas específicas	30
3.6.2. Absorção.....	32

3.6.3. Porosidade.....	32
4. CIMENTO PORTLAND.....	33
4.1. DEFINIÇÃO	33
4.1.1. Aglomerantes	33
4.2. MATÉRIAS PRIMAS	34
4.2.1. Calcário.....	34
4.2.2. Argila	34
4.2.3. Gesso	34
4.3. COMPISIÇÃO QUÍMICA.....	34
4.3.1. Propriedades dos compostos.....	35
4.4. HIDRATAÇÃO, PEGA E ENDURECIMENTO	35
4.4.1. Hidratação dos compostos.....	35
4.4.2. Pega e endurecimento	36
4.5. GRAU DE MOAGEM.....	38
4.6. ADIÇÕES	38
4.6.1. Pozolanas.....	38
4.6.2. Escórias de alto forno.....	39
4.6.3. Filers	39
4.6. TIPOS DE CIMENTOS.....	39
4.6.1. CP I e CP I-S.....	41
4.6.2. CP II (E,Z ou F).....	41
4.6.3. CP III.....	41
4.6.4. CP IV	41
4.6.5. CP V-ARI.....	42
4.6.6. Cimento Portland branco	42
5. CONCRETO	43
5.1. DEFINIÇÃO	43
5.2. PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO	43
5.2.1. Trabalhabilidade.....	43
5.2.2. Massa específica.....	46
5.2.3. Exsudação.....	47
5.3. PROPRIEDADES NO E ESTADO ENDURECIDO	47
5.3.1. Massa específica.....	47
5.3.2. Resistência.....	47
5.3.3. Módulo de elasticidade	50
5.3.4. Permeabilidade e absorção.....	51

5.5.1. Considerações iniciais	51
5.5.2. Resistência de dosagem	52
5.5.3. Método ABCP/ACI	53
5.5.4. Exercício	57
6. REFERÊNCIAS	61

1. INTRODUÇÃO

1.1. JUSTIFICATIVA

A Equipe Bétons UFSC, fundada em julho de 2018, é uma atividade extracurricular formada por alunos de graduação de diferentes cursos da UFSC, em conformidade com a RESOLUÇÃO NORMATIVA nº 87/2016/CUn da UFSC, que regulamenta as equipes de competição da universidade.

Esta iniciativa permite a complementação dos conhecimentos teóricos passados em sala de aula com experimentos práticos que visam o desenvolvimento pessoal e profissional dos alunos envolvidos, a produção de artigos científicos e a participação da equipe nas competições promovidas anualmente pelo Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON).

Em parceria com o Centro Acadêmico Livre da Engenharia Civil, a equipe lança o I Concurso de Corpo de Prova, aberto aos graduandos dos cursos Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Engenharia de Produção Civil, Engenharia Química e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina.

Neste contexto, o presente documento trata de um material complementar que será utilizado na aula prática sobre dosagem de concreto e moldagem de corpo de prova oferecida pela Equipe Bétons UFSC durante a VI Semana Acadêmica de Engenharia Civil.

1.2. OBJETIVOS

Este material tem por objetivo geral apresentar conceitos sobre os materiais constituintes do concreto de cimento Portland de maneira simplificada, a fim de que tais conhecimentos sejam suficientes para que alunos das primeiras fases da graduação possam ser capazes de dosar uma mistura de concreto comum dado um valor de f_{ck} .

Para que o objetivo geral seja alcançado, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Apresentar características dos agregados miúdo e graúdo;
- Apresentar características do Cimento Portland e suas adições;
- Apresentar características do concreto no estado fresco e endurecido;
- Mostrar e dar exemplo do método de dosagem da ABCP/ACI.

2. AGREGADO MIÚDO

2.1. DEFINIÇÃO

Entende-se por agregado o material granular, sem forma e volume definidos, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para uso em obras de engenharia. São as rochas britadas, os fragmentos rolados no leito dos cursos d'água e os materiais encontrados em jazidas, provenientes de alterações de rochas (areias).

Geralmente eram classificados como naturais, aqueles que já são encontrados na natureza sob a forma de agregados (Ex: areias e seixos) e artificiais os que necessitam de um trabalho de afeiçoamento pela ação do homem afim de chegar à situação de uso como agregado (Ex: britas e pós-de-pedra). Contudo, a NBR 7211:2009 classifica todos os tipos anteriormente citados como de origem natural guardando a designação artificiais aos obtidos por processos industriais e para aqueles originados a partir de materiais sintéticos tais como produtos ou rejeitos industriais (Ex: argila expandida e escória moída). O presente capítulo abordará apenas os agregados de origem natural de acordo com a definição da citada norma.

Os agregados são utilizados em lastros de vias férreas, bases para calçamentos, entram na composição de material para revestimentos betuminosos, como material de drenagem e para filtros e, finalmente, como material granuloso e inerte na confecção de argamassas e concretos.

Existe uma divisão básica dos agregados de acordo com as suas dimensões. Dessa forma, define-se areia, ou agregado miúdo, como areia de origem natural ou resultante da britagem de rochas estáveis, ou a mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira ABNT de 4,75 mm e ficam retidos na peneira ABNT de 0,075 mm.

De acordo com a origem, os agregados miúdos podem ser classificados de duas maneiras:

Areia natural: Agregado miúdo proveniente de jazidas naturais, que podem ser:

- Residuais: São os depósitos encontrados nas proximidades da rocha matriz. Possuem, em geral, granulometria contínua, mas também grande quantidade de impurezas.
- Eólicas: São depósitos de materiais finos, com granulometria fina e uniforme, porém com grande pureza. Os grãos possuem formato esférico. São formados pela ação do vento (dunas).
- Aluviais: São depósitos formados pela ação transportadora das águas podendo ser fluviais ou marítimos. Os marítimos, em geral, apresentam granulometria uniforme (fina ou grossa) enquanto que os fluviais são normalmente os melhores agregados encontrados na natureza por possuírem uma granulometria razoavelmente contínua e poucas impurezas. Geralmente possuem uma deficiência de grãos muito finos.

Areia de britagem: Agregado miúdo proveniente da britagem de rochas em pedreiras. É também comercialmente conhecida como areia industrial. Possuem grãos de forma angular e de arestas vivas com faces mais ou menos planas

2.2. PROPRIEDADES FÍSICAS

2.2.1. Composição granulométrica

Denomina-se composição granulométrica de um agregado a proporção relativa, expressa em percentagem, dos diferentes tamanhos de grãos que constituem o material.

Esta composição granulométrica tem uma grande influência nas propriedades futuras das argamassas e concretos confeccionados com este agregado. É determinada por peneiramento, através de peneiras com determinadas aberturas, constituindo uma série padrão. No Brasil são utilizadas peneiras com malhas de forma quadrada e uma sequência tal que o lado de cada abertura tenha sempre o dobro do lado da abertura da malha da peneira anterior, começando pela peneira 0,15mm. Estas são denominadas peneiras da série normal.

Existem outras peneiras com aberturas diferentes das da série normal utilizadas para a caracterização de dimensões características máximas e mínimas das partículas. Estas constituem a série intermediária. A Tabela 2.1 resume os tamanhos das peneiras.

Tabela 2.1: Sequência de peneiras da série normal e intermediária (NBR 7211/2009)

Série Normal- Abertura (mm)	Série Intermediária- Abertura (mm)
76	--
--	63
--	50
37,5	--
--	31,5
--	25
19	--
--	12,5
9,5	--
--	6,3
4,75	--
2,36	--
1,18	--
0,6	--
0,3	--
0,15	--

A composição granulométrica de um agregado pode ser expressa pelo material que passa ou pelo que fica retido, por peneira ou acumulado.

Dos ensaios de peneiramento, determina-se os seguintes parâmetros:

Dimensão Máxima Característica: Corresponde à abertura de malha, em mm, da peneira da série normal ou intermediária, a qual corresponde uma percentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

Dimensão Mínima Característica: Corresponde à abertura de malha, em mm, da peneira da série normal ou intermediária, a qual corresponde uma percentagem retida acumulada igual ou imediatamente superior a 95% em massa.

Módulo de Finura: É o valor da soma das percentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal, dividido por 100.

2.2.1.1. Limites granulométricos

A granulometria, determinada segundo a NBR NM 248:2003, deve atender aos limites estabelecidos na Tabela 2.2. Podem ser utilizados como agregado miúdo para concreto materiais com distribuição granulométrica diferente das zonas estabelecidas na Tabela 2.2, desde que estudos prévios de dosagem comprovem sua aplicabilidade.

Tabela 2.2: Limites granulométricos de agregado miúdo (NBR 7211/2009)

Porcentagens Retidas Acumuladas				
Abertura (mm)	Limites Inferiores		Limites Superiores	
	Zona utilizável	Zona Ótima	Zona Ótima	Zona utilizável
9,5	0	0	0	0
6,3	0	0	0	7
4,75	0	0	5	10
2,36	0	10	20	25
1,18	5	20	30	50
0,6	15	35	55	70
0,3	50	65	85	95
0,15	85	90	95	100

Notas:

1. O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90
2. O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20
3. O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50

2.2.1.2. Composição de Agregados miúdos

Como foi visto no item anterior, areias das mais diversas granulometrias podem ser utilizadas para concreto. Deve ser lembrado que a definição do agregado miúdo deve ser baseada em critério econômico, ou seja, muitas vezes é preferível utilizar uma areia com uma granulometria menos favorável, porém mais barata do que trazer uma areia de melhor granulometria de uma jazida distante, pois o custo de transporte passa a ser determinante da escolha.

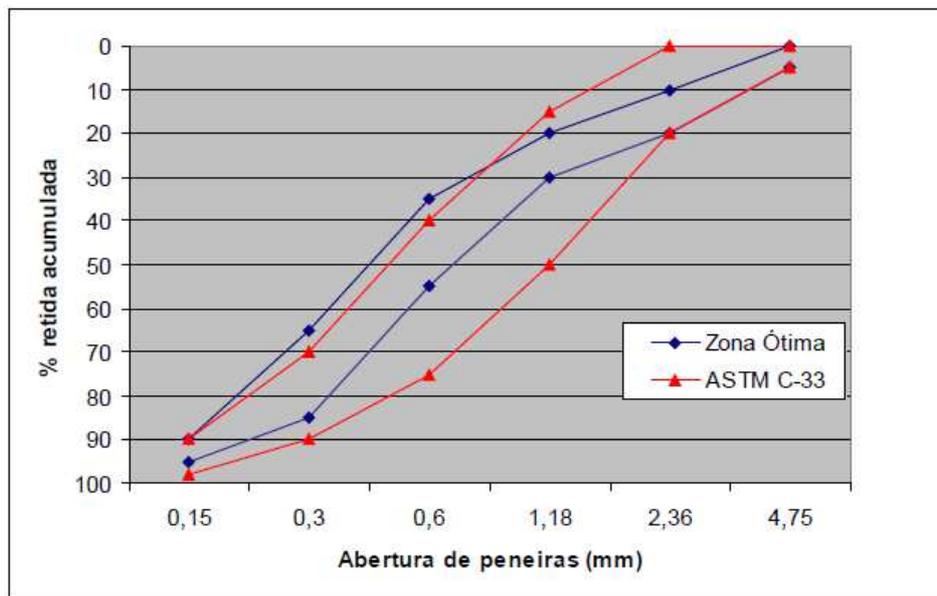
Entretanto, volta-se a enfatizar que existem certos limites ou faixas granulométricas em que se consegue melhores resultados em termos de dosagem, quer sob o ponto de vista técnico ou econômico.

Devido a isto, sempre que possível, é interessante que se façam composições de agregados miúdos de modo a obter uma mistura com características granulométricas o mais próximo possível das especificações da Zona Ótima (NBR 7211/2009) ou ASTM C 33 - 13. Isto quer dizer que às vezes é possível conseguir-se um bom agregado miúdo a partir de uma mistura de dois materiais inadequados ou menos adequados (um fino e um grosso). A seguir é apresentado um procedimento gráfico para a determinação da composição entre dois agregados.

Procedimento:

Primeiramente, devem-se traçadas curvas granulométricas de referência que representam a faixa recomendada. A Figura 2.1 mostra os limites indicados pela NBR 7211/2005 e pela ASTM C 33 - 13.

Figura 2.1: Faixas granulométricas recomendadas



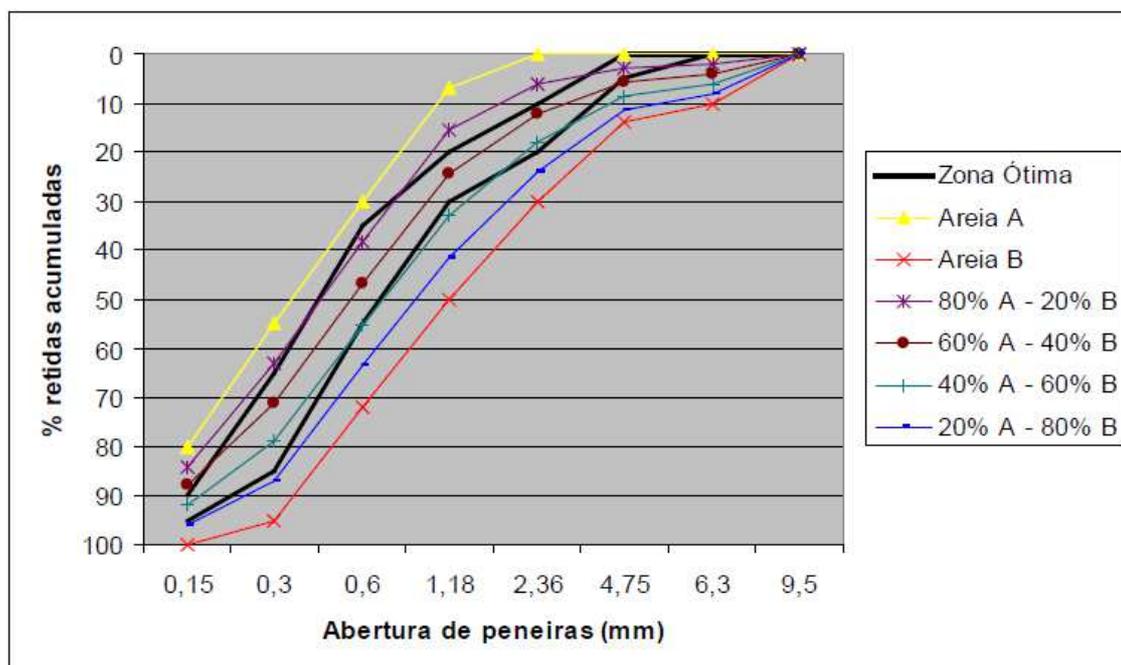
Em seguida, de posse do resultado da análise granulométrica de dois agregados miúdos (Tabela 2.3) com os quais se deseja compor a mistura, devem-se plotar as curvas referentes a essas duas areias. Agora o objetivo é, de uma maneira gráfica, compor uma mistura cujo resultado se enquadre dentro de qualquer uma das faixas mostradas acima. Para isto, segue-se o seguinte procedimento:

- Sobre as linhas verticais correspondentes a abertura das diversas peneiras, dividir o segmento de reta que une os pontos de interseção das curvas granulométricas plotadas dos agregados em 5 ou 10 partes;
- Unir os pontos obtidos das divisões sobre os segmentos de reta de forma que cada curva obtida represente misturas entre os agregados, num variação de 10 em 10% ou 20 em 20%;
- Detectar visualmente qual das curvas (Figura 2.2) melhor se enquadra na faixa granulométrica usada como referência. A porcentagem de mistura dos dois agregados miúdos será aquela que gerou esta curva.

Tabela 2.3: Análise granulométrica de dois agregados miúdos

AREIA A				AREIA B			
#	massa ret. (g)	% retida	% retida acumul.	#	massa ret. (g)	% retida	% retida acumul.
9,5	0	0	0	9,5	0	0	0
6,3	0	0	0	6,3	50	10	10
4,8	0	0	0	4,8	20	4	14
2,4	0	0	0	2,4	80	16	30
1,2	28	7	7	1,2	100	20	50
0,6	92	23	30	0,6	110	22	72
0,3	100	25	55	0,3	115	23	95
0,15	100	25	80	0,15	25	5	100
F	80	20	100	F	0	0	100
Soma	400	100		Soma	500	100	

Figura 2.2: Diagrama das composições dos agregados

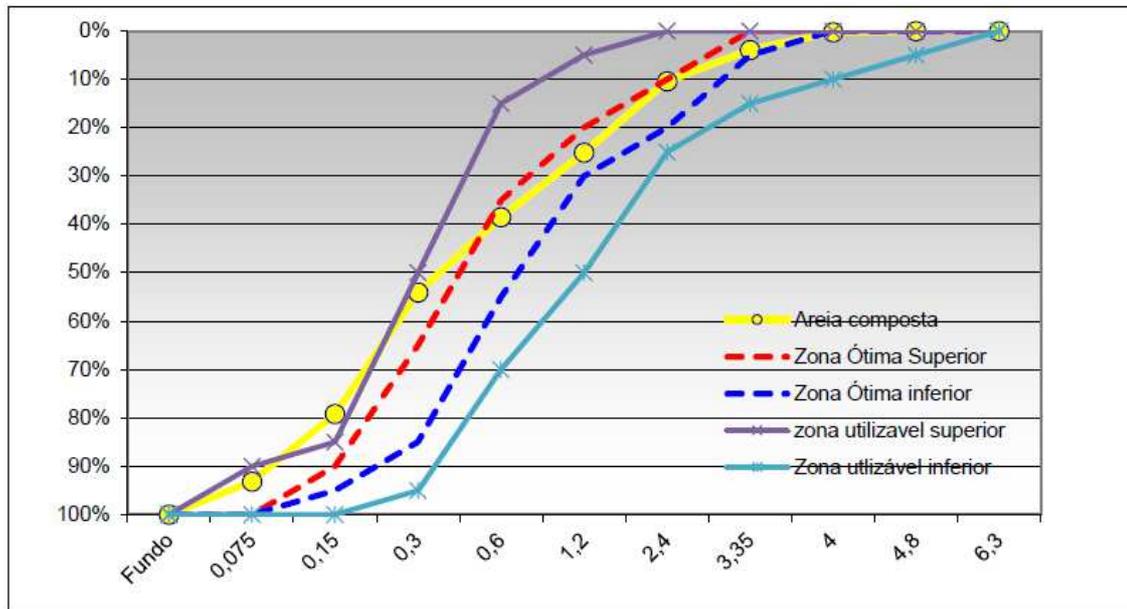


Como pode ser visto, nenhuma composição se enquadraria totalmente na faixa granulométrica recomendada. Uma mistura aceitável seria então 40% da areia A e 60% da areia B uma vez que se obteria uma curva granulométrica aproximadamente centrada, sendo ligeiramente mais fina do que o desejável na peneira 0,15 e ligeiramente mais grossa nas peneiras 4,75 e 6,3.

Obs.: No caso de não existir nenhuma composição que caia inteiramente na faixa granulométrica recomendada, deve-se escolher aquela que se enquadre pelo menos na faixa correspondente as peneiras de menor diâmetro (0,15 e 0,3) e que fuja o menos possível na faixa correspondente as peneiras de maior abertura. Utilizando-se esse critério, uma mistura de 50% da areia A e 50% da areia B seria a mais indicada.

Deve aqui ser ressaltado que, apesar da NBR 7211:2009 não explicitar, os limites da zona ótima são para agregados miúdos originados de jazidas naturais (areias naturais). Assim, no caso de utilização de misturas de areias naturais com areias de britagem, os limites granulométricos para as peneiras mais finas (0,3 e 0,15mm) são dificilmente obedecidos. A Figura 2.3 mostra uma composição de areia fina com areia de britagem utilizada com sucesso em uma concreiteira de Joiville-SC, onde justamente estes limites citados não são atendidos. Esta proporção ideal (50% de cada areia) foi obtida em ensaios realizados diretamente em concreto.

Figura 2.3: Curva granulométrica de uma mistura de areia natural e de britagem utilizada na região de Joinville-SC



2.2.2. Umidade

O conhecimento do teor de umidade é de suma importância no estudo dos agregados, principalmente dos miúdos devido ao fenômeno do inchamento. Além disso, a água contida na superfície dos grãos de um agregado influencia na quantidade de água que precisa ser adicionada em um concreto para proporcionar a trabalhabilidade adequada e a resistência estabelecida no processo de dosagem.

O teor de umidade é definido como a razão entre a massa de água contida numa amostra e a massa desta amostra seca. O resultado normalmente é expresso em porcentagem.

$$h = \frac{m_{H_2O}}{m_s} \times 100 \quad (2.1)$$

De acordo com o teor de umidade, pode-se considerar o agregado nos seguintes estados:

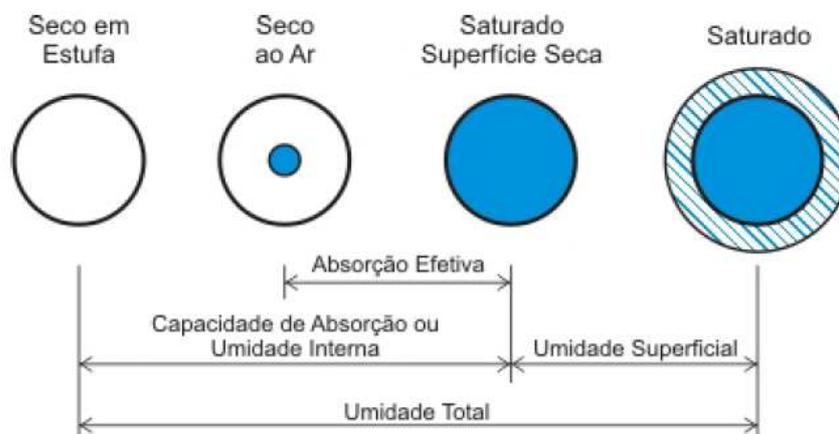
- Seco em estufa: Toda a umidade, externa ou interna, foi eliminada por um aquecimento a 10 °C;
- Seco ao ar: quando não apresenta umidade superficial, tendo, porém, umidade interna sem, todavia, estar saturado;
- Saturado Superfície Seca: quando a superfície não apresenta água livre estando, porém, preenchidos de água os vazios permeáveis das partículas dos agregados;
- Saturado: quando apresenta água livre na superfície.

O teor de umidade no estado saturado superfície seca é denominado absorção. Essa absorção pode ser definida como a diferença entre a umidade total e umidade superficial de um agregado. É geralmente muito baixa podendo atingir, em casos excepcionais, a 2%.

A determinação da umidade pode ser feita pelos seguintes meios:

- Secagem em estufa;
- Secagem por aquecimento ao fogo;
- Frasco de Chapman;
- Picnômetro;
- Aparelhos especiais (Ex: Speedy moisture tester);
- Microondas;
- Sensores elétricos.

Figura 2.4: Diferentes condições de umidade dos agregados



2.2.3. Massas específicas

A massa específica de uma amostra é a relação da sua massa com seu volume. Porém, no caso de agregados, existem diferentes parâmetros relativos à massa e ao volume considerados. Portanto, têm-se as seguintes variações desta propriedade:

2.2.3.1 Massa específica absoluta (D)

Considera-se a massa do agregado seco e o volume de seus grãos excluindo os poros permeáveis e os impermeáveis.

$$D = \frac{m}{V_{abs}} \quad (2.2)$$

2.2.3.1 Massa específica aparente do agregado seco (d_1)

Considera-se a massa do agregado seco e o volume de seus grãos incluindo os poros permeáveis.

$$d_1 = \frac{m}{V_{ap}} \quad (2.3)$$

2.2.3.1 Massa específica aparente do agregado saturado superfície seca (d_2)

Considera-se a massa do agregado saturado com superfície seca e o volume de seus grãos incluindo os poros permeáveis.

$$d_2 = \frac{m_s}{V_{ap}} \quad (2.4)$$

2.2.3.1 Massa específica

Considera-se a massa do agregado seco e o volume de seus grãos excluindo os poros permeáveis.

$$d_3 = \frac{m}{V} \quad (2.5)$$

2.2.3.1 Massa unitária

É a relação entre a massa de um agregado no estado seco e seu volume compreendendo o volume aparente e o volume de vazios intergranulares (V_{unit}). Na prática, é a relação entre a massa de um agregado seco e o volume de um recipiente que o contém. É comum, no caso de agregados miúdos, também se determinar a relação entre a massa úmida e o volume do recipiente. Essa relação é conhecida como massa unitária úmida (δ_h).

$$\delta = \frac{m}{V_{unit}} \quad \delta_h = \frac{m_h}{V_{unit}} \quad (2.6)$$

A massa unitária tem grande importância na tecnologia pois é por meio dela que pode-se converter as composições das argamassas e concretos dadas em massa para volume e vice-versa.

O teor de umidade influencia grandemente a massa unitária dos agregados miúdos devido ao fenômeno do inchamento, que será abordado no item seguinte.

A massa unitária no estado solto de uma areia média está em torno de 1,5kg/dm³, em estado seco. As areias finas têm massas unitárias da ordem de 1,4kg/dm³.

No tópico **2.4** será abordado como determinarem experimentalmente os valores das densidades citadas acima.

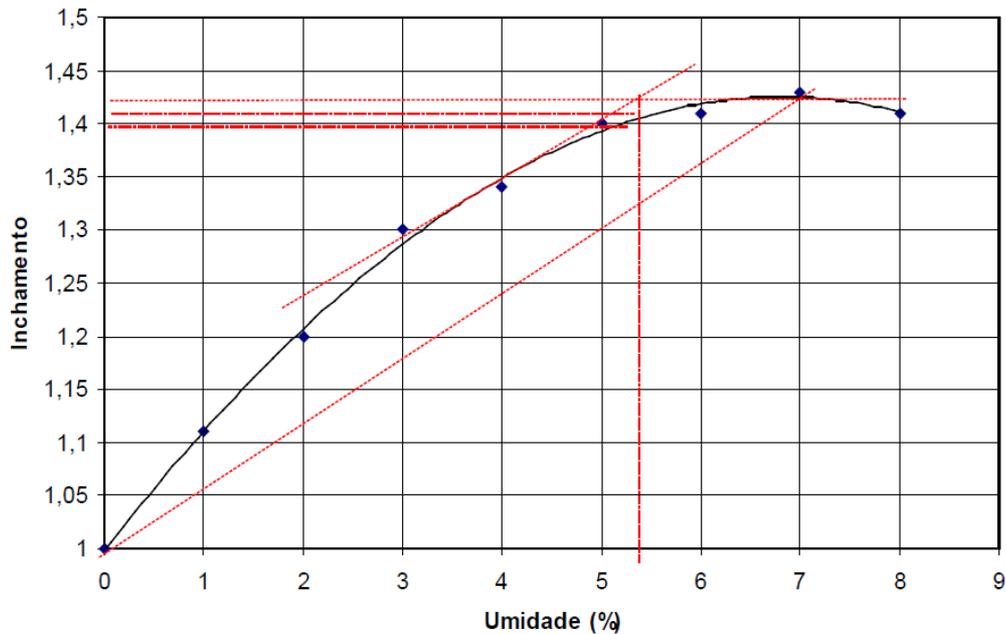
2.2.4. Inchamento

Uma areia, quando usada em obra, apresenta-se geralmente úmida. A experiência mostra que a água livre aderente aos grãos provoca um afastamento entre eles, do que resulta o inchamento do conjunto. Esse inchamento depende da composição granulométrica e do grau de umidade do agregado, sendo maior para as areias finas que apresentam maior superfície específica.

O inchamento das areias aumenta com o acréscimo de umidade até que esta atinja 4 a 7%. Nesta faixa (que é a que normalmente se encontra nas areias naturais em obra) se dá o inchamento máximo. Depois destes teores, o inchamento decresce lentamente (saturação).

A curva da Figura 2.5 é a representação gráfica do fenômeno de inchamento para uma areia de graduação média, onde na abscissa estão marcados os teores de umidade e na ordenada os coeficientes de inchamento (i), definido como sendo a relação entre os volumes unitários úmido e seco de uma mesma massa de areia. A construção desta curva é feita variando-se o teor de umidade de uma amostra e calculando o coeficiente de inchamento respectivo.

Figura 2.5: Curva de inchamento da areia



$$i = \frac{V_{unith}}{V_{unit}} \quad (2.7)$$

Através deste gráfico, surgiu a idéia de caracterizar-se uma areia, do ponto de vista de seu inchamento, por dois índices: a umidade crítica e o coeficiente médio de inchamento, assim definidos:

Umidade Crítica: É o teor de umidade acima do qual o inchamento permanece praticamente constante. Ela é obtida pela seguinte construção gráfica:

- Traça-se uma tangente à curva paralela ao eixo das abscissas;
- Traça-se uma nova tangente à curva, paralela à corda que une a origem ao ponto de tangência da reta anterior;
- A umidade correspondente ao ponto de interseção das duas tangentes é a umidade crítica.

Coeficiente Médio de Inchamento: É a média dos coeficientes de inchamento no ponto correspondente à umidade crítica e o coeficiente máximo observado.

Como já foi citado, o valor da umidade crítica representa o ponto a partir do qual o inchamento permanece praticamente constante, ou seja, se a umidade do agregado miúdo na obra estiver acima deste valor, não haverá variações significativas no seu volume. Deste modo, no caso de proporcionamento dos agregados em volume, é possível projetar e utilizar uma padiola com volume constante, utilizando-se como valor de inchamento o coeficiente médio de inchamento. Se a umidade estiver abaixo da

umidade crítica têm-se duas opções: Conceber uma padiola com possibilidade de alteração de volume (regulagem de altura) em função da umidade medida no dia da concretagem ou, o que é mais prático, manter o agregado acima da umidade crítica através de molhagem.

2.3. SUBSTÂNCIAS NOCIVAS

A NBR 7211:2009 fixa os teores máximos de substâncias nocivas em de acordo com a tabela abaixo:

Tabela 2.4: Limites máximos aceitáveis de substâncias nocivas no agregado miúdo com relação à massa do material

Determinação	Método de ensaio		Quantidade máxima relativa à massa do agregado miúdo %
Torrões de argila e materiais friáveis	ABNT NBR 7218		3,0
Materiais carbonosos ¹⁾	ASTM C 123	Concreto aparente	0,5
		Concreto não aparente	1,0
Material fino que passa através da peneira 75 µm por lavagem (material pulverulento)	ABNT NBR NM 46	Concreto submetido a desgaste superficial	3,0
		Concretos protegidos do desgaste superficial	5,0
Impurezas orgânicas ²⁾	ABNT NBR NM 49		A solução obtida no ensaio deve ser mais clara do que a solução-padrão
	ABNT NBR 7221	Diferença máxima aceitável entre os resultados de resistência à compressão comparativos	10 %

Quando o material fino que passa na peneira 0,075 mm por lavagem for constituído totalmente de grãos gerados durante a britagem de rocha, os limites podem ser aumentados de 3% para 10% (para concreto submetido a desgaste superficial) e de 5% para 12% (para concreto protegido do desgaste superficial).

Torrões de Argila: São assim denominadas todas as partículas de agregado desagregáveis sob pressão dos dedos (torrões friáveis). Sua presença é bastante nociva para a resistência de concretos e argamassas, pois se constituem em material de pouca resistência e, em certos casos, expansivos.

Materiais Carbonosos: São partículas de carvão, linhito, madeira e material vegetal sólido presentes no agregado. Sua determinação é feita por processo de separação por decantação do agregado em um líquido de massa específica igual a 2kg/dm³ (cloreto de zinco ou tetrabromoetano). As partículas de baixa densidade são consideradas inconvenientes, pois são inclusões de baixa resistência. Além de afetarem a resistência, prejudicam o concreto quando submetido à abrasão. As partículas de carvão e linhito

podem intumescer e desagregar o concreto, bem como perturbar o endurecimento do cimento.

Material Pulverulento: Em geral, as areias naturais contêm uma pequena percentagem de material fino, constituído de silte e argila e, portanto, passando na peneira de 0,075mm. Os finos, de um modo geral, quando presentes em grande quantidade, aumentam a exigência de água dos concretos para uma mesma consistência. Os finos de certas argilas em particular, além disso, propiciam maiores alterações de volume nos concretos, intensificando sua retração e reduzindo sua resistência. O efeito da presença de argila em um agregado que se destina a ser utilizado em concreto depende também do modo como ela está distribuída. Para a resistência do concreto, ela é muito mais nociva quando se encontra formando uma fina película que cobre os grãos de areia, do que quando se acha uniformemente distribuída em toda a massa. No primeiro caso, a aderência entre a pasta e areia fica reduzida, enquanto no segundo é algumas vezes até favorável.

A argila pode ser eliminada por lavagem mas esta operação pode trazer alguns inconvenientes. Se, de um lado, a água pode eliminar esta impureza, aumentando a resistência da argamassa ou concreto, por outro podem ser arrastados os grãos mais finos da areia, aumentando o índice de vazios da areia o que resultará em perda de trabalhabilidade destes materiais.

O porquê da norma ser mais tolerante com os agregados oriundos de britagem reside no fato de que os agregados miúdos de britagem são constituídos por grãos angulosos e a presença de finos ajuda a reduzir o atrito entre as partículas melhorando a trabalhabilidade do concreto. Além disso, estes grãos geralmente não são tão finos quanto os de natureza argilosa, comuns nos agregados naturais, que são, em muitos casos, até expansivos.

Impurezas Orgânicas: A matéria orgânica é a impureza mais frequente nas areias. São detritos de origem vegetal na maior parte que, geralmente sob a forma de partículas minúsculas, mas em grande quantidade, chegam a escurecer o agregado miúdo. A cor escura da areia geralmente é indício de matéria orgânica (é uma regra mas há exceções), a menos que se trate de agregado resultante de rocha escura, como é o caso do basalto.

As impurezas orgânicas da areia, normalmente formadas por partículas de húmus, exercem uma ação prejudicial sobre a pega e endurecimento das argamassas e concretos. Uma parte de húmus, que é ácida, neutraliza a água alcalina da argamassa e a parte restante envolve os grãos de areia, formando uma película sobre eles, impedindo desta forma, uma perfeita aderência entre o cimento e as partículas de agregado. Por estas razões, as argamassas e concretos preparados com a areias que contenham uma proporção de matéria orgânica têm baixa resistência. Esta influência será tanto maior quanto mais pobre for a mistura e menor a idade.

2.4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Aqui serão apresentados os principais ensaios para obtenção de algumas propriedades físicas mencionadas anteriormente.

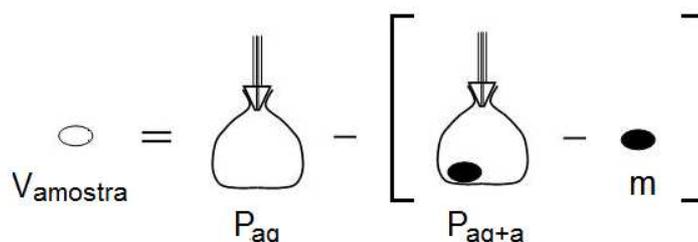
2.4.1. Massas específicas

A NM 52/2009 apresenta um procedimento para determinação das diversas massas específicas definidas no item 2.2.3. Entretanto, a forma para se obter o agregado saturado superfície seca é, no mínimo, questionável, principalmente em se tratando de agregados de britagem, onde a angulosidade dos grãos interfere no ensaio.

Alternativas que vêm sendo utilizadas há muitos anos com sucesso para a determinação da massa específica aparente, que é o parâmetro de real interesse na tecnologia do concreto, são os ensaios do picnômetro e do frasco de Chapman.

Picnômetro: Picnômetro é um recipiente de vidro que possui uma rolha esmerilhada com um tubo capilar. Quando repleto por um líquido, obtém-se um volume bem definido e preciso.

Figura 2.6: Cálculo do volume da amostras através do picnometro



• Procedimento:

- Pesa-se o picnômetro com água (P_{ag});
- Retira-se um pouco da água do picnômetro e pesa-se (m_A);
- Coloca-se uma pequena quantidade de amostra com o auxílio de um funil e pesa-se (m_B);
- Remove-se o ar aderido nas partículas do agregado por agitação ou, preferencialmente, com o auxílio de uma bomba de vácuo e completa-se o restante do espaço com água;
- Pesa-se o picnômetro com amostra e água (P_{ag+a}).

2.4.1.1. Massa específica aparente do agregado seco (d_1)

$$d_1 = \frac{m}{(P_{ag} - (P_{ag+a} - m))} \quad \begin{array}{l} m = \text{massa seca} \\ P_{ag} = \text{massa do picnômetro com água} \\ P_{ag+a} = \text{massa do picnômetro com água mais amostra} \end{array} \quad (2.8)$$

$$m = m_B - m_A$$

2.4.1.2. Massa específica aparente do agregado saturado superfície seca seco (d_2)

$$d_2 = \frac{m_s}{(P_{ag} - (P_{ag+a} - m))} \quad \begin{array}{l} m_s = \text{massa saturada superfície seca} \\ m = \text{massa seca} \\ P_{ag} = \text{massa do picnômetro com água} \\ P_{ag+a} = \text{massa do picnômetro com água mais amostra} \\ A = \text{absorção} \\ h = \text{umidade total do agregado} \\ h_{sup} = \text{umidade superficial do agregado} \end{array} \quad (2.9)$$

$$m_s = m \left(\frac{A + 100}{100} \right)$$

$$A = h - h_{sup}$$

2.4.1.3. Massa específica (d_3)

$$d_3 = \frac{m}{(P_{ag} - (P_{ag+a} - m)) + A} \quad (2.10)$$

Frasco de Chapman: O frasco de Chapman é um frasco semelhante à uma proveta graduada que possui uma escala com sensibilidade de 1ml na sua parte superior. Por possuir uma geometria especial (Figura 2.7), permite que se possa trabalhar com amostras de 500 gramas.

Figura 2.7: Frasco de Chapman



- Procedimento

- Pesar 500 gramas de areia seca em estufa;
- Colocar água no frasco até que atinja a marca de 200 ml, situada no trecho entre os dois alargamentos do tubo;
- Com o auxílio de um funil, colocar a amostra no frasco, agitando-o periodicamente para eliminação das bolhas de ar aderidas nas partículas;
- Realizar a leitura correspondente ao nível da água na escala do frasco (L);
- Calcular a massa específica aparente do agregado (d_1), expressa em g/cm^3 , através da seguinte expressão:

$$d_1 = \frac{500}{L - 200} \quad (2.11)$$

2.4.1.4. Massa unitária (δ)

A seguir é apresentado o procedimento apresentado pela norma NBR NM 45/2006:

- Pesa-se o recipiente vazio (m_{rec});
- Utiliza-se um recipiente cilíndrico de volume não inferior aos valores constantes na Tabela 2.5. O enchimento do recipiente de volume V_{rec} deve ser feito com uma altura de lançamento não superior a 10cm da borda. Este procedimento tenta simular as condições de obra;
- Enche-se o recipiente em demasia e com uma régua metálica faz-se a rasadura da superfície eliminando-se o excesso (no caso do agregado miúdo). No caso do agregado graúdo, faz-se uma compensação entre as partes que se sobressaem do recipiente com as que ficam abaixo da borda;
- Pesa-se o recipiente com agregado seco (m_{ra}).

$$\delta = \frac{m_{ra} - m_{rec}}{V_{rec}} \quad (2.12)$$

Tabela 2.5: Requisitos de dimensão para o recipiente utilizado no ensaio da massa unitária

φ máximo do agregado (mm)	Dimensões Mínimas do Recipiente		
	Volume (dm ³)	Diâmetro Interior (mm)	Altura Interior (mm)
d ≤ 37,5	10	220	268
37,5 < d ≤ 50	15	260	282
50 < d ≤ 75	30	360	294
<p>* O ensaio deverá ser executado no mínimo 3 vezes, sendo que o resultado individual de cada ensaio não deve apresentar desvio maior que 1% em relação à média; ** Entre duas determinações ou entre a determinação de dois operadores distintos, não deve haver, respectivamente, variação superior a 40kg/m³ e diferença maior que 125kg/m³.</p>			

2.4.2. Umidade e absorção

2.4.2.1. Umidade total (h)

Secagem em estufa: Este método apresenta boa precisão, mas é muito demorado para determinações de campo e exige equipamento caro (estufa) o que só é recomendado para trabalhos de laboratório.

- Procedimento:
 - Pesagem da amostra no estado úmido (m_h);
 - Secagem em estufa a uma temperatura de 105°C e 110°C até constância de peso;
 - Pesagem da amostra no estado seco (m)

$$h = \frac{m_h - m}{m} \quad (2.13)$$

Secagem rápida (ao fogo ou micro-ondas): Este método é utilizado quando se necessita de determinações rápidas em campo.

- Procedimento
 - Colhe-se uma amostra representativa do material (aproximadamente 500g) e pesa-se (m_h);
 - Coloca-se o material numa frigideira ao fogo ou em um recipiente de vidro num micro-ondas, até que toda a água se evapore;
 - Pesa-se a amostra seca (m).

$$h = \frac{m_h - m_s}{m} \quad (2.14)$$

Speedy moisture tester: Este equipamento é composto por uma garrafa metálica com uma tampa provida de um manômetro. O teste consiste em colocar a umidade do agregado em contato com carbureto de cálcio gerando um gás dentro da garrafa. O gás formado provoca um aumento de pressão interna na garrafa que é registrada no manômetro da tampa. A pressão lida no manômetro está associada a um determinado grau de umidade uma vez que a amostra colocada tem massa padronizada (5, 10 ou 20g).

- Procedimento:

- Pesar uma amostra na balança do próprio aparelho;
- Colocar a amostra na garrafa, juntamente com 2 ampolas de carbureto de cálcio;
- Colocar duas esferas de aço que servem para romper as ampolas;
- Fechar a garrafa e agitar o conjunto até que se observe uma estabilização na leitura da pressão no manômetro;
- Verificar na tabela de calibração do aparelho que umidade corresponde a pressão observada.

2.4.2.2. Umidade superficial (h_{sup})

Picnômetro: Para a execução do ensaio, também é necessário que se conheça a massa específica aparente do agregado. Esta massa específica pode ser determinada pelo próprio picnômetro segundo procedimento descrito no item 2.4.1.1.

$$h_{sup} = \frac{100 \cdot (d_1 \cdot K - m_h)}{d_1 \cdot (m_h - K)} \quad \begin{array}{l} m_h = \text{massa úmida} \\ P_{ag} = \text{massa do picnômetro com água} \end{array} \quad (2.15)$$

$$K = P_{ag} - (P_{ag+a} - m_h) \quad \begin{array}{l} P_{ag+a} = \text{massa do picnômetro com água mais amostra} \\ d_1 = \text{massa específica aparente} \end{array}$$

Frasco de Chapman: Para a execução do ensaio, é necessário que se conheça a massa específica aparente do agregado. Esta massa específica pode ser determinada pela equação 2.10.

$$h_{sup} = \frac{\{100[d_1(L - 200) - 500]\}}{d_1(700 - L)} \quad (2.16)$$

2.4.2.3. Absorção

Uma maneira simples e precisa de determinar este parâmetro é tomar uma amostra de areia úmida saturada perfeitamente homogeneizada e determinar-se a umidade total pela estufa e superficial pelo picnômetro ou frasco de Chapman. Nesse caso, a absorção do agregado poderia ser assim determinada:

$$A = h - h_{sup} \quad (2.17)$$

2.4.3. Inchamento

O inchamento de uma areia pode ser calculado pela expressão 2.18:

$$i = \frac{\delta}{\delta_h} \cdot \frac{h + 100}{100} \quad (2.18)$$

Com $V_{\text{unit}} = V_{\text{unith}}$, tem-se:

$$i = \frac{m}{m_{h1}} \cdot \frac{h + 100}{100} \quad (2.19)$$

- Procedimento:

- Preencher a caixa padronizada (Volume = V_c e Massa = M_c) com agregado seco, segundo procedimento descrito para determinação da massa unitária;
- Determinar a massa do conjunto (M_{c+a});
- Determinar a massa da amostra (m): $m = (M_{c+a}) - (M_c)$;
- Calcular a massa de água necessária para obter-se 1% de umidade ($m/100$);
- Colocar a amostra do agregado numa caixa metálica de grandes dimensões, adicionar a água e homogeneizar o conjunto;
- Preencher a caixa padronizada com o agregado úmido, proceder a rasadura. O material excedente deve retornar a caixa maior. Pesquisar a caixa contendo a amostra úmida (M_{c+ah});
- Determinar a massa da amostra úmida (m_{h1}): $m_{h1} = (M_{c+ah}) - (M_c)$;
- Calcular o coeficiente de inchamento (i) pela fórmula acima;
- Repetir os procedimentos 4 a 8 para teores de umidade crescentes de 1 em 1% até que o valor do coeficiente de inchamento apresente uma diminuição em duas determinações consecutivas;
- Traçar o gráfico de inchamento determinando a umidade crítica e coeficiente de inchamento médio.

3. AGREGADO GRAÚDO

3.1. DEFINIÇÃO

Define-se ainda agregado graúdo como pedregulho ou brita proveniente de rochas estáveis, ou a mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 75 mm e ficam retidos na peneira ABNT de 4,75 mm.

O presente tópico tratará de agregados graúdos, que têm as seguintes denominações conforme a origem:

- Brita: Agregado graúdo proveniente da exploração de pedreiras, que por sua vez têm como matéria prima o maciço rochoso, a partir do qual são produzidas as britas por meio de detonações e uso de britadores;
- Seixo Rolado: Agregado graúdo proveniente de leitos de rio ou regiões adjacentes. São também conhecidos como pedregulhos.

Será dado enfoque nos agregados oriundos da britagem de rochas, os quais são mais utilizados para concreto, sendo o granito e o basalto os dois principais tipos de rochas encontrados no estado de Santa Catarina.

3.2. PROPRIEDADES MECÂNCIAS

3.2.1. Resistência

As pedras em geral resistem bem à compressão e mal à tração. Certos fatores influem na resistência como orientação do esforço no caso de rochas estratificadas e umidade. A resistência à compressão é um dado interessante para poder avaliar indiretamente as outras propriedades.

- Cisalhamento = 1/10 a 1/15 da resistência à compressão;
- Tração = 1/20 a 1/40 da resistência à compressão;
- Flexão = 1/10 a 1/15 da resistência à compressão.

3.2.2. Dureza

A escala de dureza de Mohs tem pouca importância no estudo tecnológico das pedras. Praticamente avalia-se a dureza pela maior ou menor facilidade de se deixar serrar, classificando-se as pedras em:

- a) Brandas: serradas facilmente por serra de dentes. Ex: Tufos vulcânicos.
- b) Semiduras: dificilmente serradas por serra de dentes e facilmente pela serra lisa com areia ou esmeril. Ex: Calcários compactos.
- c) Duras: só serradas pela serra lisa. Ex: mármore.
- d) Duríssimas: dificilmente serradas pela serra lisa, facilmente com serras diamantadas ou com carborundum. Ex: granito.

Esta propriedade é importante porque afeta a trabalhabilidade da pedra e está intimamente ligada ao seu custo.

3.2.3. Desgaste

Desgaste superficial dos grãos do agregado quando sofrem atrição. A resistência à abrasão mede, portanto, a capacidade que o agregado tem de se não alterar quando manuseado: carregamento, basculamento, estocagem.

O ensaio mais conhecido é o de Abrasão Los Angeles e é recomendado para qualificação de agregados para uso em concretos asfálticos ou de cimento Portland. É uma medida indireta da capacidade de manutenção da granulometria do agregado durante o processo de mistura do concreto, mostrando quão friável é o material. No caso de agregados destinados a concretos de alta resistência, é importante que este valor seja o menor possível.

3.3. PRINCIPAIS ROCHAS EM SC

3.3.1. Granito

Rocha ígnea intrusiva muito dura de textura cristalina e de grãos finos ou médios. Tem fratura irregular ou concóide (conchoidal) e é muito comum na natureza. Compõem-se de quartzo, feldspato e mica. A cor predominante do granito depende principalmente do feldspato e pode ser rósea, marrom, amarelada, cinza ou azulada. Sua densidade varia de 2,5 a 3,0kg/dm³ e sua resistência à compressão é, em média, 150 MPa.

O granito é excelente pedra de construção, desde que não se apresente alterado. Sua resistência mecânica e durabilidade estão entre as maiores em se tratando de pedras utilizadas em construção. Sua dureza, entretanto, dificulta o trabalho da pedra, sendo por isto vantajoso executar este trabalho próximo à extração porque a água da pedreira que permanece em seus interstícios e vazios facilita muito a ação das ferramentas. Esta propriedade também é responsável pelo enorme desgaste sofrido pelos britadores e peneiras empregados na produção de agregados.

É muito indicado para calçamento, por resistir excepcionalmente bem ao choque e desgaste. Em todas as obras em que predomina os esforços de compressão é aconselhável o seu uso, tais como muros de arrimo, alvenarias e mesmo pontes em arco. Contudo, sua utilização principal é como agregado (base de pavimentos, concretos asfálticos e de cimento Portland). Atualmente tem sido muito utilizado como revestimento de pisos e paredes na forma polida por sua aparência estética (textura, coloração), resistência ao desgaste e durabilidade.

3.3.2. Basalto

Rocha ígnea extrusiva constituída à base de feldspato. Utilizado em calçamentos, é uma rocha de coloração cinza escuro que tem grande resistência e dureza. Como agregados apresentam algumas características importantes: a primeira, a grande dureza que provoca desgastes importantes nos britadores (menos importantes dos que os observados nos granitos); a segunda, a forma dos grãos predominantemente lamelares. Em compensação, devido ao seu fraturamento natural, exige menos explosivos na exploração das pedreiras para a produção de agregados. Isto faz com que seu custo de produção seja geralmente inferior aos agregados graníticos.

A sua massa específica é da ordem de 2,8 a 3,0 kg/dm³ e sua resistência à compressão pode alcançar valores da ordem de 200MPa. Pode ser empregado em forma

de placas polidas para revestimento de pisos onde haja grande afluência de trânsito de pedestres, por sua grande resistência à abrasão. Em forma bruta (sem polimento), é usado como piso em placas esquadrejadas para jardins e em torno de piscinas.

3.4. PROPRIEDADES FÍSICAS

3.4.1. Análise granulométrica

Denomina-se composição granulométrica de um agregado a proporção relativa, expressa em percentagem, dos diferentes tamanhos de grãos que constituem o material.

Esta composição granulométrica tem uma grande influência nas propriedades futuras das argamassas e concretos confeccionados com este agregado. É determinada por peneiramento, através de peneiras com determinadas aberturas, constituindo uma série padrão. No Brasil são utilizadas peneiras com malhas de forma quadrada e uma sequência tal que o lado de cada abertura tenha sempre o dobro do lado da abertura da malha da peneira anterior, começando pela peneira 0,15mm. Estas são denominadas peneiras da série normal.

Existem outras peneiras com aberturas diferentes das da série normal utilizadas para a caracterização de dimensões características máximas e mínimas das partículas. Estas constituem a série intermediária. A Tabela 2.1 resume os tamanhos das peneiras.

Tabela 2.1: Sequência de peneiras da série normal e intermediária (NBR 7211/2009)

Série Normal- Abertura (mm)	Série Intermediária- Abertura (mm)
76	--
--	63
--	50
37,5	--
--	31,5
--	25
19	--
--	12,5
9,5	--
--	6,3
4,75	--
2,36	--
1,18	--
0,6	--
0,3	--
0,15	--

A composição granulométrica de um agregado pode ser expressa pelo material que passa ou pelo que fica retido, por peneira ou acumulado.

Dos ensaios de peneiramento, determina-se os seguintes parâmetros:

- Dimensão Máxima Característica: Corresponde à abertura de malha, em mm, da peneira da série normal ou intermediária, a qual corresponde uma percentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.
- Dimensão Mínima Característica: Corresponde à abertura de malha, em mm, da peneira da série normal ou intermediária, a qual corresponde uma percentagem retida acumulada igual ou imediatamente superior a 95% em massa.

- **Módulo de Finura:** É o valor da soma das percentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal, dividido por 100.

3.4.1.1. Limites granulométricos

A amostra representativa de um lote de agregado graúdo, coletada de acordo com as NM 26:2001 e NM 27:2001, deve satisfazer os limites prescritos na Tabela 2.2. A designação das faixas e os limites impostos nesta Tabela substituíram os constantes na Tabela 2.3 e ainda causam confusão em termos comerciais. Ainda é comum se especificar os agregados graúdos pela sua graduação (Brita 0, brita 1, etc).

Pode-se observar nos valores da Tabela 2.3 que os limites granulométricos das diferentes graduações sugerem granulometrias uniformes, ou seja, que numa determinada peneira, o valor desejável é zero e na próxima (ou subsequente), 100%. Por exemplo, uma brita 1 ideal deveria apresentar 0% retido na peneira 19mm e 100% na peneira 9,5mm. Neste caso, a faixa especificada, 0 – 10 % na peneira 19mm indica o nível de tolerância por contaminação de grãos maiores que ocorre normalmente nas pedreiras por deficiências no processo de peneiramento (ruptura das malhas). Do mesmo modo, na peneira 9,5mm, a faixa 80 – 100% indica que o nível de contaminação por grãos menores, decorrente de peneiramento incipiente (excesso de material sobre a peneira) é de no máximo 20%. A atual designação mantém esse mesmo enfoque, apenas trabalhando com dimensões características mínimas e máximas. Deve ser lembrado que as peneiras utilizadas para definir os tamanhos máximos e mínimos dos grãos dos agregados miúdos não são exatamente as utilizadas nos ensaios de granulometria. Por exemplo, a peneira utilizada para separar a brita 1 da brita 0 na pedreira geralmente é de 12mm mas esta abertura pode variar com o tipo de material da peneira (se borracha é maior do que se for de aço).

Tabela 2.2: Limites granulométricos de agregado graúdo (NBR 7211:2009)

% Ret. Acum. # (mm)	Porcentagem, em massa, retida acumulada Zona granulométrica - d/D ¹				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75	-	-	-	-	0 - 5
63	-	-	-	-	5 - 30
50	-	-	-	0 - 5	75 - 100
37,5	-	-	-	5 - 30	90 - 100
31,5	-	-	0 - 5	75 - 100	95 - 100
25	-	0 - 5	5 - 25 ²	87 - 100	-
19	-	2 - 15 ²	65 ² - 95	95 - 100	-
12,5	0 - 5	40 ² - 65 ²	92 - 100	-	-
9,5	2 - 15 ²	80 ² - 100	95 - 100	-	-
6,3	40 ² - 65 ²	92 - 100	-	-	-
4,75	80 ² - 100	95 - 100	-	-	-
2,36	95 - 100	-	-	-	-

1) Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo.
2) Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados com ². Essa variação pode também estar distribuída em vários desses limites.

Tabela 2.3: Limites granulométricos de agregado graúdo (NBR 7211/83)

% Ret. Acum. # (mm)	Gradação					
	0	1	2	3	4	5*
76	-	-	-	-	0	-
64	-	-	-	-	0 – 30	-
50	-	-	-	0	75 – 100	-
38	-	-	-	0 – 30	90 – 100	-
32	-	-	0	75 – 100	95 – 100	-
25	-	0	0 – 25	87 – 100	-	-
19	-	0 – 10	75 – 100	95 – 100	-	-
12,5	0	-	90 – 100	-	-	-
9,5	0 – 10	80 – 100	95 – 100	-	-	-
6,3	-	92 – 100	-	-	-	-
4,8	80 – 100	95 – 100	-	-	-	-
2,4	95 – 100	-	-	-	-	-

*Valores devem ser acordados entre fornecedor e cliente.

3.4.1.2. Composição de agregados

Em alguns tipos de obra, é recomendável a composição de dois ou mais agregados graúdos. Isto é particularmente interessante em concretos massa destinados a obras de grandes volumes, onde a dimensão máxima característica destes agregados é de 76mm ou até mais. Neste caso, existem faixas granulométricas recomendadas e processos de composição de agregados que levam a misturas que se enquadram nestas faixas.

Em concretos estruturais convencionais, objeto desta publicação, a dimensão máxima característica dos agregados graúdos dificilmente ultrapassa 25mm. Neste caso, é comum apenas, em certas situações, compor-se misturas de agregados de graduação 0, 1 e 2 (ou 4,75/12,5; 9,5/25 e 19/31,5). O critério mais utilizado é o da máxima massa unitária compactada, ou seja, a mistura ideal entre os dois agregados será aquela que proporcionar um menor volume de vazios intergranulares a ser preenchido posteriormente por argamassa no concreto. Este procedimento é recomendado no método de dosagem da ABCP e será melhor explicado posteriormente.

3.4.2. Forma dos grãos

A forma geométrica dos grãos que compõem os agregados tem grande importância na trabalhabilidade dos concretos. Até o presente momento, as normas só contemplam a avaliação dessa propriedade para os agregados graúdos, devido a predominância do uso de agregados miúdos de jazidas naturais. Entretanto, com o uso crescente das areias de britagem, a determinação dessa propriedade para os agregados miúdos passa a ser extremamente relevante, apesar do pouco conhecimento disponível na literatura.

Os grãos dos agregados podem ser arredondados, como os dos seixos, ou de forma angular e de arestas vivas com faces mais ou menos planas, como os da pedra britada.

Grãos de formato semelhante a uma agulha ou a um disco dão concretos menos trabalháveis e requerem mais pasta de cimento. Hoje existem máquinas que arredondam

os grãos angulosos e o custo desta operação, que é repassado ao preço do produto, é compensado pela menor quantidade de pasta de cimento e/ou relação água/cimento mais baixa que é possível empregar.

Sob este aspecto, a melhor forma para os agregados graúdos é a que se aproxima da esfera, para o seixo, e a do cubo, com as três dimensões espaciais de mesma ordem de grandeza, para as britas.

Convencionou-se denominar:

- Comprimento (C): a distância entre dois planos paralelos que possam conter o agregado em sua maior dimensão;
- Largura (L): o diâmetro da menor abertura circular, através da qual o agregado possa passar;
- Espessura (E): a distância mínima entre dois planos paralelos que possam conter o agregado.

Quanto às dimensões os grãos classificam-se em normais ou lamelares:

Normais: Quando todas as dimensões têm a mesma ordem de grandeza:

$$C / L < 2 \text{ e } L / E < 2$$

Lamelares: Quando há grande variação na ordem de grandeza de uma ou mais dimensões.

3.4.3. Massas específicas

As mesmas massas específicas comentadas no tópico 2.2.3. (página 14) para os agregados miúdos, valem também para os agregados graúdos.

3.4.4. Porosidade

É a relação entre o volume de vazios e o volume aparente do material.

$$P = \frac{V_v}{V_{ap}} \quad (3.1)$$

Onde:

P < 1% = Rocha muito compacta
1% < P < 2,5% = Rocha com pequena porosidade
2,5% < P < 5% = Rocha com regular porosidade
5% < P < 10% = Rocha bastante porosa
10% < P < 20% = Rocha muito porosa
P > 20% = Rocha fortemente porosa

3.5. SUBSTÂNCIAS NOCIVAS

A NBR 7211/ 2009 fixa os teores máximos de substâncias nocivas em de acordo com a tabela 3.4:

Tabela 3.4: Limites máximos aceitáveis de substâncias nocivas no agregado graúdo com relação à massa do material

Determinação	Método de ensaio		Quantidade máxima relativa à massa do agregado graúdo %
Torrões de argila e materiais friáveis	ABNT NBR 7218	Concreto aparente	1,0
		Concreto sujeito a desgaste superficial	2,0
		Outros concretos	3,0
Materiais carbonosos ¹⁾	ASTM C 123	Concreto aparente	0,5
		Concreto não aparente	1,0
Material fino que passa através da peneira 75 µm por lavagem (material pulverulento) ^{2), 3)}	ABNT NBR NM 46		1,0

*Tais substâncias já foram explicadas no item 2.3.

A NBR 7211:2009 permite que o limite de material pulverulento pode ser majorado para 2% quando os agregados graúdos forem obtidos de rochas com absorção de água inferior a 1%.

A limitação quanto à quantidade de torrões de argila e de materiais carbonosos está associada à formação de pontos de fraqueza dentro do concreto e de prejuízos na estética do material, quando aparente. No caso do material pulverulento, o limite é inferior ao permitido para agregados miúdos. Isto se deve à menor área específica dos agregados graúdos o que faz com que uma quantidade relativamente pequena de material pulverulento seja suficiente para prejudicar a sua aderência à pasta de cimento.

3.6. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

3.6.1. Massas específicas

A determinação da massa específica dos agregados graúdos pode ser feita de várias formas, de acordo com a precisão necessária. Um método expedito, de baixa precisão, mas útil em muitos casos é o do frasco graduado.

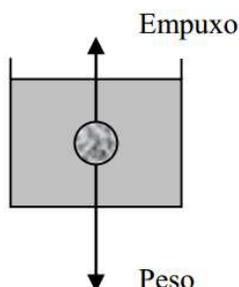
Frasco graduado: Coloca-se uma certa quantidade de água em uma proveta graduada e faz-se uma leitura inicial (L_i). Determina-se a massa de uma certa porção da amostra (m) e coloca-se esta porção na proveta. Faz-se então a leitura final (L_f).

$$d = \frac{m}{L_f - L_i} \quad (3.2)$$

Este procedimento é indicado para cálculos rápidos. A precisão é pequena pois depende da sensibilidade de leitura da proveta utilizada e, portanto, não tem sentido a diferenciação entre os diversos tipos de massa específica citados (d_1 , d_2 ou d_3)

Balança hidrostática: Este é o método preconizado pela norma NBR NM 53:2009. O princípio deste ensaio baseia-se na lei de Arquimedes: "Todo corpo imerso num fluido está sujeito a uma força de baixo para cima igual ao peso do líquido por ele deslocado".

Figura 3.1: Lei de Arquimedes



O valor do empuxo pode ser determinado pela diferença entre a massa de uma amostra em condições normais (m) e sua massa imersa (m_a). Se o fluido em questão for a água (densidade igual a 1) o valor desta força em kgf será numericamente igual ao volume da amostra (em dm^3).

$$d = \frac{m}{m - m_a} \quad (3.3)$$

- Procedimento:

Para a realização do ensaio, a amostra deve possuir uma massa mínima definida na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Massa mínima por amostra de ensaio de massa específica e absorção

Dimensão máxima característica do agregado (mm)	Massa mínima da amostra de ensaio (kg)
12,5	2
19	3
25	4
37,5	5
50	8
63	12
75	18
90	25
100	40
112	50
125	75
150	125
* Após secagem	

- Lavar completamente o agregado para remover o pó ou outro material da superfície;
- Secar a amostra de ensaio a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ e deixar esfriar em temperatura ambiente durante 1 a 3 horas;

- Pesar uma amostra (m) de acordo com a massa mínima;
- Submergir o agregado em água por 24 horas (24±4°C);
- Retirar a amostra da água e envolver em um pano até que toda a água visível seja eliminada, ainda que a superfície se apresente úmida. Enxugar cada grão durante a operação. Pesar m_s;
- Tarar a balança com o recipiente que conterá a amostra quando imersa na água. Esse recipiente deverá ser feito de tela com 3,35mm de abertura e possuir um volume de 4 a 7 dm³;
- Colocar a amostra no recipiente imerso e fazer a pesagem imersa (m_a).

3.6.1.1. Massa específica aparente do agregado seco (d₁)

$$d_1 = \frac{m}{m_s - m_a} \quad \begin{array}{l} m = \text{massa seca} \\ m_s = \text{massa saturada superfície seca} \\ m_a = \text{massa imersa} \end{array} \quad (3.4)$$

3.5.1.2. Massa específica aparente do agregado saturado superfície seca (d₂)

$$d_2 = \frac{m_s}{m_s - m_a} \quad \begin{array}{l} m_s = \text{massa saturada superfície seca} \\ m_a = \text{massa imersa} \end{array} \quad (3.5)$$

3.6.1.2. Massa específica aparente do agregado saturado superfície seca (d₃)

$$d_3 = \frac{m}{m - m_a} \quad \begin{array}{l} m = \text{massa seca} \\ m_a = \text{massa imersa} \end{array} \quad (3.6)$$

3.6.2. Absorção

$$A = \frac{m_s - m}{m} \quad \begin{array}{l} m = \text{massa seca} \\ m_s = \text{massa saturada superfície seca} \\ m_a = \text{massa imersa} \end{array} \quad (3.7)$$

Os parâmetros podem ser determinados pelo processo da balança hidrostática.

3.6.3. Porosidade

$$P = \frac{m_s - m}{m_s - m_a} \quad \begin{array}{l} m = \text{massa seca} \\ m_s = \text{massa saturada superfície seca} \\ m_a = \text{massa imersa} \end{array} \quad (3.8)$$

Os parâmetros podem ser determinados pelo processo da balança hidrostática.

4. CIMENTO PORTLAND

4.1. DEFINIÇÃO

4.1.1. Aglomerantes

Aglomerantes são produtos empregados na construção civil para fixar ou aglomerar materiais entre si. Apresentam-se geralmente sob a forma pulverulenta e a maioria, quando misturada com água tem a capacidade de aglutinar e formar suspensões coloidais, endurecendo por simples secagem e/ou em consequência de reações químicas, aderindo à superfície com as quais foram postos em contato.

São empregados, via de regra, como pastas ou com agregados inertes (areia e pedra), na confecção de argamassas e concretos utilizados para revestimentos de pisos e paredes, obtenção e/ou união de elementos de construção civil (tijolos, blocos, azulejos, lajotas), construção de elementos e componentes estruturais e estabilização de solos.

Os aglomerantes podem ser inicialmente classificados conforme o processo que leva ao seu endurecimento. São denominados quimicamente inertes aqueles cujo endurecimento não produz qualquer alteração química ou mineralógica em sua constituição. Um exemplo são as misturas argilosas, cujo processo de endurecimento ao ambiente é decorrente exclusivamente da evaporação da água de amassamento, que não têm grande interesse para a construção civil, devido às baixas resistências mecânicas obtidas e à própria reversibilidade do processo. O cimento asfáltico é um outro exemplo desse tipo de aglomerante.

Por outro lado, existem os aglomerantes quimicamente ativos, como as cales, gessos e cimentos, cujo endurecimento nas condições ambientes de temperatura e pressão é decorrente de uma reação química. Apresentam maior interesse e têm grande campo de aplicação, pois são capazes de atingirem altas resistências físico mecânicas e manterem-se estáveis nessa condição. Os aglomerantes quimicamente ativos dividem-se em:

Aglomerantes aéreos: São empregados somente ao ar, pois não resistem satisfatoriamente quando imersos em água.

Aglomerantes hidráulicos: Podem ser empregados ao ar ou na água, pois resistem satisfatoriamente mesmo imersos na água.

4.1.1.1. Cimento Portland

Aglomerante hidráulico, pulverulento, constituído de silicatos e aluminatos de cálcio, praticamente sem cal livre. Estes silicatos e aluminatos complexos, ao serem misturados com água, hidratam-se e produzem o endurecimento da massa, oferecendo elevada resistência mecânica.

O cimento Portland resulta da moagem de um produto denominado clínquer, obtido pelo cozimento até a fusão insipiente (aproximadamente 30% de fase líquida) da mistura de calcário e argila convenientemente dosada e homogeneizada, de tal forma que toda a cal se combine com os compostos argilosos, sem que, depois do cozimento, resulte cal livre em quantidade prejudicial. Após a queima, é feita pequena adição de sulfato de cálcio, de modo que o teor de SO_3 não ultrapasse 3%, a fim de regularizar a tempo de início das reações do aglomerante com a água.

4.2. MATÉRIAS PRIMAS

4.2.1. Calcário

São rochas sedimentares compostas basicamente por carbonatos de cálcio (CaCO_3) associados, em certos casos, aos carbonatos de magnésio. Os calcários formados predominantemente por carbonato de cálcio são denominados "calcários calcíticos" e aqueles que apresentam quantidade expressiva de carbonato de magnésio são conhecidos por "calcários dolomíticos ou magnesianos".

No cimento, o calcário empregado é de natureza calcítica, que se apresenta na natureza com impurezas como o óxido de magnésio, SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . O teor de óxido de magnésio não pode ser elevado por conduzir a cimentos com características expansivas.

4.2.2. Argila

A argila empregada na fabricação do cimento é essencialmente constituída de silicato de alumínio hidratado, geralmente contendo ferro e outros minerais, em menores percentagens. A argila fornece os óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 necessários à fabricação do cimento. Em muitos casos, torna-se necessário o uso de matérias primas complementares para facilitar o ajuste dos teores de sílica e óxido de ferro (areias, filito, quartzito, magnetita, etc).

4.2.3. Gesso

É o produto de adição final no processo de fabricação do cimento Portland, com o fim de regular o tempo de pega por ocasião das reações de hidratação.

A gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) é o tipo de gesso mais empregado. Como as jazidas deste mineral localizam-se na região nordeste, começou-se a utilizar no sul do país o fosfogesso ou gesso sintético que é obtido como rejeito na produção de ácido fosfórico.



Apatita + ácido sulfúrico + água ácido fosfórico + gipsita

Este fosfogesso, para ser utilizado na produção de cimento, precisa ser purificado, pois normalmente encontra-se associado a impurezas (fluoretos e fosfatos residuais).

4.3. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

No interior do forno de produção de cimento, a sílica, a alumina, o óxido de ferro e óxido de cálcio reagem dando origem ao clínquer, cujos compostos principais são os seguintes:

- Silicato tricálcico: $3 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S)
- Silicato dicálcico: $2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S)
- Aluminato tricálcico: $3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A)
- Ferro aluminato tetracálcico: $4 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF)

Esses compostos formam-se no interior do forno quando a temperatura se eleva a ponto de transformar a "mistura crua" num líquido pastoso que, ao resfriar-se, dá origem a substâncias cristalinas, como ocorre com os três primeiros produtos acima citados, e a um material intersticial amorfo, o C_4AF e outros.

Todos esses compostos têm a propriedade de reagir em presença de água, por hidrólise, dando origem então a compostos hidratados.

Nos fornos, a primeira reação que se processa é a combinação do óxido de ferro com alumina e cal formando o C_4AF , até esgotar-se o ferro. A segunda reação que se processa é a combinação do Al_2O_3 excedente com o CaO formado o C_3A até esgotar-se a alumina. Finalmente, haverá a formação dos silicatos de cálcio, podendo ainda, após esta reação, sobrar o CaO livre em pequenas quantidades.

4.3.1. Propriedades dos compostos

4.3.1.1. C_3S

É o composto essencial do cimento Portland. Esse composto é o responsável pela resistência inicial dos cimentos. Os cimentos de alta resistência inicial são ricos em C_3S . Reage em poucas horas em contato com a água, liberando grande quantidade de calor na hidratação.

4.3.1.2. C_2S

Tem pega lenta com fraca resistência até os 28 dias que aumenta então rapidamente chegando a equivaler com a do C_3S no primeiro ano. Este composto desenvolve baixo calor de hidratação.

4.3.1.3. C_3A

Tem pega instantânea desenvolvendo altíssimo calor de hidratação. Tem baixa resistência e não resiste à ação de águas sulfatadas. Evidentemente sua quantidade deve ser pequena devido aos inconvenientes acima citados. No entanto, a presença da alumina é importante na fase de produção do cimento, pois ela age como fundente facilitando, desta forma, a formação do clínquer a temperaturas mais baixas.

4.3.1.4. C_4AF

Tem pega rápida, porém não instantânea como a C_3A . Tem baixa resistência, mas possui a vantagem do Fe_2O_3 trabalhar como fundente e também fixar parte da alumina melhorando o desempenho do cimento ao ataque de águas sulfatadas (Ex: água do mar).

4.4. HIDRATAÇÃO, PEGA E ENDURECIMENTO

4.4.1. Hidratação dos compostos

- C_3S : $2C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3Ca(OH)_2$ ou $(CSH + CH)$
- C_2S : $2C_2S + 4H \rightarrow C_3S_2H_3 + Ca(OH)_2$ ou $(CSH + CH)$

- $C_3A: C_3A + 6H \rightarrow C_3AH^6$
- $C_4AF: C_4AF + Ca(OH)_2 + CaSO_4 \cdot 2H \rightarrow 3CA_3CaSO_4$ (Sulfo-aluminato de cálcio)
 $3CF \cdot 3CaSO_4$ (sulfoferrita)

4.4.2. Pega e endurecimento

Sendo o cimento constituído por minúsculas partículas de tamanho variável, na sua maior parte variando de 7 a 30 μ m, cada uma delas podendo conter variadas proporções dos principais constituintes já mencionados, o seu processo de hidratação é considerado bastante complexo mas de profundo interesse pois influi nas propriedades de concretos e argamassas, tanto no estado fresco quanto endurecido.

Dos compostos acima citados, o C_3A é o que possui uma maior reatividade inicial. Se um cimento for composto apenas por um clínquer moído, a reação do C_3A com água, conforme apresentada acima, seria praticamente instantânea provocando um grande aquecimento e enrijecimento do material e o cimento não teria utilidade para a maioria das aplicações práticas. Por isso que se adiciona gipsita para evitar-se que aquela reação ocorra de imediato. A gipsita, em contato com a água de amassamento, libera sulfato para a solução. O C_3A dissolvido, em presença de quantidade suficiente de sulfato, forma um composto denominado etringita primária ($C_6AS_3H_{32}$) que se precipita sobre os grãos anidros formando pequenos cristais. Tem-se então uma pequena redução na fluidez da pasta que continua trabalhável. A hidratação do C_4AF em presença de sulfato produz compostos semelhantes à etringita. O sulfato dissolvido também afeta a velocidade de hidratação do C_3S .

Durante as primeiras horas após o contato do cimento com água, pouca reação ocorre e esta fase é conhecida como tempo de dormência. Após esta fase, a pasta de cimento passa a apresentar um aumento brusco da viscosidade e temperatura que é denominada de início de pega. Várias teorias tem sido postuladas para explicar a ocorrência desse fenômeno mas nenhuma totalmente comprovada. Sabe-se apenas que, a partir desse instante, o C_3S passa a reagir com velocidade maior, produzindo CSH (composto de maior resistência e hidráulidade do cimento) e liberando grandes quantidades de $Ca(OH)_2$. A quantidade de etringita formada também aumenta consideravelmente. Poucas horas depois, a pasta passa a apresentar resistência mecânica (fim de pega) e inicia-se a fase denominada endurecimento (ganho de resistência). Esse ganho de resistência é atribuído praticamente à hidratação do C_3S e, numa taxa que aumenta com o tempo, à hidratação do C_2S . A etringita formada, a partir de 1 dia, com a diminuição da quantidade de sulfato dissolvido, instabiliza-se e converte-se progressivamente em monossulfato (C_4ASH_{18}).

Observações:

- a) O tempo de início de pega é controlado pela quantidade e reatividade do sulfato de cálcio presente. Grande quantidades de gipsita podem não só retardar a pega mas provocar reações expansivas no cimento após o processo de endurecimento pela formação de etringita secundária.
- b) A resistência até os 3 dias é assegurada pela hidratação dos aluminatos e silicatos de cálcio (C_3S). Até os 7 dias: Praticamente pelo aumento da hidratação do C_3S . Até os 28 dias: Continua a hidratação do C_3S responsável pelo aumento da resistência, com pequena contribuição do C_2S . Acima dos 28 dias: O aumento de resistência passa a ser devido à hidratação do C_2S .

- c) A alta resistência inicial de um cimento pode ser obtida pelo aumento de C_3S ou pela melhor moagem do clínquer. No entanto, se aumentarmos o C_3S haverá um aumento da produção de $Ca(OH)_2$ que poderá comprometer a estabilidade química do cimento. A maior moagem aumentará a demanda de água das misturas bem como o teor de gipsita necessário para controlar a pega do cimento.
- d) Dos compostos resultantes da hidratação do cimento, o único solúvel é o $Ca(OH)_2$, sendo esta solubilidade o principal agente para a redução de durabilidade das misturas endurecidas. Nos cimentos Portland, forma-se de 13 a 17% de $Ca(OH)_2$. Este $Ca(OH)_2$ em contato com águas puras é facilmente lixiviado e, recebendo o CO_2 do ar, forma o $CaCO_3$ que é um carbonato insolúvel mas que gera eflorescências brancas. A água do mar é rica em sulfatos. O concreto quando posto em contato com ela, o $Ca(OH)_2$ reage com este sulfato resultando num sulfato de cálcio. Este, por sua vez, combina-se com a alumina do C_3A formando o sulfoaluminato de cálcio (etringita) que é expansivo o que provocará a desagregação do concreto.
- e) Os cimentos finamente moídos dão início de pega mais rápido e fim de pega mais demorado que os menos finos.
- f) O aumento de temperatura diminui o tempo de início de pega, enquanto que temperaturas próximas de $0^\circ C$ retardam as reações e pouco abaixo deste valor as paralisam.
- g) Certos compostos solúveis aceleram a pega, ao passo que outros retardam. Entre os primeiros estão o Cloreto de Cálcio (em % superior a 0,5%), o Cloreto de Sódio, álcalis (Hidróxidos de Potássio e Sódio). Como retardadores citam-se: gesso, carbonato de sódio, óxido de zinco, açúcar, bórax, tanino e ácido fosfórico.
- h) De acordo com os tempos de pega, os cimentos podem ser classificados:
- Pega rápida: Tempo de início de pega < 30 min
 - Pega semi-rápida: 30min < Tempo de início de pega < 60min
 - Pega normal: Tempo de início de pega > 60min
- i) Em alguns cimentos apresenta-se um fenômeno conhecido como falsa pega. Ela manifesta-se como um aumento brusco de viscosidade da pasta logo após a mistura entre cimento e água. Este fenômeno é causado principalmente pela desidratação da gipsita adicionada na fabricação do cimento. Quando durante a moagem da mistura de clínquer mais gipsita, a temperatura do material atinge $150^\circ C$, ocorre esta desidratação. O cimento assim produzido, quando entra em contato com a água, promove a reidratação da gipsita o que gera uma perda de trabalhabilidade da mistura em poucos minutos. Neste caso, um amassamento mais enérgico da pasta, sem acréscimo de água, é suficiente para eliminar o fenômeno, passando a pega a ser normal, não havendo perda de resistência mecânica. No caso de não ser restabelecida a trabalhabilidade, pode-se estar na presença de uma pega instantânea, provocada provavelmente por deficiência na quantidade de gipsita adicionada ao clínquer para controlar a pega tornando o cimento inadequado ao uso como aglomerante.

4.5. GRAU DE MOAGEM

Além da composição química, o grau de moagem tem grande influência sobre as propriedades do cimento.

A hidratação dos grãos em contato com a água se faz da superfície para o interior. Desta forma, o grau de moagem influirá sobre a velocidade de hidratação e conseqüentemente sobre o desenvolvimento do calor, retração e resistência. Como ordem de grandeza, pode-se dizer que a água age a 0,5µm de profundidade nas primeiras 24 horas, a 2µm na primeira semana e a 4µm no primeiro mês. Logo, os cimentos bem moídos endurecem mais rapidamente, dando pastas mais homogêneas e mais estáveis. Em contrapartida, a melhor moagem fará com que o cimento libere maior quantidade de calor

4.6. ADIÇÕES

São denominados adições, os materiais que, misturados aos cimentos ou concretos em quantidades apreciáveis (maior do que 5% em massa), alteram as propriedades que o aglomerante confere ao concreto. No Brasil, quase a totalidade dos cimentos comercialmente disponíveis possuem um ou mais tipos de adição. Isto se explica principalmente pela redução de custo do cimento e por questões ambientais pois a maioria destas adições são sub-produtos industriais. É sempre importante enfatizar que a fabricação de cimento Portland é ecologicamente agressiva, pois a produção de uma tonelada de cimento resulta na emissão de cerca de uma tonelada de dióxido de carbono para a atmosfera. A seguir é apresentada uma breve descrição dos principais tipos de adições empregadas nos cimentos brasileiros.

4.6.1. Pozolanas

São consideradas pozolanas, os materiais silicosos ou sílico-aluminosos, que por si só possuem pouco ou nenhum valor aglomerante. Porém, quando finamente divididos e em presença de umidade, reagem quimicamente com hidróxido de cálcio, à temperatura normal, formando compostos com propriedades aglomerantes (silicatos de cálcio hidratados), porém distintos daqueles originados do clínquer, pois têm menor relação CaO/SiO_2 , portanto menos básicos e por esta razão mais estáveis aos meios agressivos. Os materiais pozolânicos são empregados na fabricação de alguns cimentos brasileiros com o CP IV e o CP II –E. Dentro desta definição, enquadram-se uma série de materiais:

Pozolanas naturais: Como algumas terras diatomáceas, rochas contendo opala, tufos e cinzas vulcânicas.

Pozolanas artificiais: Obtidas pela calcinação conveniente de argilas e xistos argilosos.

Cinzas Volantes: Resultantes da combustão de carvão mineral, usualmente das usinas termoelétricas.

Cinzas de Origem Vegetal: Obtidas pela queima de produtos vegetais (casca de arroz, palha de cana, etc).

4.6.2. Escórias de alto forno

É um resíduo da produção de ferro gusa (uma tonelada de ferro gusa gera 300 kg de escória). Quimicamente é uma mistura de óxido de cálcio, sílica e alumina, que são os mesmos óxidos que compõem o clínquer Portland, mas em proporções distintas. A composição aproximada (principais compostos) da escória utilizada no Brasil é: $\text{SiO}_2 = 35\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 12\%$; $\text{CaO} = 42\%$ e $\text{MgO} = 6\%$. A composição e estrutura física do material são muito variáveis e dependem do processo utilizado e das condições de resfriamento. Para uso como adição em cimentos, necessita ser resfriada bruscamente para que se solidifique como material vítreo.

As escórias atuam quimicamente de modo distinto das pozolanas. São, isoladamente, um aglomerante de baixíssima reatividade, ou seja, em contato com a água reagem formando compostos hidratados complexos mas de natureza similar aos da hidratação do cimento Portland (CSH) mas numa velocidade muito lenta. Para acelerar as reações de hidratação, necessitam de um ambiente fortemente alcalino. Desta forma, quando adicionadas ao cimento Portland, reagem com água devido ao alto pH gerado na solução dos poros do concreto devido à hidratação dos compostos do clínquer. Neste caso, a reatividade da escória e, por conseguinte, do cimento de escória chamado de cimento de alto forno, é extremamente dependente de sua finura. Como é um material difícil de moer, normalmente a moagem é feita em separado até atingir áreas específicas da ordem de 400 a 500m²/kg e depois adicionada ao cimento em proporções que variam entre 30 e 70%. Sua massa específica é de aproximadamente 2,90kg/dm³.

4.6.3. Filers

O filer é um material finamente moído, com aproximadamente a mesma finura do cimento portland, mas que, devido a suas propriedades físicas, tem um efeito benéfico sobre as propriedades do concreto, tais como trabalhabilidade, densidade, permeabilidade, capilaridade e exsudação. Usualmente são inertes. Os filers mais utilizados na fabricação dos cimentos são provenientes da moagem do calcário, portanto de composição a base de carbonato de cálcio. Podem ativar a hidratação do cimento Portland atuando como pontos de nucleação. Devido ao seu baixo custo e disponibilidade, são empregados em praticamente todos os cimentos comerciais brasileiros, em proporções entre 5 e 10%.

4.6. TIPOS DE CIMENTOS

A ABNT apresenta seis tipos de cimentos normalizados, sendo que alguns se subdividem, totalizando dez variedades. Cabe ressaltar que a disponibilidade de certos tipos de cimento é regional e alguns só são fabricados segundo encomendas especiais. As Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam as características destes cimentos e alguns requisitos de desempenho.

Tabela 4.1: Tipos de cimentos Portland Nacionais

Norma	Tipo	Sigla	classe
NBR 5732/91 (EB-1/91)	Cimento Portland Comum	CP I - Cimento Portland Comum	25,32,40
		CP I-S - Cimento Portland Comum c/ adição	25,32,40
NBR 11578/91 (EB-2138)	Cimento Portland Composto	CP II-E - Cimento Portland Composto c/ escória	25,32,40
		CP II-Z - Cimento Portland Composto c/ pozolana	25,32,40
		CP II-F - Cimento Portland Composto c/ filer	25,32,40
NBR 5735/91 (EB-208)	Cimento Portland de Alto Forno	CP III - Cimento Portland de Alto Forno	25,32,40
NBR 5736/91 (EB-758)	Cimento Portland Pozolânico	CP IV - Cimento Portland Pozolânico	25,32
NBR 5733/91 (EB2)	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	CP V- ARI - Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	
NBR 5737/92	Cimento Portland resistente a sulfatos	RS - Cimento Portland resistente a sulfatos	25,32

Tabela 4.2: Limites para a composição dos cimentos

Sigla	Clínquer + sulfatos de cálcio (%)	Escória granulada (%)	Material Pozolânico (%)	Material Carbonático (%)
CP I	100	0	0	0
CP I-S	99 - 95		1 - 5	
CP II-E	94 - 56	6 - 34	0	0 - 10
CP II-Z	94 - 76	0	6 - 14	0 - 10
CP II-F	94 - 90	0	0	0 - 10
CP III	65 - 25	35 - 70	0	0 - 5
CP IV	85 - 45	0	15 - 50	0 - 5
CP V	100 - 95	0	0	0 - 5

Tabela 4.3: Exigências físicas em função da classe do cimento

Tipos	Classe (MPa)	Finura		Tempo de Pega		Expans. Frio ou Quente (mm)	Resistência à Compressão			
		#200	Blaine (m ² /Kg)	Início (h)	Fim (h)		1 Dia (MPa)	3 Dias (MPa)	7 Dias (MPa)	28 Dias (MPa)
CP I CP I-S	25	≤12,0	≥240	≥1	≤10	≤5,0	-	≥8,0	≥15,0	≥25,0
	32	≤12,0	≥260				-	≥10,0	≥20,0	≥32,0
	40	≤10,0	≥280				-	≥15,0	≥25,0	≥40,0
CP II-E CP II-Z CP II-F	25	≤12,0	≥240	≥1	≤10	≤5,0	-	≥8,0	≥15,0	≥25,0
	32	≤12,0	≥260				-	≥10,0	≥20,0	≥32,0
	40	≤10,0	≥280				-	≥15,0	≥25,0	≥40,0
CP III	25	≤8,0	-	≥1	≤12	≤5,0	-	≥8,0	≥15,0	≥25,0
	32						-	≥10,0	≥20,0	≥32,0
	40						-	≥12,0	≥23,0	≥40,0
CP IV	25	≤8,0	-	≥1	≤12	≤5,0	-	≥8,0	≥15,0	≥25,0
	32						-	≥10,0	≥20,0	≥32,0
CP V	--	≤6,0	≥300	≥1	≤10	≤5,0	≥14,0	≥24,0	≥34,0	-
CP V - ARI RS	--	≤6,0	≥300	≥1	≤10	≤5,0	≥11,0	≥24,0	≥34,0	-

4.6.1. CP I e CP I-S

Este aglomerante é obtido pela moagem do clínquer mais sulfato de cálcio. No caso do CP I-S pode adicionar-se até 5% de escória, pozolana ou filer calcário. É utilizado em casos correntes, onde não se exige nenhuma propriedade especial do concreto.

4.6.2. CP II (E,Z ou F)

Este aglomerante difere do CP I-S apenas quanto à quantidade de adição utilizada na sua formulação (ligeiramente maior). Sua aplicação é a mesma que a do tipo anterior. A presença das adições em quantidades relativamente baixas faz com que apresentem resistência e durabilidade similares ao do cimento CP I-S.

4.6.3. CP III

É o aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland e escória granulada de alto-forno, com adição eventual de sulfato de cálcio. O conteúdo de escória deve estar compreendido entre 35 e 70% da massa total. Este cimento produz resistências iniciais mais baixas que o cimento Portland comum, principalmente sob baixas temperaturas, e desenvolve menor calor de hidratação. Tem seu emprego generalizado em obras de concretos simples, armado e protendido, apesar de possuir aplicações específicas mais interessantes.

O emprego do cimento Portland de Alto Forno é particularmente interessante no caso de meios sulfatados, como os ambientes marinhos e certas águas residuais industriais, devido à menor quantidade de hidróxido de cálcio presente no material hidratado. Recomenda-se sua utilização também em concreto massa ou estruturas cujas dimensões facilitam o aparecimento de fissuras de origem térmica.

É importante esclarecer que a escória utilizada na fabricação do cimento é alcalina e, portanto, não tem ação pozolânica, isto é, não tem condições de combinar com o Ca(OH)_2 . O hidróxido de cálcio age apenas como catalisador básico para despertar a ação hidráulica dos componentes da escória que se encontra em estado latente.

4.6.4. CP IV

É o aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer Portland e pozolana, sem adição, durante a moagem, de outra substância a não ser do sulfato de cálcio. A quantidade de pozolana empregada varia de 15 a 50%. Nas primeiras idades, apresenta desenvolvimento mais lento das resistências mecânicas, comparados a concretos de cimento Portland comum, o que tende a inverter-se em idades superiores a 90 dias. Possui também uma maior susceptibilidade à baixas temperaturas no que tange ao desenvolvimento de resistência nas primeiras idades. Além disso, desenvolvem baixo calor de hidratação, produzem argamassas e concretos mais impermeáveis pela fixação de Ca(OH)_2 na reação pozolânica, inibem a reação entre os álcalis do cimento e agregados reativos e apresentam um melhor desempenho à cura térmica (utilizada na fabricação de pré-moldados).

O emprego do cimento Portland Pozolânico é especialmente interessante no caso de concretos sujeitos à lixiviação sob águas agressivas, uma vez que apresenta menor permeabilidade, comparativamente aos confeccionados com cimento comum. Recomenda-se sua utilização também em concreto massa ou estruturas cujas dimensões

facilitem o aparecimento de fissuras de origem térmica. Conferem também ao concreto boa resistência a sulfatos.

4.6.5. CP V-ARI

Este aglomerante é obtido pela moagem do clínquer mais sulfato de cálcio, podendo receber a adição de até 5% de filer calcário. A elevada resistência inicial é obtida geralmente pela maior finura, uma vez que a mudança de composição do clínquer tornando-o mais rico em C3S é operacionalmente complicada para as fábricas de cimento.

O emprego deste aglomerante é recomendado quando necessita-se de resistências mecânicas elevadas a baixas idades. Por norma, exige-se que apresente, com 1 dia de idade, resistência à compressão superior ao cimento Portland comum aos 3 dias, o mesmo sucedendo-se com as idades de 3 e 7 dias, 7 e 28 dias, respectivamente para ambos os cimentos. Este cimento tem grande aplicação na indústria de pré-moldados onde a necessidade de rápida reutilização de formas exige o desenvolvimento acelerado de resistências em idades precoces. Não deve ser empregado em concreto massa e elementos de grandes dimensões, dado o elevado calor de hidratação por ele gerado. Também não é recomendado seu emprego em ambientes agressivos devido à grande quantidade de Ca(OH)_2 liberada na hidratação.

4.6.6. Cimento Portland branco

Um outro tipo de cimento Portland fabricado no Brasil é o branco. Possui esta coloração por advir de uma mistura de calcário e caulim, sem praticamente conter óxidos de ferro e manganês. É um cimento de fabricação bastante pequena e tem seu preço superior ao do cimento Portland comum por exigir um consumo energético maior na produção (não existe Fe_2O_3 que é fundente) e, por exigir temperaturas mais altas no cozimento (aproximadamente 1500 °C) os fornos de produção precisam de material de revestimento refratário mais caro.

São classificados em dois grupos: Estrutural e Não-estrutural. O primeiro grupo apresenta exigências quanto a resistências mecânicas semelhantes ao cimento Portland Comum. É empregado em aplicações especiais onde se deseja um efeito arquitetônico pela cor. O segundo grupo é utilizado principalmente para composição de pastas de rejunte de elementos cerâmicos.

5. CONCRETO

5.1. DEFINIÇÃO

Concreto de cimento Portland é o produto resultante do endurecimento de uma mistura de cimento Portland, agregado miúdo, agregado graúdo e água, adequadamente proporcionada. A esses materiais básicos, podem ser acrescentados aditivos, adições, fibras, etc, em situações específicas em que se deseja alterar alguma de suas propriedades, seja no estado fresco e/ou endurecido.

O concreto é conceitualmente um material bifásico, constituído por uma fase pasta e outra agregado, cada uma com funções bem determinadas no caso de concretos plásticos usuais.

Funções da pasta (cimento + água):

- Dar impermeabilidade ao concreto;
- Dar trabalhabilidade ao concreto;
- Envolver os grãos;
- Preencher os vazios entre os grãos;
- Conferir resistência mecânica ao concreto.

Funções do agregado:

- Reduzir o custo do concreto;
- Reduzir as variações de volume (diminuir as retrações);
- Contribuir com grãos capazes de resistir aos esforços solicitantes (terão que ter resistência superior a da pasta).

Sendo um material estrutural, após endurecido, deve ter resistência mecânica e durabilidade. Um aspecto interessante e peculiar do concreto é que estas propriedades podem ser modificadas de acordo com o proporcionamento entre seus constituintes. Além disso, estas propriedades dependem fundamentalmente das características do material antes da ocorrência da pega e endurecimento. Esta fase do concreto é denominada estado fresco.

5.2. PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

5.2.1. Trabalhabilidade

É a propriedade do concreto fresco que identifica sua maior ou menor aptidão para ser empregado com determinada finalidade, sem perda de sua homogeneidade. Este conceito, aparentemente vago, expressa uma característica marcante. Não se pode definir se um concreto é trabalhável sem se conhecer de ante-mão a finalidade e condições de contorno (tipo de misturador, forma de lançamento e adensamento, dimensões e densidade da armadura da peça a ser concretada) de sua aplicação. Por exemplo, um concreto considerado trabalhável para a produção de blocos para alvenaria, que exige a imediata remoção da forma após o adensamento, não seria considerado trabalhável para a concretagem da estrutura de um edifício.

Assim sendo, quando se trata do assunto trabalhabilidade do concreto, deve-se abordar os fatores internos que caracterizam sua reologia, ou seja, capacidade de se deformar quando lhe é aplicado um esforço externo. Simplificadamente, esses fatores são a consistência (oposto da fluidez) e coesão (oposto de segregação).

A consistência é função principalmente da quantidade de água adicionada ao concreto ou da presença de alguns tipos de aditivos (plastificantes e superplastificantes). Esta propriedade simplesmente indica quão “duro” (seco) ou “mole” está o concreto.

A coesão é uma propriedade que reflete a capacidade do concreto de manter sua homogeneidade durante o processo de adensamento. É função fundamentalmente da quantidade de finos presente na mistura bem como da granulometria dos agregados gráudo e miúdo e da proporção relativa entre eles.

Os principais fatores que afetam a consistência e/ou coesão de um concreto são:

Quantidade de água (relação água/materiais secos): quanto maior a quantidade de água, menor serão a consistência e coesão de um concreto.

Quantidade, tipo e finura do cimento: Cimentos mais finos aumentam a demanda de água de um concreto para uma dada consistência como também aumentam a coesão do concreto. Traços mais ricos em cimento mostrarão a mesma tendência. Cimentos contendo partículas mais arredondadas (certas cinzas volantes) podem aumentar a fluidez de um concreto, quando se mantém constante a quantidade de água adicionada.

Proporção relativa entre cimento e agregados: concretos mais argamassados tendem a ser mais coesos e exigir mais água para a mesma consistência.

Granulometria e forma dos agregados: agregados com granulometria contínua, desde que não muito grossos, tendem a aumentar a coesão e fluidez para uma dada quantidade de água adicionada. Agregados muito grossos diminuem a consistência e coesão ao passo que os muito finos tem a tendência inversa (desde que a granulometria não seja totalmente uniforme). Quanto à forma, grãos arredondados aumentam a fluidez e grãos lamelares a diminuem.

Presença de material pulverulento: a presença de pó nos agregados melhora a coesão do concreto mais diminui sua fluidez.

Uso de aditivos: certos aditivos (plastificantes, superplastificantes, incorporadores de ar) podem alterar significativamente a consistência e coesão dos concretos.

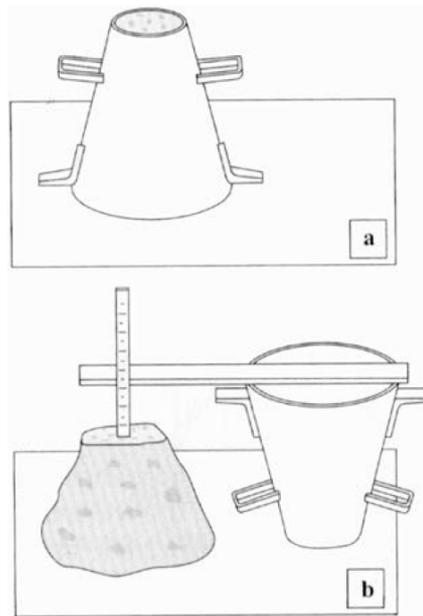
5.2.1.1. Ensaio do abatimento do tronco de cone (Slump test)

É o procedimento mais utilizado para medir a trabalhabilidade (consistência) do concreto. O método baseia-se na deformação causada na massa do concreto pelo seu peso próprio.

Conforme a NBR NM 67/1998, o ensaio consiste em encher-se uma forma metálica tronco cônica de diâmetro superior de 10 cm, inferior de 20 cm e altura de 30cm, com uma massa de concreto, em três camadas de alturas aproximadamente iguais, adensadas cada uma com 25 golpes com uma barra de 16mm de diâmetro.

Logo após, retira-se lentamente o molde (5 a 10s), verticalmente, e determina-se a diferença entre a altura do molde e da massa de concreto, após assentada.

Figura 5.1: Determinação da consistência do concreto através do ensaio do tronco de cone



Observações:

- a) Valores de abatimento (Slump) recomendados em função do tipo de aplicação do concreto (Tabela 5.1):

Tabela 5.1: Faixas de abatimento recomendadas em função do tipo de aplicação

Classe	Abatimento mm	Aplicações típicas (exemplos ilustrativos)
S10	$10 \leq A < 50$	Concreto extrusado, vibro prensado ou centrifugado
S50	$50 \leq A < 100$	Alguns tipos de pavimentos, de elementos de fundações e de elementos pré-moldados ou pré-fabricados
S100	$100 \leq A < 160$	Elementos estruturais correntes como lajes, vigas, pilares, tirantes, pisos, com lançamento convencional do concreto
S160	$160 \leq A < 220$	Elementos estruturais correntes como lajes, vigas, pilares, tirantes, pisos, paredes diafragma, com concreto lançado por bombeamento, estacas escavadas lançadas por meio de caçambas.
S220	$A \geq 220$	Estruturas e elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras com concreto lançado por bombeamento, lajes de grandes dimensões, elementos pré-moldados ou pré-fabricados de concreto, estacas escavadeiras lançadas por meio de caçambas.

- b) O ensaio de abatimento pode ser utilizado para verificar o bom proporcionamento da mistura:

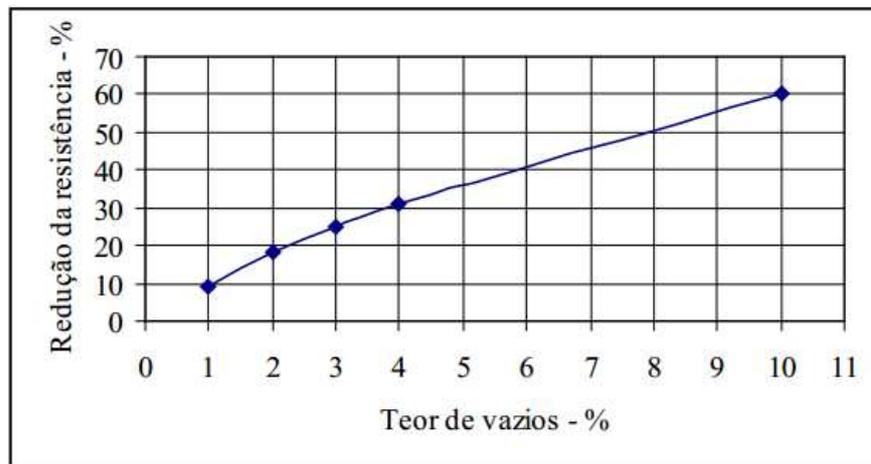
- Se a superfície do concreto apresenta excesso ou falta de argamassa;
- Quando o concreto é abatido por pancadas na base do equipamento adjacentes ao tronco de cone formado, se estiver mal proporcionado (falta de coesão), a mistura desagrega.

- c) O ensaio possui limitações de precisão. Um operador bem treinado pode fazer o abatimento de um concreto variar de até 3cm, dependendo de sua consistência, em função da forma como é adensado o concreto e de como é retirado o molde.

5.2.2. Massa específica

A massa específica do concreto no estado fresco pode ser um parâmetro importante para, entre outras coisas, avaliar indiretamente o teor de ar incorporado/aprisionado no material. Este teor, se elevado, pode levar a reduções significativas na resistência do concreto como pode ser visto na Figura 5.2.

Figura 5.2: Redução de resistência em relação ao teor de vazios



A massa específica do concreto (γ) pode ser determinada através de um ensaio bastante simples. Basta preencher-se um recipiente indeformável de volume conhecido com concreto, adensando-o em condições similares às de obra. A razão entre a massa do concreto e o volume do recipiente fornecerá o valor de γ .

Para se determinar o percentual de vazios preenchidos por ar no concreto pode-se utilizar o seguinte procedimento:

- Dado um concreto dosado em massa com traço de 1: a : p : x (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo : água); as massas específicas do cimento (d_c), do agregado miúdo (d_a), do agregado graúdo (d_p) em kg/dm^3 e a absorção de água do agregado miúdo (A_a) e do agregado graúdo (A_p) em % e γ a massa específica do concreto em Kg/dm^3 :

$$Vazios = 100 \cdot \frac{\left[1000 - \left(\frac{C}{d_c} + \frac{C_a}{d_a} + \frac{C_p}{d_p} + \frac{C_{ag}}{1} - \frac{A_a \cdot C_a}{100} - \frac{A_p \cdot C_p}{100} \right) \right]}{1000} \quad (5.1)$$

Onde:

$$C = \frac{\gamma}{1 + a + p + x} \quad \text{Consumo de cimento por m}^3 \text{ de concreto}$$

$$C_a = C \cdot a \quad \text{Consumo de agregado miúdo em kg por m}^3 \text{ de concreto}$$

$$C_p = C \cdot p \quad \text{Consumo de agregado graúdo em kg por m}^3 \text{ de concreto}$$

$$C_{ag} = C \cdot x \quad \text{Consumo de água em kg por m}^3 \text{ de concreto}$$

5.2.3. Exsudação

É uma forma particular de segregação, em que a água da mistura tende a elevar-se à superfície do concreto recentemente lançado. Esse fenômeno é provocado pela impossibilidade dos constituintes sólidos fixarem toda a água da mistura e depende, em grande escala, das propriedades do cimento.

Como resultado da exsudação, o topo de cada camada de concreto pode tornar-se muito úmido e, se a água é impedida de evaporar pela camada que lhe é superposta, poderá resultar numa camada de concreto poroso, fraco e de pouca durabilidade. A exsudação pode causar também:

- Enfraquecimento da aderência pasta-agregado e pasta armadura, em alguns pontos;
- Aumento da permeabilidade;
- Formação de nata de cimento sobre a superfície do concreto que precisará ser removida quando da concretagem de uma nova etapa.

Para minimizar-se a ocorrência deste fenômeno, deve-se tomar os seguintes cuidados:

- Não utilizar agregados miúdos sem uma parcela conveniente de finos;
- Utilizar cimentos de maior finura (Ex: Pozolânicos e de Alto-forno);
- Utilizar aditivos plastificantes.

5.3. PROPRIEDADES NO E ESTADO ENDURECIDO

5.3.1. Massa específica

A massa específica do concreto é um parâmetro que define a carga devido ao peso próprio que a estrutura de concreto estará sujeita, uma vez conhecidas as suas características geométricas. Varia principalmente com o tipo de agregado empregado e teor de armadura.

Como valores usuais costuma-se tomar:

- Concretos não-armados: 2 300kg/m³
- Concretos armados: 2 500 kg/m³

Com a utilização de agregados leves é possível atingir valores da ordem de 1 800kg/m³ e, com agregados pesados, 3 700kg/m³.

5.3.2. Resistência

O concreto é um material que resiste bem aos esforços de compressão e mal aos esforços de tração. Sua resistência à tração é da ordem de um décimo da resistência à compressão. Também resiste mal ao cisalhamento, em virtude de tensões de distensão que então se verificam em planos inclinados.

Os principais fatores que afetam a resistência mecânica são:

5.3.2.1. Relação água/cimento

É o principal fator a ser controlado quando se deseja atingir uma determinada resistência. Diz-se que a resistência do concreto é inversamente proporcional à relação água/cimento.

Esta relação não é linear e pode normalmente ser expressão pela função:

$$f_{cj} = \frac{A}{B^{a/c}} \quad (5.2)$$

Esta expressão é conhecida como "Lei de Abrams". Na realidade, a relação água/cimento determina a resistência do concreto porque o excesso de água nele adicionado para promover uma consistência necessária ao processo de mistura, lançamento e adensamento deixa, após o endurecimento, vazios na pasta de cimento. Quanto maior for o volume de vazios, menor será a resistência do material.

5.3.2.2. Idade

A resistência do concreto progride com a idade. Isto pode ser explicado pelo mecanismo de hidratação do cimento que se processa ao longo do tempo, que torna o material progressivamente menos poroso. Para projetos, costuma-se utilizar a resistência do concreto aos 28 dias como padrão pois, a partir desta idade (para o cimento Portland Comum) o incremento de resistência é muito pequeno. Como estimadores da resistência à compressão, pode-se citar:

- $f_{c28} = 1,20$ a $1,5 f_{c7}$
- $f_{c28} = 1,70$ a $2,50 f_{c3}$
- $f_{c90} = 1,05$ a $1,20 f_{c28}$
- $f_{c365} = 1,10$ a $1,35 f_{c28}$

5.3.2.3. Forma e tamanho dos agregados

Em igualdade de relação água/cimento, diz-se que os concretos confeccionados com seixos tendem a ser menos resistentes do que aqueles confeccionados com pedra britada. Isto pode ser justificado pela menor aderência pasta/agregado. Entretanto, esse efeito só é significativo para concretos de elevada resistência.

A granulometria do agregado graúdo também tem uma influência sobre a resistência do concreto. Concretos executados com britas de menor diâmetro tendem a gerar concretos mais resistentes, mantida a relação água/cimento. Isto se explica pela maior região de interface pasta/agregado além da maior possibilidade dos agregados de maior diâmetro possuírem falhas internas decorrentes do processo de britagem. Entretanto, estas duas assertivas devem ser analisadas com muito cuidado. Tanto concretos executados com seixos ou com britas de maior diâmetro produzem concretos, para uma dada trabalhabilidade, com menor exigência de água baixando, desta forma, a relação água/cimento da mistura. Normalmente este efeito é muito mais significativo que o anterior, principalmente para o caso do diâmetro maior dos agregados, em se tratando de concretos de resistência usual ou baixa (abaixo de 40MPa). Para concretos de alta resistência, esta tendência pode se inverter.

5.3.2.4. Tipo e finura do cimento

Como já foi visto no capítulo 4, a composição química do cimento (proporção de C_3S e C_2S) influencia a evolução de resistência dos concretos. A adição de escórias e pozolanas também tem uma grande influência na resistência (menores resistências

iniciais e maiores resistências finais), bem como a finura (quanto mais fino, maiores são as resistências iniciais do cimento).

5.3.2.5. Forma e dimensões do corpo de prova

O corpo-de-prova para ensaio de resistência à compressão do concreto normalizado no Brasil é o cilíndrico de relação altura/diâmetro igual a 2. O de 15cm de diâmetro por 30cm de altura era o mais empregado até recentemente, mas o de 10cm de diâmetro por 20cm de altura vem ganhando espaço pelo crescente uso de agregados graúdos com dimensão máxima característica limitada a 19mm. Em muitos países europeus, entretanto, o corpo-de-prova normalizado é o cúbico de 10 ou 15cm de aresta.

Com respeito a forma dos corpos-de-prova, pode-se afirmar:

- A resistência obtida em ensaios com cubos de concreto é geralmente mais alta do que aquela obtida em corpos-de-prova cilíndricos ($h/d=2$) (cilindro aproximadamente igual a 80% da resistência do cubo). Essa diferença é causada pelo efeito de confinamento dos pratos das prensas, mais pronunciado para corpos-de-prova com baixa relação altura/área de contato. No caso de concretos de resistência baixa este percentual é mais elevado (<10MPa, esta diferença é quase insignificante).
- Quanto maiores as dimensões do cilindro (mantida a relação $h/d=2$), menores são as resistências obtidas. Isso ocorre por um efeito probabilístico maior de ocorrência de falhas nos corpos-de-prova maiores, lembrando-se que é a propagação das falhas durante o carregamento que gera a ruptura do material.

Outro fator que afeta a resistência dos corpos-de-prova padronizados é a maneira como é produzido e preparado para o ensaio. A norma brasileira prescreve que os corpos-de-prova cilíndricos 10x20cm devem ser moldados em duas camadas de altura similar, adensadas cada uma com 12 golpes com a mesma haste empregada no ensaio de abatimento. Após o adensamento, o topo deve ser regularizado com colher de pedreiro e o corpo de prova deve ser mantido na forma por 24 horas à sombra, com o topo protegido, quando deve ser desmoldado evitando-se choques. Logo após, deve ser colocado em câmara úmida ou submerso em água de cal onde deve permanecer até a data de ensaio. Antes do ensaio de ruptura, os topos devem ser preparados para promover um contato perfeito entre concreto e pratos da prensa. Essa operação, conhecida como capeamento, pode ser feita com pasta fundida de enxofre, pasta de cimento ou placas de neoprene confinadas por anéis metálicos. Para validar qualquer um desses sistemas de capeamento, deve-se previamente comparar os resultados de resistência dos corpos-de-prova obtidos com o sistema de capeamento escolhido com os de corpos-de-prova com topos retificados por polimento (fresados). O uso da própria fresa para o preparo dos topos de corpos-de-prova vem crescendo no país. Entretanto, se o operador não for experiente ou se o disco de desbaste estiver muito desgastado, poderá produzir topos com face sem planicidade o que compromete a resistência medida. Por isso, recomenda-se que, periodicamente, durante o ensaio, seja interposto entre o corpo-de-prova e os pratos da prensa, folhas sulfite e papel carbono para avaliar-se a extensão de contato entre os materiais, que deverá ser plena.

5.3.2.6. Velocidade de aplicação de carga de ensaio

Maiores velocidades tendem a gerar valores de resistência mais elevados. Isto ocorre porque em velocidades mais baixas existe um tempo maior para a propagação de fissuras que ocorrem durante o carregamento, levando assim o corpo-de-prova ao colapso em níveis de carga inferiores. Por isso a velocidade é normalizada. No Brasil é de 0,3 a 0,8 MPa/s (530 a 1410 kgf/s para corpos-de-prova 15x30 e 235 a 630kgf/s para corpos-de-prova 10x20).

5.3.2.7. Duração da carga

Para cargas de curta duração, o concreto resiste maiores níveis de carga. Como o principal carregamento de uma estrutura é o seu peso próprio, que é uma carga permanente, não se podem conceber estruturas submetidas a tensões muito próximas à obtida no ensaio normalizado. A explicação para isto também reside no mecanismo de propagação das fissuras. A partir de 50% da tensão de ruptura, o concreto começa a apresentar um quadro progressivo de fissuração interna. Essa fissuração promove uma redistribuição de tensões e, se o nível de carregamento for mantido, o material se estabiliza estruturalmente sem maiores riscos. Quando o concreto é submetido a tensões próximas de sua ruptura e esta tensão é mantida constante por um longo período de tempo, a propagação das fissuras prossegue, ou seja, o material não consegue mais redistribuir as tensões e se estabilizar estruturalmente. Isso leva a sua ruptura com o tempo, mesmo sem atingir a tensão máxima obtida no ensaio

5.3.3. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade de um concreto é obtido pela razão entre o gradiente de tensão aplicado e o respectivo gradiente de deformação específica. Como o concreto não é um material perfeitamente elástico, na determinação do módulo de elasticidade convencionou-se determinar esses gradientes em dois níveis de tensão pré-definidos: 0,5MPa e 35% da tensão média de ruptura do material. Existem expressões que correlacionam a resistência à compressão do concreto com seu módulo de elasticidade, pois se sabe que são propriedades que caminham em mesma direção. Segundo a NBR 6118/2014, este valor é designado Módulo de Elasticidade Tangente Inicial e, quando não forem realizados ensaios específicos para a sua determinação experimental, pode-se estimá-lo utilizando as expressões abaixo:

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}} \text{ para } f_{ck} \text{ de 20 MPa a 50 MPa;}$$

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3}, \text{ para } f_{ck} \text{ de 55 MPa a 90 MPa.}$$

sendo

$$\alpha_E = 1,2 \text{ para basalto e diabásio}$$

$$\alpha_E = 1,0 \text{ para granito e gnaisse}$$

$$\alpha_E = 0,9 \text{ para calcário}$$

$$\alpha_E = 0,7 \text{ para arenito}$$

onde

$$E_{ci} \text{ e } f_{ck} \text{ são dados em megapascal (MPa).}$$

A importância do conhecimento desse parâmetro tem aumentado muito recentemente, a medida que interfere nas propriedades de deformabilidade das estruturas. Entretanto, a adoção dessas expressões deve ser feita com muita cautela pois o módulo de elasticidade depende também do módulo de elasticidade de seus materiais constituintes e do traço adotado. Por isso, cada vez mais os calculistas têm especificado em seus projetos que o módulo de elasticidade deva ser obtido em ensaios laboratoriais específicos, a partir de amostras do concreto que será efetivamente utilizado na estrutura.

5.3.4. Permeabilidade e absorção

O concreto é um material que, por sua própria constituição, é poroso. As razões da porosidade são:

- É quase sempre necessário utilizar uma quantidade de água superior a que se precisa para hidratar o aglomerante e esta água, ao evaporar, deixa vazios.
- Com a combinação química diminuem os volumes absolutos do cimento e água que entram na reação.
- Inevitavelmente, durante o amassamento do concreto, incorpora-se ar na massa.

A interconecção destes vazios de água ou de ar poderá tornar o concreto permeável. Quando se deseja obter concretos com baixa absorção e permeabilidade, deve-se assim proceder:

- Utilizar baixas relações água/cimento, seja pelo aumento do consumo de cimento, seja pela utilização de aditivos redutores de água (plastificantes, superplastificantes e incorporadores de ar). Deve-se ressaltar que um aumento excessivo no consumo de cimento nos concretos pode gerar fissurações por retração hidráulica e autógena devido à grande quantidade de pasta existente na mistura.
- Substituição parcial do cimento por pozolanas (cinzas volantes, cinza da casca do arroz ou microssilica). Este procedimento promove um preenchimento de vazios capilares do concreto pela reação entre pozolana e hidróxido de cálcio liberado nas reações de hidratação do cimento.
- Utilização de agregados com um teor maior de finos, desde que estes não sejam de natureza argilosa.

5.5. DOSAGEM

5.5.1. Considerações iniciais

Dosagem do concreto é o processo pelo qual se faz a seleção dos componentes adequados, determinando suas quantidades relativas, a fim de ser obtido, da maneira mais econômica possível, um concreto que preencha basicamente os requisitos de trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade.

Conforme o conceito acima, custo é fator de extrema importância na produção de concretos. Como normalmente o cimento é o componente mais caro, busca-se sempre dosar um concreto com o menor consumo de cimento possível, desde que o valor encontrado não interfira negativamente em outras características do concreto. O consumo elevado de cimento, além de responsável pela elevação de custos, pode gerar uma série de problemas, visto ser diretamente proporcional a este parâmetro a ocorrência de fissuras por retração e o desprendimento de elevado calor de hidratação.

Para atingir-se o proporcionamento ideal dos materiais para uma dada aplicação pode-se, segundo a NBR 12655-2014, recorrer basicamente a dois processos: dosagem empírica e dosagem racional e experimental.

A seguir, serão descritos os conceitos principais para uma dosagem racional e experimental, omitindo alguns fatores a fim de simplificar a abordagem do assunto.

5.5.2. Resistência de dosagem

A resistência de dosagem de um concreto é obtida a partir do conhecimento da resistência característica de projeto (fck), das condições do ambiente onde a estrutura de concreto será construída e das condições de preparo do concreto. Normalmente, o que aparece especificado num projeto estrutural é a resistência característica à compressão do concreto (fck) a 28 dias. Este fck representa o valor no qual 95% da ocorrência das resistências estejam acima dele.

De acordo com a NBR 6118/2015, as condições do ambiente são relevantes para garantir-se a integridade (durabilidade) da estrutura ao longo de sua vida útil. Assim sendo, um calculista estrutural não poderá especificar classes de concreto (fck) em desacordo com essa norma. Nos projetos das estruturas correntes, a agressividade ambiental deve ser classificada de acordo com o apresentado na Tabela 5.2, e pode ser avaliada, simplificada, segundo as condições de exposição da estrutura ou de suas partes.

Tabela 5.2: Classes de agressividade ambiental

Classes de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{1), 2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾	Grande
		Industrial ^{1), 2)}	
IV	Muito forte	Industrial ^{1), 3)}	Elevado
		Respingos de maré	

¹⁾Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestidos com argamassa e pintura);

²⁾Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões em clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente;

³⁾Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

De acordo com a classificação de agressividade ambiental, a norma ainda apresenta valores máximos e mínimos de requisitos que a mistura de concreto deve atender (Tabela 5.3).

Tabela 5.3: Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade (Tabela 5.10)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe do concreto (NBR8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
Consumo de cimento por m ³ de concreto kg/m ³	CA e CP	≥ 260	≥ 280	≥ 320	≥ 360

Para se garantir a obtenção de um dado f_{ck} , se trabalha com valores médios (f_{cj}), que são obtidos a partir de expressões que levam em consideração o desvio padrão de resistência da produção do concreto que, por sua vez, é função da qualidade/precisão do proporcionamento dos materiais constituintes. Utiliza-se a expressão:

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65.S_d \quad (5.3)$$

Onde S_d é o desvio-padrão de dosagem. A NBR 12655/2015 prescreve que o desvio padrão a ser adotado pode ser determinado a partir de resultados experimentais obtidos de produção anterior do concreto, desde que as condições e equipamentos dessa produção permaneçam os mesmos. O valor numérico de S_d deve ser obtido a partir de no mínimo 20 resultados consecutivos de resistência obtidos no intervalo de 30 dias, em período imediatamente anterior e que, em nenhum caso, o valor de S_d adotado pode ser menor que 2MPa. Essa forma de determinação de S_d só é aplicável em casos de centrais de concreto ou empresas de pré-moldados que possuam laboratório e/ou rotina de avaliação da resistência à compressão de seus concretos. Quando não se dispõe de série histórica de dados, a NBR 12655-2015 fixa valores para S_d , definidos em função da forma com que o concreto será proporcionado em obra.

Condição A: O cimento e os agregados são medidos em massa, a água de amassamento é medida em massa ou volume com dispositivo dosador e corrigida em função da umidade dos agregados. Essa condição é aplicável a todas as classes de concreto.

$S_d = 4$ MPa

Condição B: O cimento é medido em massa, a água de amassamento é medida em dispositivo dosador e corrigida em função da umidade dos agregados e os agregados medidos em massa combinada com volume (dosados em volume, mas a massa da padiola verificada e corrigida periodicamente através de pesagens realizadas na própria obra). Essa condição é aplicável às classes C10 A C20).

$S_d = 5,5$ MPa

Condição C: O cimento é medido em massa, os agregados são medidos em volume, a água de amassamento é medida em volume e a sua quantidade é corrigida em função da estimativa de umidade dos agregados e determinação da consistência do concreto (abatimento do tronco de cone). Essa condição só é aplicável às classes C10 e C15.

$S_d = 7,0$ MPa

5.5.3. Método ABCP/ACI

O método baseia-se no fato de que cada tipo de agregado graúdo possui um volume de vazios que será preenchido por argamassa. Além disso, deve existir uma parte de argamassa adicional que servirá como lubrificante entre os grãos de agregado graúdo para que se obtenha uma trabalhabilidade adequada. Esta quantidade de argamassa será então, função da quantidade de vazios, do tipo de areia empregado, já que areias mais grossas geram argamassas mais ásperas (menos lubrificantes) e da graduação do agregado graúdo (aqueles de menor tamanho de partícula precisarão de mais argamassa pois terão mais partículas para serem envolvidas).

5.5.3.1. Parâmetros de dosagem

Materiais:

- Tipo, massa específica e nível de resistência aos 28 dias do cimento a ser utilizado;
- Análise granulométrica e massa específica dos agregados disponíveis;
- Massa unitária compactada do agregado graúdo.

Concreto:

- Dimensão máxima característica admissível deve ser:
 - Menor do que 1/4 da menor distância entre faces de formas
 - Menor do que 1/3 da espessura das lajes
 - Menor do que 5/6 do espaçamento das armaduras em camadas horizontais
 - Menor do que 1,2 vezes do menor espaçamento entre camadas na vertical
 - Menor do que 1/3 do diâmetro da tubulação (quando o concreto for bombeado)
- Consistência desejada (Slump);
- Condições de exposição ou finalidade da obra;
- Resistência de dosagem: função da resistência característica, do desvio-padrão do concreto obtido de séries históricas ou condição de preparo do concreto na obra.

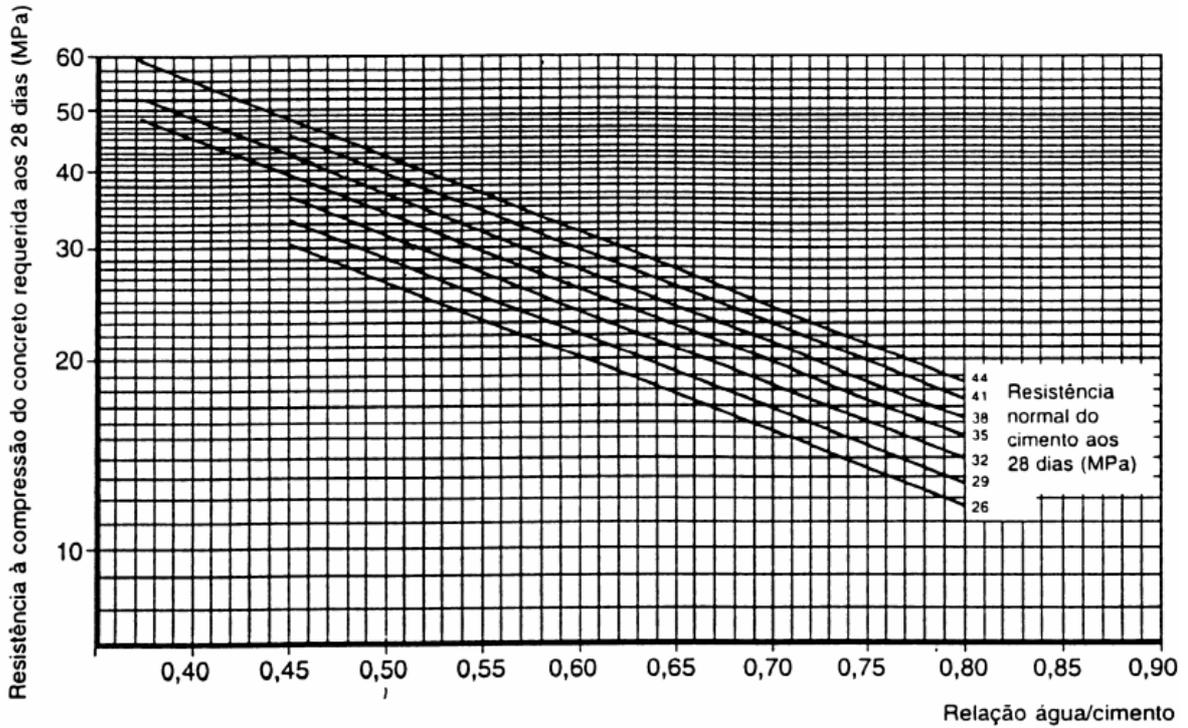
5.5.3.2. Procedimentos

a) Fixação da relação água/cimento:

Este parâmetro será determinado através de um gráfico (Figura 5.3), em função da resistência de dosagem (f_{cj}) determinada conforme a equação 5.3. Se o valor de f_{ck} for inferior ao definido pela classe mínima do concreto estabelecida por critérios de durabilidade (Tabela 5.3), o valor de f_{ck} deverá ser tomado como o dessa classe. Na prática, f_{ck} adotado será o maior dos dois valores (f_{ck} função da resistência característica definida no projeto estrutural ou a correspondente à classe definida por durabilidade). Se o valor de a/c obtido no gráfico for superior aos limites estabelecidos na Tabela 5.3, deve-se adotar este valor limite como a/c para continuidade dos cálculos.

No caso de não se dispor da resistência do cimento, deve-se buscá-lo junto ao fabricante ou utilizar o valor correspondente a sua especificação (Ex: CP I-S 32 - entrar na curva correspondente a resistência 32 MPa). Essa última alternativa geralmente conduz a dosagens muito conservadoras.

Figura 5.3: Gráfico para a determinação da relação a/c em função de f_{cj} a 28 dias



b) Determinação do consumo de água do concreto (C_{ag}):

Será feito em função da consistência e da dimensão máxima característica do agregado (Tabela 5.4):

Tabela 5.4: Consumo de água (C_{ag}) aproximado (L/m³)

Abatimento do Tronco de cone (mm)	Dimensão máxima característica do agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

c) Determinação do consumo de cimento (C):

$$C = \frac{C_{ag}}{a/c} \quad (5.4)$$

d) Determinação do consumo de agregado graúdo (C_b):

$$C_b = V_c \cdot M_c \quad (5.5)$$

Onde:

C_b = consumo de agregado graúdo (por m³ de concreto);

V_c = volume compactado seco do agregado graúdo/m³ de concreto (Tabela 5.5);

M_c = massa unitária compactada do agregado graúdo.

Tabela 5.5: Volume compactado seco (V_c) do agregado graúdo/m³ de concreto

MF	Dimensão máxima Característica (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Quando se utiliza mais de um tipo de agregado graúdo, o C_b pode ser dividido da seguinte forma:

Tabela 5.6: Proporcionamento sugerido dos agregados graúdos

Agregados Utilizados ($D_{máx}$ em mm)	Proporção (%)
9,5 - 19,0	30 - 70
19,0 - 25,0	50 - 50
25,0 - 38,0	50 - 50
38,0 - 50,0	50 - 50

Obs:

- No caso de concreto bombeado, a mistura 19,0 - 25,0 pode assumir a proporção 70% - 30% e a mistura 9,5 - 19 a proporção 30%-70%.
- Quando se deseja uma otimização melhor do proporcionamento, deve-se estudar outras proporções e determinar a massa unitária compactada (M_c). A solução escolhida deverá ser aquela que conduza ao menor volume de vazios intergranulares (se os agregados da mistura possuírem a mesma massa específica, o problema se resume a determinar a proporção que conduza à maior M_c).

e) Determinação do consumo de agregado miúdo (C_m):

$$C_m = \left[1 - \left(\frac{C}{d_c} + \frac{C_b}{d_b} + \frac{C_{ag}}{d_{ag}} \right) \right] \cdot d_m \quad (5.6)$$

Onde:

C = Consumo de cimento;

C_b = Consumo de agregado graúdo;

C_{ag} = Consumo de água;

d_c = densidade do cimento;
 d_b = densidade do agregado graúdo;
 d_m = densidade do agregado miúdo;
 d_{ag} = densidade da água

f) Traço calculado

$$1 : \frac{C_m}{C} : \frac{C_b}{C} : \frac{C_{ag}}{C} \quad (5.7)$$

Observação final:

Este traço terá que ser testado em laboratório e, quando necessárias, serão feitas as devidas correções (teor de argamassa, relação água/materiais secos), sempre mantendo a relação água/cimento constante.

Para tal, prepara-se uma mistura com pequeno volume (20 litros, por exemplo) e avalia-se, por meio do ensaio de abatimento do concreto (slump teste), sua consistência, sua textura superficial (presença de agregados graúdos na superfície lateral) e sua coesão, procedendo-se as modificações necessárias. Com o concreto corrigido, moldam-se corpos-de-prova para determinação da resistência à compressão a 28 dias.

Esse procedimento garantirá a obtenção de um concreto com uma trabalhabilidade adequada mas não a obtenção da resistência de dosagem pré-estabelecida pois a relação água/cimento empregada foi obtida a partir de um ábaco genérico e, na maioria dos casos, precisará também ser ajustada.

5.5.4. Exercício

Pretende-se dosar um concreto para ser utilizado na estrutura (revestida) de um edifício residencial. O transporte será feito por caçambas e o concreto deve apresentar as seguintes características:

$f_{cj} = 26,5$ MPa

$D_{m\acute{a}x} = 25,0$ mm

Abatimento = 60 mm

Resistência normal do cimento a 28 dias: 35MPa

Os materiais disponíveis são:

Materiais	MF	d (kg/dm ³)	δ (kg/dm ³)	Resist. Normal (MPa)
Cimento		3,10		35
Areia	2,6	2,63	1,48	
Brita 19 mm		2,65	1,32	
Brita 25 mm		2,65	1,31	

Obs.: Massa unitária compactada da mistura das duas britas (50% - 50%) - 1,50 kg/dm³

Solução:

a) Fixação da relação água/cimento:

Como não existem problemas de durabilidade (estrutura revestida em ambiente não agressivo- Classe I, Tabela 5.3), o critério de fixação da relação a/c será o da resistência, pois:

$$f_{cj} = 26,5 \text{ MPa}$$

$$\text{Resist. Normal do cimento} = 35 \text{ MPa}$$

$$\text{Através do gráfico da Figura 5.3} \Rightarrow a/c = 0,59 < 0,65 \text{ (Exigência da Tabela 5.3)}$$

b) Determinação do consumo de água (C_{ag}):

Como:

$$\text{Abatimento} = 60 \text{ mm}$$

$$D_{\text{máx}} = 25 \text{ mm}$$

$$\text{Da Tabela 5.9} \Rightarrow \mathbf{C_{ag} = 190 \text{ L/m}^3}$$

c) Consumo de cimento (C):

$$C = C_{ag} / a/c \Rightarrow \mathbf{C = 322 \text{ kg/m}^3}$$

d) Determinação do consumo de agregado graúdo (C_b):

Da Tabela 5.5, sabendo-se que MF da areia = 2,6 e $D_{\text{máx}}$ da mistura das britas = 25mm
 $V_c = 0,715 \text{ m}^3$

Utilizando a expressão: $C_b = V_c \cdot \mu$

$$C_b = 0,715 \cdot 1500 \Rightarrow \mathbf{C_b = 1070 \text{ kg/m}^3}$$

e) Determinação do consumo de areia (C_m):

Através da expressão:

$$C_m = [1 - (C / d_c + C_b / d_b + C_{ag} / d_{ag})] \cdot d_m$$

$$C_m = [1 - (322 / 3100 + 1070 / 2650 + 190 / 1000)] \cdot 2630$$

$$\mathbf{C_m = 795 \text{ kg/m}^3}$$

f) Apresentação do traço:

$$1 : C_m/c : C_b/c : C_{ag}/c$$

$$1 : 795 / 322 : 1070 / 322 : 190 / 322$$

$$\mathbf{1 : 2,47 : 3,32 : 0,59 \Rightarrow 1 : 2,47 : 1,66 : 0,59}$$

Esse traço ainda é considerado piloto e deve ser previamente testado em laboratório para comprovação da trabalhabilidade e resistência conforme procedimento a seguir:

a) Cálculo de uma mistura piloto de aproximadamente 20 litros:

Por regra de 3:

Cimento (kg)	Concreto (litros)
322 -----	1000
X -----	20

X= 6,44kg

Cimento: 6,44 kg
Areia: $6,44 \times 2,47 = 15,91$ kg
Brita 19mm: $6,44 \times 1,66 = 10,69$ kg
Brita 25mm: $6,44 \times 1,66 = 10,69$ kg
Água: $6,44 \times 0,59 = 3,80$ kg

Obs.: Se a areia estiver úmida no momento do estudo, corrigir a quantidade de areia e de água a ser colocada na betoneira:

$m_h = m_s \cdot (h+100)/100$
Água final = Água calculada – ($m_h - m_s$)

b) Proporcionamento da mistura:

Inicialmente a betoneira deve ser inicialmente imprimada (colocar na betoneira uma pequena quantidade de material com mesmo traço que o calculado, misturar inclinando a cuba da betoneira até que toda a superfície interna fique “suja” com argamassa e descartar o concreto) para que, durante o processo de avaliação da consistência e teor de argamassa, parte da argamassa do concreto não seja perdida para a superfície do equipamento.

Após o descarte deste material, adiciona-se o material previamente pesado, segundo a seguinte ordem:

- 80% da água;
- 100% do agregado graúdo;
- 100% do cimento;
- 100% do agregado miúdo;
- aditivo plastificante no teor definido (se for especificado o uso)
- Restante da água aos poucos.

Após a mistura de 3 a 5 minutos, deve ser realizado o ensaio de abatimento e verificada se a consistência e coesão e aspecto superficial do concreto estão conforme o esperado. Caso não estejam, corrigir a mistura com a introdução de pequenas porções de material (areia, brita, cimento e água) previamente pesadas até que a mistura fique trabalhável, mantendo-se inalterada a relação água/cimento.

Como por exemplo, se a mistura calculada anteriormente tivesse apresentado um abatimento de 4cm (muito seca) e britas aflorando na superfície (falta de argamassa) a correção deveria se dar na seguinte ordem:

- areia e água até que a superfície fique compacta e o concreto coeso e o abatimento um pouco acima da faixa desejada (Ex: areia= 2kg; água= 0,5kg)
- cimento em quantidade tal que a relação a/c fique mantida= $0,5/0,59 = 0,85$ kg. Além do cimento, dever-se-ia adicionar, se fosse o caso, o teor respectivo de aditivo plastificante: teor recomendado(%) de 0,85kg. A adição desse cimento faria com que o abatimento caísse um pouco e se enquadrasse na faixa desejada.

c) Cálculo do traço final corrigido:

Totalizando a soma dos materiais inicialmente colocados na betoneira com as adições feitas para a sua correção de trabalhabilidade:

Cimento: $6,44+0,85 = 7,29\text{kg}$

Areia: $15,91+2 = 17,91\text{kg}$

Brita 19mm: $10,69+0 = 10,69\text{kg}$

Brita 25mm: $10,69+0 = 10,69\text{kg}$

Água: $3,80+0,5 = 4,3 \text{ kg}$

O traço final corrigido seria obtido dividindo-se todas as quantidades de material calculadas pela massa de cimento (7,29kg):

1 : 2,46 : 1,47 : 1,47 : 0,59

6. REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2015.

ABNT. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2014.

ABNT. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação.** Rio de Janeiro, 2009.

ABNT. **NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.

ABNT. **NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

ABNT. **NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2009.

ABNT. **NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 1998.

ABNT. **NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

ASTM. C 33: Standard Specification for Concrete Aggregates. Pensilvania, Estados Unidos. 2013

PRUDÊNCIO JÚNIOR, L. R. **Apostila de Materiais de Construção I.** Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2016.