

CONTROLE TECNOLÓGICO BÁSICO DO CONCRETO



Autor: Rodrigo Piernas Andolfato

SUMÁRIO

1. CONCEITUAÇÃO GERAL.....	1
1.1. CONCRETO.....	1
1.2. CONCRETO ARMADO	1
1.3. DURABILIDADE DO CONCRETO	1
1.4. DURABILIDADE DO CONCRETO ARMADO.....	1
1.5. SENTIDO ECONÔMICO DO CONCRETO ARMADO.....	2
1.6. FISSURAÇÃO DO CONCRETO ARMADO	2
1.7. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO CONCRETO ARMADO.....	2
2. CONSTITUIÇÃO DO CONCRETO.....	4
2.1. ELEMENTOS CONSTITUINTES DO CONCRETO	4
2.2. CIMENTO	5
2.2.1. <i>Tipos de cimento</i>	5
2.2.2. <i>Cimentos portland</i>	5
2.2.3. <i>Cimentos portland modificados</i>	8
2.3. AGREGADOS	8
2.3.1. <i>Propriedades gerais</i>	8
2.3.2. <i>Agregados miúdos</i>	9
2.3.3. <i>Agregado graúdo</i>	10
2.3.4. <i>Água</i>	10
2.3.5. <i>Aditivos</i>	10
3. PROPRIEDADES DO CONCRETO.....	11
3.1. PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO	11
3.1.1. <i>Preparação do concreto</i>	11
3.1.2. <i>Consistência do concreto fresco</i>	11
3.1.3. <i>Transporte e colocação do concreto</i>	12
3.2. PROPRIEDADES DO CONCRETO NORMAL ENDURECIDO	12
3.2.1. <i>Introdução</i>	12
3.2.2. <i>Cura do concreto</i>	13
3.2.3. <i>Resistência à compressão simples do concreto</i>	14
4. DOSAGEM DO CONCRETO NORMAL.....	20
4.1. INTRODUÇÃO	20
4.1.1. <i>Finalidade da dosagem</i>	20
4.1.2. <i>Resistência da dosagem</i>	20
4.1.3. <i>Processos de dosagem</i>	21
4.1.4. <i>Concreto de granulometria contínua</i>	21

4.2.	DOSAGEM DE CONCRETOS COM GRANULOMETRIA CONTÍNUA	22
4.2.1.	<i>Cálculo do traço em peso</i>	22
4.2.2.	<i>Cálculo do traço em volume</i>	27
4.2.3.	<i>Dosagem de concretos com agregados de granulometria descontínua</i>	28
5.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

1. CONCEITUAÇÃO GERAL

1.1. Concreto

Denomina-se **concreto** um material formado pela mistura de cimento, água, agregado graúdo (brita ou cascalho) e agregado miúdo (areia). O concreto fresco tem consistência plástica, podendo ser moldado, na forma e dimensões desejadas, bastando lançar a massa fresca no interior de fôrmas de madeira ou outro material adequado.

O concreto endurecido tem elevada resistência à compressão, mas baixa resistência à tração.

1.2. Concreto Armado

Denomina-se **concreto armado** o material misto obtido pela colocação de barras de aço no interior do concreto. As armaduras são posicionadas, no interior da fôrma, antes do lançamento do concreto plástico. Este envolve as barras de aço, obtendo-se, após o endurecimento uma peça de concreto armado.

1.3. Durabilidade do Concreto

O concreto é um material bastante estável quando bem executado. Quando exposto às intempéries, sua resistência mecânica cresce lentamente com o tempo.

1.4. Durabilidade do Concreto Armado

As barras de aço, colocadas no interior do concreto, são protegidas contra a corrosão pelo fato de o concreto ser um meio alcalino. A experiência mostra que essa proteção persiste, mesmo quando o concreto apresenta uma fissuração moderada. Graças a esta propriedade, as

estruturas de concreto armado têm, em geral, uma grande durabilidade, quando expostas ao meio ambiente.

1.5. Sentido Econômico do Concreto Armado

Os materiais que entram na constituição do concreto são abundantes em quase todas as partes do globo terrestre, o que torna o concreto universalmente econômico.

Os minérios de ferro existem também com abundância na terra, resultando ser o aço um dos materiais mais importantes da indústria. O aço é disponível mundialmente a preços competitivos.

Sendo o concreto armado produto da associação de dois materiais econômicos, não surpreende sua extraordinária importância nas construções modernas. O concreto armado é vastamente utilizado em estruturas de edifícios, pontes, estradas, obras marítimas, barragens, etc.

1.6. Fissuração do Concreto Armado

A fissuração do concreto armado pode ser devida a duas causas principais:

- a) Retração acelerada do concreto, quando se permite rápida evaporação da água da mistura;
- b) Tensões de tração produzidas por solicitações atuantes.

As fissuras do concreto armado têm três efeitos prejudiciais:

- a) São pouco estéticas;
- b) Produzem uma sensação de insegurança;
- c) Permitem o acesso de ar e água junto às armaduras, reduzindo o grau de proteção das mesmas contra oxidação.

1.7. Vantagens e Desvantagens do Concreto Armado

O concreto armado apresenta, como material de construção, grande número de vantagens:

- a) Materiais econômicos e disponíveis com abundância no globo terrestre;
- b) Grande facilidade de moldagem, permitindo adoção das mais variadas formas;

- c) Emprego extensivo de mão-de-obra não qualificada e equipamentos simples;
- d) Elevada resistência à ação do fogo;
- e) Elevada resistência ao desgaste mecânico;
- f) Grande estabilidade, sob ação de intempéries, dispensando trabalhos de manutenção;
- g) Aumento da resistência à ruptura com o tempo;
- h) Facilidade e economia na construção de estruturas contínuas, sem juntas.

Uma das principais desvantagens do concreto armado é sua massa específica elevada ($2,5 \text{ t/m}^3$). Em obras com grandes vãos, as solicitações de peso próprio se tornam excessivas, resultando numa limitação prática dos vãos das vigas em concreto armado a valores de 30m a 40m .

2. CONSTITUIÇÃO DO CONCRETO

2.1. Elementos constituintes do concreto

Os concretos, de emprego usual nas estruturas, são constituídos de quatro materiais: cimento portland, água, agregado fino e agregado graúdo.

O cimento e a água formam a *pasta*, que enche a maior parte dos espaços vazios entre os agregados. Algum tempo depois de misturado o concreto, a pasta endurece, formando um material sólido.

Os agregados são considerados materiais inertes, enquanto a pasta (cimento + água) constitui o material ligante que junta as partículas dos agregados em uma massa sólida.

As propriedades ligantes da pasta são produzidas por reações químicas entre o cimento e a água. A quantidade de água necessária para a reação é pequena, porém se usa uma quantidade superior para obter *trabalhabilidade*, permitindo também a inclusão de maior quantidade de agregado.

Entretanto, a adição de água diminui a resistência da pasta, sendo necessário empregar uma proporção adequada entre as quantidades de água e cimento para se obter um concreto satisfatório.

Os agregados constituem cerca de 60% a 80% do concreto, o que tem sentido econômico, pois o agregado é mais barato que a pasta.

Como os agregados constituem uma porcentagem elevada do concreto, a sua escolha tem grande importância. Os agregados devem atender a três condições:

- a) Serem estáveis nas condições de exposição do concreto, não contendo materiais com efeitos prejudiciais;
- b) Apresentarem resistência à compressão e ao desgaste;
- c) Serem graduados, de modo a reduzir o volume da pasta, que deve encher os espaços entre os agregados.

Além dos elementos indicados acima, o concreto contém 1% a 2% de ar, que fica preso durante a mistura. Em alguns casos especiais, é possível incorporar no concreto até 8% de ar, em forma de micro bolhas.

Freqüentemente, na confecção de concretos, utilizam-se *aditivos* que permitem reduzir a quantidade de água ou controlar o tempo de pega.

2.2. Cimento

2.2.1. Tipos de cimento

Denomina-se, geralmente, por cimento qualquer material capaz de ligar os agregados, formando um corpo sólido.

2.2.2. Cimentos portland

Os cimentos portland são cimentos hidráulicos produzidos pela pulverização de clínquer formado essencialmente por silicatos de cálcio hidratados, com adição de sulfatos de cálcio e outros compostos.

O cimento portland é fabricado nas etapas seguintes:

- a) Mistura e moagem de materiais calcários e argilosos, nas proporções adequadas (a mistura pode ser seca ou com água);
- b) Tratamento térmico da mistura, em fornos rotativos, até a formação de um material vitrificado, denominado clínquer (1400°C a 1550°C);
- c) Moagem do clínquer com 4% a 6% de gesso.

Variando-se a composição do cimento é possível obter diversos tipos, com diferentes características quanto ao tempo de pega, calor de hidratação, resistência mecânica, resistência a sulfatos, etc.

As especificações americanas ASTM¹ C 150 distinguem cinco tipos de cimento portland, cujas composições e principais propriedades são apresentadas na Tabela 1.

¹ American Society for Testing Materials

Tabela 1 - Tipos de cimento portland (ASTM C 150).

TIPO	CARACTERÍSTICA PREDOMINANTE	COMPOSIÇÃO (%)				RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (EM RELAÇÃO À RESISTÊNCIA DO CIMENTO TIPO I)			
		1	2	3	4	1 DIA	7 DIAS	28 DIAS	3 MESES
I	Tipo de uso corrente	50	24	11	8	1	1	1	1
II	Moderado calor de hidratação / Moderada resistência a sulfatos	42	33	5	13	0,75	0,85	0,90	1
III	Elevada resistência inicial	60	13	9	8	1,90	1,20	1,10	1
IV	Baixo calor de hidratação	26	50	5	12	0,55	0,55	0,75	1
V	Elevada resistência a sulfato	40	40	4	9	0,65	0,75	0,85	1

1 - $(CaO)_3(SiO_2)$ Silicato tricálcio; 2 - $(CaO)_2(SiO_2)$ Silicato dicálcio;

3 - $(CaO)_3(Al_2O_3)$ Aluminato tricálcio; 4 - $(CaO)_4(Al_2O_3)(Fe_2O_3)$

Os cimentos são moídos em pó muito fino, não sendo possível determinar sua composição granulométrica por meio de peneiras. O grau de finura é medido em aparelhos de permeabilidade do ar, do tipo denominado *Blaine*, exprimindo-se pela “superfície específica”, que é a superfície total de todas as partículas contidas em um grama de cimento. A superfície específica média (comumente chamada de Blaine por ser o nome do ensaio que a determina) dos cimentos é cerca de $2600\text{ cm}^2/\text{g}$, com exceção do cimento tipo III, o qual é moído com maior finura, obtendo-se Blaine da ordem de $3000\text{ cm}^2/\text{g}$.

O aumento da finura produz maior velocidade de hidratação, resultando em maior resistência inicial e conseqüentemente maior geração de calor.

Os dois silicatos de cálcio $(CaO)_3(SiO_2)$ e $(CaO)_2(SiO_2)$, constituem a maior parte do cimento, cerca de 75%, sendo os principais responsáveis pelas suas propriedades cimentícias.

É apresentado no Figura 1 a variação das resistências com o tempo de concretos feitos com os cinco tipos de cimento das especificações americanas ASTM. A resistência do concreto com cimento usual, tipo I, foi tomada igual a $300\text{ kgf}/\text{cm}^2$, na idade de 28 dias, o traço utilizado para a consecução dos corpos-de-prova foi de 335kg de cimento por metro cúbico.

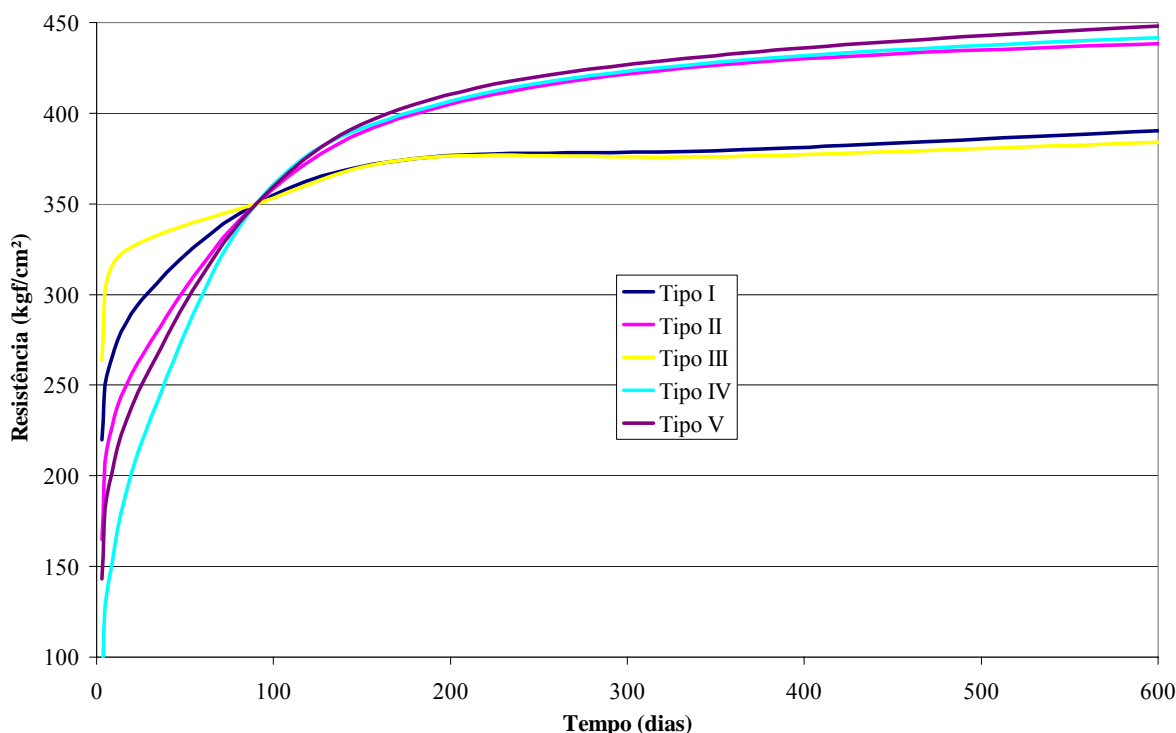


Figura 1 - Gráfico da relação entre ganho de resistência e tempo de cura.

Os ensaios de controle da qualidade do cimento portland acham-se padronizados na Norma NBR-7215 de dezembro de 1996, onde as resistências médias a compressão de seis corpos de prova de argamassa normal de cimento e areia, na proporção de 1:3 em peso, devem atender aos valores especificados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resistências médias á compressão da argamassa normal.

TIPO DE CIMENTO	IDADE (DIAS)			
	1	3	7	28
Cimento Portland Comum (CPC) tipo 25	-	8	15	25
tipo 32	-	10	20	32
tipo 40	-	14	24	40
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPARI)	10	22	31	-

Denomina-se *argamassa normal* por uma argamassa feita com o cimento estudado e uma areia padrão de laboratório, na proporção de 1:3 em peso com fator água / cimento de 0,5. Para este ensaio são usados corpos-de-prova cilíndricos de 5cm de diâmetro por 10cm de altura.

2.2.3. Cimentos portland modificados

Os cimentos portland podem ser fabricados com diversas alterações, a fim de se obter um comportamento especial. Dentro os cimentos portland modificados podem-se citar os cimentos portland com pozzolana e de alto-forno.

Os *cimento portland com pozzolana* são cimentos comuns adicionados de pozzolana, na proporção de 10% a 40% da mistura.

Os cimentos pozzolânicos apresentam as seguintes propriedades:

- a) Pequena velocidade na liberação de calor de hidratação;
- b) Elevada resistência a águas sulfatadas e ácidas.

Os *cimentos de alto-forno* são obtidos misturando-se, ao clínquer, escória de alto-forno granulada, na proporção de 25% a 65% do peso de cimento. As propriedades dos cimentos de alto-forno são semelhantes às dos cimentos pozzolânicos.

2.3. Agregados

2.3.1. Propriedades gerais

Os agregados constituem uma elevada porcentagem do concreto (cerca de 75%), de modo que as suas características têm importância nas proporções empregadas e na economia do concreto.

Os agregados em geral devem ser formados por partículas duras e resistentes, isentas de produtos deletérios, tais como: argila, mica, silte, sais, matéria orgânica e outros.

A composição granulométrica dos agregados é determinada em ensaios padronizados de peneiração. As curvas granulométricas devem ficar dentro de certos limites, fixados nas especificações, de modo que os agregados misturados apresentem um bom entrosamento, com pequeno volume de espaço vazio entre suas partículas. Esse bom entrosamento resulta em economia de pasta de cimento, que é o material mais caro do concreto.

Denomina-se porcentagem acumulada em uma dada peneira a porcentagem das partículas de agregado maiores que a abertura dessa peneira. A composição granulométrica é representada em uma curva tendo como abscissa as aberturas das peneiras e como ordenadas as respectivas porcentagens acumuladas.

2.3.2. Agregados miúdos

As areias são divididas em grossas, médias, finas e muito finas, conforme o valor do seu *módulo de finura*, que é a soma das porcentagens retidas acumuladas, nas peneiras da *série normal*, dividida por 100.

- a) Areia grossa – módulo de finura entre 3,35 e 4,05;
- b) Areia média – módulo de finura entre 2,40 e 3,35;
- c) Areia fina – módulo de finura entre 1,97 e 2,40;
- d) Areia muito fina – módulo de finura menor que 1,97.

Os valores acima são indicados pela Norma NBR-7211 de maio de 1983, com valores aproximados. Esta ainda define todos as características obrigatórias para os agregados de concreto.

A areia ótima para o concreto armado apresenta módulo de finura entre 3,35 e 4,05, porém a faixa entre 2,4 e 3,35 é considerada utilizável. A faixa ótima está contida entre as linhas verde e amarela da Figura 2 e a faixa utilizável entre as linhas vermelha e amarela.

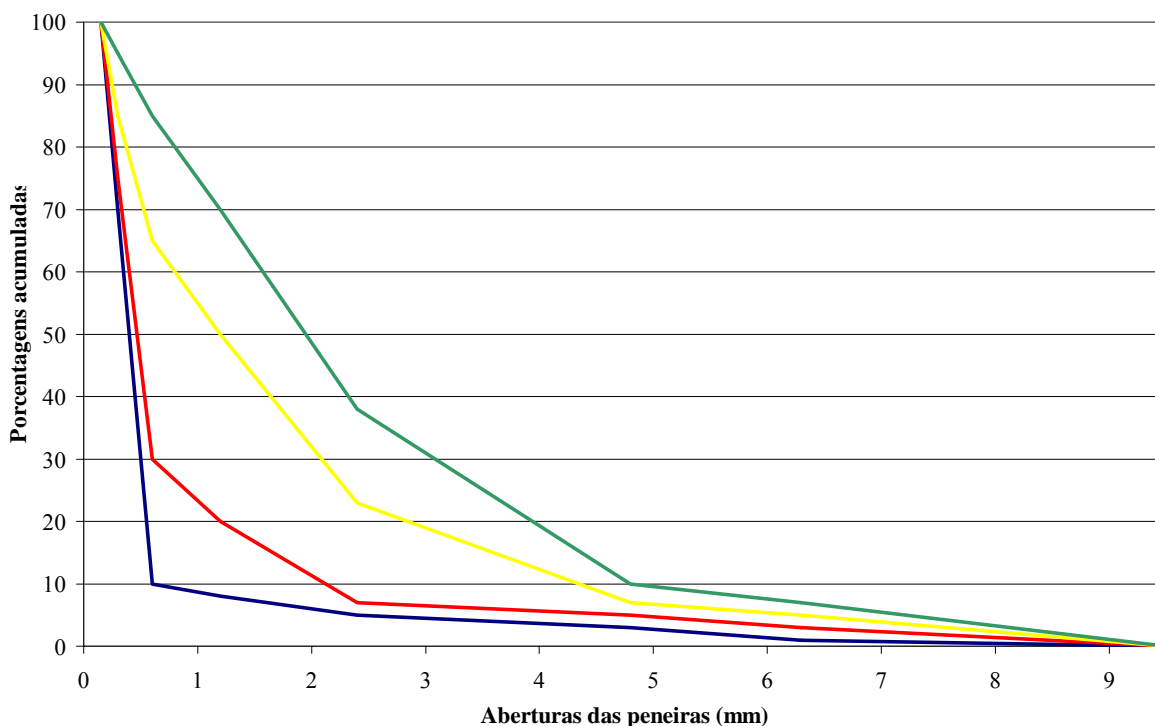


Figura 2 - Gráfico das faixas granulométricas das areias.

2.3.3. Agregado graúdo

Os agregados graúdos são classificados conforme os tamanhos das partículas componentes (diâmetros mínimos e máximos), a saber:

- a) Brita 0 → 4,8 a 9,5mm;
- b) Brita 1 → 9,5 a 19mm;
- c) Brita 2 → 19 a 25mm;
- d) Brita 3 → 25 a 50mm;
- e) Brita 4 → 50 a 76mm;
- f) Brita 5 → 76 a 100mm;

Os tamanhos mais utilizados em concreto armado comum são a brita 1 ou uma mistura de britas 1 e 2.

2.3.4. Água

A água utilizada na confecção do concreto deve ser, de preferência, potável, não devendo conter resíduos industriais ou substâncias orgânicas. A experiência mostra que diversos sais minerais não prejudicam o concreto, quando dissolvidos em concentrações toleráveis.

2.3.5. Aditivos

Denominam-se aditivos os materiais adicionados aos ingredientes normais do concreto, durante a mistura, para obter propriedades desejáveis, tais como: aumento da plasticidade, controle do tempo de pega, controle do aumento da resistência, redução do calor de hidratação, etc.

Os aditivos plastificantes têm efeitos benéficos, pois permitem reduzir a quantidade de água necessária para se obter a plastificação desejada.

Os aditivos para concreto são em geral explorados comercialmente por fabricantes especializados, cujos catálogos contêm informações pormenorizadas sobre seu melhor emprego.

3. PROPRIEDADES DO CONCRETO

3.1. Propriedades do Concreto Fresco

3.1.1. Preparação do concreto

O concreto fresco é preparado pela mistura manual ou mecânica dos componentes. A mistura manual só é utilizada em obras muito pequenas. Geralmente o concreto é misturado em máquinas com tambor rotativo, denominadas betoneiras.

3.1.2. Consistência do concreto fresco

A *consistência* do concreto fresco é uma propriedade relacionada com o estado de fluidez da mistura. A consistência adequada é fundamental para garantir a *trabalhabilidade* do concreto, ou seja, a facilidade com que o concreto pode ser colocado num certo tipo de fôrma, sem segregação.

A consistência do concreto é geralmente medida no ensaio de abatimento (*slump test*). O concreto fresco é compactado no interior de uma fôrma tronco-cônica, com altura de 30cm. Retirando-se a fôrma, por cima do concreto, este sofre um abatimento, cuja medida em centímetros é usada como valor comparativo da consistência.

A consistência e a trabalhabilidade dependem da composição do concreto, e, em particular, da quantidade de água, da granulometria dos agregados, da presença de aditivos, etc.

A dosagem do concreto deve levar em conta a consistência necessária para as condições da obra. Peças finas e fortemente armadas necessitam misturas mais fluidas que peças de grande largura e com pouca armação.

A Tabela 3 apresenta a classificação do concreto segundo o valor em centímetros do abatimento no *slump test*.

Tabela 3 - Classificação das consistências do concreto.

CONSISTÊNCIA	ABATIMENTO (cm)
Seca	0 a 2
Firme	2 a 5
Média	5 a 12
Mole	12 a 18
Fluida	18 a 25

Para evitar misturas com consistência seca ou muito fluida. Recomendam-se as faixas de abatimento apresentadas na Tabela 4, para as obras mais correntes.

Tabela 4 - Classificação das consistências do concreto.

TIPOS DE CONSTRUÇÃO	ABATIMENTO (cm)
Fundações, tubulões, paredes grossas	3 a 10
Vigas, lajes, paredes finas	5 a 10
Pavimentos	3 a 5
Obras maciças	2 a 5

3.1.3. Transporte e colocação do concreto

Após a sua fabricação na betoneira, o concreto deve ser transportado e colocado nas fôrmas. O transporte e a colocação do concreto devem obedecer a uma série de requisitos, de modo que o material não perca sua plasticidade, nem sofra segregação de seus componentes.

A compactação do concreto nas fôrmas é feita com auxílio de vibradores. A vibração é essencial para se obter um concreto resistente e durável.

3.2. Propriedades do Concreto Normal Endurecido

3.2.1. Introdução

Para se obter um concreto de boa qualidade, é necessário:

- a) Empregar materiais de boa qualidade;
- b) Dosar os materiais em proporções adequadas;

- c) Colocar o concreto nas fôrmas sem provocar segregação dos componentes, compactando o concreto por meio de vibração.

As propriedades do concreto endurecido dependem dos cuidados enumerados acima, e ainda das condições de cura do concreto.

Neste item 3.2 são estudados os concretos normais, isto é, os concretos executados com agregados usuais. O peso específico do concreto normal é de $2,4 \frac{t}{m^3}$ (toneladas por metro cúbico).

3.2.2. Cura do concreto

A cura do concreto tem por finalidade impedir a evaporação da água empregada no traço, durante o período inicial de hidratação.

As Figura 3 apresenta uma relação porcentual entre as resistências à compressão de corpos-de-prova cilíndricos em determinados períodos de tempo com relação ao f_{c28} de corpos-de-prova curados em câmara úmida.

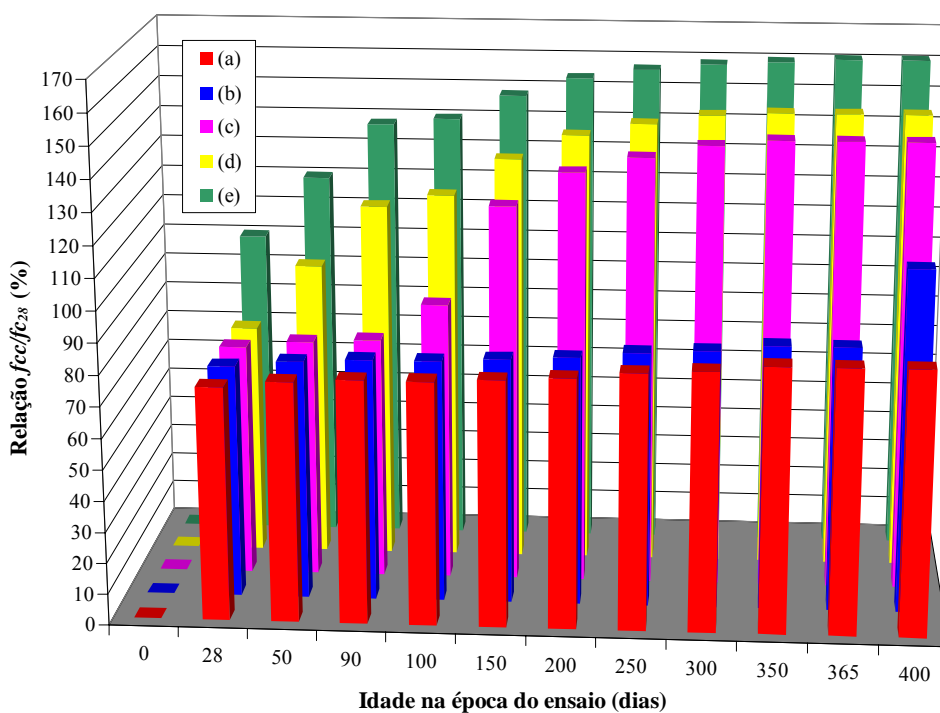


Figura 3 - Relação entre a resistência em determinado tempo com relação ao f_{c28} curado em câmara úmida.

O traço (a) foi o corpo-de-prova exposto ao ar o tempo todo, sem, por nenhum momento ter sido curado. Este apresentou acréscimo de resistência ao longo do tempo, porém não conseguiu atingir a resistência f_{c28} do traço (e) curado, nem depois de um longo período de tempo.

O traço (b) é semelhante ao traço (a), contudo, após um ano este foi curado e apresentou ganho de resistência, o que prova que mesmo após um longo período de tempo o concreto ainda ganha alguma resistência se for efetuada uma cura.

O traço (c) foi curado após 3 meses somente exposto ao ar, apresentando uma recuperação do ganho de resistência.

O traço (d) foi curado somente após os primeiros 28 dias expostos ao ar, apresentando também um ganho de resistência ao longo do tempo, porém atingindo resistência f_{c28} somente aos 60 dias.

O traço (e) foi curado em câmara úmida o tempo todo, sendo importante notar que esta cura fomentou a este concreto um acréscimo de 60% na resistência f_{c28} após um ano.

3.2.3. Resistência à compressão simples do concreto

A resistência à compressão simples é a propriedade mecânica mais importante do concreto, não só porque o concreto trabalha predominantemente à compressão, como também, porque fornece outros parâmetros físicos que podem ser relacionadas empiricamente à resistência à compressão.

Corpos-de-prova

Geralmente, a resistência à compressão simples é medida em corpos-de-prova cilíndricos padronizados, de 15cm de diâmetro por 30cm de altura, curados em câmara úmida à 20°C, e ensaiados com a idade de 28 dias. O ensaio é do tipo rápido, com elevação de tensão

de $0,1 \text{MPa}/s$ que é igual à $1 \frac{\text{kgf}/\text{cm}^2}{s}$.

Assim sendo, um corpo-de-prova de 15cm de diâmetro que apresenta área igual à $176,7 \text{cm}^2$, deve apresentar um carregamento de aproximadamente $176,7 \text{kgf}/s$. Como algumas prensas são manuais e graduadas em toneladas, esta velocidade de carregamento pode ser expressa em toneladas por minutos, que seria igual à aproximadamente $10 \text{tf}/\text{min}$.

Evolução da resistência à compressão do concreto, com o tempo

A evolução da resistência do concreto com o tempo depende do tipo de cimento e das condições de cura do concreto. Para cimento portland, e cura úmida entre 15°C e 20°C, podem adotar-se os valores médios apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Variação da resistência de concretos com diferentes cimentos portland.

Idade do Concreto (dias)	3	7	28	90
Cimento portland normal (tipo I)	0,40	0,65	1,00	1,20
Cimento portland ARI (tipo III)	0,55	0,75	1,00	1,15

Resistência característica à compressão simples

A resistência à compressão simples do concreto é, em geral, determinada em corpos-de-prova cilíndricos padronizados com idade de 28 dias. Para a mesma dosagem do concreto, verifica-se considerável flutuação de resultados da resistência, os quais seguem aproximadamente a curva normal de distribuição. Nessas condições, é possível abordar a conceituação da resistência do concreto de maneira estatística.

O valor médio dos resultados experimentais é chamado *resistência à compressão média do concreto*, indicado por $f_{ccm} = f_{cm}$.

Denomina-se *resistência à compressão característica do concreto* $f_{ck} = f_{ck}$ um valor mínimo estatístico acima do qual ficam situados 95% dos resultados experimentais.

Admitindo-se a curva normal da distribuição, pode-se escrever a relação:

$$f_{ck} = f_{cm} (1 - 1,645 \cdot \delta) = f_{cm} - 1,645 \cdot s$$

Onde δ representa o *coeficiente de variação* ou *dispersão dos valores*, dividindo-se o desvio padrão pela média:

$$\delta = \frac{s}{f_{cm}}$$

O desvio padrão é calculado fazendo-se o somatório das diferenças cada valor encontrado no ensaio pela média, elevando este valor ao quadrado, em seguida dividindo-o

pelo número de ensaios menos um e por fim extraindo a raiz quadrada. Esta equação é mostrada abaixo:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (f_{cc_i} - f_{cm})^2}{n-1}}$$

Onde f_{cc_i} é o valor de cada resultado obtido no ensaio e n é o número de ensaios realizados. Por exemplo, se fossem realizados dois ensaios contendo cada um quatro corpos-de-prova, e que apresentassem os seguintes valores:

1º ensaio (MPa)	18	19	19	20
2º ensaio (MPa)	16	20	20	24

Para os ensaios a média seria igual à:

$$f_{cm1} = \frac{18 + 19 + 19 + 20}{4} = 19 \quad f_{cm2} = \frac{16 + 20 + 20 + 24}{4} = 20$$

Percebe-se claramente que a média do primeiro ensaio é menor que a do segundo, isto não significa que o valor característico do primeiro também será menor, continuando:

$$s_1 = \sqrt{\frac{(18-19)^2 + (19-19)^2 + (19-19)^2 + (20-19)^2}{4-1}} = \sqrt{\frac{(-1)^2 + (0)^2 + (0)^2 + (1)^2}{3}} = \sqrt{\frac{2}{3}} = 0,8165$$

$$s_2 = \sqrt{\frac{(16-20)^2 + (20-20)^2 + (20-20)^2 + (20-24)^2}{4-1}} = \sqrt{\frac{(-4)^2 + (0)^2 + (0)^2 + (4)^2}{3}} = \sqrt{\frac{32}{3}} = 3,2660$$

Percebe-se através da álgebra acima que o desvio padrão foi maior para o segundo ensaio, propiciando os seguintes coeficientes de variação:

$$\delta_1 = \frac{0,8165}{19} = 4,30\% \quad \delta_2 = \frac{3,2660}{20} = 16,33\%$$

O coeficiente de variação para o primeiro ensaio é baixo o que lhe imprimirá valor característico muito próximo do valor médio enquanto que para o segundo ensaio o coeficiente de variação mais elevado fará com que o valor característico se distancie da média. Assim segue:

$$f_{ck1} = f_{cm} - 1,645 \cdot s = 19 - (1,645 \cdot 0,8165) = 19,66$$

$$f_{ck2} = f_{cm} - 1,645 \cdot s = 20 - (1,645 \cdot 3,2660) = 14,63$$

Ou seja, o primeiro ensaio apresentou valor característico bem mais alto que o segundo que, no entanto, tinha apresentado valor médio mais alto.

Controle da qualidade do concreto para aceitação da obra

Na maioria das obras, não se dispõe de um número de ensaios suficientes para determinação precisa da resistência característica do concreto executado, pela análise estatística.

Segundo a NBR-6118 de novembro de 1980, a obra deverá ser aceita automaticamente se um f_{ck-est} for maior que f_{ck} estipulado em projeto.

Para o cálculo do f_{ck-est} devem-se primeiramente dispor os dados em ordem crescente em uma tabela. Usando os dados do exemplo anterior, tem-se:

1º ensaio (MPa)	18	19	19	20
2º ensaio (MPa)	16	20	20	24

Ficando:

f_{cc1}	f_{cc2}	f_{cc3}	f_{cc4}	f_{cc5}	f_{cc6}	f_{cc7}	f_{cc8}
16	18	19	19	20	20	20	24

Feito isso o valor estimado da resistência característica do lote poderá ser obtido com a expressão:

$$f_{ck-est} = 2 \cdot \left(\frac{f_{cc1} + f_{cc2} + \dots + f_{cc\left(\frac{n}{2}-1\right)}}{\left(\frac{n}{2}-1\right)} \right) - f_{cc\frac{n}{2}}$$

Onde $f_{cc\left(\frac{n}{2}-1\right)}$ é o valor obtido do corpo-de-prova igual ao número de ensaios dividido por dois menos um, para este exemplo:

$$f_{cc\left(\frac{n}{2}-1\right)} = f_{cc\left(\frac{8}{2}-1\right)} = f_{cc3}$$

E $f_{cc\frac{n}{2}}$ é o valor obtido do corpo-de-prova igual ao número de ensaios dividido por dois, para este exemplo:

$$f_{cc\frac{n}{2}} = f_{cc\frac{8}{2}} = f_{cc4}$$

Assim, a expressão para o cálculo do f_{ck-est} fica:

$$f_{ck-est} = 2 \cdot \left(\frac{f_{cc1} + f_{cc2} + f_{cc3}}{\left(\frac{8}{2}-1\right)} \right) - f_{cc4} = 2 \cdot \left(\frac{16+18+19}{3} \right) - 19 = 16,33$$

Este valor fica ainda restrito a não ser maior que $\alpha \cdot f_{cc1}$ e nem maior que $0,85 \cdot f_{cm}$. Os valores de α são tabelados segundo o número de ensaios, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 - Relação entre α e o número de ensaios.

$n=$	6	7	8	10	12	14	16	≥ 18
$\alpha=$	0,89	0,91	0,93	0,96	0,98	1,00	1,02	1,04

Para o exemplo $\alpha = 0,93$ e um dos valores limite será de $0,93 \cdot f_{cc1} = 0,93 \cdot 16 = 14,88$. O outro valor limite será igual à $0,85 \cdot f_{cm} = 0,85 \cdot 19,5 = 16,58$, onde o valor médio foi de 19,5.

Assim o valor que deve ser adotado para o f_{ck-est} é de 14,88.

O processo estatístico apresentaria valores:

$$f_{cm} = 19,5, s = 2,2678 \text{ e } f_{ck} = 15,77$$

Realizando um comparativo entre os dois processos, percebe-se que na maioria dos casos o valor característico estimado estará sempre a favor da segurança. Apresentando valores mais baixos.

Uma observação importante, é que para concretos dosados para valores menores que 16MPa o f_{ck-est} deve ser igual à $\alpha \cdot f_{cc1}$.

4. DOSAGEM DO CONCRETO NORMAL

4.1. Introdução

4.1.1. Finalidade da dosagem

A dosagem do concreto tem por finalidade determinar as proporções dos materiais a empregar, de modo a se atender a duas condições básicas:

- a) Resistência desejada;
- b) Plasticidade suficiente do concreto fresco.

4.1.2. Resistência da dosagem

A resistência adotada como referência para dosagem é a resistência média, com 28 dias obtidas em corpos-de-prova padronizados. A resistência média, a ser obtida com a dosagem estudada, é estimada em função da resistência característica especificada no projeto.

Quando é conhecido o desvio padrão, determinado em ensaios com corpos-de-prova da obra considerada, ou da outra obra em condições equivalentes (mesma granulometria dos agregados, mesma relação água / cimento, etc.) a resistência média de dosagem pode ser calculada com a fórmula:

$$f_{cm} = f_{ck} + 1,65 \cdot k \cdot s$$

Sendo que f_{cm} nunca pode ser menor que $f_{ck} + 3,3MPa$.

Onde k é um coeficiente corretivo para o número n de ensaios utilizados na determinação de s (desvio padrão). Valores de k são encontrados na Tabela 7.

Tabela 7 - Relação entre k e o número de ensaios.

$n=$	20	25	30	50	200
$k=$	1,35	1,30	1,25	1,20	1,10

Quando não for conhecido o desvio padrão, a resistência de dosagem será fixada em função do tipo de controle dos materiais, usando-se as expressões:

Controle rigoroso	$f_{cm} = f_{ck} + 6,5MPa$
Controle razoável	$f_{cm} = f_{ck} + 9,0MPa$
Controle regular	$f_{cm} = f_{ck} + 11,5MPa$

Estes critérios implicam na condição, onde fornecedores de concreto (concreteiras) devem dosar seus traços para valores de f_{cm} em função do f_{ck} pedido.

4.1.3. Processos de dosagem

Existem diversos processos semi-empíricos para calcular a composição de materiais a empregar na mistura, o que se denomina traço do concreto. Os cálculos são baseados em relações experimentais aproximadas, devendo-se sempre confirmar o traço pela observação visual da plasticidade obtida na mistura, e pela resistência dos corpos-de-prova.

O traço calculado deverá ser corrigido se for verificado que a plasticidade do concreto fresco é insuficiente ou excessiva.

4.1.4. Concreto de granulometria contínua

Em geral se utilizam agregados com curvas granulométricas compreendidas em faixas ideais especificadas. Os traços obtidos com esses agregados denominam-se de *granulometria contínua*, uma vez que os agregados têm porcentagens retidas em todas as peneiras da série normal.

Os concretos de granulometria contínua apresentam boa trabalhabilidade e pequena tendência à segregação, sendo por isso especificados nas normas.

4.2. Dosagem de Concretos com Granulometria Contínua

4.2.1. Cálculo do traço em peso

Relação água / cimento

O traço do concreto é em geral referido a um saco de cimento (50kg). A composição em peso pode ser expressa da seguinte forma:

I – cimento

X – água

A – areia

B – brita

A resistência do concreto depende da fração *X*, igual à relação entre os pesos da água e cimento, e correntemente denominada *fator água / cimento*.

O fator *X* é escolhido em função da resistência média aos 28 dias, conforme dados experimentais médios de cimentos nacionais.

Relação água / sólidos

A trabalhabilidade do concreto fresco depende da relação (*Y*) entre o peso de água e o peso dos materiais sólidos (*cimento+areia+brita*), que se pode denominar *relação água / sólidos*.

Tabela 8 - Fator *X* (água / cimento) em função da resistência.

Fator água / cimento (<i>X</i>) para cimento portland tipo I	Resistência média aos 28 dias (f_{cm})	
	kgf/cm ²	MPa
0,37	450	45
0,40	400	40
0,45	350	35
0,50	300	30
0,55	250	25
0,60	220	22
0,65	200	20
0,70	175	17,5
0,75	150	15
0,80	130	13
0,90	100	10

$$Y = \frac{\text{água}}{\text{cimento} + \text{agregados}} = \frac{X}{1 + A + B}$$

A relação Y constitui um dado experimental, que depende principalmente do diâmetro máximo do agregado e da consistência desejada. Outros fatores influem na relação Y , tais como tipos de agregado, granulometria, formas dos grãos, etc. Pode-se, entretanto, adotar valores aproximados de Y , aplicáveis para agregados usuais.

Tabela 9 - Relação Y para concreto vibrado, em função máxima do agregado.

Diâmetro máximo do agregado d_{max}	Concreto sem aditivo	Concreto com aditivo
19mm	9%	8%
25mm	8,5%	7,5%

Massa dos agregados

Escolhido o valor de Y , conforme a Tabela 9, e o valor de X para uma dada resistência média, conforme a Tabela 8, pode-se determinar a quantidade total de agregados ($A+B$). A quantidade de brita (B) pode ser estimada, em função do peso total de materiais sólidos, adotando-se as seguintes porcentagens:

Concreto vibrado, sem aditivo: 50%

Concreto vibrado, com aditivo: 55%

Resultam então as fórmulas da Tabela 10, para o cálculo das massas de areia (A) e brita (B).

Tabela 10 - Fórmulas para determinação das massas dos agregados, em função de X e Y .

Massa de agregado para 1kg de cimento	Tipo de concreto para colocação com vibrador	
	Sem aditivo	Com aditivo
Brita (B)	$0,5 \cdot \frac{X}{Y}$	$0,55 \cdot \frac{X}{Y}$
Areia (A)	$0,5 \cdot \frac{X}{Y} - 1$	$0,45 \cdot \frac{X}{Y} - 1$

As fórmulas apresentadas na Tabela 10 são facilmente dedutíveis. Como segue:

A partir da fórmula:

$$Y = \frac{X}{1 + A + B}, \text{ tem-se: } 1 + A + B = \frac{X}{Y}$$

Onde $1 + A + B$ são os materiais sólidos. Se para concretos vibrados sem aditivo, por exemplo, a quantidade de brita corresponde a 50% de todo o material sólido, então a areia e a parte de cimento correspondem a outra metade e assim:

$$B = 1 + A \therefore 1 + A + B = 2B$$

$$2B = \frac{X}{Y} \therefore B = \frac{1}{2} \cdot \frac{X}{Y} = 0,5 \frac{X}{Y}$$

Desta forma:

$$1 + A = B = 0,5 \cdot \frac{X}{Y} \therefore A = 0,5 \cdot \frac{X}{Y} - 1$$

Isto significa que a parte de areia é igual a parte de brita menos a parte de cimento. E fica demonstrado então a obtenção das fórmulas da Tabela 10.

Consumo de cimento

O consumo de cimento C (kg de cimento por m^3 de concreto) pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$1000 - 1,5\% = C \cdot \left(\frac{1}{m_C} + \frac{X}{m_X} + \frac{A}{m_A} + \frac{B}{m_B} \right)$$

Onde cada relação na parte direita da equação representa o volume de cada material. E a parte esquerda corresponde a 1000 litros menos 1,5% de ar em volume normalmente incorporado na mistura. Deve-se atentar que para esta fórmula deve-se utilizar a massa

específica e não a massa específica aparente. Isto se deve ao fato de que no cálculo da massa específica de um material este não apresenta vazios que é aproximadamente como os materiais se apresentarão no concreto. Deste modo, a equação fica:

$$985 = C \cdot \left(\frac{1}{m_C} + \frac{X}{m_X} + \frac{A}{m_A} + \frac{B}{m_B} \right)$$

Com as seguintes massas específicas conhecidas:

m_C : massa específica de cimento ($\cong 3,125 \text{ kg/l}$)

m_X : massa específica da água ($\cong 1 \text{ kg/l}$)

m_A : massa específica da areia ($\cong 2,60 \text{ kg/l}$)

m_B : massa específica da brita ($\cong 2,75 \text{ kg/l}$)

Pode-se escrever:

$$\frac{985}{\left(\frac{1}{3,125} + \frac{X}{1} + \frac{A}{2,60} + \frac{B}{2,75} \right)} = C = \frac{985}{0,32 + X + 0,384 \cdot A + 0,364 \cdot B}$$

A fórmula já fornece o peso de cimento para $1m^3$.

Volume de água

Conhecendo-se a umidade (H) da areia, a quantidade de água na areia, de um traço com peso C de cimento, será de: $X_{areia} = C \cdot A \cdot H$.

E a quantidade de água a acrescentar no traço será $X - X_{areia}$

Exemplo para cálculo do traço

Calcular o traço em peso de um concreto de consistência para vibração, sem aditivo plastificante, com rigoroso controle dos agregados em peso e com as seguintes características:

$$f_{ck28} = 20 \text{ MPa}$$

$$d_{\max} = 19 \text{ mm}$$

Para um rigoroso controle de qualidade o valor da resistência média aos 28 dias pode ser determinado por:

$$f_{cm28} = f_{ck} + 6,5MPa = 26,5MPa$$

Com o valor da resistência média pode-se determinar o valor de X através da Tabela 8. Como não há o valor de $26,5MPa$ deve-se fazer uma interpolação para se economizar cimento. Isto é feito utilizando-se regra de três com o valor logo abaixo ($25MPa$) e o valor logo acima ($30MPa$)

$$\frac{30 - 25}{0,50 - 0,55} = \frac{30 - 26,5}{0,50 - X} \therefore \frac{5}{-0,05} = \frac{3,5}{0,50 - X} \therefore 0,50 - X = \frac{3,5}{-100} \therefore X = 0,535$$

Um dos dados do problema estipula o diâmetro máximo do agregado em $19mm$ e outro dado estipula que é um concreto sem aditivo. A partir destes dados e das relações da Tabela 9, tem-se $Y = 9\% = 0,09$.

Com os dados de X e Y e as fórmulas da Tabela 10, encontram-se:

$$A = 0,5 \cdot \frac{X}{Y} - 1 = 0,5 \cdot \frac{0,535}{0,09} - 1 = 1,97$$

$$B = 0,5 \cdot \frac{X}{Y} = 0,5 \cdot \frac{0,535}{0,09} = 2,97$$

Assim está determinado o traço em peso:

$$1 : 1,97 : 2,97 \rightarrow \text{cimento} : \text{areia} : \text{brita}$$

Com $26,75$ litros de água por saco de cimento de $50kg$. Supondo a areia com 2% de umidade, a quantidade de água a adicionar ao traço será: $26,75 - 50 \cdot 1,97 \cdot 0,02 = 24,78\text{lbs}$.

O consumo de cimento por m^3 , será de:

$$C = \frac{985}{0,32 + X + 0,384 \cdot A + 0,364 \cdot B} = \frac{985}{0,32 + 0,535 + 0,384 \cdot 1,97 + 0,364 \cdot 2,97} = 365 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

4.2.2. Cálculo do traço em volume

O emprego do traço em volume é muito conveniente, porém pouco preciso, uma vez que a massa específica aparente das areias varia muito com a umidade, e a massa específica da brita varia com a forma das partículas e do recipiente usado para medir o volume. Como indicações práticas aproximadas, podem ser adotados os seguintes valores de massa específica aparente:

Areia com 3% de umidade:	1,4 $\frac{\text{kg}}{\text{l}}$
Brita:	1,3 $\frac{\text{kg}}{\text{l}}$

Em obras pequenas, em geral se utilizam padiolas de dimensões padronizadas, exprimindo-se as quantidades de areia e brita em número de padiolas por saco de cimento (50kg).

Exemplo para cálculo do traço em volume

Exprimir o traço do exemplo anterior em volume de agregado.

Solução: Admitindo as massas específicas aparentes indicadas acima, obtemos os seguintes volumes de agregados, para 1 saco de cimento:

$$\begin{aligned} \text{Areia:} & \quad \frac{1,97 \cdot 50}{1,4} = 70 \text{litros} \\ \text{Brita:} & \quad \frac{2,97 \cdot 50}{1,3} = 114 \text{litros} \end{aligned}$$

4.2.3. Dosagem de concretos com agregados de granulometria descontínua

Os traços calculados nos itens anteriores se referem a agregados compreendidos dentro das curvas granulométricas ideais das normas. Esses traços são denominados de granulometria contínua.

É possível também realizar traços com agregados de granulometria descontínua, escolhendo-se os diâmetros das partículas de modo que elas possam arrumar-se deixando entre elas um volume pequeno, que deve ser preenchido pela nata de cimento. Com granulometrias descontínuas é possível obter concretos de grande densidade e elevada resistência, com menor consumo de cimento que nos concretos usuais.

Os concretos de granulometria descontínua apresentam, entretanto, pequena trabalhabilidade e forte tendência à segregação, sendo necessário adensá-los com vibradores de grande potencia.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão:** NBR-7215. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Agregado para concreto:** NBR-7211. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1983. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Agregados – Determinação da composição granulométrica:** NBR-7217. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova de argamassa e concreto:** NBR-9479. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos:** NBR-5739. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto:** NBR-5738. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Projeto e execução de obras de concreto armado:** NBR-6118. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1983. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone:** NBR NM-67. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1998. 8p.

ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. **Cimento portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica:** NM23:2000. 5p.

PFEIL, W. **Concreto Armado – Introdução:** Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1985. 234p.