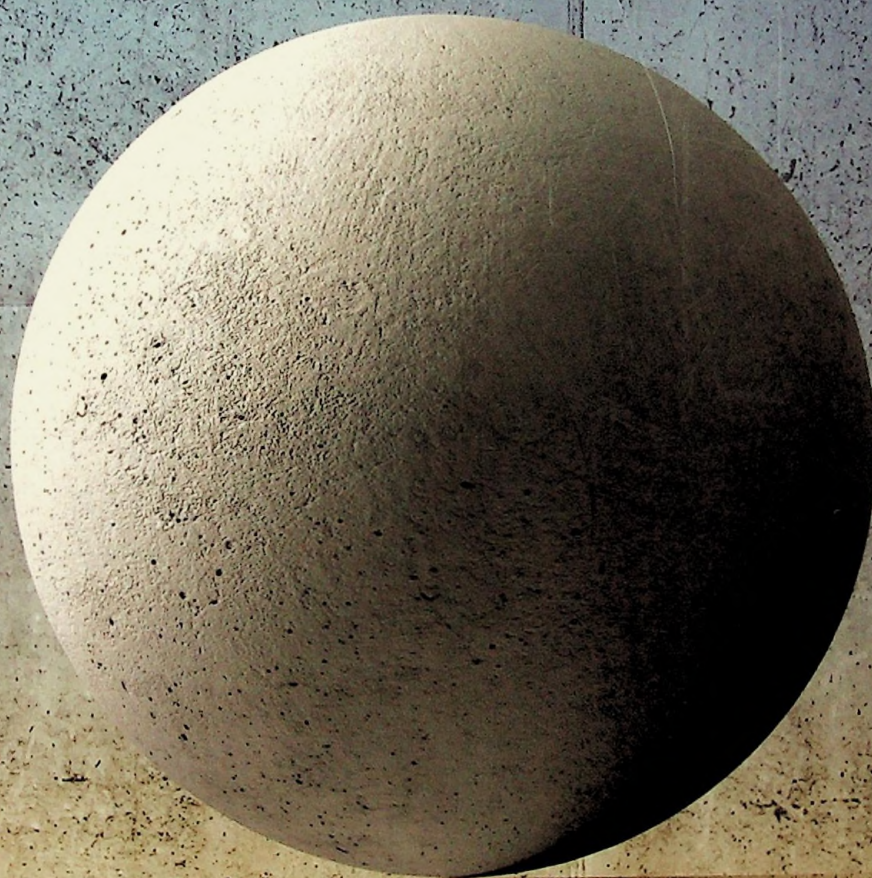


L. A. FALCÃO BAUER

MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

JOÃO FERNANDO DIAS
COORDENADOR



LTC

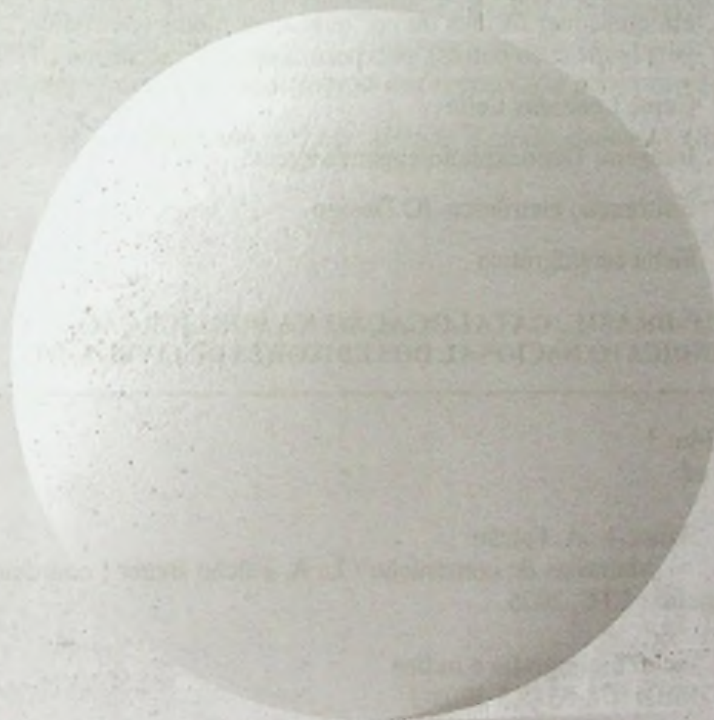
**SÉTIMA
EDIÇÃO**

L. A. FALCÃO BAUER

MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

JOÃO FERNANDO DIAS

COORDENADOR



LTC



**SÉTIMA
EDIÇÃO**

9

PROPRIEDADES DO CONCRETO ENDURECIDO

Eng.º Hélio Martins de Oliveira •
Prof. Dr. Bruno Luís Damineli •
Prof. Dr. João Adriano Rossignolo •
Prof. Dr. Osny Pellegrino Ferreira

- 9.1 Generalidades, 215**
- 9.2 Propriedades Físicas, 216**
- 9.3 Propriedades Mecânicas, 224**
- 9.4 Durabilidade, 230**
- 9.5 Propriedades Frente a Condições Específicas, 233**

9.1 GENERALIDADES

O concreto de cimento Portland é um material em contínua evolução, considerado como um sólido formado a partir de alterações físico-químicas que ocorrem nas reações envolvendo esse ligante e demais constituintes, como os agregados, os aditivos, as adições e a água. A partir de seu estado endurecido, esse sólido se apresenta com grande capacidade de resistir aos esforços mecânicos e às demais ações que interferem no seu desempenho como material de construção e na sua durabilidade ou capacidade de resistir aos agentes agressivos que possam afetar a sua vida útil.

Diferentes tipos de cimento podem ser empregados na produção de concretos, conforme foi tratado no Capítulo 3. Pode haver também a introdução de variados aditivos e adições, inseridos em sua preparação ainda no estado fresco na forma de produtos à base de polímeros e partículas com dimensões da ordem de nanômetros, os quais são capazes de incrementar as propriedades para as diferentes utilizações que sejam requeridas pela obra ou serviço.

Materiais orgânicos ou inorgânicos podem também ser introduzidos na matriz cimentícia através de seus poros após o endurecimento do concreto, alterando as propriedades físicas no estado endurecido, como sua resistência mecânica e durabilidade sob ação de substâncias agressivas presentes no meio em que esse material encontra-se inserido. Neste capítulo, esses materiais serão desconsiderados, dando-se ênfase apenas ao concreto convencional originado a partir de uma matriz cimentícia na qual se utilizam prioritariamente os cimentos Portland como ligante.

O concreto é considerado um produto fabricado pelo próprio engenheiro, às vezes no canteiro de obras, às vezes em usinas (centrais), devendo apresentar características e propriedades compatíveis com o fim a que se destina e em atendimento às exigências técnicas e econômicas demandadas pela obra que se realiza. Constitui-se, portanto, em um material sensível às modificações das condições ambientais, físicas, químicas, mecânicas, com reações geralmente lentas registradas de certo modo nas suas características e propriedades ao longo do tempo, as quais devem ser consideradas em termos relativos, segundo a qualidade exigida para um fim determinado de construção.

Exemplificando, a durabilidade de um concreto pode ser perfeitamente aceitável quando a estrutura se encontra devidamente protegida da ação dos elementos presentes no ambiente em que se situa e, por outro lado, inteiramente inadequada se exposta diretamente à ação de agentes agressivos. A impermeabilidade é

característica essencial dos concretos utilizados em estruturas hidráulicas, não sendo elemento essencial da qualidade dos concretos empregados nas estruturas de edifícios, quando as exigências fundamentais são deslocadas para as características mecânicas de resistência e rigidez.

O conhecimento das propriedades, de suas possibilidades e limitações e dos fatores que as condicionam constitui-se no instrumento que vai permitir ao engenheiro escolher o concreto ideal frente às solicitações impostas, cabendo a esse profissional eleger os materiais que irão compor o concreto e realizar sua dosagem adequada para atingir desempenho satisfatório. Porém, os processos que conduzem ao alcance do máximo de perfeição nas características que compõem a qualidade desejada podem resultar em preço elevado. Assim, cabe ao engenheiro promover a compatibilização das características e propriedades do concreto em função das exigências requeridas pela construção, atendendo, assim, às condições de vida em serviço da estrutura, com materiais de qualidade, custo compatível, e com desempenho adequado para suportar todas as ações impostas pela estrutura na qual foi integrado. Em outras palavras, a qualidade do concreto deve ser subordinada à economia geral do projeto, atendendo não somente aos aspectos do custo inicial, mas também ao desempenho da estrutura durante toda a sua vida útil.

Aqui estão elencadas as características principais do concreto de cimento Portland no estado endurecido, ficando evidentes suas variadas habilidades quanto ao monolitismo, à facilidade de construção e conservação, ao aspecto estético e funcional e propriedades como permeabilidade, durabilidade, resistência mecânica, propriedades elásticas sob cargas de curta duração e comportamento térmico sob altas temperaturas.

Conforme verificado nos capítulos anteriores, quando comparado com outros materiais estruturais como o aço, por exemplo, o concreto apresenta particularidades, pois exige um significativo contingente de mão de obra para sua produção no canteiro e meios adequados de transporte e lançamento, com elementos apresentando grandes seções, maior tempo para entrar em serviço (cura e endurecimento), alterações volumétricas devidas à retração hidráulica e outros fatores.

Os concretos podem ser classificados segundo a sua utilização na construção e pela associação ou não de outros materiais na matriz cimentícia, os quais promovem alteração em suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, e também nas

condições de produção, transporte e lançamento do concreto em obra.

Neste capítulo, será dada ênfase ao concreto contendo como ligante o cimento Portland e agregados naturais utilizados nas obras correntes. Os demais tipos de concreto, listados a seguir, devem ser objeto de abordagem específica:

- concreto massa;
- concreto para isolamento de radiação;
- concreto contendo polímeros;
- concreto reforçado com fibras;
- concreto autoadensável;
- concreto com alta densidade;
- concreto sem finos;
- concreto ciclópico;
- concreto de pós-reativos;
- concreto refratário;
- concreto leve (tratado no Capítulo 35).

As características e as propriedades do concreto endurecido, apresentadas na Tabela 9.1, serão especificamente tratadas com vista aos concretos ordinários de cimento Portland e agregados correntes.

TABELA 9.1 Características e propriedades do concreto endurecido

Propriedades físicas
Massa específica
Compacidade
Permeabilidade
Propriedades térmicas
Retração e expansividade
Propriedades mecânicas
Compressão
Tração direta
Comportamento elástico
- Módulo de deformação
- Fluência
Durabilidade
Ação da temperatura
Ataque por ácidos
Ataque por águas puras
Ataque por sais orgânicos
Ataque por sulfatos
Água do mar
Reação álcalis-agregado
Propriedades frente ações específicas

Quando for o caso, serão explicitamente identificados os concretos não usuais, fabricados com outros ligantes, adições minerais, aditivos, fibras e agregados (graúdo e miúdo).

9.2 PROPRIEDADES FÍSICAS

9.2.1 Massa Específica

A massa específica do concreto é a razão da massa da unidade considerada pelo volume preenchido por ela, incluindo os vazios em seu interior, e seu valor para concretos corriqueiros varia de 2,0 a 2,8 t/m³, segundo a NBR 9778. São aqueles concretos constituídos a partir do uso de agregados naturais, com determinados processos de adensamento na sua fabricação, também com influência menor do meio ambiente em que são mantidos em razão da variação da proporção de água contida nos seus poros.

Para o caso de concretos constituídos a partir de agregados não convencionais, os valores médios conhecidos são os seguintes:

- **Concreto leve:** massa específica seca inferior a 2000 kg/m³ de acordo com a NBR 9778:2005 (veja mais informações no Capítulo 35).
- **Concreto pesado ou denso:** massa específica seca superior a 2800 kg/m³ de acordo com a NBR 9778:2005.

O valor da massa específica do concreto depende diretamente do tipo de agregado utilizado, seja ele artificial ou natural. No concreto com aplicação estrutural, pode-se ter valores de 1,8 t/m³ quando utilizado agregado leve ou bem mais altos quando se utiliza a barita, por exemplo, chegando a valores de 3,7 t/m³.

A distinção do concreto com relação ao aço, outro material usado em larga escala na construção, advém da sua baixa relação resistência/peso, constituindo um problema econômico em obras de destaque, como edifícios de elevada altura ou pontes de grandes vãos, por exemplo. Entretanto, o desenvolvimento tecnológico nas últimas décadas tem possibilitado ao concreto grandes avanços, permitindo que continue a ser empregado em construções de grande vulto.

Para melhorar a relação resistência/peso, podem-se considerar duas possibilidades: (1) diminuir a massa específica do concreto; ou (2) aumentar o desempenho com relação à resistência.

A primeira alternativa vem sendo aplicada por meio da utilização de agregados leves estruturais em substituição aos naturais, permitindo a obtenção de

concretos dotados de massa específica com cerca de $1,6 \text{ t/m}^3$ e resistência à compressão de 25 a 40 MPa, ou até superior. Mais informações podem ser encontradas no Capítulo 35 – Concreto Leve.

A massa específica dos concretos aerados, obtidos a partir da incorporação de agentes espumantes na mistura fresca, pode atingir valores bem inferiores, por volta de $0,3 \text{ t/m}^3$, e somente se aplicam no caso de componentes e elementos sem função estrutural, condição igualmente válida para concretos cujos agregados naturais são substituídos por pérolas de poliestireno expandido (isopor), podendo este último ser utilizado apenas como enchimento em razão de sua baixa resistência à compressão.

Com a utilização de agregados leves artificiais, como a argila expandida, por exemplo, podem-se obter valores elevados de resistência à compressão e sua massa específica pode situar-se abaixo de $2,0 \text{ t/m}^3$. Nesse caso, há que se considerar como fator importante no concreto leve estrutural a forma das suas partículas ou grãos, pois estas características exercem influência no grau de acomodação quando em contato com a pasta de cimento, podendo ocorrer segregação por ocasião do adensamento da mistura fresca com vibração, por conta de menor massa específica do agregado leve.

Em outra condição, em razão de exigências impostas pelo tipo de construção, a massa específica de determinados concretos pode apresentar valores elevados, como no caso de concretos pesados utilizados para isolamento de radiações em instalações de reatores nucleares. Nesse caso, os concretos são executados com agregados graúdos pesados como a barita, por exemplo, e sua massa específica pode variar de $3,5$ a $5,5 \text{ t/m}^3$.

Pode-se considerar que uma densidade elevada do concreto remete a que o mesmo se apresente com maiores resistências mecânicas e boa durabilidade; entretanto, essas características dependerão da compactidade final, bem como do menor índice de vazios obtido. A maior massa específica se obtém por meio de uma compactação eficiente do concreto no seu estado fresco, precedido de uma adequada dosagem que possibilite a máxima compactidade possível da mescla composta pelo cimento e agregados, assegurando-se também que este concreto, após seu lançamento, receba os devidos cuidados durante a fase de cura, quando, então, serão desenvolvidos os compostos hidratados na matriz cimentícia e suas ligações com os agregados, minorando a porosidade no estado endurecido.

O bom resultado quando se analisa a relação resistência/massa específica do concreto está intimamente ligado à correta dosagem de seus constituintes,

ao teor de água utilizado na mistura fresca e à quantidade de ar incorporado acidental ou intencionalmente, fatores que vão interferir nos vazios formados. Em resumo, um concreto pode apresentar alta massa específica pelo uso de agregados de alta densidade, mas mesmo assim apresentar baixa resistência mecânica se houver porosidade excessiva na pasta, devendo ser, portanto, objeto de dosagem e confecção minuciosos para atingir resistência compatível com a densidade dos agregados utilizados.

A norma NBR 9833 define o procedimento para obtenção da massa específica do concreto no estado fresco e a NBR 9778:2005 estabelece o método para determinação da sua massa específica e índice de vazios no estado endurecido, sendo estas operações realizáveis obrigatoriamente em laboratório com instrumentos de pesagem aferidos e normalizados.

9.2.2 Compactidade

A compactidade pode ser definida como a relação entre o volume da parte sólida e o volume aparente do concreto. Seu valor será tanto mais elevado quanto menor seja o volume de poros ou vazios presentes no seu interior, ou seja, a sua porosidade, que pode ser considerada uma das propriedades importantes de um concreto endurecido, pois define o grau de “empacotamento” que se pode obter com os agregados constituintes da mistura e a pasta de cimento que os envolve, e corresponde à melhor acomodação possível de ser obtida entre os constituintes do concreto.

O traço do concreto deve ser estudado de tal forma que apresente a menor quantidade de vazios possível, seja sob o efeito de vibração para seu adensamento, seja para uma condição em que se dispensa tal procedimento, como é o caso do concreto autoadensável, o qual vem sendo largamente utilizado dadas as facilidades que propicia na execução de uma obra.

9.2.3 Permeabilidade

A permeabilidade de um concreto é a facilidade que apresenta à passagem de um fluido por seu interior, seja um gás ou líquido, atuando com ou sem pressão, contendo ou não substâncias em solução ou suspensão. Seu valor depende da porosidade apresentada pela pasta de cimento hidratada, dos tipos de agregados utilizados, da falta de compactação adequada e da exsudação provocada pela percolação da água contida em excesso no concreto fresco, quando se promove seu adensamento.

Os diferentes materiais que compõem o concreto o tornam poroso, pois não é possível preencher

a totalidade dos vazios dos agregados envoltos pela pasta de cimento. A justificativa para a existência desses vazios depende de condições presentes na produção do concreto, como:

- normalmente é utilizada uma quantidade de água superior à necessária para a hidratação do cimento, buscando a fluidez adequada para aplicação; com a evaporação após o endurecimento, promove a formação de vazios com dimensões de 10^{-2} a $10\ \mu\text{m}$;
- durante a hidratação dos diferentes compostos do cimento, os volumes absolutos de cimento e água são reduzidos após sua reação, gerando vazios com dimensões abaixo de $1\ \text{nm}$ (nanômetro);
- ocorre a incorporação de ar durante a mistura dos constituintes, com dimensões superiores a $10\ \mu\text{m}$, ficando aprisionado em seu interior após o endurecimento do concreto.

A permeabilidade do concreto vai depender da interconexão dos vazios formados. Por meio desses capilares podem penetrar os vários agentes agressivos que afetarão a durabilidade do concreto. A norma NBR 10786:2013 estabelece o método de ensaio para determinação da permeabilidade à água para o concreto endurecido, todavia, apresenta resultados pouco reprodutíveis; consiste essencialmente em fazer agir sob pressão, na superfície do corpo de prova, um caudal líquido que é recolhido após determinado tempo, após atravessar o espécime ensaiado.

O coeficiente de permeabilidade é obtido conforme fórmula a seguir:

$$K = Q \cdot L / A \cdot H$$

em que:

K = coeficiente de permeabilidade (cm/s);

Q = vazão de entrada (cm^3/s);

L = altura do corpo de prova (cm);

A = área da seção transversal do corpo de prova (CP) (cm^2);

H = altura da coluna d'água correspondente à pressão utilizada (cm).

A determinação da permeabilidade sob pressão é obtida em aparelhos de construção simples, nos quais se força a passagem de água sob pressão constante por um corpo de prova cilíndrico com furo central. A vazão de água percolada é proporcional à área do corpo de prova em contato com o líquido, a um coeficiente de permeabilidade determinado no ensaio e inversamente proporcional à espessura. Se o fenômeno obedecesse à lei de Darcy, esse coeficiente seria constante, o que realmente não ocorre, já que ele cresce mais rapidamente do que a pressão.

Aparelho similar se presta à medição da permeabilidade em relação aos gases.

A permeabilidade do concreto à água e a outros líquidos se exprime pela quantidade de água que atravessa uma superfície unitária, em uma espessura unitária durante a unidade de tempo, e sob pressão unitária ($\text{litro}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$).

A importância do conhecimento do grau de permeabilidade do concreto não deriva somente de sua utilização na construção de obras hidráulicas, mas também dos casos em que a durabilidade do material pode ser ameaçada pela ação de agentes agressivos, sendo tanto menor esta ameaça quanto menor for a permeabilidade do material.

A caracterização dos concretos segundo a sua permeabilidade se mostrou assunto de difícil desenvolvimento, por estarem sujeitos a grande número de parâmetros e alguns serem de difícil qualificação e identificação física. O aumento da permeabilidade favorece a ocorrência do inchamento do concreto quando há pressão exercida sobre a água. Também pode ocorrer que, com o passar do tempo, por dissolução dos sais solúveis e do hidróxido de cálcio em particular, estes são transportados no sentido da corrente, podendo virem a se cristalizar por queda de pressão e eventual evaporação da água, colmatando os poros e microfissuras, e fazendo diminuir a permeabilidade à água deste concreto.

A determinação do coeficiente de permeabilidade, no caso da utilização de um espécime cilíndrico, resulta no resultado em cm/hora e é feita a partir da fórmula:

$$K = (Q / 2\pi H h) \cdot \log_e (R/r), \text{ sendo:}$$

h = altura do corpo de prova (cm);

R = raio do corpo de prova (cm);

r = raio do furo central (cm);

H = pressão em centímetros de coluna de água;

Q = volume por hora (cm^3/hora).

Para concretos contendo cimento de 200 a 300 kg/m^3 e submetidos a 2,5 MPa de pressão, por exemplo, a permeabilidade à água obtida utilizando um corpo de prova cilíndrico com 15 cm de diâmetro, altura 30 cm e furo central de diâmetro 2,0 cm situa-se em torno de $2,0 \times 10^{-8}$ cm/hora. Em concretos com conteúdo de cimento próximo de 400 kg/m^3 e relação água/cimento abaixo de 0,45, esse coeficiente pode sofrer significativas reduções em função da diminuição da porosidade da pasta de cimento.

Em geral, para os concretos usuais, todo fator que tende a melhorar a resistência do concreto à compressão tem um efeito benéfico sobre a redução da permeabilidade.

Entre outros fatores, vale salientar que a permeabilidade diminui com a redução da relação água/cimento, com a proporção dos finos presentes na mistura, inclusive cimento, com os cuidados na cura, com o eventual emprego de aditivos, adições minerais e camadas superficiais de proteção.

Aditivos e adições utilizados nos concretos também podem influenciar a permeabilidade, pois afetam a formação dos compostos hidratados do cimento pela redução do volume de água normalmente requerido, caso dos aditivos plastificantes ou de adições que possibilitam a maior formação dos silicatos de cálcio hidratados, mais compactos que o hidróxido de cálcio (cal livre) presente na matriz cimentícia.

O efeito dos aditivos já foi objeto de discussão no Capítulo 5 e, embora alguns desses produtos sejam eficazes, particularmente nas misturas mais pobres, a maioria deles produz efeito insatisfatório caso não ocorra um rígido controle das condições de preparação do concreto. Para obras de menor responsabilidade, o uso de uma quantidade suplementar de cimento mostra-se mais efetivo do que a utilização de aditivos impermeabilizantes, e a um custo inferior. A tendência atual do mercado consiste em disponibilizar aos consumidores produtos cada vez mais especializados ao fim a que se destina esse concreto, principalmente quando se trata de ambientes com elevada agressividade química, caso comum em obras hidráulicas como Estações de Tratamento de Esgotos e Águas Industriais (ETEs).

Alguns aditivos, como já visto, são suspensões de pós muito finos ou de emulsões que aumentam a compacidade pela formação eventual de produtos combinados com os constituintes do cimento, como são as adições minerais, pozolanas ou *fillers* que apresentam reatividade com os compostos hidratados do cimento. Outros aditivos formam, em presença da água, géis dotados de rigidez que promovem, em maior ou menor grau, a obstrução dos poros, diminuindo a absorção de líquidos e gases provenientes do exterior.

O aumento de compacidade é acompanhado de uma diminuição de permeabilidade, constituindo a tendência para a obtenção de concretos mais duráveis e com melhor desempenho.

9.2.4 Propriedades Térmicas

O comportamento do concreto quando varia a temperatura é semelhante ao dos demais sólidos que, em geral, expandem no aquecimento e contraem quando diminui a temperatura, sendo essa deformação dependente de suas propriedades como condutividade e

difusividade térmica por conta do desenvolvimento de gradientes de temperatura.

Como exemplo, tem-se a fissuração às primeiras idades em elementos de concreto, decorrente das deformações térmicas que ocorrem quando o concreto novo ainda apresenta resistência deficiente, e que deve ser considerada quando se trata de elementos esbeltos e com grande área exposta ao ambiente, especialmente em se tratando de pré-moldados. O comportamento do concreto sob ação das variações de temperatura também influencia no dimensionamento de juntas de dilatação e contração térmica em grandes estruturas, como elementos de pontes e outras aplicações especiais, por exemplo, as bases de fornos e caldeiras nas instalações industriais e ainda na consideração da ação do fogo em situação de incêndio.

a) Condutividade

A condutividade térmica de um material é a característica com a qual se avalia a sua capacidade quanto à condução do calor através do seu interior, e é definida como a relação entre o fluxo de calor e o gradiente de temperatura a que foi submetido, sendo medida em joules por segundo por metro quadrado de um corpo no qual a diferença de temperatura seja de 1 °C por metro de espessura.

A condutividade térmica nos sólidos se processa segundo a equação de Fourier:

$$Q = kA \frac{dt}{dx} T$$

em que Q é a quantidade de calor conduzido; k é o coeficiente de condutividade térmica; A corresponde à área; dt/dx é o gradiente de temperatura; e T é o tempo.

A norma NBR 12820:2012 estabelece o método de ensaio para a determinação da condutividade térmica do concreto.

Os concretos usuais conduzem melhor o calor do que os concretos de baixa densidade e as alvenarias. Alguns valores são apresentados na Tabela 9.2. Nessa tabela, são registrados valores dos coeficientes de transmissão de calor (difusividade) pelas paredes de diferentes tipos de concretos e de diferentes espessuras. Convém lembrar que, nesse caso, o valor do coeficiente de transmissão é dado pela equação:

$$U = \frac{1}{1/i + 1/e + X/k}$$

sendo U o coeficiente de transmissão de calor pelas paredes; i é o coeficiente de transmissão superficial interno (valor médio: 0,2 kcal/m · h · °C); e é o

coeficiente superficial externo (valor médio: 0,7 kcal/m · h · °C); X é a espessura da parede (m); e k é a condutibilidade térmica (kcal/m · °C).

A variação da temperatura no interior de uma massa, quando submetida a uma fonte de calor, ocorre segundo uma velocidade que representa a difusividade. A NBR 12818:2012 estabelece o método de ensaio para determinação da difusividade térmica do concreto saturado em água e seu valor representa uma facilidade exercida pelo concreto quando submetido às variações de temperatura.

A obtenção da difusividade consiste em se determinar, a partir de uma condição de equilíbrio entre as temperaturas externa e interna, o diferencial de temperatura em relação ao tempo do elemento em cuja superfície se promove o incremento da temperatura.

A difusividade pode ser representada por meio dos valores do coeficiente de transmissão de calor pelas paredes de concreto com diferentes espessuras, e nesse caso o seu valor é dado pela última equação apresentada.

Verifica-se, pelos valores apresentados da Tabela 9.2, que o concreto normal é melhor condutor de calor do que os concretos leves. É usual relacionar o coeficiente de condutibilidade térmica dos concretos às suas respectivas densidades. Esses valores podem ser encontrados em manuais técnicos. Os concretos de baixa densidade são excelentes materiais para isolamento térmico.

A condutividade do concreto comum, além de variar em função do tipo de agregado utilizado,

também sofre influência pela sua condição de umidade, principalmente quando se encontra saturado, podendo, nesse caso, apresentar alterações da ordem de 200 % em comparação com sua condição seca.

A condutividade e a difusividade variam juntas e esta última, influenciada pelo teor de umidade com o qual se encontra o concreto endurecido, sofre influência do teor de água utilizado na mistura (relação água-cimento), do grau de hidratação do cimento e do ambiente no qual encontra-se exposto esse concreto.

O concreto normal é melhor condutor de calor do que os concretos leves, e sendo assim é usual relacionar o coeficiente de condutividade térmica dos concretos a seus respectivos valores de massa específica, os quais, por sua vez, dependem da composição mineralógica dos agregados naturais utilizados.

b) Calor específico

O calor específico é definido como a quantidade de calor necessário para aumentar a temperatura de uma unidade de massa de um material em um grau centígrado. Nos concretos comuns, varia com a temperatura e com o teor de água entre limites relativamente estreitos, de 0,20 a 0,25 kcal/kg °C. Esse valor é utilizado no cálculo da evolução térmica do concreto em grandes massas durante a cura, e representa sua capacidade térmica. Ele é pouco influenciado pela natureza mineralógica do agregado, mas afetado diretamente pelo teor de umidade do concreto, e seu valor aumenta com o acréscimo de temperatura e com a diminuição da massa específica do concreto.

TABELA 9.2 Valores de coeficiente térmico médio de diferentes tipos de concreto

Material	Coeficiente de condutibilidade (W/m · K)	Coeficiente de transmissão de calor (W/m² · K)	
		Parede (0,10 m)	Parede (0,15 m)
Concreto comum (2400 kg/m³)	1,75	4,40	—
Concreto leve com argila expandida (2000 kg/m³)	1,39	3,66	—
Concreto leve com argila expandida (1800 kg/m³)	1,06	3,29	—
Concreto leve com argila expandida (1600 kg/m³)	0,94	3,25	—
Alvenaria de tijolos maciços	—	3,70	—
Alvenaria de tijolos maciços revestidos com argamassa	—	—	3,13
Alvenaria blocos cerâmicos 8 furos	—	2,99	—
Alvenaria blocos cerâmicos 8 furos revestidos com argamassa	—	—	2,24
Alvenaria de blocos de concreto revestidos com argamassa	—	—	2,78

O calor específico é determinado por métodos elementares da física, conforme a seguinte equação:

$$c = Q/(m \cdot \Delta\theta) \text{ ou } c = C/m$$

(Normalmente, esta fórmula é apresentada como $Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta$)

Sendo:

c: calor específico (cal/g°C ou J/kg · K);

Q: quantidade de calor (cal ou J);

M: massa (g ou kg);

$\Delta\theta$: variação de temperatura (°C ou K);

C: capacidade térmica (cal/°C ou J/K).

c) Dilatação térmica

O coeficiente de dilatação térmica do concreto é definido como a variação na unidade de comprimento por grau de temperatura, e a norma NBR 12815:2012 estabelece o método para a sua determinação.

Esse coeficiente é uma grandeza que varia em função das proporções da mistura e depende do tipo de cimento utilizado, da natureza petrográfica dos agregados, do grau de umidade e das dimensões da seção transversal da peça analisada.

Os dois constituintes principais do concreto, a pasta de cimento e o agregado, apresentam coeficientes de dilatação térmica diferentes, resultando para o concreto um valor intermediário.

De acordo com os resultados de ensaios, os concretos com alto consumo de cimento têm coeficientes de dilatação térmica maiores que os de menor consumo. Admite-se que o coeficiente de dilatação nos concretos varie de $7,4 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ a $13,1 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

A NBR 6118:2014 estabelece que, para efeito de análise estrutural, o coeficiente de dilatação térmica pode ser admitido como igual a $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$.

A cura ao ar conduz a valores maiores do que a cura em água e a experiência tem revelado que a dilatação térmica, em razão da velocidade relativamente lenta de propagação das temperaturas no interior do concreto, depende das dimensões da seção transversal do elemento ensaiado.

Cabe, finalmente, uma crítica aos valores determinados experimentalmente para o coeficiente de dilatação do concreto: simultaneamente com a deformação térmica ocorre a perda de água resultante da elevação de temperatura, a qual, por sua vez, causa uma retração volumétrica, a deduzir do coeficiente real.

As dilatações térmicas obrigam a realização de juntas de dilatação nas estruturas monolíticas de concreto simples ou armado. De acordo com a NBR 6118:2014, “as juntas de dilatação devem ser

previstas pelo menos a cada 15 m. No caso de ser necessário afastamento maior, devem ser considerados no cálculo os efeitos da retração térmica do concreto (como consequência do calor de hidratação), da retração hidráulica e das variações de temperatura”.

d) Resistência a temperaturas elevadas

O comportamento do concreto na situação de incêndio é considerado em profundidade no Capítulo 13. Neste capítulo, são analisadas as suas propriedades quando submetido a temperaturas razoavelmente elevadas, porém mais ou menos estáveis, como no caso de chaminés, cubas de uso industrial e bases de caldeiras, casos em que a elevação da temperatura é gradual; ou pode também ser submetida a temperaturas elevadas, rapidamente alcançadas e ainda sujeitas a grandes variações, inclusive choques térmicos de resfriamento. No primeiro caso, a estrutura já destinada a operar em temperaturas elevadas comporta-se de maneira aceitável, exigindo-se alguns cuidados apropriados no projeto. No segundo caso, a estrutura é submetida acidentalmente a severas condições agressivas, resistindo bem ou mal, conforme suas características próprias e a gravidade da ocorrência. Para se analisar esse comportamento, em ambos os casos, faz-se necessário examinar inicialmente o comportamento dos diversos constituintes do concreto em face das variações de temperatura, o que se faz a seguir.

a) Água

A água contida no concreto se apresenta em três condições diferentes:

- água ligada quimicamente, que participou na hidratação dos constituintes anidros do cimento;
- água ligada fisicamente, adsorvida, água zeolítica e água de cristalização;
- água no estado livre, que ocupa parcialmente os poros por capilaridade e porosidade.

Quando a temperatura excede $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$, ocorre a evaporação da água livre e de uma parte da água ligada fisicamente. Nessa altura, as resistências mecânicas pouco se alteram. Essa desidratação conduz, entretanto, a uma diminuição de volume, uma retração, que se traduz no aumento do risco de ocorrência de microfissuras.

Se a temperatura se mantiver abaixo de $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$, a composição química dos diferentes constituintes do concreto não é alterada. A perda de água fica limitada às parcelas fisicamente ligadas, sendo a água de constituição da portlandita (hidróxido de cálcio) só eliminada em temperaturas superiores a

400 °C. Ocorre, entretanto, uma queda apreciável nas resistências à compressão e à tração de um concreto convencional com o aumento das temperaturas em relação ao mesmo concreto à temperatura ambiente. Em temperaturas acima de 300 °C, a queda na resistência mecânica é bastante acentuada, chegando, por exemplo, a representar somente 20 % da resistência à tração e 50 % da resistência à compressão a 500 °C com relação aos valores em temperatura ambiente.

b) Cimento

Nos casos em que se empregam cimento Portland comum e agregados usuais, o concreto conserva suas qualidades mecânicas, embora já reduzidas, até uma temperatura entre 250 e 300 °C; em temperaturas mais elevadas, aconselha-se a utilização de cimento cuja hidratação não produza muita portlandita (hidróxido de cálcio), como no caso dos cimentos aluminoso ou pozolânico.

Estando a portlandita ainda não combinada após o processo de hidratação do cimento, ela poderá ser transformada em óxido de cálcio na temperatura de 400 °C e, após o contato com a água, poderá ser novamente hidratada, expandindo-se no interior do concreto, causando fissuração interna.

O teor de magnésio tem também sua importância, pois pode desenvolver fenômenos de inchamento em caso de desidratação e reidratação sucessivas.

Na temperatura de 900 °C, a matriz cimentícia se encontra em risco de destruição, mas os efeitos são menos graves e ocorrem mais lentamente do que a tendência dos agregados a se dilatarem e provocarem o aparecimento de fissuras.

c) Agregados

A natureza petrográfica do agregado e sua porosidade exercem influência no comportamento do concreto exposto a alta temperatura. Sua composição mineralógica determina a dilatação térmica diferencial entre o agregado e a pasta de cimento que o envolve, acarretando prejuízos à resistência na zona de transição entre ambos.

Os diferentes constituintes do concreto apresentam coeficientes de dilatação desiguais, resultando em fraca resistência às elevações de temperaturas quando os agregados têm coeficientes mais elevados. Quando a temperatura é elevada lentamente e não ultrapassa 300 °C, os agregados silicosos contendo quartzo, como granito e arenito, são adequados porque a transformação do quartzo da forma α para β somente ocorre a cerca de 570 °C, com uma expansão súbita da ordem de 0,85 % acarretando fissuração na zona de transição pasta-agregado. No caso dos agregados de composição calcária, bem mais resistentes, a cerca de 900 °C podem se decompor, liberando CO_2 , CaO e MgO , podendo também provocar fissuras no concreto.

Na Figura 9.1, apresenta-se a influência do tipo de agregado utilizado no concreto na sua resistência à compressão, variando-se a temperatura.

d) Desempenho do concreto submetido ao fogo

O concreto apresenta boas características no que se refere a resistência ao fogo, pois, ainda que exposto a temperaturas elevadas por razoável período, permanece apresentando desempenho satisfatório comparativamente ao aço, por exemplo, mantendo sua

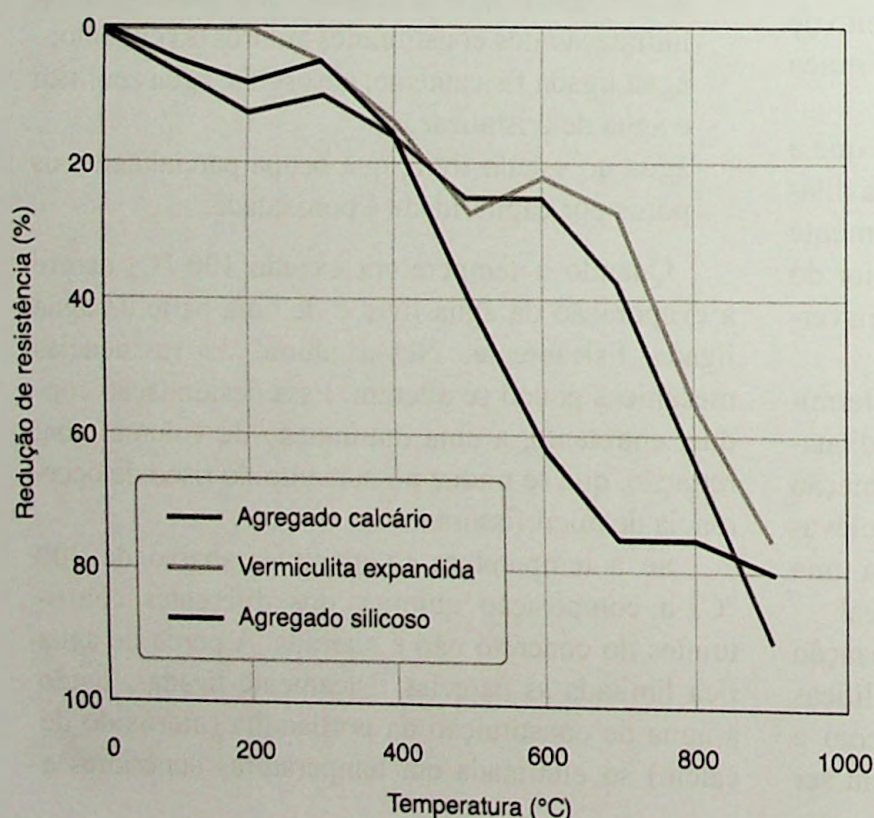


FIGURA 9.1 Redução da resistência em função do tipo de agregado. Fonte: adaptada de Neville (1997).

capacidade de suporte de cargas, resistência à penetração das chamas por não expelir gases tóxicos e resistência à transferência de calor, condição de grande importância quando utilizado como proteção ao aço.

O que se exige do concreto estrutural é que sua capacidade resistente seja preservada sob ação de exposição ao fogo durante um tempo estabelecido, além de se evitar o colapso da estrutura sem que seja possível a tomada de medidas protetivas aos usuários de um edifício, por exemplo.

O combate a incêndio a partir da aplicação de água equivale a um resfriamento brusco, acarretando um choque térmico com grande redução de resistência do concreto por conta dos elevados gradientes térmicos gerados, que favorecem a fissuração por contração a partir da superfície do elemento exposto.

Grande atenção deve ser dada por parte dos profissionais a estruturas industriais sujeitas à ação de elevadas temperaturas, como base de caldeiras e fornos que trabalham continuamente por longos períodos. Nesse caso, além da opção pelo uso de agregados naturais de origem calcária ou mesmo leves artificiais, devem-se evitar agregados silicosos.

Deve-se ter em consideração, de forma adicional, que o avanço dos ensaios de termogravimetria em materiais cimentícios demonstrara que os compostos resistentes das pastas de concretos (CSH) iniciam sua degradação ao atingirem temperaturas da ordem de 200 °C, quando já há água combinada sendo eliminada pelo calor; o hidróxido de cálcio (ou portlandita), composto também importante dentro da estrutura, é desagregado em temperaturas entre 400 e 550 °C; por fim, o carbonato de cálcio perde sua estabilidade química quando o fogo atinge 850 a 900 °C. Por isso, mesmo que existam tabelas de tempo de resistência do concreto ao fogo e de diminuição de resistência com o aumento da temperatura, considera-se que uma estrutura de concreto estará seriamente abalada já em incêndios de baixas temperaturas. Essas tabelas são mais úteis para indicar tempos aproximados para evacuação do edifício. Por isso, a reutilização de estruturas de concreto que sofreram incêndio deve ser minuciosamente avaliada e projetada por especialistas, para evitar riscos à integridade física de futuros ocupantes.

O comportamento do concreto na situação de incêndio é considerado em profundidade no Capítulo 13.

9.2.5 Retração e Expansão

A variação dimensional de um elemento de concreto que ocorre a partir do início de pega do cimento até

o seu endurecimento, quando adquire sua condição de equilíbrio com o ambiente, mesmo sob ausência de qualquer esforço aplicado, pode resultar em uma retração ou uma expansão do seu volume inicial.

A retração consiste na diminuição de dimensões provocada pela secagem do concreto durante a fase de hidratação do cimento, quando então adquire resistência aos esforços atuantes no elemento, e a expansão consiste no aumento de dimensões deste quando em meio úmido ou submerso. Essas duas variações de volume são expressas por meio de uma deformação em determinada direção, relativamente à dimensão inicial.

Essas variações de volume ocorrem durante o endurecimento do concreto, mesmo sob temperatura constante, sendo decorrentes da consolidação entre os seus constituintes promovida pelas ligações entre pasta e agregados e da saída de água por evaporação através da superfície em contato com a atmosfera.

Na fase de endurecimento do concreto, o produto da reação de hidratação dos diferentes compostos do cimento pode resultar em um volume inferior ao de cada constituinte na sua forma anidra. A água adsorvida junto às lamelas das fibras cristalinas dos silicatos de cálcio hidratados interfere na distância entre elas e a retração decorre do teor de água à forma zeolítica que a pasta possa conter, dando origem à retração autógena, decorrente da contínua hidratação da matriz cimentícia, mesmo sem a ocorrência de trocas de umidade com o ambiente exterior.

Outra alteração de volume no concreto endurecido resulta do movimento da água contida nos poros abertos à superfície, a qual pode sair por evaporação ou penetrar em seu interior através dos capilares interconectados, responsáveis pela permeabilidade do concreto.

Também a carbonatação dos compostos hidratados do cimento, provocada pela combinação do dióxido de carbono presente na atmosfera, pode originar sólidos na forma de carbonatos, com volume inferior à soma daqueles ocupados inicialmente pelos hidróxidos, constituindo a chamada retração por carbonatação.

Esses fenômenos que levam à ocorrência de retração no concreto durante sua secagem e a retração de caráter autógeno podem ser considerados os mais importantes e são responsáveis pelo aparecimento de fissuras no concreto endurecido, decorrentes das tensões de tração geradas pela contração da matriz cimentícia em relação ao “esqueleto” constituído

pelos agregados ou da própria disposição das armaduras existentes.

Essas fissuras constituem-se em caminhos preferenciais por onde agentes atmosféricos, especialmente o gás carbônico, penetram e se combinam com os compostos hidratados do cimento, levando à despassivação das armaduras de aço no interior do concreto, promovendo a corrosão em presença de umidade ou de outros íons agressivos.

Pode-se considerar que a retração do concreto seja afetada por variados fatores, como: dimensão dos elementos moldados; teor de água adicionado ao concreto fresco; teor de cimento adotado no traço; natureza e granulometria dos agregados utilizados; tempo de cura úmida e umidade do ambiente; composição do cimento; presença de aditivos e adições, entre outros.

9.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

As resistências que se determinam no concreto se assemelham às dos demais materiais de construção, como tensões de ruptura provocadas por estados simples, duplos ou triplos de tensões normais e as resistências a corte, choque, fadiga, desgaste e aderência. Algumas são normalmente determinadas enquanto outras são obtidas em casos especiais ou para estudos básicos das propriedades do material, por exemplo, sua tensão sob carga constante (fluência) e a resistência ao cisalhamento. Aqui, será dedicada maior atenção ao estudo das tensões de ruptura à compressão uniaxial e tração simples, por resultarem em dados bastante significativos ao estudo da constituição do concreto, suas características e propriedades desejáveis.

As características e propriedades dos constituintes do concreto já foram avaliadas nos capítulos anteriores, como a do tipo de cimento utilizado, a composição do clínquer, suas adições, finura e tipos de aditivos, embora outros inúmeros fatores influenciem nos resultados de resistência mecânica e desempenho do concreto.

As determinações por meio de ensaios são influenciadas pela maneira como estes são realizados e em particular pela forma e dimensões dos espécimes, aparelhagem, natureza das superfícies que recebem a ação das cargas, condições de moldagem e cura do espécime, velocidade de aplicação da carga e mesmo teor de umidade do corpo de prova na hora do ensaio.

As dimensões do espécime ensaiado exercem significativa influência sobre o valor da tensão de ruptura

obtida, que depende da máquina utilizada no ensaio por conta da deformabilidade do prato e da velocidade de incremento da tensão aplicada. As faces do corpo de prova devem ser apoiadas sobre placas deformáveis no contato com o prato da máquina de ensaio para evitar o acúmulo pontual de tensão. A dispersão dos resultados obtidos diminui à medida em que se aumentam as dimensões do espécime ensaiado.

9.3.1 Resistência à Compressão

A resistência característica de projeto (f_{ck}) é o valor que se adota no projeto para a resistência à compressão como base dos cálculos para o dimensionamento da estrutura, com uma confiabilidade acima de 95 %.

O controle estatístico do concreto por amostragem parcial é definido conforme a NBR 12655:2022, em que são retirados exemplares de algumas betonadas de concreto. As amostras devem ser de no mínimo seis exemplares para os concretos com resistência até 50 MPa, e 12 exemplares para os concretos com resistência acima de 50 MPa, conforme define a NBR 8953:2015:

a) Para os lotes com número de exemplares igual ou maior que 6 e menor que 20, o valor estimado da resistência característica à compressão (f_{ckest}) na idade determinada é de:

$$f_{ckest} = 2 [(f_1 + f_2 + \dots + f_{m-1}) / (m-1)] - f_m$$

em que:

$m = n/2$; f_1, f_2, \dots, f_m = valores da resistência à compressão dos exemplares em ordem crescente, desprezando-se o valor mais alto de n , se for ímpar.

Não se deve tomar para f_{ckest} valor inferior ao do espécime ensaiado multiplicado por um coeficiente de minoração que varia conforme o número de corpos de prova considerados na tabela constante na norma.

b) Para lotes com mais de 20 espécimes:

$$f_{ckest} = f_{cm} - 1,65 S_d$$

em que:

f_{cm} é a resistência média dos exemplares, em MPa.

S_d é o desvio-padrão da amostra com n espécimes, calculado com um grau de liberdade a menos no denominador. A determinação das características do concreto endurecido é realizada com base em corpos de prova moldados e curados ao longo do tempo e em determinadas condições de umidade e temperatura.

No Brasil, os corpos de prova têm formato cilíndrico e prismático e suas dimensões são fixadas na norma NBR 5739:2018.

A moldagem dos corpos de prova nas formas é feita manualmente, sendo compactados em camadas sobrepostas, por meio de golpes por soquete padronizado e de modo a não ultrapassar a espessura da camada sob moldagem ou, ainda, por vibrador de imersão de diâmetro adequado ou mesa vibratória. Após preenchimento total do molde, promovem-se o acabamento da superfície superior e a proteção para que não haja perda da água de amassamento do concreto por evaporação superficial com uso de lâmina plástica em local protegido de agentes atmosféricos (chuva, ventos, insolação).

Os corpos de prova no período mínimo de 16 horas e máximo de 72 horas são desmoldados e levados ao laboratório para cura final em câmara úmida. O tempo definido para a ruptura dos corpos de prova pode ser fixado de 24 horas, 3, 7, 14, 28 dias ou mais, caso haja necessidade, para verificação de resistência a maiores idades. A Tabela 9.3 apresenta comparação aproximada da resistência à compressão entre as diferentes idades.

As variáveis que intervêm na resistência à compressão do concreto são influenciadas pelos parâmetros seguintes:

- características e propriedades dos materiais utilizados;
- valor da relação água/cimento;
- dimensão máxima dos agregados;
- método e duração da cura (cura úmida, cura com película superficial, cura submersa ou cura a vapor);
- influência da idade do ensaio e estado em que foram mantidos os corpos de prova.

A norma NBR 8953:2015 se aplica a concretos leves, normais ou pesados, utilizados em elementos de concreto simples, armado ou protendido, preparados a partir de mistura de cimento Portland como ligante, agregados, água e, eventualmente, aditivos ou adições, todavia não se aplica a concreto-massa, concreto projetado e concreto sem finos.

Os concretos para fins estruturais são classificados pela NBR 8953:2015 em classes de resistência

variando de 20 até 50 MPa (Grupo I) e de 55 MPa até 100 (Grupo II), conforme a resistência característica à compressão (f_{ck}), determinada a partir do ensaio de corpos de prova moldados de acordo com a NBR 5738:2015 e rompidos conforme a NBR 5739:2018.

Os valores apresentados na NBR 8953:2015 não estabelecem os concretos com classe de resistência inferior a C20, porque estes não são estruturais e, caso sejam utilizados, devem ter seu desempenho atendido conforme NBR 6118:2014 e NBR 12655:2022.

Cita-se ainda o concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC), com resistência à compressão acima de 150 MPa, um material relativamente novo, de elevada tecnologia em relação à composição, produção, desempenho no estado fresco e endurecido, alta ductilidade e excelente durabilidade, que tem sido objeto de estudos mundo afora.

Considerando que o concreto é constituído por diferentes materiais e com variadas resistências, densidades e dimensões, é natural supor que, quanto maior for o volume do espécime ensaiado a uma dada tensão, maior será a probabilidade de o mesmo volume conter elementos com baixa resistência, acarretando que a resistência de um espécime diminui à medida que aumenta sua dimensão (Fig. 9.2). A utilização de espécimes com menores dimensões tem vantagem por maior praticidade, contudo apresenta o inconveniente de provocar maior dispersão de valores e, assim, requerer maior número de corpos de prova para representatividade do concreto ensaiado.

A extração de corpos de prova de elementos estruturais deve levar em conta as dimensões dos espécimes em função das capacidades dos equipamentos utilizados.

Outra condição a ser evidenciada refere-se à dimensão transversal do corpo de prova, pois a tensão de ruptura à compressão depende da altura do prisma que está sujeito a esta força.

No caso do concreto, a influência da altura do espécime (h) com relação ao seu diâmetro (d) está representada na Tabela 9.4, possibilitando a correção da tensão de ruptura à compressão em função da altura do cilindro.

TABELA 9.3 Coeficiente de redução da resistência à compressão em função da idade do concreto

	Idade do concreto (dias)				
	3	7	28	90	360
$f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$	0,40	0,65	1,00	1,20	1,35
$f_{ck} > 50 \text{ MPa}$	0,55	0,75	1,00	1,15	1,20

Observação: o endurecimento do concreto vai depender das características/composição do cimento utilizado no concreto.

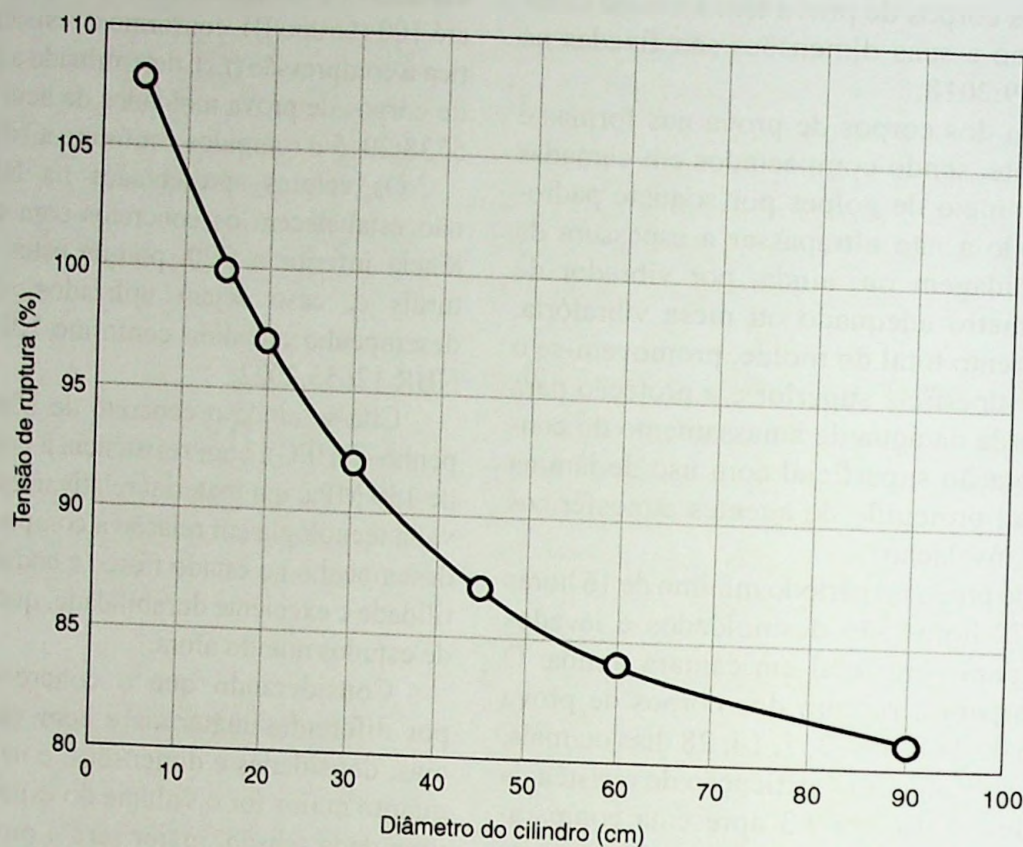


FIGURA 9.2 Relação da tensão de ruptura à compressão de cilindros [relação altura/diâmetro (h/d) = 2].

TABELA 9.4 Coeficientes para correção da tensão de ruptura à compressão em função da relação entre altura e diâmetro do espécime

Relação h/d	Fator de correção	
	ASTM C42-68	BS 1881:1952
2,00	1,00	1,00
1,75	0,99	0,97
1,50	0,97	0,95
1,25	0,94	0,92
1,00	0,91	0,89

A aplicação desses coeficientes para a obtenção dos valores da tensão à compressão é muito útil no caso de ensaios realizados em corpos de prova retirados de elementos estruturais de uma construção existente, como lajes, vigas, pilares blocos e outros, com dimensões variáveis e que dificilmente se ajustam a uma relação $h/d = 2$.

9.3.2 Resistência à Tração Simples

A aplicação de uma força de tração pura, exercida sobre o corpo de prova, é dificultada em razão das tensões secundárias decorrentes da excentricidade introduzida pelos dispositivos de aplicação das forças por ocasião do ensaio.

A determinação da resistência à tração do concreto também oferece subsídios ao entendimento sobre o comportamento do concreto armado mesmo quando os procedimentos de cálculo não levam em conta as contribuições do concreto, e sua importância diz respeito à fissuração, a qual decorre de uma ruptura por tração na região mais solicitada do elemento sob carga e que vai comprometer a continuidade da estrutura e dar margem à sua deterioração, facilitada pela entrada de agentes agressivos ao interior que irão iniciar a despassivação e a corrosão das armaduras metálicas.

A tensão de tração do concreto é afetada pelas características do agregado utilizado. Os provenientes de rochas calcárias, pela composição mineralógica e afinidade com o aglomerante, apresentam valores 20 % superiores ao obtido com uso de outros agregados como seixos (pedregulhos) ou escória; no caso de concreto produzido com agregados graníticos, esse valor pode chegar a ser 25 % superior. Tal efeito decorre da influência do calcário no desenvolvimento das ligações epitaxiais com o cimento, a partir das reações de hidratação e formação dos silicatos de cálcio hidratados da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado. Condições semelhantes para a melhoria dessas ligações na zona de transição entre a pasta e o agregado também ocorrem

quando se utiliza no concreto fresco a adição da sílica ativa e metacaulim, vindo a contribuir indiretamente na melhoria da resistência à tração do concreto.

Métodos para determinação da resistência à tração do concreto

Podem ser adotados três diferentes métodos para a obtenção da resistência à tração do concreto, sendo o primeiro deles não normalizado no Brasil, e que adota procedimentos que permitem encontrar a resistência direta à tração, em que o corpo de prova possui uma área central menor do que nas bordas fazendo que, sob a força axial aplicada nas extremidades, a ruptura ocorra nesta região central.

O segundo método consiste em se determinar a resistência à tração por meio da flexão de corpo de prova prismático, conforme a NBR 12142:2010, sendo que a máquina de ensaio deve possuir um dispositivo de flexão adequado para que a força seja aplicada centrada e perpendicularmente às faces superior e inferior do espécime. Esse ensaio exige um controle adequado do ponto de aplicação das forças no terço médio da face superior do espécime, o qual deve apresentar as superfícies externas perfeitamente planas para o contato adequado do corpo de prova com os dispositivos (cutelos) que transmitem as cargas e os roletes de apoio posicionados nas extremidades.

O terceiro método, adotado em todo o mundo e conhecido como *brazilian test*, foi desenvolvido pelo pesquisador brasileiro Fernando Lobo Carneiro e apresenta grande facilidade de execução, pois os espécimes submetidos ao ensaio podem apresentar as mesmas características e dimensões dos utilizados no ensaio de compressão axial.

A aparelhagem para esse teste está definida pela NBR 5739:2018 e pela NBR 7215:2019, sendo que a moldagem dos corpos de prova é determinada pela NBR 5738:2015. Outra condição possível é que os

espécimes podem ser extraídos da própria estrutura por meio de brocas diamantadas e ensaiados no próprio local da obra através de máquina portátil usada no ensaio à compressão.

Segundo a NBR 7222:2011, o ensaio consiste basicamente em colocar um corpo de prova na posição horizontal apoiada por duas chapas de madeira sobre o prato da máquina de compressão, conforme se verifica na Figura 9.3. Deve-se aplicar a carga sem choques e de forma contínua, com crescimento constante da tensão de tração, a uma velocidade de 0,05 MPa/s até a ruptura do corpo de prova.

A resistência à tração por compressão diametral é obtida através da equação a seguir:

$$f_{ct} = 2F / \pi \cdot L \cdot d$$

em que:

f_{ct} = resistência à tração indireta (MPa);

F = força aplicada (N);

L = comprimento do corpo de prova (mm);

d = diâmetro do corpo de prova (mm).

O resultado de tração nesse ensaio não é direto, pois o cilindro solicitado à compressão diametral não se encontra em estado uniaxial, já que o diâmetro do corpo de prova não está submetido apenas a tensões de tração.

Conforme referido anteriormente, a determinação da resistência à tração do concreto pode ser obtida através dos diferentes métodos citados, podendo-se correlacionar os resultados segundo a Tabela 9.5.

9.3.3 Comportamento Elástico

O comportamento do concreto quando submetido a tensão é influenciado pelas características de seus constituintes principais: a pasta de cimento e os agregados. O resultado apresentado pelo concreto quando submetido à compressão uniaxial corresponde a uma

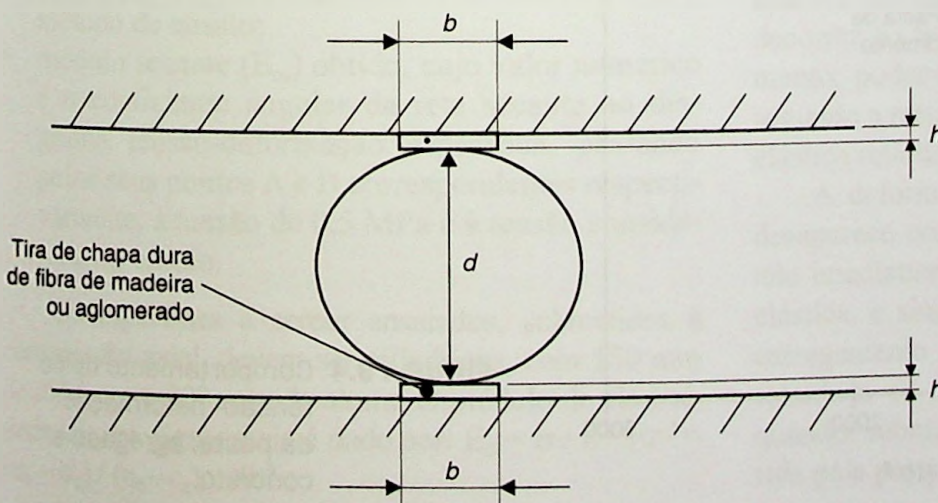


FIGURA 9.3 Ensaio brasileiro de tração. Fonte: NBR 7222:2011.

TABELA 9.5 Relação entre resultados de ensaios à tração

Natureza do ensalo	Coefficientes para conversão do ensalo compressão diametral de cilindros 15 x 30 em outros ensalos	Coefficiente correlação
	Valor médio	Limites de variação
Compressão diametral de cilindros 15 x 30 cm	1,00	-
Flexão simples de prismas com 15 x 15 cm ² com 2 cargas nos terços médios (45 cm entre apoios)	1,50	1,35 a 1,65
Flexão com carga concentrada no centro do vão do prisma 15 x 15 cm ²	1,70	1,55 a 1,85
Tração pura	0,86	0,65 a 1,32

condição intermediária, conforme consta na Figura 9.4, na qual é representada a variação da tensão aplicada e a correspondente deformação do agregado e da pasta de cimento, considerados separadamente.

O comportamento da pasta e do agregado pode ser considerado linear, enquanto o do concreto sofre variação significativa quando se impõe velocidade constante do carregamento. Isso se deve à evolução da microfissuração interna do concreto, e que se processa paulatinamente à medida que a tensão aumenta, desenvolvendo-se na zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado.

A ruptura nas ligações entre a pasta de cimento e o agregado passa a ser notada quando atinge 30 % do

valor da carga última de ruptura e, à medida que sofre o incremento do carregamento, há uma progressão da fissuração até que ocorra a falência final do concreto.

Todos os fatores que intervêm sobre a melhoria das ligações entre a matriz de cimento hidratada e os agregados são responsáveis pelos ganhos de desempenho e resistência do concreto no seu estado endurecido. A quantidade e a medida da abertura das fissuras originadas na zona de transição entre pasta de cimento e agregado dependem, entre outros fatores, das características de exsudação apresentadas anteriormente na fase inicial de endurecimento do concreto, do desenvolvimento das ligações em nível cristalino na zona de transição entre pasta e agregado

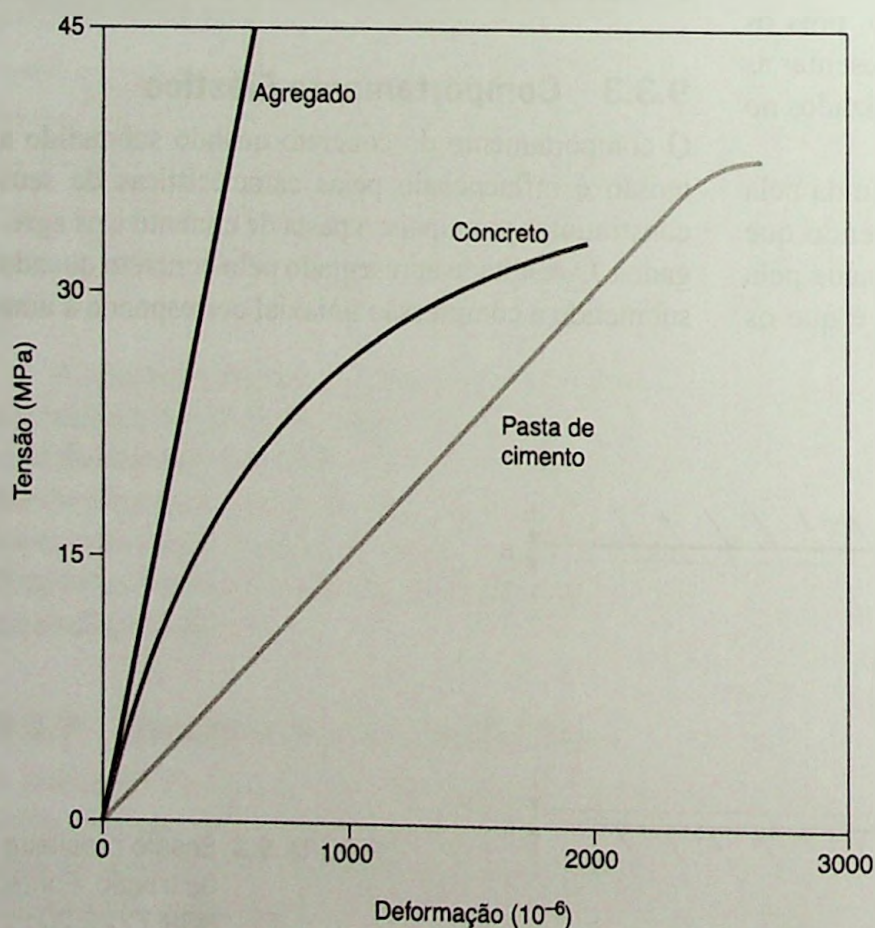


FIGURA 9.4 Comportamento típico tensão-deformação da pasta, agregado e concreto.

que levam ao ganho de resistência, e da efetividade da cura desse concreto até que atinja as propriedades desejadas ao estado endurecido.

Ultrapassando-se os 30 % da última carga do concreto sob tensão, começam a aumentar a quantidade, a extensão e as medidas das aberturas das microfissuras na zona de transição, fazendo com que a proporcionalidade entre tensão e deformação deixe de ocorrer e a curva comece a se desviar sensivelmente de uma linha reta. Até os 50 % da tensão, ocorre uma condição estável no desenvolvimento da microfissuração, e ultrapassado esse estágio inicia-se a formação de fissuras na própria matriz cimentícia, evoluindo de modo que, a partir de 75 % da carga, a proliferação e a propagação da fissuração levarão ao desenvolvimento de deformações muito grandes, indicando que o sistema caminha ao colapso por conta da rápida propagação de fissuras tanto na matriz cimentícia como na sua zona de transição com os agregados.

Fica compreensível que a preocupação por parte do responsável pela produção de um concreto deve recair na qualidade e efetividade das ligações entre a matriz cimentícia e os agregados que o integram, pois o resultado quanto à sua resistência às tensões e à sua durabilidade nas condições em serviço estarão intimamente relacionadas com essas propriedades no nível da sua microestrutura.

9.3.3.1 Módulo de deformação

Considerando que a curva tensão \times deformação não é linear para o concreto, são estabelecidas diferentes formas de representação de seu valor conforme a norma NBR 8522:2021:

- módulo tangente (E_{ci}), ou módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente à origem ou inicial, que é considerado equivalente ao módulo de deformação secante ou cordal entre 0,5 MPa e 30 % f_c , para o carregamento estabelecido nesse método de ensaio;
- módulo secante (E_{cs}) obtido, cujo valor numérico é o coeficiente angular da reta secante ao diagrama tensão-deformação específica, passando pelos seus pontos A e B correspondentes respectivamente, à tensão de 0,5 MPa e à tensão considerada no ensaio.

Os espécimes a serem ensaiados, submetidos à compressão axial, devem ser cilíndricos, com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. O módulo de elasticidade, E_{ci} , em gigapascals é dado por: $E_{ci} = \sigma / \varepsilon \cdot 10^{-3} = (\sigma_b - \sigma_a) / (\varepsilon_b - \varepsilon_a) \cdot 10^{-3}$

em que:

σ_b = tensão maior (0,3 f_c);

σ_a = tensão básica (0,5 MPa);

ε_b = deformação específica média dos espécimes ensaiados sob a tensão maior;

ε_a = deformação específica média dos espécimes ensaiados sob a tensão básica.

O módulo de deformação do concreto varia em função dos valores obtidos pela pasta de cimento e pelo agregado, pelas ligações entre ambos e ainda pela sua interação granulométrica, mais poros e vazios, que afetam a rigidez e a deformabilidade do material, podendo ser considerado um compósito de duas fases sólidas com tensões de ruptura e constantes elásticas diferentes.

Coeficiente de Poisson

A relação entre a deformação lateral e a deformação axial de um concreto submetido à carga uniaxial, dentro do intervalo elástico obtido por meio do ensaio realizado para obtenção de seu módulo de deformação, é denominada coeficiente de Poisson, e seus valores para o concreto comum variam entre 0,15 e 0,20, não havendo constatação de que sofram influência das características como sua relação água/cimento, período de cura, granulometria do agregado ou outras variáveis relativas à dosagem.

9.3.3.2 Fluência

A fluência (*creep*) de um material é o aumento da sua deformação, sob condições de tensão constante.

A ocorrência da fluência no concreto é causada por fenômenos complexos envolvendo movimento da água presente nos seus poros interiores e seu comportamento não linear quando a relação tensão \times deformação ultrapassa os 30 a 40 % da tensão última estabelecida para esse concreto.

A fluência do concreto é a deformação lenta que aparece nos elementos estruturais carregados com o decorrer do tempo e com a manutenção do carregamento, podendo ser decomposta em duas parcelas, segundo a resposta elástica do elemento: deformação elástica retardada e fluência propriamente dita.

A deformação elástica retardada é aquela que desaparece com a retirada do carregamento, porém não imediatamente, como ocorre com a deformação elástica, e sim depois de algum tempo após o descarregamento do elemento. Essa resposta elástica retardada se deve ao comportamento do agregado quando submetido ao aumento da tensão transferida pela pasta de cimento, a partir do andamento da

microfissuração que se desenvolve na zona de transição pasta-agregado.

A fluência propriamente dita consiste na deformação que não desaparece mesmo após a retirada do carregamento, independentemente do tempo decorrido.

A deformação lenta é determinada pela diferença entre a deformação total sob carga constante, subtraída da deformação imediata e da deformação do elemento não carregado, e decorrente da retração por secagem e formação dos compostos hidratados do cimento.

Os movimentos de umidade na pasta de cimento endurecida exercem significativa influência controlando as deformações de retração por secagem e de fluência do concreto, e as inter-relações com os vários constituintes do concreto são bastante complexas. No caso dos agregados, sua natureza petrográfica, granulometria, dimensão máxima, forma e textura das partículas, módulo de deformação, conteúdo de cimento no traço, favorecimento no adensamento do concreto no estado fresco etc. são fatores que influenciam na fluência e sua retração.

O tipo de cimento utilizado, para um dado agregado e determinada dosagem, exerce influência na resistência do concreto e no momento da aplicação da carga a fluência será afetada. Concretos com cimento Portland pozolânico e com escória de alto-forno apresentam fluência mais elevada nas primeiras idades que no caso de cimento sem adições.

Essas adições de escória e pozolanas tendem a aumentar o volume de poros na faixa de 3 a 20 nm, tendo efeitos desfavoráveis quanto à retração e fluência nas primeiras idades; com a formação dos silicatos de cálcio hidratados a maiores idades, essas deficiências são desconsideradas.

A fluência também sofre efeitos da temperatura à qual o concreto é exposto, principalmente quando submetido à cura térmica, na condição de um elemento ainda não submetido a carregamento. Essa situação é típica em indústrias de pré-moldados em que o processo de cura a vapor é empregado, sob temperaturas variando de 50 a 60 °C, propiciando maior ganho de resistência e menor deformação por fluência quando colocado nas condições em serviço.

No caso de elementos de concreto armado como pilares, o aumento da deformação do concreto com o tempo provoca uma contínua redistribuição das tensões entre o aço e o concreto por conta da deformação deste último com o tempo, que transfere parte das tensões a que estava sujeito para o aço, até que se estabeleça uma condição final de equilíbrio, quando a deformação lenta tende a atingir seu valor máximo.

9.4 DURABILIDADE

A durabilidade dos elementos construtivos do concreto simples, armado e protendido, está condicionada ao ataque de agentes agressivos a que estejam sujeitos durante a sua vida em serviço. É um conceito que deve ser entendido em termos relativos, por meio do conhecimento quanto ao comportamento desse material, sujeito à deterioração em maior ou menor grau em face de determinadas situações. Estas podem conduzir ao desenvolvimento progressivo, normalmente lento, de patologias que, em um processo contínuo, podem levar a uma desagregação completa.

Esses processos destrutivos podem, desde que as medidas necessárias sejam tomadas a tempo, ser interrompidos sanando-se as causas da degradação progressiva e restaurando-se total ou parcialmente suas condições iniciais quanto a resistência e desempenho. Resulta, então, ser de grande importância o conhecimento do comportamento desse material quando sujeito à ação de agentes deletérios.

As causas e os fatores responsáveis por tais processos agem por diferentes mecanismos sob a ação de agentes agressivos, podendo estes exercer uma ação física, como no caso de dissolução, ou uma ação química decorrente de reação com os compostos hidratados na matriz cimentícia, gerando substâncias expansivas ou, finalmente, exercer uma ação mecânica como a erosão.

Considerando o caso do concreto armado, a sinergia entre o aço e o concreto deve ocorrer tal qual uma simbiose entre dois organismos vivos, que interagem e se complementam mutuamente. Para que ocorra tal condição, uma das principais defesas do concreto é sua compacidade, propriedade que vai possibilitar a proteção requerida pelo aço em seu interior.

Para manter o concreto mais resistente quanto aos ataques externos provocados por agentes agressivos, e que podem comprometer sua integridade e durabilidade, a condição principal consiste em minorar ao máximo os vazios formados durante o processo de endurecimento, envolvendo todas as atividades antecessoras de sua produção, iniciando com a escolha adequada de seus constituintes e sua proporção correta, dos tipos de adições e aditivos utilizados e das operações desenvolvidas durante o lançamento e adensamento da mistura fresca. Adicionalmente, com relação ao concreto armado, o teor de reserva alcalina também é importante, já que esta mantém o pH alto e a armadura passiva (e, portanto, sem apresentar corrosão) por maior período.

Durante a fase inicial de endurecimento é que resultam as fissuras originadas pela retração por secagem e formação de capilares por conta da evaporação da água de amassamento e que não foi combinada com os compostos hidratados do cimento.

Após endurecido, o concreto vai estar sujeito a formação de fissuras decorrentes dos efeitos mecânicos exercidos pelas ações externas que agem sobre a estrutura na qual se encontra integrado.

Pode-se, assim, considerar que todos os vazios e fissuras formados a partir da mistura fresca até a condição de trabalho, após endurecido, constituem vulnerabilidades do concreto, pois permitem a penetração de agentes agressivos em seu interior, que vão comprometer sua durabilidade e afetar a vida útil do ente ao qual se encontra integrado.

A norma NBR 6118:2014 apresenta os níveis de agressividade ambiental que devem ser considerados em função do risco de deterioração da estrutura de concreto exposto aos diferentes agentes atuantes.

Para evitar a instalação de patologias nas construções em concreto, é necessário satisfazer às exigências de durabilidade a partir da definição do projeto, devendo ser observados critérios adequados à obra que ora se realiza, como:

- prever drenagem eficiente de elementos sujeitos à exposição à água;
- evitar formas arquitetônicas e estruturais inadequadas;
- garantir concreto de qualidade apropriada, particularmente nas regiões superficiais dos elementos estruturais;
- garantir cobrimentos de concreto apropriados para proteção às armaduras;
- detalhar adequadamente as armaduras;
- controlar a fissuração das peças;
- prever espessuras de sacrifício ou revestimentos protetores em regiões sob condições de exposição ambiental muito agressiva; e
- definir um plano de inspeção e manutenção preventiva.

Mais detalhes a respeito da durabilidade dos concretos são apresentados no Capítulo 4 – Agregados, Capítulo 13 – Concreto em situação de incêndio e Capítulo 14 – Mecanismos de degradação do concreto.

9.4.1 Exigências quanto à Durabilidade

As estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto, e quando utilizadas

conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante um período mínimo de 50 anos, sem exigir medidas visando sua recuperação, exceto aquelas necessárias para sua manutenção.

Isso fica evidente se considerado que os diferentes materiais utilizados em determinada estrutura de concreto apresentam um tempo de vida útil determinado, em função dos agentes ambientais a que se acha submetida. Por exemplo, os materiais utilizados na impermeabilização de estruturas hidráulicas apresentam resistência limitada à ação de produtos com pH baixo e também a radiação ultravioleta, exigindo manutenções em menores intervalos de tempo.

9.4.2 Vida Útil

Por vida útil de projeto entende-se o período durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto, sem exigir medidas extras de manutenção e reparo; é após esse período que começa a efetiva deterioração da estrutura, com o aparecimento de sinais visíveis como os produtos de corrosão da armadura, desagregação do concreto, fissuras, deslocamentos etc. O conceito de vida útil aplica-se à estrutura como um todo ou às suas partes. Dessa forma, determinadas partes das estruturas podem merecer consideração especial com valor de vida útil diferente do todo e em função do nível de agressividade à qual estão expostas.

9.4.3 Atuação dos Agentes na Deterioração do Concreto

Na consideração da durabilidade, devem ser levados em conta os mecanismos mais importantes de envelhecimento e deterioração da estrutura de concreto, relacionados a seguir:

- a) Lixiviação por ação de águas puras, como água destilada, água de chuva, de lençol freático ou profundo, em regiões silicosas que praticamente não contém sais dissolvidos, e por isso têm a tendência a dissolver a cal liberada pela hidratação dos silicatos de cálcio do cimento, tornando o concreto poroso e diminuindo sua resistência. Ao chegar à superfície, essa cal liberada é carbonatada sob a ação do CO_2 atmosférico, originando as eflorescências superficiais esbranquiçadas. O processo, entretanto, pode ainda evoluir desfavoravelmente quando encontrada uma alta proporção de CO_2 . Nesse caso, a dissolução prossegue com a formação de bicarbonato, sendo este solúvel. O ataque ao concreto por ação de águas puras,

por exemplo, provenientes de fontes graníticas ou de neve, é fato constatado, registrando-se a destruição de aquedutos em prazos excepcionalmente curtos. A corrosão por efeito de excesso de CO_2 no lençol freático tem sido registrada em fundações. Muitas estruturas de concreto mostram a existência desse processo pela presença de depósitos superficiais de coloração branca. Como esse fenômeno está diretamente ligado à circulação das águas pela massa do concreto, torna-se evidente a sua dependência do grau de permeabilidade.

- b)** Expansão por ação de águas e solos que contenham ou estejam contaminados com sulfatos, dando origem a reações expansivas e deletérias com a pasta de cimento hidratado. O ataque do concreto por água sulfatada é assunto amplamente discutido desde o início da utilização moderna dos cimentos Portland. As águas que contêm sulfato de sódio, magnésio, cálcio e amônio agem sobre o concreto por dois mecanismos.

Uma ação mecânica de microfissuração proveniente da cristalização dos sais presentes em consequência da evaporação de água, quando as estruturas são sujeitas à molhagem e posterior secagem de forma intermitente, provoca uma destruição progressiva do concreto pela expansão dos poros em decorrência da cristalização.

No segundo caso, os sulfatos reagem quimicamente com a cal hidratada e o aluminato de cálcio, formando sulfato de cálcio e sulfoaluminato de cálcio, respectivamente. Esses produtos são formados com certa expansão causadora da fissuração e consequente destruição do material. Os sulfatos são os elementos mais agressivos ao concreto e a gravidade desse problema é função do tempo decorrido e da concentração salina presente nas águas agressivas. Os cimentos de baixa proporção de aluminatos são recomendados nas obras sujeitas à ação das águas sulfatadas.

- c)** Expansão por ação das reações entre os álcalis do cimento e sílica de agregados (reação álcali-agregado), que pode ter efeito desagregante e provocar a formação de fissuras com aberturas variando de 0,1 a 10 mm, em casos extremos. A profundidade dessas fissuras pode variar de 25 a 50 mm, prejudicando tanto a aparência como também a vulnerabilidade quanto à penetração de agentes agressivos em seu interior. Também há comprometimento da resistência à compressão do concreto na direção da tensão aplicada. A diferenciação entre as fissuras geradas por esta reação e

as causadas pela ação de sulfatos ou pelo congelamento e degelo fica dificultada. Uma alternativa neste caso consiste em verificar se a fissura originada pela reação dos álcalis passa através das faces das partículas dos agregados e da pasta de cimento que as envolve superficialmente. A limitação do teor de álcalis do cimento pode impedir a ocorrência dessa reação caso o ligante seja a causa principal. O teor mínimo de álcalis a partir do qual pode ocorrer a reação expansiva é de 0,6 % do equivalente em óxido de sódio (Na_2O), e seu valor representa o limite em relação aos cimentos de baixo teor de álcalis. Esse percentual é calculado a partir do valor do teor de óxido de sódio mais 0,658 vez o teor de óxido de potássio (K_2O) presentes no clínquer. Nessas condições, é aconselhável limitar o teor total de álcalis no concreto a um máximo de 3,0 kg na quantidade equivalente em óxido de sódio por metro cúbico de concreto contendo agregado reativo ao álcalis.

- d)** Ação água do mar, exercida pelo movimento das ondas e ciclos de molhagem e secagem que provocam expansão e contração do concreto. As obras marítimas de concreto estão sujeitas a uma contínua ação dos sais presentes nas águas salgadas. O mecanismo de ação da água do mar sobre o concreto é semelhante ao já descrito para as águas sulfatadas, embora muito mais complexo, comportando o processo uma série de estágios intermediários. Os cimentos podem ser classificados em ordem de resistência decrescente à ação agressiva da água do mar, da seguinte maneira: cimentos sulfatados, cimentos aluminosos, cimentos pozolânicos, cimentos metalúrgicos e cimentos Portland. Também aqui valem as recomendações referentes à compacidade e à dosagem direcionadas a se atingir baixa permeabilidade. As prescrições usuais de trabalho em obra marítima são naturalmente exigentes, impondo a utilização de cimentos adequados e cuidadosa elaboração do concreto.

- e)** Ação do gás carbônico exercida pela difusão desse gás no interior do concreto provocando a redução do pH na matriz cimentícia. Esse mecanismo é menos nocivo ao concreto do que ao aço em seu interior e provoca a despassivação da armadura, ocorrendo de maneira significativa em ambientes de umidade relativa abaixo de 98 % e acima de 65 %, ou em ambientes sujeitos a ciclos de molhagem e secagem, possibilitando a instalação da corrosão.

- f) Ação do íon cloro (cloreto) por penetração do cloreto por meio de processos de difusão, de impregnação ou de absorção capilar de águas contendo teores de cloreto, que ao penetrarem no interior dos poros do concreto acarretam a despassivação do aço e dão início à corrosão.

9.5 PROPRIEDADES FRENTE A CONDIÇÕES ESPECÍFICAS

O meio ambiente exerce várias ações que devem ser consideradas no dimensionamento das construções de concreto, exigindo que esse material apresente desempenho compatível com as necessidades impostas pelas atividades desenvolvidas nessas construções, sejam elas caracterizáveis como uma indústria, um edifício, uma obra de arte, uma usina nuclear ou uma hidrelétrica.

A qualidade do concreto passa a ter influência marcante na sua durabilidade e, desse modo, a garantia de desempenho é estabelecida por meio da definição de alguns parâmetros desejáveis para o concreto, como o teor máximo de água estabelecido pela relação *a/c*, os valores das classes de resistência definidas na NBR 8953:2015 para cada condição de agressividade, e a espessura dos cobrimentos mínimos desejáveis às armaduras em cada tipo de ambiente. Além desses parâmetros, outros deverão ser considerados dependendo do tipo de construção e das atividades que nela se desenvolvam, estando elencados a seguir.

a) Resistência à abrasão

A resistência à abrasão é uma característica importante nas superfícies sujeitas à movimentação de cargas. A destruição da estrutura do material se processa quer por rompimento dos grãos do agregado, quer pelo seu arrancamento. A utilização de agregados de maior dureza e tamanho de grão melhora o desempenho quanto ao desgaste. O teor adequado de pasta de cimento Portland, além da presença de adições minerais, pode favorecer a união dos grãos dos agregados à matriz cimentícia. Por outro lado, o acabamento superficial realizado de forma a diminuir o caráter áspero também contribui para a diminuição dos desgastes. Essa melhoria de acabamento superficial em concretos de boa qualidade é mais apropriadamente alcançada por polimento no concreto no estado endurecido do que por alisamento a colher do concreto no estado fresco.

A resistência à abrasão do concreto tem grande importância quando esse material é aplicado em pisos sujeitos ao trânsito elevado de pessoas ou máquinas,

pavimentos de rodovias, estruturas hidráulicas como tanques de tratamento de efluentes com sólidos em suspensão, tubulações de escoamento de águas residuárias, vertedouros etc. Em geral, a resistência à abrasão do concreto cresce com a sua resistência à compressão, e por conta dessa condição existem recomendações técnicas para que um concreto sujeito ao desgaste por abrasão deva apresentar uma resistência à compressão não inferior a 35 MPa, sendo que em alguns casos esse valor deve superar 41 MPa.

Há diferentes ensaios para medir a resistência ao desgaste por abrasão, que consistem em submeter o espécime ao contato direto com o material abrasivo, avaliando posteriormente a perda de massa ou a diminuição de sua espessura, após decorrido o ensaio. A NBR 16974:2022 especifica o método para o ensaio de abrasão em agregados, denominado “Los Angeles” e que consiste em avaliar o desgaste sofrido pelo agregado, quando colocado na máquina juntamente com uma carga abrasiva, submetido a determinado número de revoluções dessa máquina a velocidade de 30 a 33 rpm.

Pode-se utilizar um moinho de bolas revestido com os espécimes do concreto a ser analisado. Outra alternativa é a aplicação de jato de areia incidido sobre o corpo de prova, verificando-se posteriormente a profundidade da cavidade produzida pelo jato e a perda de massa ocorrida.

Existe também a possibilidade de utilização de abrasímetros, equipamentos utilizados para a análise de revestimentos cerâmicos, dotados de um disco giratório sobre o qual é lançado o material abrasivo como areia, promovendo o desgaste superficial das placas de concreto em contato com o disco.

b) Vibração

O concreto, como todos os outros materiais, está sujeito ao fenômeno da fadiga, sofrendo diminuição de sua resistência mecânica sob esforços provenientes de vibrações. Cabe, nesse caso, que seja feita a avaliação do elemento estrutural quanto às faixas de frequências a que estará exposto quando colocado em serviço. Os efeitos das ações por esforços dinâmicos sobre as estruturas de concreto acarretam diferentes comportamentos e devem ser analisados caso a caso. As características físicas e mecânicas do concreto, especialmente seu módulo de deformação, devem ser adequadas para responder às solicitações dinâmicas impostas.

c) Temperatura

As ações das variações de temperatura sobre os elementos estruturais de concreto se fazem sentir em

nosso clima, no Brasil, apenas com o aparecimento de trincas térmicas.

Nos climas temperados, a ação das baixas temperaturas resulta em desagregação do concreto por expansão resultante do congelamento da água presente nos poros do material. Os ciclos de gelo e degelo repetidos propiciam a expansão de volume da água dentro dos vazios do concreto, provocando microfissuração e posterior prosseguimento do processo, quando podem ocorrer deslocamentos e, por fim, a completa destruição do material por desagregação.

d) Agentes químicos

Têm-se construído tanques e reservatórios de concreto para armazenamento de várias espécies de líquidos, alguns dos quais prejudicam a durabilidade do material. Também os pisos de concreto em instalações industriais têm sido deteriorados pela ação de líquidos e outros materiais. Esse assunto é examinado com maior profundidade no capítulo referente às patologias e terapêuticas do concreto, quando serão recomendados tratamentos superficiais convenientes a cada caso.

No estudo da ação dos agentes químicos, cabe algum desenvolvimento dos processos de corrosão da armadura. A antiga crença na estabilidade das armaduras contidas no interior do concreto – justificada pela observação do comportamento da estrutura de concreto armado utilizada em regime de baixos índices de solicitações, com taxas de trabalho relativamente baixas e superdimensionamento das peças – está sendo cada vez mais questionada em razão do progresso verificado na utilização de concretos com elevação crescente das tensões de trabalho e consequente diminuição nas seções das peças. Isso diminui consideravelmente o peso dos elementos e o seu preço; em contrapartida, alguns inconvenientes vão aparecendo, em particular o aumento da fissuração e da corrosão das armaduras. A pré-fabricação, que leva a extremos a redução nas seções, tem causado, por imprudência ou ignorância, acidentes que forcem os investigadores a pesquisar mecanismos de comportamento do material diante de novas condições de uso.

Atualmente, não se põe em dúvida a importância da questão do ataque da armadura, assunto da maior relevância em grande parte dos estudos de obras de concreto armado. A corrosão dos metais é constituída por reações de natureza complexa, químicas ou eletroquímicas, que ocorrem na interface metal-meio ambiente. É um processo de destruição do metal a partir de sua superfície. As reações se resumem, geralmente, a uma perda de elétrons do metal, conhecidas

comumente pelo nome de oxidação. Normalmente, diferencia-se o fenômeno em oxidação química e oxidação eletroquímica.

A corrosão química ocorre por ação direta do elemento oxidante, por exemplo, o oxigênio do ar combinando diretamente com o ferro da armadura. A corrosão direta se faz geralmente pelos gases e líquidos que não são eletrólitos.

A corrosão eletroquímica pressupõe a existência de uma corrente elétrica entre uma parte e outra do metal. Essa corrente elétrica pode ser de origem galvânica, desenvolvida no volume da peça de concreto armado, ou resultar da ação das correntes dispersas eventualmente existentes no solo.

Do ponto de vista prático, é importante caracterizar a corrosão qualitativamente para determinar a origem do ataque. De modo geral, a corrosão uniforme, que se estende por toda a superfície metálica das armaduras, indica a presença de oxidação química. E a corrosão localizada em plaquetas, em pontos ou mesmo a intercrystalina, como também seletiva, isto é, afetando mais certos trechos da armadura do que outros, caracteriza a corrosão de origem eletroquímica.

Na oxidação química, ocorre uma reação de formação de um óxido ou hidróxido metálico. Esses produtos constituem uma película que poderá ou não proteger o metal de posterior ataque, segundo seja permeável ou não. Os óxidos de ferro são relativamente permeáveis, permitindo o prosseguimento da oxidação da armadura.

No mecanismo da corrosão eletroquímica, ocorre a formação de pilhas galvânicas em escala finita ou, muito diminuta, as micropilhas. Nesses elementos galvânicos, o ânodo e o cátodo podem estar na mesma barra da armadura, tudo dependendo de fatores diversos, quais sejam: heterogeneidade do metal, diferença de tensões, orientação granular, pH do concreto, aeração diferenciada no concreto, resultante, por sua vez, de defeitos de execução do mesmo.

Havendo condições que possibilitem a formação das pilhas, galvânicas, e desde que a condutibilidade elétrica do concreto o permita, haverá um transporte metálico do ânodo para o cátodo. Tal processo conduz à formação de óxidos de ferro a certa distância da interface metal-concreto. Não há, no caso, a formação de camada protetora de óxidos que dificulte o prosseguimento da corrosão. Essa é a razão de se considerar a corrosão eletroquímica mais perigosa do que a oxidação química.

Os concretos preparados com cimentos ordinários apresentam pH aproximado de 12 a 12,5,

condição favorável à conservação das armaduras por insuficiência de voltagem desenvolvida nas pilhas galvânicas eventualmente formadas. Nessa situação, a mais comum nas estruturas de concreto, a armadura de aço se encontra passiva. Todavia, o pH do concreto pode baixar a limites da ordem de 7 a 8, em consequência, por exemplo, de percolação sistemática de água que arrasta a portlandita presente (CaOH_2), tornando as condições favoráveis à ocorrência de corrosão eletroquímica. Mais uma vez é salientada a qualidade do concreto como fator essencial na inibição da corrosão nos seus diferentes aspectos.

Do ponto de vista prático, a corrosão das armaduras é evitada quando a permeabilidade delas é baixa e quando a sua camada de recobrimento é relativamente grande (5 cm de espessura realizam proteção plena) e a abertura das fissuras é inferior a 0,4 mm, bem como quando a dosagem do concreto é cuidadosa no estabelecimento de reserva alcalina a partir da incorporação de níveis previamente mensurados de cimentos, já que o hidróxido de cálcio que protege a armadura provém de reações químicas a partir de compostos dos cimentos Portland comuns.

Quando, em meio agressivo, se tem necessidade de diminuir a espessura da camada protetora das armaduras, deve-se proceder à sua impermeabilização superficial protetora. Essa proteção pode ser feita mediante aplicação de silicatos, fluorsilicatos, borrachas, polivinil e silicones, entre outros materiais.

e) Agentes biológicos

O ataque biológico do concreto ocorre em diversas situações nas quais estejam presentes umidade, nutrientes orgânicos, fungos e bactérias ativas. Isso acontece nas instalações industriais de processamento de alimentos e outros produtos orgânicos, em tanques e pavimentos de concreto. É fato conhecido o ataque que sofre o concreto em presença de resíduos de laticínios e matadouros, obrigando a frequentes reparações e até mesmo reconstruções.

Os microrganismos promovem a síntese de ácidos que, por sua vez, dissolvem a cal do concreto, prosseguindo a deterioração até a completa destruição por desagregação. Várias são as espécies de microrganismos já identificados, estando o assunto desenvolvido na literatura especializada. Constitui defesa a esse gênero de ataque a utilização de cimentos com adição de nanopartículas no concreto ou a sua proteção pelos meios usuais de impermeabilização.

f) Condutibilidade elétrica

A condutibilidade elétrica nos concretos parece não oferecer, no momento, interesse apreciável.

Pode-se dizer, contudo, que ela é extremamente variável com a composição e, sobretudo, com a umidade. Para concretos comuns com 300 kg de cimento por metro cúbico, a resistência elétrica varia entre 10^4 e 10^7 ohms/cm², entre as idades de 1 dia e 800 dias, respectivamente. Após esse período, uma umidificação dos corpos de prova conduzirá a resistência ao valor inicial de 10^4 ohms/cm². Para efeito de comparação, a resistividade da ardósia é 10^{11} ohms/cm² e a do mármore é 10^9 ohms/cm². O concreto é, portanto, um mau condutor de eletricidade, não chegando, porém, a ser um isolante.

g) Materiais radioativos

Nas instalações que operam processos físicos acompanhados de produção de radiações e partículas elementares de alta energia, aparelhos de raios X, laboratórios de pesquisa nuclear, pilhas atômicas e indústrias correlatas, sempre se faz necessário construir anteparos e invólucros capazes de absorvê-las para atender principalmente à segurança do elemento humano, reduzindo o risco dos efeitos maléficos consequentes. A absorção das radiações ocorre por dissipação de energia durante seu percurso pelo volume ocupado pelo material, que é dimensionado em função de diversos parâmetros segundo as leis físicas que regulam o fenômeno. O chumbo sempre foi o material utilizado para essa finalidade. Dado, porém, seu elevado preço, procurou-se substituí-lo por outros mais econômicos, abrindo um campo de utilização para o concreto, material que se mostrou capaz de resolver satisfatoriamente tais problemas.

Os concretos para esse fim são, de preferência, aqueles que, utilizando agregados de alta densidade, resultam em misturas também pesadas. De fato, a espessura das paredes de isolamento é, em geral, inversamente proporcional à densidade do concreto. O seu conteúdo de água, quimicamente ligada, contribui também de maneira importante na dissipação da energia e consequente isolamento aos efeitos maléficos das radiações. De modo geral, pode-se dizer que os concretos de massa específica próxima de 4,0 tf/m³ absorvem duas vezes mais as radiações do que os concretos usuais.

Uma das propriedades mais importantes na caracterização de um concreto apropriado para blindagem aos efeitos radioativos é o seu comportamento em temperaturas elevadas. Com o progresso na utilização da energia nuclear, esses elementos são submetidos a temperaturas cada vez mais elevadas. Como já visto, o concreto sofre com a elevação da temperatura, inicialmente uma perda de água livre que, do ponto de vista de capacidade de absorção

radioativa, é inconveniente, e a seguir está sujeito, por várias causas, a fissuração, também indesejável. Sua utilização nesse novo campo de aplicação vai depender, em grande parte, das melhorias que possa alcançar sua capacidade de resistência a elevações de temperatura.

h) Adesão

A adesão em superfícies de concreto endurecido é um problema que ocorre na aplicação de revestimentos, pinturas, reparações e aplicação de sistemas de impermeabilização. De modo geral, as superfícies limpas de concreto são apropriadas a receber satisfatoriamente revestimentos e pinturas. E tal fato ocorre como consequência de acabamento superficial mais ou menos poroso, resultado dos processos de fabricação do produto.

É sabido que um dos fatores mais importantes no sucesso da ligação superficial é o grau das irregularidades presentes. Os concretos realizados com forma de madeira bruta se ligam com mais facilidade aos revestimentos do que os realizados com formas de madeira aparelhada, formas metálicas e plásticas, pois estas últimas conferem à superfície um acabamento bastante liso. Também a tendência na elevação de resistência mecânica dos concretos utilizados estruturalmente, por exemplo, em edifícios altos e obras de arte com valores de 40 a 60 MPa ou mais, vem ocasionando diminuição no volume de poros por conta da alta compacidade desses concretos, o que traz problemas de aderência aos revestimentos argamassados comuns. O nível de porosidade do substrato tem influência fundamental na ancoragem do acabamento, sendo que substratos menos porosos (concretos de menor porosidade por menor relação *a/c*, por exemplo) possuem menor capacidade de receber acabamentos com boa adesão, e vice-versa.

A ligação de concreto novo com concreto velho, essencial nos trabalhos de reparações e acertos, resulta, em geral, em uma união fraca. Isso se deve, em primeiro lugar, à ação da retração que ocorre no endurecimento do concreto novo e que promove movimentação relativa na superfície de união, comprometendo o êxito da ligação. A dilatação diferenciada, mais atuante no volume de concreto novo, geralmente mais próximo da superfície exposta, é também responsável por movimentação relativa na superfície de união. Em regra, esses reparos se destacam em tempo mais ou menos longo.

Para resolver essas dificuldades, é recomendado o emprego de certas resinas à base de látex acrílico ou látex de estireno-butadieno que constituem uma ponte de aderência, integrando o concreto novo à

base existente. Outra possibilidade é a utilização de adesivos à base de resina epóxi, que se têm provado altamente satisfatórios na solução desse problema. Observa-se que a diferença de coeficientes de dilatação dos revestimentos aplicados com relação ao concreto de suporte é sempre o fator mais responsável pela ocorrência de descolamento. É mais ou menos frequente o descolamento de revestimentos de pisos, principalmente de material cerâmico aplicado diretamente sobre lajes de concreto. O material cerâmico normalmente dilata menos do que o concreto, ficando sujeito a tensões elevadas de compressão ao longo de sua superfície quando a temperatura diminui. Nessas condições, qualquer ponto fraco de ligação permite a ocorrência do descolamento, que se manifesta em uma área relativamente grande por inchamento repentino da superfície, que se destaca assumindo uma forma convexa.

l) Propriedades acústicas

O estudo das propriedades acústicas do concreto alcança progressiva importância com respeito a dois aspectos fundamentais: como material de construção de edifícios, seu comportamento sonoro desempenha importante papel na reflexão e reverberação de sons e ruídos ou como isolante ou amortecedor dos mesmos. E, em segundo lugar, o desenvolvimento recente de métodos não destrutivos de qualificação de concretos baseados na determinação de velocidade de propagação de sons e ultrassons veio despertar enorme interesse nesse campo.

Do ponto de vista de tratamento acústico nos edifícios, o concreto usual, estrutural, responde pela propagação das ondas sonoras em proporção relativamente modesta. De fato, a física das construções mostra serem fatores mais importantes nesse problema o comportamento nas paredes de divisões e as aberturas, situando-se esses fatores no complexo do projeto como um todo. O coeficiente de amortecimento desse material estrutural na propagação direta dos ruídos de impacto é muito pequeno. Por isso mesmo, as divisões suportadas por essa estrutura ficam excitadas em quase toda a extensão do edifício, constituindo o melhor fator de defesa a tais inconvenientes a massa dos elementos, que contribui proporcionalmente para o amortecimento desejado.

Com respeito aos sons propagados por via aérea, as paredes e pisos de concreto desempenham papel importante, contribuindo de maneira apreciável para absorção e consequente redução dos níveis energéticos de vibrações sonoras.

A absorção do som por superfícies, paredes e tetos, principalmente, se processa pela dissipação de

energia trazida pelas ondas sonoras incidentes por movimentação de ar contido nos poros do material. Segue daí que esse coeficiente de absorção será, evidentemente, maior nos materiais mais porosos. Com respeito ao concreto, oferecem maior coeficiente de absorção os concretos cavernosos, nos quais o agregado miúdo é eliminado, e os concretos com agregados leves (porosos).

Velocidade do som

A velocidade de propagação do som no concreto tem sido objeto de ensaios que visam a determinar a sua qualidade. É sabido da física que a velocidade de propagação do som em um meio elástico é determinada quando se conhecem o valor do coeficiente de elasticidade e o da densidade do meio.

O fenômeno é de análise bastante complexa, sendo governado por relações relativamente simples quando a forma da onda é considerada plana, o que é lícito supor quando a fonte se encontra bastante distanciada. Nessa situação, a análise do fenômeno em uma única direção, no caso de uma peça longa, conduz à seguinte relação:

$$V = \sqrt{\frac{E_g}{w}}$$

em que V é a velocidade do som (cm/s); E é o coeficiente de elasticidade (kg/cm²); g é a aceleração da gravidade (cm/s²); e w é a densidade (kg/m³).

Quando se trata de um meio de duas dimensões, uma placa, torna-se necessário introduzir um fator corretivo dependente do coeficiente de Poisson:

$$V = \sqrt{\frac{E_g}{w} (1 - \sigma^2)}$$

em que σ é o coeficiente de Poisson.

De modo análogo, em um meio de três dimensões, como uma peça volumosa, a fórmula a ser utilizada é a seguinte:

$$V = \sqrt{\frac{E_g}{w} \cdot \frac{1 - \sigma}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}}$$

Essas expressões valem para qualquer meio elástico e, em particular, são perfeitamente aplicáveis ao concreto. Nesse material, a velocidade de propagação do som atinge valores entre 2500 e 4000 m/s, nos casos mais comuns. O valor da velocidade do som nas peças de concreto cai quando o material é defeituoso. Fissuras e trincas de qualquer origem, interpostas na trajetória do som, e outras deteriorações são fatores

que afetam o valor da velocidade, diminuindo-a. Por outro lado, a armadura presente na trajetória tem influência inversa, ou seja, aumenta a velocidade do som. Os ensaios mostraram que essa influência das armaduras deixa de ser perceptível quando a distância delas à direção principal de propagação da onda é superior a 5 cm.

A medição de velocidade de propagação do som no concreto é realizada mediante aparelho eletrônico de alta precisão, de uso muito fácil e cômodo. Revela esse método uma enorme potencialidade no estudo da qualificação dos concretos. Já foi dito que a auscultação dinâmica é o meio mais prático no exame das estruturas atingidas pelo fogo. A auscultação dinâmica oferece também recurso no exame das características dos concretos mediante ensaios não destrutivos, tratados com maior detalhamento no Capítulo 11.

BIBLIOGRAFIA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5738: Concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5739: Concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7215: Cimento Portland – determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7222: Concreto e argamassa – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8522: Concreto endurecido – determinação dos módulos de elasticidade e de deformação*. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8953: Concreto para fins estruturais – classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência*. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9833*: Concreto fresco – determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10786*: Concreto endurecido – determinação do coeficiente de permeabilidade à água. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12142*: Concreto – determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12655*: Concreto de cimento Portland – preparo, controle, recebimento e aceitação – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12815*: Concreto endurecido – determinação do coeficiente de dilatação térmica linear – método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12818*: Concreto – determinação da difusividade térmica – método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12820*: Concreto endurecido – determinação da condutividade térmica – método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16974*: Agregado graúdo – ensaio de abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- COUTINHO, A. de S. *Fabrico e propriedades do betão*. Lisboa: LNEC, 2006.
- ISAIA, G. C. *Concreto: ciência e tecnologia*. São Paulo: Ibracon, 2011.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2008.
- NEVILLE, A. M. *Properties of concrete*. 5. ed. San Francisco: Prentice Hall, Pearson, 2012.
- NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. São Paulo: Pini, 1997.
- PETRUCCI, E. *Concreto de cimento Portland*. 13. ed. São Paulo: Globo, 1995.
- ROSSIGNOLO, J. A. *Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações*. São Paulo: Pini, 2009.
- WASHA, G. W. *Workability*. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 1998. Cap. 5: Concrete construction handbook.