

ESTRUTURAS DE CONCRETO – CAPÍTULO 2

Libânio M. Pinheiro, Cassiane D. Muzardo, Sandro P. Santos,

Thiago Catoia, Bruna Catoia

Março de 2010

CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO

Como foi visto no capítulo anterior, a mistura em proporção adequada de cimento, agregados, água e, em alguns casos, adições e/ou aditivos resulta num material de construção, o concreto, cujas características diferem substancialmente daquelas apresentadas pelos elementos que o constituem.

Este capítulo tem por finalidade destacar as principais características e propriedades do material concreto, incluindo aspectos relacionados à sua utilização.

2.1 MASSA ESPECÍFICA

Serão considerados os concretos de massa específica normal (ρ_c), entre 2000 kg/m³ e 2800 kg/m³.

Para efeito de cálculo, pode-se adotar para o concreto simples o valor 2400 kg/m³, e para o concreto armado, 2500 kg/m³.

Quando se conhecer a massa específica do concreto utilizado, pode-se considerar, para valor da massa específica do concreto armado, aquela do concreto simples acrescida de 100 kg/m³ a 150 kg/m³.

2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

As principais propriedades mecânicas do concreto são: **resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade**. Essas propriedades são determinadas a partir de ensaios, executados em condições específicas. Geralmente, os ensaios são realizados para **controle da qualidade e atendimento às especificações**.

2.2.1 Resistência à compressão

A **resistência à compressão simples**, denominada f_c , é a característica mecânica mais importante.

Para estimá-la em um lote de concreto, são moldados e preparados corpos de prova segundo a **NBR 5738 – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto**, os quais são ensaiados de acordo com a **NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**.

O corpo de prova padrão brasileiro é o **cilíndrico**, com **15 cm de diâmetro e 30 cm de altura**, e a idade de referência é **28 dias**.

Após ensaio de um **número muito grande** de corpos de prova, pode ser feito um gráfico com os valores obtidos de f_c versus a quantidade de corpos de prova relativos a determinado valor de f_c , também denominada densidade de frequência. A curva encontrada denomina-se **Curva Estatística de Gauss** ou **Curva de Distribuição Normal** para a resistência do concreto à compressão (**Figura 2.1**).

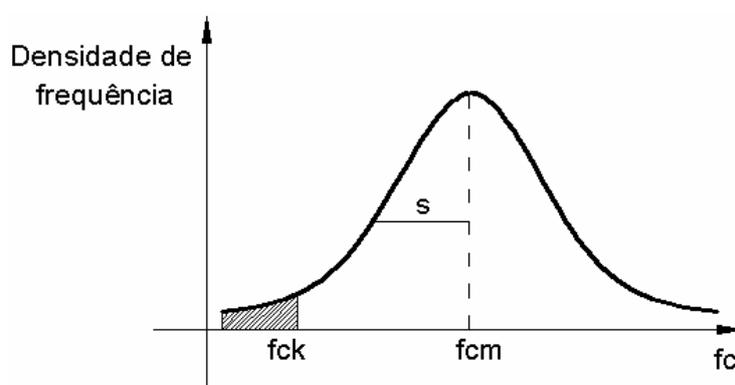


Figura 2.1 – Curva de Gauss para a resistência do concreto à compressão

Na curva de Gauss encontram-se dois valores de fundamental importância: **resistência média do concreto à compressão, f_{cm}** , e **resistência característica do concreto à compressão, f_{ck}** .

O valor f_{cm} é a média aritmética dos valores de f_c para o conjunto de corpos de prova ensaiados, e é utilizado na determinação da resistência característica, f_{ck} , por meio da fórmula:

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,65s$$

O desvio padrão s corresponde à distância entre a abscissa de f_{cm} e a do ponto de inflexão da curva (ponto em que ela muda de concavidade).

O valor **1,65** corresponde ao **quantil de 5 %**, ou seja, apenas 5 % dos corpos de prova possuem $f_c < f_{ck}$, ou, ainda, 95 % dos corpos de prova possuem $f_c \geq f_{ck}$.

Portanto, pode-se definir f_{ck} como sendo o **valor da resistência que tem 5 % de probabilidade de não ser alcançado**, em ensaios de corpos de prova de um determinado lote de concreto.

Como será visto posteriormente, a NBR 8953 define as classes de resistência em função de f_{ck} . Concreto classe C30, por exemplo, corresponde a um concreto com $f_{ck} = 30$ MPa.

Nas obras, devido ao pequeno número de corpos de prova ensaiados, calcula-se $f_{ck,est}$, **valor estimado** da resistência característica do concreto à compressão.

2.2.2 Resistência à tração

Os conceitos relativos à **resistência do concreto à tração direta**, f_{ct} , são análogos aos expostos no item anterior, para a resistência à compressão. Portanto, tem-se a **resistência média do concreto à tração**, f_{ctm} , valor obtido da média aritmética dos resultados, e a **resistência característica do concreto à tração**, f_{ctk} ou simplesmente f_{tk} , valor da resistência que tem 5% de probabilidade de não ser alcançado pelos resultados de um lote de concreto.

A diferença no estudo da tração encontra-se nos tipos de ensaio. Há três normalizados: tração direta, compressão diametral e tração na flexão.

a) Ensaio de tração direta

Neste ensaio, considerado o de referência, a **resistência à tração direta**, f_{ct} , é determinada aplicando-se tração axial, até a ruptura, em corpos de prova de concreto simples (**Figura 2.2**). A seção central é retangular, com 9 cm por 15 cm, e as extremidades são quadradas, com 15 cm de lado.

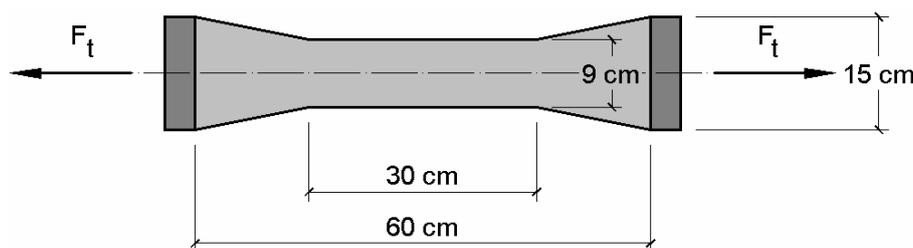


Figura 2.2 – Ensaio de tração direta

b) Ensaio de tração na compressão diametral (splitting test)

É o ensaio mais utilizado, por ser mais simples de ser executado e utilizar o mesmo corpo de prova cilíndrico do ensaio de compressão (15 cm por 30 cm). Também é conhecido internacionalmente como **Ensaio Brasileiro**, pois foi desenvolvido por **Lobo Carneiro**, em 1943.

Para a sua realização, o corpo de prova cilíndrico é colocado com o eixo horizontal entre os pratos da máquina de ensaio, e o contato entre o corpo de prova e os pratos deve ocorrer somente ao longo de duas geratrizes, onde são colocadas tiras padronizadas de madeira, diametralmente opostas (**Figura 2.3**), sendo aplicada uma força até a ruptura do concreto por fendilhamento, devido à tração indireta (**Figura 2.4**).

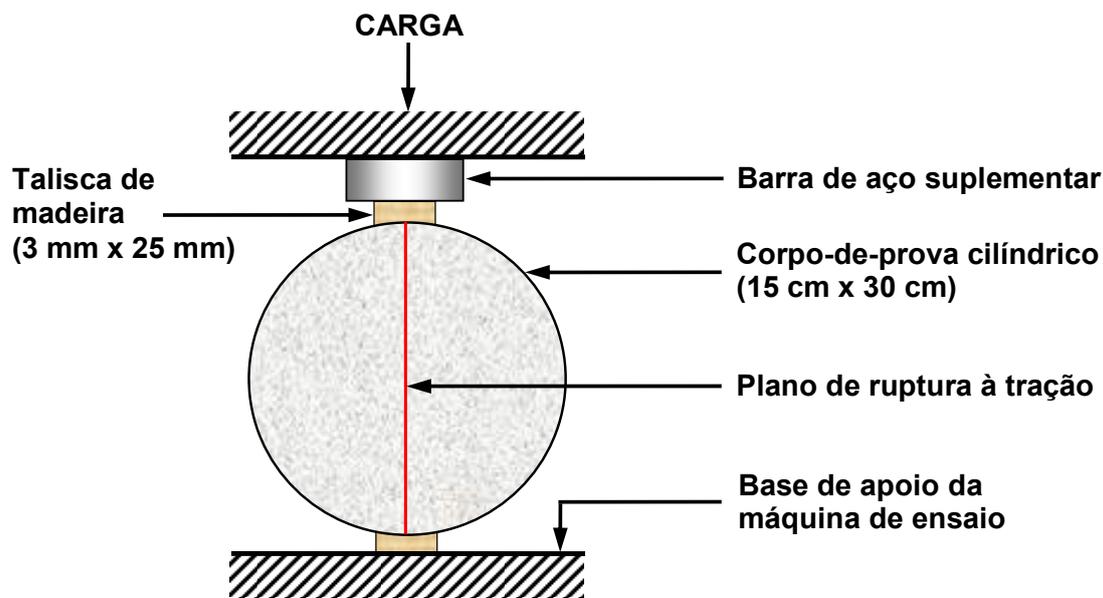


Figura 2.3 – Ensaio de tração por compressão diametral
Adaptado de Mehta e Monteiro (2008)

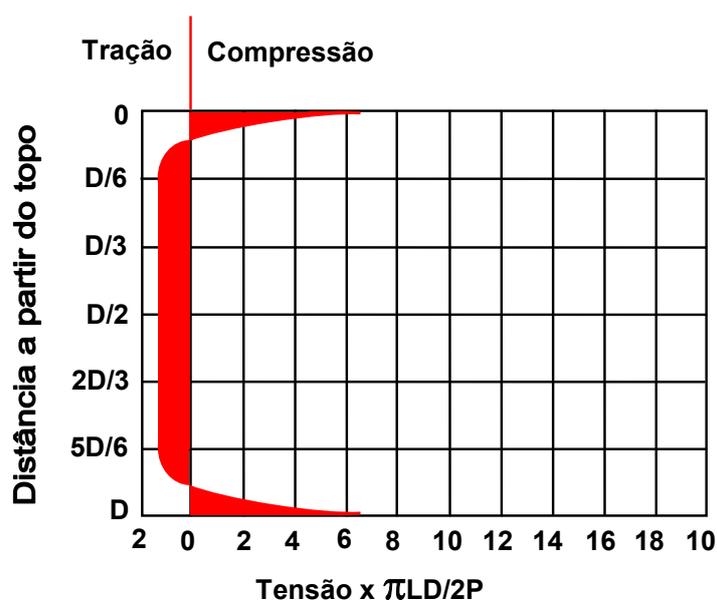


Figura 2.4 – Distribuição de tensão no corpo de prova
(MEHTA e MONTEIRO, 2008)

O valor da **resistência à tração por compressão diametral**, $f_{ct,sp}$, encontrado neste ensaio, é um pouco maior que o obtido no ensaio de tração direta.

c) Ensaio de tração na flexão

Para a realização deste ensaio, um corpo de prova de seção prismática é submetido à flexão, com carregamentos em duas seções simétricas, até à ruptura (**Figura 2.5**).

O ensaio também é conhecido por “carregamento nos terços”, pelo fato das seções carregadas se encontrarem nos terços do vão.

Analisando os diagramas de esforços solicitantes (**Figura 2.6**), pode-se notar que na região de momento máximo tem-se cortante nula.

Portanto, nesse trecho central ocorre flexão pura.

Os valores encontrados para a **resistência à tração na flexão**, $f_{ct,f}$, são maiores que os encontrados nos ensaios descritos anteriormente (tração direta e compressão diametral).

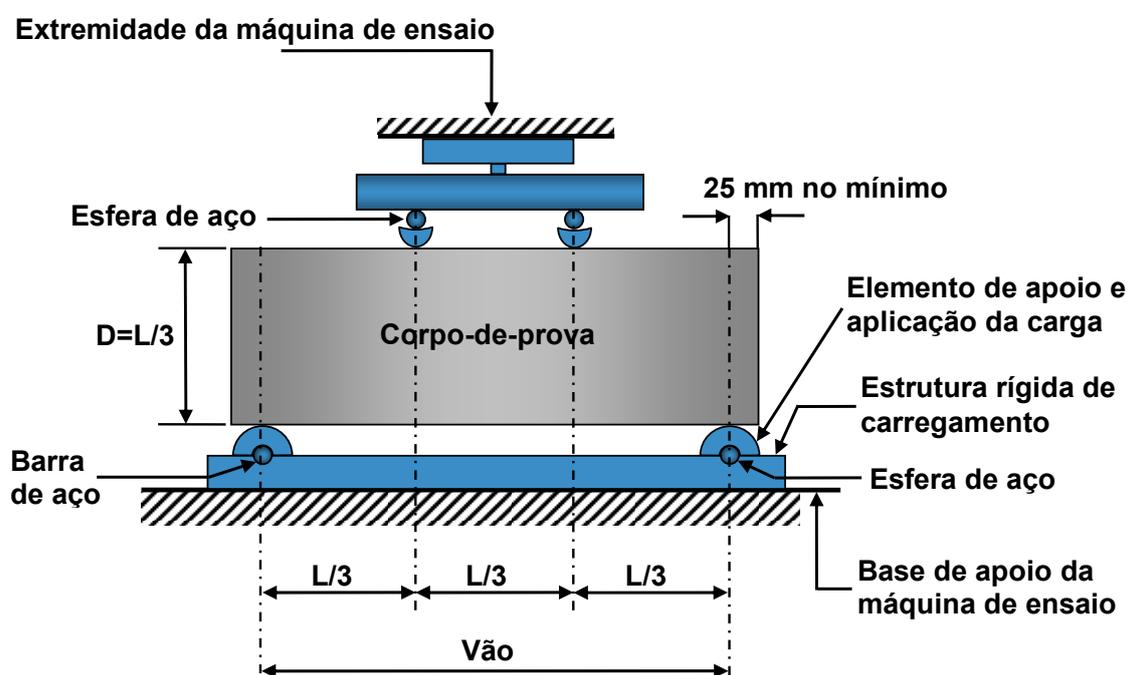


Figura 2.5 – Ensaio de tração na flexão
(MEHTA e MONTEIRO, 2008)

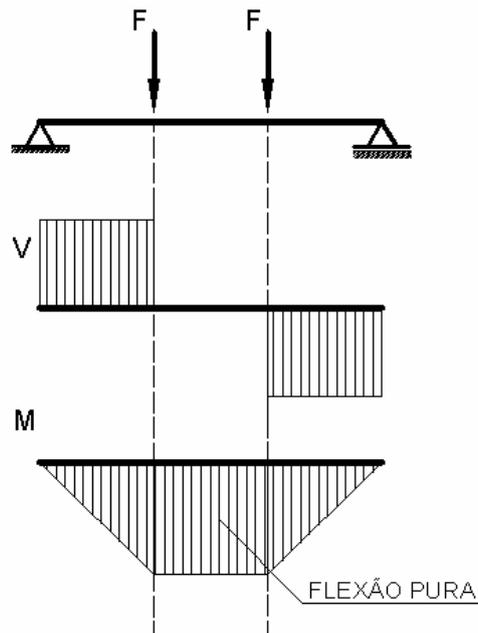


Figura 2.6 – Diagramas de esforços solicitantes (ensaio de tração na flexão)

d) Relações entre os resultados dos ensaios

Como os resultados obtidos nos dois últimos ensaios são diferentes dos relativos ao ensaio de referência, de tração direta, há coeficientes de conversão.

Considera-se a resistência à tração direta, f_{ct} , igual a $0,9 f_{ct,sp}$ ou $0,7 f_{ct,f}$, ou seja, coeficientes de conversão 0,9 e 0,7, para os resultados de compressão diametral e de flexão, respectivamente.

Na falta de ensaios, as resistências à tração direta podem ser obtidas a partir da resistência à compressão f_{ck} :

$$f_{ctm} = 0,3 f_{ck}^{2/3}$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 f_{ctm}$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3 f_{ctm}$$

Nessas equações, as resistências são expressas em MPa.

Será visto oportunamente que cada um desses valores é utilizado em situações específicas.

2.2.3 Módulo de elasticidade

Outro aspecto fundamental no projeto de estruturas de concreto consiste na relação entre as tensões e as deformações.

Sabe-se da *Resistência dos Materiais* que a relação entre tensão e deformação, para determinados intervalos, pode ser considerada linear (**Lei de Hooke**), ou seja, $\sigma = E \varepsilon$, sendo σ a tensão, ε a deformação específica e **E** o **Módulo de Elasticidade** ou **Módulo de Deformação Longitudinal** (Figura 2.7).

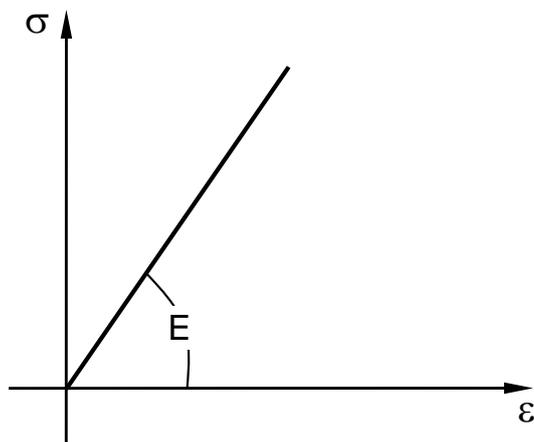


Figura 2.7 - Módulo de elasticidade ou de deformação longitudinal

Para o concreto, a expressão do Módulo de Elasticidade é aplicada somente à parte retilínea da curva tensão versus deformação ou, quando não existir uma parte retilínea, a expressão é aplicada à tangente da curva na origem. Desta forma, é obtido o **Módulo de Deformação Tangente Inicial, E_{ci}** (Figura 2.8).

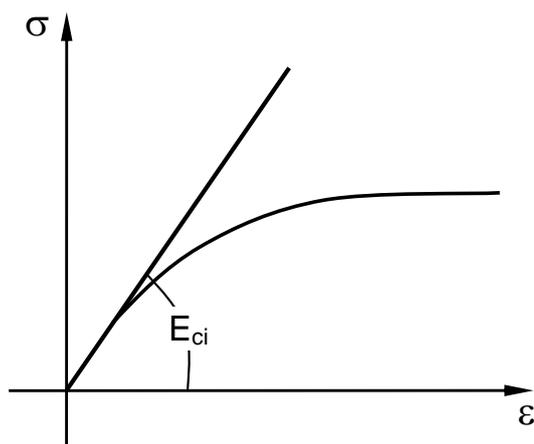


Figura 2.8 - Módulo de deformação tangente inicial (E_{ci})

O módulo de deformação tangente inicial é obtido segundo ensaio descrito na **NBR 8522 – Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação**.

Quando não forem feitos ensaios e não existirem dados mais precisos sobre o concreto, para a idade de referência de 28 dias, pode-se estimar o valor do módulo de elasticidade inicial usando a expressão:

$$E_{ci} = 5600 f_{ck}^{1/2}$$

E_{ci} e f_{ck} são dados em MPa.

O **Módulo de Elasticidade Secante**, E_{cs} , a ser utilizado nas análises elásticas de projeto, especialmente para determinação de esforços solicitantes e verificação de estados limites de serviço, deve ser calculado pela expressão:

$$E_{cs} = 0,85 E_{ci}$$

Na avaliação do comportamento de um elemento estrutural ou de uma seção transversal, pode ser adotado um módulo de elasticidade único, à tração e à compressão, igual ao módulo de elasticidade secante (E_{cs}).

2.2.4 Coeficiente de Poisson

Quando uma força uniaxial é aplicada sobre uma peça de concreto, resulta uma deformação longitudinal na direção da carga e, simultaneamente, uma deformação transversal com sinal contrário (**Figura 2.9**).

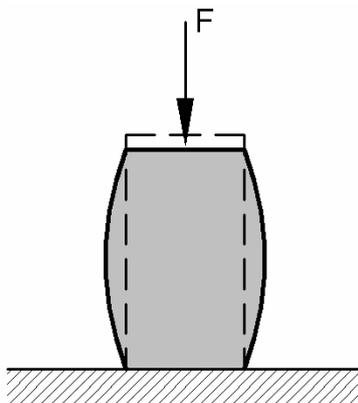


Figura 2.9 – Deformações longitudinais e transversais

A relação entre a deformação transversal e a longitudinal é denominada **coeficiente de Poisson** e indicada pela letra ν . Para tensões de compressão menores que $0,5 f_c$ e de tração menores que f_{ct} , pode ser adotado $\nu = 0,2$.

2.2.5 Módulo de elasticidade transversal

O módulo de elasticidade transversal pode ser considerado $G_c = 0,4 E_{cs}$.

2.2.6 Estados múltiplos de tensão

Na **compressão associada a confinamento lateral**, como ocorre em **pilares cintados**, por exemplo, a resistência do concreto é maior do que o valor relativo à compressão simples.

O cintamento pode ser feito com estribos, que impedem a expansão lateral do pilar, criando um estado múltiplo de tensões. O cintamento também aumenta a utilidade do elemento estrutural.

Na região dos apoios das vigas, pode ocorrer fissuração por causa da força cortante. Essas fissuras, com inclinação aproximada de 45° , delimitam as chamadas bielas de compressão.

Portanto, as bielas são regiões comprimidas com tensões de tração na direção perpendicular, caracterizando um estado biaxial de tensões. Nesse caso tem-se uma resistência à compressão menor que a da compressão simples.

Portanto, a resistência do concreto depende do estado de tensão a que ele se encontra submetido.

2.3 ESTRUTURA INTERNA DO CONCRETO

O concreto tem uma estrutura interna altamente complexa e heterogênea, sendo esta a dificuldade de sua compreensão. Entretanto, o conhecimento da estrutura e das propriedades individuais dos materiais constituintes e da relação entre eles auxilia a compreensão das propriedades dos vários tipos de concreto.

Por isso o concreto é dividido em três constituintes:

- pasta de cimento hidratada,
- agregado e
- zona de transição na interface entre a pasta de cimento e o agregado.

A **fase agregado** é a principal responsável pela massa unitária, pelo módulo de elasticidade e pela estabilidade dimensional.

Essas propriedades do concreto dependem, principalmente, da densidade e da resistência do agregado, que por sua vez são determinadas mais por suas características físicas do que pelas químicas.

A **pasta de cimento hidratada** é resultado das complexas reações químicas do cimento com a água. A hidratação do cimento evolui com o tempo, o que resulta em diferentes fases sólidas, vários tipos de vazios e água em diferentes formas.

As quatro principais fases sólidas são:

- silicato de cálcio hidratado (C-S-H), parte resistente da pasta;
- hidróxido de cálcio (CH), parte frágil da pasta;
- sulfoaluminato de cálcio e
- grão de clínquer não hidratado.

Os vazios presentes na pasta de cimento hidratada são classificados de acordo com o tamanho:

- espaço interlamelar no C-S-H, que são os menores vazios;
- vazios capilares, espaço entre os componentes sólidos da pasta;
- ar incorporado, que são os maiores vazios, só superados pelos relativos ao
- ar aprisionado, que ocupam os maiores vazios.

A classificação da água presente na pasta de cimento hidratada é baseada no grau de dificuldade ou de facilidade com que pode ser removida. São elas, na ordem crescente de dificuldade de remoção:

- água capilar ou água livre;
- água adsorvida;
- água interlamelar e
- água quimicamente combinada.

A **zona de transição**, na interface das partículas grandes de agregado e da pasta de cimento, embora composta pelos mesmos elementos que a pasta de cimento hidratada, apresenta propriedades diferentes da matriz. Esse fato se deve principalmente ao filme de água formado em torno das partículas de agregado, que alteram a relação água/cimento nessa região, formando uma estrutura mais porosa e menos resistente.

2.4 DEFORMAÇÕES

O concreto apresenta deformações elásticas e inelásticas, no carregamento, e deformações de retração por secagem ou por resfriamento. Quando restringidas, as deformações por retração ou térmicas resultam em padrões de tensão complexos, que costumam causar fissuração.

As deformações do concreto dependem essencialmente de sua estrutura interna. A contração térmica é de maior importância nos elementos de grande volume de concreto. Sua magnitude pode ser controlada por meio do coeficiente de expansão térmica do agregado, consumo e tipo de cimento e da temperatura dos materiais constitutivos do traço do concreto.

2.4.1 Retração por Secagem e Fluência

Denomina-se retração a redução de volume que ocorre no concreto, mesmo na ausência de tensões mecânicas e de variações de temperatura. A **retração por secagem** é a deformação associada à perda de umidade.

A **fluência** é o fenômeno do aumento gradual da deformação ao longo do tempo, sob um dado nível de tensão constante.

No caso de muitas estruturas reais, a fluência e a retração ocorrem ao mesmo tempo. Assim, por uma série de motivos, é pertinente discutir os fenômenos de retração por secagem e de fluência conjuntamente, considerando os aspectos:

- primeiramente, tanto a retração por secagem quanto a fluência têm a mesma origem, ou seja, a pasta de cimento hidratado;
- segundo, as curvas deformação versus tempo são muito semelhantes;
- terceiro, os fatores que influenciam a retração por secagem também normalmente influenciam a fluência, da mesma forma;
- quarto, no concreto a microdeformação de cada fenômeno é significativa e não pode ser ignorada em projetos estruturais;
- quinto, tanto a retração por secagem quanto a fluência são parcialmente reversíveis.

Presume-se que tanto as deformações de retração por secagem quanto as de fluência sejam relativas, principalmente, à remoção da água adsorvida da pasta de cimento hidratada. A diferença é que, em um caso, a umidade diferencial relativa entre o concreto e o ambiente é a força motriz, enquanto, no outro, é a tensão constante aplicada.

As causas da fluência no concreto são mais complexas. Além dos movimentos de umidade, há outras causas que contribuem para a fluência, principalmente a microfissuração da zona de transição e a resposta elástica retardada no agregado.

Além da retração por secagem, também denominada de retração capilar, que ocorre por evaporação parcial da água capilar e perda da água adsorvida, gerando tensão superficial e fluxo de água nos capilares que provocam a retração, há também a retração química, que é a contração da água não evaporável, durante as reações de hidratação do cimento.

A retração por carbonatação também pode ser considerada uma retração química. Entretanto, ocorre pela reação de um produto do cimento já hidratado, o hidróxido de cálcio (CH), com o dióxido de carbono (CO_2), produzindo o carbonato de cálcio mais água [$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$]; esta reação ocorre com diminuição de volume.

A carbonatação pode melhorar algumas características do concreto. Porém, devido ao cobrimento insuficiente e a fissuração, a carbonatação pode despassar a armadura, deixando-a suscetível à corrosão.

2.4.2 Expansão

Expansão é o aumento de volume do concreto, que ocorre em peças submersas e em peças tracionadas, devido à fluência.

Nas peças submersas, no início tem-se retração química. Porém, o fluxo de água é de fora para dentro. Por conta disso, as decorrentes tensões capilares anulam a retração química e, em seguida, provocam a expansão da peça.

2.4.3 Deformações térmicas

Em geral, sólidos se expandem com o aquecimento e se retraem com o resfriamento. A não ser sob condições extremas de temperatura, as estruturas comuns de concreto sofrem pouco ou nenhum dano com as alterações da temperatura ambiente.

No entanto, em estruturas massivas, a combinação do calor produzido pela hidratação do cimento e condições desfavoráveis de dissipação de calor resultam em grande elevação da temperatura do concreto, poucos dias após o lançamento.

A deformação associada à mudança de temperatura depende do coeficiente de expansão térmica do material e da magnitude de queda ou de elevação de temperatura.

Define-se coeficiente de variação térmica α como a variação na unidade de comprimento por variação na unidade de temperatura. Para o concreto armado, para variações normais de temperatura, a NBR 6118:2003 permite adotar $\alpha = 10^{-5} / ^\circ\text{C}$.

2.4.4 Deformação imediata

A deformação imediata acontece por ocasião do carregamento e ocorre de acordo com a Teoria da Elasticidade. Corresponde ao comportamento do concreto como sólido verdadeiro, e é causada por uma acomodação dos cristais que formam o material. Os valores dessas deformações são apresentados nas Tabelas de Lajes e nas Tabelas de Vigas.

2.5 FATORES QUE INFLUEM NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

Com base no que foi apresentado neste texto, os principais fatores que influem nas propriedades do concreto são:

- Tipo e quantidade de cimento;
- Qualidade da água e relação água-cimento;
- Tipos de agregados, granulometria e relação agregado-cimento;
- Presença de aditivos e adições;
- Procedimento e duração do processo de mistura;
- Condições e duração do transporte e do lançamento;
- Condições de adensamento e de cura;
- Forma e dimensões dos corpos de prova;
- Tipo e duração do carregamento;
- Idade do concreto, umidade, temperatura etc.

BIBLIOGRAFIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto cilíndricos ou prismáticos. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 7222**: Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 8522**: Concreto - Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação por grupos de resistência. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 12142**: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos. Rio de Janeiro, 1991.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. (2008). **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 3.ed., 674p.