

## ESTRUTURAS DE CONCRETO – CAPÍTULO 2

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

Março de 2004

### CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO

---

Como foi visto no capítulo anterior, a mistura em proporção adequada de cimento, agregados e água 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 ( $\rho_c$ ), compreendida entre 2000 kg/m<sup>3</sup> e 2800 kg/m<sup>3</sup>.

Para efeito de cálculo, pode-se adotar para o concreto simples o valor 2400 kg/m<sup>3</sup> e para o concreto armado 2500 kg/m<sup>3</sup>.

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/m<sup>3</sup> a 150 kg/m<sup>3</sup>.

#### 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**.

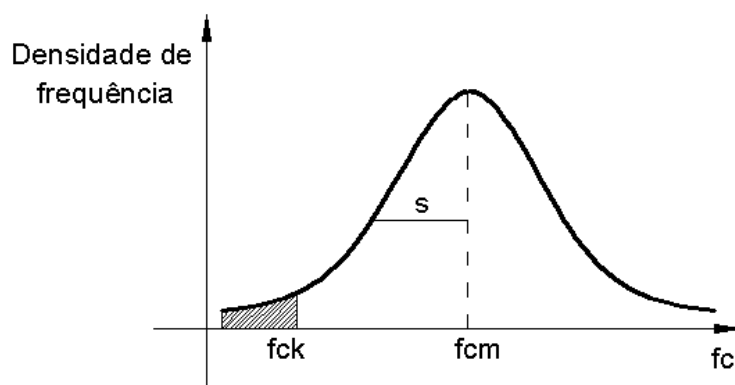
##### 2.2.1 Resistência à compressão

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 para ensaio segundo a **NBR 5738 – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto**, os quais são

ensaiados segundo a **NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**.

O corpo-de-prova padrão brasileiro é o **cilíndrico**, com **15cm de diâmetro** e **30cm de altura**, e a idade de referência para o ensaio 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  $f_{ck} = 30\text{MPa}$ .

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, medindo 9cm por 15cm, e as extremidades são quadradas, com 15cm de lado.

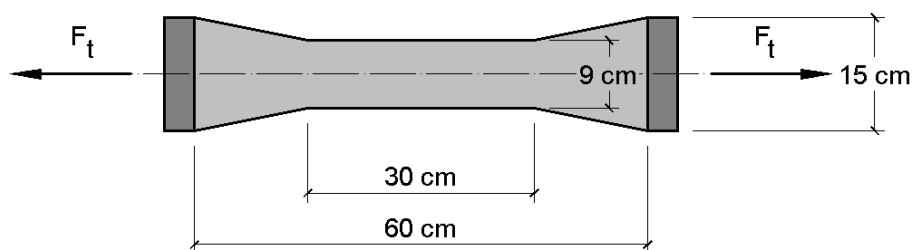


Figura 2.2 – Ensaio de tração direta

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

É o ensaio mais utilizado. Também é conhecido internacionalmente como **Ensaio Brasileiro**. Foi desenvolvido por **Lobo Carneiro**, em 1943. Para a sua realização, um corpo-de-prova cilíndrico de 15cm por 30 cm é colocado com o eixo horizontal entre os pratos da prensa (**Figura 2.3**), sendo aplicada uma força até a sua ruptura por tração indireta (ruptura por fendilhamento).

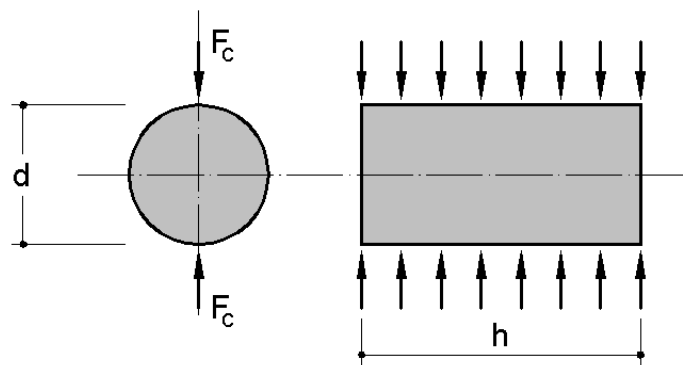


Figura 2.3 – Ensaio de tração por compressão diametral

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. O ensaio de compressão diametral é simples de ser executado e fornece resultados mais uniformes do que os da 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 2.4**). 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 2.5**) 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.

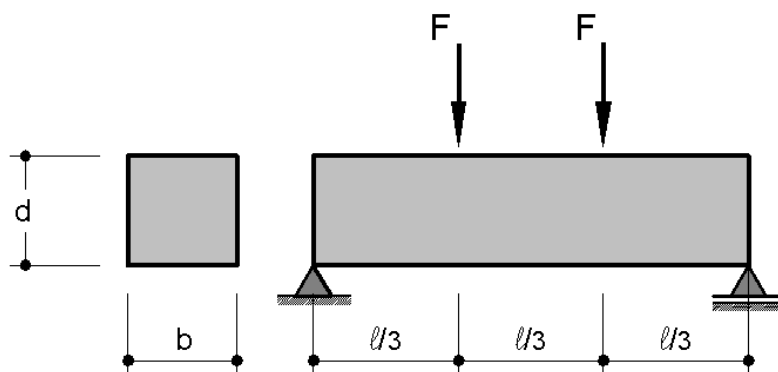


Figura 2.4 – Ensaio de tração na flexão

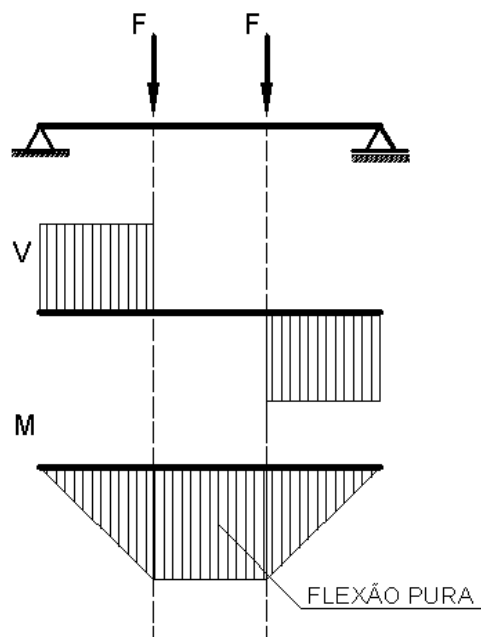


Figura 2.5 – Diagramas de esforços solicitantes (ensaio de tração na flexão)

#### 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  $\sigma$  a tensão,  $\varepsilon$  a deformação específica e  $E$  o **Módulo de Elasticidade** ou **Módulo de Deformação Longitudinal** (Figura 2.6).

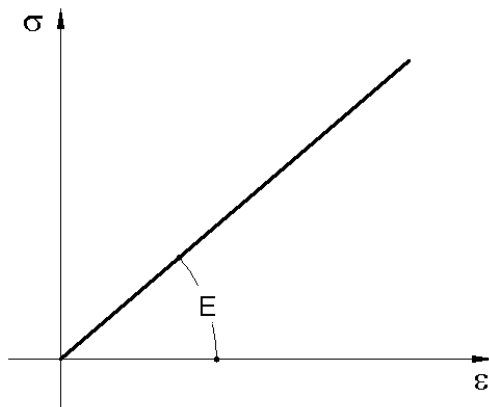


Figura 2.6 - Módulo de elasticidade ou de deformação longitudinal

Para o concreto a expressão do Módulo de Elasticidade é aplicada somente à parte retilínea da curva tensão-deformação ou, quando não existir uma parte retilínea, a expressão é aplicada à tangente da curva na origem. Neste caso, tem-se o **Módulo de Deformação Tangente Inicial,  $E_{ci}$**  (Figura 2.7).

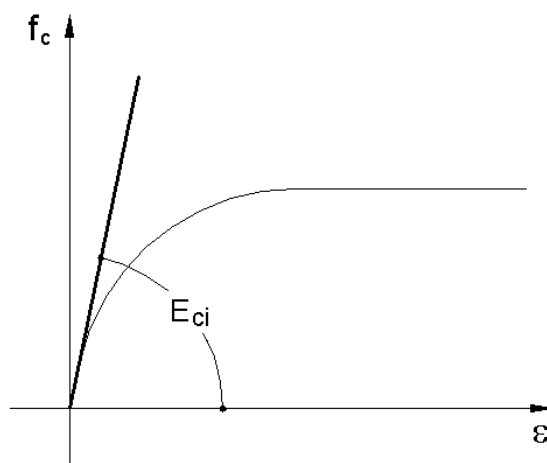


Figura 2.7 - Módulo de deformação tangente inicial ( $E_{ci}$ )

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.

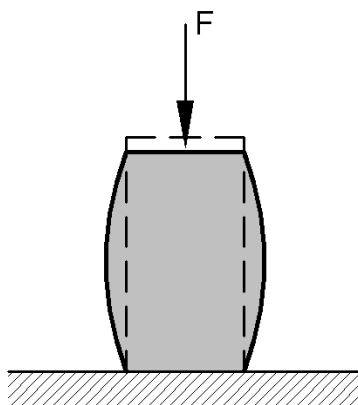
O **Módulo de Elasticidade Secante**,  $E_{cs}$ , a ser utilizado nas análises elásticas do projeto, especialmente para determinação de esforços solicitantes e verificação de limites de serviço, deve ser calculado pela expressão:

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

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 2.8**).



**Figura 2.8 – Deformações longitudinais e transversais**

A relação entre a deformação transversal e a longitudinal é denominada **coeficiente de Poisson** e indicada pela letra  $\nu$ . 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 ductilidade 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

Na **preparação do concreto**, com a mistura dos agregados graúdos e miúdos com cimento e água, tem início a **reação química** do cimento com a água, resultando **gel de cimento**, que constitui a massa coesiva de cimento hidratado.

A reação química de hidratação do cimento ocorre com **redução de volume**, dando origem a **poros**, cujo volume é da ordem de 28% do volume total do gel.

Durante o amassamento do concreto, o **gel envolve os agregados e endurece com o tempo**, formando cristais. Ao endurecer, o gel liga os agregados, resultando um **material resistente e monolítico – o concreto**.

A estrutura interna do concreto resulta bastante heterogênea: adquire forma de retículos espaciais de gel endurecido, de grãos de agregados graúdo e miúdo de várias formas e dimensões, envoltos por grande quantidade de poros e capilares, portadores de água que não entrou na reação química e, ainda, vapor d'água e ar. Fisicamente, o concreto representa um **material capilar pouco poroso**, sem continuidade da massa, no qual se acham presentes os **três estados da agregação – sólido, líquido e gasoso**.



## 2.4 DEFORMAÇÕES

As deformações do concreto dependem essencialmente de sua estrutura interna.

### 2.4.1 Retração

Denomina-se retração à redução de volume que ocorre no concreto, mesmo na ausência de tensões mecânicas e de variações de temperatura.

As causas da retração são:

- **Retração química:** contração da água não evaporável, durante o endurecimento do concreto.
- **Retração capilar:** ocorre por evaporação parcial da água capilar e perda da água adsorvida. O tensão superficial e o fluxo de água nos capilares provocam retração.
- **Retração por carbonatação:**  $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$  (ocorre com diminuição de volume).

### 2.4.2 Expansão

Expansão é o aumento de volume do concreto, que ocorre em peças submersas. Nessas peças, no início tem-se retração química. Porém, o fluxo de água é de fora para dentro. As decorrentes tensões capilares anulam a retração química e, em seguida, provocam a expansão da peça.

### 2.4.3 Deformação imediata

A deformação imediata se observa por ocasião do carregamento. Corresponde ao comportamento do concreto como sólido verdadeiro, e é causada por uma acomodação dos cristais que formam o material.

### 2.4.4 Fluência

Fluência é uma deformação diferida, causada por uma força aplicada. Corresponde a um acréscimo de deformação com o tempo, se a carga permanecer.

Ao ser aplicada uma força no concreto, ocorre deformação imediata, com uma acomodação dos cristais. Essa acomodação diminui o diâmetro dos capilares e aumenta a pressão na água capilar, favorecendo o fluxo em direção à superfície. Tanto a diminuição do diâmetro dos capilares quanto o acréscimo do fluxo aumentam a tensão superficial nos capilares, provocando a fluência.

No caso de muitas estruturas reais, a fluência e a retração ocorrem ao mesmo tempo e, do ponto de vista prático, é conveniente o tratamento conjunto das duas deformações.

#### **2.4.5 Deformações térmicas**

Define-se coeficiente de variação térmica  $\alpha_{te}$  como sendo a deformação correspondente a uma variação de temperatura de 1°C. Para o concreto armado, para variações normais de temperatura, a NBR 6118 permite adotar  $\alpha_{te} = 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ .

### **2.5 FATORES QUE INFLUEM**

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 da mistura;
- Condições e duração de transporte e de 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.