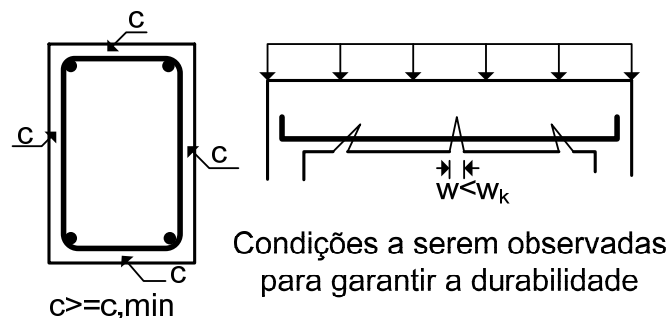


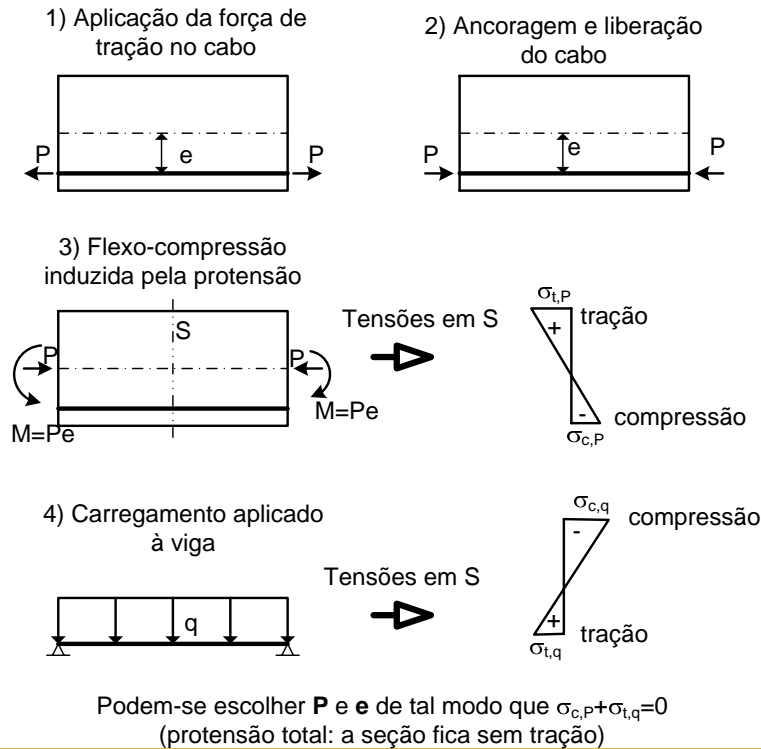
MATERIAIS PARA CONCRETO ARMADO

1.1- Introdução

- **Concreto:** agregados + cimento + água + aditivos.
- Sua resistência depende: do consumo de cimento, fator água-cimento, grau de adensamento, tipo de agregado.
- **Concreto armado** = concreto + barras de aço.
- Só existe concreto armado por causa da aderência.
- O concreto protege as armaduras contra a corrosão (desde que sejam respeitados o cobrimento mínimo e a abertura limite das fissuras).



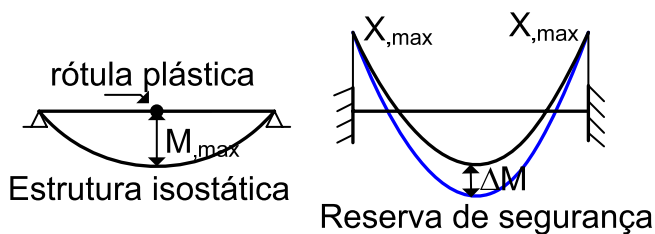
Concreto protendido: concreto armado + cabos de aço de alta resistência, os quais sofrem tensão prévia (protensão).



Prof. José Milton de Araújo - FURG

3

- **Vantagens do concreto armado:** economia; facilidade de execução; resistência ao fogo, aos agentes atmosféricos e ao desgaste mecânico; praticamente não requer manutenção ou conservação; permite facilmente a construção de estruturas hiperestáticas (com reservas de segurança).



- Estrutura isostática: transforma-se em mecanismo.
- Estrutura hiperestática: redistribui os esforços.

- **Desvantagens do concreto armado:** elevado peso das construções; dificuldades para a execução de reformas ou demolições; menor proteção térmica.

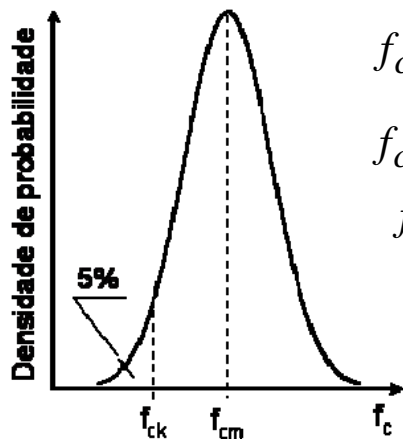
Prof. José Milton de Araújo - FURG

4

1.2- Concreto em compressão simples

Resistência à compressão: f_c

- Ensaios padronizados de curta duração (carregamento rápido).
- Idade padrão do ensaio: 28 dias.
- Corpos de prova: cilíndricos de 15cm x 30cm.
- Verifica-se grande dispersão dos resultados.



f_{cm} = resistência média à compressão.

f_{ck} = resistência característica à compressão.

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,645S$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{ci} - f_{cm})^2}{(n-1)}} = \text{desvio padrão}$$

Resistência de dosagem: $f_{cm} = f_{ck} + 1,645S$

Na fase de projeto: $f_{cm} = f_{ck} + \Delta f$

Grupos de resistência:	Classes de resistência:
Grupo I	C15, C20, C25, C30, C35, C40, C45, C50
Grupo II	C55, C60, C70, C80, C90

Exemplo: Concreto C20: $f_{ck} = 20$ MPa aos 28 dias.

NBR-6118:

- Para concreto armado: $f_{ck} \geq 20$ MPa.
- Para concreto protendido: $f_{ck} \geq 25$ MPa.
- Em obras provisórias e concreto sem fins estruturais: permitido C15.

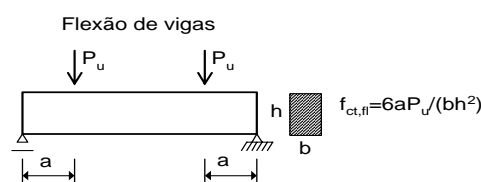
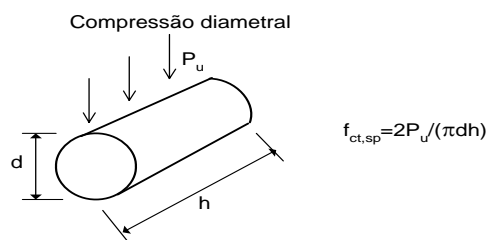
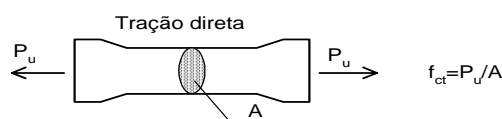
A resistência do concreto depende dos seguintes fatores:

- Composição (consumo e tipo de cimento, fator água-cimento)
- Condições de cura (temperatura e umidade)
- Forma de aplicação da carga (ensaio estático ou dinâmico)
- Duração do carregamento (ensaio de curta ou de longa duração)
- Idade do concreto (efeito do envelhecimento)
- Estado de tensões (compressão simples ou multiaxial)
- Forma e dimensões dos corpos de prova
- No Brasil: adotamos o corpo de prova cilíndrico 15cm x 30cm.

Observações:

- Concretos normais: possuem massa específica seca com valor médio de 2400 kg/m³.
- Peso específico do concreto simples: 24 kN/m³.
- Peso específico do concreto armado: 25 kN/m³.

1.3- Concreto em tração simples



f_{ctm} = resistência média à tração (axial).

f_{ctk} = resistência à tração característica (axial).

$f_{ctk,inf}$ = valor característico inferior (quantil de 5%).

$f_{ctk,sup}$ = valor característico superior (quantil de 95%).

$$f_{ctk,inf} \cong 0,7 f_{ctm} \quad f_{ctk,sup} \cong 1,3 f_{ctm}$$

Correlações, conforme NBR-6118:

$$f_{ctm} = 0,3(f_{ck})^{2/3}, \text{ se } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} = 2,12 \ln(1 + 0,11 f_{ck}), \text{ se } f_{ck} > 50 \text{ MPa}$$



$$f_{ctm} = 0,9 f_{ct,sp} \quad \text{Se for feito compressão diametral}$$

$$f_{ctm} = 0,7 f_{ct,fl} \quad \text{Se for feito ensaio de flexão}$$

Observações:

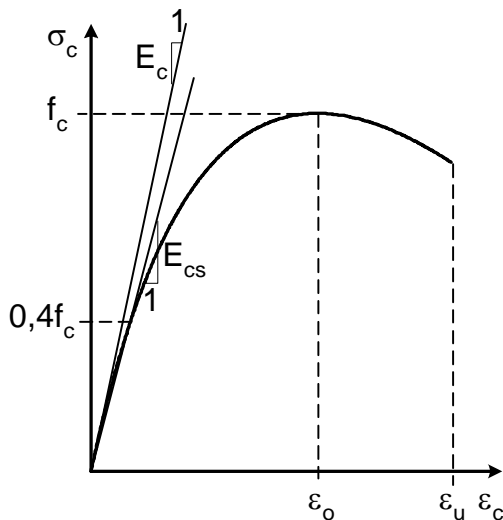
- A resistência à tração depende dos mesmos fatores que afetam a resistência à compressão.
- Ela é desprezada no dimensionamento das estruturas.
- Ela é considerada nas verificações sob as cargas de serviço.

O projeto estrutural compreende duas fases:

- **Estados limites últimos:** estamos interessados em garantir a segurança da estrutura contra a ruína; dimensionamos as seções dos elementos estruturais e as armaduras para garantir a segurança.
- **Estados limites de utilização:** devemos verificar o comportamento da estrutura nas condições normais de uso; limitamos as flechas e as aberturas das fissuras para as cargas de serviço.

1.4- O módulo de deformação longitudinal do concreto

- **Módulo tangente**



- Segundo o CEB/90:

$$E_c = 21500 \left(\frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{1/3} \text{ MPa}$$



- **Módulo secante:**

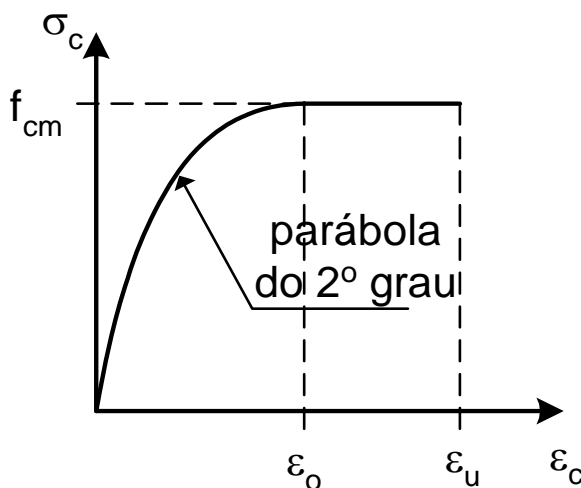
$$E_{cs} = 0,85 E_c$$



Coefficiente de Poisson do concreto: valor médio = 0,2.

1.5- Relações tensão-deformação para o concreto

- **Diagrama parábola-retângulo**



$$\epsilon_c < \epsilon_o : \sigma_c = f_{cm} [2\eta - \eta^2]$$

$$\epsilon_o \leq \epsilon_c \leq \epsilon_u : \sigma_c = f_{cm}$$

$$\epsilon_c > \epsilon_u : \sigma_c = 0$$

$$\eta = \epsilon_c / \epsilon_o$$

$$\epsilon_o = 2 \text{‰} \quad \epsilon_u = 3,5 \text{‰}$$

(Para concretos do grupo I)

1.6- Evolução das propriedades do concreto

- As propriedades do concreto em uma idade t dias dependem do tipo de cimento e das condições de cura (temperatura e umidade). A temperatura média de referência é 20 °C.

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm} \quad ; \quad \beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad \text{CEB/90} \quad \text{☀}$$

f_{cm} = resistência média aos 28 dias.

s=0,20 para cimentos de endurecimento rápido (cimento de alta resistência inicial CP V-ARI);

s=0,25 para cimentos de endurecimento normal (cimento comum CPI e cimento composto CP II) ;

s=0,38 para cimentos de endurecimento lento (cimento de alto forno CP III e cimento pozolânico CP IV).

Correlações, conforme NBR-6118:

$$f_{ctm}(t) = \beta_{cc}(t)^\alpha f_{ctm}$$

$$\alpha = 1 \text{ para } t < 28, \quad \alpha = 2/3 \text{ para } t \geq 28$$

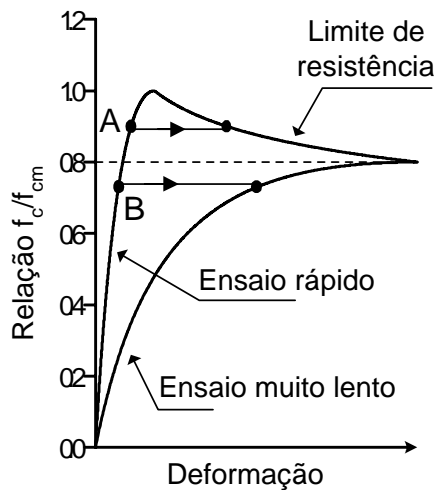
$$E_c(t) = [\beta_{cc}(t)]^{1/2} E_c, \text{ para concretos do grupo I}$$

$$E_c(t) = [\beta_{cc}(t)]^{0,3} E_c, \text{ para concretos do grupo II}$$

Todas as correlações foram extraídas do CEB/90 e do EC2.

1.7- Resistência do concreto sob carga de longa duração

Efeito Rüschi: redução da resistência do concreto sob carga de longa duração. A resistência depende da duração do carregamento.



f_{cm} = resistência média aos 28 dias de idade obtida no ensaio rápido convencional.

f_c = resistência obtida.

No projeto limitamos a tensão de compressão no concreto em 85% da resistência convencional.

$$\sigma_{cd} = 0,85 \left(\frac{f_{ck}}{1,4} \right) \quad \star$$

1.8 - Comportamento reológico do concreto

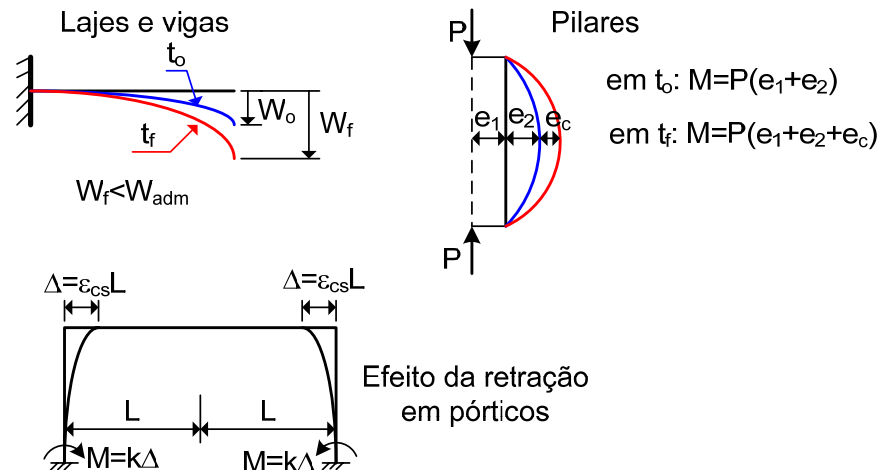
- **Comportamento reológico:** comportamento dependente do tempo.
- **Deformações diferidas:** deformações dependentes do tempo.
- **Fluência:** acréscimo das deformações, mesmo para uma tensão constante.
- **Retração:** redução de volume do material na ausência de carga externa.

▪ A fluência e a retração diminuem se:

- Reduzir o fator água-cimento
- Reduzir o consumo de cimento
- Reduzir a temperatura ambiente
- Aumentar a espessura do elemento estrutural
- Aumentar a umidade do ambiente

▪ Efeitos indesejáveis:

aumento das flechas de lajes e vigas; perdas de protensão em estruturas de concreto protendido; aumento da curvatura de pilares; fissuração das superfícies externas devido à retração; introdução de esforços em estruturas aporticadas devidos à retração (e, também, à dilatação térmica), o que exige a adoção de juntas.



Prof. José Milton de Araújo - FURG

17

▪ Deformação de fluência:

$$\epsilon_{cc}(t) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_c} \varphi(t, t_0)$$

E_c = módulo de deformação aos 28 dias

$\sigma_c(t_0)$ = tensão aplicada na idade t_0 dias

$\varphi(t, t_0)$ = coeficiente de fluência.

$\varphi_\infty = \varphi(t_\infty, t_0)$ = coeficiente final de fluência

▪ **Caso particular:** $t_0 = 28$ dias:

$$\varphi_\infty \cong 8,2 \frac{\varphi_{RH}}{\sqrt{f_{ck} + 8}}, \text{ com } f_{ck} \text{ em MPa;}$$

$$\text{sendo: } \varphi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH/100}{0,46(h_0/100)^{1/3}}$$

Prof. José Milton de Araújo - FURG

18

$$h_o = \frac{2A_c}{u} = \text{espessura equivalente}$$

A_c = área da seção transversal do elemento.

u = perímetro em contato com a atmosfera.

RH = umidade relativa do ar.

Valores de φ_∞ para $f_{ck}=20$ MPa

h_o (mm)	$RH = 50\%$	$RH = 70\%$	$RH = 90\%$
50	3,7	2,8	2,0
100	3,2	2,6	1,9
150	3,0	2,4	1,8
200	2,9	2,4	1,8
250	2,8	2,3	1,8
300	2,7	2,3	1,8

▪ Valor médio de referência: $\varphi_\infty = 2,5$ 

▪ Retração

Para $f_{ck} = 20$ MPa e cimento de endurecimento normal:

$$\varepsilon_{cs\infty} = -63 \times 10^{-5} \quad \text{para} \quad RH = 50\%$$

$$\varepsilon_{cs\infty} = -48 \times 10^{-5} \quad \text{para} \quad RH = 70\%$$

$$\varepsilon_{cs\infty} = -20 \times 10^{-5} \quad \text{para} \quad RH = 90\%$$

Valor adotado nos exemplos numéricos: $\varepsilon_{cs\infty} = -50 \times 10^{-5}$ 

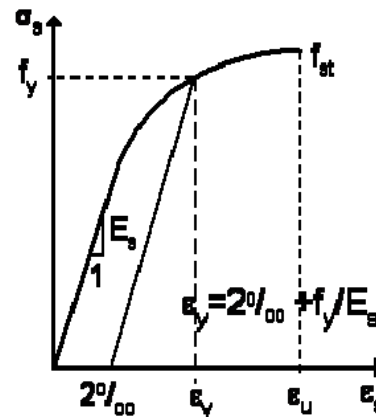
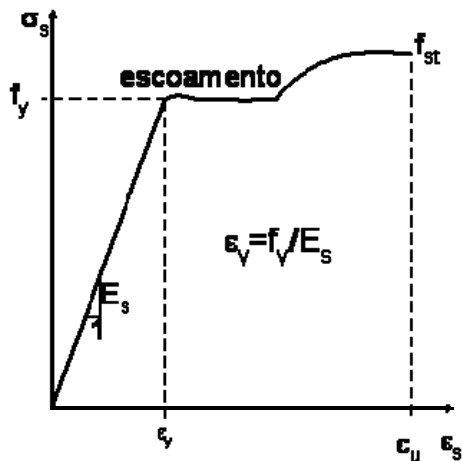
1.9 - Aços para concreto armado

- **Barras:** obtidas por laminação a quente, sem deformação a frio posterior, e apresentam um patamar de escoamento no diagrama tensão-deformação.
- **Fios:** obtidos por deformação a frio (processo de trefilação) e não apresentam patamar de escoamento.

Norma brasileira: ABNT. NBR-7480: **Aço Destinado a Armaduras Para Estruturas de Concreto Armado.**
Rio de Janeiro, 2007.

Tabela 1 - Características das barras e fios de acordo com a NBR-7480


Fios	Barras	Diâmetro nominal (mm)	Área da seção (cm ²)	Massa linear (kg/m)	Perímetro (cm)
2,4		2,4	0,045	0,036	0,75
3,4		3,4	0,091	0,071	1,07
3,8		3,8	0,113	0,089	1,19
4,2		4,2	0,139	0,109	1,32
4,6		4,6	0,166	0,130	1,45
5		5,0	0,196	0,154	1,75
5,5		5,5	0,238	0,187	1,73
6		6,0	0,283	0,222	1,88
	6,3	6,3	0,312	0,245	1,98
6,4		6,4	0,322	0,253	2,01
7		7,0	0,385	0,302	2,20
8	8	8,0	0,503	0,395	2,51
9,5		9,5	0,709	0,558	2,98
10	10	10,0	0,785	0,617	3,14
	12,5	12,5	1,227	0,963	3,93
	16	16,0	2,011	1,578	5,03
	20	20,0	3,142	2,466	6,28
	22	22,0	3,801	2,984	6,91
	25	25,0	4,909	3,853	7,85
	32	32,0	8,042	6,313	10,05
	40	40,0	12,566	9,865	12,57



f_y = tensão de escoamento f_{st} = tensão de ruptura

E_s = módulo de elasticidade longitudinal

ϵ_u = deformação de ruptura

$E_s = 200GPa$ (CEB e todas as demais normas internacionais) 

$E_s = 210GPa$ (NBR-6118: única norma a adotar esse valor) ?

▪ **Categorias das barras de aço:** CA-25, CA-50, CA-60.

CA-25: barras lisas (de baixa aderência)

CA-50: barras nervuradas (de alta aderência)

CA-60: fios lisos, entalhados ou nervurados (de alta aderência)

▪ **Diâmetros comerciais:**

CA-50: 6,3 ; 8,0 ; 10,0 ; 12,5 ; 16,0 ; 20,0 ; 25,0 ; 32,0 ; 40,0

CA-60: 4,2 ; 5,0 ; 6,0 ; 7,0 ; 8,0 ; 9,5

CA : indica aço para concreto armado. O número indica o valor da tensão de escoamento característica f_{yk} em kN/cm^2 .

CA-50: $f_{yk}=50 kN/cm^2$ (=500 MPa)

CA-60: $f_{yk}=60 kN/cm^2$ (=600 MPa)

- Além do ensaio de tração, as barras de aço devem ser submetidas ao ensaio de dobramento a 180° sem que ocorra ruptura nem fissuração na zona tracionada.
- O comprimento de fornecimento das barras e dos fios deve ser de 12m, com uma tolerância de mais ou menos 1%.
- A NBR-7480 exige que as barras nervuradas tenham marcas de laminação em relevo, identificando o fabricante, a categoria do material e o diâmetro nominal.
- A identificação dos fios lisos e entalhados CA-60 também deve ser feita por marcas em relevo. Neste caso, a identificação do fabricante pode ser feita por etiqueta.
- A identificação das barras CA-25 deve ser feita por etiqueta.

Tabela 2 - Características exigíveis das armaduras (NBR-7480)

Categoria	CA-25	CA-50	CA-60
f_{yk} (kN/cm ²)	25	50	60
f_{st}	1,20 f_y	1,08 f_y	1,05 f_y *
ε_u **	18%	8%	5%
Diâmetro do pino de dobramento	2 ϕ ¹ 4 ϕ ²	3 ϕ ¹ 6 ϕ ²	5 ϕ ¹

¹ para barras com $\phi < 20$; ² para barras com $\phi \geq 20$.

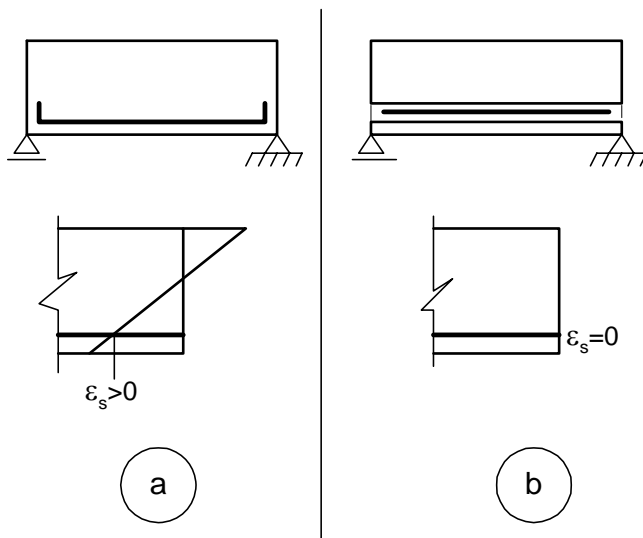
* f_{st} mínimo de 66 kN/cm².

** ε_u é a deformação de ruptura (alongamento) medida em um comprimento de 10 ϕ .

ϕ é o diâmetro (em mm)

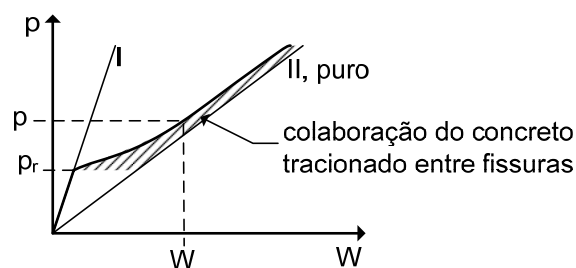
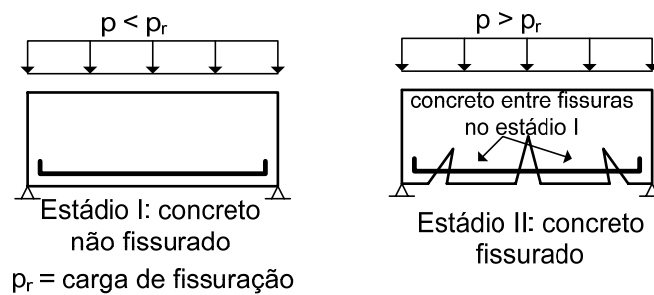
1.10 - Considerações sobre o concreto armado

- Só existe concreto armado por causa da aderência.



a) Viga com aderência:
A armadura se deforma, “arrastada” pelo concreto, e fica submetida a uma tensão.

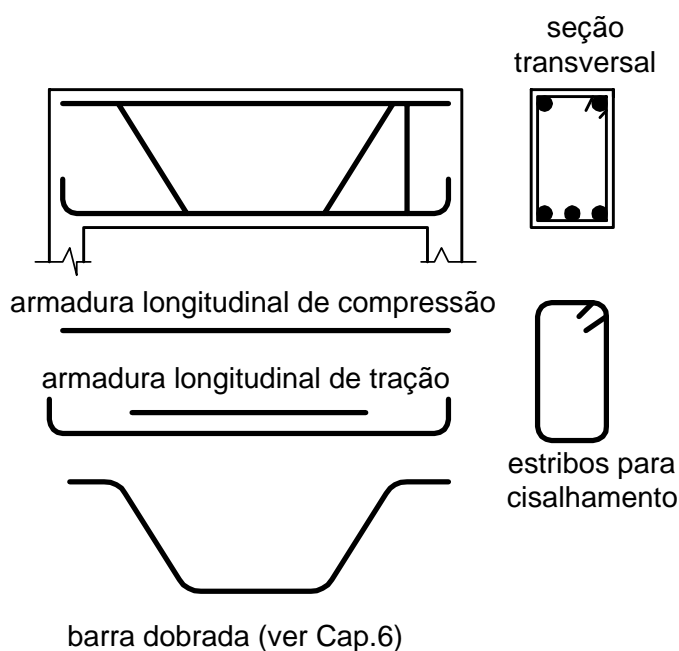
b) Viga sem aderência:
A armadura escorrega e fica sem tensão. Neste caso, o que se tem é uma viga de concreto simples.



Concreto entre fissuras: colaboração na rigidez (em serviço)

No dimensionamento: desprezamos o concreto tracionado

▪ Arranjos usuais das armaduras das vigas



1.11 - A durabilidade das estruturas de concreto

Tabela 2.3.1 - Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Tipo de ambiente	Risco de deterioração da estrutura
I	fraca	rural submersa ¹⁾	insignificante
II	moderada	urbana	pequeno
III	forte	marinha industrial	grande
IV	muito forte	industrial ²⁾ respingos de maré	elevado

¹⁾ A NBR-6118 não faz distinção quanto ao tipo de água: doce ou água do mar.

²⁾ Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto.

- NBR-6118: "pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos **secos** (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura)".

- Banheiro e cozinha são ambientes secos? Só pode estar permitindo reduzir a classe por causa dos revestimentos (reboco, azulejos, etc.) .

O texto não é claro, mas a NBR-6118 fala em revestimentos em vários pontos. Outras normas (Argentina, Portugal) permitem considerar os revestimentos

Tabela 2.3.2 - Exigências de qualidade do concreto em função da agressividade do ambiente

Concreto	Classe de agressividade (ver tabela 2.3.2)				
	Tipo	I	II	III	IV
relação água-cimento máxima (em massa)	CA	0,65	0,60	0,55	0,45
	CP	0,60	0,55	0,50	0,45
classe de resistência mínima	CA	C20	C25	C30	C40
	CP	C25	C30	C35	C40
Consumo mínimo de cimento kg/m ³ , segundo a NBR-12655		260	280	320	360
CA: elementos estruturais de concreto armado					
CP: elementos estruturais de concreto protendido					

Tabela 2.3.3 - Cobrimento nominal (cm) das armaduras para concreto armado

Elemento	Classe de agressividade (ver tabela 1.13.2)			
	I	II	III	IV
Laje	2,0	2,5	3,5	4,5
Viga e pilar	2,5	3,0	4,0	5,0
Em contato com o solo	3,0	3,0	4,0	5,0

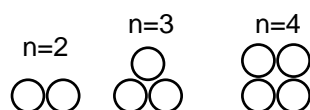
- Havendo controle de qualidade rigoroso, esses valores podem ser reduzidos de 0,5 cm, mas a exigência de controle rigoroso deve ser explicitada nos desenhos de projeto (somente para pré-moldados).
- Se for empregado concreto de resistência superior ao mínimo exigido, os cobrimentos também podem ser reduzidos em 0,5 cm.
- Reduzir no máximo 0,5 cm (sem superposição de efeitos)

- Em todos os casos, o cobrimento nominal de uma determinada barra deve ser, no mínimo, igual ao diâmetro da própria barra. No caso de feixes de barras, o cobrimento nominal não deve ser menor que o diâmetro do círculo de mesma área do feixe (diâmetro equivalente).
- A dimensão máxima característica do agregado graúdo utilizado no concreto, d_{\max} , não pode superar 20% do cobrimento nominal, ou seja,

$$d_{\max} \leq 1,2c_{nom}$$

Diâmetro equivalente do feixe:


barra isolada


Feixes de barras

$$A_s = n \frac{\pi \phi^2}{4} = \frac{\pi \phi_e^2}{4}$$

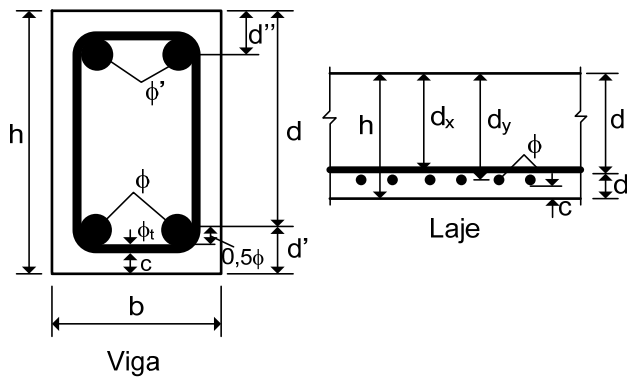
$$\phi_e = \phi \sqrt{n}$$

- Diâmetro máximo do agregado graúdo em função do cobrimento nominal para Classe de Agressividade Ambiental I:

Lajes: $c_{nom}=2,0$ cm $d_{max}= 24$ mm
 Vigas e pilares: $c_{nom}=2,5$ cm $d_{max}=30$ mm

(usar $d_{max}=19$ mm no projeto)

- **Altura útil d :**



Vigas e pilares:

$$d' = c + \phi_t + 0,5\phi$$

Lajes maciças:

$$d' = c + \phi$$

$$d = h - d'$$

Tabela 7 – Parâmetro d' para vigas e pilares (cm)

Classe de agressividade	$\phi = 10\text{mm}$	$\phi = 20\text{mm}$
I	3,5	4,0
II	4,0	4,5
III	5,0	5,5
IV	6,0	6,5

(Considerando estribos de 5mm)

Tabela 8 – Parâmetro d' para lajes maciças (cm)

Classe de agressividade	$\phi = 5\text{mm}$	$\phi = 10\text{mm}$
I	2,5	3,0
II	3,0	3,5
III	4,0	4,5
IV	5,0	5,5

Abertura máxima das fissuras:

- Classe de agressividade I: abertura máxima de 0,4mm;
- Classes de agressividade II e III: abertura máxima de 0,3mm.
- Classe de agressividade IV: abertura máxima de 0,2mm.

- Em casos específicos, esses limites devem ser reduzidos.
Ex.: nos reservatórios, para garantir a estanqueidade.

SUGESTÕES PARA ESCOLHA DA CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL

- Zona rural: Classe I
- Submersa em água doce: Classe I
- Submersa em água do mar: Classe IV
- Reservatórios de água potável dos edifícios: Classe II (longe do mar) e Classe III (litorânea)
- Edifícios residenciais e de escritório: conforme a NBR-6118. Para concreto revestido com argamassa e pintura, cerâmica, etc. pode-se reduzir os cobrimentos em 0,5 cm (mantendo as exigências de qualidade do concreto).