

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

Concreto Armado:
Ancoragem por Aderência

José Samuel Giongo

São Carlos, março de 2004

APRESENTAÇÃO

Este texto apresenta a rotina para o cálculo do comprimento de ancoragem por aderência para barras de aço e são estudadas as indicações para cálculo da resistência de aderência entre barra e concreto.

Como etapas do processo constitui-se, primeiramente, um estudo de normas nacionais com relação às prescrições para determinação do comprimento de ancoragem das barras das armaduras. Na seqüência, desenvolvimento e apresentação das expressões matemáticas representativas dos cálculos para determinação dos comprimentos de ancoragem e, posteriormente, montagem de tabelas práticas para cálculo do comprimento de ancoragem.

Este trabalho baseia-se em análises dos conceitos e termos apresentados na NBR 6118:2003.

A análise da consideração da resistência de aderência, dos critérios para determinação dos comprimentos de ancoragem, segundo as normas indicadas e montagem das tabelas foi feita pelo Engenheiro Daniel dos Santos, na época aluno do quarto ano de engenharia civil da USP – EESC, durante período de trabalho de pesquisa na modalidade de iniciação científica com bolsa da FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

Esta versão contou com o trabalho do Eng.^o Rodrigo Gustavo Delalibera, aluno de doutorado no Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos – USP, estagiário da disciplina SET 404 - Estruturas de Concreto A, no primeiro semestre de 2004, pelo Programa de Aperfeiçoamento de Ensino – PAE.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	ADERÊNCIA	4
2.1	Generalidades	4
2.2	Tensão de aderência	6
2.3	Resistência de aderência indicada na NBR 6118:2003	7
2.4	Zonas de aderência	9
2.5	Barras transversais soldadas	10
3	Comprimento de ancoragem	11
3.1	Barras isoladas sem ganchos nas extremidades	11
3.1.1	Exemplo de cálculo de comprimento de ancoragem	12
3.1.2	Comprimento de ancoragem necessário	13
3.1.3	Armadura transversal na ancoragem	13
3.1.3.1	Barras longitudinais com $\varnothing < 32\text{mm}$	14
3.1.3.2	Barras longitudinais com $\varnothing \geq 32\text{mm}$	14
3.2	Feixe de barras	14
3.3	Ancoragem fora dos apoios de barras providas de ganchos nas extremidades	16
3.3.1	Redução no comprimento de ancoragem	16
3.3.2	Tipos de ganchos	16
3.4	Ancoragem de barras dobradas	17
4	Ancoragem de barras comprimidas	17
5	Ancoragem de estribos	18
6	Emendas das barras	19
6.1	Generalidades	19
6.2	Emendas por traspasse	20
6.2.1	Proporção das barras emendadas	21
6.2.2	Comprimento de traspasse de barras tracionadas isoladas	22
6.2.3	Comprimento de traspasse de barras comprimidas isoladas	22
6.2.4	Armadura transversal nas emendas por traspasse, em barras isoladas	22
6.2.4.1	Emendas de barras tracionadas da armadura principal	22
6.2.4.2	Emendas de barras comprimidas	23
6.2.4.3	Emendas de barras da armadura secundária	23
6.2.5	Emendas por traspasse de feixe de barras	23
6.3	Emendas por luvas roscadas	23
6.4	Emendas por solda	23
7	Ancoragem por meio de dispositivos mecânicos	25
8	Comprimento das barras em elementos estruturais fletidos	25
8.1	Decalagem do diagrama de força nas barras	25
8.1.1	Modelo de Cálculo I	25
8.1.2	Modelo de Cálculo II	26
8.2	Ponto de início de ancoragem	26
8.3	Caso de barras isoladas nas mesas	28
8.4	Armadura de tração na seção de apoio	28
8.4.1	Generalidades	28
8.4.2	Ancoragem da armadura de tração no apoio	29
8.5	Barras prolongadas até os apoios	30
8.5.1	Apoio de extremidade	30
8.5.2	Viga engastada elasticamente em pilar de extremidade	32
8.5.3	Barras da armadura prolongadas até os apoios	34
8.5.4	Ancoragem de telas soldadas por aderência	34
9	Referências bibliográficas	35

1. INTRODUÇÃO

A análise da ancoragem de barras ou fios da armadura em elementos estruturais de concreto armado é de suma importância pois, ao se definirem os seus pontos de interrupções, de acordo com os diagramas de esforços solicitantes de cálculo, há necessidade de se transferir para o concreto que as envolve as tensões que as solicitam. Às vezes, como em tramos de pilares, é necessário interromper as barras por uma condição construtiva havendo, portanto, necessidade de transferir as tensões das barras posicionadas no tramo superior para as posicionadas no tramo inferior; esta transferência de tensões se dá pela emenda por traspasse entre as barras, que é feita considerando o comprimento de ancoragem das barras.

Nas vigas de concreto armado algumas barras da armadura longitudinal são interrompidas antes dos apoios procurando-se otimizar a sua distribuição com a variação dos momentos fletores solicitantes de cálculo, deslocado do comprimento (a_e) conforme justificado por ocasião do estudo de seções transversais de peças de concreto armado submetidas à ação de força cortante.

Observando o diagrama de M_d da viga da figura 1 e considerando que para absorver o momento fletor máximo são necessárias 6 barras de diâmetro ϕ , e entendendo que cada barra deve absorver 1/6 do valor do momento fletor de cálculo, pode-se perceber que nem todas as barras devem ir até os apoios pois, os momentos fletores diminuem nos sentidos dos apoios. Para as seções afastadas da seção de meio de vão o número de barras é menor e pode ser determinado em função da variação do momento fletor.

Nas seções transversais em que essas barras tracionadas podem ser interrompidas, em função da verificação da resistência da seção transversal em face das tensões normais, há sempre a necessidade de provê-las de um comprimento adicional, chamado de comprimento de ancoragem reto (l_b), com a finalidade de se transferir as tensões atuantes para o concreto.

As barras 1, 2 e 3, indicadas na figura 1, devem chegar até os apoios. As barras 4, 5 e 6 podem ser tiradas de serviço antes dos apoios, desde que providas de conveniente comprimento de ancoragem.

Para a barra número 4 adotou-se o mesmo desenho das barras 1, 2 e 3 pois o seu comprimento, sem gancho nas extremidades, fica muito próximo da distância entre as faces externas dos pilares.

Nas vigas para as quais há necessidade de colocação de barras comprimidas e barras tracionadas (armadura dupla) exigidas pelo cálculo, as barras comprimidas devem ter também comprimento de ancoragem convenientemente determinado.

No caso de pilares, que são elementos estruturais lineares, verticais e essencialmente comprimidos, as barras da armadura vertical calculadas atendendo os critérios de verificação da capacidade resistente com relação às tensões normais, devem ser convenientemente ancoradas.

O processo de construção da estrutura em concreto armado de edifícios prevê a concretagem em etapas relativas a cada pavimento, o que exige que as armaduras para os pilares tenham em cada andar um comprimento adicional (Figura 2) necessário para transferir as tensões nas armaduras do tramo de pilar imediatamente acima.

Como pode ser visto na figura 2 a armadura vertical do primeiro tramo do pilar deve estar convenientemente ancorada no bloco de coroamento das estacas de fundação.

Como já foi dito, há necessidade de transferir tensões em barras da armadura para o concreto que as envolve o que é feito pelo comprimento de ancoragem. Para que ocorra essa transferência é necessário que o concreto e o aço trabalhem em conjunto, e isto é possível por conta da aderência que há entre esses dois materiais.

A aderência é a responsável pela possibilidade de se unirem dois materiais de características diferentes: concreto que resiste preponderantemente às tensões de compressão e o aço que resiste as tensões de tração.

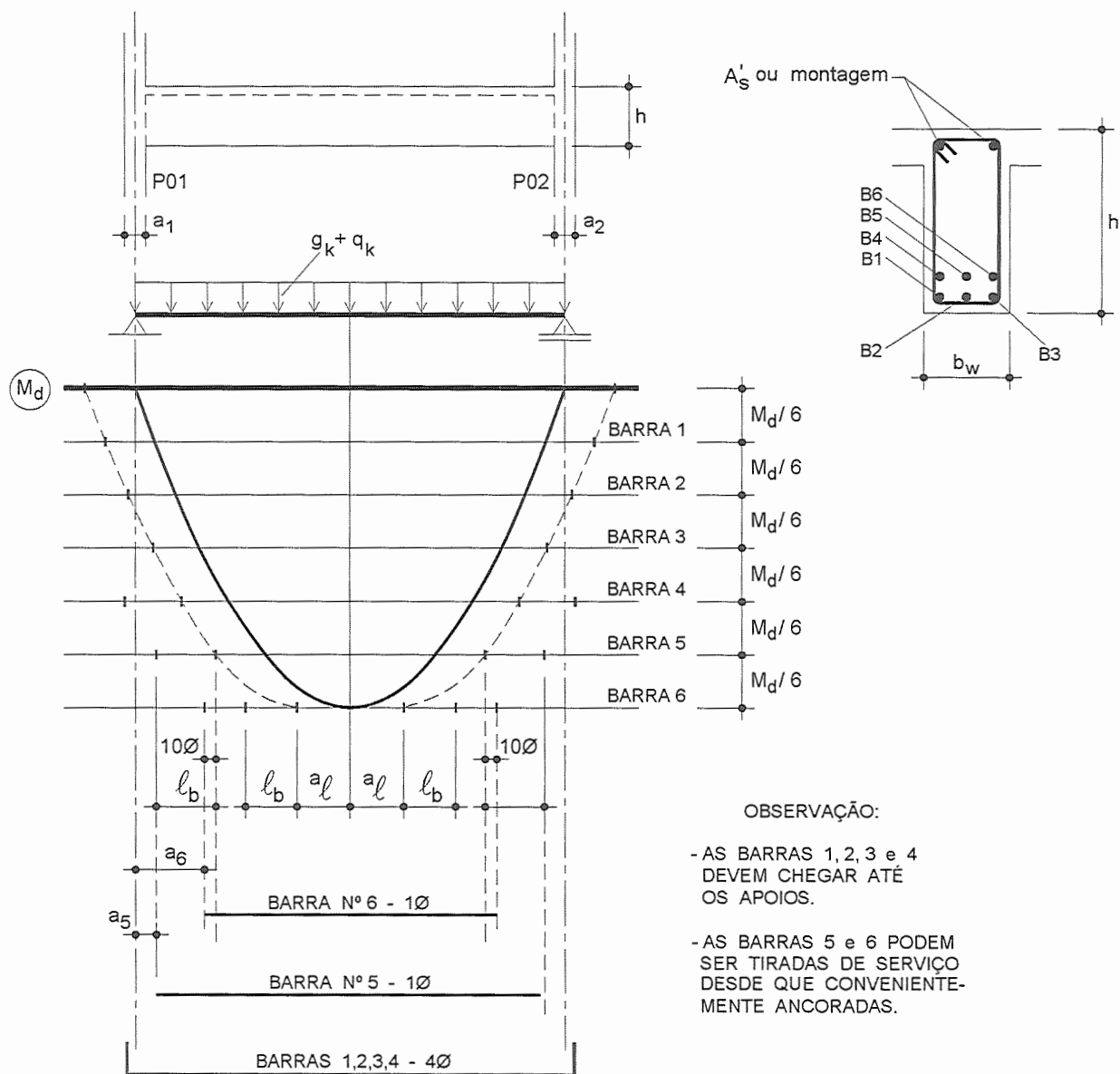


Figura 1 - Vigas: ancoragem da armadura longitudinal.

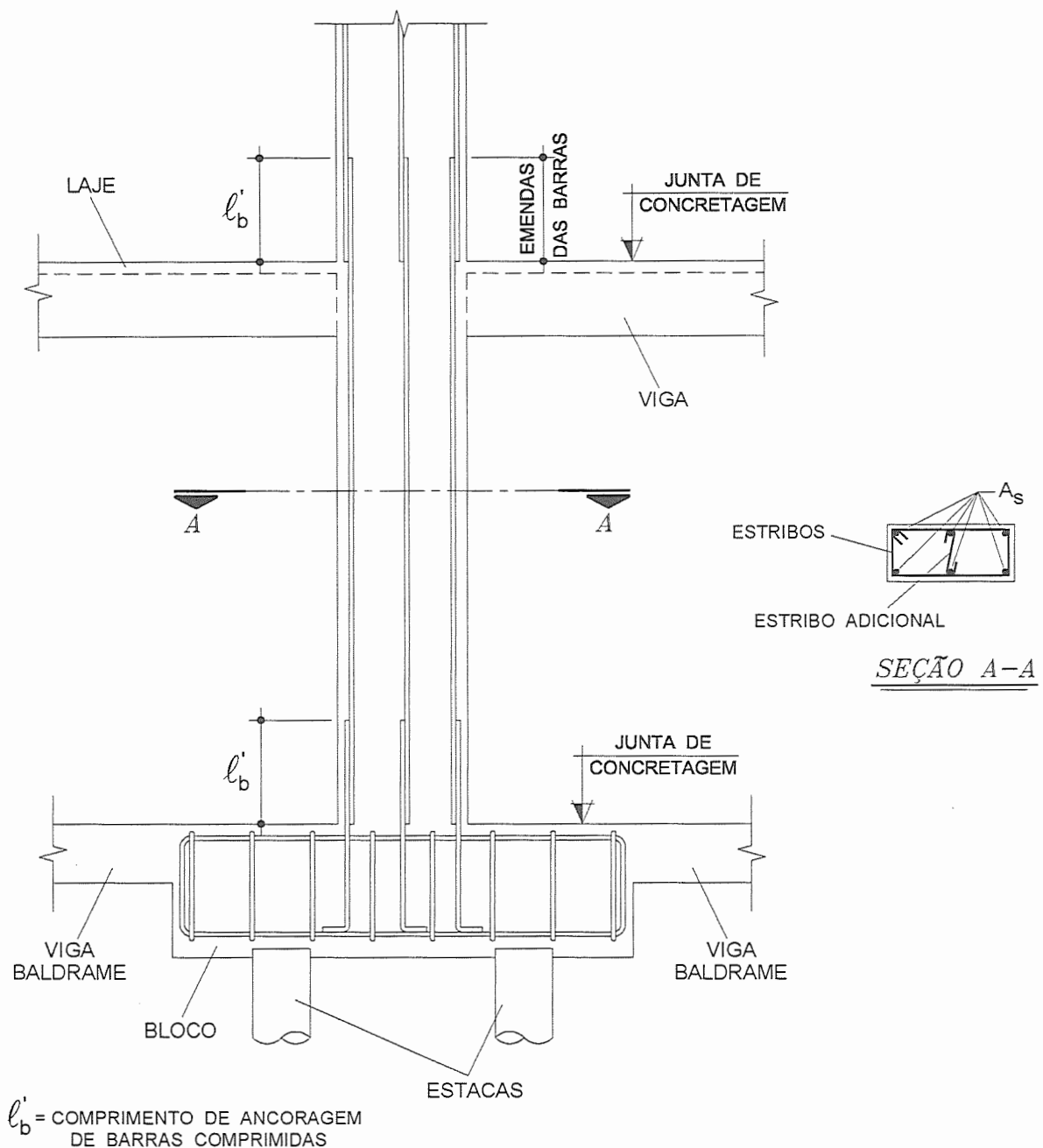


Figura 2 - Pilares: ancoragem da armadura longitudinal.

Tendo ficado claro a necessidade de ancorar convenientemente as barras da armadura nos elementos estruturais em concreto armado, iniciam-se a seguir as análises dos critérios para quantificar a resistência de aderência e a determinação dos comprimentos de ancoragem.

As barras da armadura devem ter as seguranças das ancoragens verificadas sempre e em todas as situações que elas ocupam nos elementos estruturais. Assim, tão importante quanto a verificação da eficiente ancoragem das barras tiradas de serviço antes dos apoios é a verificação das ancoragens das barras nos apoios.

Analisando a figura 2 pode-se perceber que as barras longitudinais e transversais do bloco sobre as estacas devem ser ancoradas para que elas possam resistir e transferir para o concreto as força que as solicitam. O mesmo ocorre com as barras das armaduras longitudinal e transversal do pilar.

2. ADERÊNCIA

2.1 GENERALIDADES

A aderência é a propriedade que impede que haja deslocamento relativo entre as barras da armadura e o concreto, sendo assim responsável pela solidariedade entre esses materiais, fazendo com que adquiram, em conjunto, características próprias do concreto armado.

Para que se entenda melhor a aderência, é possível separá-la em três tipos:

Aderência por adesão

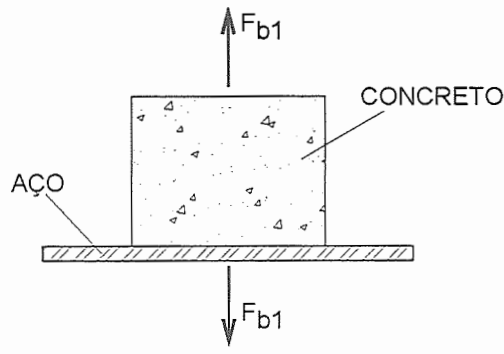
Ocorre por causa das ligações físico-químicas entre as barras de aço e a pasta de cimento, e se caracteriza por uma resistência de adesão que se opõe à separação dos dois materiais. Para pequenos deslocamentos relativos entre as barras de aço, sob tensão, e a massa de concreto que a envolve essa ligação é destruída. A figura 3a mostra um cubo de concreto moldado sobre uma placa de aço; a ligação entre estes dois materiais se dá pela adesão. Para separá-los há necessidade de se aplicar uma ação representada pela força F_{b1} , indicando separação na direção vertical, mas que geraria o mesmo efeito de adesão se aplicada na horizontal.

Aderência por atrito

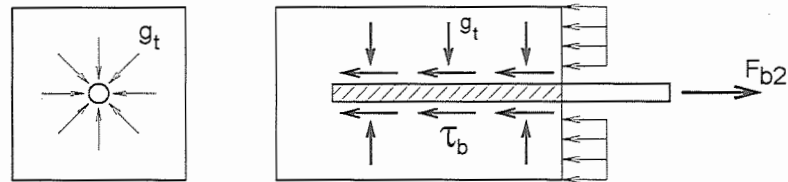
O atrito se manifesta quando há tendência ao deslocamento relativo entre os materiais, depende da rugosidade superficial da barra e da compressão uniformemente distribuída exercida pelo concreto sobre a barra em virtude da retração (Figura 3b). O coeficiente de atrito entre o concreto e aço é alto em função da rugosidade da superfície das barras de aço resultando valores entre 0,3 e 0,6 conforme indicação de Leonhardt (1977). A figura 3b apresenta o efeito da aderência por atrito onde se pode notar que a oposição à ação F_{b2} constituídas pela resultante das tensões (τ_b) distribuídas ao longo da barra. Há também, contribuindo favoravelmente a esse efeito, a ação da força radial uniformemente distribuída (g_t) oriunda da retração do concreto que envolve a barra.

Aderência mecânica

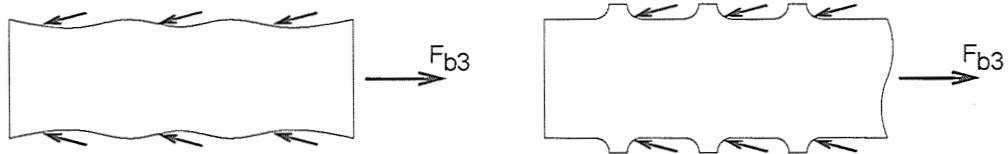
Esta parcela é por conta da conformação superficial das barras que apresentam nervuras (barras de alta aderência) que funcionam como peças de apoio e, mobilizando tensões de compressão no concreto, aumentam significativamente a aderência (Figura 3c). Mesmo as barras lisas apresentam uma rugosidade superficial por causa do processo de fabricação (Figura 3c.1), que nos cálculos de ancoragem não são levadas em conta. Na figura 3c.2 é mostrada a conformação superficial das barras de alta aderência, onde as massas contribuem de modo significativo melhorando a capacidade de aderência.



a) ADERÊNCIA POR ADESÃO



b) ADERÊNCIA POR ATRITO



c.1) BARRAS LISAS (CA-25)

c.2) BARRAS COM NERVURAS (CA-50, CA-60)

Figura 3 - Ilustração das parcelas de aderência [Fusco, 1975].

A figura 4 apresentada em Leonhardt (1977) mostra que mesmo uma barra lisa pode apresentar aderência mecânica por causa da rugosidade superficial ocorrida por corrosão, gerando uma superfície irregular. Para efeito de comparação são apresentadas figuras das superfícies de barras de aço de seção circular recém laminadas (CA-50) e de fios de aço obtidos por laminação a quente e posterior encruamento a frio por estiramento (CA-60).

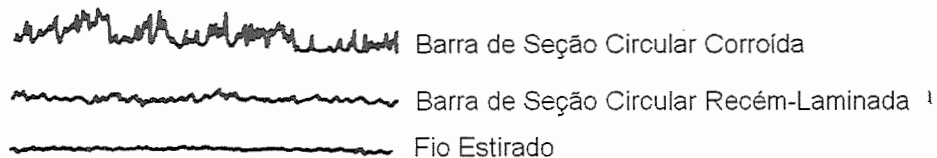


Figura 4 - Rugosidade superficial de barras e fios lisos [Leonhardt, 1977].

A separação da aderência nas três parcelas indicadas - adesão, atrito e mecânica - é apenas esquemática, pois não é possível determinarem-se experimentalmente cada uma delas em separado.

A análise experimental da aderência é necessária para que se possa quantificá-la e, posteriormente, determinar os comprimentos de ancoragem das barras e fios da armadura.

2.2 TENSÃO DE ADERÊNCIA

As tensões de aderência nos elementos estruturais de concreto armado atuam sempre que houver variação de deformação nas barras de aço e, por conseguinte, variação de tensão em um segmento desta. As causas da variação são as seguintes, segundo Leonhardt (1977).

a. Ações - alteram os esforços solicitantes, que por sua vez modificam os valores das tensões nas armaduras tracionadas ou comprimidas;

b. Fissuras - as fissuras quando surgem no concreto junto às faces das peças acarretam um acréscimo de tensões nas barras da armadura aumentando, portanto, as tensões de aderência;

c. Ancoragens nos extremos das barras - na seção transversal onde se pode retirar a barra de serviço, a força atuante deve ser transferida para o concreto por meio das tensões de aderência;

d. Variações de temperatura - a maior condutibilidade térmica do aço provoca aquecimento mais rápido das barras de aço do que no concreto, por exemplo, em caso de incêndio. A aderência impede que as barras de aço tenham dilatação livre, acarretando ruptura do concreto do cobrimento;

e. Retração do concreto - gera tensões de tração no concreto e de compressão na armadura e é impedida pela armadura;

f. Deformação lenta do concreto - no caso de peças comprimidas o encurtamento provocado pela deformação lenta, as barras que compõem a armadura recebem um acréscimo de tensão e o concreto sofre um alívio.

A caracterização da aderência, portanto, é complexa e depende dos fenômenos indicados. Sendo assim, recorre-se a análise experimental, realizando os ensaios de arrancamento, que permitem a determinação de valores médios da tensão de aderência.

Essa tensão média de aderência é determinada considerando o método das tensões admissíveis supondo-se que, na iminência do arrancamento, todo o comprimento da barra, dentro do elemento de concreto, transferiu a tensão nela atuante para o concreto (Figura 5).

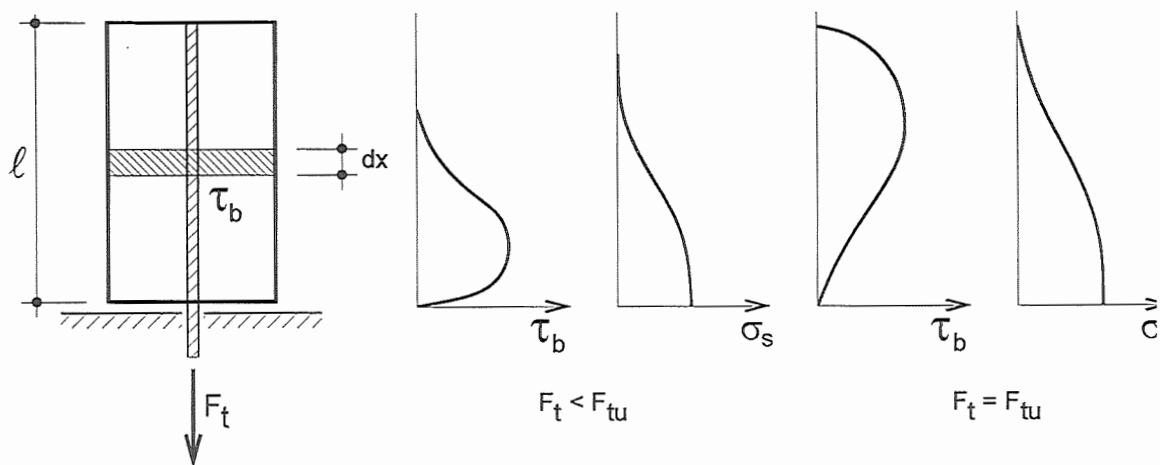


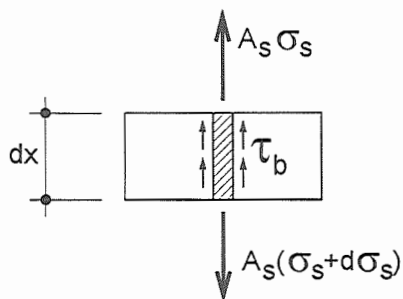
Figura 5 - Ensaio de arrancamento [Santos Netto, 1976].

A tensão σ_s na barra diminui à medida que a seção transversal ocupa posições afastadas da seção que coincide com a extremidade do bloco de concreto. Isso acontece por causa da aderência que permite a transferência das tensões atuantes na barra para o concreto que a envolve.

No caso de se ter uma força de tração F_{st} menor que a força de tração F_{tu} , a aderência será mobilizada em apenas uma parte do comprimento total da barra.

Quando se tiver $F_{st} = F_{stu}$ a aderência será mobilizada em todo o comprimento da barra.

Considerando-se um elemento infinitesimal dx (Figura 6), no equilíbrio das forças atuantes na barra e no concreto que a envolve, pode-se escrever a expressão 1 que relaciona a tensão de aderência com a tensão atuante na barra e com as características geométricas da barra.



Assim tem-se:

$$A_s \sigma_s + \pi \phi \tau_b dx = A_s \sigma_s + A_s d\sigma_s$$

$$\tau_b = \frac{A_s}{\pi \phi} \cdot \frac{d\sigma_s}{dx} \quad [1]$$

Figura 6 - Elemento Infinitesimal.

As tensões de aderência (τ_b) se opõem à tendência de deslocamento relativo entre a barra de aço e o concreto que a envolve.

2.3 RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA INDICADA NA NBR 6118:2003

Embora as tensões de aderência não sejam uniformemente distribuídas ao longo do comprimento da barra, para o cálculo do comprimento de ancoragem básico, adota-se um valor da resistência de aderência de cálculo (f_{bd}) constante e dado pela expressão 2.

O valor da resistência de aderência de cálculo (f_{bd}) depende da conformação superficial da barra, pela consideração do coeficiente η_1 , da qualidade do concreto, por meio do valor da resistência à tração do concreto de cálculo (f_{ctd}) e da localização da barra no elemento estrutural, considerando as zonas de boa ou má aderência e do diâmetro das barras, ou seja:

$$f_{bd} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 f_{ctd} \quad [2]$$

A NBR 6118:2003 define que o valor da resistência à tração do concreto de cálculo (f_{ctd}) é dado pelo valor mínimo da resistência característica à tração, considerando o coeficiente de minoração da resistência do concreto $\gamma_c = 1,4$ (expressão 3), e que os valores desta resistência e da resistência média à tração são dadas pelas expressões 4 e 5, respectivamente.

$$f_{ctd} = f_{ctk,inf} / \gamma_c \quad [3]$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 f_{ctm} \quad [4]$$

$$f_{ctm} = 0,3 f_{ck}^{2/3} \quad [5]$$

Os coeficientes representados pela letra grega neta (η) têm os seguintes valores e significados:

$$\eta_1 = 1,0 \text{ para barras lisas;}$$

$$\eta_1 = 1,4 \text{ para barras dentadas;}$$

$$\eta_1 = 2,25 \text{ para barras nervuradas;}$$

$$\eta_2 = 1,0 \text{ para situações de boa aderência;} \quad [6]$$

$$\eta_2 = 0,7 \text{ para situações de má aderência;}$$

$$\eta_3 = 1,0 \text{ para } \phi < 32 \text{ mm;}$$

$$\eta_3 = (132 - \phi) / 100 \text{ para } \phi > 32 \text{ mm.}$$

A NBR 7480:1996 especifica que os valores dos coeficientes de conformação superficial mínimo (η), para diâmetros iguais ou maiores a 10mm, são iguais a 1,0 para as barras de aço CA-25 (barras lisas) e 1,5 para as barras de aço CA-50 (barras com nervuras) e para os fios de aço CA-60.

A NBR 6118:2003 especifica que em relação ao tipo de superfície as barras e os fios podem ser lisos ou providos de saliências ou nervuras. Para cada categoria de aço, o coeficiente de conformação superficial mínimo, determinado por meio de ensaios de acordo com a NBR 7477:1982 deve atender ao indicado na NBR 7480:1996. Para efeito de cálculo da resistência de ancoragem, a conformação superficial é medida pelo coeficiente η_1 , cujo valor está relacionado ao coeficiente de conformação superficial η como estabelecido na tabela 1.

Tabela 1 - Relação entre η_1 e η [NBR 6118:2003]

Tipo de barra	Coeficiente de conformação superficial	
	η NBR 7480:1996	η_1 NBR 6118: 2003
Lisa	1,0	1,0
Dentada	1,2	1,4
Alta aderência	$\geq 1,5$	2,25

2.4 ZONAS DE ADERÊNCIA

A resistência de aderência depende das posições das barras e fios da armadura no elemento estrutural sendo introduzindo o conceito de zonas de aderência.

A NBR 6118:2003 especifica que uma barra que compõem a armadura está em uma situação de boa aderência, indicadas na figura 7 como região I, quando sua posição relativa estiver de acordo com uma das posições a seguir:

- a) com inclinação maior que 45° sobre a horizontal (Figura 7a);
- b) para o caso de barra horizontal ou com inclinação menor que 45° com a horizontal, desde que localizadas no máximo a 30cm acima da face inferior da peça ou junta de concretagem mais próxima (Figura 7b);
- c) quando a peça tiver espessura máxima de 30 cm (Figura 7b);
- d) quando a altura da peça for menor do que 60cm, a região que dista 30cm a partir da face inferior (Figura 7c);
- e) exceto nos 30cm superiores de peças com espessura maior que 60cm (Figura 7d);
- f) nos casos de lajes e vigas concretadas simultaneamente, a parte inferior pode estar em uma região de boa aderência e a superior em região de má e a laje, se tiver espessura menor do que 30cm estará em uma região de boa aderência, isto está ilustrado na figura 7e e 7f.

As demais situações são consideradas de má aderência indicadas nas figuras como região II.

Essa divisão dos elementos estruturais em zonas de boa e má aderência se deve ao fenômeno da exsudação que, mesmo em concretos bem compactados, sempre ocorre. Ainda, os agregados graúdos, durante o processo de adensamento, deslocam-se para a parte inferior do elemento, e com a evaporação da água de amassamento junto à parte superior surgem vazios em torno das barras posicionadas nesta região prejudicando a aderência.

Para as barras localizadas em zonas de má aderência, o coeficiente η_2 é adotado igual a 0,7, o que significa majorar o comprimento de ancoragem em 43%, como se vê analisando a expressão 9. Considerando situações de boa aderência o coeficiente η_2 é adotado igual a unidade.

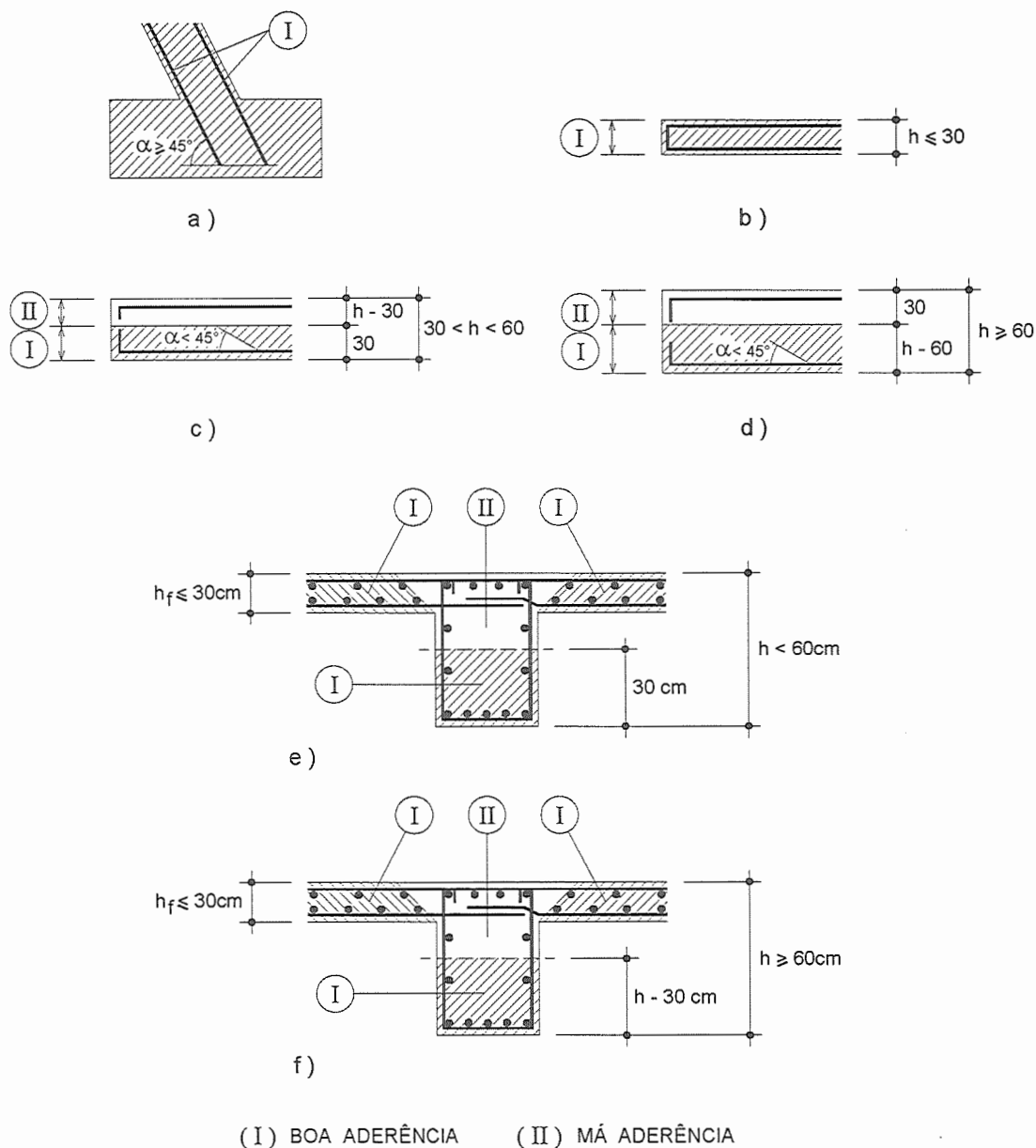


Figura 7 - Situações de boa e má aderência [PROMON, 1976].

2.5 BARRAS TRANSVERSAIS SOLDADAS

A NBR 6118:2003 indica que podem ser utilizadas várias barras transversais soldadas para a ancoragem de barras, desde que seja seguido o indicado na figura 8:

- a- diâmetro da barra soldada $\phi_t \geq 0,60 \phi$;
- b- a distância da barra transversal ao ponto de início da ancoragem seja $\geq 5 \phi$;
- c- a resistência ao cisalhamento da solda deve superar a força mínima de $0,3 A_s f_{yd}$ (30% da resistência da barra ancorada).

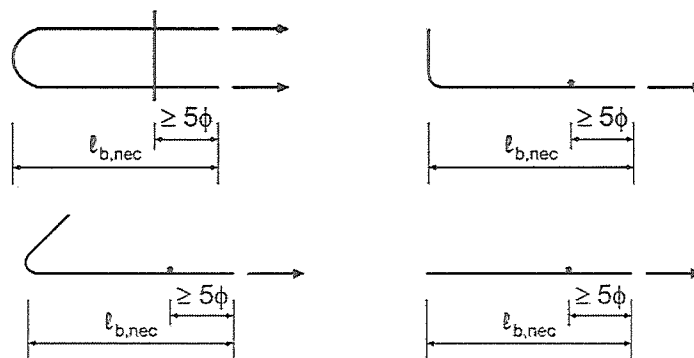


Figura 8 – Ancoragem com barras transversais soldadas

No caso de barra transversal única deve-se proceder como indicado para barra única soldada na extremidade de estribos.

3. COMPRIMENTO DE ANCORAGEM

3.1 BARRAS ISOLADAS SEM GANCHOS NAS EXTREMIDADES

O comprimento de ancoragem básico por aderência de barra é o comprimento mínimo necessário para que a mesma transfira ao concreto a força de tração ($A_s f_{yd}$) que a solicita, admitindo, que ao longo desse comprimento a distribuição da resistência de aderência seja uniforme e igual a f_{bd} , dada pela expressão [2].

Conhecendo-se as condições geométricas da barra e a resistência de escoamento, a resistência de aderência calculada pela expressão [2], o valor do coeficiente de rugosidade superficial da barra, pode-se calcular o valor do comprimento de ancoragem básico reto (l_b), conforme indicado na figura 9.

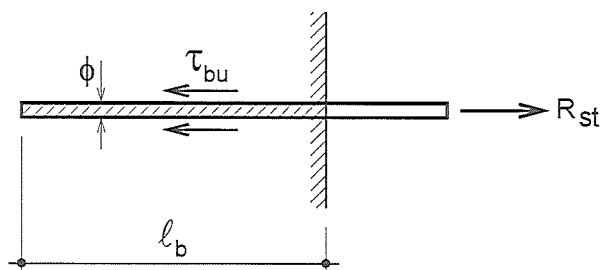


Figura 9 - Determinação do comprimento de ancoragem.

No Estado Limite Último considerando o equilíbrio das forças interna (R_d) e externa (S_d), pode-se determinar a expressão com a qual se calcula o comprimento de ancoragem básico (l_b). Considerando que a solitação de cálculo é R_{st} e a resultante da resistência de aderência ao longo da área da barra em contato com o concreto pode-se escrever (Figura 9):

$$A_s f_{yd} = f_{bd} \cdot l_b \cdot \pi \phi \quad [7]$$

Substituindo o valor da área da seção transversal da barra, vem:

$$\frac{\pi\phi^2}{4} f_{yd} = f_{bd} \ell_b \pi\phi \quad [8]$$

Resultando a expressão [9] com a qual se calcula o comprimento de ancoragem básico (ℓ_b), para barras sem ganchos nas extremidades.

$$\ell_b = \frac{\phi f_{yd}}{4 f_{bd}} \quad [9]$$

Assim que uma barra da armadura longitudinal de uma peça de concreto armado puder ser retirada de serviço basta assegurar que, à partir da seção onde ela pode ser retirada, exista um comprimento suplementar (ℓ_b) que garanta a transferência das tensões na barra para o concreto.

3.1.1 Exemplo de cálculo do comprimento de ancoragem

Calcular o comprimento de ancoragem básico sem gancho para uma barra de diâmetro ϕ maior ou igual a 10mm, de aço categoria CA-50, que faça parte da armadura longitudinal de tração, posicionada em zona de boa aderência, de uma viga moldada com concreto de resistência característica à compressão igual a 20MPa (C20).

Solução:

Usando a expressão [2] determina-se o valor da resistência de aderência considerando:

$\eta_1 = 2,25$, pois, se trata de barra com diâmetro igual a 10mm e, portanto, laminada com nervuras externas com a finalidade de melhorar a aderência;

$\eta_2 = 1,0$, para situações de boa aderência; e,

$\eta_3 = 1,0$ para $\phi < 32$ mm;

o valor de f_{ctm} é dado pela expressão [5] resultando,

$$f_{ctm} = 0,3 f_{ck}^{2/3} = 0,3 \cdot 20^{2/3} = 2,21 \text{ MPa};$$

com $f_{ctk,inf}$ calculado pela expressão [4], tem-se,

$$f_{ctk,inf} = 0,7 f_{ctm} = 0,7 \cdot 2,21 = 1,55 \text{ MPa};$$

resultando, portanto, para f_{ctd} , de acordo com a expressão [3],

$$f_{ctd} = f_{ctk,inf} / \gamma_c = 1,55 / 1,4 = 1,11 \text{ MPa};$$

substituindo em [2], vem:

$$f_{bd} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 f_{ctd} = 2,25 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,11 = 2,50 \text{ MPa}$$

O comprimento de ancoragem básico, sem gancho, para barras de diâmetros maiores ou iguais a 10mm e menores do que 32mm, de aço CA-50 e para concreto C20, resulta, usando a expressão [9]:

$$l_b = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{500/1,15}{2,50}$$

$$l_b = 44 \phi$$

Que é o comprimento de ancoragem em função do diâmetro (ϕ) da barra (10mm < ϕ < 32mm), considerando barra de aço CA-50 e concreto C20. Esse valor está indicado na Tabela 1, apresentada no Apêndice deste trabalho, valendo sempre que as condições de dimensionamento forem semelhantes. No Apêndice a tabela 1 apresenta os comprimentos de ancoragem em função dos diâmetros, para os casos de concretos do Grupo I de resistência da NBR 8953:1992 e para os aços de categorias indicadas na NBR 7480:1996.

3.1.2 Comprimento de ancoragem necessário

No caso de a área de armadura efetiva A_{se} ser maior que a área de armadura calculada $A_{s,calc}$, e isto ocorre na maioria das vezes, pois as barras que compõem a armadura têm bitolas padronizadas, a tensão nas barras diminui e, portanto, o comprimento de ancoragem pode ser reduzido na mesma proporção.

Chamando de l_b o comprimento de ancoragem relativo à área de armadura calculada ($A_{s,calc}$) e $l_{b,nec}$ o comprimento de ancoragem relativo à área de armadura efetiva, pode-se escrever:

$$l_{b,nec} = \alpha_1 l_b \frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}} = \alpha_1 \frac{\phi}{4} \frac{f_{yd}}{\tau_{bu}} \frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}} \geq l_{b,min} \quad [10]$$

A NBR 6118:2003 introduz na expressão [10] o coeficiente α_1 para levar em conta a existência de gancho na extremidade da barra, sendo:

$\alpha_1 = 1,0$ para barras sem gancho;

$\alpha_1 = 0,7$ para barras tracionadas com gancho, com cobrimento no plano normal ao do gancho $\geq 3\phi$;

com $l_{b,min}$ dado pelo maior valor entre $0,3 l_b$, 10ϕ e 100 mm.

3.1.3 Armadura transversal na ancoragem

Nas regiões em que se consideram de ancoragem das barras da armadura longitudinal há a possibilidade de ocorrer fendilhamento do concreto por ocorrerem tensões de tração transversal às barras. A armadura transversal constituída por estribos pode controlar as aberturas das fissuras. Podem ser consideradas as armaduras transversais existentes ao longo do comprimento de ancoragem, como capazes de cumprir essa função desde que a soma das áreas dessas armaduras seja maior ou igual às especificadas em 3.1.3.1 e 3.1.3.2.

3.1.3.1 Barras longitudinais com $\phi < 32$ mm

Ao longo do comprimento de ancoragem deve ser prevista armadura transversal capaz de resistir a 25% da força de uma das barras longitudinais ancoradas. Se a ancoragem envolver barras de diâmetros diferentes, prevalece para esse efeito, a de maior diâmetro.

3.1.3.2 Barras longitudinais com $\phi \geq 32$ mm

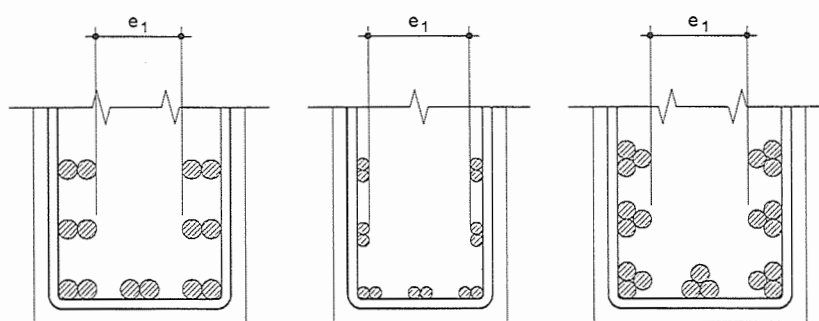
Deve ser verificada a armadura em duas direções transversais ao conjunto de barras ancoradas. Essas armaduras transversais devem suportar os esforços de fendilhamento segundo os planos críticos, respeitando espaçamento máximo de 5ϕ , sendo ϕ é o diâmetro da barra longitudinal ancorada.

Nos casos de barras comprimidas, pelo menos uma das barras constituintes da armadura transversal deve estar situada a uma distância igual a quatro diâmetros (da barra ancorada) além da extremidade da barra.

3.2 FEIXE DE BARRAS

Quando na peça estrutural tem pouco espaço, por ser pequena a sua largura, para alojar as barras da armadura exigidas pelo cálculo de verificação das tensões normais há necessidade de detalhá-las em forma de feixe de barras, conforme mostrado na figura 10.

Este tipo de detalhamento permite um melhor adensamento do concreto por facilitar a passagem de vibrador. Os diâmetros das agulhas dos vibradores são de 35cm, 50cm, 75cm, reservando-se o de 100mm para peças com grande consumo de concreto por exemplo, os blocos de fundação. Em função das larguras das vigas escolhe-se o diâmetro da agulha do vibrador que será usado.



e_1 = Largura livre para passagem do vibrador

Figura 10 - Arranjo dos feixes de barras em vigas [Fusco,1975].

Fusco (1975), sugere que nas estruturas usuais de edifícios a dimensão e_1 , mostrada na figura 10, deve ser adotada igual ao diâmetro da agulha do vibrador acrescida de 1cm. Lembra-se que não é conveniente que, durante o processo de adensamento do concreto, o vibrador encoste nas barras da armadura pois, é possível tirá-las da posição por ruptura do arame recozido que as fixa.

Na maioria dos projetos estruturais de edifícios em concreto armado as larguras das vigas e as menores dimensões dos pilares são definidas em função de exigências

arquitetônicas, não permitindo ao projetista adotar valores compatíveis com a quantidade de armadura a alojar.

A NBR 6118:2003 diz que as larguras das vigas não devem ter medidas menores do que 12cm; 10cm pode ser adotado desde que cuidados especiais sejam considerados no projeto e execução. A menor dimensão das seções dos pilares não deve ser menor do que 19cm; podem ser adotados valores entre 19cm e 12cm desde que os esforços solicitantes finais de cálculo sejam majorados de um coeficiente γ_n que é dado em função da dimensão considerada.

Ao adotar detalhamento em feixes, como mostrado na figura 11, as barras ficam posicionadas uma ao lado da outra no caso de feixes de duas barras e, com os seus centros formando um triângulo equilátero no caso de feixes de três barras e para feixes com quatro barras, os seus centros formam um quadrado.

Para o cálculo do comprimento de ancoragem de feixes de barras por aderência considera-se o feixe como uma barra de diâmetro equivalente igual a:

$$\phi_n = \phi_f \sqrt{n}$$

As barras constituintes de feixes devem ter ancoragem reta, sem ganchos, e atender às seguintes condições:

a) quando o diâmetro equivalente do feixe for menor ou igual a 25 mm, o feixe pode ser tratado como uma barra única, de diâmetro igual a ϕ_n , para a qual vale o estabelecido para o caso de barra única;

b) quando o diâmetro equivalente for maior que 25 mm, o comprimento de ancoragem deve ser calculado para cada barra isolada, distanciando as suas extremidades de forma a minimizar os efeitos de concentrações de tensões de aderência; a distância entre as extremidades das barras do feixe não deve ser menor que 1,2 vez o comprimento de ancoragem de cada barra individual;

c) quando por razões construtivas, não for possível proceder como recomendado na alínea anterior, o comprimento de ancoragem pode ser calculado para o feixe, como se fosse uma barra única, com diâmetro equivalente ϕ_n . A armadura transversal adicional deve ser obrigatória e obedecer ao estabelecido o que está indicado no item 3.1.2, conforme ϕ_n seja menor, igual ou maior que 32 mm.

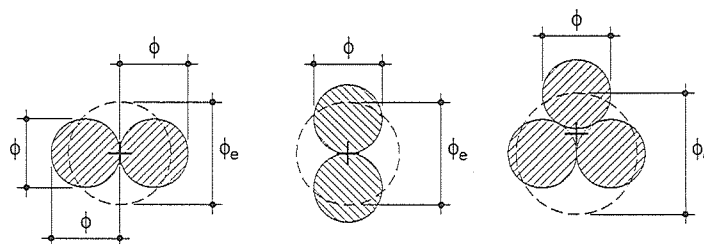


Figura 11 - Determinação do diâmetro equivalente dos feixes [Fusco, 1975].

3.3 ANCORAGEM FORA DOS APOIOS DE BARRAS PROVIDAS DE GANCHOS NAS EXTREMIDADES

3.3.1 Redução no comprimento de ancoragem

Com o uso de ganchos nas extremidades da barra da armadura o valor do comprimento de ancoragem básico pode ser diminuído, já que o efeito do gancho, por

funcionar mais por atrito do que de aderência, absorve boa parte da força a ser transferida para o concreto.

No caso de uso de ganchos nas extremidades segundo a NBR 6118:2003, o comprimento de ancoragem necessário ($\ell_{b,nec}$) dado pela expressão [10] leva em conta a presença de ganchos considerando-o por meio do coeficiente α_1 .

3.3.2 Tipos de ganchos

Os ganchos nas extremidades das barras de tração podem ser:

- a) semi-circulares, com ponta reta de comprimento não inferior a 2ϕ (Figura 12a);
- b) em ângulo de 45° (interno), com ponta reta de comprimento não inferior a 4ϕ (Figura 12b);
- c) em ângulo reto, com ponta reta de comprimento inferior 8ϕ (Figura 12c).

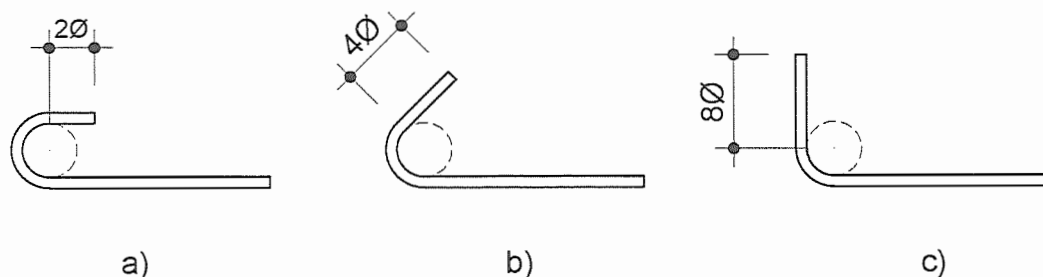


Figura 12 - Tipos de ganchos.

O diâmetro interno mínimo de ganchos, que compõem a ancoragem nas extremidades das barras longitudinais e dos estribos que compõem as armaduras transversais nas vigas, não deve ser menor do que os valores indicados na NBR 6118:2003 e anotados na tabela 2.

Tabela 2 - Diâmetro dos pinos de dobramento

Bitola (mm)	Tipo de aço		
	CA-25	CA-50	CA-60
$\phi < 20$	4ϕ	5ϕ	6ϕ
$\phi \geq 20$	5ϕ	8ϕ	-

Lembra-se que as barras lisas devem ter gancho sempre que as barras de diâmetro maior do que 32mm não devem ser detalhadas com ganchos.

Quando houver barra soldada transversal ao gancho, e a operação de dobramento ocorrer após a soldagem, devem ser mantidos os diâmetros dos pinos de dobramento da tabela 2, se o ponto de solda situar-se na parte reta da barra, a uma distância mínima de 4ϕ do início da curva.

Caso essa distância seja menor, ou o ponto se situe sobre o trecho curvo, o diâmetro do pino de dobramento deve ser no mínimo igual a 20ϕ .

Quando a operação de soldagem ocorrer após o dobramento, devem ser mantidos os diâmetros da tabela 2.

3.4 ANCORAGEM DE BARRAS DOBRADAS

As barras de aço longitudinais, posicionadas junto a face tracionada das vigas, podem ser dobradas à 45° nas seções transversais nas quais elas podem ser retiradas de serviço, com a finalidade de aproveitá-las, além da colocação de estribos verticais para absorver as tensões de tração por ação de força cortante.

A prática corrente tem sido usar estribos para absorver essas tensões.

As barras dobradas, quando adotadas no cálculo de verificação da seção transversal e no detalhamento, devem ser convenientemente ancoradas na face da viga oposta àquela onde a barra absorve as tensões normais de tração.

O comprimento de ancoragem de barras de aço dobradas (l_1), de acordo com a NBR 6118:2003, deve ser maior ou igual a $l_{b,nec}$ calculado pela expressão [10], conforme detalhe indicado na figura 13.

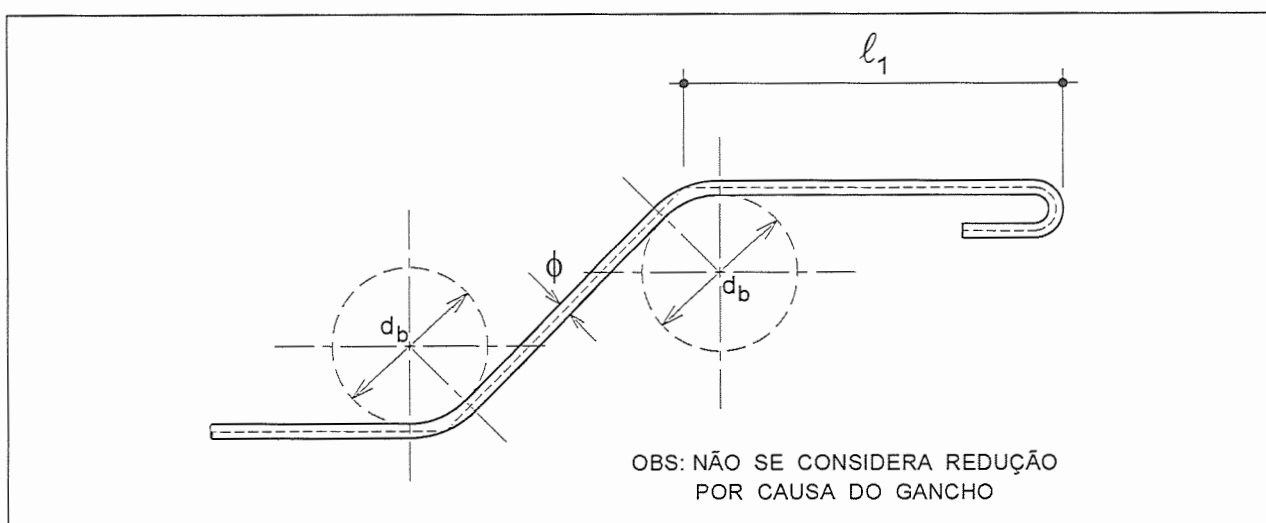


Figura 13 - Comprimento de ancoragem para barras dobradas.

Os diâmetros de dobramento (d_b) para as curvas das barras dobradas devem ser adotados igual aos indicados na tabela 2.

4. ANCORAGEM DE BARRAS COMPRIMIDAS

Nas estruturas usuais de concreto armado há necessidade de se ancorar barras comprimidas nos seguintes casos:

a) nas vigas - quando não se pode prescindir de barras comprimidas para se verificar o equilíbrio das tensões normais, isto é, dimensionamento no domínio 4 de deformação e, portanto, é necessária a colocação de barras junto a borda comprimida de viga (armadura dupla);

b) nos pilares - precisam ser verificadas as ancoragens das barras nas regiões de emendas por traspasse, no nível dos andares e, nas regiões de ancoragem das armaduras dos pilares junto aos blocos ou sapatas de fundação (Figura 2).

As barras que forem exclusivamente comprimidas devem ser ancoradas em trecho reto sem gancho (Figura 14), sendo o comprimento de ancoragem básico $l'_b = l_b$ calculado como no caso da tração pela expressão [9], com a garantia do comprimento $l_{b,nec}$ indicado na expressão [10]

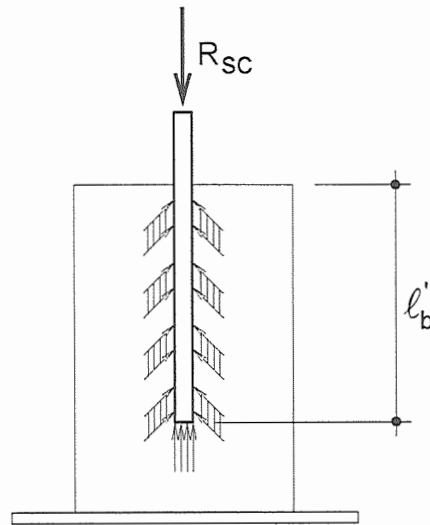


Figura 14 - Ancoragem de barras comprimidas [Fusco, 1975].

5. ANCORAGEM DE ESTRIBOS

A ancoragem dos estribos deve necessariamente ser garantida por meio de ganchos ou barras longitudinais soldadas.

Os ganchos dos estribos podem ser :

a) semi circulares ou em ângulo de 45° (interno), com ponta reta de comprimento igual a $5\phi_t$, porém não inferior a 5 cm;

b) em ângulo reto, com ponta reta de comprimento maior ou igual a $10\phi_t$, porém não inferior a 7 cm (este tipo de gancho não deve ser utilizado para barras e fios lisos).

O diâmetro interno da curvatura dos estribos deve ser, no mínimo, igual ao índice dado na tabela 3.

Tabela 3 - Diâmetro dos pinos de dobramento para estribos

Bitola mm	Tipo de aço		
	CA-25	CA-50	CA-60
$\phi \leq 10$	$3 \phi_t$	$3 \phi_t$	$3 \phi_t$
$10 < \phi < 20$	$4 \phi_t$	$5 \phi_t$	$6 \phi_t$
$\phi \geq 20$	$5 \phi_t$	$8 \phi_t$	-

A ancoragem de estribos pode ser feita por barras transversais soldadas desde que a resistência ao cisalhamento da solda para uma força mínima de $A_s f_{yd}$, que é a força resistente da barra ancorada, seja comprovada por ensaio, de acordo com a figura 15, obedecendo às condições dadas a seguir,:

a) duas barras soldadas com diâmetro $\phi_t > 0,7\phi$ para estribos constituídos por 1 ou 2 ramos;

b) uma barra soldada com diâmetro $\phi_t > 1,4\phi$, para estribos de 2 ramos.

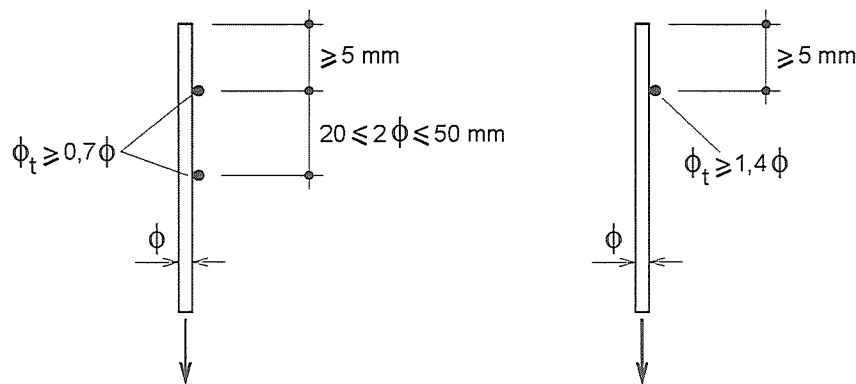


Figura 15 - Ancoragem de armadura transversal por meio de barras soldadas

Pode ser usada uma barra transversal única soldada como dispositivo de ancoragem integral da barra desde que:

- $\phi_t = \phi$ barra ancorada;

- ϕ não deve ser maior que 1/6 da menor dimensão do elemento estrutural na região da ancoragem ou 25 mm;

-o espaçamento entre as barras ancoradas não deve ser maior que 20ϕ ;

-a solda de ligação das barras deve ser feita no sentido longitudinal e transversal das barras, contornando completamente a área de contato das barras;

-a solda deve respeitar o prescrito no item 6.4.

6. EMENDAS DAS BARRAS

6.1 GENERALIDADES

Na NBR 7480:1996 é indicado que o comprimento normal de fabricação das barras e fios de aço é de 11m com tolerância de 9%. Desse modo são encontradas no comércio barras e fios cujos comprimentos podem variar de 10m a 12m. Evidentemente esses valores não se aplicam aos fios que são fornecidos em rolos. Podem ser produzidos outros comprimentos e tolerâncias desde que de comum acordo entre produtor e consumidor.

Nos casos de peças estruturais onde o comprimento longitudinal exige barras de comprimentos maiores que aqueles encontrados no comércio, há necessidade de se emendar convenientemente as barras da armadura.

As emendas das barras podem ser feitas por:

traspasse;

luvas com preenchimento metálico ou rosqueadas;

solda;

por outros dispositivos justificados.

6.2 EMENDAS POR TRASPASSE

A emenda por traspasse deve contar com o efeito da aderência para transmitir as forças nas barras conforme mostrado na figura 16. As emendas por traspasse podem ser feitas em ponta reta ou com qualquer tipo de gancho dos apresentados na figura 12. Sempre que possível deve-se utilizar emendas com extremidades retas, pois, segundo Leonhardt (1977), os ganchos só devem ser levados em conta quando puder ser evitado rompimento por esmagamento do concreto na região dos ganchos.

A força de tração na armadura é transmitida de uma barra para outra por meio de bielas de concreto inclinadas em relação ao eixo da barra (Figura 16).

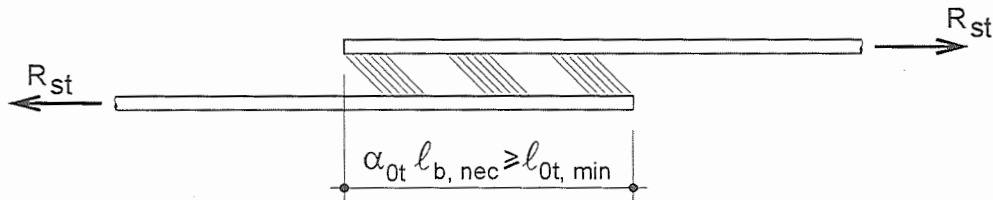


Figura 16 - Emendas por traspasse de barras.

No processo de transferência de forças atuantes nas barras, apenas uma parte dos perímetros das barras podem participar, exatamente aqueles que estão mais próximos. Por isso, somente o comprimento de ancoragem básico (l_b) não é suficiente para garantir a emenda por traspasse, sendo necessário um comprimento maior, multiplicando o comprimento $l_{b, nec}$ por coeficiente de majoração α_{0t} .

Perpendicularmente às bielas de concreto entre duas barras da armadura na região da emenda, e que estão submetidas a forças de compressão, para manter o equilíbrio aparecem forças de tração transversal que aumentam o risco de um rompimento do cobrimento de concreto.

De acordo com resultados de ensaios, as deformações transversais e, portanto, os esforços de fendilhamento variam ao longo do comprimento $\alpha_{0t} \cdot l_{b, nec}$. Quando várias emendas se situam próximas umas das outras, os esforços de fendilhamento se superpõem.

Para que esses esforços não se tornem excessivamente grandes e podendo haver fissuração na face da viga, é necessário respeitar as recomendações da NBR 6118:2003 que limitam a proporção de barras tracionadas emendadas na mesma seção.

A proporção de barras que podem ser emendadas na mesma seção transversal é dada na tabela 4, em função do tipo de conformação superficial da barra, do número de camada e do tipo de carregamento se estático ou dinâmico.

A emenda por traspasse não é permitida para barras de bitola maior que 32mm, nem para tirantes e pendurais, que são elementos estruturais lineares de seção inteiramente tracionada.

No caso de feixes, o diâmetro do círculo de mesma área, para cada feixe, não deve ser superior a 45 mm, respeitados os critérios estabelecidos em 3.2.

6.2.1 Proporção das barras emendadas

A NBR 6118:2003 considera que estão na mesma seção transversal as emendas que se superpõem ou cujas extremidades mais próximas estejam afastadas de menos que 20% do comprimento do trecho de traspasse.

Quando as barras têm diâmetros diferentes, o comprimento de traspasse deve ser calculado pela barra de maior diâmetro.

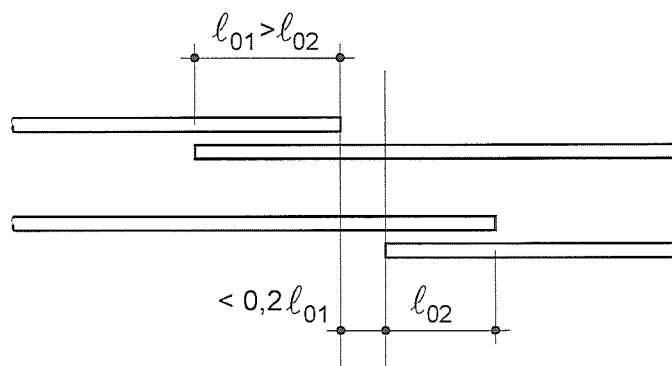


Figura 17 - Emendas supostas como na mesma seção transversal

A proporção máxima de barras tracionadas da armadura principal emendadas por traspasse na mesma seção transversal do elemento estrutural deve ser a indicada na tabela 4.

A adoção de proporções maiores que as indicadas deve ser justificada quanto à integridade do concreto na transmissão dos esforços e da capacidade resistente da emenda, como um conjunto, frente à natureza das ações que a solicitem.

Tabela 4 - Proporção máxima de barras tracionadas emendadas

Tipo de barra	Situação	Tipo de Carregamento	
		Estático	Dinâmico
Alta aderência	em uma camada	100 %	100 %
	em mais de uma camada	50 %	50 %
Lisa	$\phi < 16 \text{ mm}$	50 %	25 %
	$\phi \geq 16 \text{ mm}$	25 %	25 %

Quando se tratar de armadura permanentemente comprimida, caso de pilares, ou de distribuição, caso de armadura secundária em lajes armadas em uma direção, todas as barras podem ser emendadas na mesma seção.

6.2.2 Comprimento de traspasse de barras tracionadas isoladas

Quando a distância livre entre barras emendadas estiver compreendida entre 0 e 4ϕ , o comprimento do trecho de traspasse para barras tracionadas deve ser:

$$l_{ot} = \alpha_{ot} \times l_{b,nec} \geq l_{ot, \min}$$

sendo, $l_{0t, \min}$ o maior valor entre $0,3 \alpha_{0t} l_b$, 15ϕ e 200mm ;

onde, α_{0t} é o coeficiente função da porcentagem de barras emendadas na mesma seção, conforme tabela 5.

Quando a distância livre entre barras emendadas for maior do que 4ϕ , ao comprimento calculado em 6.2.1 deve ser acrescida a distância livre entre barras emendadas. A armadura transversal na emenda deve ser justificada considerando o comportamento conjunto concreto-aço, atendendo ao estabelecido em 6.2.3.

Tabela 5 - Valores do coeficiente α_{0t}

Porcentagem de barras emendadas na mesma seção	≤ 20	25	33	50	> 50
Valores de α_{0t}	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0

6.2.3 Comprimento de traspasse de barras comprimidas isoladas

Quando as barras estiverem comprimidas, adota-se a seguinte expressão para cálculo do comprimento de traspasse:

$$l_{0c} = l_{b, \text{nec}} \geq l_{0c, \min}$$

sendo, $l_{0c, \min}$ o maior valor entre $0,6 l_b$, 15ϕ e 200mm .

6.2.4 Armadura transversal nas emendas por traspasse, em barras isoladas

6.2.4.1 Emendas de barras tracionadas da armadura principal

Quando $\phi < 16 \text{ mm}$ ou a proporção de barras emendadas na mesma seção for menor que 25%, a armadura transversal deve satisfazer 6.2.3.

Nos casos em que $\phi \geq 16 \text{ mm}$ ou quando a proporção de barras emendadas na mesma seção for maior ou igual a 25%, a armadura transversal deve:

- ser capaz de resistir a uma força igual à de uma barra emendada, considerando os ramos paralelos ao plano da emenda;
- ser constituída por barras fechadas se a distância entre as duas barras mais próximas de duas emendas na mesma seção for menor do que 10ϕ , com ϕ igual ao diâmetro da barra emendada);
- concentrar-se nos terços extremos da emenda.

A distribuição da armadura transversal na região da emenda das barras longitudinais deve ser como indicado na figura 18.

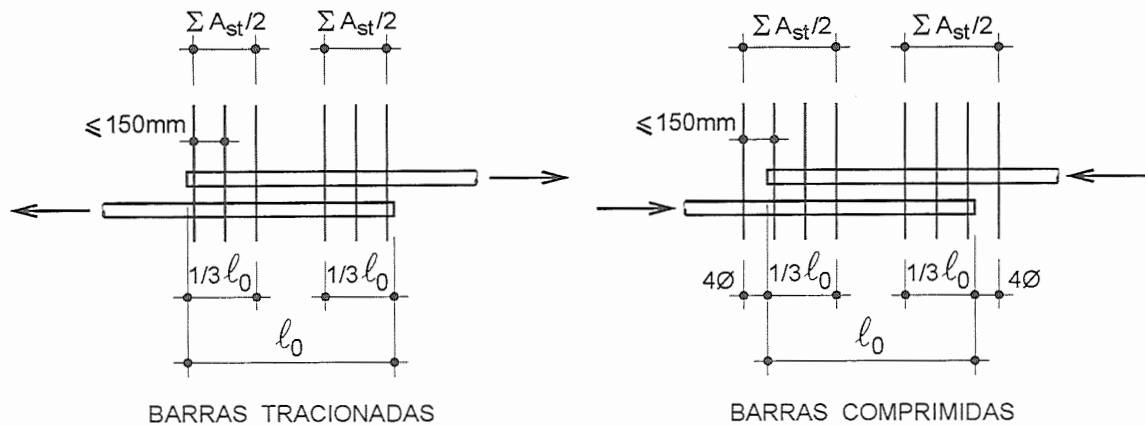


Figura 18 - Armadura transversal nas emendas

6.2.4.2 Emendas de barras comprimidas

Devem ser mantidos os critérios estabelecidos para o caso anterior, com pelo menos uma barra de armadura transversal posicionada 4ϕ além das extremidades da emenda.

6.2.4.3 Emendas de barras de armaduras secundárias

A armadura transversal deve obedecer ao estabelecido no item 6.2.4.1.

6.2.5 Emendas por traspasse de feixes de barras

Podem ser feitas emendas por traspasse em feixes de barras quando, respeitado o estabelecido em 3.2, as barras constituintes do feixe forem emendadas uma de cada vez, sem que em qualquer seção do feixe emendado resulte mais do que quatro barras.

As emendas das barras do feixe devem ser separadas entre si 1,3 vez o comprimento de emenda individual de cada uma.

6.3 EMENDAS POR LUVAS ROSCADAS

Para este tipo de emenda, as luvas roscadas devem ter resistência maior que das barras emendadas.

6.4 EMENDAS POR SOLDA

As emendas por solda podem ser:

- de topo, por caldeamento, para bitola não menor que 10 mm;
- de topo, com eletrodo, para bitola não menor que 20 mm;
- por traspasse com pelo menos dois cordões de solda longitudinais, cada um deles com comprimento não inferior a 5ϕ afastados no mínimo 5ϕ (ver Figura 19);
- com outras barras justapostas (cobrejuntas), com cordões de solda longitudinais, fazendo-se coincidir o eixo baricêntrico do conjunto com o eixo

longitudinal das barras emendadas, devendo cada cordão ter comprimento de pelo menos 5ϕ (ver Figura 19).

As emendas por solda podem ser realizadas na totalidade das barras em uma seção transversal do elemento estrutural.

Devem ser consideradas como na mesma seção as emendas que de centro a centro estejam afastadas entre si menos que 15ϕ medidos na direção do eixo da barra.

A resistência de cada barra emendada deve ser considerada sem redução.

Em caso de barra tracionada e havendo preponderância de carga acidental, a resistência deve ser reduzida em 20%.

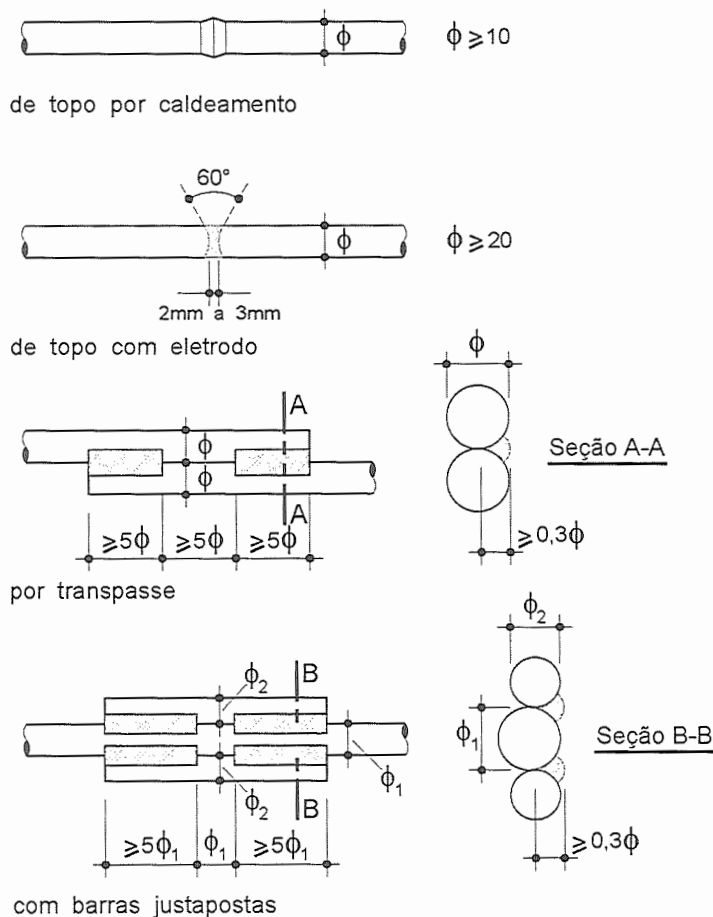


Figura 19 - Emendas por solda.

7. ANCORAGEM POR MEIO DE DISPOSITIVOS MECÂNICOS

Quando forem utilizados dispositivos mecânicos acoplados às armaduras a ancorar, a eficiência do conjunto deve ser justificada e quando for o caso, comprovada por meio de ensaios.

O escorregamento entre a barra e o concreto, junto ao dispositivo de ancoragem, não deve exceder 0,1 mm para 70% da força limite última, nem 0,5 mm para 95% dessa força.

A resistência de cálculo da ancoragem não deve exceder 50% da força limite determinada experimentalmente, nos casos em que sejam desprezíveis os efeitos de fadiga, nem 70% da força limite obtida em ensaio de fadiga, em caso contrário. O projeto deve prever os efeitos localizados desses dispositivos, com verificação da resistência do concreto e da disposição de armaduras adequadas para resistir aos esforços gerados e manter as aberturas de fissuras nos limites especificados, conforme indicado na NBR 6118:2003.

8. COMPRIMENTOS DAS BARRAS EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS FLETIDOS

8.1. DECALAGEM DO DIAGRAMA DE FORÇAS NAS BARRAS

A NBR 6118:2003 indica que a determinação do ponto de interrupção ou dobramento das barras longitudinais nas peças fletidas, o diagrama de forças R_{st} (M_d/z) na armadura deve ser deslocado, dando-se aos pontos uma translação paralela ao eixo da peça, no sentido desfavorável de valor a_ℓ (Figura 20).

O valor de a_ℓ , para a decalagem do diagrama de força no banzo tracionado depende do modelo de cálculo (I ou II) adotado para a determinação da armadura transversal para absorver as tensões de tração oriunda da ação de força cortante.

8.1.1 Modelo de cálculo I

Quando a armadura longitudinal de tração for determinada considerando o equilíbrio de esforços na seção normal ao eixo do elemento estrutural, os efeitos provocados pela fissuração oblíqua podem ser substituídos no cálculo pela decalagem do diagrama de força no banzo tracionado dada pela expressão:

$$a_\ell = d \cdot \left[\frac{V_{Sd,máx}}{2 \cdot (V_{Sd,máx} - V_c)} \cdot (1 + \cot g\alpha) - \cot g\alpha \right] \quad [11]$$

sendo:

$$a_\ell \geq 0,5d, \text{ no caso geral;}$$

$$a_\ell \geq 0,2d, \text{ para estribos inclinados a } 45^\circ.$$

Essa decalagem pode ser substituída, aproximadamente, pela correspondente decalagem do diagrama de momentos fletores.

A decalagem do diagrama de força no banzo tracionado Pode também ser obtida simplesmente aumentando a força de tração, em cada seção, pela expressão:

$$R_{Sd,cor} = \frac{M_{Sd}}{2} + |V_{Sd}| \cdot (\cot g\theta - \cot g\alpha) \cdot \frac{1}{2} \quad [12]$$

8.1.2 Modelo de cálculo II

Com as condições indicadas na NBR 6118:2003, o deslocamento do diagrama de momentos fletores, aplicando o modelo de cálculo II, o valor da decalagem é dado por:

$$a_l = 0,5 \cdot d \cdot (\cot g\theta - \cot g\alpha)$$

[13]

sendo:

$$a_l \geq 0,5d, \text{ no caso geral;}$$

$$a_l \geq 0,2d, \text{ para estribos inclinados a } 45^\circ.$$

Permanece válida para o modelo II a alternativa dada em 8.1.2.

8.2 PONTO DE INÍCIO DE ANCORAGEM

A distribuição longitudinal das barras da armadura de tração em elementos estruturais submetidos a flexão simples, ancoradas por aderência, deve seguir os critérios estabelecidos na NBR 6118:2003.

O trecho da extremidade da barra de tração, considerado como de ancoragem, tem início na seção teórica onde sua tensão σ_s começa a diminuir (a força de tração nas barras da armadura começa a ser transferida para o concreto).

Deve prolongar-se pelo menos 10ϕ além do ponto teórico de tensão σ_s nula, não podendo em nenhum caso ser inferior ao comprimento de ancoragem necessário.

Assim, na armadura longitudinal de tração dos elementos estruturais solicitados por flexão simples, o trecho de ancoragem da barra deve ter início no ponto A (Figura 20) do diagrama de forças $R_{sd} = M_{sd} / z$ decalado do comprimento a_l conforme calculado com as expressões 11 e 13, dependendo do modelo de cálculo adotado.

Esse diagrama equivale ao diagrama de forças corrigido $R_{sd,cor}$. Se a barra não for dobrada, o trecho de ancoragem deve prolongar-se além de B, no mínimo 10ϕ .

Se a barra for dobrada, o início do dobramento pode coincidir com o ponto B (ver figura 20).

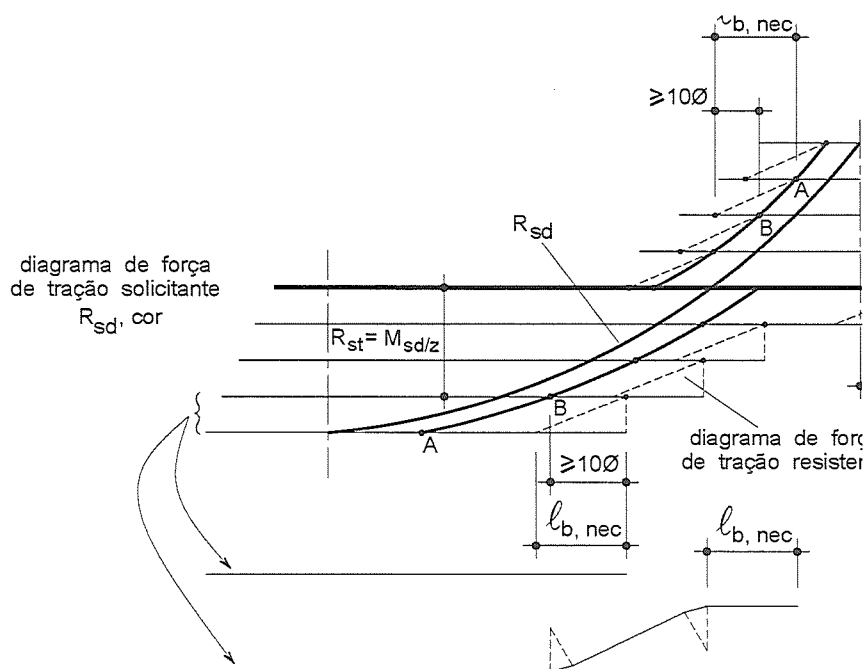


Figura 20 - Cobertura do diagrama de força de tração solicitante pelo diagrama resistente [NBR 6118:2003]

Nas seções intermediárias entre A e B, o diagrama resistente linearizado deve cobrir o diagrama solicitante (ver Figura 20).

Se o ponto A estiver na face do apoio ou além dela e a força R_{st} diminuir em direção ao centro de apoio, o trecho de ancoragem deve ser medido a partir dessa face e deve ter o comprimento calculado pela expressão [9], e as barras da armadura devem ser detalhadas como indicado na figura 28.

Retomando o exemplo de viga apresentado no item 1 deste texto, no diagrama de momentos fletores de cálculo - figura 21 - a ordenada (segmento AB) que representa o valor do momento fletor de cálculo de maior intensidade foi dividida, na seção transversal mais solicitada, pelo número (n) de barras, de diâmetro ϕ , da armadura necessária para absorver as tensões de tração.

Isso significa que cada barra da armadura é responsável por absorver $1/n$ do valor do momento fletor de cálculo.

A seção de início de ancoragem, de cada uma das n barras, é determinada a partir da seção de intercessão da reta paralela ao eixo da peça, que passa por um dos pontos (C, D, E, F, G e B) assinalados no segmento (AB) com o diagrama que representa a variação deste momento fletor deslocado de a_i , conforme pode ser acompanhado na figura 21.

O comprimento de ancoragem necessário ($l_{b,nec}$) deve ser marcado e obrigatoriamente deve ultrapassar 10ϕ do ponto de início de ancoragem da barra de ordem n-1. Se isto não ocorrer deve-se prolongar o seu comprimento até atingir-se este valor.

O procedimento é válido também para as barras posicionadas junto às bordas superiores das vigas, ou seja aquelas que absorvem momentos fletores de cálculo convencionados como negativos.

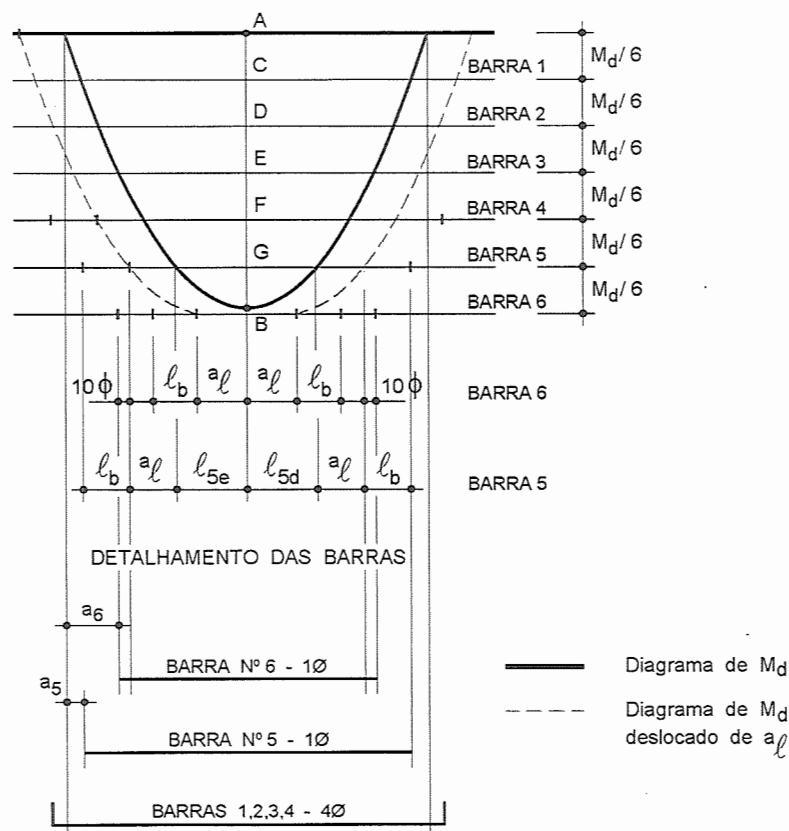


Figura 21 - Exemplo de detalhamento de barras da armadura longitudinal em vigas

Analisando a figura 21 pode-se perceber que as barras 3, 2 e 1 quando acrescidas dos comprimentos necessários de ancoragem $\ell_{b, nec}$, ficam fora dos apoios. Não sendo isto possível, as ancoragens dessas barras são verificadas pela rotina de cálculo indicada no item 8.5.

A barra 4, acrescida dos comprimentos de ancoragem tem comprimento total próximo da distância de face a face da viga (ver Figura 1) e, portanto, optou-se por detalhá-la com o mesmo desenho das barras 3, 2 e 1.

8.3 CASO DE BARRAS ALOJADAS NAS MESAS

Para as barras alojadas nas mesas ou lajes, e que façam parte da armadura da viga, o ponto de interrupção da barra é obtido pelo mesmo processo anterior, considerando ainda um comprimento adicional igual à distância da barra à face mais próxima da alma.

8.4 ARMADURA DE TRAÇÃO NAS SEÇÕES DE APOIO

8.4.1 Generalidades

Os esforços de tração junto aos apoios de vigas simples ou contínuas devem ser resistidos por armaduras longitudinais que satisfaçam a mais severa das seguintes condições:

a) no caso de ocorrência de momentos fletores positivos, as armaduras obtidas por meio do dimensionamento da seção;

b) em apoios extremos, para garantir ancoragem da diagonal de compressão, armaduras capazes de resistir a uma força de tração $R_{st} = (a_\ell / d) V_d + N_d$, onde V_d é a força cortante no apoio e N_d é a força de tração eventualmente existente;

c) em apoios extremos e intermediários, por prolongamento de uma parte da armadura de tração do vão ($A_{s,vão}$), correspondente ao máximo momento fletor positivo do tramo ($M_{vão}$) de modo que:

$$-A_{s,apoio} \geq 1/3 (A_{s,v\tilde{a}o}) \text{ se } M_{apoio} \text{ for nulo ou negativo}$$

$$\text{e de valor absoluto } |M_{apoio}| \leq 0,5 M_{v\tilde{a}o};$$

$$-A_{s,apoio} \geq 1/4 (A_{s,v\tilde{a}o}) \text{ se } M_{apoio} \text{ for negativo e de valor absoluto } |M_{apoio}| > 0,5 M_{v\tilde{a}o}$$

8.4.2 Ancoragem da armadura de tração no apoio

Quando se tratar do caso (a) do item 8.4.1, as ancoragens devem obedecer aos critérios usuais de detalhamento.

Para os casos (b) e (c), em apoios extremos, as barras das armaduras devem ser ancoradas a partir da face do apoio, com comprimentos iguais ou superiores ao maior dos seguintes valores:

$\ell_{b,nec}$, conforme expressão [10];

$(r + 5,5\phi)$;

60 mm.

Quando houver cobrimento da barra no trecho do gancho, medido normalmente ao plano do gancho, de pelo menos 70 mm e as ações acidentais não ocorrerem com grande frequência com seu valor máximo, o primeiro dos três valores anteriores pode ser desconsiderado, prevalecendo as duas condições restantes.

Para os casos (b) e (c) do item 8.4.1, em apoios intermediários, o comprimento de ancoragem pode ser igual a 10ϕ , desde que não haja qualquer possibilidade da ocorrência de momentos positivos nessa região, provocados por situações imprevistas, particularmente, por efeitos de vento e eventuais recalques. Quando essa possibilidade existir, as barras devem ser contínuas ou emendadas sobre o apoio.

8.5 BARRAS PROLONGADAS ATÉ OS APOIOS

As ancoragens das barras da armadura longitudinal de tração, nos apoios, diferem quanto ao tipo de vinculação adotada para a ligação da viga com o apoio. Assim estudam-se a seguir ancoragem das barras longitudinais de tração no apoio de extremidade, quando a viga for apoiada em outra viga - apoio indireto, ou quando for apoiada em pilar - apoio direto.

8.5.1 Apoio de extremidade

A figura 22 representa uma viga V1, apoiada em outra viga V2 (Figura 22d), ou viga V1 considerada apoiada no pilar P1 - figuras 22a e 22b, cujo diagrama de momentos fletores também está esboçado (Figura 22c). Para se obter o diagrama de momentos fletores resistentes é necessário deslocá-lo de a_ℓ .

No triângulo retângulo ABC da figura 22c pode-se escrever:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{BC}{AB} = \frac{BC}{a_\ell} = V_d \quad [14]$$

Lembrando que:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{dM_d}{dx} = V_d \quad [15]$$

obtem-se:

$$BC = V_d \cdot a_\ell = M_{d,apoio} \quad [16]$$

Na seção da viga coincidente com o plano médio do pilar pode-se escrever, a partir da consideração do equilíbrio da viga sob flexão simples com armadura simples, a expressão seguinte:

$$M_{d,apoio} = R_{st,apoio} \cdot z \quad [17]$$

ou seja:

$$R_{st,apoio} = \frac{1}{z} \cdot a_\ell \cdot V_d = \frac{a_\ell}{z} \cdot V_d \quad [18]$$

A força de tração R_{st} na seção central do apoio é calculada pela expressão 12.

$$R_{st} = \frac{M_d}{z} = V_d \frac{a_\ell}{z} \quad [19]$$

V_d é a reação de apoio de cálculo e z é a distância do ponto de aplicação da resultante de compressão ao centro de gravidade da armadura de tração, isto é, o braço de alavanca.

Pode-se considerar $z \cong d$, pois, o momento fletor de cálculo $M_d = V_d a_\ell$ assume um valor pequeno e a linha neutra nessa seção está muito próxima da borda comprimida, obtendo-se para valor de R_{st} o indicado na expressão 20.

$$R_{st} = V_d \frac{a_\ell}{d} > 0,5V_d \quad [20]$$

A NBR 6118:2003 indica que a essa expressão deve-se acrescentar o efeito de força normal de tração de cálculo (N_d). Nos casos usuais de vigas de edifícios essa força não ocorre, porém, por exemplo, em estruturas de reservatórios paralelepípedicos, por efeito de força de equilíbrio entre os elementos há que considerá-la no dimensionamento.

A área da armadura calculada para ancorar no apoio a força R_{st} é determinada pela expressão 22.

$$A_{s,cal,apoio} = \frac{R_{st}}{f_{yd}} \quad [21]$$

com R_{st} dado pela expressão 21.

O ponto de início de ancoragem segundo a NBR 6118:2003, é o da face interna do apoio - figuras 23 e 24, sendo que, quando o apoio for uma viga, Leonhardt (1977) indica que o ponto de início de ancoragem deve ser considerado distante 1/3 da largura do apoio medido a partir da face deste (Figura 22d).

O comprimento de ancoragem das barras da armadura no apoio deve ser igual ao maior dos seguintes valores:

$\ell_{b,nec}$ (comprimento de ancoragem necessário);

$(r + 5,5\phi)$, com r igual ao raio efetivo do gancho;

60mm.

Para apoios estreitos a largura $\ell_{b,ef}$ pode não ser suficiente para alojar o comprimento $\ell_{b,nec}$, mesmo considerando gancho na extremidade da barra (Figura 24).

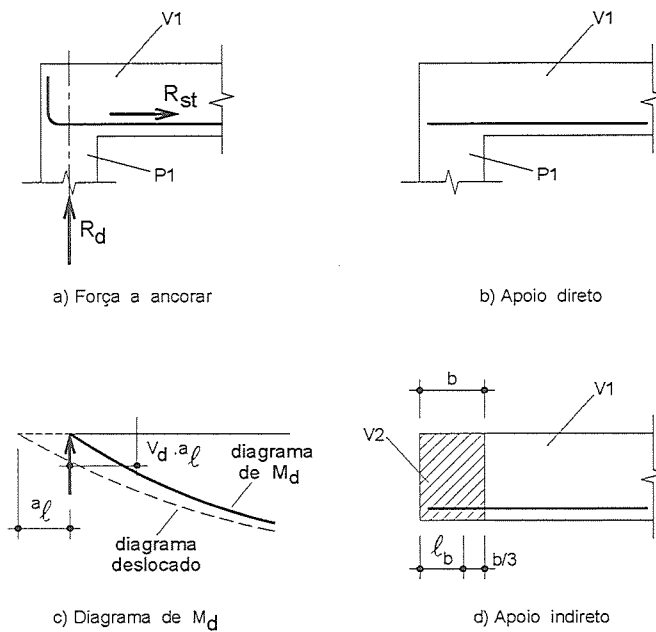


Figura 22 - Ancoragem em apoio de extremidade [Süssekind, 1980]

Então, quando no apoio tem-se $l_{b,ef} < l_{b,nec}$ é necessário diminuir a tensão (σ_s) nas barras alojadas no apoio, aumentando-se a área calculada de armadura no apoio ($A_{s,calc,apoio}$) para área de barras da armadura efetiva no apoio ($A_{s,ef,apoio}$), resultando:

$$A_{s,ef,apoio} = \frac{l_{b,nec}}{l_{b,ef}} A_{s,calc,apoio} \quad [22]$$

sendo, $l_{b,ef} = b - c$, com b igual a largura do apoio na direção do eixo da viga e c é a medida do cobrimento, conforme figura 23, com o cobrimento definido de acordo com a NBR 6118:2003.

Se for interessante e havendo largura suficiente pode-se ancorar as barras prolongadas até o apoio em ponta reta (Figura 23), bastando para isso na expressão [10] considerar o coeficiente α_1 igual a um.

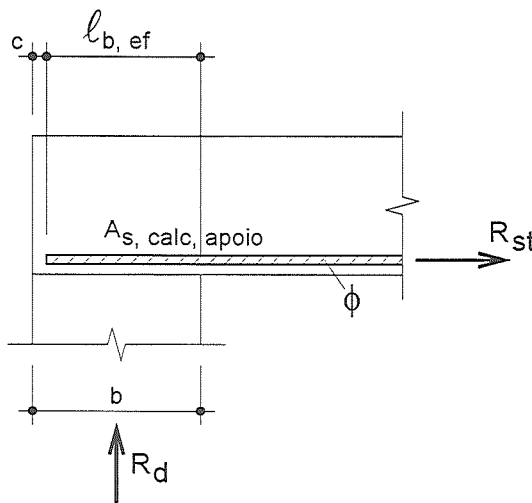


Figura 23 - Barra em ponta reta [PROMON(1976)]

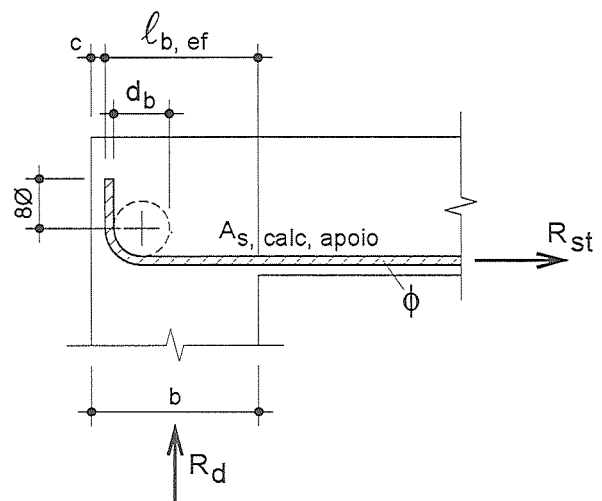


Figura 24 - Barra em gancho [PROMON(1976)]

8.5.2 Viga engastada elasticamente em pilar de extremidade

A consideração de engaste elástico das vigas em pilares de extremidades requer um estudo conveniente da ancoragem das barras de armadura calculada para absorver o momento fletor (negativo) atuante na viga.

Segundo Leonhardt (1978), a transmissão dos momentos fletores de cálculo da viga para os pilares de extremidade contínuos provoca, na região do nó, não só forças de tração na direção da diagonal, como também altas tensões de aderência na armadura tracionada do pilar. Estes dois efeitos têm influência na capacidade resistente do nó. As tensões de aderência originam-se por causa da alternância das forças, de tração para compressão, que ocorrem no pilar ao longo da altura de viga (Figura 25).

Taylor, citado por Leonhardt (1977), diz que no Estádio II, portanto, seção fissurada, o tramo inferior do pilar é mais rígido que o superior, sendo que no dimensionamento do tramo inferior, o momento fletor determinado para a seção não fissurada (Estádio I) deve ser multiplicado por 1,2. Para o dimensionamento do tramo superior do pilar não se deve fazer qualquer restrição.

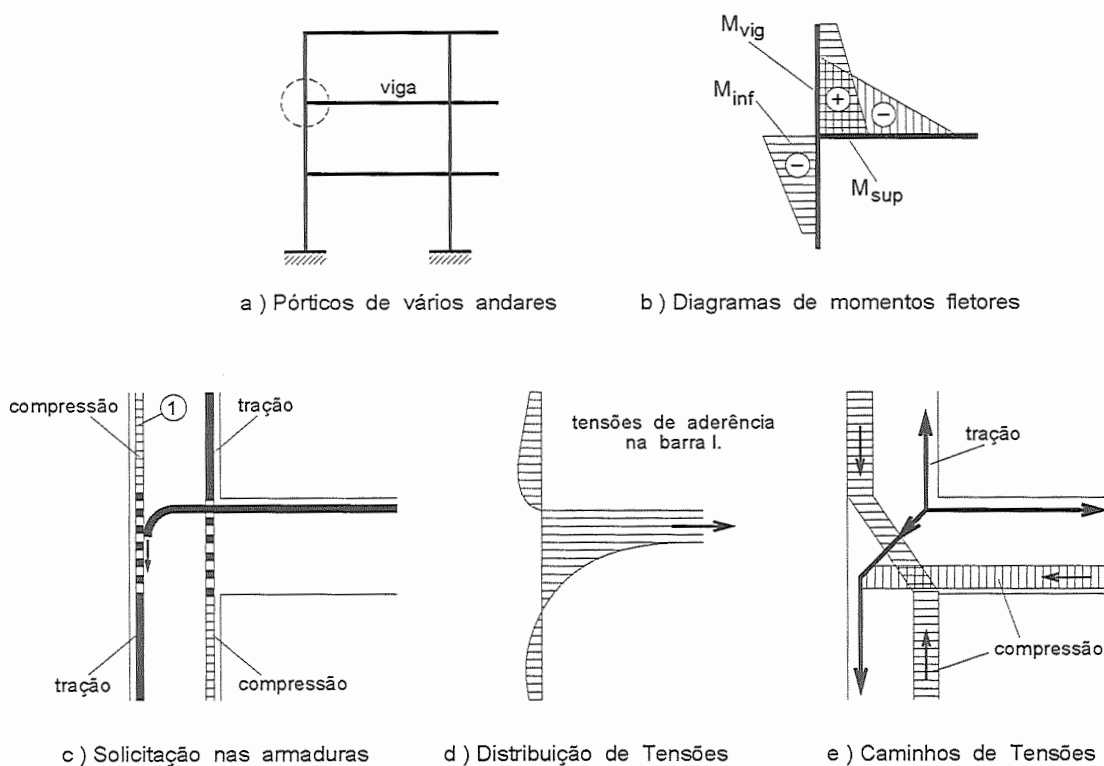


Figura 25 - Viga engastada elasticamente em pilar de extremidade
[Leonhardt, 1977]

O detalhamento recomendado é mostrado na Figura 27, sendo que a armadura inclinada deve ter área igual à metade da área da armadura a ancorar e, o diâmetro das barras deve ser igual a 70% do diâmetro das barras daquela armadura. Quanto aos estribos do pilar, eles devem ter o espaçamento reduzido para no máximo 100mm e, essa distribuição deve ser em um trecho de comprimento igual a duas vezes a largura do pilar, medido na direção da viga, acrescido da altura da viga.

O diâmetro interno da curvatura das barras deve ser no mínimo igual a 8ϕ e o comprimento do prolongamento da barra dentro do pilar deve ser no mínimo igual a 35ϕ e deve emendar-se com a armadura tracionada do pilar conforme figura 26.

Segundo a NBR 6118:1978, “se houver barras de tração curvadas no mesmo plano e o afastamento entre elas for inferior ao dobro do mínimo permitido, o valor mínimo do diâmetro da curvatura estabelecido neste item será multiplicado pelo número de barras nessas condições”.

Quando a força normal aplicada no pilar na seção em estudo for grande, em função da transmissão de ação dos tramos superiores e, a seção do pilar for toda comprimida (pouca influência do momento fletor transmitido pela viga), as barras da armadura superior da viga devem ser ancoradas (Figura 27) na largura do pilar, como estudado no item 8.5 (Apoio livre à rotação).

Nos projetos de vigas usuais de edifícios de andares tipo, em que se pretende fazer um detalhe único para as vigas tipo, pode-se prever a ancoragem no apoio de extremidade de tal modo a satisfazer os dois casos indicados nas figuras 26 e 27.

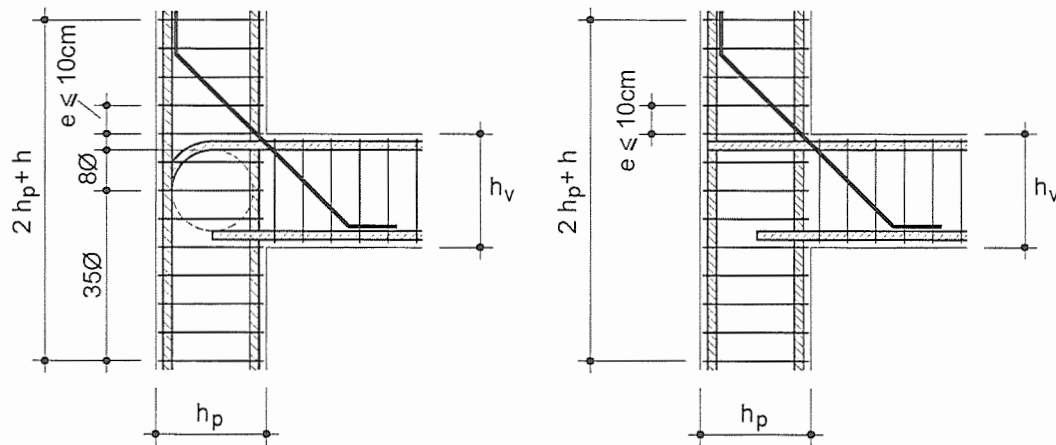


Figura 26 - Ancoragem em dobra
[Leonhardt, (1978)]

Figura 27 - Ancoragem reta
[Leonhardt, (1978)]

8.5.3 Barras da armadura prolongadas até os apoios internos

Quando o ponto de início de ancoragem estiver na face do apoio ou além dela (Figura 28) e a força a ancorar (R_{st}) na armadura diminuir em direção ao centro do apoio, o comprimento de ancoragem ($\ell_{b,nec}$) será medido a partir dessa face e, com a força a ancorar dada pela expressão 10.

Quando o diagrama de momentos fletores de cálculo não atingir a face do apoio, as barras prolongadas até o apoio (Figura 29) devem ter o comprimento de ancoragem necessário marcado a partir da intercessão do eixo da barra com o diagrama deslocado e, obrigatoriamente, deve ultrapassar 10ϕ da face de apoio.

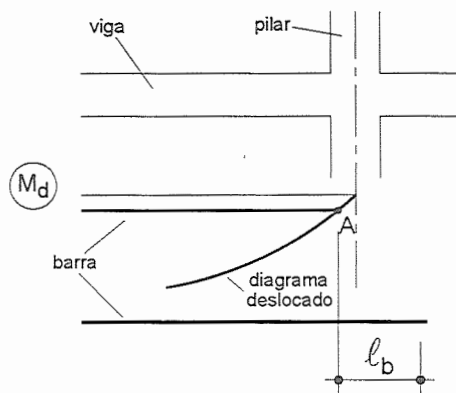


Figura 28 - Barras prolongadas até os apoios [NBR 6118:2003]

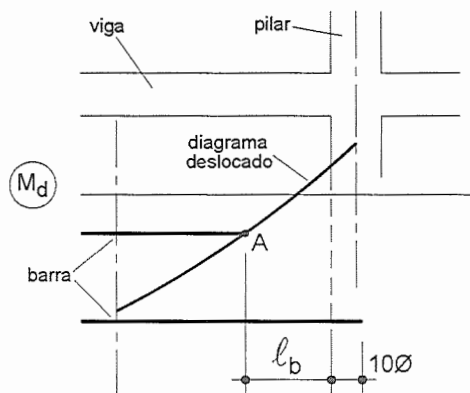


Figura 29 - Barras interrompidas antes dos apoios [NBR 6118:2003]

8.5.4 Ancoragem de telas soldadas por aderência

Para verificar a segurança de elementos estruturais com relação à ancoragem da armadura constituída por telas soldadas aplicam-se os critérios especificados para barras isoladas.

Quando a tela for composta de fios lisos ou com mossas, podem ser adotados os mesmos critérios definidos para barras nervuradas desde que o número de fios transversais soldados ao longo do comprimento de ancoragem necessário seja calculado conforme a expressão:

$$n \geq 4 \cdot \frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}} \quad [23]$$

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Projeto e execução de obras de concreto armado: NBR 6118:1978*. Rio de Janeiro, 1978.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Projeto de estruturas de concreto: NBR 6118:2003*. Rio de Janeiro, 2001. (Projeto de Revisão da NBR 6118:1978).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado: NBR 7477:1982*. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado: NBR 7480:1996*. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto - classificação pela resistência à compressão de concreto para fins estruturais: NBR 8953:1992*. Rio de Janeiro, 1992.

FUSCO, P. B. *Fundamentos da técnica de armar: estruturas de concreto*. São Paulo: Grêmio Politécnico, 1975. v.3

LEONHARDT, F., MÖNNIG, E. *Construções de concreto: princípios básicos sobre a armação de estruturas de concreto armado*. Rio de Janeiro: Interciência, 1978. v.3

LEONHARDT, F., MÖNNING, E. *Construções de concreto: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado*. Rio de Janeiro: Interciência, 1977. v.1

PINHEIRO, L. M. *Concreto armado: tabelas e ábacos*. São Carlos: EESC-USP, 1986. 66p.

PROMON ENGENHARIA. *Tabelas para dimensionamento de concreto armado: segundo a NB-1/76*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1976. 269p.

SANTOS NETO, P. *Ancoragem por aderência em barras de concreto armado*. São Carlos: EESC-USP, 1978. 16p.

SÜSSEKIND, J. C. *Curso de concreto: concreto armado*. Porto Alegre: Globo, 1980. v.1.

APÊNDICE
TABELAS PARA O CÁLCULO DO COMPRIMENTO DE ANCORAGEM

MONTAGEM DAS TABELAS

Tabela 1 - Comprimento de ancoragem básico $l_b = n\phi$ determinado usando a expressão 9, em função do diâmetro da barra, para as resistências características do concreto especificadas na NBR 8953:1992 e do aço indicadas na NBR 7480:1996 com coeficientes de conformação superficial da NBR 6118:2001, para barras posicionadas em zonas de boa e má aderência. É também apresentado roteiro para o cálculo do comprimento de ancoragem com os critérios da NBR 6118:2001.

Tabela 2 - Comprimento de ancoragem básico l_b (expressão 9), medido em centímetros, para o aço CA-25, barras lisas, com $\gamma_s=1,15$, nas situações de ancoragem sem e com gancho e para barras posicionadas em zonas de boa e má aderência.

Tabela 3 - Comprimento de ancoragem básico l_b (expressão 9), medido em centímetros, para o aço CA-50, barras dentadas, para os diâmetros 5,0, 6,3 e 8,0, com $\gamma_s=1,15$, nas situações de ancoragem sem e com gancho (expressões 3 e item 3.4.1) e para barras posicionadas em zonas de boa e má aderência.

Tabela 4 - Comprimento de ancoragem básico l_b (expressão 9), medido em centímetros, para o aço CA-50, barras nervuradas, com $\gamma_s=1,15$, nas situações de ancoragem sem e com gancho e para barras posicionadas em zonas de boa e má aderência.

Tabela 5 - Comprimento de ancoragem básico l_b (expressão 9), medido em centímetros, para o aço CA-60, barras lisas, com $\gamma_s=1,15$, nas situações de ancoragem sem e com gancho e para barras posicionadas em zonas de boa e má aderência.

Tabela 6 - Comprimento de ancoragem básico l_b (expressão 9), medido em centímetros, para o aço CA-60, barras dentadas, com $\gamma_s=1,15$, nas situações de ancoragem sem e com gancho (expressões 3 e item 3.4.1) e para barras posicionadas em zonas de boa e má aderência.

OBSERVAÇÕES

Os diâmetros de barras e fios são os indicados na NBR 7480:1996; sendo que para as bitolas comerciais diferentes destes podem ser usada as expressões para o cálculo do comprimento de ancoragem.

O comprimento de ancoragem a ser adotado no detalhamento deve ser maior ou igual do que o comprimento de ancoragem necessário $l_{b,nec}$ (expressão 10) indicado na tabela. Ao adotar ganchos nas extremidades da barra deve-se prever o acréscimo de comprimento da barra para o tipo de gancho adotado.

O comprimento de ancoragem de barras comprimidas é igual ao valor calculado para as barras tracionadas sem gancho considerando zona de boa aderência.

As tabelas foram elaboradas por Daniel dos Santos e José Samuel Giongo, durante desenvolvimento de pesquisa de iniciação científica, no ano de 2001, na Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, Processo número 00/10502-3.

TABELA 1 COMPRIMENTO DE ANCORAGEM EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO											
CONCRETO	ZONA DE ADERÊNCIA	CA-25		CA-50				CA-60			
		LISA		DENTADA		NERVURADA		LISA		DENTADA	
		$\eta_1 = 1,0$		$\eta_1 = 1,4$		$\eta_1 = 2,25$		$\eta_1 = 1,0$		$\eta_1 = 1,4$	
		SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM
C20	MÁ	70 ϕ	49 ϕ	100 ϕ	70 ϕ	62 ϕ	44 ϕ	169 ϕ	118 ϕ	120 ϕ	84 ϕ
	BOA	49 ϕ	34 ϕ	70 ϕ	49 ϕ	44 ϕ	31 ϕ	118 ϕ	83 ϕ	84 ϕ	59 ϕ
C25	MÁ	61 ϕ	42 ϕ	86 ϕ	60 ϕ	54 ϕ	38 ϕ	145 ϕ	102 ϕ	104 ϕ	72 ϕ
	BOA	42 ϕ	30 ϕ	60 ϕ	42 ϕ	38 ϕ	26 ϕ	102 ϕ	71 ϕ	72 ϕ	51 ϕ
C30	MÁ	54 ϕ	38 ϕ	77 ϕ	54 ϕ	48 ϕ	33 ϕ	129 ϕ	90 ϕ	92 ϕ	64 ϕ
	BOA	38 ϕ	26 ϕ	54 ϕ	38 ϕ	33 ϕ	23 ϕ	90 ϕ	63 ϕ	64 ϕ	45 ϕ
C35	MÁ	48 ϕ	34 ϕ	69 ϕ	48 ϕ	43 ϕ	30 ϕ	116 ϕ	81 ϕ	83 ϕ	58 ϕ
	BOA	34 ϕ	24 ϕ	48 ϕ	34 ϕ	30 ϕ	21 ϕ	81 ϕ	57 ϕ	58 ϕ	41 ϕ
C40	MÁ	44 ϕ	31 ϕ	63 ϕ	44 ϕ	39 ϕ	28 ϕ	106 ϕ	74 ϕ	76 ϕ	53 ϕ
	BOA	31 ϕ	22 ϕ	44 ϕ	31 ϕ	28 ϕ	19 ϕ	74 ϕ	52 ϕ	53 ϕ	37 ϕ
C45	MÁ	41 ϕ	29 ϕ	58 ϕ	41 ϕ	36 ϕ	25 ϕ	98 ϕ	69 ϕ	70 ϕ	49 ϕ
	BOA	29 ϕ	20 ϕ	41 ϕ	29 ϕ	25 ϕ	18 ϕ	69 ϕ	48 ϕ	49 ϕ	34 ϕ
C50	MÁ	38 ϕ	27 ϕ	54 ϕ	38 ϕ	34 ϕ	24 ϕ	92 ϕ	64 ϕ	65 ϕ	46 ϕ
	BOA	27 ϕ	19 ϕ	38 ϕ	27 ϕ	24 ϕ	17 ϕ	64 ϕ	45 ϕ	46 ϕ	32 ϕ

Elaborada por: Daniel dos Santos e José Samuel Giongo – USP-EESC-SET/FAPESP

Expressão para o cálculo do comprimento de ancoragem:

$$l_b = (\phi / 4) (f_{yd} / f_{bd})$$

sendo:

ϕ = diâmetro da barra;

$$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s ;$$

$$f_{bd} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 f_{ctd}$$

$$f_{ctd} = f_{ctk,inf} / \gamma_c$$

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

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

Coefficientes adotados:

$\gamma_c = 1,4$, coeficiente de minoração da resistência do concreto;

$\gamma_s = 1,15$, coeficiente de minoração da resistência das barras de aço;

$\eta_1 = 1,0$ para barras lisas

$\eta_1 = 1,4$ para barras dentadas

$\eta_1 = 2,25$ para barras nervuradas

$\eta_2 = 1,0$ para situações de boa aderência

$\eta_2 = 0,7$ para situações de má aderência

$\eta_3 = 1,0$ para $\phi < 32$ mm

$\eta_3 = (132 - \phi) / 100$, para $\phi > 32$ mm,

O comprimento de ancoragem necessário é dado por:

$$l_{b,nec} = \alpha_1 l_b (A_{s,cal} / A_{s,ef}) \geq l_{b,min}$$

com:

$\alpha_1 = 1,0$ para barras sem gancho;

$\alpha_1 = 0,7$ para barras tracionadas com gancho e com cobrimento no plano normal ao do gancho maior ou igual a 3ϕ ;

$l_{b,min}$ é o maior valor entre $0,3 l_b$, 10ϕ e 100 mm.

O comprimento de ancoragem, para cada resistência do concreto, indicado na linha superior se refere às barras posicionadas em zonas de má aderência e os indicados na linha inferior em zonas de boa aderência.

TABELA 2														
COMPRIMENTO DE ANCORAGEM (cm) PARA $A_{se} = A_{scal}$													CA-25 – LISA	
ϕ (mm)	C20		C25		C30		C35		C40		C45		C50	
	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM
5,0	35	25	30	21	27	19	24	17	22	15	20	14	19	13
	25	17	21	15	19	13	17	12	15	11	14	10	13	9
6,3	44	31	38	27	34	24	30	21	28	20	26	18	24	17
	31	22	27	19	24	17	21	15	20	14	18	13	17	12
8,0	56	39	48	34	43	30	39	27	35	25	33	23	31	21
	39	28	34	24	30	21	27	19	25	17	23	16	21	15
10,0	70	49	61	42	54	38	48	34	44	31	41	29	38	27
	49	34	42	30	38	26	34	24	31	22	29	20	27	19
12,5	88	61	76	53	67	47	60	42	55	39	51	36	48	33
	61	43	53	37	47	33	42	30	39	27	36	25	33	23
16,0	112	79	97	68	86	60	77	54	71	50	65	46	61	43
	79	55	68	47	60	42	54	38	50	35	46	32	43	30
20,0	140	98	121	85	107	75	97	68	89	62	82	57	76	53
	98	69	85	59	75	53	68	47	62	43	57	40	53	37
22,0	155	108	133	93	118	83	106	74	97	68	90	63	84	59
	108	76	93	65	83	58	74	52	68	48	63	44	59	41
25,0	176	123	151	106	134	94	121	85	111	77	102	72	95	67
	123	86	106	74	94	66	85	59	77	54	72	50	67	47
32,0	225	157	194	136	172	120	155	108	142	99	131	92	122	85
	157	110	136	95	120	84	108	76	99	69	92	64	85	60
40,0	305	214	263	184	233	163	210	147	192	135	178	125	166	116
	214	150	184	129	163	114	147	103	135	94	125	87	116	81

Elaborada por: Daniel dos Santos e José Samuel Giongo – USP-EESC-SET/FAPESP

A tabela está de acordo com as indicações das NBR 6118:2001, NBR 8953:1992 e NBR 7480:1996.

O comprimento de ancoragem necessário é dado por:

$$l_{b,nec} = \alpha_1 l_b (A_{s,cal} / A_{s,ef}) \geq l_{b,min}$$

sendo:

$\alpha_1 = 1,0$ para barras sem gancho;

$\alpha_1 = 0,7$ para barras tracionadas com gancho e com cobrimento no plano normal ao do gancho maior ou igual a 3ϕ ;

$l_{b,min}$ é o maior valor entre $0,3 l_b$, 10ϕ e 100mm ;

$A_{s,cal}$ é a área calculada para resistir ao esforço solicitante;

$A_{s,ef}$ é a área de armadura existente, determinada para diâmetros comerciais;

Número superior: barras posicionadas em zona de má aderência;

Número inferior: barras posicionadas em zona de boa aderência.

O produto $\alpha_1 l_b$ é determinado nesta tabela para os casos de ancoragem em ponta reta ou com gancho e barra posicionada em zona de boa ou má aderência.

Adotaram-se: $\eta_1 = 1,0$, $\eta_2 = 1,0$ ou $0,7$ e $\eta_3 = 1,0$ e $\eta_3 = (132 - \phi) / 100$; para $\phi 40,0$.

TABELA 3														
COMPRIMENTO DE ANCORAGEM (cm) PARA $A_{se} = A_{scal}$													CA-50 – DENTADA	
ϕ (mm)	C20		C25		C30		C35		C40		C45		C50	
	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM
5,0	50	35	43	30	38	27	35	24	32	22	29	20	27	19
	35	25	30	21	27	19	24	17	22	15	20	14	19	13
6,3	63	44	54	38	48	34	44	30	40	28	37	26	34	24
	44	31	38	27	34	24	30	21	28	20	26	18	24	17
8,0	80	56	69	48	61	43	55	39	51	35	47	33	44	31
	56	39	48	34	43	30	39	27	35	25	33	23	31	21

TABELA 4														
COMPRIMENTO DE ANCORAGEM (cm) PARA $A_{se} = A_{scal}$													CA-50 – NERVURADA	
ϕ (mm)	C20		C25		C30		C35		C40		C45		C50	
	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM
10,0	62	44	54	38	48	33	43	30	39	28	36	25	34	24
	44	31	38	26	33	23	30	21	28	19	25	18	24	17
12,5	78	55	67	47	60	42	54	38	49	34	45	32	42	30
	55	38	47	33	42	29	38	26	34	24	32	22	30	21
16,0	100	70	86	60	76	53	69	48	63	44	58	41	54	38
	70	49	60	42	53	37	48	34	44	31	41	29	38	27
20,0	125	87	108	75	95	67	86	60	79	55	73	51	68	47
	87	61	75	53	67	47	60	42	55	39	51	36	47	33
22,0	137	96	118	83	105	73	95	66	87	61	80	56	75	52
	96	67	83	58	73	51	66	46	61	42	56	39	52	37
25,0	156	109	135	94	119	83	107	75	98	69	91	64	85	59
	109	76	94	66	83	58	75	53	69	48	64	45	59	42
32,0	200	140	172	121	152	107	138	96	126	88	116	81	108	76
	140	98	121	84	107	75	96	67	88	62	81	57	76	53
40,0	271	190	234	163	207	145	187	130	171	120	158	111	147	103
	190	133	163	115	145	102	130	92	120	84	111	77	103	72

Elaborada por: Daniel dos Santos e José Samuel Giongo – USP-EESC-SET/FAPESP

A tabela está de acordo com as indicações das NBR 6118:2001, NBR 8953:1992 e NBR 7480:1996.

O comprimento de ancoragem necessário é dado por:

$$\ell_{b,nec} = \alpha_1 \ell_b (A_{s,cal} / A_{s,ef}) \geq \ell_{b,min}$$

sendo:

$\alpha_1 = 1,0$ para barras sem gancho;

$\alpha_1 = 0,7$ para barras tracionadas com gancho e com cobrimento no plano normal ao do gancho maior ou igual a 3ϕ ;

$\ell_{b,min}$ é o maior valor entre $0,3 \ell_b$, 10ϕ e 100mm ;

$A_{s,cal}$ é a área calculada para resistir ao esforço solicitante;

$A_{s,ef}$ é a área de armadura existente, determinada para diâmetros comerciais;

Número superior: barras posicionadas em zona de má aderência;

Número inferior: barras posicionadas em zona de boa aderência.

O produto $\alpha_1 \ell_b$ é determinado nesta tabela para os casos de ancoragem em ponta reta ou com gancho e barra posicionada em zona de boa ou má aderência.

Adotaram-se: $\eta_1 = 1,4$ para a tabela 3 e $\eta_1 = 2,25$ para a tabela 4, $\eta_2 = 1,0$ ou $0,7$ e $\eta_3 = 1,0$ e $\eta_3 = (132 - \phi) / 100$, para $\phi 40,0$.

TABELA 5														
COMPRIMENTO DE ANCORAGEM (cm) PARA $A_{se} = A_{scal}$													CA-60 – LISA	
ϕ (mm)	C20		C25		C30		C35		C40		C45		C50	
	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM
2,4	40	28	35	24	31	22	28	20	25	18	24	16	22	15
	28	20	24	17	22	15	20	14	18	12	16	12	15	11
3,4	57	40	49	35	44	31	39	28	36	25	33	23	31	22
	40	28	35	24	31	21	28	19	25	18	23	16	22	15
3,8	64	45	55	39	49	34	44	31	40	28	37	26	35	24
	45	31	39	27	34	24	31	22	28	20	26	18	24	17
4,2	71	50	61	43	54	38	49	34	45	31	41	29	38	27
	50	35	43	30	38	26	34	24	31	22	29	20	27	19
4,6	78	54	67	47	59	41	53	37	49	34	45	32	42	29
	54	38	47	33	41	29	37	26	34	24	32	22	29	21
5,0	84	59	73	51	64	45	58	41	53	37	49	34	46	32
	59	41	51	36	45	32	41	28	37	26	34	24	32	22
5,5	93	65	80	56	71	50	64	45	58	41	54	38	50	35
	65	45	56	39	50	35	45	31	41	29	38	26	35	25
6,0	101	71	87	61	77	54	70	49	64	45	59	41	55	38
	71	50	61	43	54	38	49	34	45	31	41	29	38	27
6,4	108	76	93	65	82	58	74	52	68	48	63	44	59	41
	76	53	65	46	58	40	52	36	48	33	44	31	41	29
7,0	118	83	102	71	90	63	81	57	74	52	69	48	64	45
	83	58	71	50	63	44	57	40	52	36	48	34	45	31
8,0	135	94	116	81	103	72	93	65	85	59	79	55	73	51
	94	66	81	57	72	50	65	46	59	42	55	38	51	36
9,5	160	112	138	97	122	86	110	77	101	71	93	65	87	61
	112	78	97	68	86	60	77	54	71	49	65	46	61	43
10,0	169	118	145	102	129	90	116	81	106	74	98	69	92	64
	118	83	102	71	90	63	81	57	74	52	69	48	64	45

Elaborada por: Daniel dos Santos e José Samuel Giongo – USP-EESC-SET/FAPESP

A tabela está de acordo com as indicações das NBR 6118:2001, NBR 8953:1992 e NBR 7480:1996.

O comprimento de ancoragem necessário é dado por:

$$l_{b,nec} = \alpha_1 l_b (A_{s,cal} / A_{s,ef}) \geq l_{b,min}$$

sendo:

$\alpha_1 = 1,0$ para barras sem gancho;

$\alpha_1 = 0,7$ para barras tracionadas com gancho e com cobrimento no plano normal ao do gancho maior ou igual a 3ϕ ;

$l_{b,min}$ é o maior valor entre $0,3 l_b$, 10ϕ e 100mm ;

$A_{s,cal}$ é a área calculada para resistir ao esforço solicitante;

$A_{s,ef}$ é a área de armadura existente, determinada para diâmetros comerciais;

Número superior: barras posicionadas em zona de má aderência;

Número inferior: barras posicionadas em zona de boa aderência.

O produto $\alpha_1 l_b$ é determinado nesta tabela para os casos de ancoragem em ponta reta ou com gancho e barra posicionada em zona de boa ou má aderência.

Adotaram-se: $\eta_1 = 1,4$, $\eta_2 = 1,0$ ou $0,7$ e $\eta_3 = 1,0$.

TABELA 6														
COMPRIMENTO DE ANCORAGEM (cm) PARA $A_{se} = A_{scal}$ CA-60 – DENTADA														
ϕ (mm)	C20		C25		C30		C35		C40		C45		C50	
	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM
2,4	29	20	25	17	22	15	20	14	18	13	17	12	16	11
	20	14	17	12	15	11	14	10	13	10	12	10	11	10
3,4	41	29	35	25	31	22	28	20	26	18	24	17	22	16
	29	20	25	17	22	15	20	14	18	13	17	12	16	11
3,8	46	32	39	28	35	24	32	22	29	20	27	19	25	18
	32	22	28	19	24	17	22	15	20	14	19	13	18	12
4,2	51	35	44	31	39	27	35	24	32	22	29	21	27	19
	35	25	31	21	27	19	24	17	22	16	21	14	19	13
4,6	55	39	48	33	42	30	38	27	35	24	32	23	30	21
	39	27	33	23	30	21	27	19	24	17	23	16	21	15
5,0	60	42	52	36	46	32	41	29	38	27	35	25	33	23
	42	29	36	25	32	23	29	20	27	19	25	17	23	16
5,5	66	46	57	40	51	35	46	32	42	29	39	27	36	25
	46	32	40	28	35	25	32	22	29	20	27	19	25	18
6,0	72	51	62	44	55	39	50	35	46	32	42	29	39	27
	51	35	44	31	39	27	35	24	32	22	29	21	27	19
6,4	77	54	66	46	59	41	53	37	49	34	45	31	42	29
	54	38	46	33	41	29	37	26	34	24	31	22	29	20
7,0	84	59	73	51	64	45	58	41	53	37	49	34	46	32
	59	41	51	36	45	32	41	28	37	26	34	24	32	22
8,0	96	67	83	58	74	51	66	46	61	43	56	39	52	37
	67	47	58	41	51	36	46	33	43	30	39	27	37	26
9,5	114	80	99	69	87	61	79	55	72	50	67	47	62	43
	80	56	69	48	61	43	55	39	50	35	47	33	43	30
10,0	120	84	104	73	92	64	83	58	76	53	70	49	65	46
	84	59	73	51	64	45	58	41	53	37	49	34	46	32

Elaborada por: Daniel dos Santos e José Samuel Giongo – USP-EESC-SET/FAPESP

A tabela está de acordo com as indicações das NBR 6118:2001, NBR 8953:1992 e NBR 7480:1996.

O comprimento de ancoragem necessário é dado por:

$$l_{b,nec} = \alpha_1 l_b (A_{s,cal} / A_{s,ef}) \geq l_{b,min}$$

sendo:

$\alpha_1 = 1,0$ para barras sem gancho;

$\alpha_1 = 0,7$ para barras tracionadas com gancho e com cobrimento no plano normal ao do gancho maior ou igual a 3ϕ ;

$l_{b,min}$ é o maior valor entre $0,3 l_b$, 10ϕ e $100mm$;

$A_{s,cal}$ é a área calculada para resistir ao esforço solicitante;

$A_{s,ef}$ é a área de armadura existente, determinada para diâmetros comerciais;

Número superior: barras posicionadas em zona de má aderência;

Número inferior: barras posicionadas em zona de boa aderência.

O produto $\alpha_1 l_b$ é determinado nesta tabela para os casos de ancoragem em ponta reta ou com gancho e barra posicionada em zona de boa ou má aderência.

Adotaram-se: $\eta_1 = 1,4$, $\eta_2 = 1,0$ ou $0,7$ e $\eta_3 = 1,0$.