

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Estevan Christ Machry

**MÉTODOS DE ANCORAGEM DE BARRAS LONGITUDINAIS
EM EXTREMIDADES DE VIGAS EM CONCRETO ARMADO:
DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMA COMPUTACIONAL**

Porto Alegre
dezembro 2014

ESTEVAN CHRIST MACHRY

**MÉTODOS DE ANCORAGEM DE BARRAS LONGITUDINAIS
EM EXTREMIDADES DE VIGAS EM CONCRETO ARMADO:
DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMA COMPUTACIONAL**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Alexandre Rodrigues Pacheco

Porto Alegre
dezembro 2014

ESTEVAN CHRIST MACHRY

**MÉTODOS DE ANCORAGEM DE BARRAS LONGITUDINAIS
EM EXTREMIDADES DE VIGAS EM CONCRETO ARMADO:
DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMA COMPUTACIONAL**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 15 de dezembro de 2014

Prof. Alexandre Rodrigues Pacheco
Ph.D. pela Pennsylvania State University
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Dra. pelo PPGA/UFRGS
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Profa. Virgínia Maria Rosito d'Avila Bessa (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Roberto Domingo Rios (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Alexandre Rodrigues Pacheco (UFRGS)
Ph.D. pela Pennsylvania State University

Dedico este trabalho aos meus pais, Edson e Eloísa, que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Alexandre Rodrigues Pacheco, orientador deste trabalho, pelo seu incentivo, disponibilidade e disposição em compartilhar seu conhecimento.

À Prof. Carin Maria Schmitt, por sua dedicação e aplicação, buscando sempre o aperfeiçoamento deste trabalho através de críticas e sugestões.

Aos meus pais, Edson e Eloísa, pelo incentivo e apoio em todos os momentos de minha vida.

À minha namorada, Fernanda Candemil, pelo carinho e otimismo inabalável.

Aos meus colegas Miguel Luis Piva e Vinícius Liedtke Garcia pela amizade e companheirismo durante o período de faculdade.

Aos meus amigos, que tornaram o período de faculdade singular e sempre fazem com que as conquistas se tornem mais gratificantes.

Ao amigo e engenheiro Manoel Xavier Filho pelas inúmeras conversas e discussões sobre cálculo estrutural.

Agradeço aos professores da Escola de Engenharia e à UFRGS, por proporcionarem um ensino de excelência.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

Os problemas significativos que enfrentamos não podem ser resolvidos no mesmo nível de pensamento em que estávamos quando os criamos.

Albert Einstein

RESUMO

A ancoragem das armaduras longitudinais nas extremidades das vigas de concreto armado tem papel fundamental no correto funcionamento destas e é essencial para que essas se comportem da maneira mais semelhante possível àquela que foi concebida em projeto. O fenômeno de aderência garante a ancoragem entre o aço e o concreto ao evitar que ocorra deslocamento entre estes dois materiais e sintetiza a principal característica do concreto armado. Por estes motivos a verificação da ancoragem é uma etapa importante no projeto de vigas de concreto armado. A partir da determinação da tensão de aderência e dos métodos de ancoragem reta, com ganchos, com barra transversal soldada e com grampos, se calculam valores de comprimentos de ancoragem a fim de se verificar a validade destes resultados para que ocorra a correta transferência de esforços entre os elementos estruturais. Com o objetivo de automatizar estes cálculos foi desenvolvido um programa computacional que execute o dimensionamento da ancoragem, considerando válidas as recomendações da NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto: procedimento. O desenvolvimento do *software* foi feito utilizando a linguagem de programação *Visual Basic*, que permite a criação de uma interface gráfica organizada e prática de utilizar, e então a partir da solução de exemplos é explicado o funcionamento do programa computacional.

Palavras-chave: Ancoragem de Armaduras em Vigas. Vigas de Concreto Armado.
Ancoragem com Ganchos. Ancoragem com Barra Transversal Soldada.
Ancoragem com Grampos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa	19
Figura 2 – Aderência por adesão	22
Figura 3 – Aderência por atrito	23
Figura 4 – Aderência mecânica	23
Figura 5 – Tensões principais na zona de ancoragem de uma barra de armadura	24
Figura 6 – Fendilhamento na zona de ancoragem	25
Figura 7 – Tensões de aderência	27
Figura 8 – Tensões de aderência na região de ancoragem de barras retas	28
Figura 9 – Posições de boa e má aderência	32
Figura 10 – Tensões de contato no gancho	38
Figura 11 – Disposição dos ganchos	39
Figura 12 – Tipos de ganchos	39
Figura 13 – Ancoragem com barras transversais soldadas	40
Figura 14 – Grampos de ancoragem em apoios de extremidade de pequena largura	45
Figura 15 – Modelo de biela e tirante para ancoragem com grampos	46
Figura 16 – Interface do programa Calculadora de Ancoragem	48
Figura 17 – Sistema de ajuda	48
Figura 18 – Linhas de programação	49
Figura 19 – Tela inicial	50
Figura 20 – Dados de entrada	51
Figura 21 – Aviso de erro	52
Figura 22 – Dados da seção	52
Figura 23 – Dados da resistência dos materiais	53
Figura 24 – Dados da armadura longitudinal	54
Figura 25 – Viga exemplo	54
Figura 26 – Cobrimento	55
Figura 27 – Posição da barra	55
Figura 28 – Dados da região de apoio	56
Figura 29 – Comprimento do apoio	56
Figura 30 – Diagramas de solicitações da viga exemplo	57
Figura 31 – Dados dos coeficientes de segurança	58
Figura 32 – Cobrimento maior que 70 mm ao plano do gancho	58
Figura 33 – Diâmetro do grampo	59

Figura 34 – Dados de saída	60
Figura 35 – Cálculo de ancoragem	61
Figura 36 – Cálculo de ancoragem com barra transversal soldada	61
Figura 37 – Cálculo de ancoragem com grampos	62
Figura 38 – Cálculos intermediários	62
Figura 39 – Viga exemplo 1	63
Figura 40 – Diagramas de solicitações da viga exemplo 1	64
Figura 41 – Cálculos de ancoragem para o apoio A da viga exemplo 1	65
Figura 42 – Cálculos de ancoragem para o apoio B da viga exemplo 1	66
Figura 43 – Viga exemplo 2	67
Figura 44 – Diagramas de solicitações da viga exemplo 2	67
Figura 45 – Cálculos de ancoragem para o apoio A da viga exemplo 2	68
Figura 46 – Cálculos de ancoragem para o apoio B da viga exemplo 2	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classes de agressividade ambiental	26
Quadro 2 – Relação entre classe de agressividade ambiental e cobertura nominal	27
Quadro 3 – Valores do coeficiente de conformação superficial	31
Quadro 4 – Valores do coeficiente de posição da barra durante a concretagem	32
Quadro 5 – Diâmetro nominal e área da seção para barras de aço	33
Quadro 6 – Diâmetro nominal e área da seção para fios de aço	34
Quadro 7 – Diâmetro dos pinos de dobramento	40

LISTA DE SÍMBOLOS

R_{b1} – resistência de adesão

P_t – pressão transversal

R_{b2} – resistência de atrito

R_{b3} – resistência mecânica

Z – força de tração

D – força de compressão

c – cobrimento de concreto (mm)

Δc – tolerância de execução para o cobrimento (mm)

τ_b – tensão tangencial

l_b – comprimento de ancoragem básico (cm)

f_{bd} – resistência de aderência de projeto (MPa)

η_1 – coeficiente de conformação superficial

η_2 – coeficiente de posição da barra durante a concretagem

η_3 – coeficiente de diâmetro da barra

f_{ctd} – resistência de projeto à tração do concreto (MPa)

f_{ck} – resistência característica à compressão do concreto (MPa)

$f_{ct,m}$ – resistência média à tração do concreto (MPa)

$f_{ctk,inf}$ – resistência característica inferior à tração do concreto (MPa)

γ_c – coeficiente de ponderação da resistência do concreto

ϕ – diâmetro da barra (mm)

f_{yd} – resistência de projeto ao escoamento do aço (MPa)

$l_{b,nec}$ – comprimento de ancoragem necessário (cm)

α – coeficiente para cálculo do comprimento de ancoragem

$A_{s,calc}$ – área de aço calculada (cm²)

$A_{s,ef}$ – área de aço efetiva adotada em projeto (cm²)

$l_{b,min}$ – comprimento de ancoragem mínimo (cm)

σ_{cb} – pressão de contato no gancho

ϕ_t = diâmetro da barra transversal soldada (mm)

a_l – decalagem do diagrama de força no banzo tracionado (cm)

d – altura útil da viga (cm)

$V_{sd,máx}$ – força cortante máxima solicitante de projeto (kN)

V_c – força cortante resistida por mecanismos complementares ao modelo em treliça (kN)

V_{c0} – valor de referência para V_c , para bielas de compressão inclinadas de 45° (kN)

b_w – largura da alma da viga (cm)

R_{sd} – força de tração de projeto na armadura (kN)

V_d – força cortante de projeto no apoio (kN)

N_d – força normal de projeto no apoio (kN)

F_{sd} – força de tração de projeto nos grampos (kN)

$l_{b,disp}$ – comprimento de ancoragem disponível no apoio (cm)

$A_{s,l}$ – área de aço dos grampos (cm²)

$l_{b,l}$ – comprimento de ancoragem dos grampos (cm)

ϕ_l – diâmetro dos grampos (mm)

$R_{sd,n}$ – força de tração de projeto não ancorada (kN)

A_s – armadura tracionada (cm²)

f_{yk} – resistência característica ao escoamento do aço (MPa)

l_{apoio} – comprimento total do apoio (cm)

$A_{s,v\tilde{a}o}$ – área de aço existente no vão e referente ao maior momento positivo deste vão (cm²)

$M_{v\tilde{a}o}$ – maior momento positivo no vão (kNm)

M_{apoio} – momento no apoio (kNm)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	17
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	17
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	17
2.3 PRESSUPOSTO	17
2.4 DELIMITAÇÕES	17
2.5 LIMITAÇÕES	18
2.6 DELINEAMENTO	18
3 ADERÊNCIA	21
3.1 ADERÊNCIA POR ADESÃO	21
3.2 ADERÊNCIA POR ATRITO	22
3.3 ADERÊNCIA MECÂNICA	23
3.4 FENDILHAMENTO	24
3.5 COBRIMENTO	26
3.6 TENSÃO DE ADERÊNCIA	27
3.6.1 Resistência do concreto	29
3.6.2 Conformação superficial	30
3.6.3 Localização da barra na peça	31
3.6.4 Diâmetro da barra de aço	33
4 ANCORAGEM	35
4.1 COMPRIMENTO DE ANCORAGEM NECESSÁRIO	35
4.1.1 Ancoragem reta	37
4.1.2 Ancoragem com ganchos	37
4.1.3 Ancoragem com barras transversais soldadas	40
4.2 ANCORAGEM EM APOIOS DE EXTREMIDADE	41
4.3 ANCORAGEM COM GRAMPOS	44
5 PROGRAMA COMPUTACIONAL	47
5.1 DESENVOLVIMENTO	47
5.2 VALIDAÇÃO DO SOFTWARE	49
5.3 INSTRUÇÕES DE USO	50
5.3.1 Dados de entrada	51
5.3.1.1 Seção	52
5.3.1.2 Resistência dos materiais	53

5.3.1.3 Armadura longitudinal	53
5.3.1.4 Região de apoio	56
5.3.1.5 Coeficientes de segurança	57
5.3.1.6 Dados secundários	58
5.3.2 Interpretação de resultados	59
5.3.2.1 Cálculo de ancoragem	59
5.3.2.2 Cálculo de ancoragem com barra transversal soldada	61
5.3.2.3 Cálculo de ancoragem com grampos	62
5.3.2.4 Cálculos intermediários	62
5.3.3 Exemplos	63
5.3.3.1 Exemplo 1	63
5.3.3.2 Exemplo 2	66
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

De uma forma geral, os principais materiais empregados na área estrutural da construção civil são o aço e o concreto. Estes materiais constituem, portanto, os elementos estruturais das construções que devem resistir às solicitações previstas em projeto. Assim, é imprescindível que cada elemento estrutural comporte-se de maneira adequada ao qual foi projetado e que o concreto e o aço trabalhem monoliticamente.

As vigas são elementos estruturais responsáveis por transmitirem suas cargas próprias, das alvenarias e as atuantes nas lajes para os pilares que, por sua vez, as transmitem às fundações. Estas cargas reproduzem solicitações nas vigas que devem ser dimensionadas para resistirem a esta situação. Uma das etapas do dimensionamento de vigas diz respeito à verificação da ancoragem de barras longitudinais em apoios de extremidade. A ancoragem adequada é necessária para a correta transferência de esforços entre viga e apoio.

Atualmente, a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 34), descreve os procedimentos necessários para os cálculos de verificação da ancoragem de armaduras. Contudo, eventualmente, devido ao pequeno comprimento de ancoragem disponível em uma região de apoio ou em função de um elevado carregamento, se faz necessário o uso de outros métodos de ancoragem como, por exemplo, ganchos, barras transversais soldadas ou grampos. Estes sistemas de ancoragem são também abordados na literatura existente sobre concreto armado na qual é possível encontrar definições destes métodos de cálculo.

Este trabalho, portanto, tem por objetivo a descrição dos métodos existentes para ancoragem de barras longitudinais em extremidades de vigas em concreto armado. Também se pretende analisar os resultados obtidos pelos métodos aplicados em vigas com diferentes solicitações e comprimentos de apoio, situação em que os cálculos foram automatizados pelo desenvolvimento de um programa computacional.

A divisão deste trabalho está feita em seis capítulos, sendo este, o primeiro e referente à introdução, pelo qual é apresentado o tema abordado, sua contextualização e a justificativa do mesmo.

No segundo capítulo estão as diretrizes da pesquisa para desenvolvimento deste trabalho, apresentando os objetivos da pesquisa, pressuposto, delimitações, limitações e o delineamento.

O terceiro e quarto capítulos são referentes à fundamentação teórica, sendo estudado o fenômeno da aderência e também caracterizadas as fórmulas e considerações necessárias para o cálculo da tensão de aderência. São descritos os métodos de ancoragem reta, com ganchos, com barras transversais soldadas e com grampos, assim como as fórmulas e condições para os cálculos de ancoragem.

No quinto capítulo é apresentado o programa computacional desenvolvido para o cálculo de ancoragem e também são descritas as etapas de criação da interface gráfica e algoritmo do *software*, assim como a validação dos cálculos por ele executados. Posteriormente, são fornecidas instruções de como utilizar e interpretar os resultados gerados pela ferramenta computacional e são propostos exemplos de aplicação da mesma na solução de problemas de ancoragem.

O sexto capítulo apresenta as considerações finais em que são feitas uma avaliação geral sobre o trabalho e uma última análise sobre a ferramenta computacional desenvolvida.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: quais os métodos existentes para ancoragem de barras longitudinais em extremidades de vigas em concreto armado e como automatizar os cálculos a partir de uma rotina computacional?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa são a descrição dos métodos de ancoragem de barras longitudinais em extremidades de vigas em concreto armado e o desenvolvimento de um programa computacional que execute o dimensionamento destes métodos.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que as recomendações da NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), relativas ao dimensionamento e detalhamento de estruturas em concreto armado, são consideradas válidas.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo sobre ancoragem de barras longitudinais em extremidades de vigas em concreto armado.

2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) métodos de ancoragem aplicados para vigas de seção retangular ou seção T;
- b) carregamento das vigas composto por cargas concentradas e/ou uniformemente distribuídas;
- c) linguagem *Visual Basic*, para elaboração do programa computacional.

2.6 DELINEAMENTO

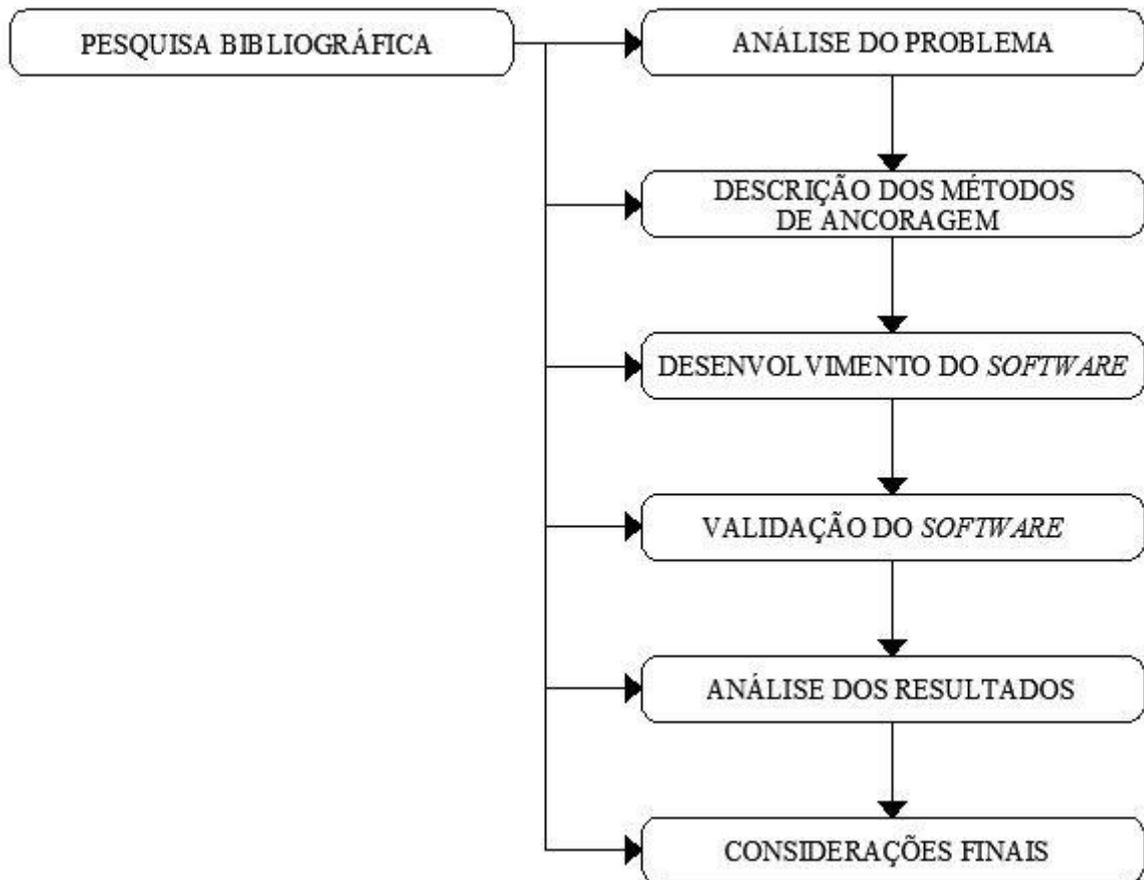
O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir que estão representadas na figura 1 e descritas nos parágrafos seguintes:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) análise do problema;
- c) descrição dos métodos de ancoragem;
- d) desenvolvimento do *software*;
- e) validação do *software*;
- f) análise dos resultados;
- g) considerações finais.

A **pesquisa bibliográfica** foi a etapa inicial do trabalho e se fez presente durante todo o período de desenvolvimento deste. Esta etapa teve por objetivo a pesquisa e leitura de materiais como livros, normas técnicas, artigos científicos, trabalhos de conclusão, teses e dissertações que auxiliaram no aprimoramento do conhecimento acerca do tema deste trabalho.

A segunda etapa foi a **análise do problema**, quando a partir da interpretação do mesmo, buscou-se entender e definir quais os termos e condições necessárias para a sua solução. Nesta etapa procurou-se determinar a forma como o trabalho foi desenvolvido e as variáveis fundamentais para a criação do programa computacional.

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor)

Após a análise do problema, a **descrição dos métodos de ancoragem** buscou caracterizar e explicar estes métodos, assim como determinar os roteiros para o dimensionamento e detalhamento destas soluções. Esta é uma etapa importante, pois além de definir os métodos de cálculo que foram abordados no trabalho, teve direta influência no desenvolvimento do algoritmo do programa computacional.

Finalizada a etapa de descrição dos métodos de ancoragem, o próximo passo foi o **desenvolvimento do software**, quando a partir da linguagem de programação *Visual Basic*, foi escrita a sequência de instruções de execução dos cálculos e desenvolvida a interface gráfica de entrada e saída de dados do programa computacional.

A **validação do software** foi feita a partir da comparação dos resultados fornecidos pelo programa computacional com resultados de cálculos feitos manualmente. Também foi feita a revisão do algoritmo, buscando sempre que possível, a melhoria na sua sequência de instruções.

Na etapa de **análise dos resultados** foi feita uma avaliação geral do *software* desenvolvido e explicada a utilização e funcionamento deste. Também foi executado o cálculo de ancoragem de barras longitudinais para exemplos de vigas em concreto armado com diferentes solicitações e comprimentos de apoio a fim de exemplificar a aplicação dos métodos de ancoragem e o uso do *software*. Por fim, as **considerações finais** encerraram este trabalho.

3 ADERÊNCIA

O trabalho monolítico entre o aço e o concreto é o principal responsável pelo comportamento do material concreto armado. Esta condição entre os dois materiais evita que ocorra deslocamento entre o aço e o concreto e sintetiza a sua principal característica (FUSCO, 1995, p. 135).

Ainda de acordo com Fusco (1995, p. 135):

A solidariedade da armadura ao concreto é garantida pela existência de uma certa aderência entre os dois materiais. Na realidade, essa aderência é composta por diversas parcelas, que decorrem de diferentes fenômenos que intervêm na ligação dos dois materiais. Esses fenômenos podem ser explicitados por meio de diferentes ensaios.

O mesmo autor define que as três parcelas que compõem o fenômeno de aderência são: aderência por adesão, aderência por atrito e aderência mecânica. Esta divisão tem por objetivo a explicação detalhada deste fenômeno, entretanto não é possível calcular cada parcela separadamente devido à complexidade do mesmo (FUSCO, 1995, p. 137). As três componentes da aderência estão descritas nos capítulos a seguir.

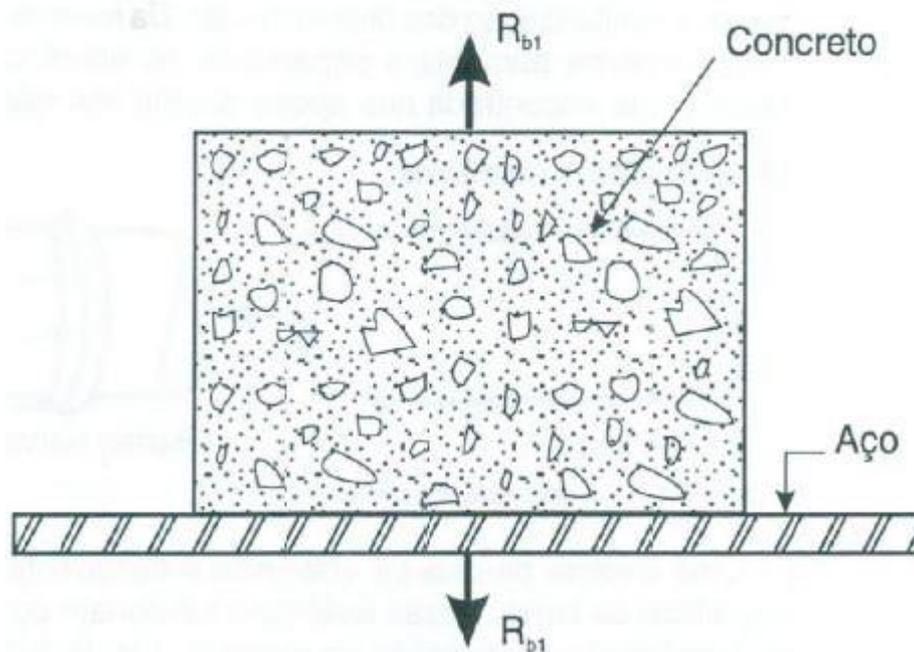
3.1 ADERÊNCIA POR ADESÃO

Segundo Araújo (2010, p. 220):

A aderência por adesão decorre das ligações físico-químicas que se estabelecem no contato entre o aço e o concreto (efeito de colagem) durante o processo de pega do cimento. Esse efeito é destruído para pequenos deslocamentos da barra de aço e, portanto, dá uma contribuição muito pequena para a resistência da aderência.

Fusco (1995, p. 135) explica que “Essa parcela de aderência [aderência por adesão] é constatada pela resistência à separação dos dois materiais, quando se tenta separar um bloco concretado diretamente em contato com uma placa de aço [...]”. A figura 2 mostra a resistência de adesão R_{bI} .

Figura 2 – Aderência por adesão



(fonte: FUSCO, 1995, p. 135)

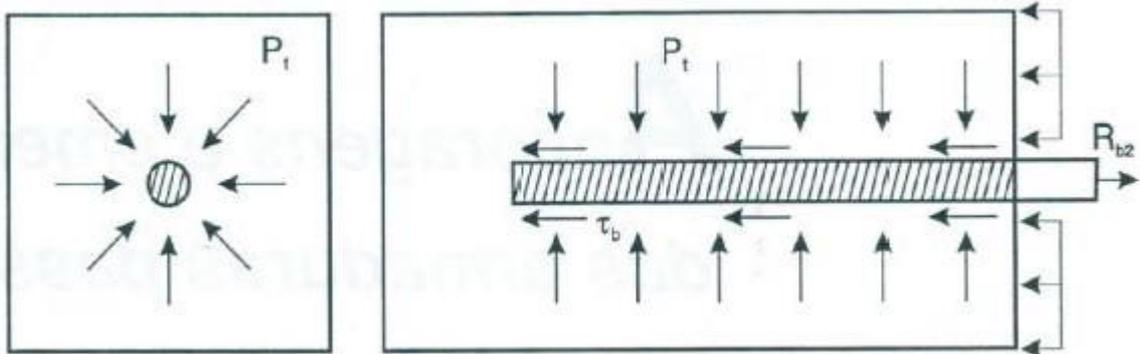
Brisotto (2011, p. 7) descreve que “A aderência por adesão [...] também depende da rugosidade e da limpeza da superfície das armaduras. Este efeito nunca age isoladamente e é ainda estritamente difícil de mensurá-lo, pois não é suficiente para garantir a ligação entre os materiais.”.

3.2 ADERÊNCIA POR ATRITO

Segundo Brisotto (2011, p. 7), “A parcela [de aderência] relativa ao atrito surge quando há a tendência de deslocamento relativo entre os dois materiais [aço e concreto], depois que é rompida a aderência por adesão.”.

Esta parcela de aderência existe em consequência das forças de atrito entre o aço e o concreto e são influenciadas pela rugosidade superficial do aço. Quando o concreto sofre retração, o seu volume é reduzido e a armadura existente no seu interior impede, em parte, que ocorram deformações na peça, fazendo com que apareçam pressões transversais P_t que ajudam a aumentar a aderência por atrito (FUSCO, 1995, p. 136). As pressões transversais que o concreto exerce na armadura e a resistência de atrito R_{b2} estão mostradas na figura 3.

Figura 3 – Aderência por atrito



(fonte: FUSCO, 1995, p. 136)

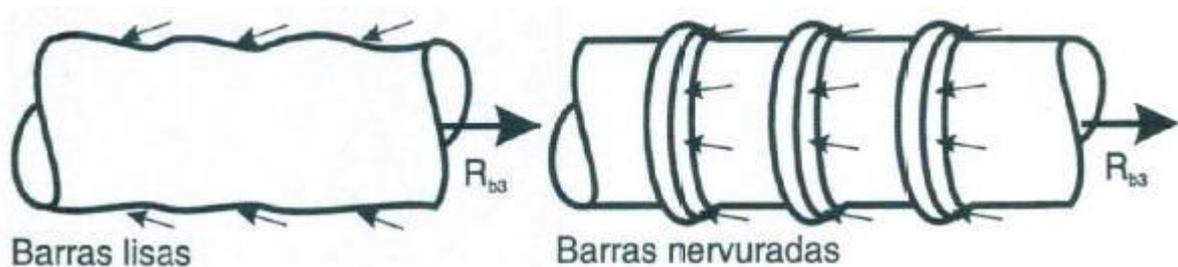
3.3 ADERÊNCIA MECÂNICA

Araújo (2010, p. 220) explica que:

A aderência mecânica ocorre em barras nervuradas, através do contato direto entre o concreto e as saliências na superfície da barra. Nas regiões de contato, formam-se consolos de concreto solicitados ao corte, o que permite uma ligação efetiva entre o aço e o concreto. A aderência mecânica também ocorre nas barras lisas, devido a irregularidades superficiais sempre existentes, porém o seu efeito é bem menor que nas barras nervuradas.

Na figura 4, está ilustrada a resultante das tensões de compressão no concreto devido às saliências existentes em barras de aço lisas e nervuradas que ocasionam a resistência mecânica R_{b3} (FUSCO, 1995, p. 136).

Figura 4 – Aderência mecânica



(fonte: FUSCO, 1995, p. 136)

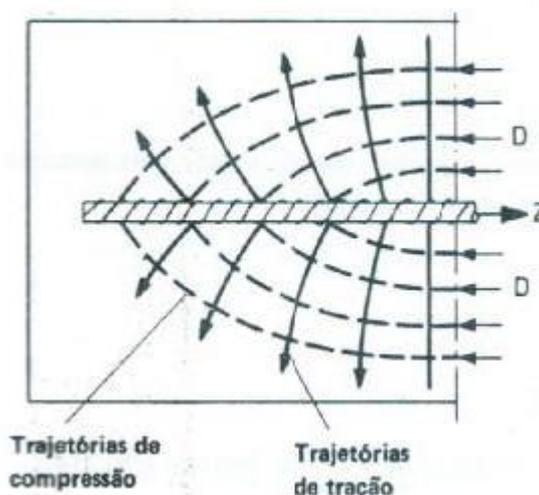
Brisotto (2011, p. 8) explica que:

Nas barras de alta aderência as nervuras criam consolos no concreto, levando ao surgimento de forças concentradas de compressão perpendiculares às faces das nervuras no instante em que a barra é tracionada (ou comprimida) e tende a deslizar [...]. Estas forças levam a microfissuração e ao esmagamento do concreto na região das nervuras. Com o aumento do escorregamento, as forças de atrito presentes sofrem rápida redução, tornando a aderência mecânica a principal responsável pela aderência de barras nervuradas. Nota-se ainda, que mesmo em barras lisas, onde a aderência depende primordialmente da adesão química e do atrito, existe o efeito da aderência mecânica, em menor escala, devido às irregularidades superficiais decorrentes do processo de laminação.

3.4 FENDILHAMENTO

Na ancoragem de uma barra de aço no concreto existe um equilíbrio entre a força de tração Z e a força de compressão D . Na figura 5, são mostradas as trajetórias das tensões de tração e compressão resultantes dos esforços na peça. As tensões de compressão desenvolvem-se a partir do início do comprimento de ancoragem da barra de aço e convergem até a mesma ao longo deste comprimento. As tensões de tração são transversais às tensões de compressão e responsáveis pelo esforço de fendilhamento (LEONHARDT; MÖNNIG, 1978, p. 31).

Figura 5 – Tensões principais na zona de ancoragem de uma barra de armadura

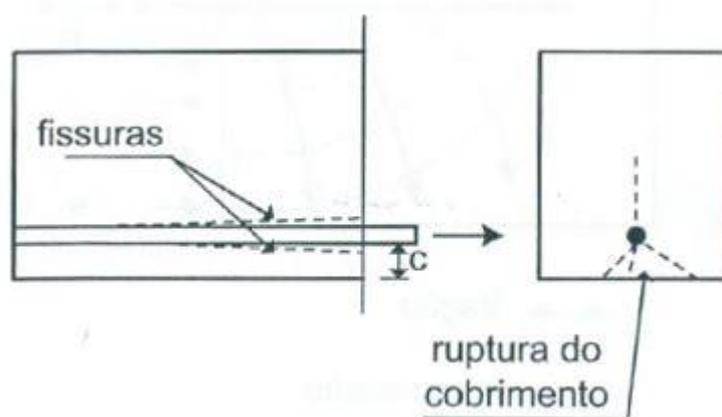


(fonte: LEONHARDT; MÖNNIG, 1978, p. 31)

Segundo Araújo (2010, p. 219), “Em virtude das tensões de tração, surge sempre o risco de aparecerem fissuras longitudinais ou de fendilhamento na região da ancoragem. Se o

cobrimento de concreto, c , for pequeno em relação ao diâmetro da barra, ele pode romper-se [...]”. As fissuras de fendilhamento e a ruptura do cobrimento de concreto estão ilustradas na figura 6.

Figura 6 – Fendilhamento na zona de ancoragem



(fonte: ARAÚJO, 2010, p. 220)

O mesmo autor ainda explica que nos apoios diretos das vigas, devido às reações de apoio, ocorre uma compressão transversal que pode anular ou diminuir os esforços transversais de tração, ajudando a reduzir a possibilidade de fendilhamento na zona de ancoragem. Caso a região de ancoragem não possua essa compressão transversal, os esforços de fendilhamento devem ser resistidos por uma armadura transversal à barra longitudinal ancorada (ARAÚJO, 2010, p. 219).

Em relação à armadura transversal ao longo do comprimento de ancoragem que deve resistir aos esforços de fendilhamento, Leonhardt e Mönning (1978, p. 39) explicam que “Em geral, a armadura transversal já existente, como, por exemplo, estribos em lajes e vigas, é suficiente para absorver os esforços de tração.”.

Fusco (1995, p. 152) também considera que “Frequentemente desaparece a necessidade de colocação de uma armadura especial de costura, porquanto essa função pode ser desempenhada pelas armaduras transversais colocadas nas peças em virtude de outros tipos de sollicitação.”.

3.5 COBRIMENTO

A NBR 6118 define que (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 16):

A agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, independentemente das ações mecânicas, das variações volumétricas de origem térmica, da retração hidráulica e outras previstas no dimensionamento das estruturas.

No quadro 1, são ilustradas as classes de agressividade ambiental necessárias para a determinação do cobrimento.

Quadro 1 – Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe 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).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 17)

A mesma norma explica que as características do concreto, assim como as do cobrimento da armadura, influenciam diretamente a durabilidade das estruturas de concreto armado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 18). O quadro 2 mostra os valores de cobrimento nominal relacionados com a classe de agressividade ambiental para uma tolerância de execução para o cobrimento, Δc , de 10 mm.

Quadro 2 – Relação entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV ^a
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^b	30	40	50	

^a Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

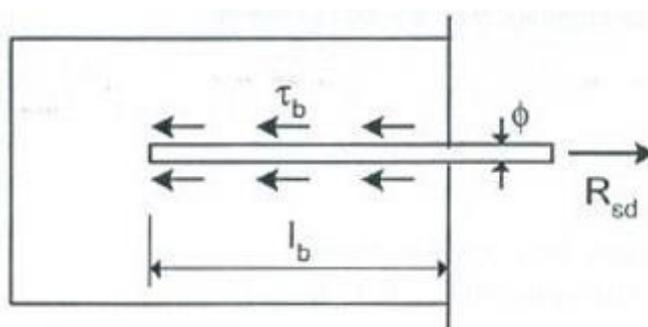
^b No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 20)

3.6 TENSÃO DE ADERÊNCIA

Na figura 7, de acordo com Araújo (2010, p. 217), “Devido à aderência entre o concreto e o aço, surgem tensões tangenciais τ_b na interface entre os dois materiais. Dessa maneira, a força de tração na barra de aço é transferida ao concreto ao longo do comprimento l_b .”

Figura 7 – Tensões de aderência



(fonte: ARAÚJO, 2010, p. 217)

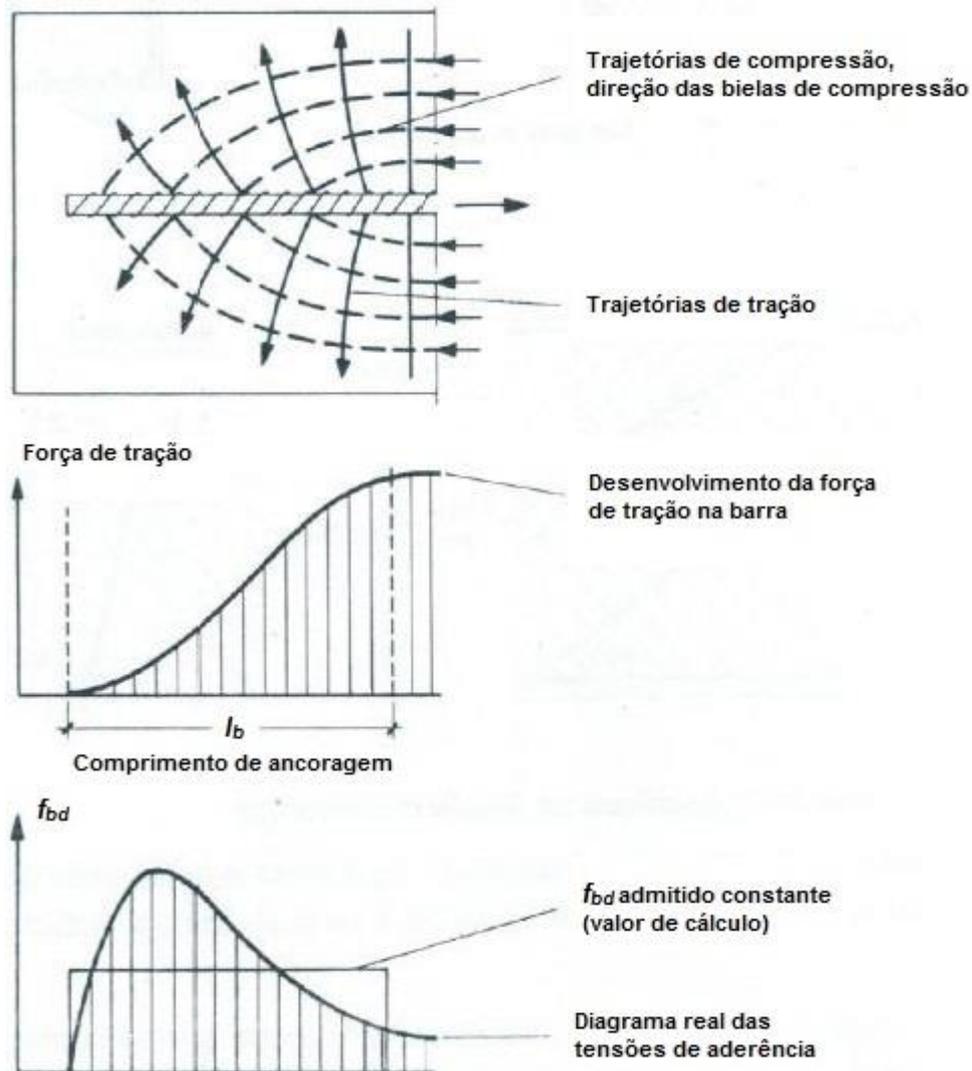
Brisotto (2011, p. 7) explica que:

A forma usual de consideração da transferência de esforços entre os dois materiais é através da definição de uma **tensão de aderência** e de sua distribuição ao longo da interface. A relação tensão de aderência versus escorregamento, a qual representa a variação da tensão tangencial que surge entre a superfície da barra e o concreto com

relação ao deslocamento relativo entre eles, é adotada para quantificar a eficiência da ligação concreto/armadura.

Leonhardt e Mönning (1978, p. 35) afirmam que a tensão de aderência não é constante ao longo do comprimento de ancoragem. Entretanto, para os cálculos de projeto deve ser adotado um valor médio da tensão de aderência a fim de se estar a favor da segurança. Na figura 8 é possível ver o comportamento da força de tração na barra e das tensões de aderência ao longo do comprimento de ancoragem.

Figura 8 – Tensões de aderência na região de ancoragem de barras retas



(fonte: adaptado de LEONHARDT; MÖNNIG, 1978, p. 36)

Segundo a NBR 6118, a partir da fórmula 1 pode-se chegar ao valor da resistência de aderência de projeto (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 34):

$$f_{bd} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 f_{ctd} \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

f_{bd} = resistência de aderência de projeto;

η_1 = coeficiente de conformação superficial;

η_2 = coeficiente de posição da barra durante a concretagem;

η_3 = coeficiente de diâmetro da barra;

f_{ctd} = resistência de projeto à tração do concreto.

A resistência de aderência de projeto depende da resistência do concreto, da conformação superficial, localização e diâmetro das barras. A seguir estão descritos estes fatores que influenciam nos cálculos da resistência de aderência de projeto.

3.6.1 Resistência do concreto

De acordo com a NBR 6118, para concretos de classes até C50 e a partir da resistência característica à compressão do concreto, pode-se calcular a resistência média à tração do concreto conforme a fórmula 2 e então, a resistência característica inferior à tração do concreto de acordo com a fórmula 3. Finalmente, a partir da fórmula 4, pode-se calcular a resistência de projeto à tração do concreto (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 23):

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{2/3} \quad (\text{fórmula 2})$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 f_{ct,m} \quad (\text{fórmula 3})$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} \quad (\text{fórmula 4})$$

Onde:

f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto, em megapascal;

$f_{ct,m}$ = resistência média à tração do concreto;

$f_{ctk,inf}$ = resistência característica inferior à tração do concreto;

f_{ctd} = resistência de projeto à tração do concreto;

γ_c = coeficiente de ponderação da resistência do concreto.

Para concretos de classes C55 até C90 a resistência média à tração do concreto é calculada de acordo com a fórmula 5 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 23):

$$f_{ct,m} = 2,12 \ln(1 + 0,11 f_{ck}) \quad (\text{fórmula 5})$$

Onde:

f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto, em megapascal;

3.6.2 Conformação superficial

A NBR 6118 define que a geometria da barra é considerada no cálculo da resistência de aderência de projeto a partir do coeficiente de conformação superficial η_1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 29). No quadro 3, são apresentados os valores do coeficiente de conformação superficial para cada tipo de superfície existente.

Quadro 3 – Valores do coeficiente de conformação superficial

Tipo de superfície	η_1
Lisa	1,0
Entalhada	1,4
Nervurada	2,25

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 29)

A NBR 7480 exige que as barras de categoria CA-50 possuam nervuras, enquanto que as barras de categoria CA-25 sejam obrigatoriamente lisas. Em relação aos fios de categoria CA-60 eles podem ser lisos, entalhados ou nervurados, sendo que apenas os fios de 10 mm desta categoria devem ser entalhados ou nervurados, excluindo-se a opção de serem lisos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 2-3).

3.6.3 Localização da barra na peça

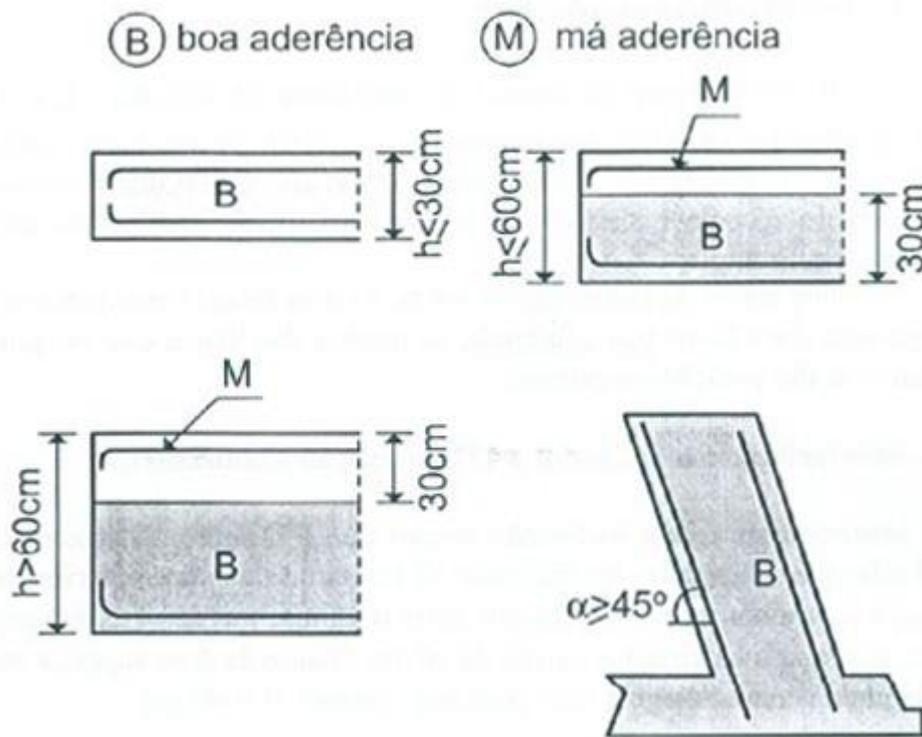
Segundo Araújo (2010, p. 222):

A resistência de aderência depende, ainda, da posição das barras de aço na estrutura. Barras verticais estão sempre em uma posição favorável, enquanto que barras horizontais podem estar em uma situação desfavorável, dependendo de sua localização. Devido à sedimentação do concreto fresco, pode ocorrer um acúmulo de água sob as barras horizontais, com a consequente formação de vazios na parte inferior das mesmas. Por causa disso, a resistência da aderência fica reduzida.

A NBR 6118 classifica a posição da barra durante a concretagem entre situações de boa ou má aderência. É considerada em situação de boa aderência a barra que possui inclinação superior a 45° em relação a horizontal. Para barra com inclinação menor que 45° em relação a horizontal é considerada em posição de boa aderência desde que esteja localizada no máximo a 30 cm acima da face inferior da peça que possui altura menor que 60 cm, ou que esteja localizada no mínimo 30 cm abaixo da face superior da peça que possui altura maior ou igual a 60 cm. Qualquer outra posição deve ser considerada em situação má aderência (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 34). A figura 9 complementa as considerações a respeito da localização das barras na peça.

A mesma norma define que o coeficiente η_2 é responsável por considerar a influência da posição da barra na peça no cálculo da resistência de aderência de projeto (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 35). Os valores que este coeficiente pode ter estão apresentados no quadro 4.

Figura 9 – Posições de boa e má aderência



(fonte: ARAÚJO, 2010, p. 224)

Quadro 4 – Valores do coeficiente de posição da barra durante a concretagem

Situação da barra	Coeficiente de posição da barra
	η_2
Boa aderência	1,0
Má aderência	0,7

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 35)

3.6.4 Diâmetro da barra de aço

A NBR 6118 determina a influência do diâmetro da barra de aço no cálculo da resistência de aderência de projeto a partir do coeficiente η_3 . Quando o diâmetro da barra for menor que 32 mm o valor do coeficiente η_3 é 1,0. Porém, quando o diâmetro da barra for maior ou igual a 32 mm deve-se utilizar a fórmula 6 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 35):

$$\eta_3 = \frac{(132 - \phi)}{100} \quad (\text{fórmula 6})$$

Onde:

η_3 = coeficiente de diâmetro da barra;

ϕ = diâmetro da barra, em milímetros.

Segundo a NBR 7480, o diâmetro nominal é definido como “[...] o diâmetro equivalente da seção transversal típica do fio ou da barra, expresso em milímetros.”, enquanto que a área nominal é definida como “[...] a área da seção transversal do fio ou da barra de diâmetro nominal específico, expresso em milímetros quadrados.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 2). Nos quadros 5 e 6 são mostrados os diâmetros nominais das barras e fios de aço assim como suas respectivas áreas nominais, sendo que os valores das áreas estão em centímetros quadrados devido à maior familiaridade da utilização destes dados nesta unidade de medida.

Quadro 5 – Diâmetro nominal e área da seção para barras de aço

CA-25 e CA-50		CA-25 e CA-50	
Diâmetro nominal (mm)	Área da seção (cm ²)	Diâmetro nominal (mm)	Área da seção (cm ²)
6,3	0,312	20,0	3,142
8,0	0,503	22,0	3,801
10,0	0,785	25,0	4,909
12,5	1,227	32,0	8,042
16,0	2,011	40,0	12,566

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 10)

Quadro 6 – Diâmetro nominal e área da seção para fios de aço

CA-60	
Diâmetro nominal (mm)	Área da seção (cm²)
2,4	0,045
3,4	0,091
3,8	0,113
4,2	0,139
4,6	0,166
5,0	0,196
5,5	0,238
6,0	0,283
6,4	0,322
7,0	0,385
8,0	0,503
9,5	0,709
10,0	0,785

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 11)

4 ANCORAGEM

Araújo (2010, p. 217) explica que “A ancoragem das barras da armadura pode ser feita por aderência ou por dispositivos especiais, como placas de ancoragem. As ancoragens por aderência são mais baratas e por isso são sempre usadas, quando se dispõe de um comprimento necessário para as mesmas.”.

A NBR 6118 define o “[...] comprimento de ancoragem básico como o comprimento reto de uma barra de armadura passiva necessário para ancorar a força limite $A_s f_{yd}$ nessa barra, admitindo-se, ao longo desse comprimento, resistência de aderência uniforme igual a f_{bd} [...]” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 37). O comprimento de ancoragem básico é calculado de acordo com a fórmula 7:

$$l_b = \frac{\phi f_{yd}}{4 f_{bd}} \geq 25\phi \quad (\text{fórmula 7})$$

Onde:

l_b = comprimento de ancoragem básico;

ϕ = diâmetro da barra;

f_{yd} = resistência de projeto ao escoamento do aço;

f_{bd} = resistência de aderência de projeto.

4.1 COMPRIMENTO DE ANCORAGEM NECESSÁRIO

Segundo a NBR 6118 a partir da fórmula 8 é calculado o comprimento de ancoragem necessário (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 37). Esta fórmula permite a consideração de outros métodos de ancoragem a partir do coeficiente α e também leva em conta a influência das áreas de aço das armaduras longitudinais, adotadas e calculadas em projeto, no valor final do comprimento de ancoragem.

$$l_{b,nec} = \alpha l_b \frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}} \geq l_{b,min} \quad (\text{fórmula 8})$$

Onde:

$l_{b,nec}$ = comprimento de ancoragem necessário;

α = coeficiente para cálculo de comprimento de ancoragem;

l_b = comprimento de ancoragem básico;

$A_{s,calc}$ = área de aço calculada;

$A_{s,ef}$ = área de aço efetiva adotada em projeto;

$l_{b,min}$ = comprimento de ancoragem mínimo.

Os valores do coeficiente α para cálculo do comprimento de ancoragem necessário são estipulados a partir do tipo de ancoragem a ser feito. A NBR 6118 define estes valores da seguinte maneira (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 37-38):

- a) $\alpha = 1,0$ para barras retas;
- b) $\alpha = 0,7$ para barras com gancho em suas extremidades, cobrimento $\geq 3\phi$ no plano normal ao gancho e que estejam tracionadas;
- c) $\alpha = 0,7$ para barras retas que possuam barras soldadas transversalmente;
- d) $\alpha = 0,5$ para barras com gancho em suas extremidades, que possuam barras soldadas transversalmente e cobrimento $\geq 3\phi$ no plano normal ao gancho.

A relação entre a área de aço calculada e a área de aço efetiva adotada em projeto, permite reduzir o comprimento de ancoragem necessário quando o valor de $A_{s,ef}$ for maior que $A_{s,calc}$ devido a tensão de escoamento ser superior à tensão na armadura (ARAÚJO, 2010, p. 226).

De acordo com a NBR 6118, o comprimento de ancoragem mínimo deve ser igual ao maior dos seguintes valores (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 38):

- a) $0,3l_b$;
- b) 10ϕ ;
- c) 100 mm.

4.1.1 Ancoragem reta

Fusco (1995, p. 151) explica que:

No caso de barras de alta aderência, é possível a ancoragem reta sem gancho, pois nessas barras age essencialmente a ancoragem mecânica, a qual não é destruída pela deformação lenta ou por um incipiente escorregamento longitudinal. No caso de barras lisas, cuja maior parte da aderência é feita por adesão e por atrito, exige-se obrigatoriamente o gancho de extremidade, o qual tem por finalidade inibir o início de escorregamento da barra.

Leonhardt e Mönnig (1978, p. 34) explicam que para a ancoragem reta deve-se utilizar barras que possuam nervuras, devido à resistência de aderência que a conformação superficial deste tipo de barra possibilita alcançar. Pelo mesmo motivo, as barras lisas devem ser ancoradas apenas com ganchos, em consequência das parcelas de aderência que possuem valores menores em razão da ausência de nervuras neste tipo de aço.

4.1.2 Ancoragem com ganchos

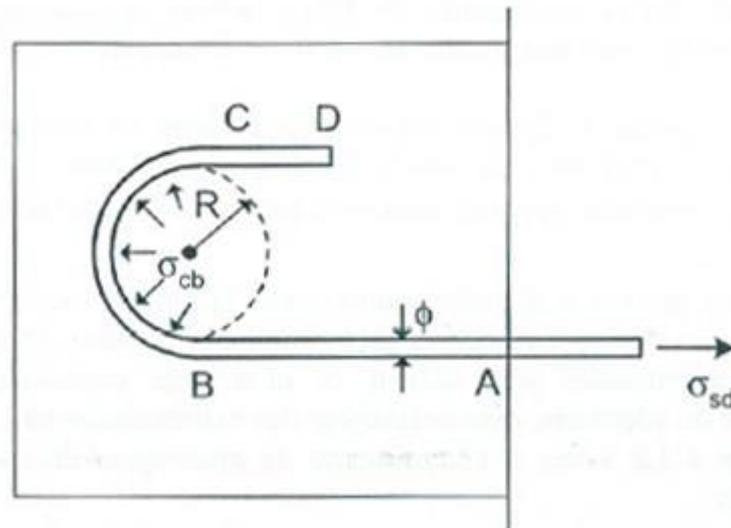
Araújo (2010, p. 227) descreve que “Uma maneira eficiente para reduzir o comprimento de ancoragem consiste no emprego de barras com ganchos de extremidade. Nesse caso, uma parcela da força na barra de aço é transmitida ao concreto por meio das pressões de contato no trecho curvo da barra [...]”.

Fusco (1995, p. 162), a partir da figura 10, reforça que:

[...] não é possível admitir que o ramo CD fique tracionado, quando se aplica uma solicitação de tração F_t na extremidade do ramo AB. Para que isso ocorresse, seria preciso que o concreto pudesse resistir aos esforços decorrentes de um verdadeiro processo de estiramento da barra de aço dentro do concreto. Nessas condições, a ancoragem dessa barra será feita, de fato, ao longo do trecho retilíneo AB e por meio da dobra de extremidade BC. O trecho suplementar CD não pode, portanto, ser considerado como participante da ancoragem.

Na figura 10 é possível ver as pressões de contato, σ_{cb} no trecho curvo da barra e os ramos descritos por Fusco.

Figura 10 – Tensões de contato no gancho



(fonte: ARAÚJO, 2010, p. 228)

O comprimento de ancoragem necessário calculado quando a barra possui gancho em suas extremidades é importante para que a ancoragem não seja feita apenas pelo gancho. O trabalho solidário entre o trecho reto da barra e o gancho, permite que este último não seja o único responsável por resistir à força de tração aplicada na armadura, o que causaria o risco de fendilhamento no concreto devido à capacidade do gancho de ancorar toda a força solicitante na barra (FUSCO, 1995, p. 166).

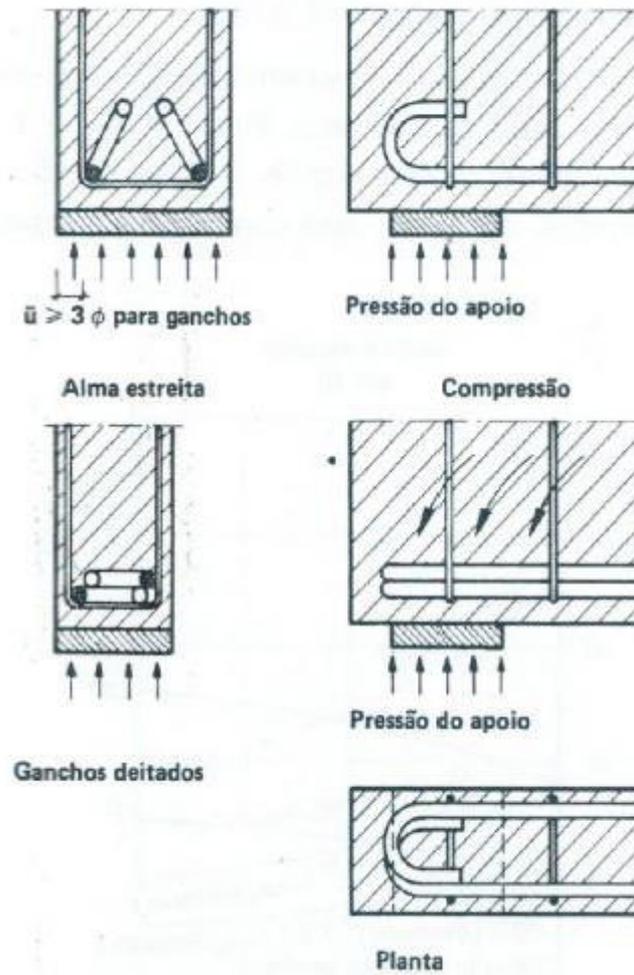
Leonhardt e Mönnig (1978, p. 42) propõem que “Nas barras mais próximas às faces laterais, ancoradas com ganchos, estes devem ser dispostos inclinados ou deitados, afastando-se da face [...]. A melhor posição dos ganchos é a perpendicular às tensões de compressão.”. Na figura 11 é possível ver a disposição de ganchos proposta por Leonhardt e Mönnig.

A NBR 6118 define as possíveis formas dos ganchos das extremidades das barras da armadura longitudinal de tração (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 36-37):

- a) semicircular, com extremidade reta do gancho maior ou igual a 2ϕ ;
- b) em ângulo de 45° , com extremidade reta do gancho maior ou igual a 4ϕ ;
- c) em ângulo reto, com extremidade reta do gancho maior ou igual a 8ϕ .

Na figura 12 estão ilustrados os tipos de ganchos.

Figura 11 – Disposição dos ganchos



(fonte: LEONHARDT; MÖNNIG, 1978, p. 42)

Figura 12 – Tipos de ganchos



(fonte: adaptado de ARAÚJO, 2010, p. 229)

A mesma norma define o diâmetro dos pinos de dobramento para os ganchos no quadro 7 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 37).

Quadro 7 – Diâmetro dos pinos de dobramento

Bitola mm	Tipo de aço		
	CA-25	CA-50	CA-60
< 20	4 ϕ	5 ϕ	6 ϕ
≥ 20	5 ϕ	8 ϕ	-

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 37)

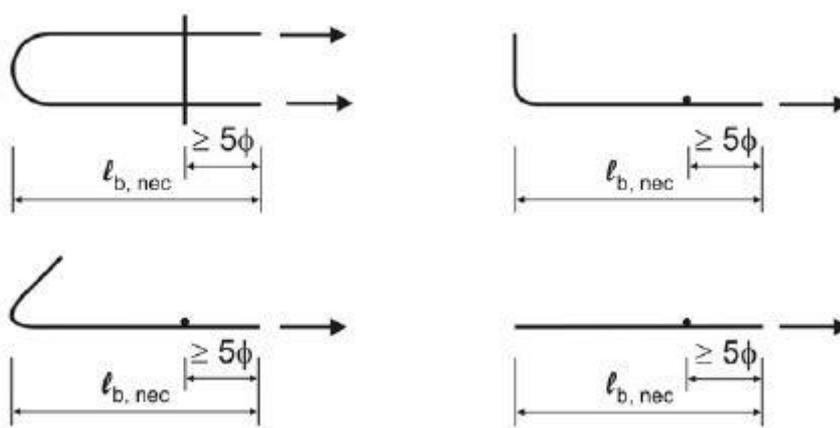
4.1.3 Ancoragem com barras transversais soldadas

A NBR 6118 permite a utilização de mais de uma barra soldada transversalmente à armadura longitudinal para ancoragem desta, desde que respeitadas as seguintes condições (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 36):

- barra soldada transversalmente deve ter diâmetro $\phi_t \geq 0,6\phi$;
- barra soldada transversalmente deve ter uma distância $\geq 5\phi$ a partir do ponto inicial da ancoragem;
- a solda da barra transversal deve ter resistência ao cisalhamento maior que 30% da resistência da barra ancorada, ou seja, $0,3A_s f_{yd}$.

Na figura 13 é possível ver as disposições das barras transversais soldadas para ancoragem das armaduras longitudinais.

Figura 13 – Ancoragem com barras transversais soldadas



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 36)

4.2 ANCORAGEM EM APOIOS DE EXTREMIDADE

Segundo Araújo (2010, p. 237), “[...] em decorrência das fissuras inclinadas, a força na armadura longitudinal de tração em uma seção transversal da peça é proporcional ao momento fletor solicitante em uma seção vizinha, dela afastada de uma distância a_l ”.

A NBR 6118 explica que o valor de a_l pode ser calculado pela decalagem do diagrama de força no banzo tracionado a partir da fórmula 9 e tem limites estabelecidos de acordo com a equação 1 para modelo de cálculo I e estribos inclinados a 90° (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 137):

$$0,5d \leq a_l \leq d \quad (\text{equação 1})$$

$$a_l = d \left[\frac{V_{Sd,máx}}{2(V_{Sd,máx} - V_c)} \right] \quad (\text{fórmula 9})$$

Onde:

a_l = decalagem do diagrama de força no banzo tracionado;

d = altura útil da viga;

$V_{Sd,máx}$ = força cortante máxima solicitante de projeto;

V_c = parcela de força cortante resistida por mecanismos complementares ao modelo em treliça.

De acordo com a mesma norma, admitindo-se o modelo de cálculo I com diagonais de compressão inclinadas de 45° e considerando-se flexão simples ou flexo-tração com a linha neutra cortando a seção, o termo V_c pode ser igualado de acordo com a equação 2 e calculado a partir da fórmula 10 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 136):

$$V_c = V_{c0} \quad (\text{equação 2})$$

$$V_{c0} = 0,6f_{ctd}b_wd \quad (\text{fórmula 10})$$

Onde:

V_c = parcela de força cortante resistida por mecanismos complementares ao modelo em treliça;

V_{c0} = valor de referência para V_c , para bielas de compressão inclinadas de 45°;

f_{ctd} = resistência de projeto à tração do concreto;

b_w = largura da alma da viga;

d = altura útil da viga.

Em relação à armadura longitudinal de tração nas extremidades de vigas, o item 18.3.2.4 da NBR 6118 impõe restrições aos valores da área de aço calculada, $A_{s,calc}$, que deve resistir aos esforços de tração. A armadura longitudinal deve atender a situação mais desfavorável apresentada nas alíneas a seguir (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 148):

- a) caso existam momentos positivos na região de apoio, o valor de $A_{s,calc}$ deve ser o mesmo que foi calculado para o dimensionamento desta seção;
- b) a armadura longitudinal deve resistir à força de tração R_{sd} calculada a partir da fórmula 11, sendo o valor de $A_{s,calc}$ calculado a partir da fórmula 12;
- c) a área de aço da armadura de tração existente no vão, $A_{s,vão}$, referente ao maior momento positivo deste vão, $M_{vão}$, deve ser prolongada até a região de apoio com um valor determinado pela equação 3 ou equação 4.

A NBR 6118 define que a força de tração a ser resistida pela armadura longitudinal deve ser calculada a partir da fórmula 11 apresentada a seguir e citada na alínea anterior (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 148):

$$R_{sd} = \left(\frac{a_l}{d} \right) V_d + N_d \quad (\text{fórmula 11})$$

Onde:

R_{sd} = força de tração de projeto na armadura;

a_l = decalagem do diagrama de força no banzo tracionado;

d = altura útil da viga;

V_d = força cortante de projeto no apoio;

N_d = força normal de projeto no apoio.

Araújo (2010, p. 238) explica que para apoios de extremidade, o valor da área de aço calculada, necessária para o cálculo do comprimento de ancoragem é determinado a partir da fórmula 12:

$$A_{s,calc} = \frac{R_{sd}}{f_{yd}} \quad (\text{fórmula 12})$$

Onde:

$A_{s,calc}$ = área de aço calculada;

R_{sd} = força de tração de projeto na armadura;

f_{yd} = resistência de projeto ao escoamento do aço.

As equações 3 e 4 a seguir restringem o valor da área de aço calculada pela fórmula 12 a partir dos valores de momentos existentes no vão e no apoio.

$$A_{s,calc} \geq \frac{1}{3} A_{s,v\tilde{a}o}, \quad SE \quad M_{apoio} \leq 0 \quad e \quad |M_{apoio}| \leq 0,5M_{v\tilde{a}o} \quad (\text{equação 3})$$

$$A_{s,calc} \geq \frac{1}{4} A_{s,v\tilde{a}o}, \text{ SE } M_{apoio} < 0 \text{ e } |M_{apoio}| > 0,5M_{v\tilde{a}o} \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

$A_{s,calc}$ = área de aço calculada;

$A_{s,v\tilde{a}o}$ = área de aço existente no vão e referente ao maior momento positivo deste vão;

M_{apoio} = momento no apoio;

$M_{v\tilde{a}o}$ = maior momento positivo no vão.

Para os cálculos da ancoragem de barras longitudinais em apoios de extremidade, a NBR 6118 exige que o comprimento de ancoragem necessário seja superior ou igual ao maior dos três valores a seguir (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 148):

- a) $l_{b,nec}$;
- b) $(r + 5,5\phi)$, onde r é o raio de curvatura dos ganchos;
- c) 60 mm.

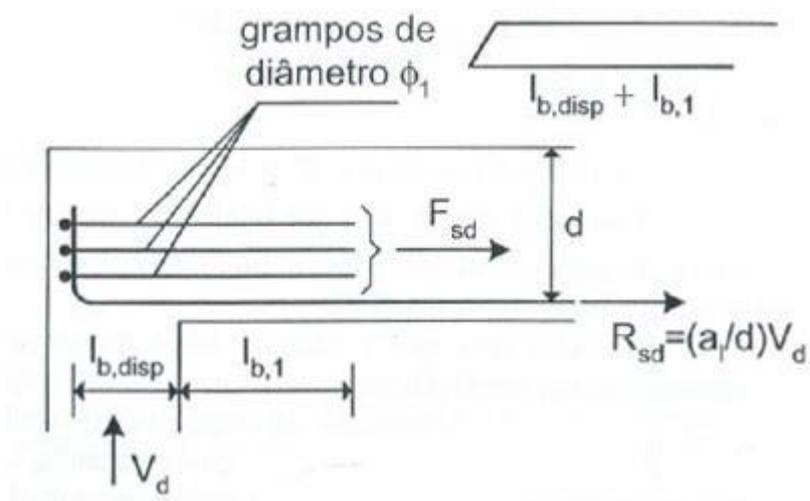
A NBR 6118 também define que (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 148):

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.

4.3 ANCORAGEM COM GRAMPOS

Eventualmente, devido às características geométricas de uma região de apoio, o comprimento de ancoragem necessário, que foi calculado, pode ser maior que o disponível, não permitindo que a ancoragem adequada seja feita. Uma solução é o emprego de grampos adicionais que são barras com áreas de aço calculadas que envolvem a armadura longitudinal (ARAÚJO, 2010, p. 240). A figura 14 mostra a ancoragem com grampos.

Figura 14 – Grampos de ancoragem em apoios de extremidade de pequena largura



(fonte: adaptado de ARAÚJO, 2010, p. 240)

Araújo (2010, p. 240) explica que os grampos devem resistir à força de tração calculada a partir da fórmula 13 e que a área de aço e o comprimento de ancoragem dos grampos são calculados pelas fórmulas 14 e 15 respectivamente:

$$F_{Sd} = R_{Sd} \left(1 - \frac{l_{b,disp}}{l_{b,nec}} \right) \quad (\text{fórmula 13})$$

$$A_{s1} = \frac{F_{Sd}}{f_{yd}} \quad (\text{fórmula 14})$$

$$l_{b,1} = \frac{\phi f_{yd}}{4 f_{bd}} \quad (\text{fórmula 15})$$

Onde:

F_{sd} = força de tração de projeto nos grampos;

R_{sd} = força de tração de projeto na armadura;

$l_{b,disp}$ = comprimento de ancoragem disponível no apoio;

$l_{b,nec}$ = comprimento de ancoragem necessário;

A_{sI} = área de aço dos grampos;

f_{yd} = resistência de projeto ao escoamento do aço;

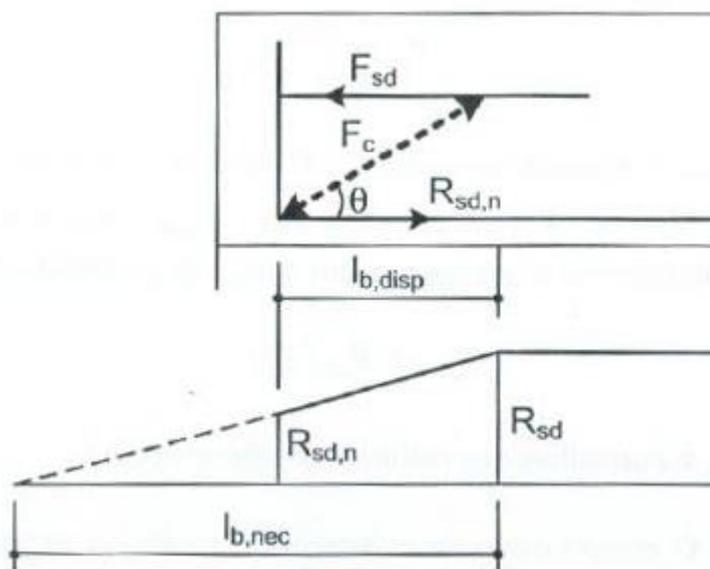
$l_{b,l}$ = comprimento de ancoragem dos grampos;

ϕ_I = diâmetro dos grampos;

f_{bd} = resistência de aderência de projeto.

O mesmo autor explica que a fórmula 13 é determinada a partir do modelo de biela e tirante mostrado na figura 15. A força que a armadura longitudinal tracionada não é capaz de resistir, $R_{sd,n}$, é resistida pelos grampos por meio da biela de compressão, que está sujeita à força F_c . Então, a fórmula 13 decorre da força de tração resistida pelos grampos F_{sd} (ARAÚJO, 2010, p. 240-241).

Figura 15 – Modelo de biela e tirante para ancoragem com grampos



(fonte: ARAÚJO, 2010, p. 241)

5 PROGRAMA COMPUTACIONAL

O propósito deste capítulo é introduzir o programa computacional para o cálculo de ancoragem, abordando desde o seu desenvolvimento até as instruções necessárias para sua utilização. No final são apresentados exemplos de vigas em que o *software* é utilizado para solucionar os problemas de ancoragem.

5.1 DESENVOLVIMENTO

Primeiramente foi definido um roteiro de cálculo que considerou todas as possibilidades de solução descritas no capítulo quatro para os problemas de ancoragem. A partir deste roteiro, do programa *Microsoft Visual Studio 2013* e utilizando a linguagem de programação *Visual Basic*, foi desenvolvida a interface gráfica e o algoritmo do programa computacional.

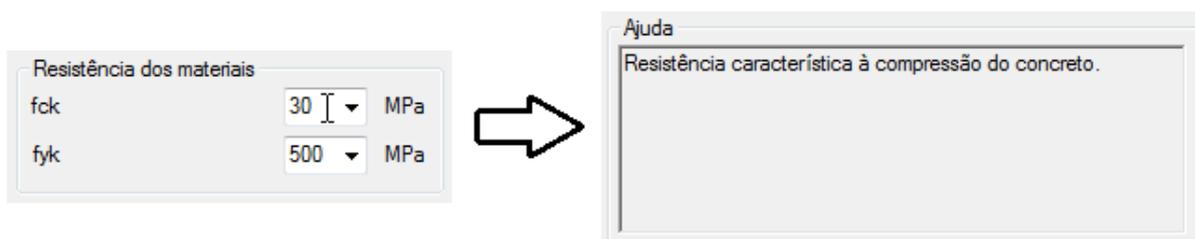
A interface gráfica do *software* foi criada com o objetivo de ser simples e prática de utilizar. Portanto, quanto menor for a quantidade de dados de entrada necessários a serem fornecidos pelo usuário, mais agradável se torna a experiência de manuseio da ferramenta computacional. Na figura 16 é ilustrada a interface gráfica do programa **Calculadora de Ancoragem**, na qual as caixas de texto e seleção em cor branca são referentes aos dados de entrada, enquanto que as caixas de texto em cor cinza fornecem os resultados calculados ou definidos automaticamente pelo *software*.

Também foi criado um sistema de ajuda em que o usuário ao clicar sobre a caixa de texto de qualquer termo, tem a possibilidade de obter uma explicação sobre ele na caixa de texto intitulada **Ajuda**. A figura 17 mostra a utilização do sistema de ajuda, no qual é possível perceber que o cursor do mouse tem sua forma alterada ao pousar sobre a caixa de seleção, indicando a possibilidade de se clicar na mesma.

Figura 16 – Interface do programa Calculadora de Ancoragem

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 17 – Sistema de ajuda



(fonte: elaborado pelo autor)

Com a interface gráfica praticamente finalizada partiu-se para a fase de desenvolvimento do algoritmo, que nada mais é que uma sequência de instruções que o programa computacional é capaz de executar, gerando então dados de saída a partir dos dados de entrada fornecidos pelo usuário.

Nesta etapa todo o formulário abordado no trabalho e também as condições e restrições de cálculo (capítulos três e quatro), foram transcritos para a linguagem de programação *Visual Basic* a fim de o *software* ser capaz de processar e executar, de uma forma automatizada, a sequência de instruções dos cálculos de ancoragem. Na figura 18 é possível visualizar algumas linhas de programação referentes à determinação da resistência média à tração do concreto $f_{ct,m}$, que depende da resistência característica à compressão do concreto f_{ck} .

Figura 18 – Linhas de programação

```

If ComboBox_fck.Text = "" Then
    MessageBox.Show("Escolher um valor para o " + Label_fck.Text + "!", "Erro", MessageBoxButtons.OK)
    ComboBox_fck.Focus()
    Exit Sub
End If

If fck <= 50 Then
    fct_m = (0.3 * (fck ^ (2 / 3))) / 10
ElseIf fck >= 55 Then
    fct_m = (2.12 * Math.Log(1 + (0.11 * fck))) / 10
End If

```

(fonte: elaborado pelo autor)

5.2 VALIDAÇÃO DO SOFTWARE

A autenticação do *software* foi feita a partir da comparação dos resultados obtidos pelo programa computacional com os resultados de exemplos resolvidos manualmente, a fim de verificar a coerência entre os dados de entrada com os dados de saída em ambos os casos. As condições e os resultados de cálculo puderam ser controlados pela alteração das variáveis desses exemplos, com o objetivo de criar e de obter diferentes cenários e soluções que fossem capazes de testar o adequado funcionamento do programa para o maior número de situações possíveis. Para se confirmar este correto funcionamento, os dados de saída emitidos pelo *software* deveriam ser iguais aos das soluções dos exemplos criados, o que de fato foi comprovado.

Em relação à validação do algoritmo os seguintes procedimentos foram adotados:

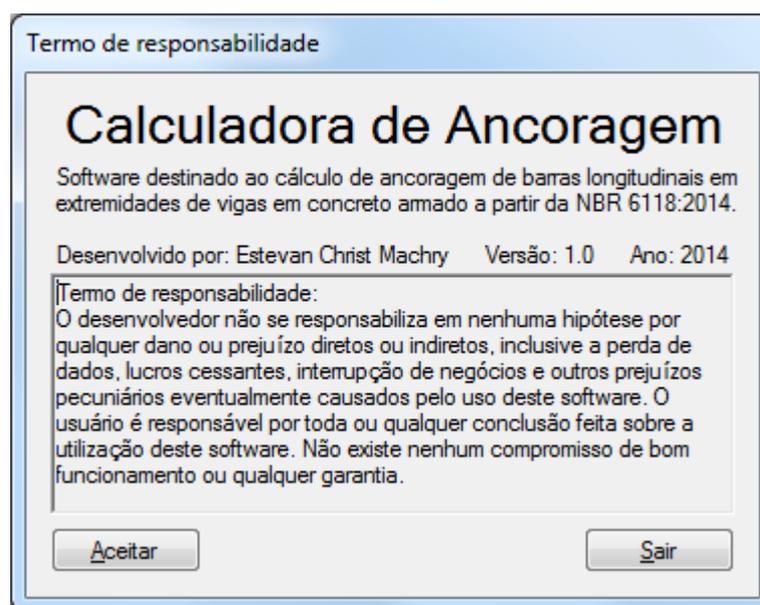
- a) **validação do formulário:** todas as fórmulas programadas em *Visual Basic* foram revisadas e testadas com o propósito de se confirmarem corretas;

- b) **validação das condições e restrições de cálculo:** o programa computacional segue um roteiro de cálculo e toma decisões lógicas que dependem dos dados de entrada fornecidos pelo usuário. Portanto, nesta etapa foram testadas todas as sequências de instruções relacionadas aos cálculos que o algoritmo é capaz executar, evitando assim a possibilidade de ocorrerem erros durante a utilização do *software*;
- c) **validação das linhas de programação:** durante a criação do algoritmo podem ocorrer erros de digitação ou erros na lógica de programação relacionados à funcionalidade da interface do programa. Estes erros podem impossibilitar o usuário de digitar algum dado ou proporcionar a perda de ação de algum botão e por isso têm a possibilidade de ocasionar o mau funcionamento da ferramenta computacional. Por este motivo também foi feita a revisão destas linhas de programação.

5.3 INSTRUÇÕES DE USO

O objetivo deste capítulo é apresentar as instruções de utilização e o funcionamento da ferramenta computacional denominada **Calculadora de Ancoragem**. Ao executar o programa a primeira tela apresentada é referente ao termo de responsabilidade, com as opções <Aceitar> ou <Sair> conforme ilustrado na figura 19. Após aceitar o termo de responsabilidade o usuário é levado à tela principal do *software* já apresentada na figura 16.

Figura 19 – Tela inicial



(fonte: elaborado pelo autor)

5.3.1 Dados de entrada

Conforme a figura 20 os dados de entrada estão identificados pelo retângulo em vermelho e separados em grupos que estão nomeados da seguinte maneira:

- seção;
- resistência dos materiais;
- armadura longitudinal;
- região de apoio;
- coeficientes de segurança.

Os dados de entrada identificados pelo retângulo em verde são considerados secundários pelo motivo de não ser necessário fornecer-los para que os cálculos sejam executados.

Figura 20 – Dados de entrada

(fonte: elaborado pelo autor)

Caso algum valor de entrada seja inserido de forma incorreta ou não seja fornecido, o programa computacional emite um aviso de erro exigindo que o usuário preencha o dado corretamente, para só assim executar os cálculos de ancoragem. Na figura 21 é exibido este aviso quando a base da seção transversal da viga não é informada.

Figura 21 – Aviso de erro

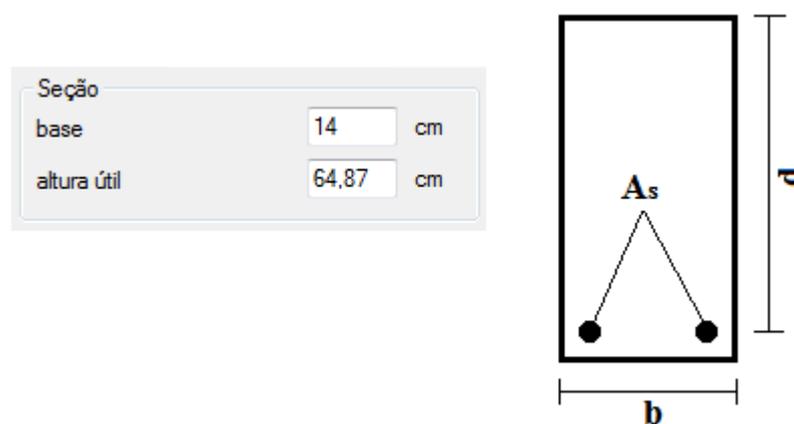


(fonte: elaborado pelo autor)

5.3.1.1 Seção

Os primeiros dados a serem fornecidos são a **base**, b , e a **altura útil**, d , da seção transversal da viga e devem estar em centímetros. A figura 22 ilustra as caixas de texto destes dados de entrada no *software* e a identificação deles em um croqui, sendo a altura útil definida como a distância entre o centro de gravidade da armadura tracionada, A_s , até a fibra mais comprimida do concreto.

Figura 22 – Dados da seção



(fonte: elaborado pelo autor)

5.3.1.2 Resistência dos materiais

Na figura 23 são mostradas as caixas de seleção referentes à **resistência característica à compressão do concreto**, f_{ck} , e à **resistência característica ao escoamento do aço**, f_{yk} , que já possuem valores predeterminados bastando ao usuário selecioná-los. O valor do f_{ck} pode ser escolhido entre as classes de concreto C20 até C90 enquanto que o f_{yk} pode ter seu valor definido em 250, 500 ou 600 MPa.

Figura 23 – Dados da resistência dos materiais

(fonte: elaborado pelo autor)

5.3.1.3 Armadura longitudinal

O grupo de dados de entrada referente à armadura longitudinal é demonstrado na figura 24. O primeiro termo a ser fornecido é o **diâmetro da barra** ou fio que será ancorado. Os valores que aparecem na caixa de seleção do diâmetro da barra dependem da resistência característica ao escoamento do aço, f_{yk} , selecionada anteriormente.

A **armadura efetiva no apoio** é a área de aço da armadura que existe nesta região. Na figura 25 é ilustrada uma viga já dimensionada ao cisalhamento e à flexão e que serve de exemplo para explicar a definição deste dado. Nesta viga a ancoragem é verificada para as barras longitudinais inferiores que são as duas barras com diâmetro de 10 mm que chegam até a região de apoio A e, portanto, o valor da armadura efetiva é igual a 1,6 cm². Já a **armadura**

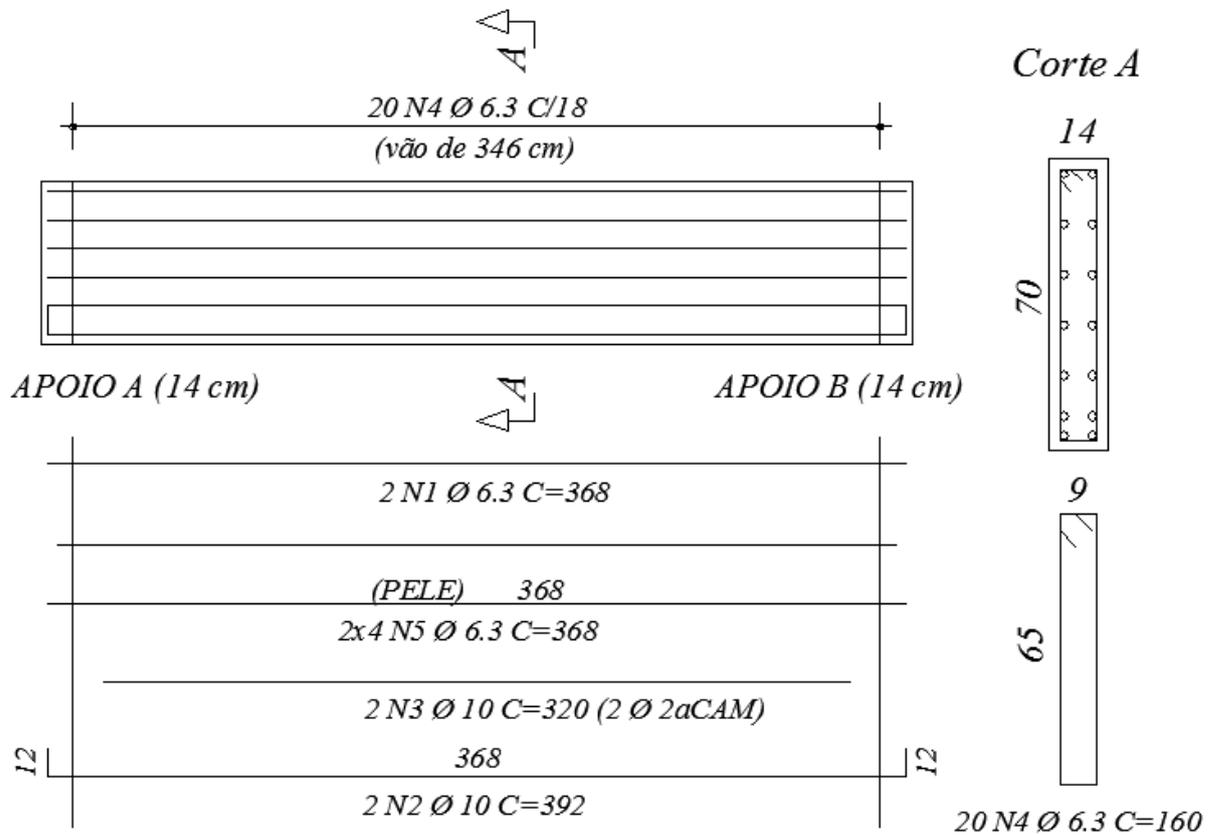
efetiva no vão é a área de aço da armadura que existe no vão desta viga, como neste caso existem quatro barras com diâmetro de 10 mm, o valor da armadura efetiva é de 3,2 cm².

Figura 24 – Dados da armadura longitudinal

Two screenshots of a software interface for longitudinal reinforcement data. The left screenshot shows a dropdown menu for 'diâmetro da barra' with '10,0' selected. The right screenshot shows the same interface with numerical input fields for 'armadura efetiva no apoio' (1,6 cm²), 'armadura efetiva no vão' (3,2 cm²), and 'cobrimento' (2,5 cm).

(fonte: elaborado pelo autor)

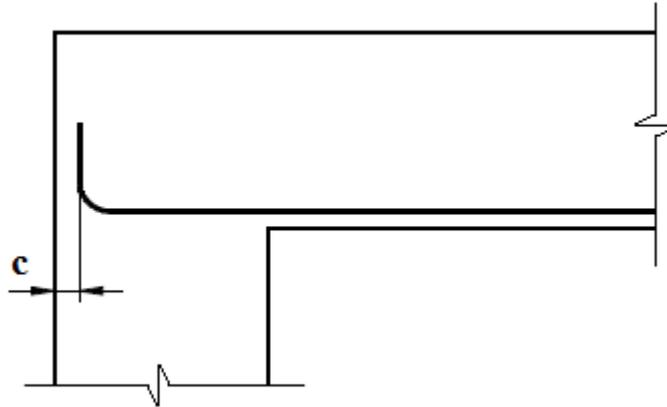
Figura 25 – Viga exemplo



(fonte: elaborado pelo autor)

O **cobrimento**, c , da armadura longitudinal é ilustrado na figura 26, devendo ser fornecido em centímetros e de acordo com as exigências da NBR 6118:2014 conforme tratado anteriormente no capítulo 3.5.

Figura 26 – Cobrimento



(fonte: elaborado pelo autor)

A caixa de seleção referente à **posição da barra** permite que o usuário escolha entre duas opções conforme mostra a figura 27. Estas posições de boa e má aderência são abordadas no capítulo 3.6.3 deste trabalho.

Figura 27 – Posição da barra

Armadura longitudinal	
diâmetro da barra	10,0 mm
armadura efetiva no apoio	1,6 cm ²
armadura efetiva no vão	3,2 cm ²
cobrimento	2,5 cm
posição da barra	boa
gancho	boa
	má
barra transversal soldada	<input checked="" type="checkbox"/>

(fonte: elaborado pelo autor)

Os últimos dados a serem fornecidos em relação à armadura longitudinal são sobre a utilização ou não de **gancho** e/ou **barra transversal soldada**. O usuário deve selecionar as caixas de marcação para que estes métodos sejam considerados no cálculo de ancoragem, caso contrário, não marcando nenhuma das caixas, o cálculo é feito considerando-se apenas ancoragem reta. Na figura 24, é possível visualizar as caixas de marcação.

5.3.1.4 Região de apoio

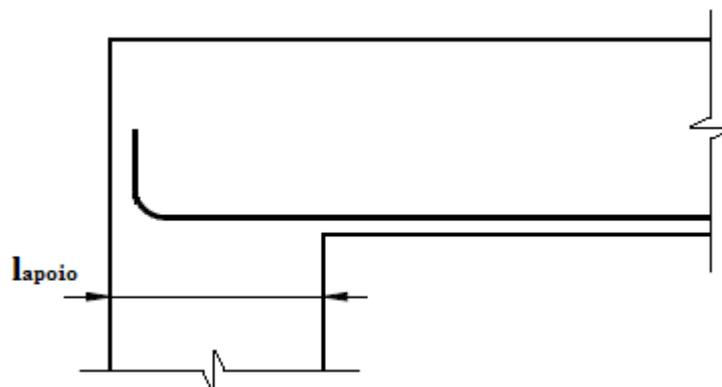
Os dados de entrada referentes à região de apoio são mostrados na figura 28 e devem ser retirados dos diagramas de esforço cortante e momento fletor da viga analisada, excetuando-se o dado de **comprimento do apoio**, que deve ser fornecido em centímetros e conforme indicado na figura 29.

Figura 28 – Dados da região de apoio

Região de apoio		
comprimento do apoio	14	cm
cortante no apoio	66,6	kN
cortante máximo no vão	66,6	kN
momento no apoio	0	kNm
momento no vão	59,9	kNm

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 29 – Comprimento do apoio

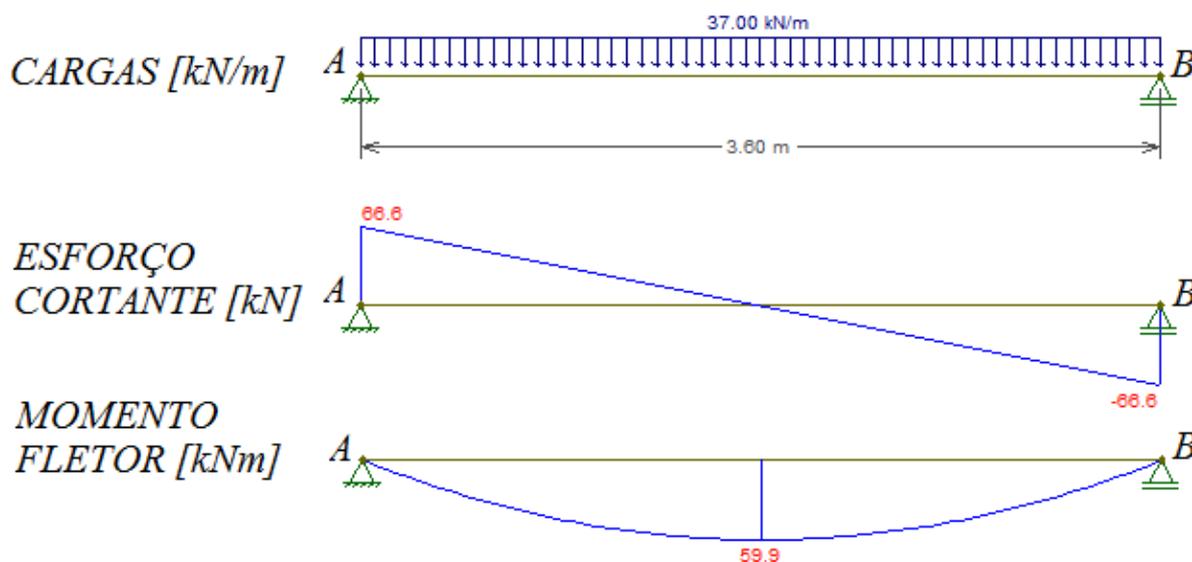


(fonte: elaborado pelo autor)

As variáveis denominadas **cortante no apoio** e **cortante máximo no vão** são obtidas a partir da análise do diagrama de esforço cortante da viga exemplo, ilustrado na figura 30. Considerando que a ancoragem deve ser verificada no apoio A, o valor do **cortante no apoio** fica definido em 66,6 kN enquanto que o **cortante máximo no vão**, ou seja, o maior valor de esforço cortante que existe no vão adjacente ao apoio analisado, fica definido também em 66,6 kN. Os sinais dos esforços cortantes não são considerados na hora de se inserir seus valores no *software*, devendo ser inseridos apenas seus módulos.

Os valores do **momento no apoio** e do **momento no vão** são definidos a partir da interpretação do diagrama de momento fletor da viga exemplo também ilustrado na figura 30. Levando em conta a verificação da ancoragem no apoio A, o valor do **momento no apoio** fica definido em zero, enquanto que o **momento no vão** fica em 59,9 kNm. É importante ressaltar que os sinais dos momentos fletores devem ser considerados na hora de se inserir seus valores no programa computacional.

Figura 30 – Diagramas de solicitações da viga exemplo



(fonte: adaptado de MARTHA, 2012)

5.3.1.5 Coeficientes de segurança

Os coeficientes de segurança do esforço **cortante** e **momento fletor**, assim como do **concreto** e do **aço** já vêm predefinidos quando o programa é iniciado, mas existe a possibilidade do

usuário alterar estes valores caso julgue necessário. Na figura 31, é possível visualizar as caixas de texto que recebem os valores dos coeficientes de segurança utilizados nos cálculos de ancoragem.

Figura 31 – Dados dos coeficientes de segurança

Coeficientes de ponderação	
cortante e momento	1,4
concreto	1,4
aço	1,15

(fonte: elaborado pelo autor)

5.3.1.6 Dados secundários

Os dados secundários são assim chamados pelo fato de não ser necessário fornece-los para que os cálculos de ancoragem sejam executados pelo *software*. O primeiro dado secundário é mostrado na figura 32 e diz respeito ao **cobrimento maior que 70 mm ao plano do gancho**. A marcação desta opção permite que seja feita uma redução no comprimento de ancoragem mínimo, atendidas as exigências abordadas ao final do capítulo 4.2 deste trabalho.

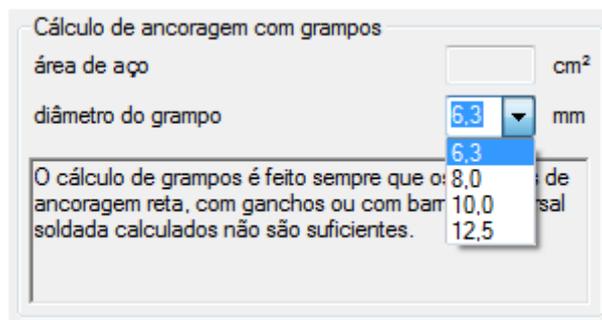
Figura 32 – Cobrimento maior que 70 mm ao plano do gancho

Cálculo de ancoragem	
comprimento de ancoragem disponível	<input type="text"/> cm
comprimento de ancoragem necessário	<input type="text"/> cm
comprimento de ancoragem mínimo	<input type="text"/> cm
<input checked="" type="checkbox"/> cobrimento maior que 70 mm ao plano do gancho	

(fonte: elaborado pelo autor)

O último dado secundário é o **diâmetro do grampo** conforme ilustrado na figura 33. Este valor só deve ser definido caso o programa computacional informe ao usuário que a ancoragem calculada não foi suficiente e então se faz necessário utilizar grampos na ancoragem. Os valores de **diâmetro dos grampos** disponíveis para seleção dependem da resistência característica ao escoamento do aço selecionada anteriormente.

Figura 33 – Diâmetro do grampo



(fonte: elaborado pelo autor)

5.3.2 Interpretação dos resultados

Após o preenchimento dos dados de entrada o usuário deve clicar no botão <Calcular ancoragem> para obter os resultados da solução do problema. Na figura 34, os resultados estão identificados pelo retângulo em vermelho e separados em grupos que estão intitulados conforme as alíneas a seguir:

- a) cálculo de ancoragem;
- b) cálculo de ancoragem com barra transversal soldada;
- c) cálculo de ancoragem com grampos.

Os dados de saída identificados pelo retângulo em verde são referentes aos resultados de cálculos intermediários, ou seja, são resultados que foram obtidos ao longo do processo de execução dos cálculos de ancoragem e são disponibilizados para consulta do usuário apenas para um melhor entendimento de como o problema foi resolvido.

5.3.2.1 Cálculo de ancoragem

Neste primeiro grupo de dados de saída são fornecidos os seguintes resultados de cálculo:

- a) comprimento de ancoragem disponível;
- b) comprimento de ancoragem necessário;
- c) comprimento de ancoragem mínimo.

Levando em consideração as recomendações da NBR 6118:2014, os resultados dos cálculos de ancoragem são comparados entre si e então é gerado um breve relatório na caixa de texto, indicada na figura 35, com as devidas conclusões sobre os resultados destes cálculos, indicando ou não a sua validade. Se o usuário utilizar ancoragem com barra transversal soldada e/ou grampos, os grupos de dados de saída referentes a estes métodos mostram resultados de dimensionamento, mas a conclusão final é sempre apresentada na caixa de texto da figura 35.

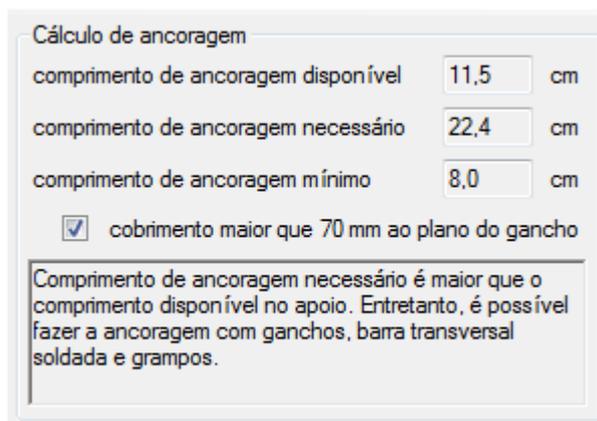
Figura 34 – Dados de saída

The image shows a software interface for calculating reinforcement anchorage. It is divided into several sections:

- Seção:** base (cm), altura útil (cm).
- Resistência dos materiais:** fck (MPa), fyk (MPa).
- Amadura longitudinal:** diâmetro da barra (mm), armadura efetiva no apoio (cm²), armadura efetiva no vão (cm²), cobrimento (cm), posição da barra (dropdown), gancho (checkbox), barra transversal soldada (checkbox).
- Região de apoio:** comprimento do apoio (cm), cortante no apoio (kN), cortante máximo no vão (kN), momento no apoio (kNm), momento no vão (kNm).
- Coefficientes de ponderação:** cortante e momento (1,4), concreto (1,4), aço (1,15).
- Cálculo de ancoragem (highlighted in red):**
 - comprimento de ancoragem disponível (cm)
 - comprimento de ancoragem necessário (cm)
 - comprimento de ancoragem mínimo (cm)
 - cobrimento maior que 70 mm ao plano do gancho
- Cálculo de ancoragem com barra transversal soldada:**
 - diâmetro mínimo da barra (mm)
 - distância mínima do ponto de solda (cm)
 - resistência ao cisalhamento da solda (kN)
- Cálculo de ancoragem com grampos:**
 - área de aço (cm²)
 - diâmetro do grampo (mm)
 - Nota: O cálculo de grampos é feito sempre que os métodos de ancoragem reta, com ganchos e com barra transversal soldada calculados não são suficientes.
- Cálculos intermediários (highlighted in green):**
 - Mostrar resultados
 - fyd (kN/cm²), fct,m (kN/cm²), fctk,inf (kN/cm²), fctd (kN/cm²), n1, n2, n3
 - fbd (kN/cm²), Vc0 (kN), al (cm), Rsd (kN), As,calc (cm²), alfa, raio (cm), Fsd (kN)

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 35 – Cálculo de ancoragem



Cálculo de ancoragem

comprimento de ancoragem disponível 11,5 cm

comprimento de ancoragem necessário 22,4 cm

comprimento de ancoragem mínimo 8,0 cm

cobertura maior que 70 mm ao plano do gancho

Comprimento de ancoragem necessário é maior que o comprimento disponível no apoio. Entretanto, é possível fazer a ancoragem com ganchos, barra transversal soldada e grampos.

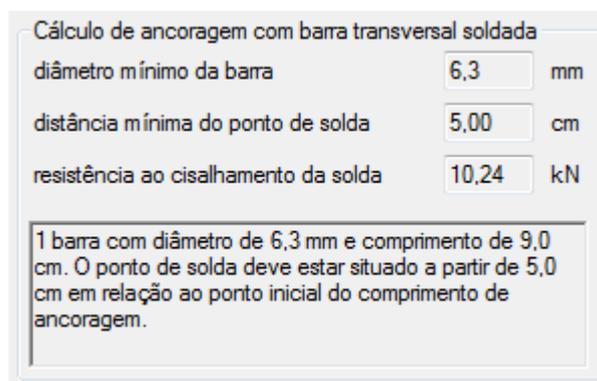
(fonte: elaborado pelo autor)

5.3.2.2 Cálculo de ancoragem com barra transversal soldada

Caso o usuário defina, na etapa de entrada de dados, que a ancoragem deve ser feita com barra transversal soldada, os resultados deste método de ancoragem ficam disponíveis no grupo intitulado **cálculo de ancoragem com barra transversal soldada**, mostrado na figura 36. Na caixa de texto, são fornecidos dados de dimensionamento da barra transversal soldada a partir dos seguintes resultados calculados:

- diâmetro mínimo da barra;
- distância mínima do ponto de solda;
- resistência ao cisalhamento da solda.

Figura 36 – Cálculo de ancoragem com barra transversal soldada



Cálculo de ancoragem com barra transversal soldada

diâmetro mínimo da barra 6,3 mm

distância mínima do ponto de solda 5,00 cm

resistência ao cisalhamento da solda 10,24 kN

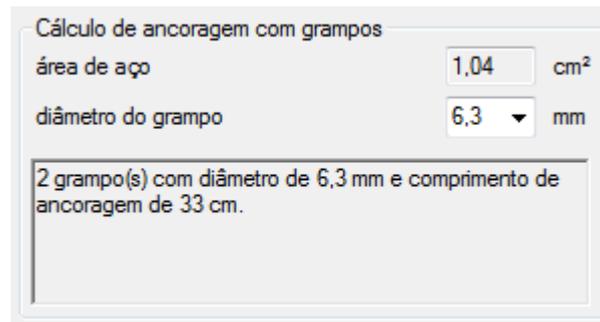
1 barra com diâmetro de 6,3 mm e comprimento de 9,0 cm. O ponto de solda deve estar situado a partir de 5,0 cm em relação ao ponto inicial do comprimento de ancoragem.

(fonte: elaborado pelo autor)

5.3.2.3 Cálculo de ancoragem com grampos

Os grampos são calculados sempre que outros métodos de ancoragem não são suficientes para que os resultados sejam validados. Neste grupo é calculada a **área de aço** para os grampos e na caixa de texto são definidos dados de dimensionamento dos mesmos conforme a figura 37.

Figura 37 – Cálculo de ancoragem com grampos



Cálculo de ancoragem com grampos

área de aço cm²

diâmetro do grampo mm

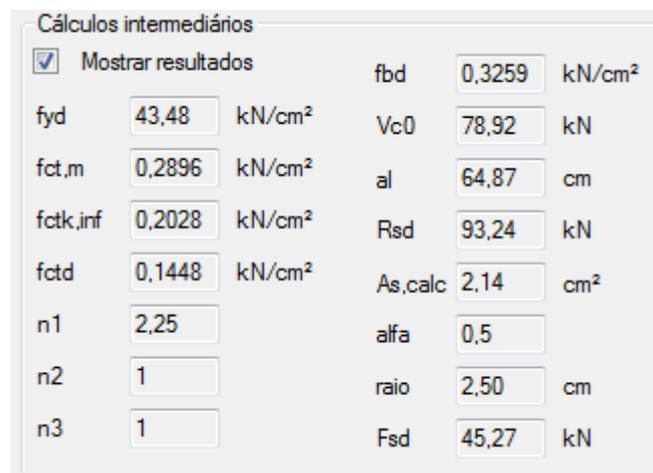
2 grampo(s) com diâmetro de 6,3 mm e comprimento de ancoragem de 33 cm.

(fonte: elaborado pelo autor)

5.3.2.4 Cálculos intermediários

Na figura 38 é demonstrado que ao clicar na caixa de marcação <Mostrar resultados>, o usuário tem acesso a todos os dados de saída que foram calculados pelo programa computacional e utilizados para se chegar aos resultados finais. Esta opção tem como objetivo permitir que o usuário tenha uma melhor compreensão da solução do problema.

Figura 38 – Cálculos intermediários



Cálculos intermediários

Mostrar resultados

fyd	<input type="text" value="43,48"/>	kN/cm ²	fbd	<input type="text" value="0,3259"/>	kN/cm ²
fct,m	<input type="text" value="0,2896"/>	kN/cm ²	Vc0	<input type="text" value="78,92"/>	kN
fctk,inf	<input type="text" value="0,2028"/>	kN/cm ²	al	<input type="text" value="64,87"/>	cm
fctd	<input type="text" value="0,1448"/>	kN/cm ²	Rsd	<input type="text" value="93,24"/>	kN
n1	<input type="text" value="2,25"/>		As,calc	<input type="text" value="2,14"/>	cm ²
n2	<input type="text" value="1"/>		alfa	<input type="text" value="0,5"/>	
n3	<input type="text" value="1"/>		raio	<input type="text" value="2,50"/>	cm
			Fsd	<input type="text" value="45,27"/>	kN

(fonte: elaborado pelo autor)

5.3.3 Exemplos

Neste capítulo são apresentados dois exemplos em que é verificada a ancoragem das armaduras longitudinais nas duas extremidades de vigas com apenas um vão. Nos dois exemplos os resultados fornecidos pelo *software* se mostraram idênticos aos resultados do cálculo manual, confirmando assim o bom funcionamento da ferramenta computacional.

5.3.3.1 Exemplo 1

Na figura 39 é ilustrada uma viga já dimensionada ao cisalhamento e à flexão a partir dos seus diagramas de esforço cortante e momento fletor mostrados na figura 40. A ancoragem é verificada para as barras longitudinais inferiores para os apoios A e B devido à existência de momentos positivos que tracionam estas barras.

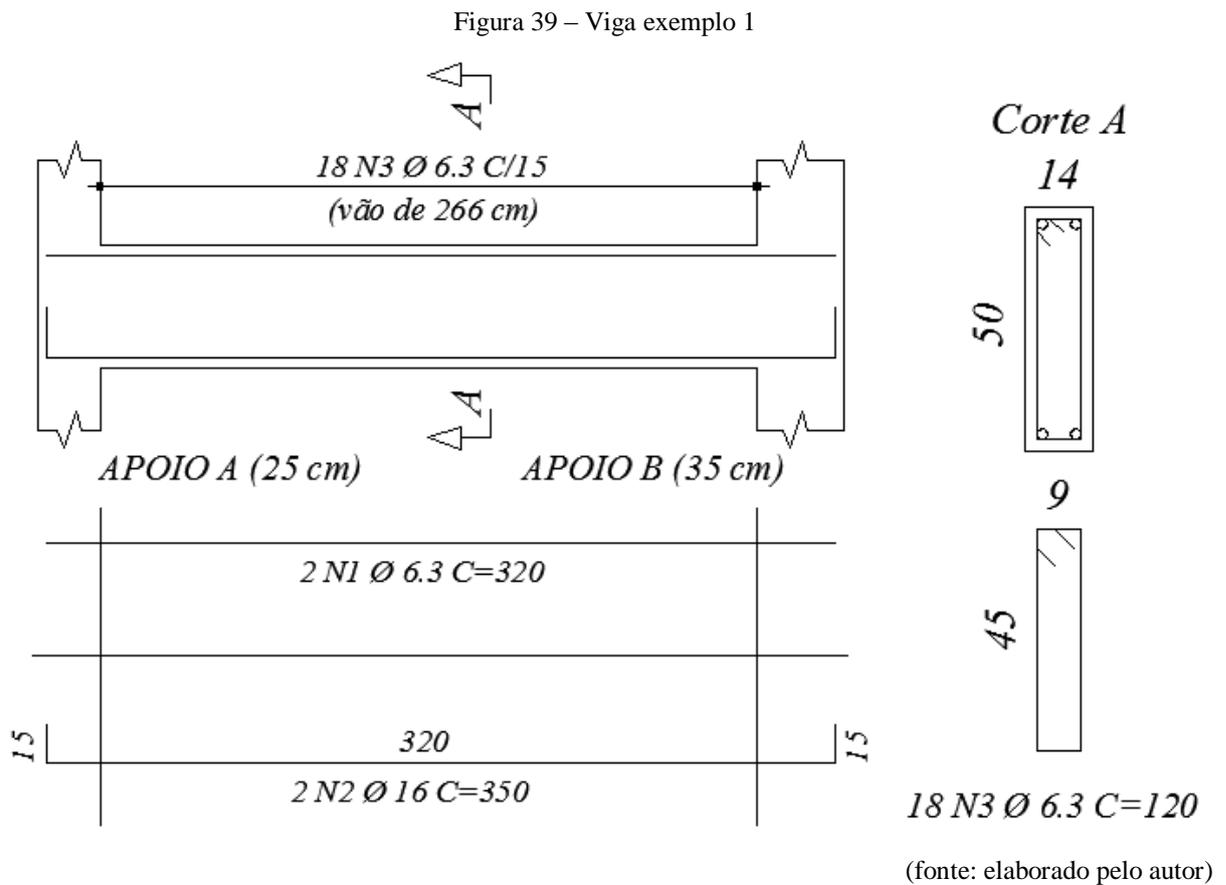
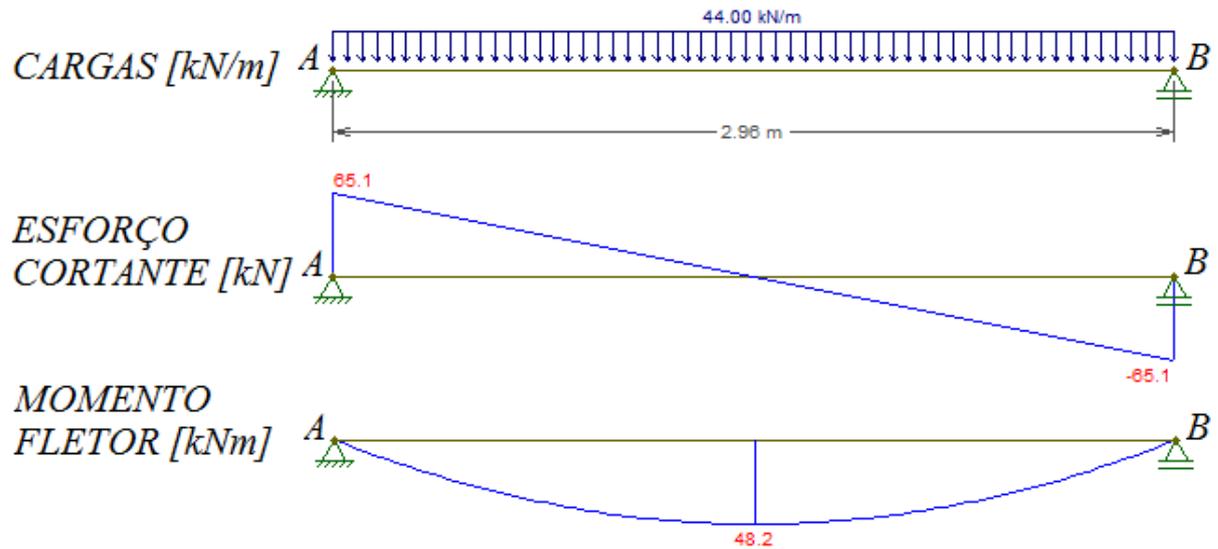


Figura 40 – Diagramas de solicitações da viga exemplo 1



(fonte: adaptado de MARTHA, 2012)

Primeiramente são demonstrados na figura 41 os dados de entrada e os resultados dos cálculos de ancoragem para as barras longitudinais do apoio A. O comprimento de ancoragem necessário calculado é igual a 19,6 cm, ou seja, menor que o comprimento de ancoragem disponível de 22,5 cm e maior ou igual ao comprimento de ancoragem mínimo de 19,6 cm, o que valida e permite que a ancoragem seja feita com ganchos.

A figura 42 ilustra os dados de entrada e os resultados dos cálculos de ancoragem para o apoio B, quando nesta verificação o dado de entrada referente ao comprimento do apoio é alterado para 35 cm, enquanto que os demais dados permanecem iguais. O comprimento de ancoragem necessário calculado é igual a 19,6 cm, ou seja, muito menor que o comprimento de ancoragem disponível de 32,5 cm e maior ou igual ao comprimento de ancoragem mínimo de 19,6 cm, validando assim a verificação da ancoragem destas barras longitudinais no apoio B. É importante ressaltar que esta verificação pode ser calculada considerando apenas a ancoragem reta, pois o valor encontrado para o comprimento de ancoragem necessário sem o uso de ganchos, seria de 28 cm, ou seja, menor que os 32,5 cm disponíveis no apoio B. Porém, com o objetivo de se evitar equívocos na hora de executar a montagem e colocação desta viga em relação aos seus apoios, foi também calculada a ancoragem com ganchos para o apoio B.

Figura 41 – Cálculos de ancoragem para o apoio A da viga exemplo 1

Calculadora de Ancoragem

Arquivo Sobre

Seção
base 14 cm
altura útil 46,24 cm

Resistência dos materiais
fck 30 MPa
fyk 500 MPa

Armadura longitudinal
diâmetro da barra 16,0 mm
armadura efetiva no apoio 4 cm²
armadura efetiva no vão 4 cm²
cobrimento 2,5 cm
posição da barra boa
gancho
barra transversal soldada

Região de apoio
comprimento do apoio 25 cm
cortante no apoio 65,1 kN
cortante máximo no vão 65,1 kN
momento no apoio 0 kNm
momento no vão 48,2 kNm

Coefficientes de ponderação
cortante e momento 1,4
concreto 1,4
aço 1,15

Cálculo de ancoragem
comprimento de ancoragem disponível 22,5 cm
comprimento de ancoragem necessário 19,6 cm
comprimento de ancoragem mínimo 19,6 cm
 cobrimento maior que 70 mm ao plano do gancho
Ancoragem com gancho OK!

Cálculo de ancoragem com barra transversal soldada
diâmetro mínimo da barra mm
distância mínima do ponto de solda cm
resistência ao cisalhamento da solda kN

Cálculo de ancoragem com grampos
área de aço cm²
diâmetro do grampo mm
Não é necessário calcular grampos!

Ajuda
Comprimento de ancoragem necessário.

Cálculos intermediários
 Mostrar resultados
fyd 43,48 kN/cm²
fct,m 0,2896 kN/cm²
fctk,inf 0,2028 kN/cm²
fctd 0,1448 kN/cm²
n1 2,25
n2 1
n3 1
fbd 0,3259 kN/cm²
Vc0 56,25 kN
al 46,24 cm
Rsd 91,14 kN
As,calc 2,10 cm²
alfa 0,7
raio 4,00 cm
Fsd kN

Calcular ancoragem Limpar dados

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 42 – Cálculos de ancoragem para o apoio B da viga exemplo 1

Calculadora de Ancoragem

Arquivo Sobre

Seção
base 14 cm
altura útil 46,24 cm

Resistência dos materiais
fck 30 MPa
fyk 500 MPa

Armadura longitudinal
diâmetro da barra 16,0 mm
armadura efetiva no apoio 4 cm²
armadura efetiva no vão 4 cm²
cobrimento 2,5 cm
posição da barra boa
gancho
barra transversal soldada

Região de apoio
comprimento do apoio 35 cm
cortante no apoio 65,1 kN
cortante máximo no vão 65,1 kN
momento no apoio 0 kNm
momento no vão 48,2 kNm

Coefficientes de ponderação
cortante e momento 1,4
concreto 1,4
aço 1,15

Cálculo de ancoragem
comprimento de ancoragem disponível 32,5 cm
comprimento de ancoragem necessário 19,6 cm
comprimento de ancoragem mínimo 19,6 cm
 cobrimento maior que 70 mm ao plano do gancho
Ancoragem com gancho OK!

Cálculo de ancoragem com barra transversal soldada
diâmetro mínimo da barra mm
distância mínima do ponto de solda cm
resistência ao cisalhamento da solda kN

Cálculo de ancoragem com grampas
área de aço cm²
diâmetro do grampo mm
Não é necessário calcular grampas!

Ajuda
Comprimento de ancoragem necessário.

Cálculos intermediários
 Mostrar resultados

fyd	43,48	kN/cm ²	fbd	0,3259	kN/cm ²
fct,m	0,2896	kN/cm ²	Vc0	56,25	kN
fctk,inf	0,2028	kN/cm ²	al	46,24	cm
fctd	0,1448	kN/cm ²	Rsd	91,14	kN
n1	2,25		As,calc	2,10	cm ²
n2	1		alfa	0,7	
n3	1		raio	4,00	cm
			Fsd		kN

Calcular ancoragem Limpar dados

(fonte: elaborado pelo autor)

5.3.3.2 Exemplo 2

Neste exemplo é proposta uma viga, conforme a figura 43, com apoios de diferentes comprimentos e armaduras longitudinais e transversais já definidas a partir dos diagramas de esforço cortante e momento fletor apresentados na figura 44. A ancoragem é verificada somente para as barras longitudinais inferiores, nos dois apoios A e B, devido à existência de apenas momentos positivos.

Figura 43 – Viga exemplo 2

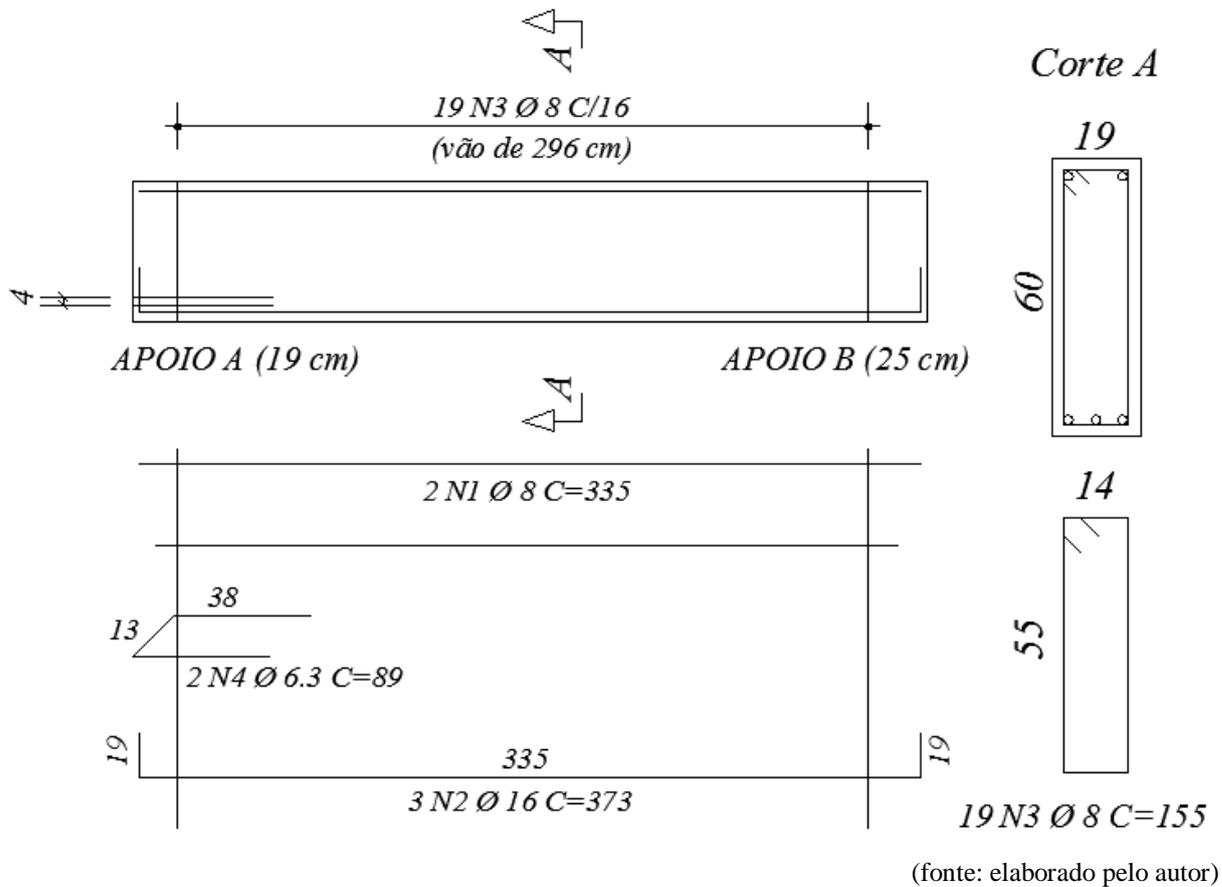
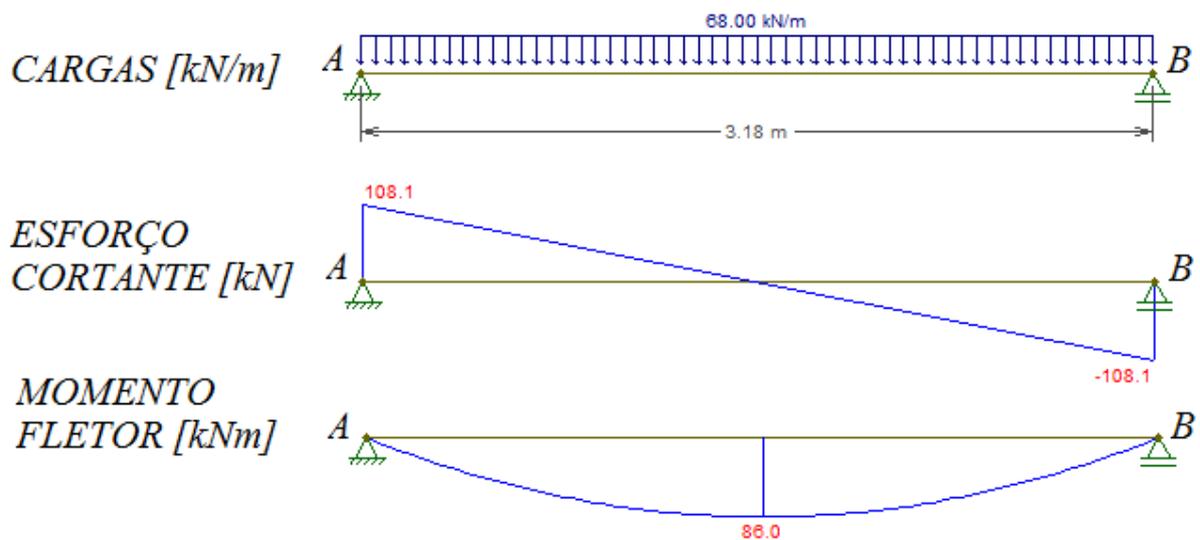


Figura 44 – Diagramas de solicitações da viga exemplo 2



Na figura 45, são exibidos os dados de entrada e os resultados dos cálculos de ancoragem para as barras inferiores que chegam ao apoio A que possui 19 cm de comprimento. Neste caso o comprimento de ancoragem necessário é calculado em 21,7 cm, enquanto que o comprimento de ancoragem disponível é menor e tem o valor de 16,5 cm, exigindo, portanto, o uso de grampos para que a ancoragem possa ser feita.

Para a verificação da ancoragem no apoio B deve-se alterar o dado de entrada referente ao comprimento do apoio de 19 cm para 25 cm. Neste caso a ancoragem com ganchos é válida sem a necessidade de se empregar grampos conforme mostrado na figura 46, em que o comprimento de ancoragem necessário é igual a 21,7 cm enquanto que o comprimento de ancoragem disponível é de 22,5 cm.

Figura 45 – Cálculos de ancoragem para o apoio A da viga exemplo 2

The screenshot shows the 'Calculadora de Ancoragem' software interface. The window title is 'Calculadora de Ancoragem'. The interface is divided into several sections:

- Seção:** base (19 cm), altura útil (55,9 cm).
- Resistência dos materiais:** fck (30 MPa), fyk (500 MPa).
- Armadura longitudinal:** diâmetro da barra (16,0 mm), armadura efetiva no apoio (6 cm²), armadura efetiva no vão (6 cm²), cobrimento (2,5 cm), posição da barra (boa), gancho (checked), barra transversal soldada (unchecked).
- Região de apoio:** comprimento do apoio (19 cm), cortante no apoio (108,1 kN), cortante máximo no vão (108,1 kN), momento no apoio (0 kNm), momento no vão (86 kNm).
- Coefficientes de ponderação:** cortante e momento (1,4), concreto (1,4), aço (1,15).
- Cálculo de ancoragem:** comprimento de ancoragem disponível (16,5 cm), comprimento de ancoragem necessário (21,7 cm), comprimento de ancoragem mínimo (21,7 cm). There is a checkbox for 'cobrimento maior que 70 mm ao plano do gancho' which is unchecked. A message box states: 'Comprimento de ancoragem necessário é maior que o comprimento disponível no apoio. Entretanto, é possível fazer a ancoragem com ganchos e grampos.'
- Cálculo de ancoragem com barra transversal soldada:** diâmetro mínimo da barra (empty), distância mínima do ponto de solda (empty), resistência ao cisalhamento da solda (empty).
- Cálculo de ancoragem com grampos:** área de aço (0,83 cm²), diâmetro do grampo (6,3 mm). A message box states: '2 grampo(s) com diâmetro de 6,3 mm e comprimento de ancoragem de 38 cm.'
- Ajuda:** Comprimento de ancoragem necessário.
- Cálculos intermediários:** fyd (43,48 kN/cm²), fct,m (0,2896 kN/cm²), fctk,inf (0,2028 kN/cm²), fctd (0,1448 kN/cm²), n1 (2,25), n2 (1), n3 (1), fbd (0,3259 kN/cm²), Vc0 (92,29 kN), al (55,90 cm), Rsd (151,34 kN), As,calc (3,48 cm²), alfa (0,7), raio (4,00 cm), Fsd (36,13 kN). There is a checkbox for 'Mostrar resultados' which is checked.

Buttons at the bottom include 'Calcular ancoragem' and 'Limpar dados'.

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 46 – Cálculos de ancoragem para o apoio B da viga exemplo 2

Calculadora de Ancoragem

Arquivo Sobre

Seção
 base 19 cm
 altura útil 55,9 cm

Resistência dos materiais
 fck 30 MPa
 fyk 500 MPa

Armadura longitudinal
 diâmetro da barra 16,0 mm
 armadura efetiva no apoio 6 cm²
 armadura efetiva no vão 6 cm²
 cobrimento 2,5 cm
 posição da barra boa
 gancho
 barra transversal soldada

Região de apoio
 comprimento do apoio 25 cm
 cortante no apoio 108,1 kN
 cortante máximo no vão 108,1 kN
 momento no apoio 0 kNm
 momento no vão 86 kNm

Coefficientes de ponderação
 cortante e momento 1,4
 concreto 1,4
 aço 1,15

Cálculo de ancoragem
 comprimento de ancoragem disponível 22,5 cm
 comprimento de ancoragem necessário 21,7 cm
 comprimento de ancoragem mínimo 21,7 cm
 cobrimento maior que 70 mm ao plano do gancho
 Ancoragem com gancho OK!

Cálculo de ancoragem com barra transversal soldada
 diâmetro mínimo da barra mm
 distância mínima do ponto de solda cm
 resistência ao cisalhamento da solda kN

Cálculo de ancoragem com grampos
 área de aço cm²
 diâmetro do grampo mm
 Não é necessário calcular grampos!

Ajuda
 Comprimento de ancoragem necessário.

Cálculos intermediários
 Mostrar resultados
 fbd 0,3259 kN/cm²
 fyd 43,48 kN/cm²
 fct,m 0,2896 kN/cm²
 fctk,inf 0,2028 kN/cm²
 fctd 0,1448 kN/cm²
 n1 2,25
 n2 1
 n3 1
 Vc0 92,29 kN
 al 55,90 cm
 Rsd 151,34 kN
 As,calc 3,48 cm²
 alfa 0,7
 raio 4,00 cm
 Fsd kN

Calcular ancoragem Limpar dados

(fonte: elaborado pelo autor)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo é feita uma avaliação geral sobre o trabalho de diplomação e uma análise final em relação ao programa computacional desenvolvido. Os objetivos principais do trabalho – a descrição dos métodos de ancoragem de barras longitudinais em extremidades de vigas em concreto armado e o desenvolvimento de um programa computacional que execute o dimensionamento destes métodos – foram atingidos.

A partir da NBR 6118:2014 e da literatura existente de concreto armado foram caracterizados os temas de aderência e ancoragem de armaduras, desenvolvendo-se então um trabalho que aborda de uma forma ampla e conjunta estes dois assuntos. Buscou-se incorporar questões e conteúdos presentes tanto na literatura quanto nas normas brasileiras a fim de se ter um material mais detalhado sobre o assunto.

O *software* desenvolvido permite ao usuário, a partir da inserção de alguns dados de entrada, obter resultados para os problemas de ancoragem de uma forma automatizada, rápida e livre de erros, que são mais frequentes nos cálculos manuais. A interface gráfica e o método de fornecimento de resultados foram criados com o objetivo de serem práticos e intuitivos de serem interpretados, permitindo assim, que o usuário verifique a ancoragem de vigas em menor tempo que da maneira usual. Em relação ao funcionamento, o programa computacional se mostrou capaz de resolver os exemplos de ancoragem propostos neste trabalho, uma vez que os resultados obtidos foram idênticos aos encontrados a partir dos cálculos feitos à mão.

De uma maneira geral, o programa atendeu os objetivos que foram propostos e tem totais condições de ser utilizado tanto em meio acadêmico quanto profissional, uma vez que o mesmo apresenta todas as condições necessárias para a solução dos problemas de ancoragem. É necessário ressaltar a importância de o usuário ter entendimento e clareza no processo de inserção dos dados de entrada, visto que esta fase é essencial para que os resultados fornecidos sejam coerentes. Apesar de o *software* possuir linhas de programação que notificam o usuário frente a um dado inserido erroneamente, ele não interpreta a validade destes dados, nesta questão, a leitura deste trabalho de diplomação é significativa para um entendimento completo sobre aderência, ancoragem e a utilização da ferramenta computacional.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, J. M. de. **Curso de concreto armado**. 3. ed. Rio Grande: Dunas, 2010. v. 1.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480**: aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – especificação. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

BRISOTTO, D. de S. **Um modelo elasto-plástico para a análise da aderência em peças de concreto armado**. 2011. 116 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

FUSCO, P. B. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. 1. ed. (7. tiragem). São Paulo: Pini, 1995 (tiragem 2007).

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. **Construções de concreto**: princípios básicos sobre a armação de estruturas de concreto armado. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1978. v. 3.

MARTHA, L. F. **FTOOL**: Um programa gráfico-interativo para ensino de comportamento de estruturas, versão 3.0. Rio de Janeiro: PUCRJ, 2012. *Software* do comportamento de estruturas. Disponível em: <<http://www.tecgraf.puc-rio.br/ftool/>>. Acesso em: 8 ago. 2014.