

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ARRANCAMENTO DE BARRAS DE AÇO EM
PEÇAS DE CONCRETO ARMADO**

SURIK NEYTHON DUQUE NICOLS

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ESTRUTURAS
E CONSTRUÇÃO CIVIL

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

BRASÍLIA / DF: JUNHO – 2017

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ARRANCAMENTO DE BARRAS DE
AÇO EM PEÇAS DE CONCRETO ARMADO**

SURIK NEYTHON DUQUE NICOLS

ORIENTADOR: MARCOS HONORATO DE OLIVEIRA
COORIENTADORA: PATRÍCIA CÂNDIDA SOUZA DA SILVA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

BRASÍLIA / DF: JUNHO-2017
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ARRANCAMENTO DE BARRAS DE AÇO
EM PEÇAS DE CONCRETO ARMADO**

SURIK NEYTHON DUQUE NICOLS

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

Prof. Marcos Honorato de Oliveira, *D.Sc* (UnB)
(Orientador)

Prof. Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo, *D.Sc* (UnB)
(Examinador interno)

Prof. Paulo Chaves, de Rezende Martins, *D.Sc* (UnB)
(Examinador interno)

BRASÍLIA/DF, 22 DE JUNHO DE 2017

FICHA CATALOGRÁFICA

NICOLS, SURIK NEYTHON DUQUE

Análise Experimental do Arrancamento de Barras de Aço em Peças de Concreto Armado [Distrito Federal] 2017.

xxv, xp., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2017)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Arrancamento

2. Concreto Armado

3. Ancoragem

4. Análise Experimental

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Bacharel)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

NICOLS, S.N.D. (2017). Análise Experimental do Arrancamento de Barras de Aço em Peças de Concreto Armado. Monografia de Projeto Final em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 76 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Surik Neython Duque Nicols.

TÍTULO: Análise Experimental do Arrancamento de Barras de Aço em Peças de Concreto Armado.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil ANO: 2017

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Surik Neython Duque Nicols
SHIS QL: 22, Conjunto: 2, Casa: 07, Lago Sul
CEP: 71.650-225 Brasília – DF – Brasil
e-mail: suriknicols@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus pelo dom da vida e por todos os momentos de lucidez quando mais precisei.

Em segundo quero agradecer aos meus pais, Jaime Victor Nicols e Sandra Manuela Duque Nicols pelo amor, carinho, por me terem guiado em toda vida pessoal, social e acadêmica. Todos os sermões que até hoje ouço são dos principais motivos pelos quais eu me encontro nessa posição, podendo encerrar mais um ciclo da minha vida.

Quero também agradecer ao meu irmão Jaime Victor Nicols Junior por todos os momentos de descontração durante a elaboração desse trabalho.

Aos amigos que fiz durante essa minha caminhada, o meu obrigado pelas amizades e todos momentos que passamos durante esses cinco anos.

Ao meu orientador Marcos Honorato, muito obrigado pelos ensinamentos não só de carácter acadêmico, mas também por ser um amigo fora da Universidade. Para sempre levarei comigo todos os seus ensinamentos e conselhos.

RESUMO

NICOLS, S.N.D. (2017). **Análise Experimental do Arrancamento de Barras de Aço em Peças de Concreto Armado**. Monografia de Projeto Final em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 76 p.

Atualmente, em maior parte das estruturas, há ligação entre duas peças estruturais, fazendo-se necessário o uso de conectores entre elas. Esses conectores são peças de aço que, ao serem solicitadas por tração, o local de instalação desse conector vira ponto crítico da estrutura como um todo, pelo que deve ser minuciosamente estudada.

O trabalho aqui apresentado irá falar o comportamento registado por barras ancoradas em peças de concreto armado, quando estas são submetidas à esforços de tração axial. Dentro desse contexto serão avaliados o uso de armadura complementar e tipo de gancho como sendo fatores que influenciam a resistência ao arrancamento das barras ancoradas.

Para tal serão realizados ensaios com nove espécimes diferentes, cada um deles contendo um tipo diferente de armadura de ancoragem. Serão usados ganchos de 90° e 135°, e leitura dos dados será feita por extensômetros e defletômetros.

Ao final do ensaio, os resultados serão comparados com modelos teóricos a fim de se verificar a dispersão e segurança da formulação usada.

Palavras-chave:

Arrancamento – Ancoragem – Concreto Armado – Análise Experimental

ABSTRACT

NICOLS, S.N.D. (2017). **Experimental Analysis of the Removal of Steel Bars in Armed Concrete Parts**. Monograph of Final Project in Civil Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Brasília, Brasília, DF, 76 p.

Currently, in most of the structures, there is a connection between two structural parts, making it necessary to use connectors between them. These connectors are pieces of steel that, when requested by traction, the place of installation of this connector becomes the critical point of the structure as a whole, so it must be thoroughly studied. The work presented here will speak about the behavior of bars anchored in pieces of reinforced concrete when they are subjected to axial tensile stresses. In this context, the use of complementary reinforcement and hook type will be evaluated as factors that influence the pullout resistance of the anchored rods. For this will be carried out tests with nine different specimens, each containing a different type of anchorage armor. Hooks of 90 ° and 135 ° will be used, and reading of the data will be made by extensometers and defletometers. At the end of the test, the results will be compared with theoretical models in order to verify the dispersion and safety of the formulation used.

Key words:

Pullout - Anchorage - Reinforced Concrete - Experimental Analysis

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. MOTIVAÇÃO	4
1.2. OBJETIVOS.....	4
1.3. METODOLOGIA	5
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1. ASPECTOS GERAIS	7
2.2. MODOS DE RUPTURA	10
2.2.1. Escoamento da barra do conector	10
2.2.2. Ruptura por deslizamento.....	10
2.2.3. Destacamento lateral	11
2.2.4. Fendilhamento	11
2.2.5. Ruptura do cone de concreto	12
2.2.6. Ruptura do concreto no gancho da barra.....	12
2.3. FATORES QUE INFLUENCIAM A RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DE BARRAS EMBUTIDAS NA PEÇA DE CONCRETO ARMADO	13
2.3.1. Propriedades do concreto	13
2.3.2. Diâmetro da barra do conector	14
2.3.3. Espaçamento entre as barras.....	14
2.3.4. Comprimento de embutimento efetivo.....	14
2.3.5. Abertura de fissuras.....	15
2.3.6. Armadura complementar.....	15
2.4. MODELOS TEÓRICOS DE TRABALHOS ANTERIORES.....	16

2.4.1. Jayne Sperry (2017).....	16
2.4.2. REGAN (2000).....	17
2.5. OUTROS MODELOS.....	18
2.5.1. Nathaniel Searle <i>et al</i> (2014).....	18
2.5.2. Brantschen <i>et al</i> (2016)	18
2.6. PRESCRIÇÕES NORMATIVAS.....	19
2.6.1. NBR 6118:2014 – PROJETO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO – PROCEDIMENTO.....	19
2.6.2. ACI 318:2014 – <i>BUILDING CODE REQUIREMENTS FOR STRUCTURAL CONCRETE AND COMMENTARY</i>	21
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	24
3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	24
3.2. CARACTERÍSTICAS DOS ESPÉCIMES ENSAIADOS	24
3.3. MATERIAIS	30
3.3.1. Concreto	30
3.3.1.1. Composição, concretagem e cura	30
3.3.1.2. Propriedades mecânicas	30
3.3.2. Propriedades mecânicas do aço	31
3.4. CONFECÇÃO DOS ESPÉCIMES	31
3.4.1. Forma.....	31
3.4.2. Armadura de flexão, cisalhamento e complementar dos espécimes	32
3.4.3. Armadura de ancoragem.....	32
3.5. INSTRUMENTAÇÃO.....	33
3.5.1. Deslocamento vertical	33
3.5.2. Deformação nas armaduras	34
3.6. Sistema de ensaio	35

4. RESULTADOS.....	37
4.1. Resistência à tração da barra de ancoragem.....	37
4.2. Escorregamento da barra de ancoragem.....	38
4.3. Deformações na armadura de flexão.....	41
4.4. Deformações na armadura de ancoragem.....	44
4.5. Carga de ruptura.....	47
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	49
5.1. Carga aplicada vs Carga Teórica.....	49
5.2. Modo de ruptura dos espécimes.....	52
6. CONCLUSÃO.....	55
6.1. Sugestões para trabalhos futuros.....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
Tabela 1 - Características dos espécimes da 1ª etapa de ensaios	26
Tabela 2 - Ensaio de tração axial da barra de aço de 10 mm	37
Tabela 3 - Carga de ruptura de cada espécime	47
Tabela 4 - Carga de ruptura dos espécimes (Experimental e Teórico)	49
Tabela 5 - Carga de ruptura experimental vs. Teórico	50
Tabela 6 - Modos ruptura observados	54

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1 - Aplicação de conectores na ligação de elementos estruturais (conexão com barras com gancho).....	2
Figura 2 - Aplicação de conectores na ligação de elementos estruturais (conexão com pinos)	2
Figura 3 - Barras com gancho padrão (90°, 135° e 180°).....	2
Figura 4 - Vista frontal e lateral da armadura complementar	3
Figura 5 - Esquema de transferência de esforços prováveis em barras com dobra (MACGREGOR, 2012).....	7
Figura 6 - Tipos de conectores pré-instalados (COSTA, 2016).....	8
Figura 7 - Tipos de conectores pós-instalados (COSTA, 2016)	9
Figura 8 – Modo de ruptura para barras com gancho de 90°, adaptado de acordo com PODHORSKY (2011).....	9
Figura 9 - Ruptura por destacamento lateral (ELIGEHAUSEN <i>et al</i> , 2006).....	11
Figura 10 - Ruptura por deslizamento lateral (ELIGEHAUSEN <i>et al</i> , 2006)	11
Figura 11 - Comprimento de embutimento efetivo.....	15
Figura 12 - Armadura complementar (barra transversal).....	16
Figura 13 - comprimento de ancoragem	21
Figura 14 - Ganchos e dobras segundo o EUROCODE 2 (2004).....	25
Figura 15 - Comprimento de ancoragem caso fosse usado o EUROCODE 2 (2004)	25
Figura 16 – Detalhamento longitudinal do espécime da primeira etapa de ensaios	26
Figura 17 - Detalhamento transversal do espécime da primeira etapa de ensaio.....	27
Figura 18 - Armadura de flexão do espécime da primeira etapa	27
Figura 19 - Ancoragem com gancho "J"	28
Figura 20 - Ancoragem com gancho "L" (5 ϕ após a curvatura).....	28
Figura 21 - Ancoragem com gancho "L" (10 ϕ após a curvatura).....	29
Figura 22 - Ancoragem com gancho reto com armadura transversal: a) uma barra de 6.3 mm; b) uma barra de 16.0 mm; c) duas barras de 8.0 mm	29
Figura 23 - Barras da armadura complementar.....	30

Figura 24 - Disposição das formas já armadas.....	31
Figura 25 -Barras dobradas	32
Figura 26 - Defletômetro LVDT (Laboratório de Estruturas, UNB)	33
Figura 27 – Montagem do extensômetro.....	34
Figura 28 - Vista frontal e em 3D do ensaio (SketchUP).....	35
Figura 29 - Imagem real do ensaio.....	36
Figura 30 - Ensaio de tração axial da barra de aço de 10 mm.....	37
Figura 31 – Escorregamento das barras ancoradas	39
Figura 32 - Escorregamento das barras ancoradas – Comparação	40
Figura 33 – Deformação armadura de flexão	42
Figura 34 – Deformação armadura de flexão – Comparação.....	43
Figura 35 - Deformação da armadura de ancoragem fora do concreto	45
Figura 36 - Deformação da armadura de ancoragem fora do concreto – Comparação.....	46
Figura 37 - Carga de ruptura	47
Figura 38 - Carga de ruptura vs Carga teórica – Razão	51
Figura 39 - Comportamento das barras de ancoragem.....	53

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
h_{ef}	Comprimento de embutimento efetivo
$F_{u,fy}$	Carga de ruptura por escoamento da barra de aço
f_y	Tensão de escoamento da barra de aço
A_S	Área da seção transversal da barra de aço
T_h	Carga total de ruptura (Segundo Sperry <i>et al</i>)
T_c	Contribuição do concreto na resistência de ancoragem (Segundo Sperry <i>et al</i>)
T_s	Contribuição da armadura complementar na resistência de ancoragem (Segundo Sperry <i>et al</i>)
f_{cm}	Resistência à compressão do concreto (Segundo Sperry <i>et al</i>)
l_{eh}	Comprimento de embutimento efetivo (Segundo Sperry <i>et al</i>)
d_b	Diâmetro da barra (Segundo Sperry <i>et al</i>)
N	Número de pernas paralelas ao comprimento reto da barra enganchada ao longo do comprimento da cauda em um gancho de 90°, ou o número de pernas perpendicular à barra ao longo do comprimento numa barra reta (Segundo Sperry <i>et al</i>)
A_{tr}	Área de uma das pernas (Segundo Sperry <i>et al</i>)
n	Número de ganchos observados (Segundo Sperry <i>et al</i>)
T	Resistência de cálculo de ancoragem da barra (Segundo Searle <i>et al</i>)
f'_c	Resistência à compressão do concreto (Segundo Searle <i>et al</i>)
l_{eh}	Comprimento de embutimento efetivo (Segundo Searle <i>et al</i>)
d_b	Diâmetro da barra, em polegadas (Segundo Searle <i>et al</i>)
c_b	Distância do centro da barra à superfície de concreto mais próxima (Segundo Searle <i>et al</i>)
ϕ_f	Diâmetro da armadura de flexão
ρ	Taxa de armadura

NBR 6118:2014

$f_{ctk,inf}$	Resistência à tração direta do concreto
γ_c	Coefficiente de ponderação da resistência do concreto
l_b	Comprimento de ancoragem básico

ϕ	Bitola da barra em milímetros
f_{yd}	Tensão de escoamento da barra
f_{bd}	Resistência de aderência de cálculo da armadura passiva
$l_{b,nec}$	Comprimento de ancoragem necessário
$l_{b,min}$	Comprimento de ancoragem mínimo

ACI 318 (2014)

l_d	é o comprimento de ancoragem
f_y	Tensão de escoamento da barra
f'_c	Resistência à compressão do concreto
c_b	Menor valor entre: a) distância do centro da barra à superfície de concreto mais próxima; b) metade do espaçamento centro-a-centro entre duas barras de ancoragem
d_b	Diâmetro nominal da barra
k_{tr}	O índice de armadura transversal
A_{tr}	Área de toda seção da armadura complementar que atravessa a seção crítica, dentro de um espaçamento “s”, mm ² .
n	Número de barras observadas ao longo do possível plano de divisão
ψ_t	Parâmetro que depende do posicionamento da barra
ψ_e	Parâmetro que depende do revestimento da barra
ψ_s	Parâmetro que depende da bitola da barra
λ	Parâmetro que depende do tipo de concreto usado
l_{dh}	Comprimento de ancoragem de ganchos padronizados

1. INTRODUÇÃO

Na construção civil, na maior parte dos casos é necessária uma ligação entre duas peças de concreto ou duas peças mistas (aço e concreto). Essa sua ligação pode ser proporcionada por conectores do tipo conectores com cabeça, estribos, ou ainda por barras metálicas com ou sem gancho. Alguns exemplos de peças ligadas com conectores encontram-se nas Figuras 1 e 2, onde pode-se ver uma ligação entre duas peças de concreto e uma ligação entre uma peça metálica e outra de concreto. Esses conectores são amplamente utilizados na ligação entre duas peças de concreto, sendo estas estruturais ou não, com o intuito de proporcionar a transmissão de esforços de uma peça para outra.

Essa transmissão de esforços se dá por meio de um fenômeno denominado ancoragem. Ancoragem segundo PARMAR e JAMNU (2014), consiste na transferência de esforços entre as armaduras de reforço e o concreto envolvente, garantindo de forma segura a ação conjunta dos dois elementos na resistência aos esforços solicitantes. Os principais mecanismos de ancoragem são a aderência e a chamada ancoragem mecânica, sendo que estes dois podem atuar em simultâneo ou apenas um deles, de acordo com o tipo de conector usado.

Segundo o ACI-318(2014), qualquer peça que permita o reforço do concreto aos esforços solicitantes sem que danifique ou altere as características iniciais do concreto, pode ser considerado adequada para ancoragem.

O tipo de armadura usada para a ancoragem depende principalmente da magnitude do esforço solicitado na ligação entre os dois elementos. Outros fatores a serem considerados são as propriedades do concreto e as dimensões dos elementos.

Sendo assim, os conectores (“*anchors*”) podem ser os conectores com cabeça (“*headed studs*”), estribos, barras sem gancho e barras com gancho padrão de 90°, 135° ou 180°. Na Figura 3 são demonstrados os três ganchos padronizados. A escolha do reforço metálico deve ser feita tendo em conta não só os fatores mencionados acima, mas também a facilidade de execução e o custo de aquisição. Uma vez que a construção civil no Brasil se caracteriza por uma grande competitividade entre as empresas, que buscam ganhar mercado usando técnicas de construção econômicas, porém mantendo o nível mínimo de segurança, procura-se saber se a utilização de barras com gancho satisfaz esses quesitos.

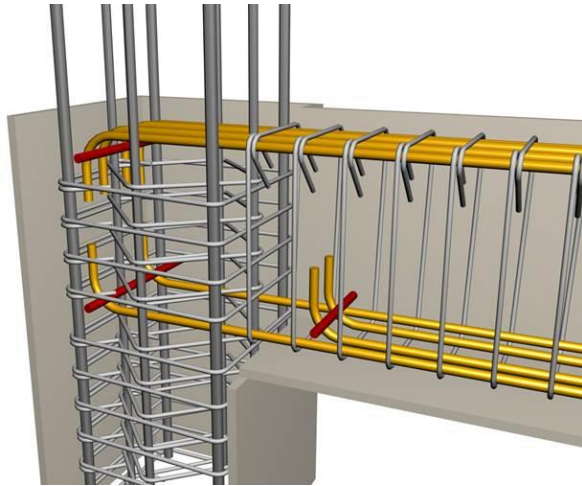


Figura 1 - Aplicação de conectores na ligação de elementos estruturais (conexão com barras com gancho)

Fonte: <http://www.buildinghow.com>



Figura 2 - Aplicação de conectores na ligação de elementos estruturais (conexão com pinos)

Fonte: <https://br.pinterest.com/taililee/structural-joinery/>

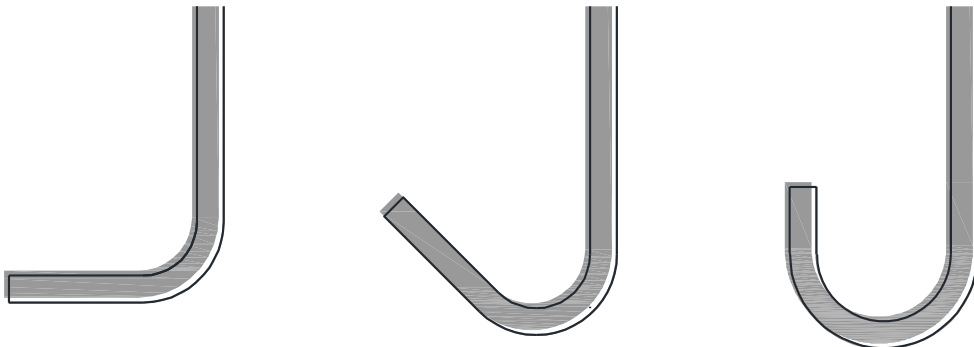


Figura 3 - Barras com gancho padrão (90°, 135° e 180°)

O fator predominante na ancoragem segundo o ACI-318 (2014), é o comprimento de embutimento efetivo (h_{ef}), que é a profundidade a partir da qual a peça metálica transfere os esforços externos ao concreto. Segundo essa Norma, o comprimento de embutimento efetivo é o principal parâmetro responsável por proporcionar à peça metálica a resistência ao arrancamento.

Para uma ancoragem eficiente, o comprimento de embutimento efetivo deve ser tal que permita a transferência segura dos esforços ao concreto, para além de resistir aos esforços que lhe são

solicitados. Isso nem sempre é possível, devido às limitações geométricas que o elemento estrutural apresenta, impossibilitando o aumento do comprimento de embutimento efetivo da barra de aço ancorada. Uma das soluções sem que seja necessário aumentar o comprimento de embutimento, é o uso de armadura complementar juntamente com o conector (COSTA, 2016). As armaduras complementares podem ser formadas de estribos, barras transversais ou barras dobradas. Neste trabalho, será estudada a barra transversal como sendo a armadura complementar, como mostra a Figura 4 abaixo.

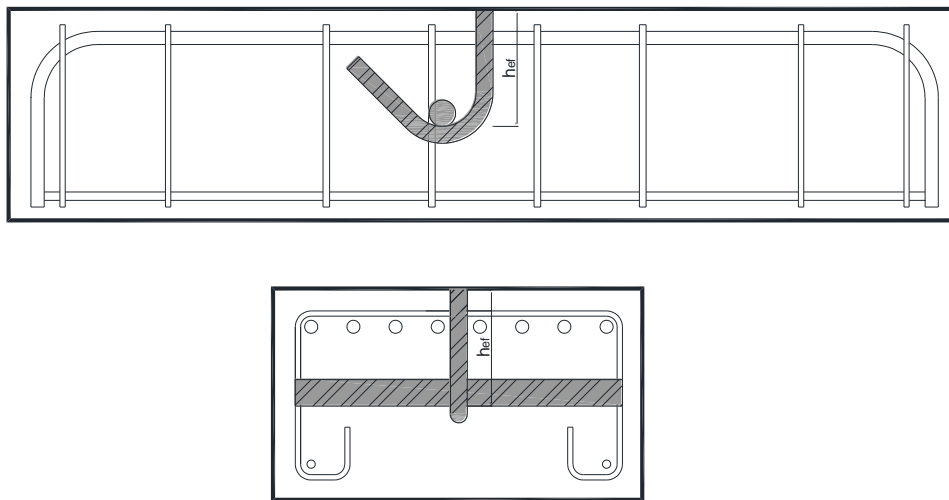


Figura 4 - Vista frontal e lateral da armadura complementar

Segundo ELIGEHAUSEN e BALOGH (1995), outro aspecto a ser considerado é a fissuração do concreto, que afeta a resistência do concreto, e conseqüentemente a resistência ao arrancamento das barras dentro do concreto. Segundo eles, a resistência sofre um decréscimo de 25% em relação à resistência última da barra ao arrancamento.

Atualmente no Brasil como também no mundo, a maior parte dos estudos dedicados à ancoragem ou força de arrancamento de peças metálicas embutidas em concreto é feita considerando conectores com cabeça (“*headed studs*”), não existindo por isso, uma quantidade considerável de trabalhos feitos sobre ancoragem usando barras dobradas.

O presente trabalho faz parte de um programa experimental, de uma pesquisa de mestrado da Engenheira Patrícia Cândida Souza da Silva. Os experimentos foram realizados no laboratório

de estruturas (LABEST), e estes são compostos por 4 séries de ensaio. Este trabalho dedica-se à primeira série de ensaios.

1.1. MOTIVAÇÃO

O que leva à realização desse estudo é o fato de não só identificar a influência do gancho ou dobra, da armadura de ancoragem e da armadura complementar, mas também pelo fato de existirem poucos estudos relacionados ao arrancamento de barras ancoradas com gancho ou dobra. Os grandes especialistas na área de arrancamento, tais como R. Eligehausen, J. Ozbolt ou ainda Z P. Bazant, focaram as suas pesquisas em conectores com cabeça (“*headed studs*”), criando vários modelos de cálculo de resistência última de arrancamento. Para barras com gancho, mais estudos têm vindo a ser feitos por pesquisadores da atualidade. Estes têm criado várias equações empíricas, por meio de uma enorme quantidade de ensaios, que relacionam a carga de arrancamento à vários fatores considerados como influentes nesta.

Esses artigos publicados pelos pesquisadores em questão serão usados como base para elaboração desse trabalho, e alguns modelos servirão como banco de dados para uma análise comparativa dos resultados que serão obtidos neste trabalho.

1.2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar o comportamento mecânico de barras com e sem gancho submetidas à esforços de tração, quando ancoradas em uma peça de concreto armado.

Como objetivos específicos têm-se:

- Avaliar a influência do uso de armadura complementar (barras transversais) na resistência ao arrancamento de barras ancoradas em peças de concreto armado;
- Avaliar modelos teórico-experimentais e recomendações normativas quanto à dispersão, segurança e precisão dos resultados, através da avaliação de formulações resultantes de um grande número de ensaios.

- Avaliar os mecanismos de transferência de carga, bem como os modos de ruptura para esse cada um dos tipos de mecanismos de ancoragem usados.

1.3. METODOLOGIA

Neste trabalho, serão avaliados 9 espécimes diferentes, cada espécime composto por um tipo de armadura de ancoragem embutida na peça de concreto armado. Esses espécimes serão divididos em três grupos: o primeiro será composto por espécimes cujas armaduras estão ancoradas com gancho de 90°, o segundo com armaduras ancoradas com gancho de 135°, e o último com barras ancoradas sem gancho. Todos os espécimes tiveram as barras ancoradas com um comprimento de embutimento efetivo de 60 mm. Cada espécime será levado à um ensaio de arrancamento por tração da armadura de ancoragem, no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília. O concreto usado para confeccionar os espécimes tinha uma resistência à compressão (f_c) de 34,7 MPa, e as barras da armadura de ancoragem foram de 10,0 mm.

Todos os espécimes foram instrumentados de forma igual, contendo defletômetros do tipo LVDT, e extensômetros elétricos. Os dados obtidos durante o ensaio serão transferidos por meio de módulos *Spiders8* e a leitura dos dados será feita de forma constante por meio do software *Catman*.

Os dados serão trabalhados para que possam ser analisados de forma precisa, segura e coerente para que depois seja possível comparar os dados com os recolhidos no banco de dados.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

Para além do capítulo 1, onde será apresentada a introdução do trabalho, no capítulo 2 será realizada a revisão bibliográfica, com a discussão do fenômeno da ancoragem, dos tipos de conectores e seus principais tipos de transferência de esforços. Serão debatidos também os principais tipos de rupturas de peças de concreto armado contendo armadura de ancoragem, e quais os principais fatores influenciam na resistência ao arrancamento de barras com gancho. Serão vistos também alguns modelos teóricos e algumas recomendações normativas em relação a esse conteúdo.

No capítulo 3 será debatido essencialmente o esquema de montagem do experimento, desde a confecção dos espécimes, até toda a instrumentação feita para possibilitar a leitura dos dados relativos ao comportamento do espécime quando a barra de ancoragem é submetida à esforços de tração.

No capítulo 4 serão objeto de reflexão os resultados obtidos no ensaio. Estes serão o escorregamento da barra de ancoragem, a deformação da armadura utilizada para resistir a flexão, e a deformação da barra de ancoragem fora do concreto e dentro do concreto. Também serão comparados espécimes contendo barras ancoradas com mesmo gancho (o único diferencial é a armadura complementar).

No capítulo 5 será apresentada a análise de dados, onde os resultados obtidos serão comparados com modelos teóricos para que seja verificada a exatidão e precisão dos dados. Também será analisado se os modelos teóricos são conservadores ou perigosos, por meio de uma análise gráfica. Por fim, será quantificada a força de aderência entre o concreto e a barra ancorada, bem como os outros mecanismos de transferência de esforços.

O capítulo 6 consistirá na conclusão do trabalho, onde será dito se os resultados foram no geral satisfatórios ou não, e as razões para tal. Também constarão no capítulo algumas possíveis formas de melhorar trabalhos futuros relacionados ao tema em questão.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção será apresentado o fenômeno da ancoragem e como funcionam os mecanismos de transferência de esforços com maior detalhe. Serão explicadas as várias formas de ruptura da peça de concreto a qual a armadura está ancorada, e quais fatores influenciam na resistência da barra ancorada na peça de concreto durante o arrancamento. Mais adiante serão mostrados alguns estudos feitos por pesquisadores, que resultaram em modelos teóricos e que até hoje podem ser usados para estimar a carga de ruptura do conjunto. Esses modelos serão comparados também às recomendações de cálculo propostas pelas normas NBR 6118 (2014) e ACI 318 (2014).

2.1. ASPECTOS GERAIS

As armaduras de ancoragem (ou conectores) são responsáveis por transmitir os esforços entre duas peças de concreto ou duas peças mistas. Segundo MURATLI (1998), todas forças externas exercidas sobre as barras são transferidas ao concreto envolvente como uma carga concentrada por meio de três formas de transferência de carga: adesão química, fricção ou aderência mecânica. Como não é possível quantificar cada uma dessas parcelas isoladamente, geralmente é chamada apenas de ancoragem por aderência.

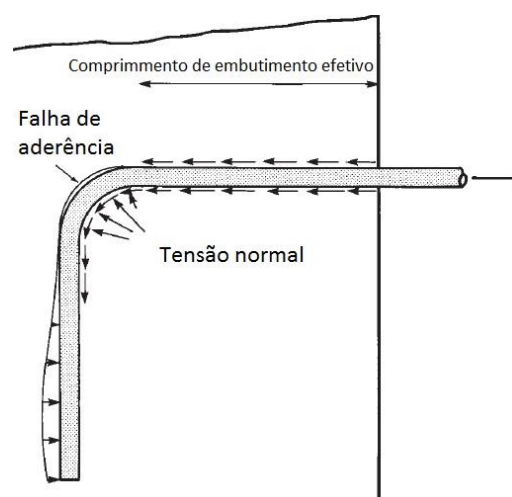


Figura 5 - Esquema de transferência de esforços prováveis em barras com dobra (MACGREGOR, 2012)

As armaduras de ancoragem em geral são classificadas em dois grandes tipos: pré-instalados e pós-instalados, sendo que cada um deles é subdividido em subtipos, de acordo com o mecanismo de transferência de carga para o concreto, segundo MURATLI (1998). Os pré-instalados, como o nome sugere, são colocados já na posição que eles irão ocupar na peça de concreto, antes da concretagem dessa respectiva peça. Fazem parte das armaduras pré-instaladas os “headed bolts”, “headed studs”, barras com e sem gancho. Já as armaduras pós instaladas são colocados no concreto já endurecido. Estes últimos servem normalmente para reforço futuro de uma peça, embora seja usado para novas construções, devido ao avanço tecnológico nas áreas de perfuração MURATLI (1998).

Quando instalados, uma característica a ter em conta é o comprimento de embutimento nominal, que não deve ser confundido com o comprimento de embutimento efetivo. O primeiro é uma característica construtiva que indica a profundidade total que foi instalado o conector, independentemente do tipo. O comprimento de embutimento efetivo (h_{ef}), segundo o ACI 318 (2014) é a profundidade segundo a qual se desenvolvem os mecanismos de transferência dos esforços para o concreto, como mostram as Figuras 6 e 7. Ou seja, o comprimento de embutimento efetivo vai da superfície de concreto até a face superior da cabeça, para o caso de conectores com cabeça, e para barras dobradas essa altura se dá na face superior do trecho dobrado (posterior a dobra).

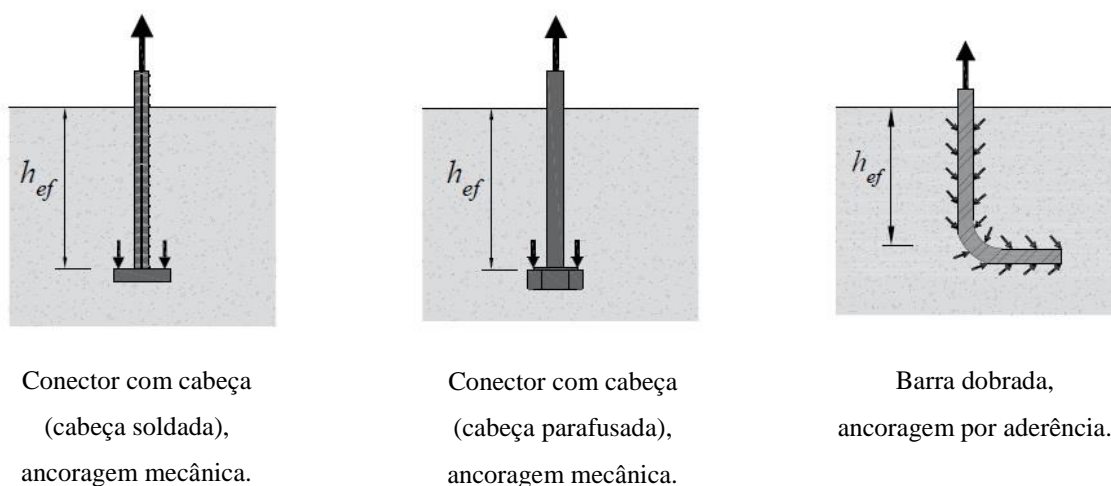
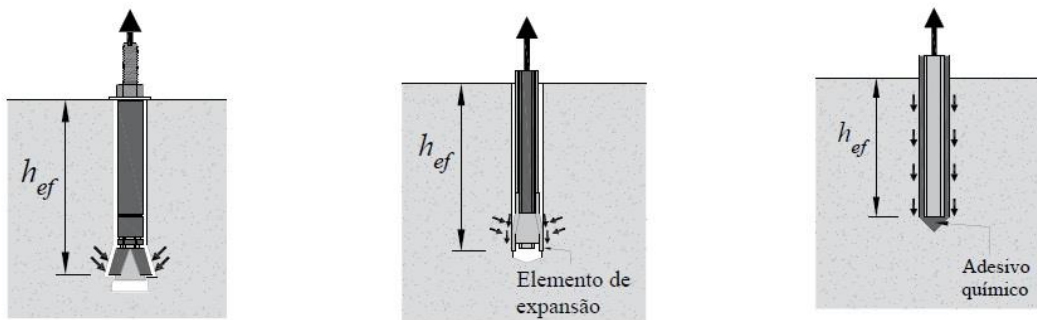


Figura 6 - Tipos de conectores pré-instalados (COSTA, 2016)



Conectores de segurança,
ancoragem mecânica.

Conectores de expansão,
ancoragem por fricção.

Conectores de aderência
química.

Figura 7 - Tipos de conectores pós-instalados (COSTA, 2016)

Segundo PODHORSKY (2011), o modo de ruptura de barras com gancho tanto de 90° como de 180° é de falha da ancoragem por aderência acompanhado de esmagamento do concreto no raio interior do gancho. Segundo a autora, o concreto dentro do raio interno da dobra tende a esmagar e a barra move-se como um todo, no caso de barras com gancho de 180° . Para barras com gancho de 90° a extremidade da barra sofre um deslizamento, seguido de um alinhamento no sentido da força de arrancamento, devido a essa mesma força. Quanto ao raio externo da dobra, há perda de aderência com o concreto, como é mostrado na Figura 8 abaixo.

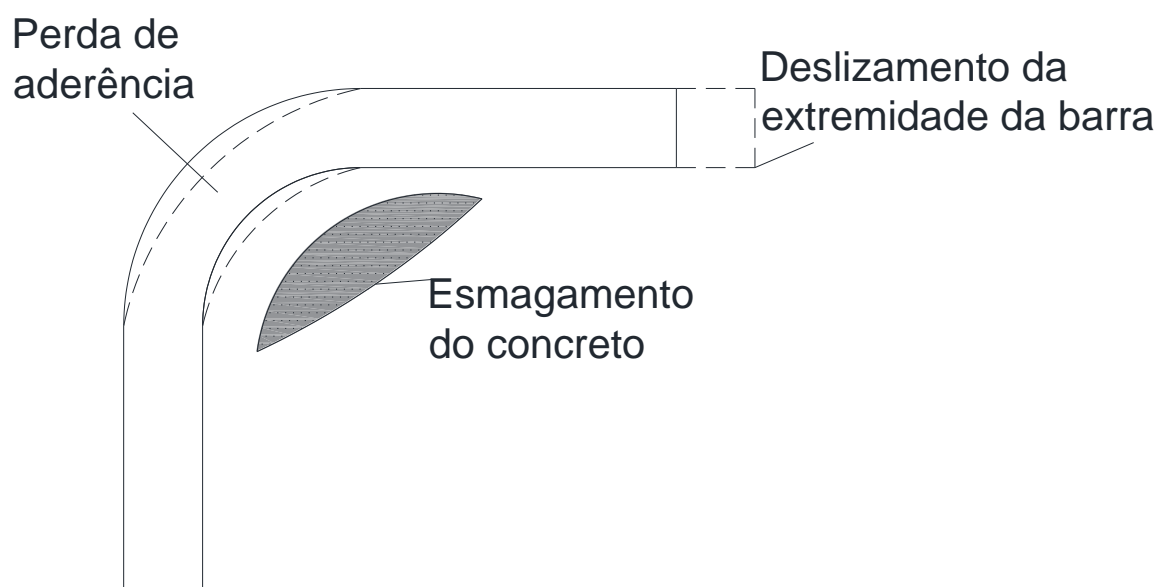


Figura 8 – Modo de ruptura para barras com gancho de 90° , adaptado de acordo com PODHORSKY (2011)

2.2. MODOS DE RUPTURA

Para um bom entendimento do comportamento das barras instaladas dentro do concreto na condição de estado limite último (ELU), no que diz respeito à relação carga x deslocamento e quanto as condições de ductilidade, é necessário conhecer os mecanismos de ruptura já estudados para conectores. Estes são:

- Escoamento da barra do conector
- Ruptura por deslizamento
- Destacamento lateral
- Fendilhamento do concreto
- Ruptura do cone de concreto
- Ruptura do concreto no gancho da barra

2.2.1. Escoamento da barra do conector

Ocorre quando a carga solicitante é maior que a carga de escoamento do conector, provocando o escoamento da barra e a posterior ruptura desta. Conhecendo a tensão de escoamento da barra, pode-se calcular a carga de escoamento com a equação abaixo:

$$F_{u,f_y} = f_y \cdot A_s$$

Onde:

F_{u,f_y} é a carga de ruptura por escoamento da barra de aço (N);

f_y é a tensão de escoamento da barra de aço (MPa);

A_s é a área da seção transversal da barra de aço (mm²).

2.2.2. Ruptura por deslizamento

Muito comum em conectores do tipo pós-instalados, pelo fato do mecanismo de transferência de esforços se dar por meio da ancoragem por aderência (ELIGEHAUSEN *et al*, 2006). Esse tipo de ruptura é também observado para as barras com gancho (conectores pré-instalados), onde se observa o mesmo mecanismo de transferência de esforços.

2.2.3. Destacamento lateral

Segundo ELIGEHAUSEN *et al* (2016), quando o conector se situa perto de uma das faces laterais da peça de concreto, as tensões causadas pela transferência de carga geram forças transversais à força de arrancamento, o que gera destruição da face lateral. Segundo esses autores, a distância mínima do conector à face lateral deve ser de $1,5h_{ef}$.

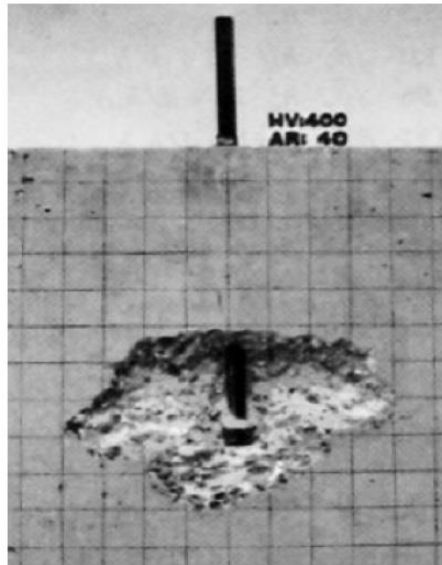


Figura 9 - Ruptura por destacamento lateral (ELIGEHAUSEN *et al*, 2006)

2.2.4. Fendilhamento

Tal como o destacamento lateral, esse tipo de ruptura ocorre nas faces laterais da peça de concreto. Segundo ELIGEHAUSEN *et al* (2006), este fenômeno ocorre com a aparição de fissuras paralelas ao conector que tendem a dividir a peça que geralmente é de pequena espessura. Ocorre também nos casos em que o conector se situa próximo das faces laterais.

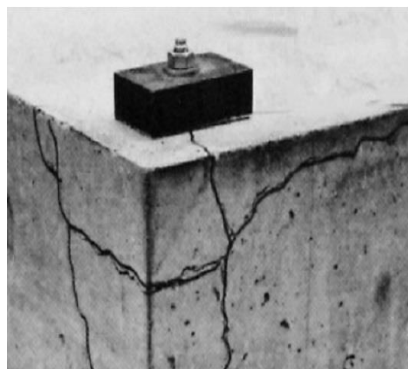


Figura 10 - Ruptura por deslizamento lateral (ELIGEHAUSEN *et al*, 2006)

2.2.5. Ruptura do cone de concreto

Consiste em uma fissura circunferencial que aparece na superfície do concreto rodeando o conector tracionado. Segundo ELIGEHAUSEN *et al* (2006), este modo de ruptura se dá quando a força solicitante de tração é maior que a resistência a tração do concreto, que é muito baixa como já foi comprovada. A fissura começa na base do conector e vai se expandindo para a superfície do concreto, com um ângulo de inclinação de 35°.

Este tipo de ruptura é característica de peça ancoradas com conectores contendo cabeça em sua extremidade.

Geralmente a ruptura do cone de concreto é considerada o modo de ruptura de projeto para o caso de conectores com cabeça, sendo este o motivo para a necessidade de um bom conhecimento do plano de ruptura, uma vez que hoje em dia os conectores com cabeça são os mais utilizados. Vários estudos foram feitos para determinar as características do plano de ruptura. Por exemplo, o ACI 349 (1985) inicialmente considerava o plano de inclinação de 45°, que foi posteriormente contestada por vários autores. ELIGEHAUSEN *et al* (1992) e OZBOLT e ELIGEHAUSEN (1990) são exemplos de autores que determinaram que o plano de ruptura tinha de fato, 35° de inclinação.

Essa análise foi feita também para o caso de concreto fissurado, pois a fissura implica numa redução da resistência dos conectores ao arrancamento. Segundo REHM *et al* (1988), a resistência é reduzida pelo fato das fissuras provocarem distúrbio no estado inicial de tensões quando o concreto não se encontrava fissurado. ELIGEHAUSEN *et al* (2006) verificaram que o formato da fissura do cone era quase a mesma.

2.2.6. Ruptura do concreto no gancho da barra

Este tipo de ruptura é exclusivo de barras com gancho. Segundo o ACI 318 (2014), a divisão do concreto situado no interior do raio interno do gancho é a principal razão para a ruptura da peça. PODHORSKY (2011) também observou que o concreto no interior do raio interno do gancho sofria esmagamento acompanhado de uma perda de aderência na curva exterior do gancho. No interior do concreto, esse esmagamento é ocasionado pelo engrenamento da barra de aço com o agregado, também chamado de encaixe de agregado, quando a barra sofre

arrancamento. Esse encaixe de agregado é o responsável pelo desdobramento da barra de ancoragem.

2.3. FATORES QUE INFLUENCIAM A RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DE BARRAS EMBUTIDAS NA PEÇA DE CONCRETO ARMADO

Nesta seção serão estudados os fatores que têm maior impacto na resistência das barras ancoradas em peças de concreto, quando submetidas ao arrancamento. Para tal o modo de ruptura considerado para todos os ensaios foi o de ruptura do cone de concreto, uma vez que o ensaio é preparado tal que não haja problemas com ruptura por fendilhamento, destacamento lateral. Outro motivo é que os estudos anteriores realizados tiveram como modo de ruptura a formação do cone de concreto. Os fatores que serão considerados são: propriedades do concreto, diâmetro do conector, espaçamento entre os conectores, comprimento de embutimento efetivo, fissuras e existência ou não de armadura complementar.

2.3.1. Propriedades do concreto

Geralmente qualquer estudo relacionado com o concreto levará em conta a resistência à compressão (f_c) e à tração do concreto (f_{ct}). Ao fazer-se um estudo do comportamento de uma peça de concreto, uma das primeiras propriedades a ser conhecida é a resistência à compressão. Como a resistência de arrancamento da barra está diretamente associado à resistência do concreto, as formulações mencionadas nas próximas seções levarão em conta a resistência do concreto, onde observa-se que o aumento da resistência à compressão (e conseqüentemente à tração) levará ao aumento da resistência ao arrancamento da barra.

Um estudo feito por OZBOLT e ELIGEHAUSEN (1993) usando conectores com cabeça demonstrou que não só deve ser associada às resistências à tração e à compressão do concreto, mas também à energia de fratura e ao módulo de elasticidade do concreto. Mais tarde, ELIGEHAUSEN *et al* (2006) observaram que os efeitos da energia de fratura e do módulo de elasticidade poderiam ser substituídos pela raiz da resistência à compressão do concreto ($\sqrt{f_c}$).

2.3.2. Diâmetro da barra do conector

Segundo BARBOSA (2001), a tensão máxima de aderência é reduzida com o aumento do diâmetro das barras. O seu estudo teve como base os artigos de SOROUSHIAN & CHOI (1989) e REYNOLDS & BEDDY (1982), que verificaram que barras de maior diâmetro possuindo nervuras de maiores dimensões, retêm a água de amassamento na parte inferior da barra, evitando o fenômeno da exsudação. Uma vez que maior parte da água está na parte inferior, a zona de transição entre o concreto e a barra é de maior espessura na parte inferior, fazendo que essa zona fique mais porosa, reduzindo assim à sua resistência de aderência.

2.3.3. Espaçamento entre as barras

Para que as barras isoladas desenvolvam em sua total capacidade a resistência ao arrancamento, é recomendado que estas respeitem um espaçamento mínimo (s) entre elas e em relação à face externa do elemento de concreto.

Segundo o ACI 318-14, no seu item 17.2.1.1, o espaçamento mínimo entre dois conectores deve ser 3 vezes superior ao comprimento de embutimento efetivo ($3h_{ef}$), tanto para ruptura do concreto por tensão, como também por cisalhamento.

ELIGEHAUSEN *et al* (2006) haviam considerado um espaçamento entre conectores com cabeça e a face da peça de concreto num valor de $1,5h_{ef}$. Embora não haja, na literatura um valor exato de espaçamento quando se trata de barras com gancho, o valor obtido para conectores com cabeça por vezes é usado para barras com gancho, uma vez que as barras com gancho apresentam resistência menor que os conectores com cabeça.

2.3.4. Comprimento de embutimento efetivo

O comprimento de embutimento efetivo é o fator de maior importância a ser considerado nos modos de ruptura do elemento de concreto com o reforço.

Estudos feitos por SPERRY (2017) demonstraram, através de inúmeros experimentos, que a resistência ao arrancamento das barras com gancho no concreto é diretamente proporcional ao comprimento de embutimento efetivo. Baseando-se no ACI 318 (2014) em seu item 25.4.3.1,

SPERRY (2017) estabeleceu uma relação matemática em que a tensão da barra é diretamente proporcional à resistência à compressão do concreto, ao comprimento de embutimento efetivo usado para ancoragem e inversamente proporcional ao diâmetro da barra.

Tal observação já havia sido feita para conectores com cabeça, onde ASHOUR e ALQEDRA (2005) verificaram que a carga de ruptura era proporcional a $h^{1,5}$.

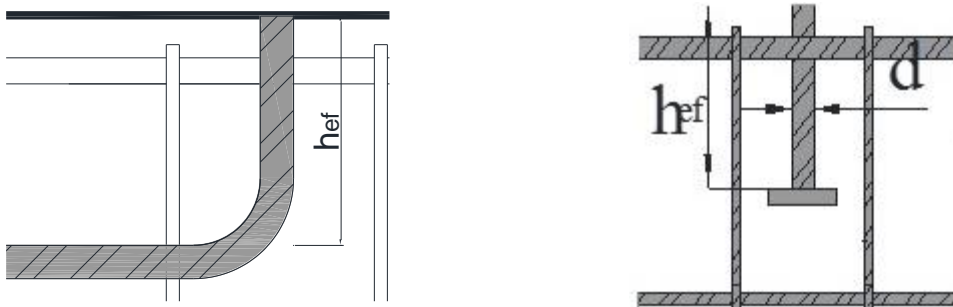


Figura 11 - Comprimento de embutimento efetivo

2.3.5. Abertura de fissuras

Muitos elementos de reforço do concreto armado são projetados partindo do princípio que o concreto já se encontra fissurado. Já foi provado que fissuras reduzem a carga de ruptura até 25% para vários tipos de armadura de ancoragem. ELIGEHAUSEN (1984) e ELIGEHAUSEN e BALOGH (1995), por meio de análises de conectores com cabeça embutidos em concreto fissurado, averiguaram que realmente a carga de ruptura era reduzida em 25% quando a abertura de fissura “w” atingia valores entre 0,2 a 0,4 mm. A NBR 6118 (2014) limita o valor de fissuras nesse intervalo para a durabilidade de elementos estruturais.

Segundo ELIGEHAUSEN e BALOGH (1995), as fissuras nem sempre são causadas por carregamento externo. Por vezes pode ser causada devido à retração térmica, ataques químicos ou mesmo deformações das estruturas. Quanto ao carregamento externo, eles afirmam que as fissuras começam a ficar evidentes com 40% da carga de ruptura.

2.3.6. Armadura complementar

O uso de armadura complementar é conveniente quando não é possível, por meio do embutimento máximo possível dentro da peça ou mesmo com o uso de ganchos, obter a

resistência de ancoragem mínima necessária da armadura com a peça de concreto. Podem fazer parte da armadura complementar as barras transversais ou estribos.

Estudos feitos por SPERRY (2017), ELIGEHAUSEN e BALOGH (1995) e SEARLE *et al* (2004) comprovaram que a adição de armadura complementar resulta em um grande aumento na carga de ruptura.

SPERRY (2017) e SEARLE *et al* (2014) chegaram a essa conclusão por meio de experimentos usando barras com ganchos de 90° e 180°, enquanto que ELIGEHAUSEN e BALOGH (1995) chegaram a essa conclusão fazendo o estudo com conectores com cabeça.

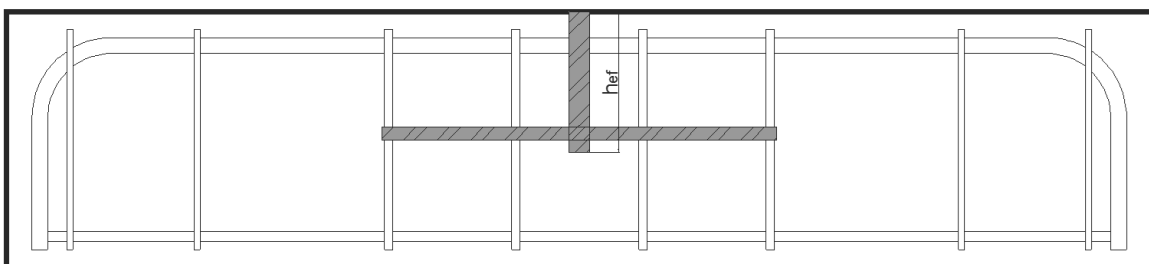


Figura 12 - Armadura complementar (barra transversal)

2.4. MODELOS TEÓRICOS DE TRABALHOS ANTERIORES

2.4.1. Jayne Sperry (2017)

O trabalho foi desenvolvido por Jayne Sperry e é uma atualização de um trabalho de sua própria autoria. O propósito do estudo destes pesquisadores foi de determinar fatores críticos que influenciam na capacidade de resistência das barras com ganchos. Os fatores considerados foram a resistência à compressão do concreto, o comprimento de embutimento efetivo, e o diâmetro da barra e as características da armadura de confinamento, se houvesse.

SPERRY ensaiou no total 337 espécimes com características diferentes, e chegou a formulação abaixo para calcular a resistência ao arrancamento das barras, independentemente do tipo de gancho ou dobra:

$$N_u = (68,4 \cdot h_{ef} \cdot \phi^{0,47} - 7855) \cdot f_c^{0,29}$$

Onde:

h_{ef} é o comprimento de ancoragem efetivo;

ϕ é o diâmetro da barra ancorada;

f_c é a resistência a compressão do concreto.

Embora Sperry tenha feito ensaios usando armadura complementar, os resultados não podem ser considerados, uma vez que esta armadura tem uma disposição diferente do ensaio que foi realizado neste trabalho. Os resultados serão usados apenas para comparação com os ensaios realizados nos espécimes contendo armadura complementar de ancoragem.

Outro aspecto é que esse modelo também não seria válido para o caso de barras ancoradas sem gancho.

2.4.2. REGAN (2000)

REGAN (2000) realizou ensaios com seis diferentes formas de ancoragem, com o intuito de observar a diferença entre suas eficiências. Seus ensaios foram feitos com barras ancoradas não mais do que 100mm dentro do concreto.

Regan fez uma adaptação da equação abaixo, retirada do CEB, e afirmou que se encaixava na resistência ao arrancamento de barras ancoradas no concreto. O valor k é um coeficiente o qual Regan adotou como sendo 14 quando barra de ancoragem fosse feita em torno de barras horizontais do tipo “headed studs”, com ganchos de 180° e dobras de 90° com pelo menos uma extensão para além da curva de seis vezes o diâmetro nominal da barra de ancoragem. Caso contrário o valor de “ k ” é igual a 10.

$$N_u = k \cdot \sqrt{f_c} \cdot h_{ef}^{3/2}$$

h_{ef} é o comprimento de ancoragem efetivo;

f_c é a resistência a compressão do concreto.

2.5. OUTROS MODELOS

2.5.1. Nathaniel Searle *et al* (2014)

O trabalho foi desenvolvido por Nathaniel Searle, Michael De Rubeis e outros pesquisadores. O interessante é que tanto os autores dessa pesquisa como os da pesquisa mostrada na seção 2.4.2, é que todos eles fazem parte do mesmo instituto, Universidade do Kansas, e são patrocinados pelas mesmas empresas.

Searle ensaiou no total 329 espécimes com características diferentes, e chegou a formulação abaixo para calcular a resistência ao arrancamento das barras, independentemente do tipo de gancho ou dobra:

$$N_u = (362 \cdot h_{ef} \cdot \phi^{0,10} \cdot c_b^{0,3} - 1227) \cdot f_c^{0,29}$$

Onde:

h_{ef} é o comprimento de ancoragem efetivo, em polegadas;

ϕ é o diâmetro da barra ancorada, em polegadas;

f_c é a resistência a compressão do concreto, em libras.

N_u é a força de arrancamento, em libra-força por polegada quadrada

2.5.2. Brantschen *et al* (2016)

Brantschen realizou um total de 89 ensaios de arrancamento de barras ancoradas em concreto fissurado. Os ensaios dividiram-se em três séries: barras retas (16 espécimes), barras com cabeça soldada (18 espécimes) e barras com gancho (55 espécimes). O seu objetivo era de avaliar a diferença entre o arrancamento de barras em concreto fissurado e não fissurado, para além de estudar a influência do diâmetro da barra, tipo de mecanismo de ancoragem usado.

Este autor limitou-se apenas em uma análise do comportamento das barras ancoradas, por meio de gráficos, não estabelecendo assim, alguma formulação.

2.6. PRESCRIÇÕES NORMATIVAS

Nesta seção serão indicadas algumas recomendações impostas pela NBR 6118 (2014) e pelo ACI 318 (2014). Ambas normas fazem menção ao cálculo da resistência ao arrancamento considerando a existência de armadura complementar. Porém, a NBR 6118 (2014) impõe algumas condições relativas ao posicionamento da barra transversal na conexão com a armadura de ancoragem.

2.6.1. NBR 6118:2014 – PROJETO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO – PROCEDIMENTO

Esta norma estabelece o cálculo da resistência de aderência (design bond strength) como sendo dependente da força resistente à tração do concreto e das características da barra usada na ancoragem, como mostra a equação abaixo:

$$f_{bd} = n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot f_{ctd}$$

Onde:

f_{bd} é a resistência de aderência de cálculo da armadura passiva;

n_1 pode assumir os valores: 1,0 para barras lisas; 1,4 para barras entalhadas; 2,25 para barras nervuradas;

n_2 pode assumir os valores: 1,0 para situações de boa aderência; 0,7 para situações de má aderência;

$n_3 = 1,0$ para $\phi < 32$ mm;

$n_3 = (132 - \phi)/100$, para $\phi > 32$ mm;

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

$f_{ctk,inf}$ é a resistência à tração direta do concreto;

γ_c é o coeficiente de ponderação da resistência do concreto.

A NBR 6118:2014, no seu item 9.3.1, considera em boa situação quanto a aderência as barras que estejam nas seguintes situações:

a) Inclinação de 45° ou maior em relação a horizontal;

b) Horizontal ou abaixo de 45°, desde que localizados no máximo 30 cm acima da face inferior de elementos de concreto com $h < 60$ cm; ou no mínimo 30 cm abaixo da face superior do elemento de concreto com $h > 60$ cm.

Uma vez obtida a resistência de aderência da barra, pode ser obtido o comprimento de ancoragem básico desta. Este parâmetro depende não só da resistência de ancoragem, mas também da tensão de escoamento dessa barra.

$$l_b = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{bd}} \leq 25\phi$$

Onde:

l_b é o comprimento de ancoragem básico;

ϕ é a bitola da barra em milímetros (mm);

f_{yd} é a tensão de escoamento da barra;

f_{bd} é a resistência de aderência de cálculo da armadura passiva.

O comprimento de ancoragem básico relaciona-se a uma área de aço calculada para determinado esforço solicitante. Porém, as barras de aço são de tamanho comercial, pelo que nem sempre é possível obter a área de aço igual a calculada. Normalmente escolhe-se uma quantidade de aço tal que a sua área efetiva seja maior que a calculada. Devido a isso, o comprimento de ancoragem pode ser reduzido ao “comprimento de ancoragem necessário”, calculado pela expressão abaixo.

$$l_{b,nec} = \alpha \cdot l_b \cdot \frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}} \geq l_{b,min}$$

Onde:

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

α é o coeficiente que pode assumir os valores:

1,0 para barras sem gancho;

0,7 para barras com gancho;

0,7 quando houver barras transversais soldadas;

0,5 quando houver barras transversais soldadas e gancho com cobrimento no plano normal ao gancho $\geq 3\phi$;

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

A resistência ao arrancamento é dependente do diâmetro da barra, do comprimento de ancoragem e da resistência do concreto à compressão. Para o caso de barras com o diâmetro menor que 32 mm, como é o caso dos ensaios que serão tratados mais adiante, em situação de boa aderência, e ancoradas em peças de concreto com resistência à compressão inferior a 55 MPa, sua resistência ao arrancamento pode ser estimada pela seguinte formulação:

$$T_{u, NBR} = \frac{0,473 \cdot \sqrt[3]{f_c^2} \cdot \pi \cdot \phi \cdot h_{ef}}{\alpha_1} \rightarrow f_c < 55 MPa$$

Onde:

$T_{u, NBR}$ é a força resistente de aderência;

f_c é a resistência à compressão do concreto;

ϕ é o diâmetro da barra de ancoragem;

h_{ef} é o comprimento necessário de ancoragem segundo a ANBT NBR 6118 (2014), conforme a Figura 13.

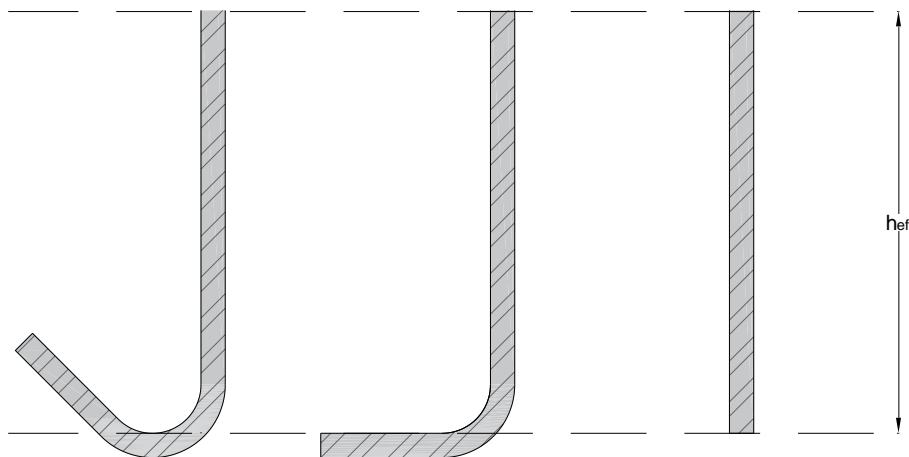


Figura 13 - comprimento de ancoragem

2.6.2. ACI 318:2014 – BUILDING CODE REQUIREMENTS FOR STRUCTURAL CONCRETE AND COMMENTARY

O ACI 318 (2014) possibilita calcular o comprimento total de ancoragem a partir da tensão de escoamento, ou vice-versa. Para barras retas, o ACI por meio do seu item 25.4.2.3 permite o cálculo do comprimento de ancoragem da barra por meio da relação abaixo.

$$l_d = \left[\frac{f_y}{1,1 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c}} \cdot \frac{\psi_t \cdot \psi_e \cdot \psi_s}{(c_b + k_{tr})} \right] d_b$$

Onde:

l_d é o comprimento de ancoragem;

f_y é a tensão de escoamento da barra, em Mpa;

f'_c é a resistência à compressão do concreto, em Mpa;

c_b é o menor valor entre: a) distância do centro da barra à superfície de concreto mais próxima;

b) metade do espaçamento centro-a-centro entre duas barras de ancoragem, mm;

d_b é o diâmetro nominal da barra, mm;

k_{tr} é o índice de armadura transversal

$$k_{tr} = \frac{40 \cdot A_{tr}}{s \cdot n}$$

“ A_{tr} ” é a área de toda seção da armadura complementar que atravessa a seção crítica, dentro de um espaçamento “s”, mm².

n é o número de barras observadas ao longo do possível plano de divisão.

Observações:

l_d não deve ser inferior a 300 mm;

$\frac{(c_b + K_{tr})}{d_b}$ não deve ser superior a 2,5;

$\psi_t = 1,3$ se a armadura horizontal for posicionada tal que mais de 3cm de concreto fresco lançado na estrutura ficar por baixo dessa armadura. Caso contrário, $\psi_t = 1,0$;

$\psi_e = 1,5$ para barras revestidas de epóxi, barras duplas revestidas de zinco e epóxi, ou fios revestidos de epóxi, *com cobertura inferior a 3db, ou ainda com espaçamento livre de barras inferior a 6db*. Para todas as outras barras revestidas de epóxi, revestidas de zinco e epóxi, ou fios revestidos de epóxi;

$\psi_e = 1,2$. Para barras não revestidas ou zincado (galvanizado);

$\psi_e = 1,0$;

O produto $\psi_e \cdot \psi_t$ não deve ser maior que 1,7;

$\psi_s = 0,8$ para barras de bitola 20 mm ou inferior; Caso contrário, $\psi_s = 1,0$.

Para concreto leve, λ deve ser inferior a 0,75. Para concreto convencional, $\lambda = 1,0$.

Quando se tratar de barras com gancho, o ACI estabelece outra relação simplificada da Equação 2.8, como é observado abaixo.

$$l_{dh} = \left(\frac{0,24 \cdot \psi_e \cdot f_y}{\lambda \cdot \sqrt{f'_c}} \right) \cdot d_b$$

Onde:

l_{dh} é o comprimento de ancoragem de ganchos padronizados. De salientar que de acordo com o ACI 318 (2014) em seu item 25.4.3.1, a relação acima fornece a ancoragem medida desde a seção crítica da peça até a ponta do gancho.

f_y é a tensão de escoamento da barra, em Mpa;

f'_c é a resistência à compressão do concreto, em Mpa;

d_b é o diâmetro nominal da barra, mm;

$\psi_e = 1,2$ para barras revestidas de epóxi. Caso contrario usa-se o valor 1,0;

$\lambda = 0,75$ para concreto leve (peso específico baixo), e valor unitário para outros casos;

O comprimento de ancoragem pode ser modificado, conforme a tabela 25.4.3.2 do ACI 318 (2014).

A resistência ao arrancamento é dependente do diâmetro da barra, do comprimento de ancoragem, do cobrimento e da resistência do concreto à compressão. Para o caso de barras com o diâmetro menor que 32 mm, como é o caso dos ensaios que serão tratados mais adiante, em situação de boa aderência, e ancoradas em peças de concreto com resistência à compressão inferior a 55 MPa, sua resistência ao arrancamento pode ser estimada pela seguinte formulação:

$$T_{u, ACI} = \frac{0,265 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot \left(\frac{c_b}{\phi} \right) \cdot \phi \cdot \pi \cdot h_{ef}}{\alpha_1}$$

Onde:

$\left(\frac{c_b}{\phi} \right)$ não pode ultrapassar o valor de 2,5.

h_{ef} é o comprimento necessário de ancoragem segundo o ACI 318 (2014), definido de forma similar à NBR 6118 (2014).

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A fim de se obter melhores resultados, os experimentos devem ser feitos em peças de dimensões reais, o que não acontece geralmente devido ao alto custo envolvido e à infraestrutura que seria necessária colocar no laboratório para suportar a estrutura em estudo. Sendo assim, os ensaios são feitos em peças de menores dimensões. O experimento tem como objetivo principal analisar o comportamento das barras ancoradas quando submetidas à tração. Durante os experimentos será também avaliado o comportamento dessas barras quando da existência de armadura complementar. Para analisar este último, serão moldados espécimes com mesmos parâmetros, porém uns contendo armadura complementar, e outros não.

Para efeitos de comparação, serão moldados também espécimes contendo barra não dobrada (conector pré-instalado), mas contendo armadura complementar.

As barras foram dispostas de várias formas: reta, dobradas em 90° e em 135°, sendo que todos os espécimes contendo as barras retas tinham armadura complementar.

3.2. CARACTERÍSTICAS DOS ESPÉCIMES ENSAIADOS

Foram ao todo 9 espécimes ensaiados, cada um deles contendo uma barra ancorada, com diâmetro nominal de 10,0 mm. Essas barras seriam ancoradas a um comprimento de embutimento efetivo de 60 mm (h_{ef}), e as vigas possuem dimensões iguais a 350 mm de largura, 900 mm de comprimento e 200 mm de altura. Cada espécime tinha uma disposição diferente das barras de ancoragem.

Dos 9 espécimes, 3 deles contém barras de ancoragem reta (sem gancho), 4 contém a barra de ancoragem com gancho de 90° (barra em “L”) e os restantes 2 com barras de ganho 180° (barra em “J”). Para que fosse possível analisar a alternativa da armadura complementar, para cada disposição da barra de ancoragem foi feito um ensaio contendo armadura complementar, e outro sem armadura complementar. Todas as armaduras complementares tinham inclinação de 90° em relação à barra da armadura ancorada verticalmente.

Vale ressaltar que os ganchos das barras respeitaram o EUROCODE 2 (2004), item 8.4, 8.5 e 8.6 no que diz respeito ao comprimento do perímetro do gancho, seu raio interno, e o comprimento mínimo do trecho reto após o gancho.

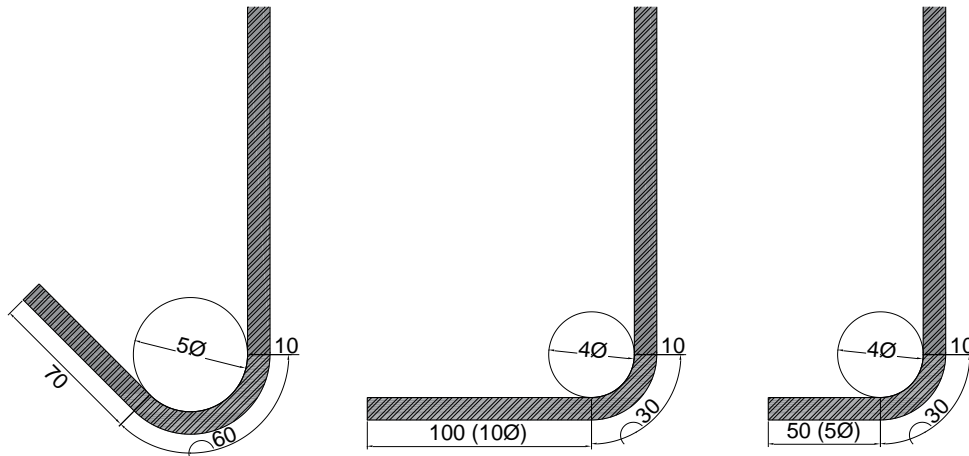


Figura 14 - Ganchos e dobras segundo o EUROCODE 2 (2004)

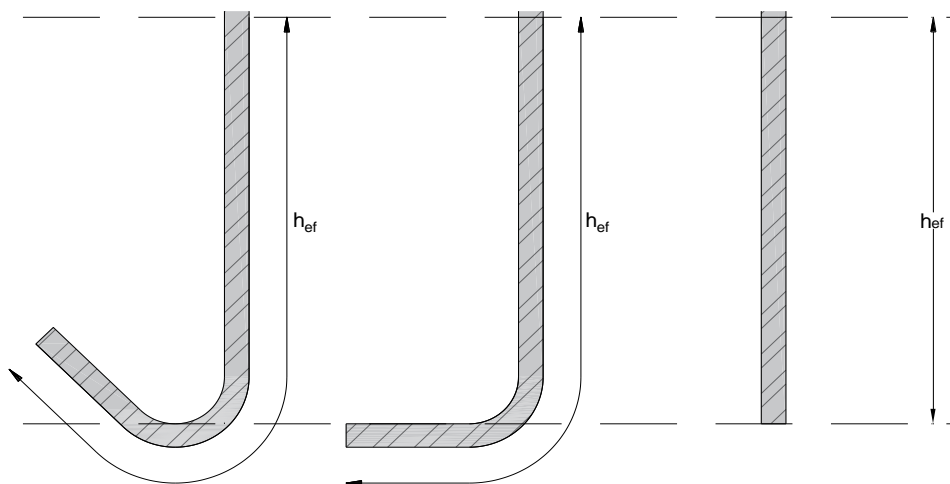


Figura 15 - Comprimento de ancoragem caso fosse usado o EUROCODE 2 (2004)

Como forma de facilitar a visualização das propriedades de cada espécime, bem como organizar de maneira adequada os dados e futuros resultados para questões de comparação, usou-se a nomenclatura observada na Tabela 1. O detalhamento geral das armaduras dos espécimes será mostrado abaixo nas Figuras 16 a 23 que se segue.

Tabela 1 - Características dos espécimes da 1ª etapa de ensaios

Espécime	Geometria do espécime		Armadura de ancoragem			Armadura de flexão		
	d (mm)	h _{real} (mm)	h _{ef} (mm)	d _s (mm)	Tipo de ancoragem	Nº de barras	ϕ _f (mm)	ρ (%)
J-60-5∅	175,00	63,00	60,00	10,00	Gancho "J"	4	10,00	1,24
J-60-5∅-T	180,00	62,00						
L-60-5∅	180,00	71,00			Gancho "L"			
L-60-5∅-T	175,00	64,00						
L-60-10∅	180,00	68,00			Reto com armadura complementar			
L-60-10∅-T	183,00	66,00						
W-60-6.3T	181,00	66,00						
W-60-16.0T	180,00	64,00						
W-60-8.0TT	178,00	61,00						
Obs.:								
Bw = 350 mm			H = 200 mm		L = 900 mm		f _c = 34,70 MPa	
$A - h_{ef} - l_b - \#T$								
A – Indica o tipo de gancho usado no espécime em questão;								
h _{ef} – Comprimento de embutimento efetivo: todos com 60 mm;								
l _b – Comprimento de ancoragem após o gancho;								
T – Existência ou não de armadura transversal (# representa a bitola da barra T);								

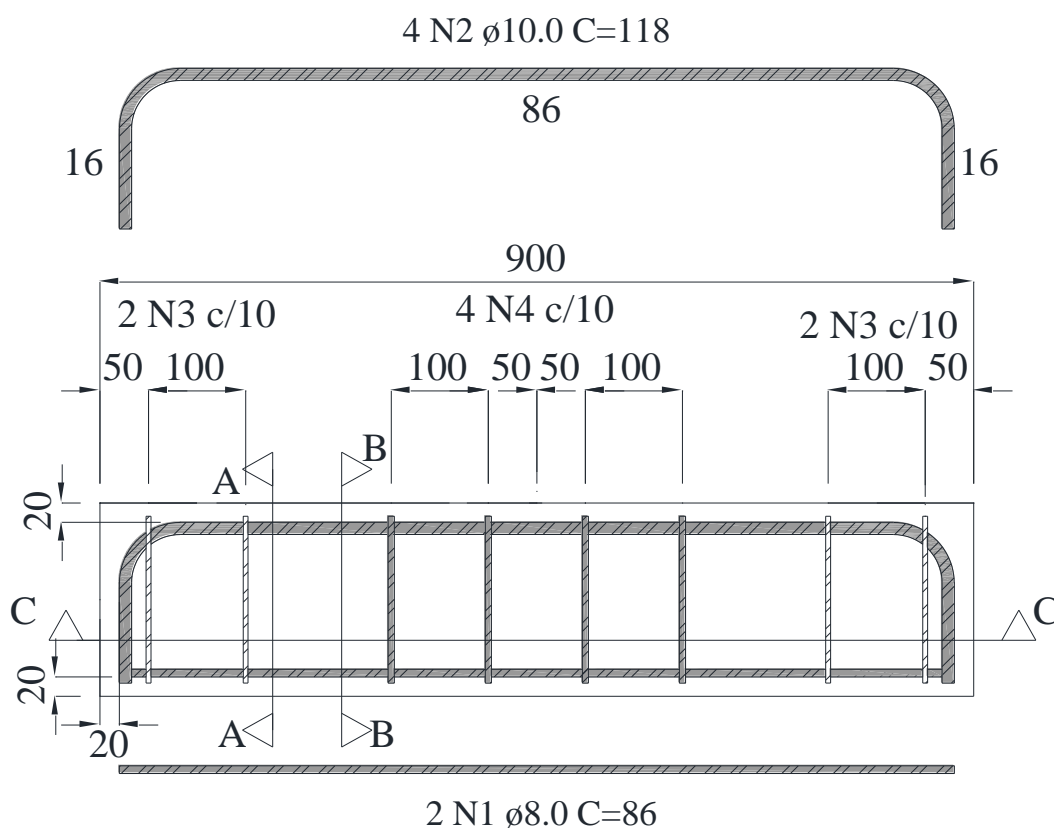


Figura 16 – Detalhamento longitudinal do espécime da primeira etapa de ensaios

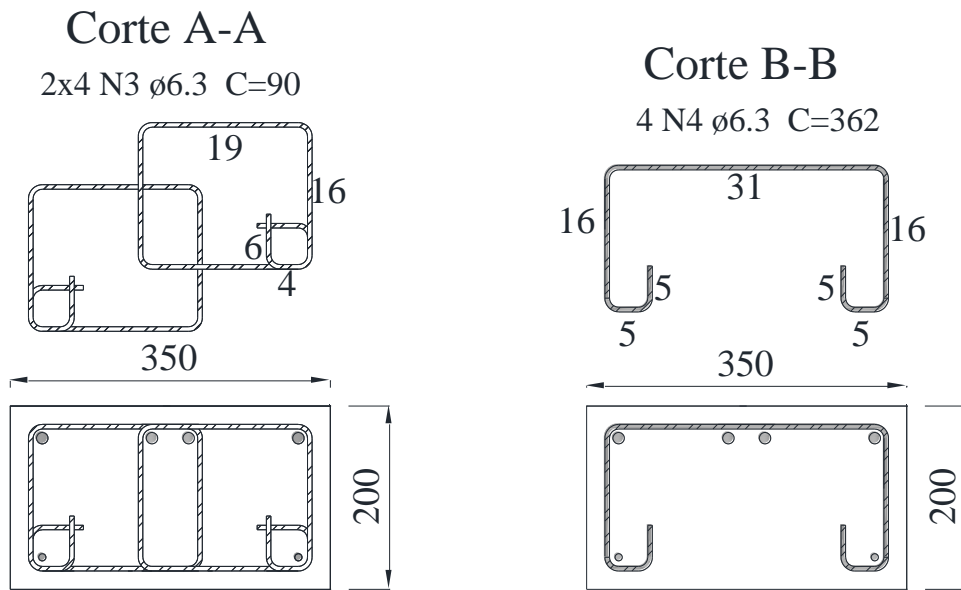


Figura 17 - Detalhamento transversal do espécime da primeira etapa de ensaio

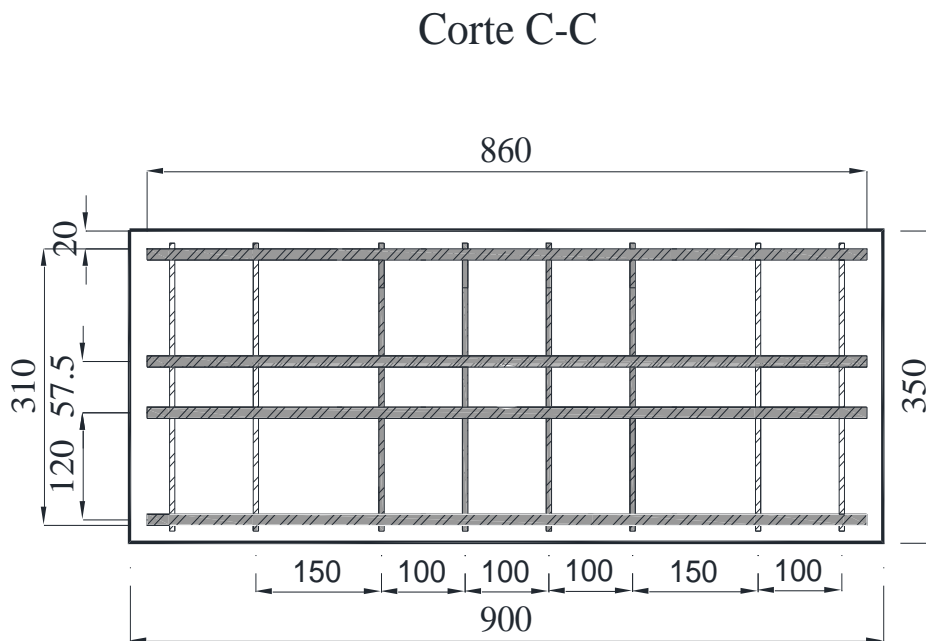


Figura 18 - Armadura de flexão do espécime da primeira etapa

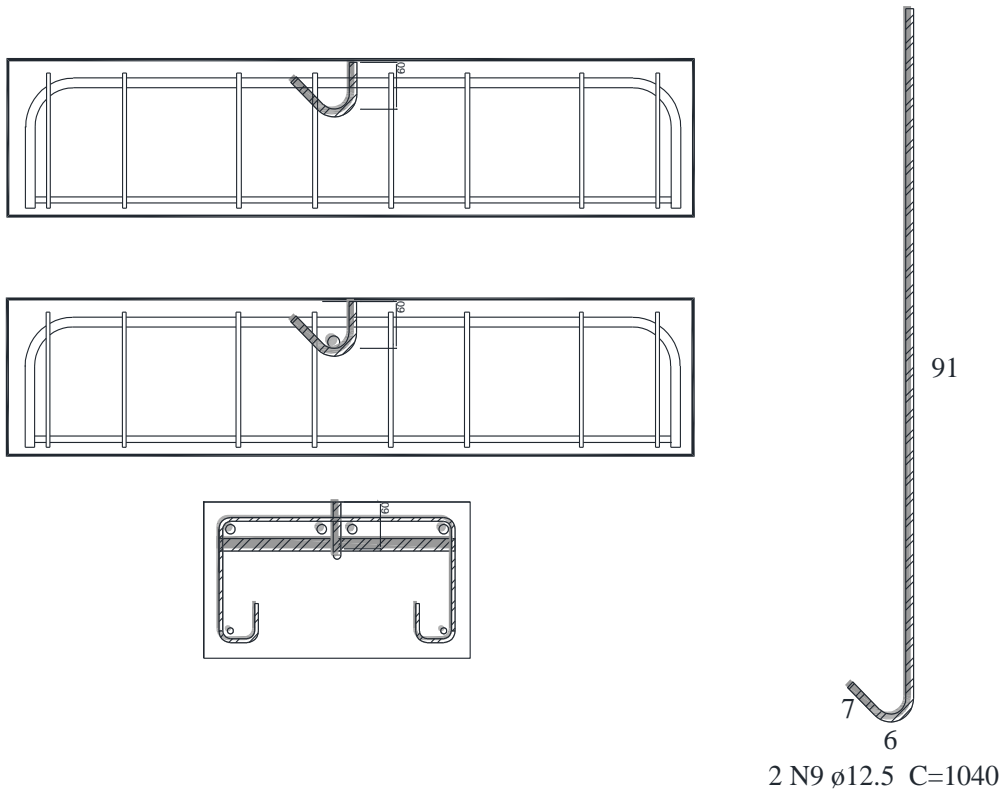


Figura 19 - Ancoragem com gancho "J"

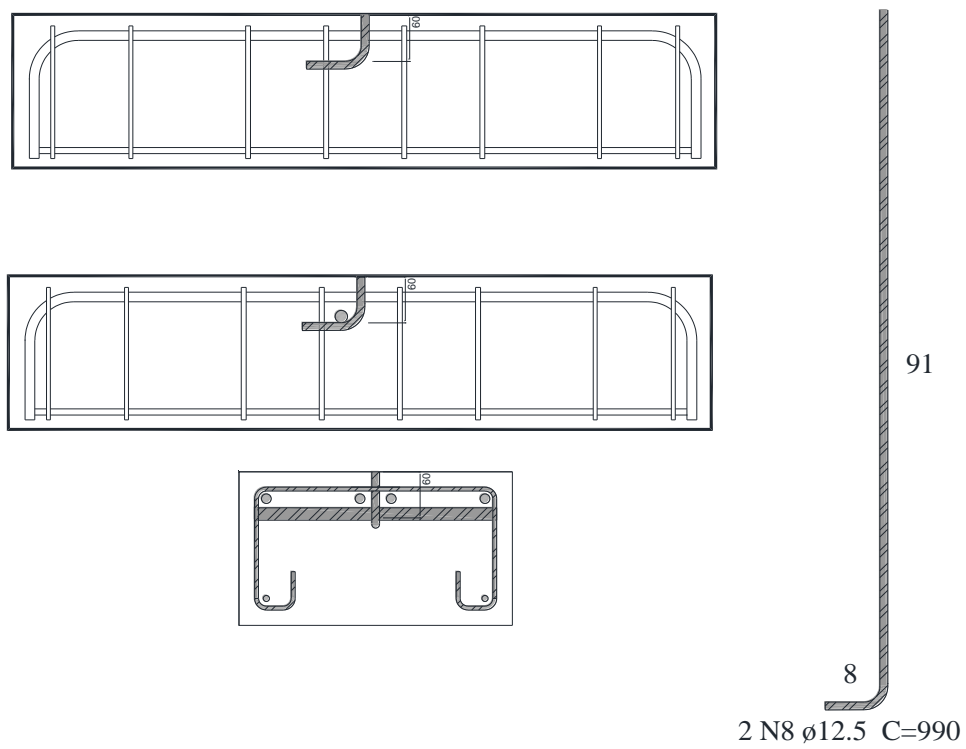


Figura 20 - Ancoragem com gancho "L" (5ϕ após a curvatura)

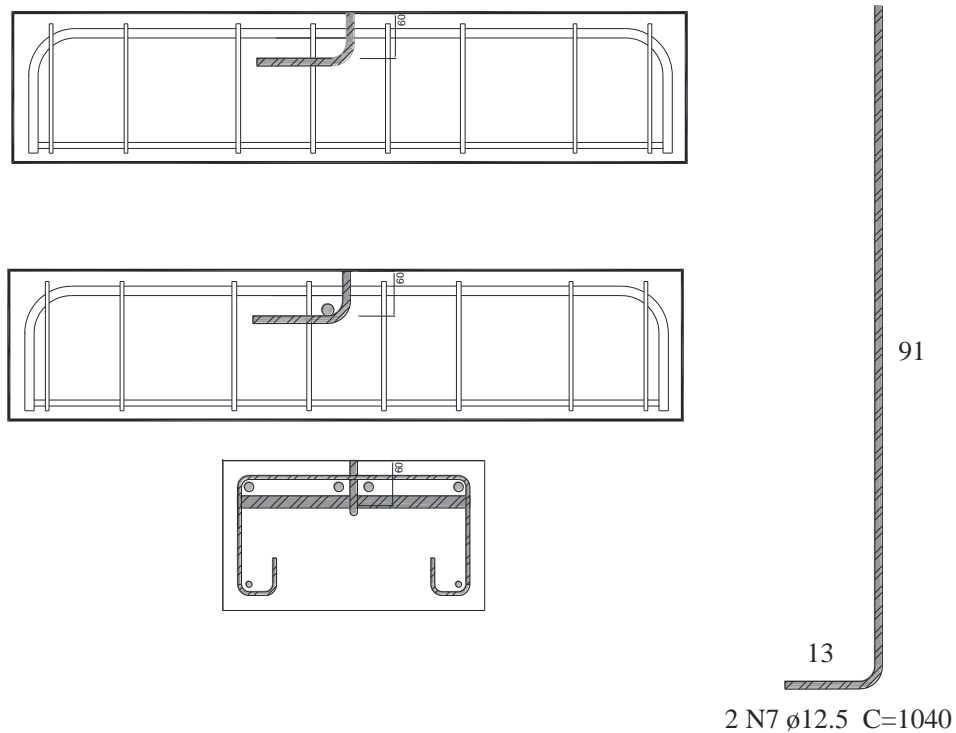


Figura 21 - Ancoragem com gancho "L" (10ϕ após a curvatura)

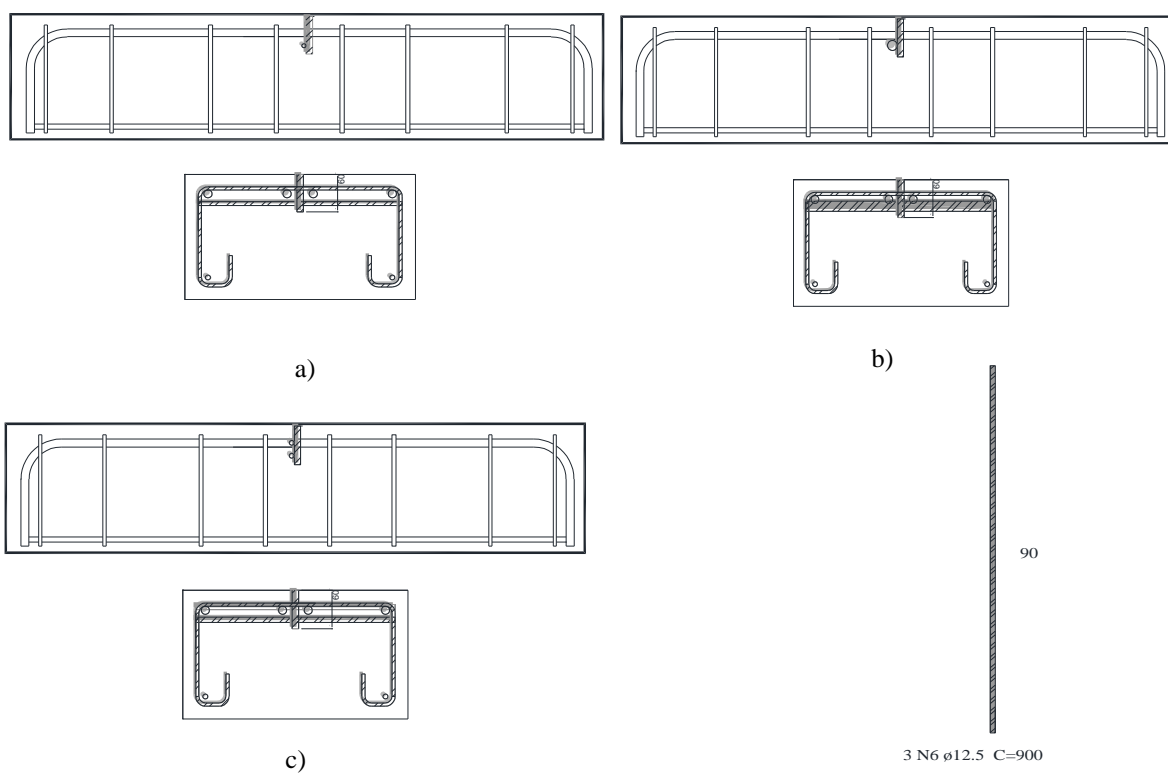


Figura 22 - Ancoragem com gancho reto com armadura transversal: a) uma barra de 6.3 mm; b) uma barra de 16.0 mm; c) duas barras de 8.0 mm

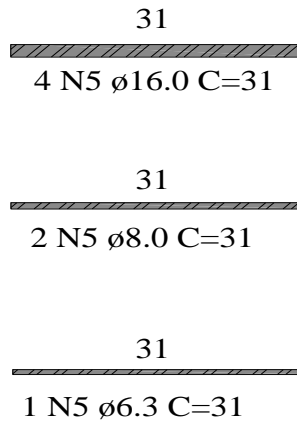


Figura 23 - Barras da armadura complementar

3.3. MATERIAIS

3.3.1. Concreto

3.3.1.1. Composição, concretagem e cura

Para a confecção dos espécimes, o concreto usado atingiu uma resistência à compressão, após 28 dias, de 34,70 MPa.

Foram concretados os 9 espécimes e corpos de prova para ensaios de resistência à compressão, para controle de qualidade do material. No dia em que a concretagem foi feita, as armaduras de flexão da viga e de ancoragem já estavam devidamente posicionadas. A cura foi executada durante o tempo necessário para que o espécime adquirisse plena resistência.

3.3.1.2. Propriedades mecânicas

Os corpos de prova que foram concretados no mesmo dia que os espécimes serviram para a execução do ensaio de resistência à compressão após 28 dias. Para tal ensaio, foram obedecidas as recomendações impostas pela NBR 5739 (2007). Os corpos de prova eram cilíndricos, com dimensões 100 x 200 mm (diâmetro e altura, respectivamente) e foram submetidos ao ensaio de compressão no laboratório de engenharia civil da Universidade de Brasília, campus Darcy Ribeiro (SG12)

3.3.2. Propriedades mecânicas do aço

Foram retirados 3 corpos-de-prova para cada um dos diâmetros usados na confecção dos espécimes (armadura de flexão, cisalhamento e da ancoragem). Os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de tração axial, no laboratório de engenharia civil da Universidade de Brasília, campus Darcy Ribeiro (SG12), respeitando as recomendações impostas pela NBR 6892 (2015).

3.4. CONFECÇÃO DOS ESPÉCIMES

3.4.1. Forma

As formas foram executadas umas do lado das outras com chapas de madeirit, que seriam travadas e enrijecidas com ripas de madeira nas suas laterais. Sobre estes foi confeccionado um pórtico com a função de segurar as barras de ancoragem no momento da concretagem, para que evitasse eventuais deslocamentos dessas barras. A imagem abaixo ilustra a disposição final das formas, com a armadura já posicionada.



Figura 24 - Disposição das formas já armadas

3.4.2. Armadura de flexão, cisalhamento e complementar dos espécimes

As barras de aço utilizadas nos espécimes para resistir à flexão foram de CA-50, com bitolas de 8.0 e 12.5 mm. Para armadura de cisalhamento e armadura complementar, foram adotadas barras de bitolas 6.3, 8.0, e 16.0 mm.

3.4.3. Armadura de ancoragem

Para instalação das armaduras de ancoragem, foi pré-estabelecido no espécime a localização destes, e lá foi colocado isopor, o que ajudaria depois na leitura do deslizamento da barra. A leitura desse deslizamento foi realizada por defletômetros do tipo LVDT (serão explicados na seção 3.5.1).

As barras passaram por uma série de ensaios de tração como forma de controle de qualidade, pois uma pequena falha nesse material, o espécime teria de ser descartado. As dobras das barras que teriam gancho, bem como os comprimentos mínimos necessários para uma boa aderência foram executadas seguindo as recomendações do EUROCODE 2 (2004). Os detalhes das barras de ancoragem usadas, bem como a configuração final do espécime antes da concretagem podem ser vistos na figura abaixo.



Figura 25 -Barras dobradas

3.5. INSTRUMENTAÇÃO

Para uma boa análise do comportamento do espécime como um todo, estes foram instrumentados com componentes tais que pudessem fazer uma leitura precisa e contínua, sem que interferisse no comportamento do espécime, ou nem que alterasse as propriedades iniciais de tais. Os componentes permitiram uma leitura durante todo o andamento do ensaio, a medida que a carga aplicada fosse aumentando até que houvesse ruptura do espécime. Todos os dados foram lidos por meio do software Catman, sendo que estes foram conectados ao software por meio de módulos Spider8.

3.5.1. Deslocamento vertical

Os deslocamentos foram determinados com o uso de defletômetros do tipo LVDT (Linear Variable Differential Transformer), instalados a volta do espécime. Foram usados 6 LVDT's a volta de todo o aparato. Os LDTV estavam apoiados em pequenos suportes metálicos que forneciam apenas aos LVDT's a possibilidade de mobilidade, para que fossem feitas leituras acuradas dos deslocamentos. Para se obter o deslizamento da armadura de ancoragem, foi necessário colocar dois LVDT's, um na parte inferior da viga de concreto tocando a armadura de ancoragem, e outro na parte superior da peça de concreto, para que fosse feita depois uma diferença dos deslocamentos, a ponto de se obter um valor acurado de deslizamento da barra da armadura de ancoragem.



Figura 26 - Defletômetro LVDT (Laboratório de Estruturas, UNB)

3.5.2. Deformação nas armaduras

O controle das deformações das armaduras, tanto do lado de fora do espécime como no de dentro, foi efetuado usando extensômetros elétricos. Foram usados 2 extensômetros para cada espécime: 1 na armadura de flexão; 1 na armadura de ancoragem.

Um dos aspectos a ser considerado é que o extensômetro de flexão seria posicionado em apenas uma barra, sendo essa barra a que se localizava mais próxima da armadura de ancoragem. Como a força de arrancamento se dá no meio do espécime como um carregamento centrado, o extensômetro conseqüentemente localizou-se próximo num ponto dessa barra o qual se situava próximo à barra de ancoragem, pois esperou-se que naquele local fosse observada maior valor de flexão.

O extensômetro situado na armadura de ancoragem tinha como objetivo auxiliar na determinação do modo de ruptura do espécime. Ou seja, serviria para determinar se o espécime rompe por esmagamento do concreto, ou por escoamento da barra de ancoragem.



Figura 27 – Montagem do extensômetro

3.6. Sistema de ensaio

Para execução do ensaio primeiramente são posicionados dois grandes blocos, distanciados entre si para a instalação do espécime. Antes da colocação do espécime são colocados pequenos roletes metálicos por cima de chapas metálicas que serviriam de apoios de 1º e 2º gênero. Em seguida é colocado o espécime, que passa por uma pequena limpeza para remover qualquer sujeira que tenha adquirido quando armazenado. Uma vez feita a limpeza, é feita a marcação das fissuras que já se encontram no espécime, para distinguir das fissuras que posteriormente aparecerão durante o ensaio. Por cima da viga de concreto é colocada uma viga metálica com o auxílio de um pórtico, e esta por sua vez fica apoiada por cima de dois roletes metálicos (apoios de 1º e 2º gênero). Por cima da viga metálica será colocada um cilindro hidráulico que é acionado por meio de uma bomba hidráulica. Por cima do cilindro é colocada uma célula de carga com o intuito de fazer a leitura periódica da carga sendo aplicada na barra de ancoragem. Este esquema é mostrado nas figuras abaixo.

Os dados foram adquiridos pelos instrumentos de deslocamento e deformação e transferidos por meio dos spiders⁸, para o software Catman, cujos resultados serão apresentados na seção a seguir.

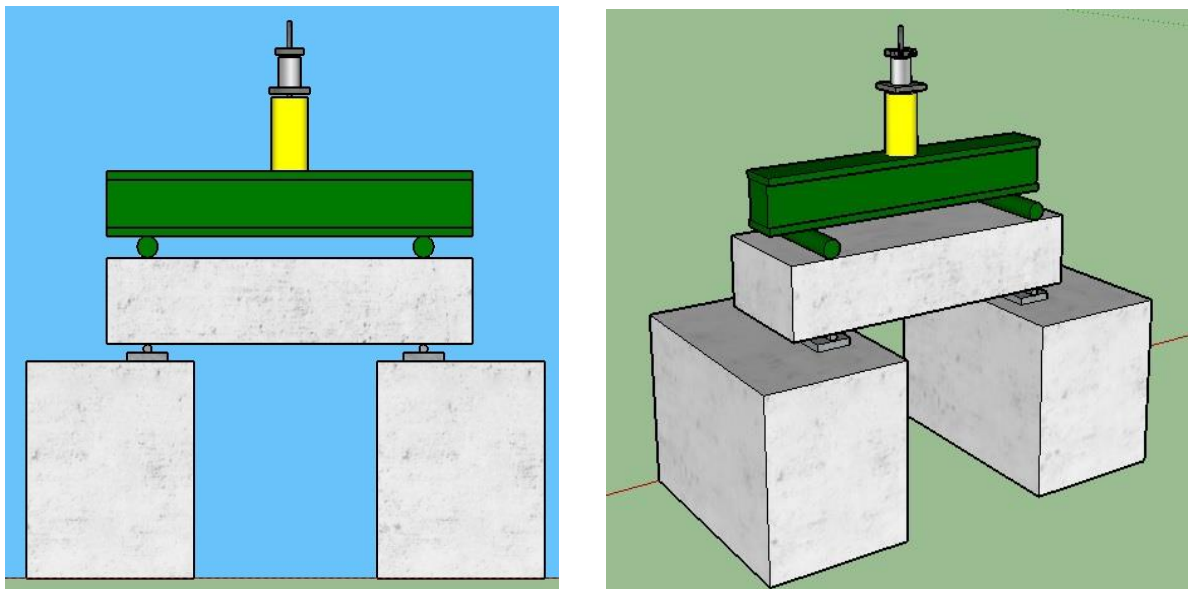


Figura 28 - Vista frontal e em 3D do ensaio (SketchUP)



Figura 29 - Imagem real do ensaio.

4. RESULTADOS

Nesta seção serão mostrados os resultados obtidos nos ensaios alguns, sendo estes a resistência à tração da barra de aço usada para ancoragem, os escorregamentos das barras de ancoragem cujas leituras foram feitas pelos LVTD's, e as deformações lidas por meio dos extensômetros instalados na armadura de ancoragem (na parte externa e interna da barra) e na de flexão.

4.1. Resistência à tração da barra de ancoragem

A tabela 2 abaixo mostra os resultados obtidos no ensaio de tração axial das barras de 10mm usadas como armadura de ancoragem na confecção dos espécimes.

Tabela 2 - Ensaio de tração axial da barra de aço de 10 mm

Corpo de prova	Comp. inicial (mm)	Peso (g)	Comp. Final (mm)	Seção (mm ²)	Força no escoamento (N)	Força máxima (N)	Módulo (GPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão máxima (MPa)	ϵ_{ys} (%)
CP1	592,70	361,40	117,50	78,54	44210,43	53427,00	201,21	562,71	680,25	2,80
CP2	600,50	364,40	117,00	78,54	44510,72	53009,92	219,68	566,53	674,94	2,58
CP3	608,00	373,50	116,70	78,54	43948,21	52623,36	194,46	559,37	670,02	2,88
Média	600,40	366,40	117,10	78,50	44223,12	53020,10	205,10	562,90	675,10	2,75

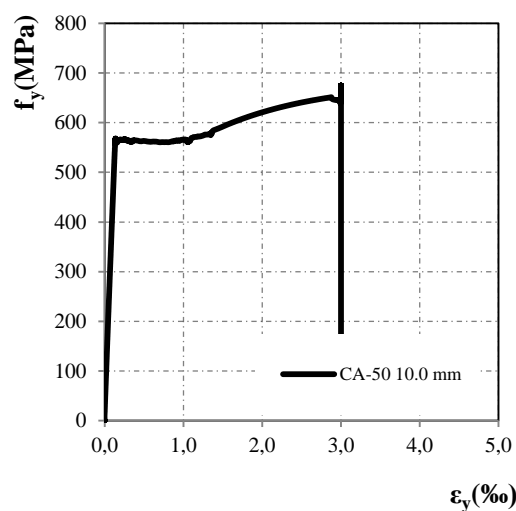


Figura 30 - Ensaio de tração axial da barra de aço de 10 mm

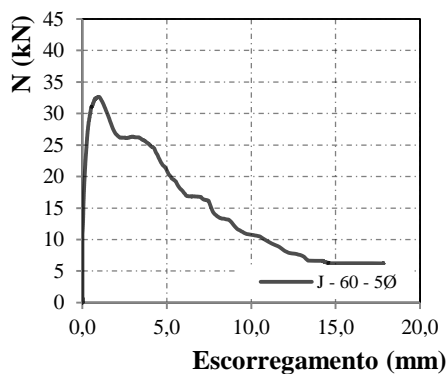
Foram ensaiados 3 corpos de prova com mesmas dimensões, e obteve-se uma tensão de escoamento média de 562,9 MPa. Esse valor é satisfatório, uma vez que se trata de uma barra de aço CA-50, que geralmente tem a tensão de escoamento média de 500 MPa. Dos três corpos de prova, a menor tensão de escoamento foi de 559,37 MPa, que levou a um módulo de elasticidade de 194,46 GPa.

Quanto ao módulo de elasticidade, a média dos três corpos de prova foi de 205,1 GPa.

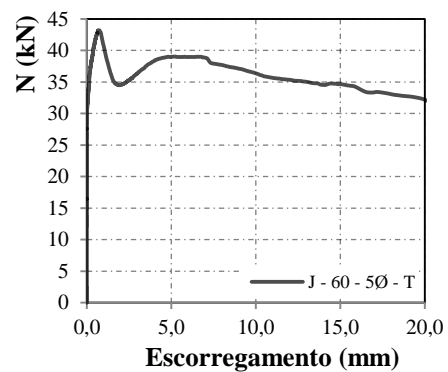
O mesmo ensaio foi realizado para as barras da armadura de flexão (12,5 mm), mas os resultados foram descartados, pois a máquina apresentou mau funcionamento, e não havia, na altura, um outro equipamento disponível para tal ensaio.

4.2. Escorregamento da barra de ancoragem

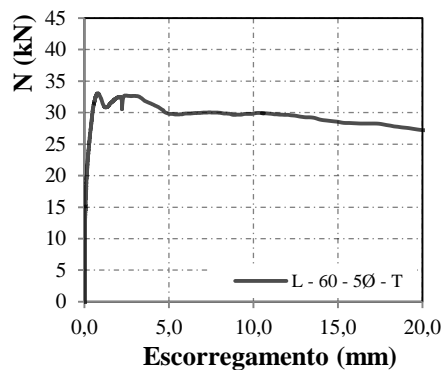
Nas figuras 31 e 32 são mostrados os comportamentos de cada uma das barras de ancoragem em cada espécime, desde o início da aplicação da carga até a ruptura deste.



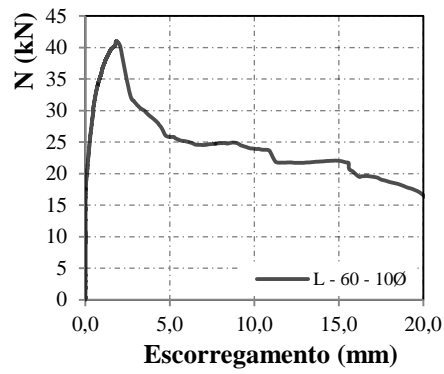
a) J-60-5Ø



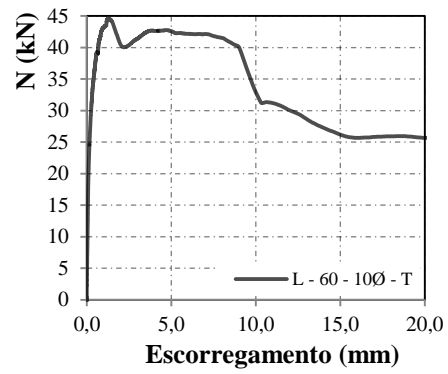
b) J-60-5Ø-T



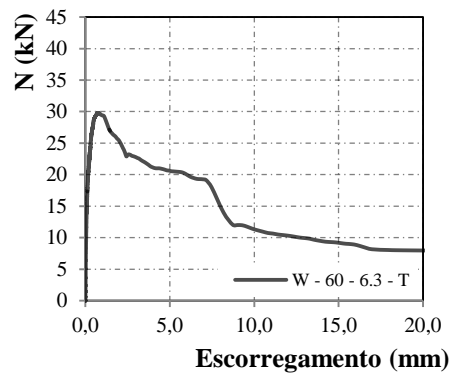
c) L-60-5Ø-T



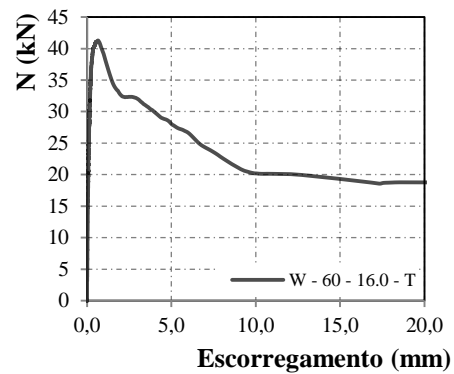
d) L-60-10Ø



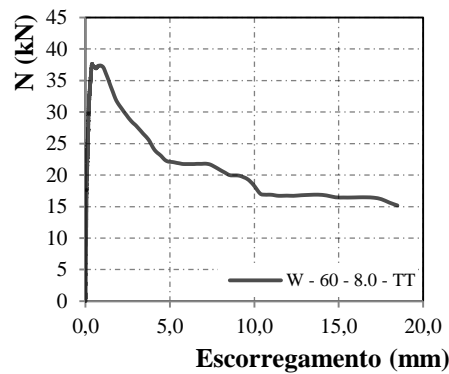
e) L-60-10Ø-T



f) W-60-6.3T



g) W-60-16T



h) W-60-8TT

Figura 31 – Escorregamento das barras ancoradas

Fazendo uma comparação entre o escorregamento de cada barra, nota-se a barra ancorada no espécime L-60-10Ø-T foi a que apresentou maior resistência ao escorregamento, uma vez que só apresentou de escorregamento quando a carga aplicada era cerca de 44,58 kN.

A barra a apresentar o segundo maior valor de resistência ao escorregamento foi o do espécime J-60-5Ø-T. Isto se deve tanto ao tipo de dobra na barra de ancoragem, como também pela existência de armadura complementar nos dois espécimes mencionados.

A influência do tipo de dobra da barra pode ser verificada pelo comportamento da barra ancorada no espécime W-60-6.3T, em que esta apresentou escorregamento com uma carga de 30,54kN, cerca de 31,49% inferior em relação a carga máxima verificada no espécime L-60-10Ø-T.

A figura 32 apresenta uma comparação entre todas as barras ancoradas nos espécimes no que diz respeito ao escorregamento destas em relação à carga aplicada.

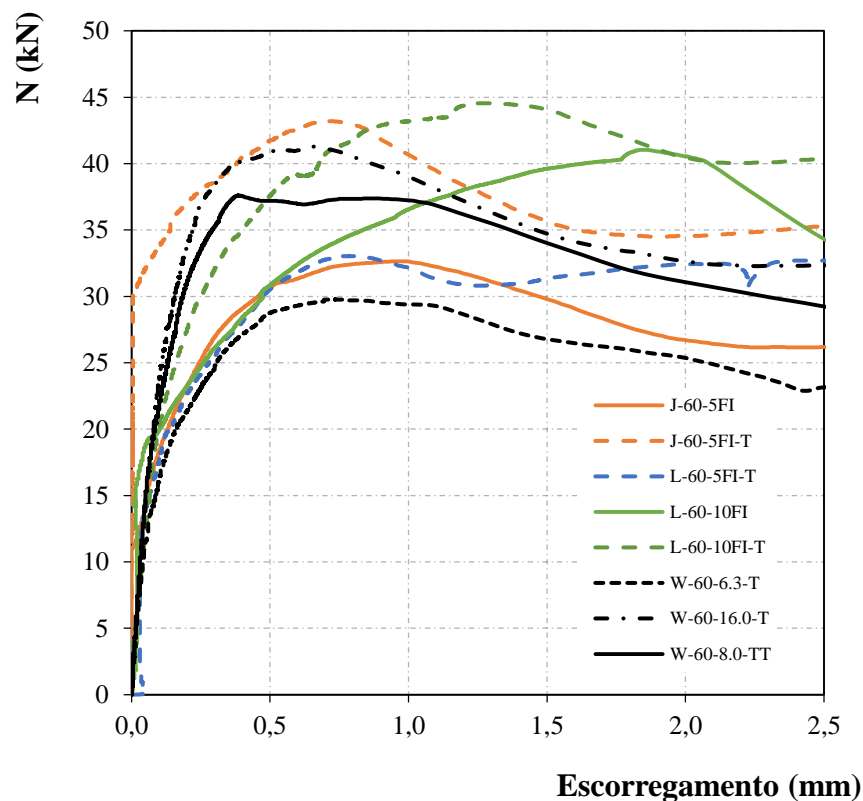


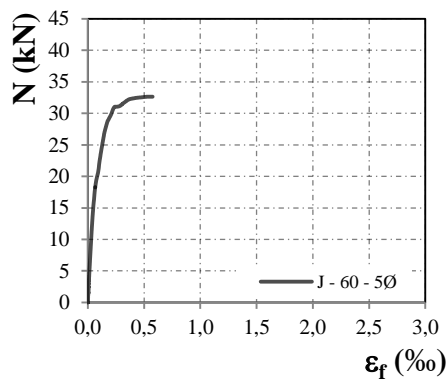
Figura 32 - Escorregamento das barras ancoradas – Comparação

Nota-se que os espécimes com barras ancoradas com a mesma configuração apresentaram o mesmo comportamento.

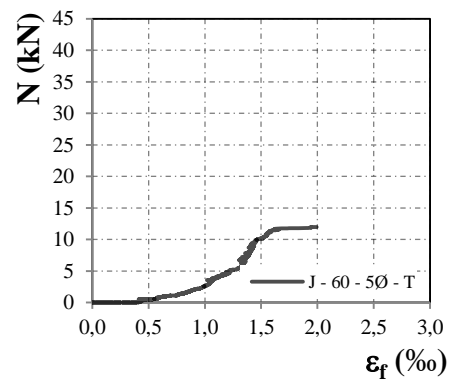
Os espécimes contendo armadura complementar tiveram um aumento na resistência ao escorregamento (fato observado nas duplas dos espécimes J-60-5 \emptyset e J-60-5 \emptyset -T; L-60-10 \emptyset e L-60-10 \emptyset -T. Para os espécimes contendo barras ancoradas sem gancho, o aumento da resistência ao arrancamento é consequência do diâmetro das barras usadas na armadura complementar.

4.3. Deformações na armadura de flexão

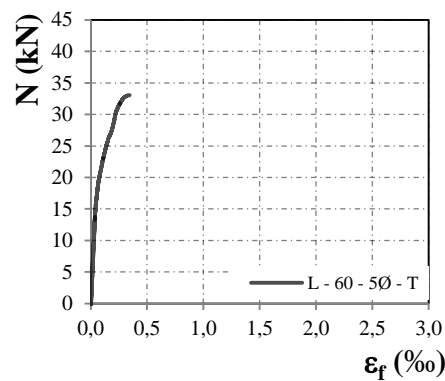
Nas figuras 33 e 34 são mostradas as deformações lidas pelos extensômetros instalados na armadura de flexão, desde a aplicação da carga até a ruptura do espécime ou perda do extensômetro.



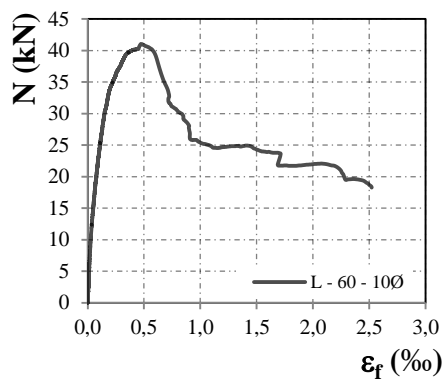
a) J-60-5 \emptyset



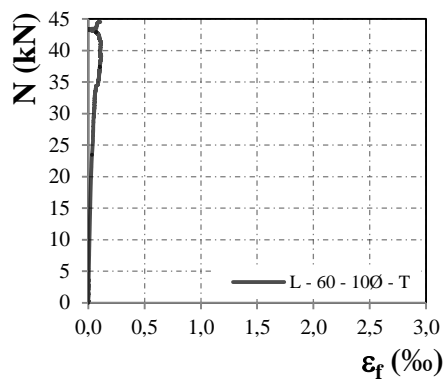
b) J-60-5 \emptyset -T



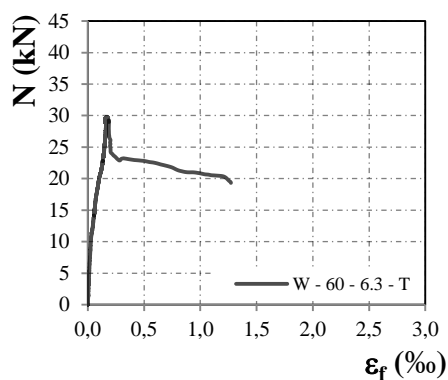
c) L-60-5 \emptyset -T



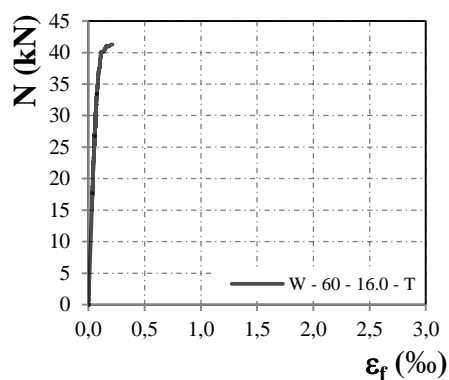
a) L-60-10Ø



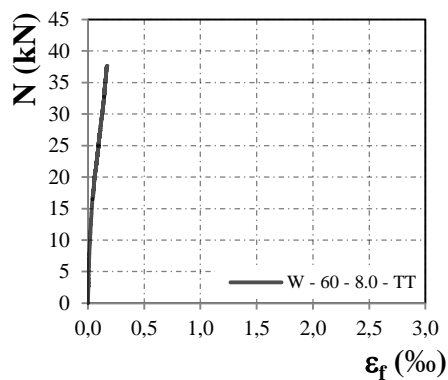
b) L-60-10Ø-T



c) W-60-6.3T



d) W-60-16T



e) W-60-8TT

Figura 33 – Deformação armadura de flexão

Nota-se que maior parte das barras de flexão trabalharam no regime elástico, com a exceção nos espécimes L-60-10Ø, W-60-6.3T e J-60-5Ø-T. Nos dois primeiros espécimes mencionados,

as barras apresentaram escoamento, enquanto que o espécime J-60-5Ø-T teve de ser desconsiderado nesta análise pois teve quebra do extensômetro, pelo que o gráfico mostra resultados incoerentes (o gráfico mostra uma deformação de 2,0‰ com apenas 12kN de carga aplicada)

A barra que apresentou maior rigidez foi do espécime L-60-10Ø-T, deformando apenas 0,2‰. Logo após essas deformações, os extensômetros apresentaram dados incoerentes, o que indica possível quebra destes durante a realização do ensaio.

A figura 34 abaixo mostra uma comparação entre as deformações da armadura de flexão de cada um dos espécimes.

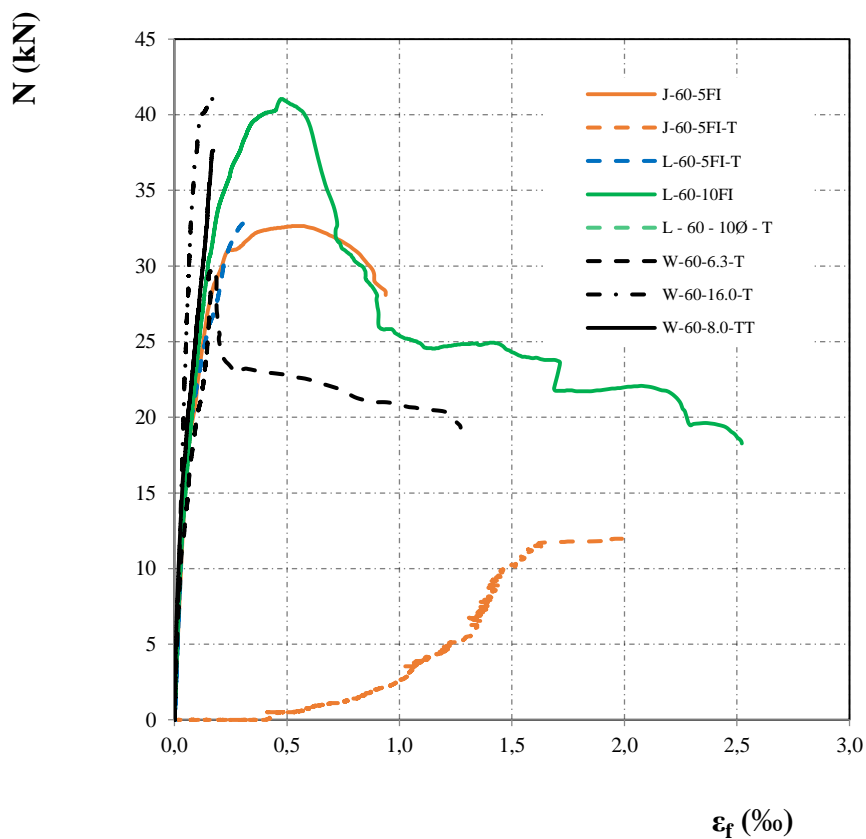
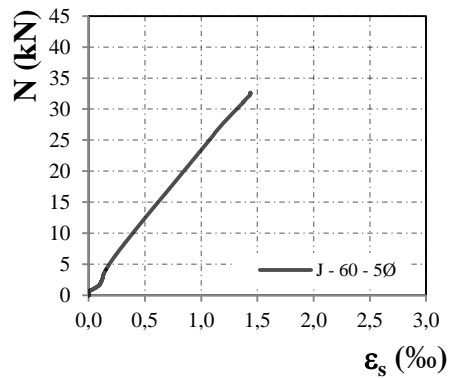


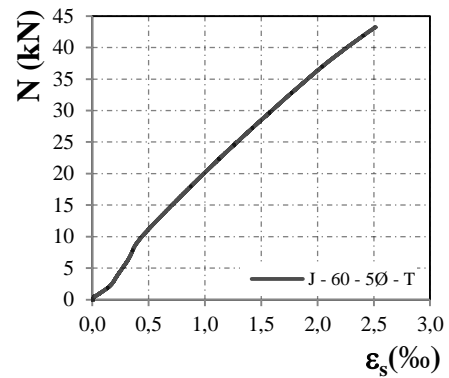
Figura 34 – Deformação armadura de flexão – Comparação

4.4. Deformações na armadura de ancoragem

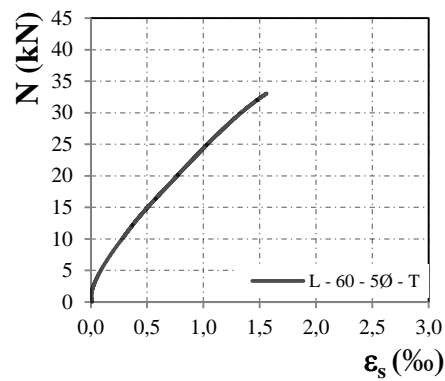
As figuras 35 e 36 mostram as leituras feitas pelos extensômetros localizados na parte externa do espécime ensaiado.



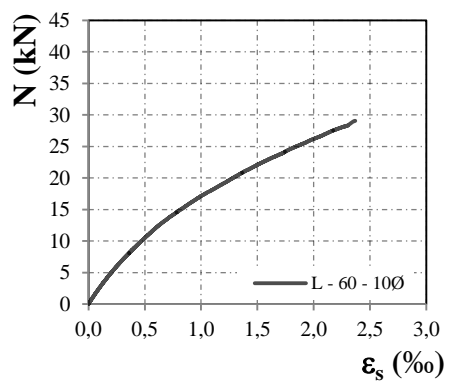
a) J-60-5Ø



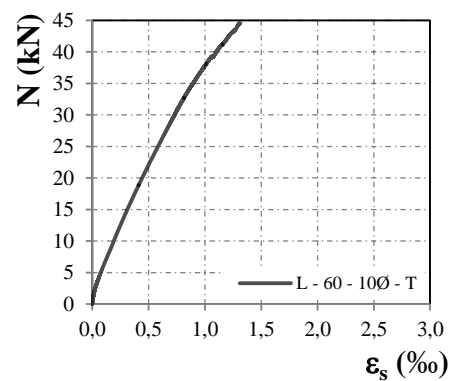
b) J-60-5Ø-T



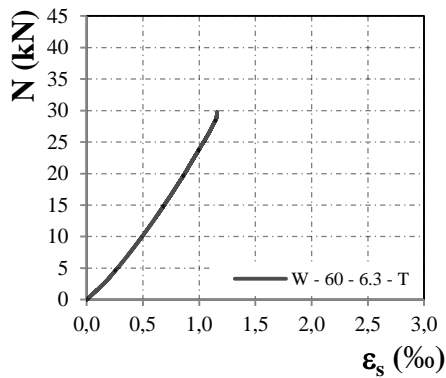
c) L-60-5Ø-T



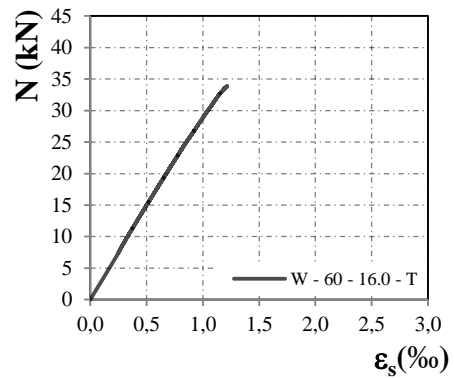
f) L-60-10Ø



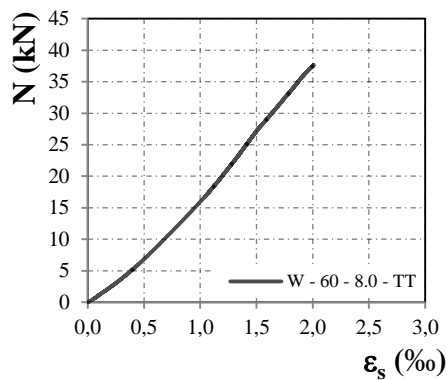
g) L-60-10Ø-T



h) W-60-6.3T



i) W-60-16T



j) W-60-8TT

Figura 35 - Deformação da armadura de ancoragem fora do concreto

Se for feita uma breve análise de todos os gráficos, consegue notar-se que todas as barras de ancoragem trabalharam no regime elástico, para todos os espécimes. Dentre as nove barras de ancoragem, a que apresentou maior rigidez (determinada pela inclinação do gráfico de Força x Deformação) foi a do espécime L-60-10Ø-T.

A barra que apresentou maior deformação foi a do espécime L-60-10Ø, com um valor muito próximo de 2,5%. Ou seja, a barra ficou muito próxima de começar a escoar, sendo que a literatura considera como deformação limite de escoamento no valor de 2,0%.

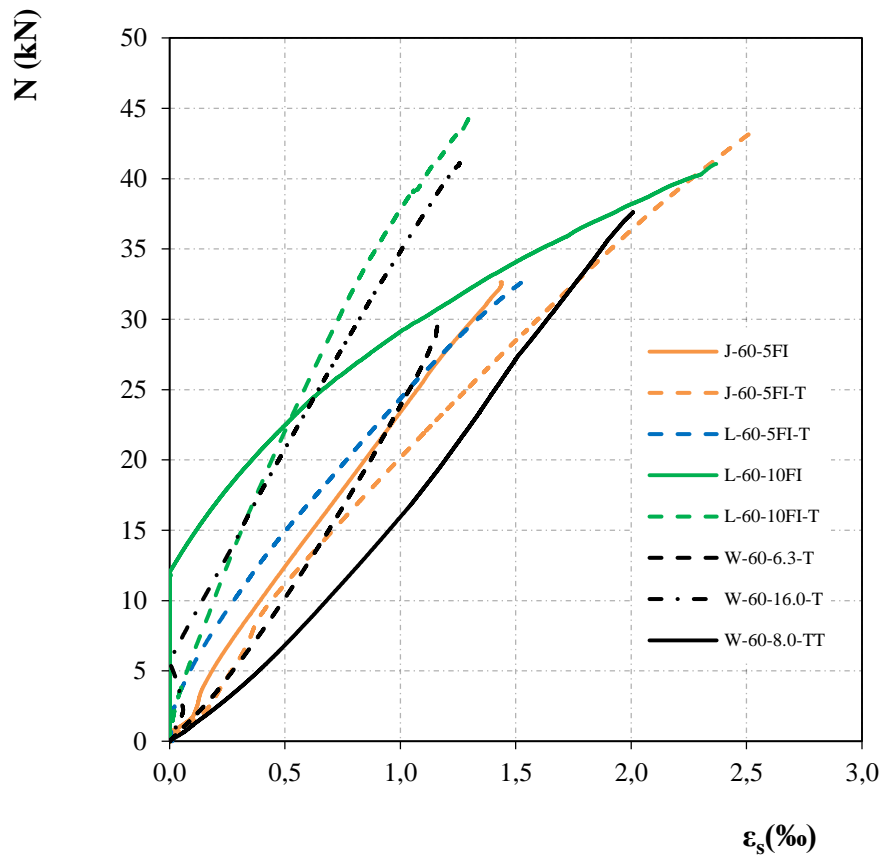


Figura 36 - Deformação da armadura de ancoragem fora do concreto – Comparação

Como será visto mais adiante, os resultados do espécime L-60-5 \emptyset não foram considerados, uma vez que durante o ensaio teve escorregamento brusco da respectiva barra.

4.5. Carga de ruptura

A tabela e o gráfico abaixo mostram a cargas de ruptura obtidas para cada um dos espécimes usados.

Tabela 3 - Carga de ruptura de cada espécime

Espécimes	d (mm)	h_{ef} (mm)	f_c (MPa)	\varnothing_s (mm)	Tipos de Ancoragem	N_u (kN)
J-60-5 ϕ	175,00	63,00	34,70	10,00	Gancho 45° com comp. de 5 ϕ	32,64
J-60-5 ϕ -T	180,00	62,00			Gancho 45° com comp. de 5 ϕ e uma barra transversal armada	43,20
L-60-5 ϕ	180,00	71,00			Dobra de 90° com comp. de 5 ϕ	45,30
L-60-5 ϕ -T	175,00	64,00			Dobra de 90° com comp. de 5 ϕ e uma barra transversal armada	33,06
L-60-10 ϕ	180,00	68,00			Dobra de 90° com comp. de 10 ϕ	41,04
L-60-10 ϕ -T	183,00	66,00			Dobra de 90° com comp. de 10 ϕ e uma barra transversal armada	44,58
W-60-6.3T	181,00	66,00			Barra reta com uma barra soldada de 6.3 mm	30,54
W-60-8.0TT	180,00	64,00			Barra reta com duas barras soldadas de 8.0 mm	37,62
W-60-16.0T	178,00	61,00			Barra reta com uma barra soldada de 16.0 mm	41,28

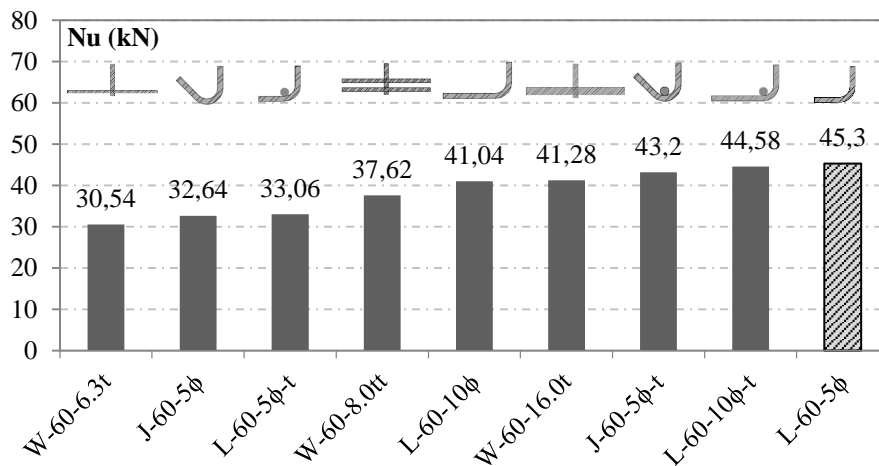


Figura 37 - Carga de ruptura

O espécime L-60-5 ϕ teve de ser descartado, pois a barra de ancoragem escorregou bruscamente no início do ensaio. Este, por sua vez retomado apenas para fins demonstrativos, tanto que ver que a carga de ruptura observada foi a maior dentre todos os espécimes, o que não deveria

acontecer. O ideal seria que esse espécime apresentasse carga de ruptura inferior que a do espécime L-60-5Ø-T.

Diante de tal descarte o espécime com maior carga de ruptura foi o L-60-10Ø-T, apresentado carga máxima de 44,58 kN, cerca de 1,38 kN superior em relação ao valor de carga de ruptura do espécime J-60-5Ø-T (43,2 kN). Ainda em relação ao espécime L-60-10Ø-T, é possível notar a influência da armadura complementar, uma vez que este apresentou um acréscimo de 3,54 kN em relação ao mesmo espécime sem armadura complementar (L-60-10Ø).

Em relação aos espécimes contendo barras ancoradas com ganchos 135°, o espécime J-60-5Ø-T apresentou uma carga de ruptura bem maior se for comparada com a do espécime contendo a mesma ancoragem, porém sem conter armadura complementar. O espécime J-60-5Ø apresentou carga de ruptura de 32,64 kN, ou seja, apenas 75,5 % da carga de ruptura lida para o espécime J-60-5Ø-T, uma vez mais evidenciando a influência da armadura complementar.

Em relação aos espécimes contendo barras ancoradas sem ganchos e armadura complementar, o que apresentou maior carga de ruptura foi o W-60-16.0T com cerca de 41,28 kN, enquanto que os espécimes W-60-8.0TT e W-60-6.3T apresentaram cargas de ruptura 37,62 kN e 30,54 kN, respectivamente. Fato do espécime W-60-16.0 possuir maior carga de ruptura em relação aos outros dois espécimes pode ser justificado pela alta rigidez da barra de 16mm usada como armadura complementar (por exemplo, era de se esperar que esse espécime tivesse a mesma carga de ruptura que o espécime W-60-8.0TT por ter maior valor efetivo de área de aço da armadura complementar).

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. Carga aplicada vs Carga Teórica

A tabela abaixo mostra os resultados obtidos da carga de ruptura de cada espécime, comparados com os modelos teóricos mencionados na seção 2.4 e 2.5. São esses modelos: NBR 6118:2014, ACI 318 (2014), SPERRY (2017) e REGAN (2000). É apresentada, também, a razão dos resultados de carga última com a carga resultante dos modelos teóricos.

Tabela 4 - Carga de ruptura dos espécimes (Experimental e Teórico)

Espécimes	N_u (kN)	f_{bu} (MPa)	N_u (NBR)	f_b (NBR)	N_u (ACI)	f_b (ACI)	N_u (SPERRY)	f_b (SPERRY)	N_u (REGAN)	f_b (REGAN)
J-60-5 ϕ	32,64	16,49	14,21	5,027	11,03	5,58	13,60	6,87	29,46	14,88
J-60-5 ϕ -t	43,20	22,18	13,99	5,027	10,86	5,58	13,04	6,69	28,76	14,76
L-60-5 ϕ -t	33,06	16,44	14,44	5,027	11,21	5,58	14,16	7,04	30,16	15,00
L-60-10 ϕ	41,04	19,21	15,34	5,027	11,91	5,58	16,42	7,69	33,03	15,46
L-60-10 ϕ -t	44,58	21,50	14,89	5,027	11,56	5,58	15,29	7,38	31,58	15,23
W-60-6.3t	30,54	14,73	14,89	5,027	11,56	5,58	15,29	7,38	31,58	15,23
W-60-8.0tt	37,62	18,71	14,44	5,027	11,21	5,58	14,16	7,04	30,16	15,00
W-60-16.0t	41,28	21,54	13,76	5,027	10,68	5,58	12,47	6,51	28,06	14,64

No geral, todos os modelos teóricos, com a exceção de Regan, apresentaram resultados muito abaixo dos esperados. Isto pode ter sido ocasionado pelo fato dos modelos não levarem em conta outros fatores que influenciam na resistência das barras ao arrancamento.

O modelo de SPERRY (2017), mesmo levando em conta a existência de armadura complementar, é responsável pelos resultados mais aquém dentre os quatro modelos em análise. Vale lembrar que o modelo de Sperry apenas é válido para barras ancoradas com gancho de 90° e 180°. Sendo assim, apenas quatro espécimes poderiam ser calculados usando a formulação de Sperry (espécimes contendo barras ancoradas com ganchos de 90°). Para os outros, foi usada a formulação para se observar a divergência de valores em relação aos valores obtidos experimentalmente.

Tanto o modelo da NBR 6118 (2014) como o do ACI 318 (2014) tiveram resultados aquém dos esperados, por não levarem em conta a existência não só da armadura complementar, mas

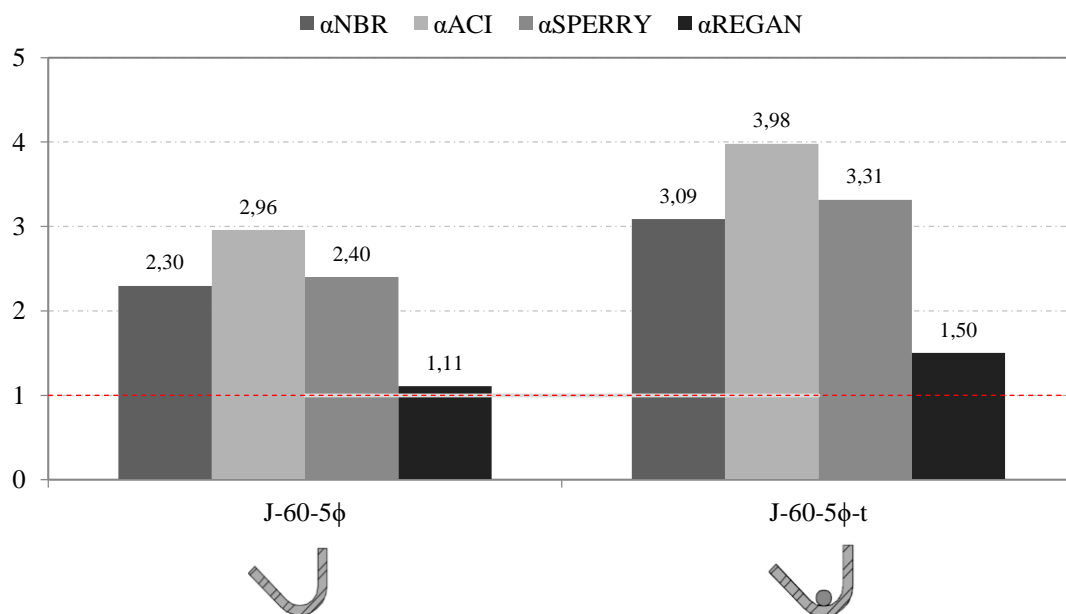
também de outros fatores que podem influenciar indiretamente na resistência ao arrancamento das barras ancoradas.

Quanto ao modelo de REGAN (2000), foi o que melhor se aproximou dos resultados, embora tenha também suas limitações. As tabelas e os gráficos abaixo mostram a razão entre a carga de ruptura obtida no ensaio e a carga de ruptura resultante dos modelos teóricos:

Tabela 5 - Carga de ruptura experimental vs. Teórico

Espécimes	h_{ef} (mm)	N_u (kN)	N_u / N_{teo} (NBR)	N_u / N_{teo} (ACI)	N_u / N_{teo} (SPERRY)	N_u / N_{teo} (REGAN)
J-60-5 ϕ	63,00	32,64	2,30	2,96	2,40	1,11
J-60-5 ϕ -t	62,00	43,2	3,09	3,98	3,31	1,50
L-60-5 ϕ -t	64,00	33,06	2,29	2,95	2,33	1,10
L-60-10 ϕ	68,00	41,04	2,68	3,45	2,50	1,24
L-60-10 ϕ -t	66,00	44,58	2,99	3,86	2,91	1,41
W-60-6.3t	66,00	30,54	2,05	2,64	2,00	0,97
W-60-8.0tt	64,00	37,62	2,61	3,36	2,66	1,25
W-60-16.0t	61,00	41,28	3,00	3,86	3,31	1,47
μ			2,63	3,38	2,68	1,26
σ			0,39	0,50	0,47	0,19

N_u / N_{Teo}



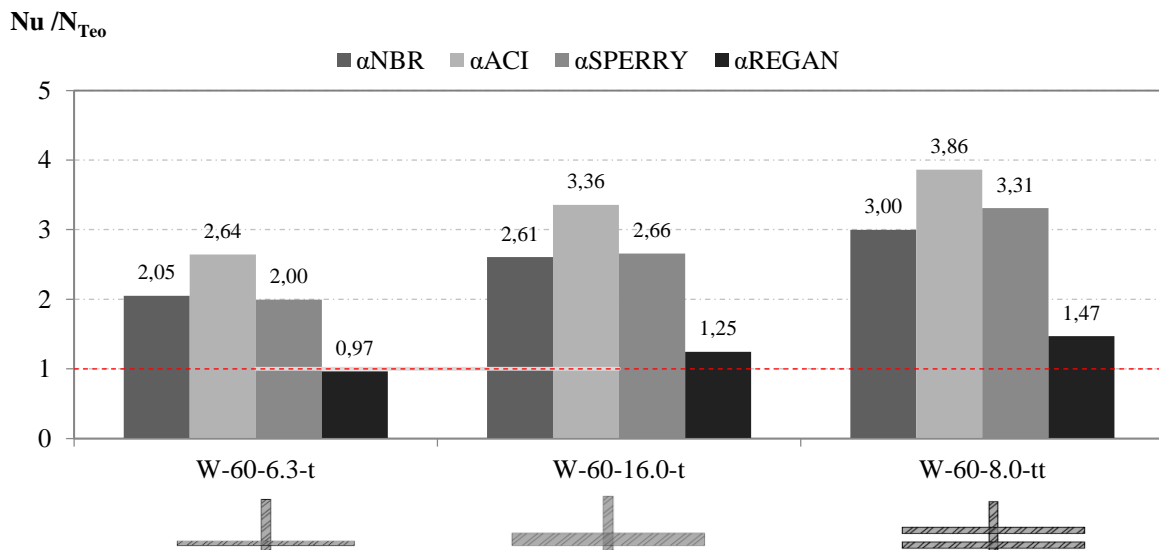
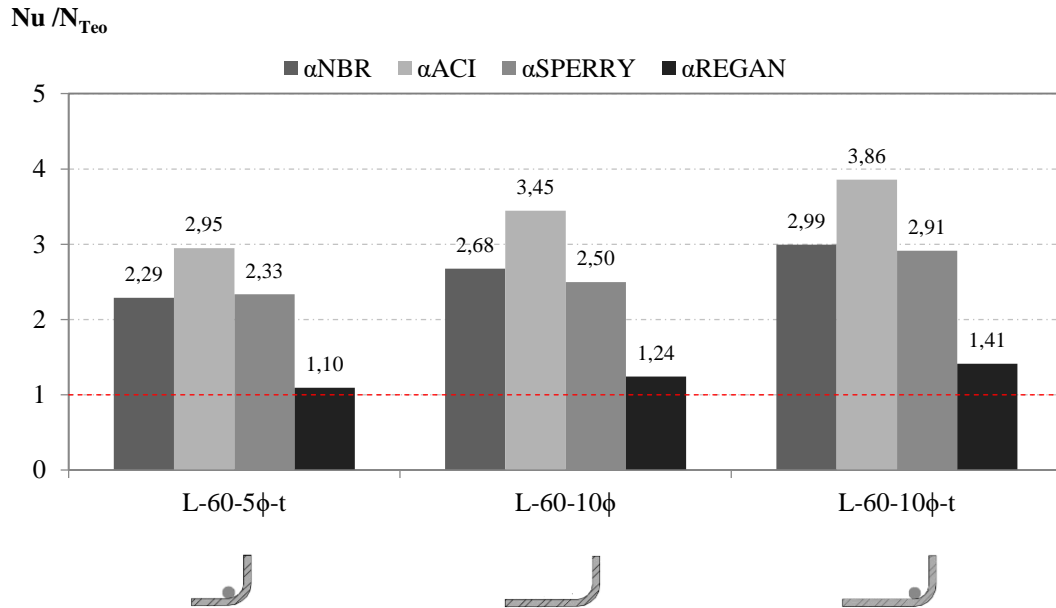


Figura 38 - Carga de ruptura vs Carga teórica – Razão

Como forma de analisar a aproximação dos resultados com os modelos teóricos, foi feita a razão entre eles, e seriam considerados resultados bons aqueles que mais próximos ficassem de 1,0. Abaixo de 1,0 os resultados seriam considerados perigosos e acima deste, conservadores.

Fazendo uma análise da tabela e dos gráficos acima, nota-se que realmente o modelo de Regan foi o levou a resultados mais próximos dos valores experimentais, comparando com os outros 3 modelos. O modelo de Regan levou a uma razão em média de 1,26, com um desvio padrão

de 0,19. Esse modelo, no entanto, não é completamente válido para os espécimes em questão. Ao considerar as armaduras transversais complementares, observou-se que se tornou um pouco conservador.

Nenhuma Norma conseguiu prever mesmo a influência de diversos fatores, como o tipo de gancho usado, ou mesmo a existência ou não de armadura complementar. Tanto a NBR 6118 (2014) como o ACI 318 (2014) possuíam médias superiores a dois e meio, portanto são muito conservadoras.

O mesmo pode ser dito para o modelo de Sperry, que também não ficou muito próximo dos resultados experimentais, tendo uma média de 2,68 com um desvio padrão de 0,47. Foi o segundo modelo que mais se distanciou dos resultados experimentais.

5.2. Modo de ruptura dos espécimes

Outro aspecto que se procurou estudar neste ensaio foi o modo como o espécime rompia. Como visto na seção introdutória, são várias as formas de ruptura de uma estrutura. Para esse ensaio, isso foi analisado a partir do gráfico das deformações da barra de ancoragem, cujos dados estavam sendo fornecidos pelo extensômetro situado na parte externa da peça de concreto.

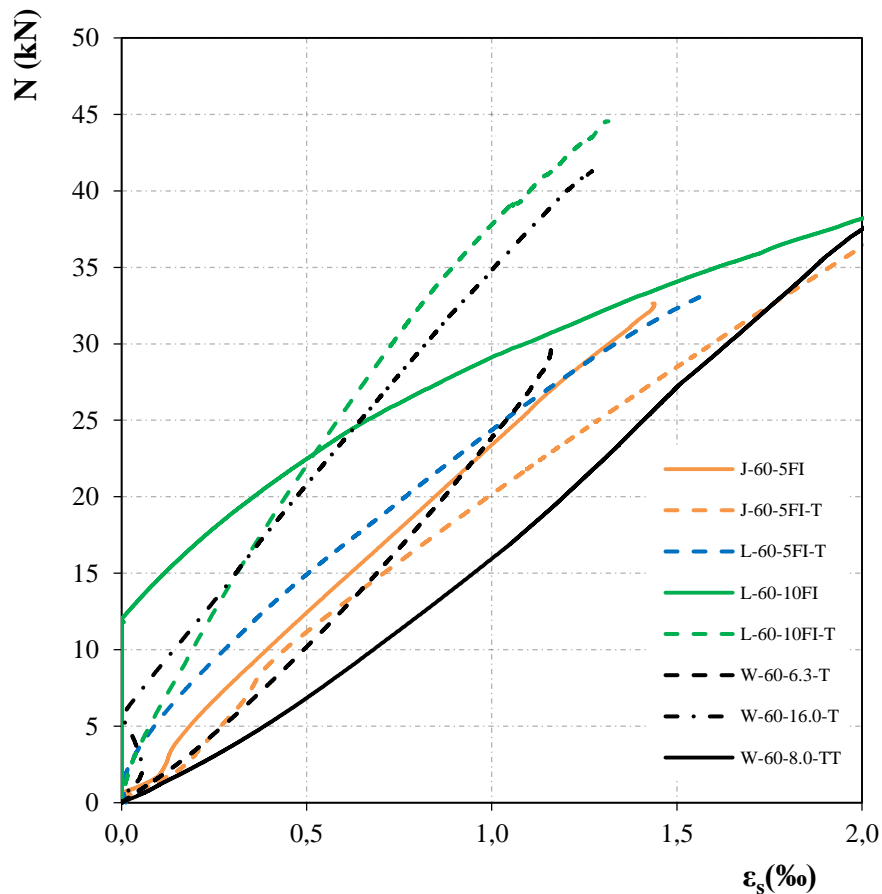


Figura 39 - Comportamento das barras de ancoragem

É possível ver que as barras de todos os espécimes ensaiados se mantiveram em regime elástico durante todo o ensaio, pelo que nenhuma delas sofreu escoamento. Isto leva a concluir que todos os espécimes podem ter rompido ou por esmagamento do concreto causado pelo encaixe do agregado na parte interna do gancho seguido da perda de aderência, para o caso de barras ancoradas com gancho. Outra forma de ruptura pode ter sido o esmagamento do concreto com formação do cone, o que pode realmente acontecer segundo REGAN (2000).

Quanto às barras ancoradas sem gancho, pela existência de armadura complementar nesses espécimes, pode ser que tenha rompido com a formação do cone, devido ao engrenamento que possa ter acontecido entre o agregado e a armadura complementar.

Nenhuma conclusão clara poderia ser tirada sem que houvesse corte da peça de concreto, para melhor análise dos espécimes depois de rompidos.

Com o intuito de fazer uma análise sobre a eficiência de ancoragem de barras retas, com dobras e com ganchos, era esperado que o modo de ruptura observado fosse da ancoragem.

Tabela 6 - Modos ruptura observados

Espécimes	d (mm)	h_{ef} (mm)	\varnothing_s (mm)	Tipos de Ancoragem	N_u (kN)	Modo de ruptura	Modo de ruptura esperado
J-60-5 ϕ	175,00	63,00	10,00	Gancho 45° com comp. de 5 ϕ	32,64	Esmagamento do concreto no gancho/Perda de aderência	Ruptura da ancoragem
J-60-5 ϕ -T	180,00	62,00		Gancho 45° com comp. de 5 ϕ e uma barra transversal armada	43,20	Esmagamento do concreto no gancho/Perda de aderência	
L-60-5 ϕ	180,00	71,00		Dobra de 90° com comp. de 5 ϕ	45,30	Perda de aderência	
L-60-5 ϕ -T	175,00	64,00		Dobra de 90° com comp. de 5 ϕ e uma barra transversal armada	33,06	Perda de aderência	
L-60-10 ϕ	180,00	68,00		Dobra de 90° com comp. de 10 ϕ	41,04	Perda de aderência	
L-60-10 ϕ -T	183,00	66,00		Dobra de 90° com comp. de 10 ϕ e uma barra transversal armada	44,58	Perda de aderência	
W-60-6.3T	181,00	66,00		Barra reta com uma barra soldada de 6.3 mm	30,54	Cone de concreto/Perda de aderência	
W-60-8.0TT	180,00	64,00		Barra reta com duas barras soldadas de 8.0 mm	37,62	Cone de concreto/Perda de aderência	
W-60-16.0T	178,00	61,00		Barra reta com uma barra soldada de 16.0 mm	41,28	Cone de concreto/Perda de aderência	

6. CONCLUSÃO

O presente estudo monográfico enfocou a análise experimental do arrancamento de barras ancoradas em peças de concreto armado. O seu desenvolvimento exigiu que o trabalho fosse desenvolvido em seis capítulos que, ordenados entre si, permitiram o desenvolvimento sistemático da temática que constituiu o seu objeto, assim descrito:

Na Introdução houve a descrição da motivação do estudo, voltado tanto para a identificação da influência do gancho ou dobra, da armadura de ancoragem e da armadura complementar, quanto pela circunstância de que são escassos os estudos relativos ao referido arrancamento de barras ancoradas com gancho ou dobra. Neste sentido, a um problema complexo de ordem técnica foi somada uma questão de literatura, que regista certa lacuna quanto à matéria em questão.

Ainda no âmbito introdutório, logo houve um esforço de natureza conceitual, cujo propósito foi definir ancoragem, para o que concorreram Parmar e Jamnu, bem como discorrer sobre os principais mecanismos de ancoragem, por meio da aderência e da ancoragem mecânica, considerando ainda fatores como propriedades do concreto, dimensões dos elementos e o papel dos conectores. Os problemas decorrentes da fissura do concreto e seu impacto na resistência dos materiais, levando às dificuldades quanto ao arrancamento de barras dentro do concreto mereceram o devido destaque, quando da especificação dos objetivos e da metodologia do trabalho em pauta.

No capítulo dois, para conferir substância teórica e técnica ao complexo problema proposto, toda uma revisão bibliográfica foi desenvolvida, privilegiando autores como Muratli, Costa e Podhorsky. Por meio da utilização de figuras, as dificuldades técnicas e as soluções propostas foram ilustradas, no intuito de evidenciar as tensões normal e de aderência, os conectores pré e pós instalados, e as dificuldades relativas à perda de aderência, ao deslizamento da extremidade da barra e ao esmagamento do concreto.

Em seguida, os modos de ruptura foram analisados, estudando o escoamento da barra do conector, a ruptura por deslizamento, o destacamento lateral, o fendilhamento do concreto, a ruptura do cone de concreto e a ruptura do concreto no gancho da barra. A expressão matemática das questões decorrentes da carga de escoamento foi chamada ao texto, que dialogou com numerosos autores, a exemplo de Eligehausen, Podhorsky, Ozbolt. Foram discutidos ainda

problemas referentes aos fatores que influenciam a resistência ao arrancamento de barras embutidas em peças de concreto armado e os modelos teóricos de trabalhos pretéritos, quando o diálogo foi travado com Jayne Sperry e Regan. Na ocasião, as prescrições normativas vinculadas ao cálculo da resistência ao arrancamento foram objeto de cuidado e de reflexão.

Quanto ao capítulo três, quando do exame do programa experimental, houve a descrição das condições ideais contrapostas às soluções reais, prevalecendo nestas a confecção de experimentos com modelos de menor dimensão. Nesta passagem, foram descritas as características dos espécimes ensaiados e seu detalhamento técnico diante de diferentes materiais como o concreto e o aço. As barras foram submetidas a uma série de ensaios de tração, antes de serem levadas a laboratório, testando a sua qualidade. Durante a montagem dos espécimes, a instrumentação foi possível, para permitir a leitura dos dados.

Já no capítulo quatro, com a posterior realização dos ensaios, o passo seguinte permitiu o conhecimento do escorregamento da barra de ancoragem, da deformação da armadura de flexão, deformação da armadura de ancoragem e da carga de ruptura. Houve uma ampla recorrência à gráficos e tabelas, os quais ilustraram o desenvolvimento dos debates, que envolveram os aspectos técnicos acima descritos e o comportamento das barras sob influência das cargas aplicadas.

No capítulo cinco, a análise dos resultados foi privilegiada, confrontando a carga teórica e a carga aplicada, e voltando a dialogar com Sperry e Regan, bem como a destacar a Norma brasileira (NBR 6118:2014) e a americana (ACI 318:14). Quanto aos resultados obtidos, uma leitura equilibrada dos seus significados permitiu dizer que os seus resultados ficaram além das prescrições normativas, sugerindo que os principais motivos podem ser estes: o sistema de ensaio foi diferente dos prescritos nos dois modelos normativos ou a armadura complementar não foi tomada em conta nos dois modelos em questão. O modelo de Regan, mais do que o do Sperry, melhor se aproximou dos resultados obtidos, embora também tenha as suas limitações reconhecidas pelo próprio autor.

Em Conclusão, como resultado de um amplo percurso de pesquisa, o presente estudo pode razoavelmente argumentar que: uma série de ensaios foi feita e seus dados analisados com o intuito de verificar a influência que vários fatores têm sobre a resistência ao arrancamento de barras. Os fatores considerados neste trabalho foram o tipo de gancho usado na ancoragem e o uso de armadura complementar.

Mais tarde, os dados foram usados para comparar com resultados obtidos por meio de formulação de modelos anteriores, para que pudessem ser avaliados quanto à sua dispersão e segurança.

Quanto aos resultados obtidos, a maior parte foi satisfatória. O mesmo não se pode dizer da tração da barra que seria usada como armadura de flexão. As barras de 12 mm apresentaram uma tensão de escoamento média de 639,3 MPa. Este resultado está muito fora do esperado, pois a barra usada no ensaio foi de classe CA-50.

Quanto ao escorregamento das barras de ancoragem, foi necessário desconsiderar o espécime L-60-5Ø, pelo fato da barra ter escorregado de forma brusca, fazendo com que os resultados não fossem confiáveis: eis a motivação da sua exclusão. Sendo assim, a barra que mais escorregou foi a que se encontrava ancorada no espécime L-60-10Ø-T. Mostrou-se que a adesão de armadura complementar acrescenta, à barra de ancoragem, resistência ao escorregamento.

Quanto às barras de flexão, concluiu-se que a maior parte trabalhou em regime elástico. Os que não trabalharam em tal regime sofreram escoamento, com a exceção de 1 deles, em que o extensômetro quebrou, forçando o descarte também desse resultado.

Em relação às armaduras usadas para ancoragem, o comportamento delas sempre foi em regime elástico durante o ensaio. Apenas uma das barras estava muito próxima de escoar, embora tal fato não tenha acontecido.

Quanto às cargas de ruptura, a principal conclusão foi a de que a adição de armadura complementar realmente causa aumento da resistência ao arrancamento das barras. Outra conclusão tirada é que não é nada aconselhável usar a barra de 6.3 mm para a função de ancoragem, seja como armadura principal, seja como a complementar. Tal não é recomendável, posto que essa barra apresenta uma rigidez muito pequena, tendo pouca resistência à esforços de grande escala.

Ainda sobre a carga de ruptura, foi concluído que os modelos teóricos são, no geral, significativos dentro dos seus próprios parâmetros, com maior exceção do modelo de Regan, que apresentou resultados muito próximos dos obtidos nos ensaios. Os outros modelos resultavam em cargas de ruptura menores que a metade das cargas de ruptura obtidas experimentalmente, pelas razões já expostas.

Quanto ao modo de ruptura, não é possível tomar uma posição final, pois era necessário que os espécimes fossem cortados, para uma análise detalhada no interior desses. Porém, tudo levou a crer que o modo de ruptura dos espécimes com barras ancoradas com gancho foi de esmagamento do concreto no interior do gancho, acompanhado de perda de aderência, que é uma explicação convergente com o postulado de Podhorsky. O esmagamento do concreto foi ocasionado pelo encaixe de agregado na parte interna do gancho.

Quanto aos espécimes contendo barras ancoradas sem gancho, o modo de ruptura pode ter sido a ruptura do cone de concreto, segundo ensinamento de Regan. Nenhuma conclusão foi tirada com exatidão, tal como dito acima.

6.1. Sugestões para trabalhos futuros

De tudo quanto foi versado no decorrer da presente pesquisa, realizada de maneira ordenada e sistêmica, decorre a possibilidade de vislumbrar possíveis próximos passos de investigação, os quais venham a desdobrar de maneira avançada as temáticas ora discutidas. Para que os próximos estudos possam ter conteúdo mais complexo e substantivo do que os esforços de aproximação desenvolvidos nas abordagens postas em debate no presente trabalho, sugere-se, primeiramente, que seja realizado um maior número de ensaios, ampliando a base de dados e permitindo a retirada de um volume mais seguro e significativo de ilações teóricas e técnicas.

Neste sentido, outras sugestões pertinentes com o conjunto de argumentos já exteriorizados, são as seguintes:

- Se for possível, solicitar para que haja o corte do concreto após o ensaio, para uma melhor análise do espécime em estudo. Isto faria com que fosse mais fácil ter uma noção plausível de qual modo de ruptura do espécime se registrou.
- E também fazer uma montagem sempre mais cuidadosa dos extensômetros, pois qualquer pequeno descuido pode causar até a perda total do ensaio. Isso porque os dados só são conferidos depois de concluído o ensaio, podendo trazer consigo um desvio involuntário de resultados.
- Aprofundar o estudo de arrancamento de barras com gancho, verificando a possível influência de outros fatores que possam desafiar o padrão de conhecimento reinante,

com o qual dialogou com o presente trabalho, fazendo avançar, como é típico do processo de construção do paradigma científico, os valiosos modelos teóricos aqui discutidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI 349-01. Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures. Reported by ACI Committee 349, Farmington, Michigan, 1985.

ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary, American Concrete Institute, Farmington, Michigan, 2014.

ASHOUR, A. F. e ALQEDRA, M. A. Concrete breakout strength of single anchors in tension using neutral networks. *Advances in Engineering Software* 36, p.87-97, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739 – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos; Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

BARBOSA, Maria Teresa Gomes. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA ADERÊNCIA EM CONCRETOS DE DIFERENTES CLASSES DE RESISTÊNCIA. Rio de Janeiro. 2001.

BRANTSCHEN, F; FARIA, D. M. V.; FERNÁNDEZ RUIZ, M.; MUTTONI, A. – Bond Behaviour of Straight, Hooked, U-Shaped and Headed Bars in Cracked Concrete, 2016.

COSTA, H. D. (2016). Resistência à Tração de Conectores de Aço Embutidos em Elementos de Concreto Armado. Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil, 105p.

ELIGEHAUSEN, R. e BALOGH, T. Behavior of Fasteners Loaded in Tension in Cracked Reinforced Concrete. *ACI Structural Journal*, V. 92, No.3, May-June, 1995.

ELIGEHAUSEN, R. Wechselbeziehungen zwischen Befestigungstechnik und Stahlbetonbauweise, (Interactions of Fastening and Reinforced Concrete Constructions), in *Fortschritte im Konstruktiven Ingenieurbau*, Verlag Wihelm Ernst & Sohn. Berlin, 1984.

ELIGEHAUSEN, R; MALLÉE, R; SILVA, J. F. Anchorage in Concrete Construction. 1^o edition, Ernst & Sohn GmbH & Co. KG. 2006.

ELIGEHAUSEN, R.; BOUSKA, P.; CERVENKA, V.; PULK, R. Size effect of the concrete cone failure load of Anchor Bolts. *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, pp 517 -523, Elsevier Applied Science, London, New York, 1992.

EUROCODE 2 [2004] “EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, CEN, Brussels, Belgium, 2004.

MACGREGOR, J. G.; WIGHT, J. K. – *Reinforced Concrete: Mechanics & Design*, 6th Edition, 2012.

MURATLI, Hakki. *Behavior of Shear Anchors in Concrete: Statistical Analysis and Design Recommendations*. 1998.

OZBOLT, J e ELIGEHAUSEN, R. Numerical analysis of headed studs embedded in large plain concrete blocks. *Proceedings of the 2nd International Conference of Computer Aided Analysis and Design of Concrete Structures*, pp.465-656, 1990.

OZBOLT, J. e ELIGEHAUSEN, R. Fastening elements in concrete structures numerical simulations. *Fracture and Damage of Concrete and Rock*. 1993, pp. 527-547.

PARMAR, M.; JAMNU, M. A. Experimental Study on Direct Pull out Test: Straight Bar, Bent-Up and Headed Bar. *International Journal of Innovative Research & Development*, 2014.

PODHORSKY, Nichole Lynn. Evaluation of the orientation of 90° and 180° reinforcing bar hooks. 2011. Masters Theses. Paper 6908.

REGAN, P. E., “Shear Reinforcement of Flat Slabs”, *International Workshop on Punching Shear Capacity of RC Slab – Stockholm*, 2000. Pp. 99-107.

REHM, G.; ELIGEHAUSEN, R. MALLÉE, R. Befestigungstechnik (Fixing technology). *Betonkalender 1988, Part II*, Ernst & Sohn, Berlin, 1988, pp. 569-663, 1988.

REYNOLDS, G. C., BEDDY, A., 1982, “Bond Strength of Deformed Bars”, In: *Bond and Concrete*, pp. 434-445, Londres, P. Bartoz.

SEARLE, N.; DERUBEIS, M.; DARWIN, D.; MATAMOROS, A.; O’REILLY, M. e FELDMAN, L. *Anchorage of High-Strength Reinforcing Bars With Standard Hooks – Initial Tests*. A Reporto n Research. Kansas. 2014.

SOROUUSHIAN, P., CHOI, K., 1989, “Local Bond of Deformed Bars with Different Diameters in Confined Concrete”, ACI Structural Journal, v.86, n.2, (Mar-Apr), pp. 217-222.

SPERRY, J.; AL-YASSO, S.; SEARLE, N.; DERUBEIS, M.; DARWIN, D.; O’REILLY, M.; MATAMOROS, A.; FELDMAN, L.; LEPAGE, A.; LEQUESNE, R. e AJAAM, A. Anchorage of High-Strength Reinforcing Bars With Standard Hooks. A Report on Research. Kansas. 2015.

SPERRY, J.; AL-YASSO, S.; SEARLE, N.; DERUBEIS, M.; DARWIN, D.; O’REILLY, M.; MATAMOROS, A.; FELDMAN, L.; LEPAGE, A.; LEQUESNE, R. e AJAAM, A. Conventional and High-Strength Hooked Bars – Parts 1 and 2, ACI Structural Journal, 2017.