

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Narjana Rejane Matte

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO AFASTAMENTO ENTRE BARRAS DE AÇO
EMENDADAS POR TRASPASSE SUJEITAS À COMPRESSÃO**

Santa Cruz do Sul

2015

Narjana Rejane Matte

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO AFASTAMENTO ENTRE BARRAS DE AÇO
EMENDADAS POR TRASPASSE SUJEITAS À COMPRESSÃO**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade de Santa Cruz do Sul para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Msc. Christian Donin

Santa Cruz do Sul

2015

Narjana Rejane Matte

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO AFASTAMENTO ENTRE BARRAS DE AÇO
EMENDADAS POR TRASPASSE SUJEITAS À COMPRESSÃO**

Este trabalho de curso foi submetido à banca examinadora, abaixo nomeada, do Curso de Engenharia Civil, da Universidade Santa Cruz do Sul – UNISC, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

M.Sc Christian Donin
Professor Orientador - UNISC

Dr. Eduardo Rizzatti
Professor Examinador - UFSM

Santa Cruz do Sul
2015

Agradecimentos

Um obrigada muito especial a todos os laboratoristas do Lab de Tecnologia da construção, que sempre atenderam aos meus pedidos de última hora com uma boa vontade incrível e colocaram a mão na massa para os experimentos terem o melhor resultado possível.

Ao meu Orientador Mestre, pelo incentivo e todo o conhecimento que me foi transmitido.

Enfim, gostaria de agradecer a todos que de alguma forma se envolveram e foram essenciais para a conclusão deste estudo, com vocês tive o aprendizado mais importante de todos: Trabalho em equipe é tudo!

RESUMO

O concreto armado é o sistema construtivo mais difundido dos tempos atuais, permitindo que sejam criadas estruturas de alta resistência e variadas formas, pela interação de materiais simples e de fácil acesso, que são o concreto e o aço. As peças necessitam de emendas nas barras de aço, que devem ser eficientes e transmitir os esforços a que estão submetidas. Em obra, o modo mais prático de se executar uma emenda é fazendo traspasse simples das barras, pois assim não são necessárias soldas ou dispositivos de emenda. Na bibliografia, para barras comprimidas, os modelos são incompletos, inconclusivos e divergentes.

Existem muitos fatores que influenciam na eficiência deste tipo de emenda, o primeiro deles é a distância entre as barras de aço, que deve estar entre uma faixa de valores que garanta proximidade suficiente para que surja uma trajetória de tensões entre as barras e espaçamento que garanta o cobrimento suficiente de concreto para aderir uma à outra. O objetivo deste estudo é definir a maneira correta para a realização das emendas de barras de aço comprimidas, situação típica no caso de pilares, assim como, definir especificamente os espaçamentos ideais entre as barras de aço e a influência dos diferentes espaçamentos usuais na eficiência da emenda.

Os modelos empregados na análise experimental tratam-se de pilares curtos de concreto armado com seção transversal quadrada submetidos à compressão centrada. Os pilares ensaiados têm seção transversal de 140mm x 180mm, com armadura longitudinal composta por 4 barras de aço tipo CA60 de 10mm de diâmetro e de armadura transversal composta de estribos de aço tipo CA60 de 5mm conforme parâmetros definidos pela NBR 6118:2014. Neste estudo são testados modelos de emendas, sem espaçamento das barras longitudinais, ou seja, com as barras encostadas, e com espaçamento entre barras de 1 e 2 vezes o diâmetro da barra, assim como, um corpo de prova de pilar sem emenda utilizado como referência para verificação dos modelos de emendas, sendo que os resultados obtidos são comparados ainda com os modelos teóricos propostos pela bibliografia.

Os resultados analisados se tratam da carga e modo de ruptura de cada modelo de pilar e possibilitam concluir qual é a situação ideal de emenda deve ser empregada no projeto e execução de pilares de concreto armado, assim como, como as variações de espaçamento influenciam na capacidade de carga destes pilares.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Trajetórias das tensões principais na zona da ancoragem	16
Figura 2 – Tipos de ancoragem de barras	19
Figura 3 – Pressão de ponta em barras comprimidas	22
Figura 4 – Emendas soldadas	24
Figura 5 – Tipos usuais de extremidades	28
Figura 6 – Forças oblíquas na barra	29
Figura 7 – Fissuras entre as barras mostram bielas comprimidas (Ensaio de Y. Goto, Japão, 1971).	31
Figura 8 – Defasagens longitudinais	31
Figura 9 – Exemplos de emendas favoráveis e desfavoráveis	32
Figura 10 – Emendas na mesma seção transversal	33
Figura 11 – Armadura transversal nas ancoragens	35
Figura 12 – Fissura por pressão de ponta	36
Figura 13 – Armadura transversal nas emendas	37
Figura 14 – Detalhamento dos pilares	38
Figura 15 – Dimensão padrão dos pilares curtos – 18x14x45cm	42
Figura 16 – Armadura do modelo 1 – Esquema tridimensional	43
Figura 17 – Vista lateral e seção transversal do modelo 1	43
Figura 18 – Armadura do modelo 2 – Esquema tridimensional	44
Figura 19 – Vista lateral e seção transversal do modelo 2	45
Figura 20 – Armadura do modelo 3 – Esquema tridimensional	45
Figura 21 – Vista lateral e seção transversal do modelo 3	46
Figura 22 – Armadura do modelo 4 – Esquema tridimensional	46
Figura 23 – Vista lateral e seção transversal do modelo 4	47
Figura 24 – Diagrama tensão-deformação do aço (Armadura transversal)	47
Figura 25 – Diagrama tensão-deformação do aço (Armadura longitudinal)	48
Figura 26 – Equipamento de corte e barras de aço cortadas	48
Figura 27 – Processo de montagem das armaduras	49
Figura 28 – Preparação da argamassa na betoneira	49
Figura 29 – Teste de <i>Slump</i>	50
Figura 30 – Diagrama força x deslocamento para a moldagem 1	51
Figura 31 – Diagrama força x deslocamento para a moldagem 2	51
Figura 32 – Corpos de prova do concreto	52
Figura 33 – Formas de MDF e armaduras	52
Figura 34 – Armadura posicionada com arame recozido	53
Figura 35 – Pilar tipo 1 – Parâmetro	54
Figura 36 – Pilar tipo 2 – Barras encostadas	54
Figura 37 – Pilar tipo 3 – Barras afastadas 1Ø	54
Figura 38 – Pilar tipo 4 – Barras afastadas 2Ø	55
Figura 39 – Adensamento do concreto	55
Figura 40 – Modelos concretados	56
Figura 41 – Equipamento de ensaio	57
Figura 42 – Esquema de aplicação de carga no pilar curto	58
Figura 43 – Diagrama força x deslocamento – Resultados dos protótipos do modelo 1	61
Figura 44 – Comparativo de cargas dos protótipos modelo 1 (barras inteiras)	61

Figura 45 – Diagrama força x deslocamento – Resultados dos protótipos modelo 2	62
Figura 46 – Comparativo de cargas dos protótipos do modelo 2 (barras encostadas)	62
Figura 47 – Diagrama força x deslocamento – Resultados dos protótipos modelo 3	63
Figura 48 – Comparativo de cargas dos protótipos do modelo 3 (barras afastadas 1Ø)	64
Figura 49 – Diagrama força x deslocamento – Resultados dos protótipos modelo 4	64
Figura 50 – Comparativo de cargas dos protótipos do modelo 4 (barras afastadas 2Ø)	65
Figura 51 – Comparação de cargas	66
Figura 52 – Protótipos pós ensaio de compressão centrada	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores dos Coeficientes	28
Tabela 2 – Coeficiente f conforme tipo de Ancoragem	29
Tabela 3 – Proporção máxima de barras tracionadas emendadas	33
Tabela 4 – Valores do coeficiente	34
Tabela 5 – Valores característicos dos pilares	38
Tabela 6 – Valores da resistência do concreto na moldagem 1	43
Tabela 7 – Valores da resistência do concreto na moldagem 2	51
Tabela 8 – Identificação dos modelos	53
Tabela 9 – Modelo barras inteiras	60
Tabela 10 – Modelos barras encostadas	62
Tabela 11 – Planilha 3 – Modelo barras afastadas 1Ø	63
Tabela 12 – Modelo barras afastadas 2Ø	64
Tabela 13 – Médias de dados dos modelos	66

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 Área.....	11
2. JUSTIFICATIVA	12
3. OBJETIVOS	14
3.1 Objetivo Geral	14
3.2 Objetivos Específicos	14
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
4.1 Influência da aderência, da distância entre barras e do cobrimento	15
4.1.1 Aderência entre concreto e aço.....	15
4.1.2 Distância entre barras de aço.....	18
4.1.3 Cobrimento de concreto	18
4.2 Ancoragem de barras	18
4.2.2 Ancoragem de barras tracionadas	20
4.2.3 Ancoragem de barras comprimidas.....	21
4.3 Emendas	23
4.3.1 Emendas Diretas.....	23
4.3.1.1 Emendas soldadas	23
4.3.1.2 Emendas com luvas rosqueadas ou prensadas	25
4.3.1.3 Emendas com luvas de pressão para barras nervuradas	25
4.3.1.4 Emendas com luvas termite	26
4.3.1.5 Emendas de contato para barras comprimidas	26
4.3.2 Emenda indiretas por traspasse.....	26
4.3.2.1 Emendas por traspasse solicitadas à tração	27
4.3.2.2 Emendas por traspasse solicitadas a compressão	35
4.4 Comportamento das emendas por traspasse.....	37
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
5.1 Definição dos modelos testados.....	42
5.1.1 Modelo 1.....	43
5.1.2 Modelo 2.....	44
5.1.3 Modelo 3.....	45
5.1.4 Modelo 4.....	46
5.2 Materiais.....	47
5.2.2 Aço	47
5.2.3 Concreto.....	49

	10
5.4 Formas	52
5.3 Moldagem dos protótipos de pilares.....	53
5.4 Ensaios dos protótipos	56
5.4.1 Equipamentos de ensaio	56
5.4.2 Procedimentos de ensaio	57
5.4.3 Considerações quanto a definição teórica da resistência dos modelos	58
6. RESULTADOS E ANÁLISES	60
6.1 Resultados	60
6.2 Análise dos Resultados	65
6.3 Considerações quanto ao modo de ruptura	68
7 CONCLUSÕES	70
REFERÊNCIAS.....	71
ANEXO A – Relatórios de Ensaio	72

1. INTRODUÇÃO

O sistema construtivo de concreto armado é um dos mais difundidos e utilizados no ramo da Construção Civil, pois além de ser uma solução durável e econômica, possibilita moldar estruturas de inúmeras formas físicas, que também resistem aos esforços aos quais são submetidas. Tal resistência se dá através da aderência entre o concreto e as barras de aço, que agem solidariamente para suportar as tensões.

O concreto é um material que resiste satisfatoriamente à compressão, mas é totalmente deficiente quanto à tração. O aço tem alta resistência a ambos os esforços e é adicionado ao concreto, resistindo à tração, para que assim as estruturas sejam resistentes a todos os esforços possíveis.

Um edifício construído por meio deste sistema apresenta três estruturas básicas: lajes, vigas e pilares; pelas quais são transmitidos os esforços até as fundações ou outros apoios. Os pilares recebem todas as cargas atuantes, sendo assim os elementos mais importantes que garantem a estabilidade global da estrutura, resistindo às ações verticais e horizontais, quando também utilizados com função de contraventamento.

Os pilares devem ser dimensionados e projetados para atender às solicitações de projeto, e por se tratarem de esbeltas estruturas verticais geralmente possuem grandes vãos. É importante ressaltar que o aço para armadura é encontrado em comprimentos padrão de 12 metros, no Brasil, necessitando que na maioria das construções se faça uso de dispositivos para emenda destas barras.

Quando há necessidade de fazer uma emenda nos pilares, estas devem ser corretamente dimensionadas e executadas, para que sejam completamente transmitidas as forças de uma barra à outra.

1.1 Área

A pesquisa foi desenvolvida na área de estruturas de concreto armado, com enfoque nas emendas dos pilares.

2. JUSTIFICATIVA

As estruturas de concreto armado têm sua estabilidade diretamente ligada à interação entre concreto e aço, sendo de extrema importância a regulamentação e a instrução para o correto procedimento de execução de uma estrutura deste tipo. A estabilidade não está apenas ligada a qualidade do concreto, mas também pelo correto emprego do aço.

O posicionamento das barras de aço é fundamental para que a peça resista aos esforços de tração, que não seriam suportados pelo concreto puro, nos deparando com situações em que certos “arranjos” deverão ser feitos para vencer as formas e os vãos projetados.

O mercado disponibiliza limitadas formas de materiais, como no caso do aço, os tamanhos usuais normalmente não vencem os vãos propostos, necessitando muitas vezes que se façam emendas. A tecnologia permite que sejam ligadas as barras por dispositivos como luvas e até mesmo por solda, porém, diante da realidade presenciada em obra, onde muitas vezes não se tem os recursos disponíveis, é necessário emprego de técnicas mais primitivas e igualmente eficientes, como é o caso do transpasse das barras.

No transpasse as barras de aço devem ser posicionadas de forma que os esforços de tração, para os quais foram dimensionadas, se transfiram de uma barra à outra. Para a execução destas emendas, existem poucas teorias concretas, que apresentem certezas sobre qual seria o procedimento mais eficiente.

Desta forma, surge o questionamento acerca da correta forma de se executar a emenda indireta, pois além de os estudos serem escassos, encontra-se muita divergência de teorias. Nas bibliografias e normas as indicações raramente são as mesmas, mas é possível notar que vem sendo normalmente calculado com base na ancoragem.

A NBR 6118:2014, norma que regulamenta a emenda por transpasse de barras, tem padrões de distância e posicionamento para a execução do mesmo, e diferencia o transpasse entre as tracionadas e comprimidas. Porém é possível perceber que ainda há muito conteúdo e informações a serem acrescentadas na regulamentação, principalmente para as sujeitas à compressão.

Na prática, muitas vezes uma emenda malfeita pode comprometer a peça, e se tratando de pilares o cuidado deve ser ainda maior, podendo afetar a estabilidade global da estrutura.

Não são encontradas informações suficientes sobre a influência do posicionamento das barras no transpasse, ou como a geometria afeta a eficiência das emendas indiretas por transpasse. Visto que na prática há muita imprecisão na hora da execução, é necessário verificar quanto o espaçamento entre barras influi no desempenho da emenda, assim como pesquisar parâmetros e informações que ajudem a executar tais emendas por transpasse.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

O objetivo do estudo é conhecer a influência da variação de distância entre barras emendadas por traspasse no desempenho de pilares, os quais estão solicitados predominantemente à compressão.

3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Estudar os tipos de emendas usuais, seus fundamentos teóricos e aplicação em pilares.
- Estudar detalhadamente as emendas por traspasse.
- Verificar os fundamentos teóricos relacionados à influência do afastamento entre barras emendadas por traspasse em pilares, de modo a embasar as análises experimentais a serem realizadas.
- Realizar análises experimentais, comparando as diversas variações recomendadas pela bibliografia no que se refere ao afastamento entre barras emendadas em pilares.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Influência da aderência, da distância entre barras e do cobrimento

4.1.1 Aderência entre concreto e aço

A estrutura de concreto armado deve ter capacidade resistente quanto à ruptura, manter-se em condições de utilização durante toda a sua vida útil e resistir às influências do meio inserida. Estes parâmetros serão garantidos conhecendo a execução e comportamento de ambos os materiais, permitindo que projetem-se estruturas capazes de resistir e atender a todas as especificações de desempenho e segurança.

É de extrema importância entender como os materiais interagem entre si, pois só assim serão escolhidos de forma adequada ao projeto estrutural. O concreto permite que seja executada qualquer forma de estrutura, desde que utilizada quantidade e forma correta de aço para garantir sua estabilidade. O aço para concreto deve ser determinado principalmente com base no tipo de esforço ao qual a estrutura estará exposta.

Montoya et. al. (2000) ressalta que é difícil atribuir um número que expresse o valor da aderência entre os dois materiais, considerando que existem muitos estudos teórico-experimentais que não levam a um resultado definitivo, já que nenhum é totalmente satisfatório.

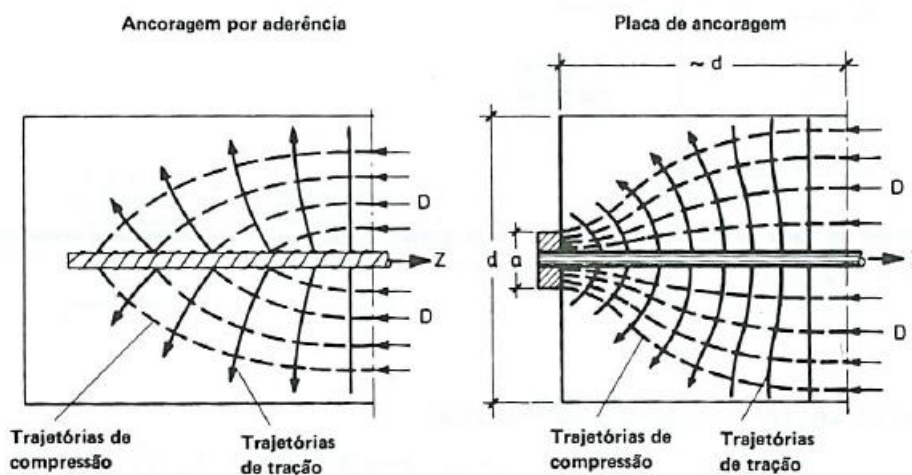
A peça de concreto armado deve estar em equilíbrio, ou seja, o aço deve estar presente para resistir à tração solicitada, proporcionalmente à resistência à compressão do concreto em si. Montoya et. al. (2000) também comenta que é difícil quantificar os fenômenos e transformá-los em fórmulas precisas quando se trata da resistência do concreto à tração ou cisalhamento. Segundo o autor, um dos exemplos que mostra a contingência desta dedução, é o da direta relação entre aderência e fissuração, caso onde se conseguem resultados mais aproximados com mais frequência.

Em peças comprimidas a armadura contribui com o concreto para resistir à compressão, aumentando a capacidade resistente contra os momentos fletores que agem simultaneamente, e evitando aparecimento de fissuras e colapso. Nas peças esbeltas comprimidas, ela diminui o risco de flambagem.

Segundo Leonhardt (1978), obtém-se um comportamento resistente mais favorável das peças de concreto armado quando as armaduras forem dispostas segundo as trajetórias das tensões principais de tração e distribuídas proporcionalmente ao valor das tensões de tração.

A aderência entre barra e concreto é um fator muito importante para que seja evitado o fendilhamento da peça. Os esforços de tração transversal à barra produzem esforço de tração no concreto, enquanto os de compressão do concreto produzem esforço de compressão na barra. Destas tensões formam-se trajetórias conforme a Figura 1.

Figura 1 - Trajetórias das tensões principais na zona da ancoragem



Fonte: Leonhardt, 1978, p.31

No detalhamento das barras, os diâmetros devem ser escolhidos para que não surjam elevadas tensões de fendilhamento por ação da aderência e para que a abertura de fissuras permaneça abaixo dos valores admissíveis. Na opinião de Leonhardt (1978), o tamanho e a distância entre as fissuras é proporcional ao diâmetro e espaçamento das barras. Ou seja, quanto maior for o diâmetro da barra, mais propício o surgimento de fissuras causado pelo esforço de aderência.

A NBR 6118:2014 tem parâmetros para classificação da aderência em boa ou ruim baseada na posição da barra durante a concretagem. A primeira boa situação é quando a barra tem uma posição com inclinação maior do que 45° sobre a inclinação horizontal. A segunda situação é quando a barra está em posição horizontal ou com inclinação menor do que 45° sobre a horizontal, porém esta depende da altura do elemento estrutural e da localização em relação a face do

elemento ou da junta de concretagem. Fora destas posições, as barras devem ser consideradas em má situação quanto a aderência, segundo a norma.

Para calcular resistência a aderência entre a armadura e o concreto na ancoragem a NBR 6118:2014 usando a equação 1.

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

Os coeficientes η_1 , η_2 e η_3 são definidos conforme o tipo de barra, situação da aderência e diâmetro da barra, respectivamente, onde:

$\eta_1 = 1,0$ para barras lisas;

$\eta_1 = 1,4$ para barras entalhadas;

$\eta_1 = 2,25$ para barras nervuradas;

$\eta_2 = 1,0$ para boa aderência;

$\eta_2 = 0,7$ para má aderência;

$\eta_3 = 1,0$ para diâmetro menor de 32mm;

$\eta_3 = \frac{(132 - \phi)}{100}$ para diâmetro maior de 32mm.

O f_{ctd} é calculado a partir da resistência a tração direta inferior $f_{ct,inf}$ (eq. 2), que por sua vez pode ser obtida através de resultados de ensaio ou pelo valor médio ou característico em função do f_{ck} do concreto (eq. 3).

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} \quad (2)$$

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

O $f_{ct,m}$ é calculado com uma fórmula para concretos de classes até C50 (eq. 4) e outra para classes C55 até C90 (eq. 5), com o valor do f_{ck} em MPa.

$$f_{ctk,inf} = 0,3 f_{ck}^{2/3} \quad (4)$$

$$f_{ctk,inf} = 2,2 \ln(1 + 0,11) f_{ck} \quad (5)$$

No escorregamento da armadura, ainda segundo a NBR 6118:2014, em materiais fletidos, a equação 1 deve ser multiplicada por 0,7.

Sobre a aderência das armaduras, Montoya (2000) coloca que as barras superiores estão em piores condições de aderência do que as inferiores por consequência de a qualidade do concreto ser mais baixa na zona superior.

4.1.2 Distância entre barras de aço

É necessário atentar para a distância mínima entre barras, Leonhardt (1978) sugere que o espaçamento mínimo deve ser maior do que o diâmetro da barra \varnothing , ou então de 2cm, o que for maior. Segundo ele, quando a dimensão máxima for 8mm, pode ser reduzir o espaçamento mínimo em até 1cm.

Montoya et. al. (2000), sugere que a distância livre, tanto horizontal quanto vertical, deve ser de 2cm, igual ao diâmetro da barra mais grossa ou 1,25 vezes o diâmetro do agregado, sendo adotado o maior entre os valores.

A NBR 6118:2014 especifica que o espaçamento mínimo entre barras deve ser igual ou maior ao diâmetro da barra, 1,5 maior do que do que o diâmetro do agregado ou igual a 2cm, o que for maior. Tais diretrizes são bem semelhantes ao que sugerem os autores citados anteriormente, se diferenciando quanto a redução sugerida por Leonhardt (1978) e sugerindo maior espaçamento em relação ao que diz Montoya et. al. (2000) em relação ao agregado.

4.1.3 Cobrimento de concreto

A partir da escolha do diâmetro das barras e definição do risco de corrosão é definido o cobrimento de concreto necessário. A NBR 6118:2014 especifica que é importante garantir o cobrimento de concreto para que as barras fiquem protegidas e em condições de trabalho durante toda sua vida útil.

É necessário que haja equilíbrio entre a quantidade de concreto e aço empregados, equilíbrio este que se dará através da utilização da barra e cobrimento corretos. Segundo Leonhardt (1978) quando o cobrimento de concreto for pequeno em relação ao diâmetro da barra ou quando o espaçamento entre as barras for pequeno, ocorre o risco de aparecerem grandes fissuras longitudinais ou de fendilhamento.

4.2 Ancoragem de barras

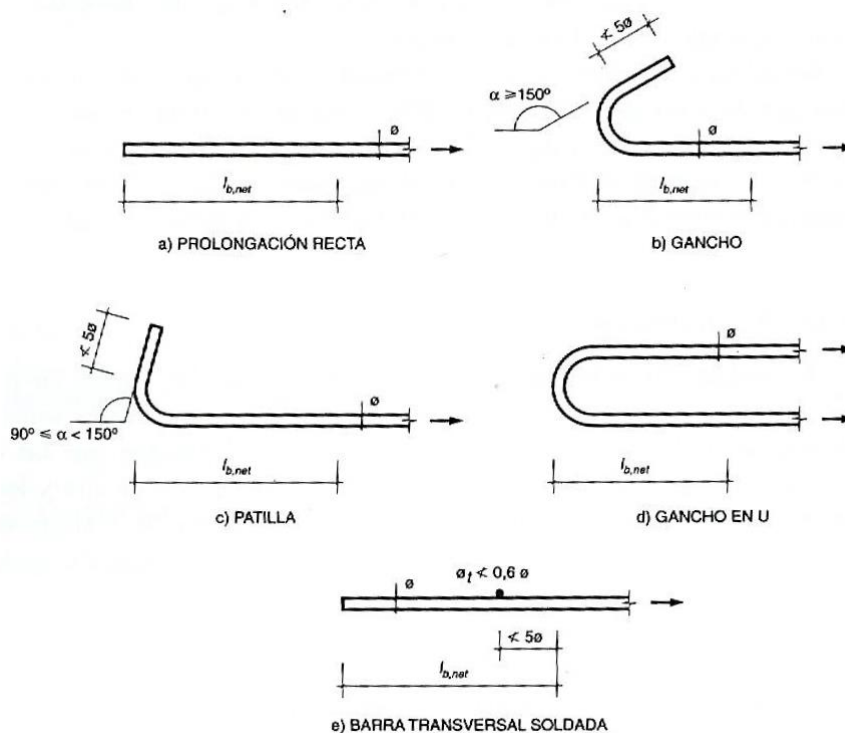
O comprimento da ancoragem deve ser dimensionado levando em conta a forma que a armadura será usada (com ou sem dobramentos), pois segundo Leonhardt (1978) a tensão de ponta na extremidade da barra, que transmite uma

parte considerável da força pode causar rompimento transversal ou em cone, o segundo quando terminar próximo a superfície externa. Portanto, levando em consideração o que indica o autor, seu tamanho não pode ser diminuído (mesmo quando existem ganchos).

Montoya (2000) diz que o comprimento da ancoragem de uma armadura depende das características geométricas de ancoragem e aderência, da resistência do concreto, da posição da barra e do esforço da armadura. O autor também sugere que a se disponham as ancoragens em locais onde o concreto esteja submetido à compressão, evitando zonas muito tracionadas.

Os quatro primeiros tipos de ancoragem (a, b, c e d) presentes na Figura 2 com suas respectivas características geométricas mínimas, segundo Montoya et. al. (2000), permitem que se reduza com comprimento da ancoragem em relação a utilização da barra reta. E o autor ainda lembra, que para serem utilizados, é necessário que se garanta o cobrimento mínimo equivalente a 3 diâmetros da barra.

Figura 2 – Tipos de ancoragem de barras



Fonte: Montoya, 2000, p. 170.

Conforme a NBR 6118:2014, o comprimento de ancoragem básico é o valor definido como o necessário para ancorar a força-limite na barra, calculado através da equação 6. Ond o f_{bd} é o valor obtido conforme a equação 1 dada anteriormente e o ϕ é a resistência característica do aço com valor minorado.

$$\ell_b = \frac{\phi f_{yd}}{4 f_{bd}} \geq 25\phi \quad (6)$$

A partir do comprimento básico de ancoragem é possível calcular o comprimento necessário (eq. 7). A NBR 6118:2014 multiplica o ℓ_b ao valor resultante da divisão da área de aço calculado $A_{s,calc}$ pela área de aço efetiva $A_{s,ef}$, e ainda pelo coeficiente α . Conforme a norma, o resultado a ser adotado será o maior valor entre $0,3\ell_b$, 10 vezes o diâmetro e 100mm.

$$\ell_{b,nec} = \alpha \ell_b \frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}} \geq \ell_{b,mín} \quad (7)$$

A NBR 6118:2014 normatiza que os valores a serem adotados para α serão

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

$\alpha = 0,7$ para barras tracionadas com gancho, com cobrimento no plano normal ao do gancho maior do que três vezes o diâmetro;

$\alpha = 0,7$ quando houver barras transversais soldadas;

$\alpha = 0,5$ quando houver barras transversais soldadas e gancho com cobrimento no plano normal ao do gancho maior do que três vezes o diâmetro.

Sobre a ancoragem de barras, Montoya et. al. (2000) cita mais de uma forma de se calcular, distinguindo o cálculo para barras tracionadas e comprimidas. O autor dá até mesmo diretrizes para cálculo de ancoragem para concretos que levam em conta combinações de esforços dinâmicos, como zonas sísmicas.

As condições de ancoragem podem ser prejudicadas pelo surgimento de esforços de tração transversais. “O esforço máximo de fendilhamento ocorre no terço extremo do comprimento de ancoragem e vale aproximadamente 25% da força ancorada” (ARAUJO, 2014, p. 283).

4.2.2 Ancoragem de barras tracionadas

Na norma brasileira 6118:2014 a ancoragem de barras tracionadas é calculada com a Equação 6 anterior. Sobre os ganchos para as tracionadas, a norma diz que podem ser semicirculares, com ponta reta de comprimento maior do que duas vezes o diâmetro; quando tiver ângulo interno de 45° , a ponta reta deve ter comprimento maior do que 4 vezes o diâmetro; e quando em ângulo reto, a ponta com comprimento mínimo 8 vezes o diâmetro.

Montoya et. al. (2000) diz que para efeito de dimensionamento de ancoragem de barras tracionadas que resistam à fissuração por esforço cortante (oblíquo), deve se supor que existam momentos fletores atuantes paralelo ao eixo, no sentido mais desfavorável da peça. Se houver mais armadura real do que o necessário o autor ainda indica que as ancoragens podem ser reduzidas com a equação 8.

$$l_{b,nec} = l_b \frac{A_s}{A_{s,real}} \quad (8)$$

O resultado adotado, ainda segundo Montoya (2000) não deve ser menor do que 33% do comprimento de ancoragem ($0,33l_b$), 10 vezes o diâmetro da barra ou 15cm.

4.2.3 Ancoragem de barras comprimidas

O comportamento do aço varia conforme a tensão à qual é submetido, aumentando até o seu limite de escoamento. Em barras que forem comprimidas, quando as tensões de deformação forem muito elevadas e a taxa de armadura for baixa, Leonhardt (1978) sugere que não se devem adotar comprimentos de ancoragem pequenos.

Na NBR 6118:2014, no item que trata da ancoragem de barras tracionadas, não há menção sobre ganchos nas armaduras de compressão, somente diretrizes para armaduras de tração. Leonhardt (1978) sugere que não se usem ganchos abertos ou fechados na ancoragem de barras comprimidas, principalmente se forem próximos a extremidade ou muito solicitados. Recomenda sempre extremidades retas para que a tensão presente na ponta possa ser transmitida, e estribos pouco espaçados com função de evitar o rompimento transversal. O autor também não recomenda uso de ganchos em barras lisas, inclusive cita que a DIN 1045 (norma regulamentadora alemã), por certo tempo exigiu tais ganchos erroneamente.

Guerrin (2002), indica que as armações presentes nas peças comprimidas não podem ser levadas em conta nos cálculos de resistência, a não ser que sejam usadas transversalmente. Quando houver a situação em que a peça estiver comprimida, a tensão de compressão do aço σ_{adm} segundo ele, será 2/3 do limite de elasticidade. Calculando desta forma, ele supõe que os esforços levados em conta nas barras podem ser efetivamente transmitidos.

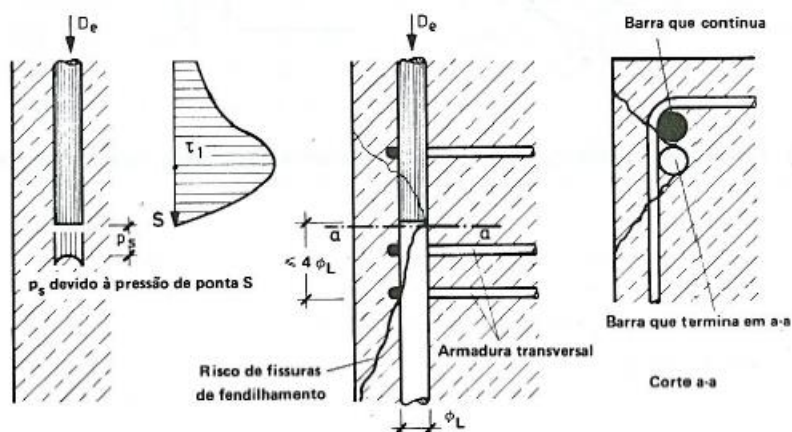
No caso de barras grossas e pequeno cobrimento de concreto (20 a 50% do total da peça), Leonhardt (1978) sugere que seja necessária além da extremidade armadura transversal de, no mínimo, dois ou três estribos com espaçamento menor do que 4 vezes o comprimento. Ele considera estes parâmetros para feixes de barras comprimidas que terminem na mesma seção. E em diâmetros maiores do que 28mm, diz que é necessário reforçar a extremidade com mais estribos, um deles indo além da extremidade do feixe.

“Nas peças de grandes dimensões armadas transversalmente, pode-se dispensar a ancoragem, desde que a peça comprimida atenda a certos parâmetros: nas compostas de concreto com B_n maior de que 250, aço BSt I; e nas com B_n de concreto maior ou igual a 250, barras de BSt III. Com estas características, suporta pressões localizadas até dez vezes maiores sua resistência cúbica a compressão” (Leonhardt, 1978).

O espaçamento dos estribos na região de ancoragem deve ser pequeno, para garantir que parte da força de compressão seja absorvida por aderência e para que haja aumento de resistência à compressão, conclui Leonhardt (1978).

A armadura transversal também diminui o risco de fendilhamento causado pela pressão de ponta, mostrada na Figura 3. Segundo Leonhardt (1978) quando a armadura transversal é colocada além da extremidade da barra, a tensão é diminuída e o fendilhamento por pressão de ponta se torna menos provável.

Figura 3 – Pressão de ponta em barras comprimidas



Fonte: Leonhardt, 1978, p.51.

A NBR 6118:2014 no seu item que fala sobre traspasse de barras comprimidas, regulamenta que para o cálculo do comprimento de traspasse deve-se usar a equação abaixo.

$$l_{0c} = l_{b,nec} \geq l_{0,mín} \quad (9)$$

Montoya et. al. (2000) cita que nas barras comprimidas, assim como nas tracionadas, quando a armadura real for maior do que a necessária, podem ser reduzidos os tamanhos de ancoragem, restringindo para valores mínimo de 10 vezes o diâmetro da barra, 15cm ou, no mínimo 66% do comprimento de ancoragem, elevando esta última restrição que antes era de 33%.

4.3 Emendas

Esquivar-se do uso de emendas é sempre a melhor opção, porém trabalhamos com tamanhos usuais de barra, que na maioria dos casos é insuficiente para vencer os vãos. Caso não possam ser evitadas, são encontradas várias formas e dispositivos para armar o concreto que tem grandes dimensões, subdividindo as emendas em diretas e indiretas.

As emendas diretas não dependem do concreto para a transmissão dos esforços de uma barra a outra, como as soldadas. Já as indiretas, como por exemplo, as transpassadas, dependem da transmissão por aderência do concreto, requerendo largo cobrimento, armadura ou compressão transversal.

Quando forem necessárias as armaduras devem, segundo Montoya (2000), estar localizadas nas áreas em que trabalhem na máxima carga. Conforme sua teoria, também é conveniente distanciar as emendas de uma mesma armadura, ou seja, não as arranjar na mesma seção, distanciadas de no mínimo um comprimento (l_b).

4.3.1 Emendas Diretas

4.3.1.1 Emendas soldadas

As emendas soldadas solicitadas à tração e à compressão tem as mesmas condições para a execução. Leonhardt (1978) diz que devem ser unidas somente barras do mesmo tipo de aço, porém na NBR 6118:2014 não há esta especificação. A norma brasileira regulamenta os cuidados necessários “quanto a composição química dos aços e dos eletrodos e quanto às operações de soldagem”, que devem atender a normas específicas.

Conforme Leonhardt (1978), podem ser executadas as soldas como emenda de topo, por transpasse ou com cobre-juntas, e inclusive em peças curvas,

atendendo aos parâmetros mínimos de distâncias e escolhendo o processo de solda de acordo com a soldabilidade do material e tipo de carregamento.

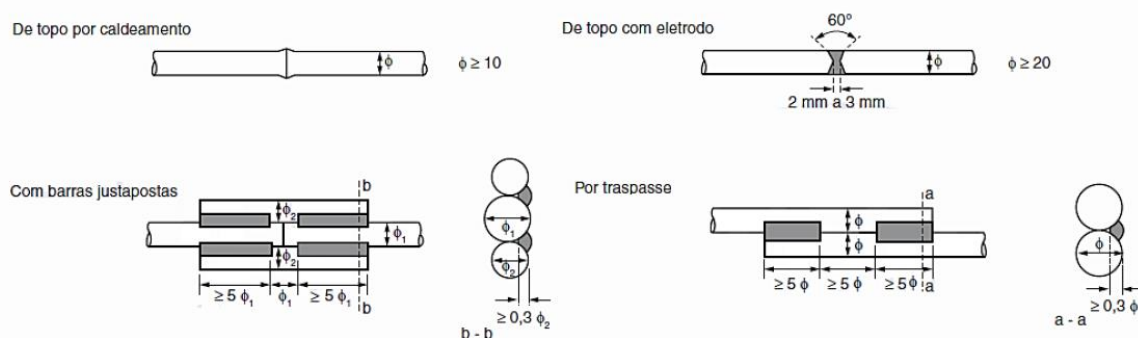
Segundo Montoya et. al. (2000), a soldabilidade do aço depende de sua composição química. O autor ainda cita que a norma espanhola limita os conteúdos máximos de carbono, fósforo, enxofre e nitrogênio, e que cada empresa deve especificar o método de solda mais adequado para o produto.

Na região soldada busca-se obter a mesma resistência presente no meio da barra, e acerca disto são encontradas várias teorias. Ainda são necessários testes que comprovem a total eficácia da região da solda, devido a divergência de opiniões encontradas nas normas e bibliografias.

No estudo de Leonhardt (1978), concluiu que todas as soldas na mesma seção transversal diminuem o desempenho da emenda e por isso não recomenda que tal arranjo seja feito. O autor ainda cita e se opõe ao especificado na norma alemã, a qual permite que todas as soldas fiquem dispostas na mesma seção. Na NBR 6118:2014 também não há especificação sobre as barras soldadas na mesma seção.

A NBR 6118:2014 aponta que é possível fazer emenda por solda de topo para bitolas maiores do que 10mm; de topo com eletrodo para bitolas maiores do que 20mm; por traspasse com cordões de solda longitudinais que atendam aos espaçamentos mostrados na Figura 4; com barras justapostas, usando cordões longitudinais e coincidindo o eixo baricêntrico do conjunto com o eixo longitudinal das emendadas, também obedecendo aos espaçamentos abaixo.

Figura 4 – Emendas soldadas



Fonte: NBR 6118:2014, p.46.

4.3.1.2 Emendas com luvas rosqueadas ou prensadas

A NBR 6118:2014 diz que a resistência das emendas com luvas rosqueadas ou prensadas devem atender a normas específicas, e na ausência delas, “a resistência deve ser no mínimo 15% maior que a resistência de escoamento da barra a ser emendada, obtida em ensaio” (NBR 6118:2014, p. 45).

Segundo Leonhardt (1978) a emenda deste tipo pode ser feita sem restrições para os carregamentos estáticos, e quando não for predominante, devem ser feitos ensaios para viabilizar a utilização.

O recorte de roscas causa perda de seção, Leonhardt (1978) sugere que pode ser amenizada esta desvantagem engrossando na forja as extremidades das barras ou soldando no topo pedaços de barra com diâmetro maior (rosqueados e pré-fabricados). Quando for recortada, o autor diz que só deve ser considerada no cálculo a seção do núcleo, para considerar a seção total há a alternativa de laminar a rosca, evitando assim seu enfraquecimento.

Leonhardt (1978) diz que as luvas ou esticadores devem ter uma capacidade resistente maior às das barras a serem ligadas, e deveriam ser mais finas nas extremidades, para evitar que os primeiros dentes da rosca sejam solicitados em excesso. É necessário também, segundo ele, penetrar a barra nas luvas suficientemente, respeitando o cobrimento de concreto indicado e distância livre entre barras na zona de emenda em função do diâmetro.

4.3.1.3 Emendas com luvas de pressão para barras nervuradas

Usando uma prensa hidráulica os tubos-luva são comprimidos na obra, formando dentes ao se deformar contra as nervuras, e alongados. As barras, que podem ser de diâmetros diferentes, devem ficar livres para se deslocar no sentido longitudinal.

Podem ser também usadas em emendas rosqueadas, já que estas são fabricadas com aços de alta resistência. A capacidade resistente deste tipo equivale-se a da barra, para tração e compressão.

4.3.1.4 Emendas com luvas termite

Refere-se a um tipo especial de aço, o termite, que preenche o espaço vazio entre a luva e a barra com uma mistura em que predominam óxido de ferro e alumínio (processo termite de Goldschmit, 1986). Segundo Leonhardt (1978), esta ligação tem os seus esforços transmitidos por aderência mecânica entre as superfícies nervuradas.

Na NBR 6118:2014 não há especificação para execução deste tipo específico de emenda. A emenda é feita com um cadinho, processa-se a fusão ligando-o a luva com suporte com tubo de alimentação, nas posições vertical, horizontal ou inclinada, conforme a possibilidade de conexão (Leonhardt, 1978).

4.3.1.5 Emendas de contato para barras comprimidas

Não há na NBR 6118:2014 especificação para execução de emendas de contato para barras comprimidas.

Segundo Leonhardt (1978), as emendas de contato verticais podem ser distribuídas uniformemente nas zonas comprimidas das peças estruturais em que predomina a compressão sem perigo de flambagem. No caso de pilares, ele indica seu uso somente em sistemas que não se deslocam horizontalmente e que apresentem pequenas excentricidades, dispostas somente nas quartas partes do comprimento.

Como indica Leonhardt (1978) nos outros casos, a seção em que serão distribuídas é limitada, podendoocar em cada apenas a metade das barras comprimidas e desde que se tenha no mínimo uma armadura contínua distribuída uniformemente. Segundo este autor, o corte das superfícies de contato deve ser perpendicular ao eixo e as rebarbas devem ser removidas, tomando cuidado para que na montagem estejam posicionadas com seus centros alinhados e seção de contato parcialmente visível.

4.3.2 Emenda indiretas por traspasse

A emenda por traspasse é feita, segundo Montoya (2000), arranjando as barras que se traspassam na melhor posição do concreto, deixando espaçamento

máximo de 4 vezes o diâmetro da barra (4ϕ). Caso este espaçamento seja maior, sugere que a quantidade de armadura transversal seja dobrada usando método de bielas e tirantes. A armadura transversal, segundo ele, tem a finalidade de absorver as ações tangentes que as barras que se traspassam geram. Esta armadura que normalmente já existe para absorver o cortante é suficiente.

Segundo Montoya et. al. (2000), alguns autores padronizam que nas zonas em que se traspassam mais da metade das barras existentes, sendo o diâmetro delas maior do que 16mm, “a seção da armadura transversal por unidade de comprimento não deve ser menor do que um terço da seção da barra mais grossa e sua separação não deve ser maior do que 15cm” (MONTROYA, 2000, p. 176).

4.3.2.1 Emendas por traspasse solicitadas à tração

Para as barras sujeitas a tração Montoya (2000) primeiramente sugere que não sejam emendadas por traspasse. Caso seja feito, o espaçamento mínimo não deve ser inferior ao diâmetro da barra mais grossa, 2 cm ou 1,25 vezes o diâmetro máximo do agregado, o que for maior. Tais valores são os mesmos indicados anteriormente para a distância mínima entre barras.

Ainda Montoya (2000) cita que a equação 11, provinda da norma espanhola, pode determinar o comprimento de traspasse nas barras solicitadas a tração, ela calcula o comprimento de traspasse através de um coeficiente α_1 que leva em conta a porcentagem de barras emendadas e seu diâmetro (retirado da tabela 1); a área de aço existente dividida pela área de aço necessária ($\frac{A_s}{A_{s,real}}$); e o comprimento de ancoragem l_b .

$$l_0 \geq \alpha_1 \cdot l_b \cdot \frac{A_s}{A_{s,real}} \quad (11)$$

Não podendo o valor resultante ser menor do que o comprimento mínimo de traspasse ($l_{0,min}$), que é o mesmo que o autor sugere para o mínimo de ancoragem: 33% do comprimento de ancoragem ($0,33 \cdot l_b$), 10 vezes o diâmetro da barra ou 15cm.

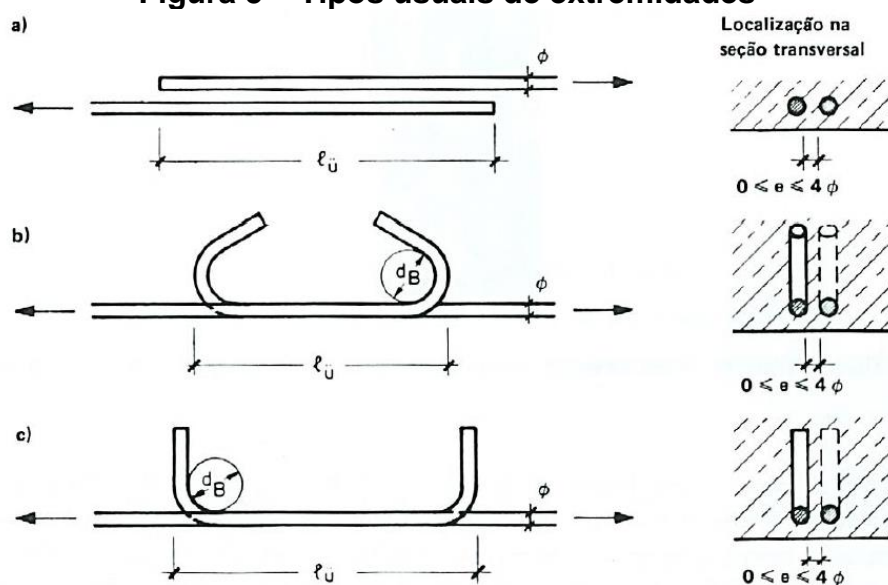
Tabela 1 – Valores dos coeficientes α_1

Separação do traspasse	Porcentagem de barras emendas				
	20%	25%	33%	50%	>50%
$\alpha \leq 10 \varnothing$	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$\alpha \geq 10 \varnothing$	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4

Fonte: Montoya, 2000, p. 177

Assim como o sugerido para Leonhardt (1978) para ancoragem, as emendas por traspasse podem ter suas extremidades retas ou com ganchos. A figura 5 mostra os três principais tipos usuais: com extremidades retas (a), com ganchos fechados (b) e com ganchos abertos (c).


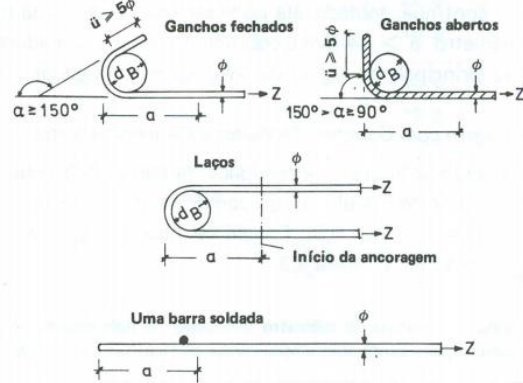
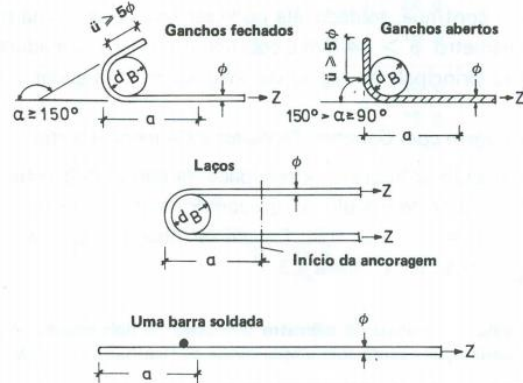
Figura 5 – Tipos usuais de extremidades



Fonte: Leonhardt, 1978, p.59.

Leonhardt (1978) ainda expõe que as emendas com ganchos fechados podem ser feitas em qualquer tipo de barra, porém, para ganchos abertos ou extremidades retas, devem ser usadas barras nervuradas obrigatoriamente. A Tabela 2 mostra os tipos de ancoragem, seus detalhes e coeficientes que o autor utiliza para cada uma.

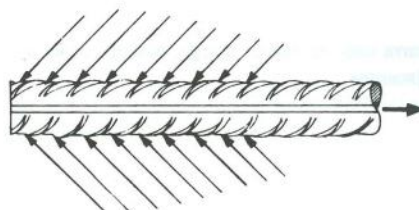
Tabela 2 – Coeficiente f conforme tipo de ancoragem

Tipo de Ancoragem	Coeficiente f	Detalhe da Ancoragem
Extremidades retas	1,0	
Ganchos fechados Ganchos abertos (admissíveis somente para barras nervuradas) Laços Extremidades retas com, pelo menos, uma barra transversal soldada, em qualquer posição dentro do trecho a	0,7	
Ganchos fechados, ganchos abertos ou laços, com pelo menos uma barra transversal soldada, no trecho a antes do início da curvatura Extremidades retas com pelo menos duas barras transversais soldadas no trecho a (distância entre barras transversais: $a_q < 10\text{cm}$)	0,5	

Fonte: Leonhardt, (1978) p. X

Leonhardt (1978) sugere que se prefira a forma reta à dobrada para não haver descontos devido ao dobramento, e neste caso, é indispensável a utilização de barras nervuradas, pois somente as barras nervuradas permitem a ancoragem por aderência, já que as nervuras da barra servem de apoio para as bielas de compressão (forças oblíquas), forçando a barra na direção transversal (Figura 6).

Figura 6 – Forças oblíquas na barra



Fonte: Leonhardt, (1978) p.34

No caso de dobramento, o comprimento deve ser considerado menor, proporcional a diminuição da parcela resistente. Segundo Leonhardt (1978) o

desconto admissível devido ao dobramento é de 0,7, dependendo dos pinos utilizados. Além disso, cita que só trabalham em força máxima após surgir e serem absorvidos os esforços de fendilhamento. Desta forma, o autor sugere que o esforço no gancho é aliviado com um comprimento reto maior anterior a ele.

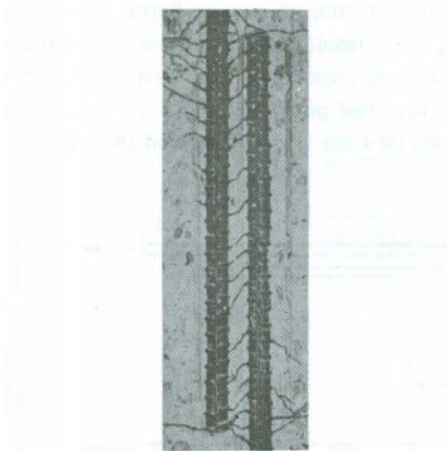
Ainda no caso de emendas com ganchos, Leonhardt (1978) diz que “o coeficiente $f=0,7$ para a determinação do comprimento de traspasse somente pode ser adotado quando for possível evitar um rompimento de concreto” (LEONHARDT, 1978, p.59). O autor ainda sugere que os ganchos podem ser dispensados no caso de cascas ou estruturas laminares e se utilizadas barras lisas e com mossas de diâmetro menor do que 8mm.

Assim, analisando as indicações de Leonhardt (1978), nas barras comprimidas a emenda só deve ser feita com barra nervurada, visto que neste tipo não se admitem ganchos, e a emenda reta só pode ser executada nas barras nervuradas.

O traspasse necessita de um comprimento maior do que aquele utilizado quando tratamos da ancoragem com espaçamento pequeno (no máximo quatro vezes o diâmetro delas) entre as. Na zona da emenda, se as barras estiverem dispostas uma sobre a outra, o braço de alavanca deve ser em relação às mais internas, indicado por Leonhardt (1978).

Um dos comportamentos mais importantes a se esclarecer sobre a emenda por traspasse é como a força de uma barra a outra é transmitida. Neste processo, é transferida por bielas de compressão, onde apenas uma parte de toda a barra pode participar. Na Figura 7 a seguir, obtida através do ensaio de Y. Goto (Japão, 1971) e apresentada por Leonhardt (1978), é possível observar no fendilhamento este comportamento.

Figura 7 – Fissuras entre as barras mostram bielas comprimidas (Ensaio de Y. Goto, Japão, 1971).

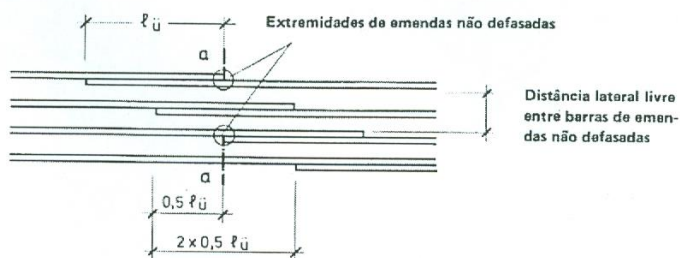


Fonte: Leonhardt, 1978, p. 60.

As bielas de compressão se comportam como uma treliça, com forças de tração transversal que variam ao longo do comprimento, e que não são observadas na ancoragem, por exemplo. Estas forças transversais, que podem se superpor, aumentam o risco de o cobrimento de concreto se romper e por isso Leonhardt (1978) indica que, quando há pouco espaçamento lateral nas emendas, se aumente o comprimento de traspasse ou se diminua a quantidade de barras emendadas (quando se trata de barras grossas maiores do que 14mm).

O valor da distância longitudinal a serem defasadas as emendas, por indicação de Leonhardt (1978) é da ordem de 0,4 a 0,6 de seu tamanho longitudinal. A Figura 8 mostra que quando duas emendas forem defasadas com valor próximo a 0,5, devem ser consideradas como na mesma seção transversal e que suportam menos esforços. O autor faz uma comparação com a norma alemã, na qual a defasagem citada anteriormente não é considerada. Ele considera tal defasagem muito vantajosa na emenda com extremidades retas, julgando ser muito eficiente contra abertura de fissuras.

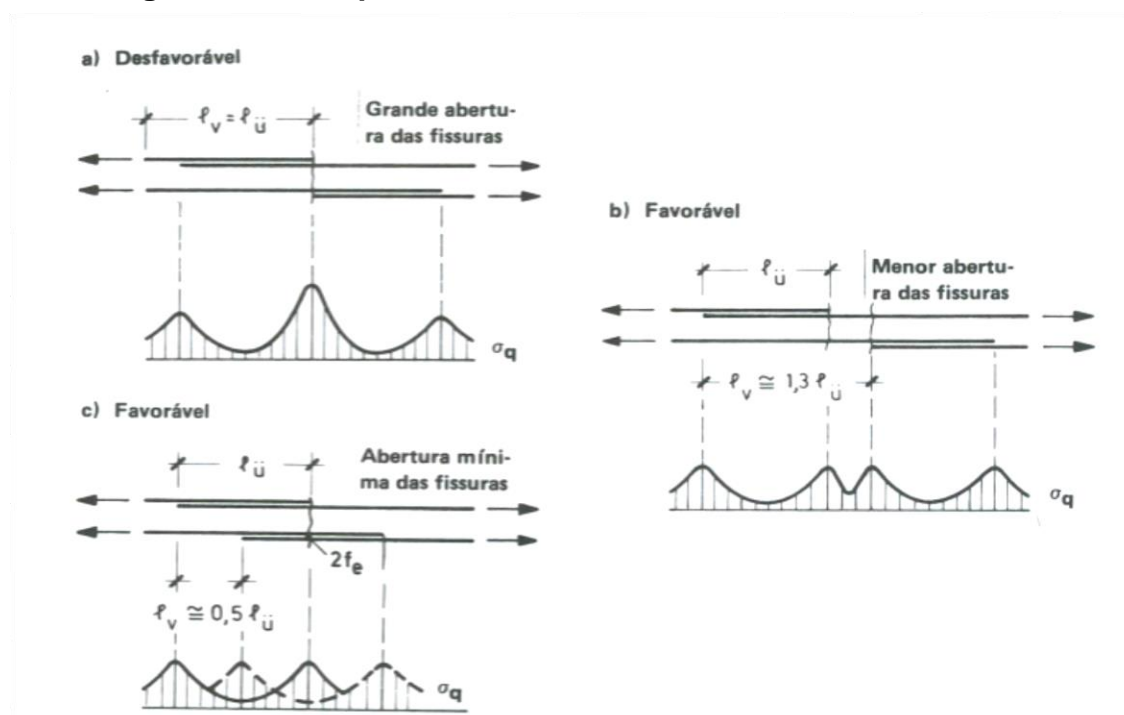
Figura 8 – Defasagens longitudinais



Fonte: Leonhardt, 1978, p.63

A Figura 9 traz exemplos de Leonhardt (1978) quando as emendas próximas podem ser favoráveis ou desfavoráveis. Segundo ele, reduzindo a tensão na região da emenda, é menor a chance de aparecerem fissuras e a tensão é reduzida quando não há na mesma região intersecção de duas emendas, como mostram os exemplos a, b e c.

Figura 9 – Exemplos de emendas favoráveis e desfavoráveis



Fonte: Leonhardt, (1978). p.62

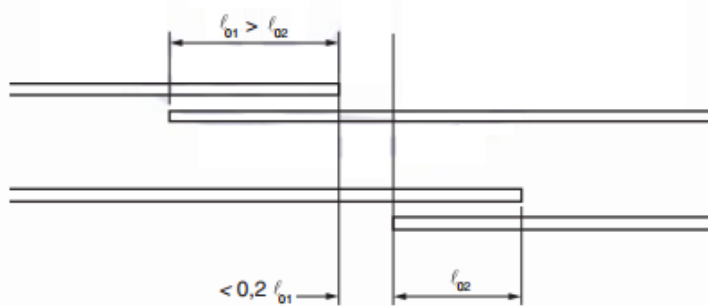
Na Figura 9, o primeiro caso (a) mostra que as duas emendas na mesma seção resultam em uma superposição das tensões em um mesmo ponto, que resultam no fendilhamento. Segundo Leonhardt (1978) este valor é facilmente reduzido afastando as emendas, executando uma em cada seção, a tensão por seção transversal se torna menor e mais fácil de ser suportada. Na situação em que há armadura em várias camadas, o transpasse em cada uma deve ser defasado longitudinalmente na grandeza de 1,3.

O comprimento de transpasse necessário para as emendas tracionadas é determinado, conforme Leonhardt (1978) com um coeficiente k que é multiplicado ao comprimento de ancoragem α . É definido com base na situação da armadura, distância transversal entre emendas não defasadas, diâmetro da barra e porcentagem de barras emendadas sem defasagem longitudinal. Ele varia de 0,68 a 1,65.

A porcentagem admissível, ainda segundo Leonhardt (1978), de barras emendadas numa seção é de 100% para barras nervuradas e 33% para barras lisas, em uma camada. Os comprimentos de traspasse podem ser facilmente determinados com uma tabela fornecida pelo autor que indica valores básicos de comprimento em função das distâncias transversais.

A NBR 6118:2014 no seu item 9.5.2.1 considera barras na mesma seção aquelas que estiverem afastadas a menos de 20% do comprimento do trecho de traspasse. E quando as barras a serem emendadas tiverem diâmetros diferentes, o valor adotado deve ser em relação a porcentagem da barra de maior diâmetro (Figura 10 abaixo).

Figura 10 – Emendas na mesma seção transversal



Fonte: NBR 6118:2014. p.42.

A 6118:2014 também normatiza que as barras tracionadas emendadas na mesma seção transversal obedeçam a Tabela 3 abaixo, que relaciona o tipo de barra, com sua situação e o tipo de carregamento.

Tabela 3 – Proporção máxima de barras tracionadas emendadas

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

Fonte: NBR 6118:2014 p.43

Comparando o indicado para barras de alta aderência (nervuradas) por Leonhardt (1978) com a norma alemã, considerando carregamento estático ou dinâmico em uma camada, é igual. Não há na DIN 1045 especificação para duas camadas, já na NBR 6118:2014 indica que se use somente 50% e para as barras nervuradas, a brasileira também considera uma porcentagem menor.

O cálculo do comprimento da emenda tracionada segundo a NBR 6118:2014, quando a distância livre for de até quatro vezes o diâmetro da barra, é feito com a equação 12. O comprimento da emenda será dado pela multiplicação entre o coeficiente da porcentagem de barras emendadas na mesma seção (Tabela 4) e o comprimento de ancoragem necessário. Este valor deve ser igual ou maior do que o comprimento de transpasse mínimo.

$$\ell_{ot} = \alpha_{ot} \cdot \ell_{b,nec} \geq \ell_{ot,min} \quad (12)$$

Tabela 4 – Valores do coeficiente α_{ot} .

Barras emendadas na mesma seção (%)	≤ 20	25	33	50	> 50
Valores de α_{ot}.	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0

Fonte: NBR 6118:2014. p.43.

O comprimento mínimo de transpasse será o maior valor entre 0,3 , 15 vezes o diâmetro da barra e 200mm.

É necessário uso de uma armadura transversal que tenha os critérios da NBR 6118:2014 atendidos. Segundo Araújo (2014) ela “melhora a ductibilidade na região da emenda, evitando uma ruptura brusca pelo cobrimento de concreto”.

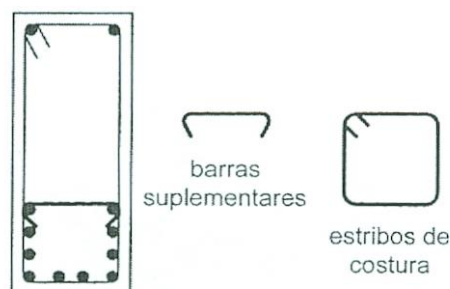
O cálculo da armadura transversal A_{st} , de acordo com a NBR 6118:2014, segue mesmo critérios usados para as tracionadas, descritos abaixo. Levam em consideração o diâmetro e a proporção das barras emendadas na mesma seção:

a) Quando o diâmetro for menor do que 16mm e a proporção das barras emendadas for menor do que 25%, a armadura transversal deve resistir a 25% da força atuante em uma das barras emendadas. Assim, se armadura emendada está com tensão igual a e for da mesma categoria do aço da armadura de costura, deve ser igual a 25% da área da seção de uma barra emendada.

b) Quando o diâmetro for maior ou igual a 16mm ou quando a proporção de barras emendadas na mesma seção for maior ou igual a 25%, a armadura transversal deve resistir a 100% da força atuante em uma das barras emendadas.

c) Se a distância entre as duas barras mais próximas de duas emendas na mesma seção for menor do que 10 vezes o diâmetro da barra, a armadura transversal deve ser constituída de estribos fechados, conforme a Figura 11.

Figura 11 – Armadura transversal nas ancoragens



Fonte: Araújo, 2014, p. 285.

4.3.2.2 Emendas por traspasse solicitadas a compressão

Para especificar a emenda por traspasse nas peças solicitadas à compressão, levam-se em conta as mesmas considerações usadas na ancoragem de barras comprimidas, pois ambas têm um comportamento semelhante.

Em conformidade com Leonhardt (1978), para as emendas que só resistem à compressão, não são adequados ganchos fechados ou abertos. Os autores também citam que na DIN 1045 eles já foram exigidos no caso de barras lisas, porém já foi adequada e não possui mais esta indicação. Quando se tratar de emenda com barra lisa comprimida, é indicado que se dê preferência para o uso de outro tipo de emenda, como por solda de topo ou por contato, exemplificando.

A trabalhabilidade do aço, que varia tensão conforme se aproxima do limite de escoamento; transmissão de pressão de ponta, que pode causar rompimento em forma de cone próximo a superfície; a necessidade de se ter uma armadura transversal para evitar rompimento da casca; descontos devido a ganchos que não permitidos; são todos fatores considerados na hora de definir o comprimento de ancoragem e devem ser considerados para determinar o de traspasse.

Em comparação com as emendas tracionadas, onde a força faz com que a tensão atue de “dentro para fora” na seção, a emenda comprimida transfere a força de compressão de “fora para dentro”, por isso não é necessário majorar as forças.

Para barras permanentemente comprimidas Montoya (2000) sugere que o comprimento de ancoragem não deve ser inferior ao comprimento de ancoragem e que a porcentagem de emendas na seção pode se elevar a 100% das barras.

Leonhardt (1978) sugere que para o traspasse da emenda se use o comprimento maior ou igual ao de ancoragem, no mínimo. A NBR 6118:2014 diz

que quando as barras estiverem comprimidas, o comprimento de traspasse deve ser adotado conforme a equação 13 abaixo, que também leva em conta o cálculo feito para ancoragem.

$$\ell_{0c} = \ell_{b,nec} \geq \ell_{0c,min} \quad (13)$$

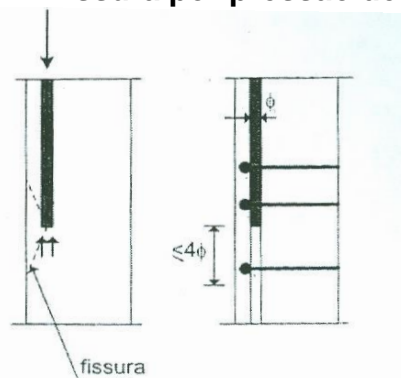
Logo, o comprimento de traspasse é igual ao comprimento de ancoragem necessário. Sendo que este valor deve ser maior do que o comprimento de traspasse mínimo, o maior valor entre 0,6, 15 e 200mm.

Comparando com o indicado para as tracionadas, o cálculo de comprimento de traspasse para as barras comprimidas se difere principalmente por parte da força a ser ancorada pelo efeito de ponta, não necessitando multiplicar por coeficiente algum.

O espaçamento máximo entre as barras emendadas por traspasse, segundo Guerrin (2002) deve ser igual a no máximo 4 vezes o diâmetro nominal da barra. Na NBR 6118:2014, não há menção sobre qual deve ser o espaçamento entre as barras traspassadas.

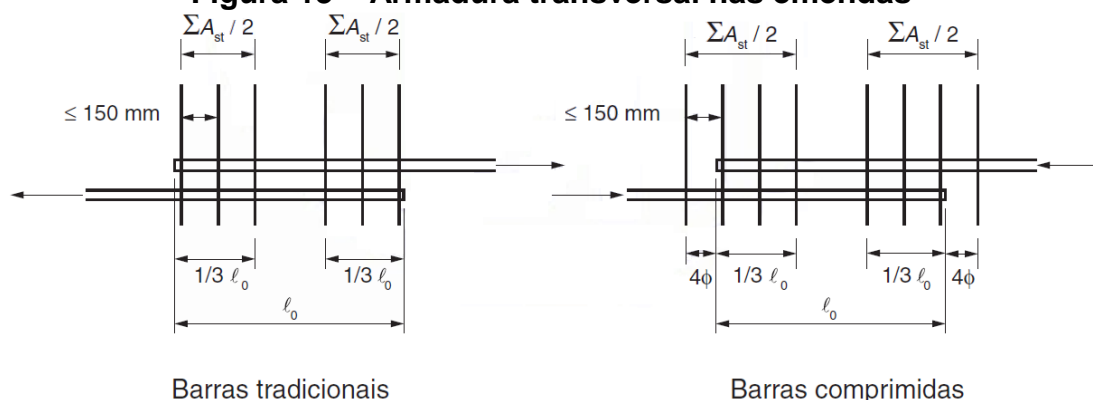
É necessário uso de uma armadura transversal, inclusive após o comprimento das barras, para evitar rompimento por pressão de ponta, como mostra a Figura 12 abaixo. Segundo Araújo (2014), a armadura transversal aumenta a ductibilidade da região da emenda, evitando uma ruptura brusca por descolamento do cobrimento de concreto.

Figura 12 – Fissura por pressão de ponta



Fonte: Araújo, 2014, p.284

A NBR 6118:2014 no seu item 9.5.2.4.2 diz que devem ser mantidos para barras comprimidas, os mesmos critérios usados nas tracionadas, utilizando uma barra de aço a mais na armadura transversal, locada numa distância igual a 4 vezes o diâmetro da barra após o término da barra emendada, conforme mostra a Figura 13.

Figura 13 – Armadura transversal nas emendas

Fonte: NBR 6118:2014, p.44

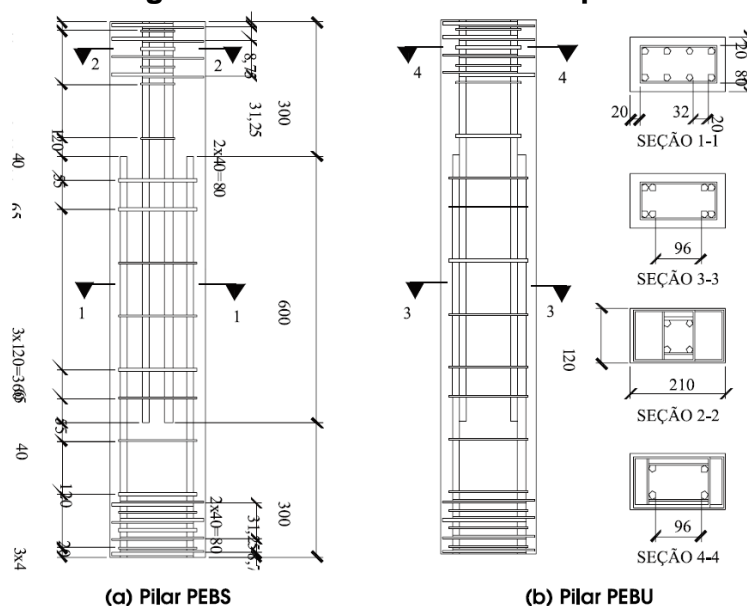
Segundo Leonhardt (1978) a norma alemã diz que “no caso de peças estruturais solicitadas predominantemente à compressão os critérios se aplicam, separadamente para a armadura de cada lado da seção transversal” (LEONHARDT, 1978, p. 71). Também é necessário respeitar a porcentagem máxima de armadura admissível e quando a distância longitudinal entre os pontos médios forem no mínimo 30% a mais do comprimento de transpasse, a emenda é considerada defasada.

4.4 Comportamento das emendas por traspasse

O bom desempenho de uma emenda é influenciado pela aderência ao longo da superfície das barras emendadas, sendo o concreto responsável por transferir as tensões. O comportamento das emendas por traspasse tem sido estudado, pois os resultados encontrados nas literaturas são pouco conclusivos.

Quintana (2008) fez um estudo experimental sobre o comportamento de emendas por traspasse de barras comprimidas em pilares de concreto armado submetido à compressão centrada. O autor diz que os estudos existentes são na maioria feitos para barras tracionadas, por serem mais críticas do que as comprimidas. No entanto, nas emendas comprimidas existe ausência de fissuras, e presume-se que haja diferenças no comportamento.

Figura 14 – Detalhamento dos pilares



Fonte: Quintana (2005), p. 275

O experimento de Quintana (2008) foi feito a partir de dois pilares curtos (210 mm x 120 mm, comprimento de 1,20 m) detalhados na Figura 14 sob compressão centrada, adotando a separação das barras como variável. Nomeados PEBU e PEBS, Pilar com Emendas Justapostas e Pilar com Emendas Separadas, respectivamente, os corpos-de-prova tem diferença no posicionamento das barras. Como o próprio nome já diz, um deles com as barras justapostas e outro com barras separadas duas vezes o diâmetro.

Os estribos nas extremidades dos pilares foram espaçados de 20 mm e nas extremidades das emendas foram posicionados mais próximos. O posicionamento dos estribos foi com base na concentração das tensões, explicando a maior proximidade entre eles na região da emenda (maior concentração de tensões). A resistência a compressão do concreto e a tensão do aço foram obtidas através de ensaio, atingindo os valores conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Valores característicos dos pilares

Pilar	Dimens. da seção (mm)	Comp. (mm)	Armad Long.	Separação das Barras* (mm)	f_y (MPa)	ρ_1 * (%)	ϵ_{sy} (%)	Armad Transv	f_c (MPa)
PEBU	210x120	1200	4 ϕ 16mm	0	544	6,4	2,7	Ø5mm com espaç. variável	31,3
PEBS				32					

*na emenda

Fonte: Quintana, 2008, p. 275

O ensaio teve como procedimento a medição das deformações, na região da emenda foram colados extensômetros elétricos de resistência com 10mm de comprimento, variando o número nos diferentes pilares. Na região da emenda as deformações específicas foram medidas com extensômetros elétricos de 6,7 cm, que foram colados em faces opostas.

Para acomodar os pilares, antes das placas metálicas presentes na base e no topo, foram colocadas capas de material compressível. Um apoio metálico foi usado para garantir o posicionamento do pilar. Quintana (2008) para garantir a transmissão de carga centrada ao pilar, coincidiu os eixos de simetria dos dois macacos hidráulicos usados com os dos pilares.

Aplicou-se a carga ao pilar a uma taxa de 40kN por minuto, em três ciclos sem interrupção: no primeiro o pilar foi carregado até 400kN e descarregado em seguida; no segundo a carga chegou próxima à de serviço, 800kN, e foi retirada; no terceiro foi aplicado carga até a ruptura. Destacando que as deformações específicas foram sempre monitoradas.

Os modos de ruptura foram iguais nos dois pilares, Quintana (2008) observou que em ambos foi repentina e na região coincidente com o extremo da emenda, já o valor de carga de ruptura se diferenciou, tendo o menor valor o pilar com as barras separadas. Segundo ele, o menor valor pode ter sido obtido pelo fato de haver uma “pequena distância entre as barras longitudinais na região da ruptura, o que diminuiu a contribuição dessas barras no caso da existência de uma excentricidade causada por imperfeições” (QUINTANA, 2008, p.277).

As curvas de deformação específica obtidas com os resultados dos ensaios mostraram que os maiores valores se desenvolveram na face do pilar onde ocorreu a ruptura do concreto. Já as curvas de tensão normal mostraram que “para qualquer valor de carga, em ambos os pilares, a tensão normal na barra na zona da emenda aumentou à medida que o ponto instrumentado se distanciava da ponta da barra” (QUINTANA, 2008, p.278).

Os resultados também mostram que em comparação com outros pontos das barras, as pontas apresentaram menor aumento de tensão normal conforme foi aumentado a tensão de carga. Quintana (2008) também destaca que não há grande diferença quanto a variação das tensões normais ao longo da emenda entre os dois pilares, mostrando que não há grande influência dos valores utilizados neste estudo, na separação de barras no comportamento global da emenda comprimida.

Nos dois pilares, no momento da carga última, as pontas das barras apresentaram valores 2 a 5 vezes a resistência à compressão uniaxial do concreto. Quintana (2008) cita que valores semelhantes já haviam sido encontrados anteriormente por Pfister e Mattock (1963) e Scott et. al. (1989), que também chegaram a conclusão de que as tensões no concreto devido à compressão das pontas excediam a resistência uniaxial à compressão do concreto. O autor ainda observou que a relação entre a tensão de ponta e a da extremidade da emenda aumenta proporcionalmente ao aumento de carga.

Quanto a aderência, as tensões apresentam diferença entre os pilares, mesmo que a carga tenha sido aplicada da mesma forma (centrada) em ambos. Quintana (2008), comparando um mesmo valor de deformação específica medido no início do trecho, observou que “a distribuição das deformações numa dada seção transversal não foi uniforme devido a pequenas imperfeições”, apresentaram diferenças nas tensões, que foram obtidas nas cinco diferentes posições das barras de aço, em cada um dos quatro trechos.

Os resultados mostram que os valores da tensão de aderência são maiores nas extremidades das barras, se mostrando maior próximo a ponta. Quintana (2008) ainda cita que Scott et. al. (1989) chegou à conclusão que os maiores valores de tensão de aderência ocorreram nas pontas, ensaiando elementos sujeitos à compressão com barras emendadas. Nos 12 ensaios de Quintana (2005), onde as barras foram submetidas a compressão excêntrica, ele observou que os maiores valores de tensão de aderência foram perto das pontas.

“Levando-se em conta as possíveis imperfeições dos pilares, pode-se dizer que o comportamento global da emenda dos dois pilares foi similar. Ensaios de vigas com emendas das barras tracionadas justapostas ou separadas de um e dois diâmetros (CHAMBERLIN, 1958) ou de 2,5 diâmetros (CHINN, FERGUSON E THOMPSON, 1955) mostraram também não haver diferença relevante entre as resistências dessas emendas.” (QUINTANA, 2008).

Por fim Quintana et. al. (2008) diz que mesmo as barras em contato não tendo concreto envolvendo-as e considerando a armadura transversal usada, as tensões de aderência desenvolvidas foram da mesma ordem que as barras separadas por dois diâmetros.

Quintana et. al. (2008) concluiu com seu experimento que para os dois pilares, as pontas das barras tiveram um valor de tensão, na carga última, de 2 a 5 vezes o valor do concreto de resistência à compressão. “Para todas as barras, a relação

entre as tensões normais na extremidade da emenda aumentou com o incremento da carga”.

Outro fato observado, foi que a tensão de aderência, em ambos os pilares, teve maior valor próxima às extremidades, sendo cada vez maior próximo a ponta, e que estes valores foram similares para os dois pilares. Segundo Quintana (2008), isto mostra a pouca influência do espaçamento entre as barras emendadas no comportamento global da emenda comprimida.

O autor ainda recomenda “estender o estudo a um número maior de ensaios de pilares com emendas comprimidas onde o espaçamento entre as barras emendadas abranja uma maior faixa de valores” (QUINTANA, 2008, p.281).

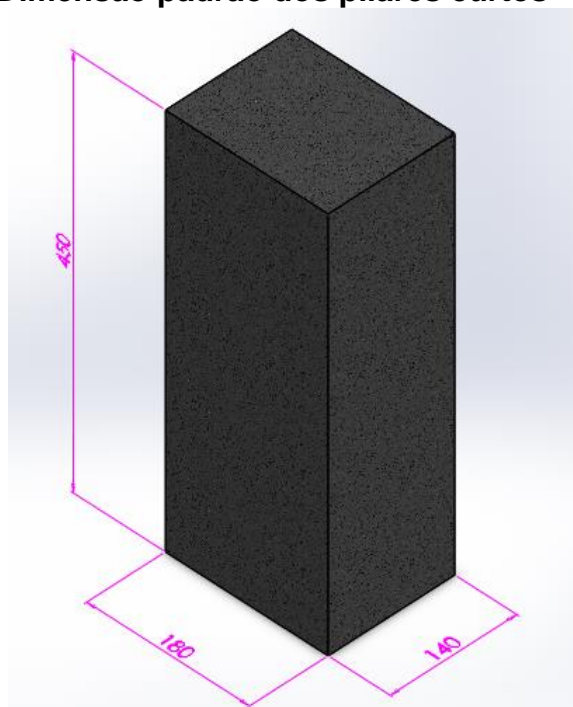
5. MATERIAIS E MÉTODOS

A partir estudo detalhado dos fundamentos teóricos que envolvem o comportamento da emenda traspassada, a realização da pesquisa busca identificar as características de desempenho da mesma, para viabilizar o dimensionamento de um modelo teórico que deve ser comparado com o experimental. O procedimento adotado visa identificar a influência das características geométricas nas propriedades mecânicas dos modelos.

5.1 Definição dos modelos testados

As características geométricas dos pilares curtos foram definidas conforme as limitações da prensa usada no ensaio de compressão. Para os ensaios são utilizados quatro tipos de corpos de prova, sendo um de parâmetro e outros três onde variam o espaçamento das barras emendadas. No total, são ensaiados doze modelos, com seção transversal de 140x180mm e altura 450mm, conforme mostra a Figura 15 abaixo.

Figura 15 – Dimensão padrão dos pilares curtos – 18x14x45cm

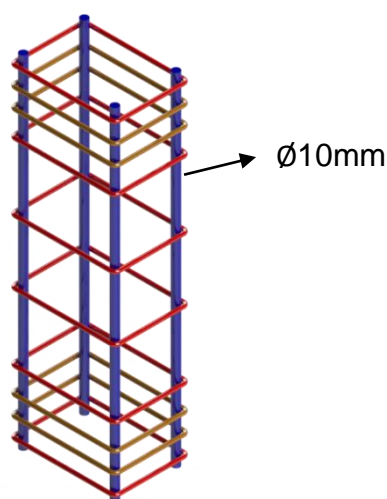


Fonte: Autora, 2015

5.1.1 Modelo 1

O primeiro modelo foi dimensionado para ser usado como parâmetro, com as quatro barras longitudinais inteiras, amostrando qual deve ser a resistência a ser atingida pelos modelos com as barras emendadas por traspasse. A figura a seguir, mostra um modelo tridimensional da armadura.

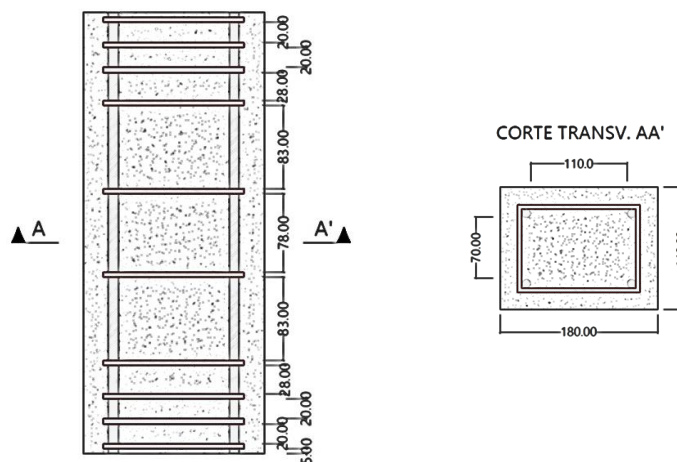
Figura 16 – Armadura do modelo 1 – Esquema tridimensional



Fonte: Autora, 2015.

Como citado, as barras longitudinais foram adotadas conforme a seção do pilar, de 140x180mm. Já a armadura transversal, composta por estribos de diâmetro 5mm com espaçamento variável, dimensionada conforme a seção longitudinal do pilar (450mm), que resultou em seis estribos, distribuídos conforme a figura abaixo.

Figura 17 – Vista lateral e seção transversal do modelo 1



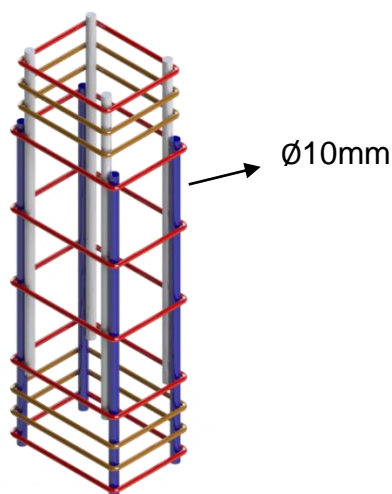
Fonte: Autora, 2015.

Na base e no topo do pilar, foram colocados estribos espaçados de 20mm, para que se obter um confinamento maior e evitar rompimento nessas regiões. Após o fim da emenda, foi tomado cuidado para que houvesse um estribo a no máximo quatro vezes o diâmetro nominal da barra (40mm), atendendo a indicação do item 9.5.2.4.2 da NBR 6118:2014.

5.1.2 Modelo 2

O segundo modelo de pilar curto é com as barras de diâmetro 10mm traspassadas encostadas. Os estribos utilizados são os mesmos do modelo 1, seis barras de diâmetro 5mm com espaçamento variável, com a base e topo reforçados com mais dois estribos em cada face. A figura seguinte mostra o esquema de armadura do modelo 2.

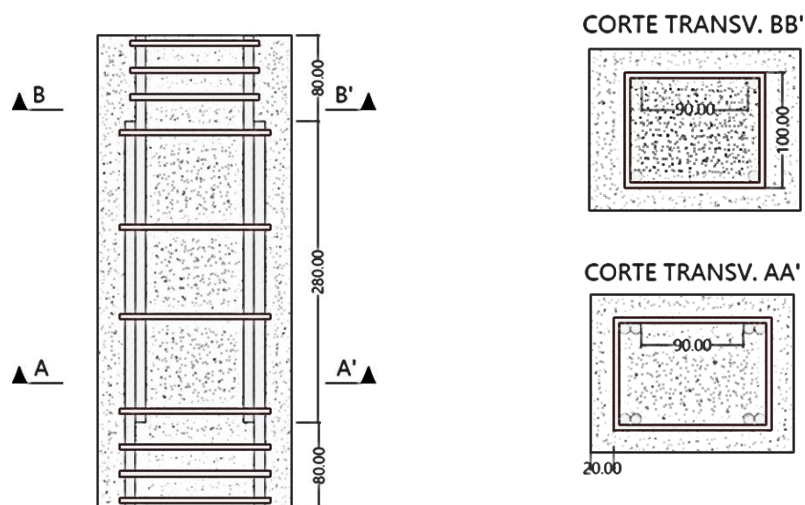
Figura 18 – Armadura do modelo 2 – Esquema tridimensional



Fonte: Autora, 2015

O dimensionamento do tamanho da emenda é padrão para os três modelos traspassados, atendendo ao mínimo que a NBR 6118:2014 indica, totalizando 280mm. A figura ao mostra os cortes transversal e longitudinal deste modelo.

Figura 19 – Vista lateral e seção transversal do modelo 2

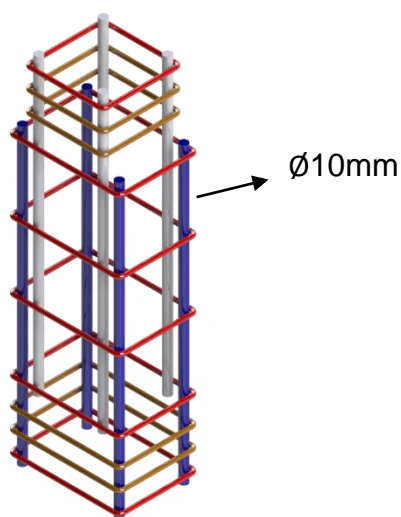


Fonte: Autora, 2015.

5.1.3 Modelo 3

O terceiro modelo de pilar curto é com as barras de diâmetro 10mm traspassadas na ordem de uma vez o diâmetro nominal da barra, no caso, 10mm. Os estribos utilizados são os mesmos, seis barras de diâmetro 5mm com espaçamento variável, com a base e topo reforçados com mais dois estribos em cada face. A figura seguinte mostra o esquema de armadura do modelo 3.

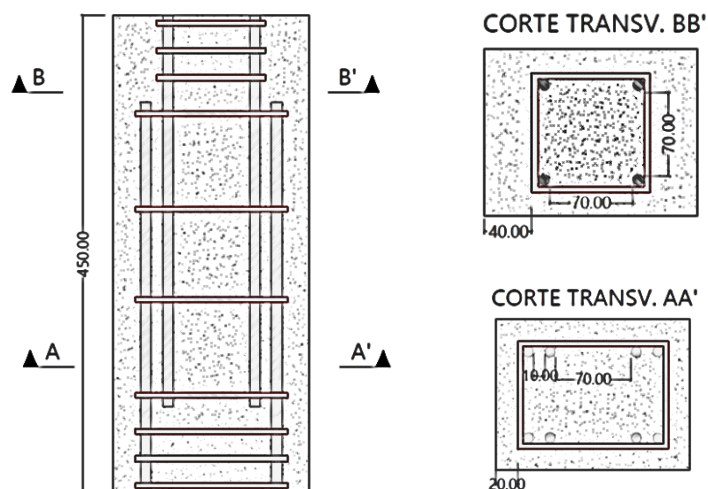
Figura 20 – Armadura do modelo 3 – Esquema tridimensional



Fonte: Autora, 2015

A figura 21 abaixo mostra os cortes transversal e longitudinal deste modelo.

Figura 21 – Vista lateral e seção transversal do modelo 3

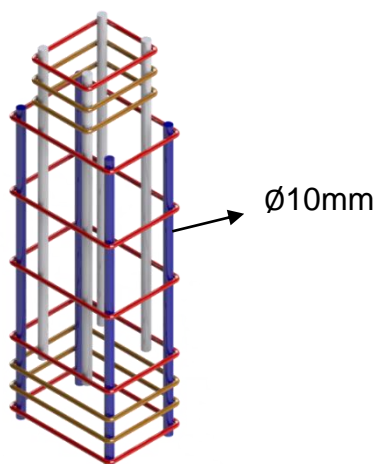


Fonte: Autora, 2015.

5.1.4 Modelo 4

O último modelo de pilar curto é com as barras de $\varnothing 10\text{mm}$ afastadas na ordem de dois diâmetros, 20mm. Os estribos utilizados são os mesmos do modelo 1, seis barras de diâmetro 5mm com espaçamento variável, com a base e topo reforçados com mais dois estribos em cada face. A figura seguinte mostra o esquema de armadura do modelo 4.

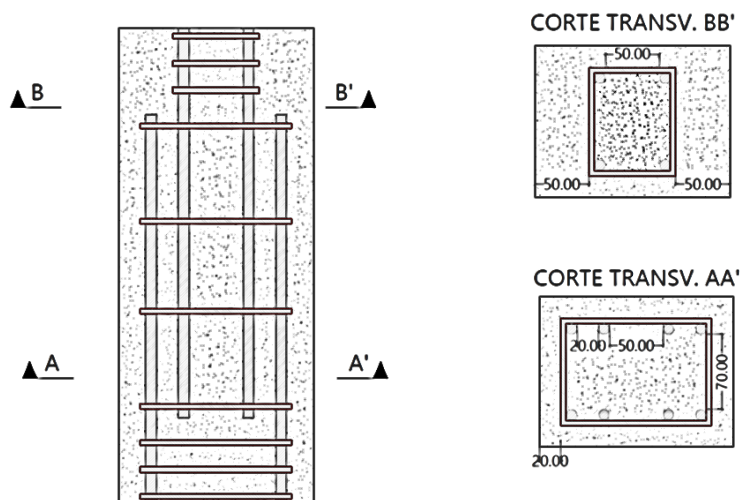
Figura 22 – Armadura do modelo 4 – Esquema tridimensional



Fonte: Autora, 2015

O dimensionamento do tamanho da emenda é padrão para os três modelos, foi feito conforme a totalizando 280mm. A figura abaixo mostra os cortes transversal e longitudinal deste modelo.

Figura 23 – Vista lateral e seção transversal do modelo 4



Fonte: Autora, 2015.

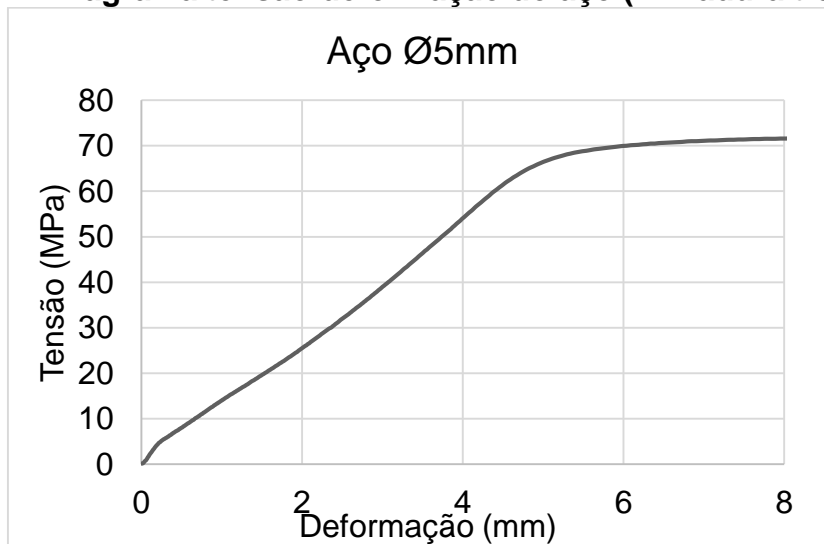
5.2 Materiais

5.2.2 Aço

A armadura longitudinal é composta por 4 barras de aço tipo CA60 de 10mm de diâmetro e armadura transversal composta de estribos de aço tipo CA60 de 5mm conforme parâmetros definidos pela NBR 6118:2014.

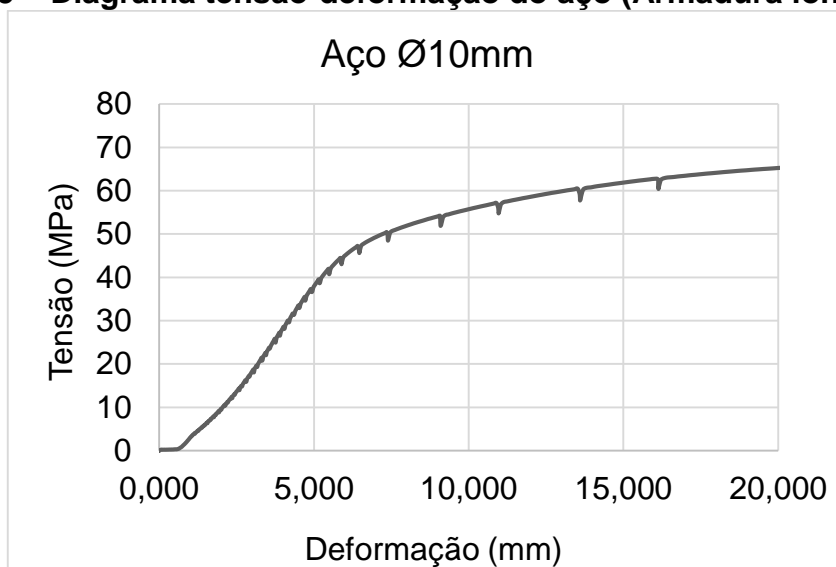
Para obtenção da curva tensão-deformação dos dois tipos de aço utilizados foram ensaiados corpos de prova do material. A armadura transversal apresentou tensão de escoamento de 675MPa (Figura 24) e a longitudinal 609MPa (Figura 25).

Figura 24 – Diagrama tensão-deformação do aço (Armadura transversal)



Fonte: Autora, 2015

Figura 25 – Diagrama tensão-deformação do aço (Armadura longitudinal)



Fonte: Autora, 2015

Os quatro tipos de armadura foram previamente montados conforme o dimensionamento, utilizando aço CA60. As barras foram cortadas com equipamento de corte conforme os tamanhos necessários, no pilar usado como parâmetro foram usadas quatro barras de 45cm de comprimento e nos demais de 36cm, levando em conta os 28cm do traspasse.

Figura 26 – Equipamento de corte e barras de aço cortadas



Fonte: Autora, 2015

A execução das armaduras se mostrou bastante complexa devido ao tamanho reduzido dos pilares, já que os estribos são bastante próximos. A amarração da armadura foi feita com arame recozido, para que os espaçamentos se mantivessem intactos durante a concretagem.

Figura 27 – Processo de montagem das armaduras

Fonte: Autora, 2015

5.2.3 Concreto

O concreto foi produzido com auxílio de uma betoneira. O traço do concreto foi de 1:1,25:2,10, cimento, areia e brita em massa. Foi utilizado cimento CP V e brita 0 de diâmetro máximo do agregado graúdo de 9,5mm. Ainda é importante ressaltar que a argamassa foi preparada em duas etapas, visto que a capacidade da betoneira não seria suficiente para o volume necessário para concretagem dos doze pilares curtos.

Figura 28 – Preparação da argamassa na betoneira

Fonte: Autora, 2015

Todo o procedimento foi executado conforme NBR 5738:2003. Utilizando os equipamentos padrão foi realizado o teste de *Slump* para as duas argamassas, que ficou dentro do estabelecido com abatimento do cone de 13cm para a primeira mistura, conforme mostra a figura abaixo e 11cm para a segunda.

Figura 29 – Teste de *Slump*



Fonte: Autora, 2015

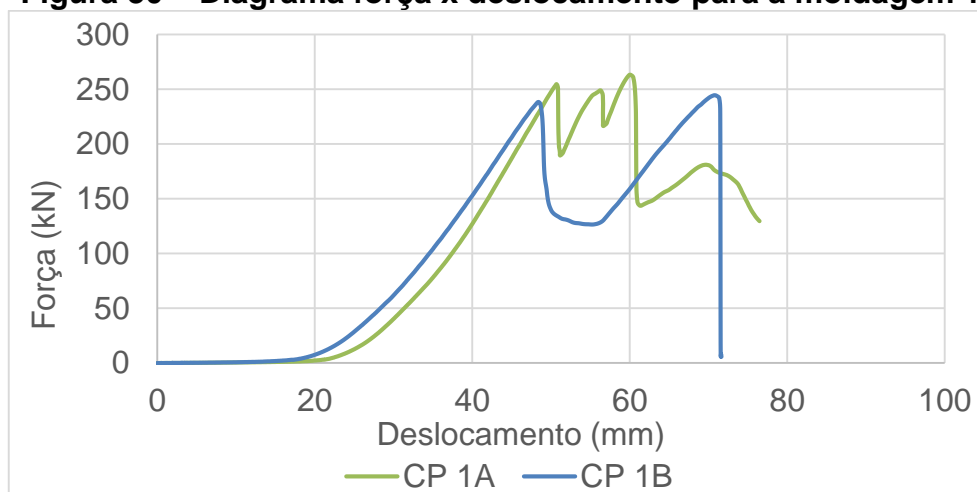
Foram moldados três corpos de prova para cada etapa feita, para amostragem da resistência do concreto, que atingiu nos ensaios de compressão cilíndrica os valores mostrados nas Tabelas 6 e 7 abaixo. Na moldagem 1, o concreto atingiu resistência média de 32,3MPa e na moldagem 2 27,7MPa.

A Tabela 6 apresenta os dados obtidos nos ensaios de compressão para os corpos de prova da Moldagem 1. Em seguida, a Figura 30 apresenta o diagrama dos resultados do ensaio.

Tabela 6 – Valores da resistência do concreto na moldagem 1

Moldagem 1		
Corpo de prova	f_c (MPa)	f_{cm} (MPa)
C-1	33,51	32,3
C-2	31,12	

Fonte: Autora, 2015

Figura 30 – Diagrama força x deslocamento para a moldagem 1

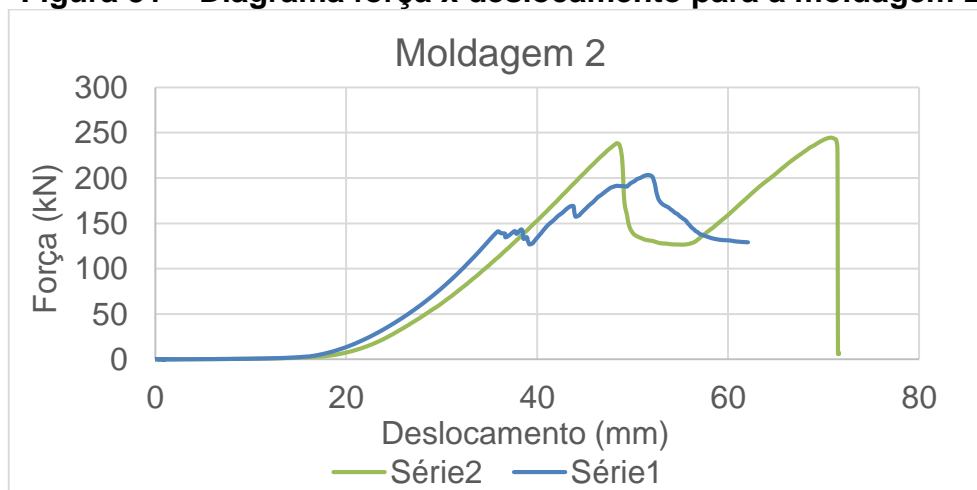
Fonte: Autora, 2015

Na Tabela 7 estão os valores de resistência obtidos nos ensaios de compressão para os corpos de prova da Moldagem 2. Em seguida, a Figura 31 exibe o diagrama com os resultados de força e deformação do ensaio.

Tabela 7 – Valores da resistência do concreto na moldagem 2**Moldagem 2**

Corpo de prova	f_c (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)
C-1	25,85	27,7
C-2	29,51	

Fonte: Autora, 2015

Figura 31 – Diagrama força x deslocamento para a moldagem 2

Fonte: Autora, 2015

Figura 32 – Corpos de prova do concreto

Fonte: Autora, 2015

5.4 Formas

Com as dimensões externas dos pilares foram confeccionadas formas especiais de MDF impermeabilizadas para concretagem dos modelos. A concretagem foi feita horizontalmente e as armaduras foram fixadas nas formas com arame recozido, desta forma o cobrimento de 2cm foi garantido. A figura abaixo mostra a forma, a armadura antes de ser posicionada e depois de posicionada.

Figura 33 – Formas de MDF e armaduras

Fonte: Autora, 2015

Figura 34 – Armadura posicionada com arame recozido



Fonte: Autora, 2015

5.3 Moldagem dos protótipos de pilares

Com os modelos identificados conforme a variação das emendas, conforme mostra a tabela abaixo, todos os tipos das armaduras foram catalogados e seguem expostos nas figuras que seguem abaixo na tabela 8.

Tabela 8 – Identificação dos modelos

Modelo	Posição das Barras	Argamassa
1 A	Inteiras	Moldagem 1
1 B		Moldagem 2
1 C		
2 A	Encostadas	Moldagem 1
2 B		
2 C		
3 A	Afastadas 1Ø	Moldagem 1
3 B		
3 C		
4 A	Afastadas 2Ø	Moldagem 2
4 B		
4 C		

Fonte: Autora, 2015

Os protótipos foram moldados nas formas de madeiras, com as armaduras posicionadas e respectivamente catalogados conforme imagens abaixo.

Figura 35 – Pilar tipo 1 – Parâmetro

Fonte: Autora, 2015

Figura 36 – Pilar tipo 2 – Barras encostadas

Fonte: Autora, 2015

Figura 37 – Pilar tipo 3 – Barras afastadas 1Ø

Fonte: Autora, 2015

Figura 38 – Pilar tipo 4 – Barras afastadas 2Ø

Fonte: Autora, 2015

A concretagem dos modelos foi feita horizontalmente com auxílio de concha e compactação com vibrador. Após encher a primeira vez cada forma, o concreto foi vibrado e posteriormente preenchido. Desta forma, preenchendo as formas em duas etapas.

Figura 39 – Adensamento do concreto

Fonte: Autora, 2015

O concreto foi curado com molhagens consecutivas por dois dias seguidos. Após os 7 dias, quando atingida a resistência, as formas foram desmontadas e os espécimes ensaiados.

Figura 40 – Modelos concretados

Fonte: Autora, 2015

5.4 Ensaios dos protótipos

Os doze protótipos foram submetidos ao ensaio de compressão centrada e verificados quanto as cargas e modos de ruptura. Os procedimentos foram realizados na Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC).

5.4.1 Equipamentos de ensaio

Para os ensaios de compressão centrada foi usada a prensa servo-hidráulica para ensaio de concreto modelo PC200CS, capacidade máxima 200 ton (2MN), da marca INSTRON/EMIC, como mostra a Figura 41. O equipamento funciona acoplado a microcomputador, e em conjunto com software TESC-EMIC que permite a realização de ensaios com taxa de incremento de carga constante e manutenção de carga, com alto grau de automatismo e emissão de relatório, que fornece o diagrama força x deslocamento do protótipo, assim como dados de força, resistência, tempo de ensaio, área e tensão.

Figura 41 – Equipamento de ensaio

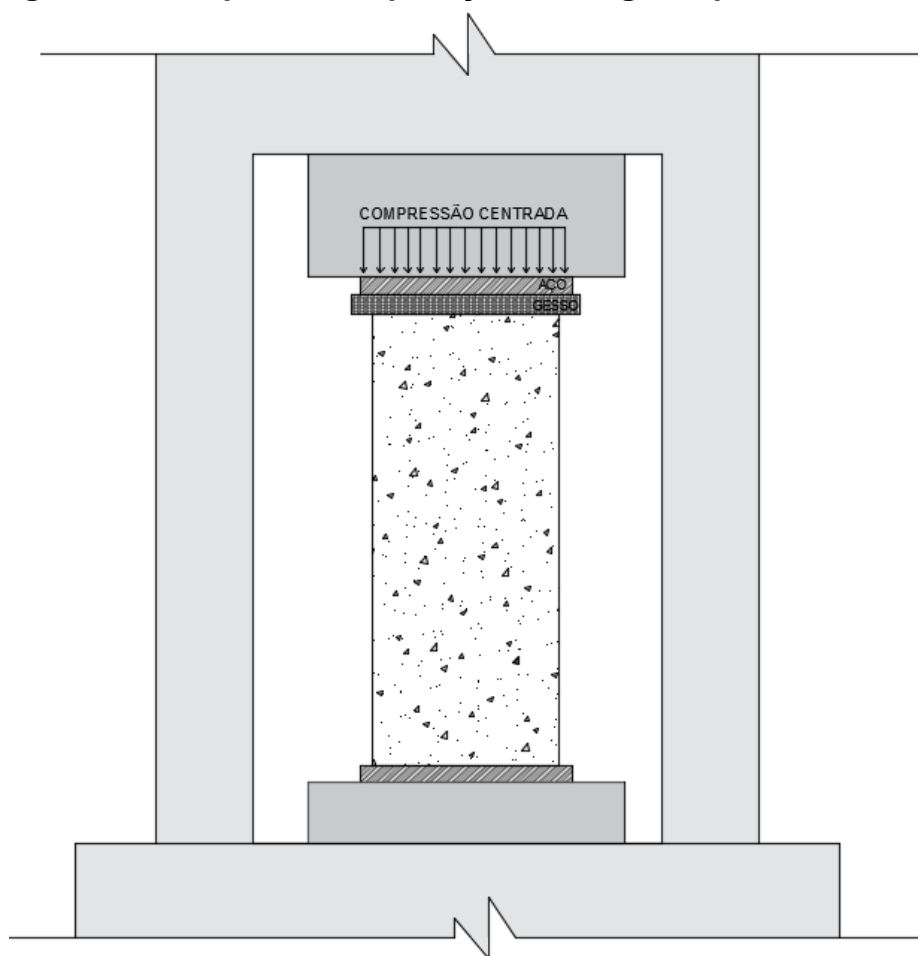
Fonte: Autora, 2015

Para cada modelo ensaiado, foram medidas suas seções transversais com a precisão de um paquímetro. Ainda, a face superior de cada modelo foi regularizada usando placas de gesso acartonado, cortadas para se adequar a seção transversal dos pilares, com tamanho de em média 16x20cm.

5.4.2 Procedimentos de ensaio

Após definida a ordem de ensaio, a seção transversal de cada espécime foi cuidadosamente verificada com um Paquímetro e catalogada, para então ser individualmente posicionado e centralizado na prensa. A força centrada, como era utilizada pela NBR 6118:1978, foi aplicada (Figura 42) em cada pilar, fornecendo os dados necessários de força e deformação necessários para o experimento.

Figura 42 – Esquema de aplicação de carga no pilar curto



Fonte: Autora, 2015

A força foi medida via células de carga da máquina e o deslocamento usando sistema interno de fuso da máquina, resultando em gráficos “força x deformação”, mostrados nos Anexos.

5.4.3 Considerações quanto a definição teórica da resistência dos modelos

Tomando como referência para as análises comparativas posteriormente apresentadas, a força normal de cálculo (N_d), a qual foi definida por meio da expressão 14, supondo um elemento de concreto armado submetido à compressão simples, similar o procedimento estabelecido pela antiga NBR 6118:1978.

A expressão utilizada, assim como os parâmetros considerados são os seguintes:

$$N_d = A_c \cdot f_{cd} \cdot 0,85 + A_s \cdot \sigma_{2\%} \quad (14)$$

Considerando:

- A_c (seção transversal de concreto) = 14x18cm
- f_{cd} (27,7MPa) = 2,77kN/cm²
- A_s (barras longitudinais Ø10mm) = 0,785cm²
- $\sigma_{2\%} = 42\text{kN/cm}^2$

Resultando em 538,5kN.

6. RESULTADOS E ANÁLISES

6.1 Resultados

Cada planilha mostra detalhes de cada tipo de modelo, a variação de carga em relação a carga de projeto, o desvio padrão das amostragens e força média dos valores de carga, todos obtidos em função dos resultados do ensaio. Ainda, com as dimensões reais da seção transversal medidas no procedimento, foi possível determinar a tensão de cada pilar e obter a média entre os três.

Os valores da variação de carga, em porcentagem, são em relação ao valor da carga de projeto que foi calculada anteriormente, 538,5kN. Com a carga resistida, ainda foi calculado o desvio padrão, em relação as três amostras.

As dimensões aferidas no procedimento serviram para o cálculo de área. Este, relacionado com a força, possibilitou a obtenção dos valores de tensão desenvolvida na amostra.

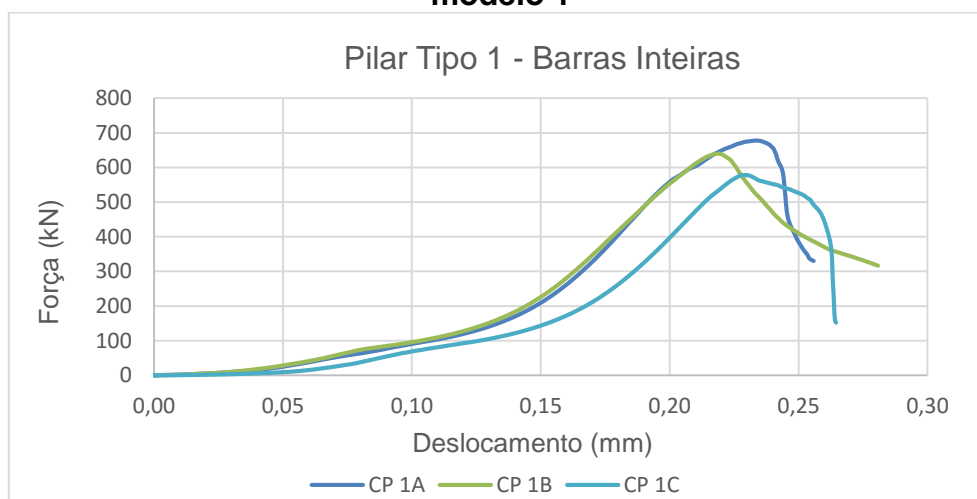
A Tabela 9 apresenta os dados de força e tensão obtidos para os protótipos 1A, 1B e 1C do Modelo 1, assim como suas respectivas médias. Já a Figura 43 que segue, exibe o Diagrama Força x Deslocamento relacionando os resultados dos protótipos 1A, 1B e 1C do Modelo 1.

Tabela 9 – Modelo barras inteiras

Mod.	Força (kN)	Variação (%)	Desv. Padrão	Força Média (kN)	Dimensões		Área (cm ²)	Tensão - σ (MPa)	Tensão Média - σ_m (MPa)
					x	y			
1A	678	20,58			140,05	180	252,09	2,69	
1B	640	15,86	6,98	632	141	180,04	253,86	2,52	2,51
1C	578	6,83			140,05	179,04	250,75	2,31	

Fonte: Autora, 2015

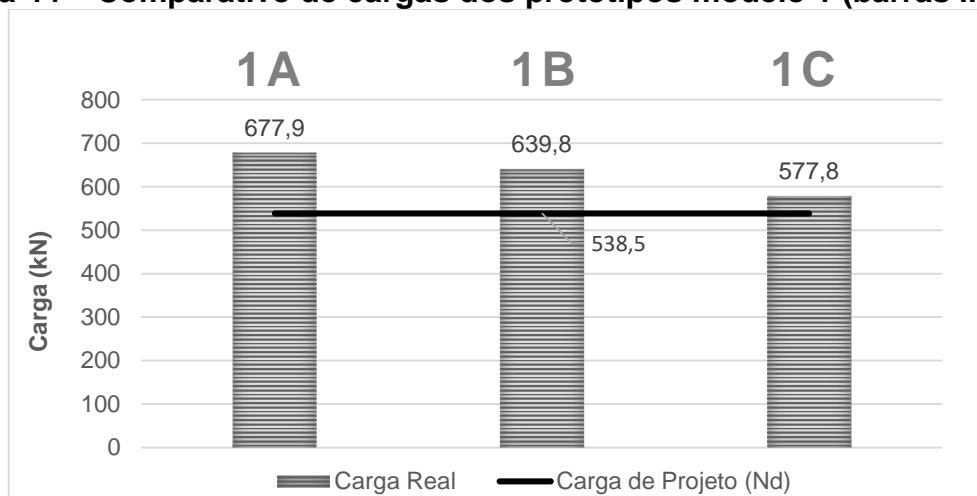
Figura 43 – Diagrama força x deslocamento – Resultados dos protótipos do modelo 1



Fonte: Autora, 2015

A Figura 44 apresenta os gráficos comparativos para os valores médios de carga atingidos pelos protótipos do Modelo 1, relacionando os resultados com o valor de carga de referência.

Figura 44 – Comparativo de cargas dos protótipos modelo 1 (barras inteiras)



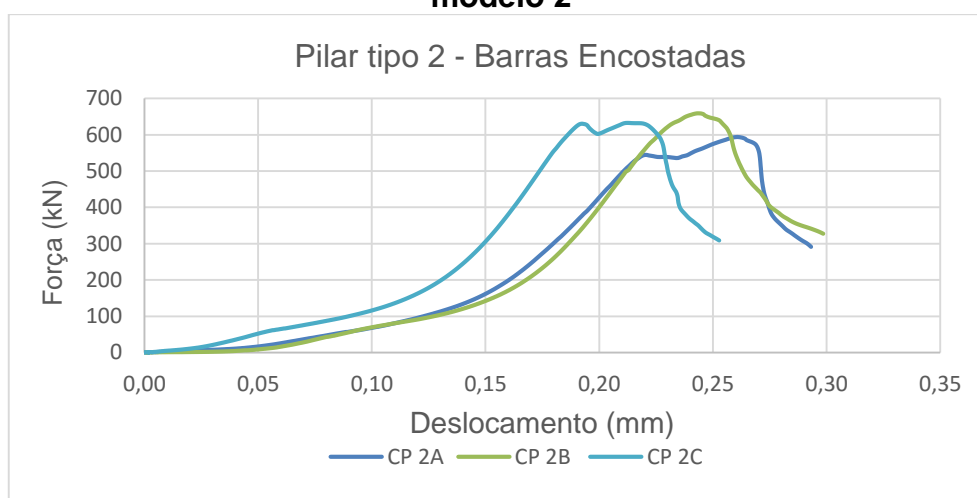
Fonte: Autora, 2015

A Tabela 10 apresenta os dados de força e tensão obtidos para os protótipos 2A, 2B e 2C do Modelo 2, assim como suas respectivas médias. Já a Figura 45 que segue, exibe o Diagrama Força x Deslocamento relacionando os resultados dos protótipos 2A, 2B e 2C do Modelo 2.

Tabela 10 – Modelos barras encostadas

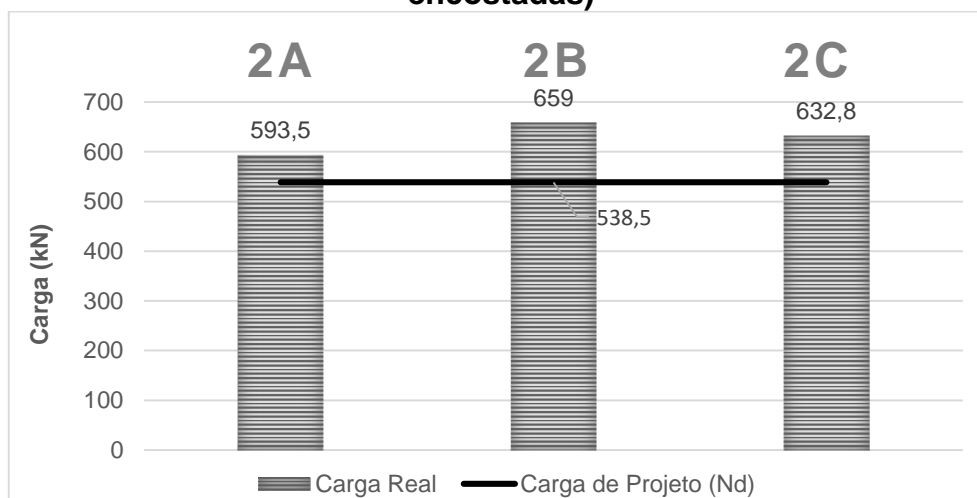
Modelo	Força (kN)	Variação (%)	Desv. Padrão	Força Média (kN)	Dimensões		Área (cm ²)	Tensão - σ (MPa)	Tensão Média - σ_m (MPa)
					x	y			
2A	593	9,19			140,08	180,15	252,35	2,35	
2B	659	18,29	4,60	628,3	141,50	180,1	254,51	2,59	2,48
2C	633	14,93			141,1	180,05	254,05	2,49	

Fonte: Autora, 2015

Figura 45 – Diagrama força x deslocamento – Resultados dos protótipos modelo 2

Fonte: Autora, 2015

A Figura 46 apresenta os gráficos comparativos para os valores médios de carga atingidos pelos protótipos do Modelo 2, relacionando os resultados com o valor de carga de referência.

Figura 46 – Comparativo de cargas dos protótipos do modelo 2 (barras encostadas)

Fonte: Autora, 2015

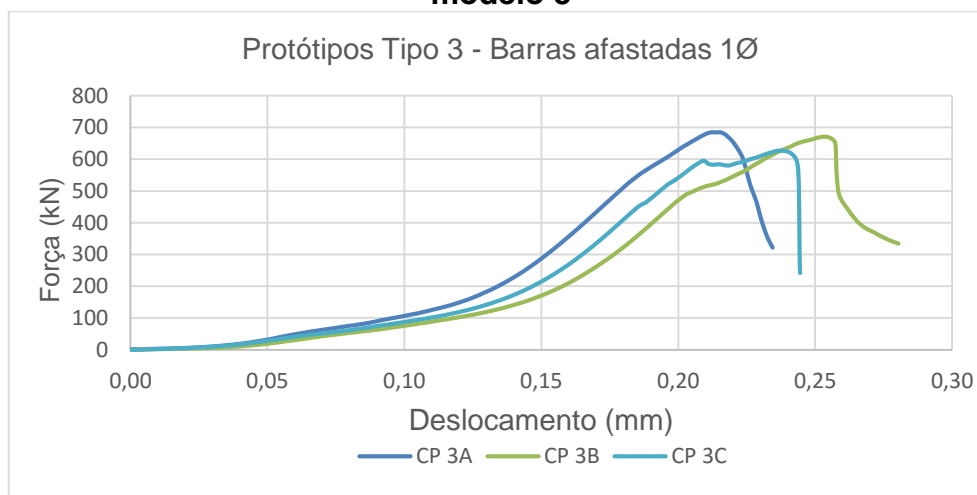
A Planilha 3 que segue (Tabela 11) apresenta os dados de força e tensão obtidos para os protótipos 3A, 3B e 3C do Modelo 3, assim como suas respectivas médias. Já a Figura 46 que segue, exhibe o Diagrama Força x Deslocamento relacionando os resultados dos protótipos 3A, 3B e 3C do Modelo 3.

Tabela 11 – Planilha 3 – Modelo barras afastadas 1Ø

Mod.	Força (kN)	Variação (%)	Desv. Padrão	Força Média (kN)	Dimensões		Área (cm ²)	Tensão - σ (MPa)	Tensão Média - σ_m (MPa)
					x	y			
3A	685	21,39			140,05	180,00	252,09	2,72	
3B	671	19,75	3,81	661,0	140,05	180,05	252,16	2,66	2,62
3C	627	14,11			140	180,10	252,14	2,49	

Fonte: Autora, 2015

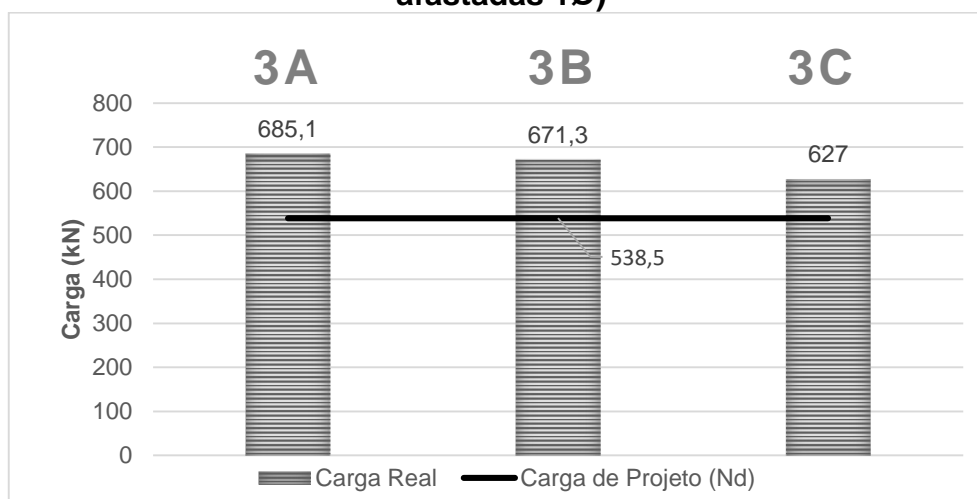
Figura 47 – Diagrama força x deslocamento – Resultados dos protótipos modelo 3



Fonte: Autora, 2015

A Figura 48 apresenta os gráficos comparativos para os valores médios de carga atingidos pelos protótipos do Modelo 3, relacionando os resultados com o valor de carga de referência.

Figura 48 – Comparativo de cargas dos protótipos do modelo 3 (Barras afastadas 1Ø)



Fonte: Autora, 2015

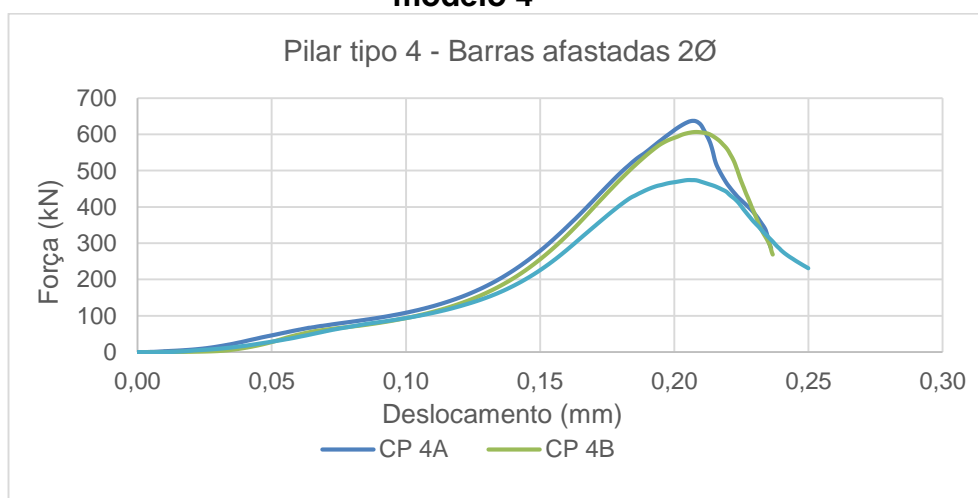
A Tabela 12 que segue apresenta os dados de força e tensão obtidos para os protótipos 4A, 4B e 4C do Modelo 4, assim como suas respectivas médias. Já a Figura 49 que segue, exibe o diagrama força x deslocamento relacionando os resultados dos protótipos 4A, 4B e 4C do Modelo 4.

Tabela 12 – Modelo barras afastadas 2Ø

Modelo	Força (kN)	Variação (%)	Desv. Padrão	Força Média (kN)	Dimensões		Área (cm ²)	Tensão - σ (MPa)	Tensão Média - σ_m (MPa)
					x	y			
4A	636	15,33	2,96	621,0	140,05	180,00	252,09	2,52	2,46
4B	606	11,14			140,05	180,05	252,16	2,40	
4C*	404	-33,29	*	*	*	*	*	*	*

Fonte: Autora, 2015

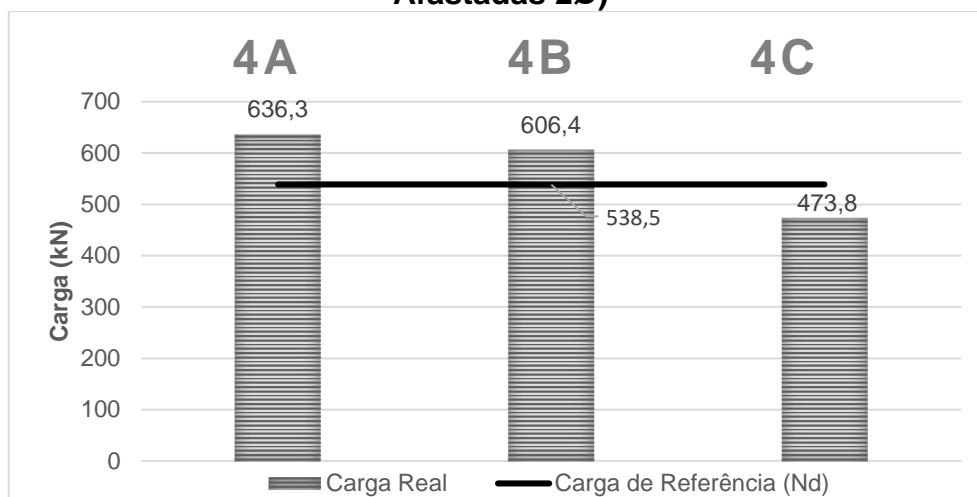
Figura 49 – Diagrama força x deslocamento – Resultados dos protótipos modelo 4



Fonte: Autora, 2015

A Figura 50 apresenta os gráficos comparativos para os valores médios de carga atingidos pelos protótipos do Modelo 4, relacionando os resultados com o valor de carga de referência.

Figura 50 – Comparativo de cargas dos protótipos do modelo 4 (Barras Afastadas 2Ø)



Fonte: Autora, 2015

6.2 Análise dos Resultados

Para o Modelo 1, que é composto pelas barras inteiras, o CP 1A resistiu à carga de 678kN, apresentando valor de resistência 20,5% maior do que o valor de referência projeto adotado, sendo o valor mais alto da série. Seguido pelo 1B, que resistiu 640kN, 15,9% acima; e 1C, 578kN, 6,83% acima. Desta forma, todas as cargas resistidas pelos protótipos ficaram acima do valor de projeto, 538,5kN.

O modelo 2 testado, com as barras encostadas, também teve seus valores aprovados, todos maiores do que o valor de referência de 538,5kN. O protótipo que suportou maior carga ficou 18,3% acima, sendo o 2B com resistência de 659kN. O corpo de prova 2C suportou 633kN e o 2A 593kN, superando em 14,9% e 9,2% o valor de referência, respectivamente.

Na série ensaiada para o Modelo 3, com afastamento de 10mm (uma vez o diâmetro nominal), a maior resistência atingida foi a do corpo de prova 3A, 685kN que correspondem a um valor 21,4% acima da referência. Novamente todos os resultados foram satisfatórios, com os protótipos 3B e 3C superando o valor de referência em 19,7% e 14,1%, suportando cargas de 671kN e 627kN.

Por fim, a série do modelo 4, com as barras afastadas duas vezes o diâmetro nominal, apresentou dois corpos de prova com resistência acima da de referência

e um corpo de prova com resistência abaixo, o 4C, que foi descartado. Assim, o maior valor da série foi o do 4A, resistindo 636kN e apresentando valor 15,3% maior, seguido pelo 4B com 606kN suportados que correspondem a um valor 11,1% maior do que a referência.

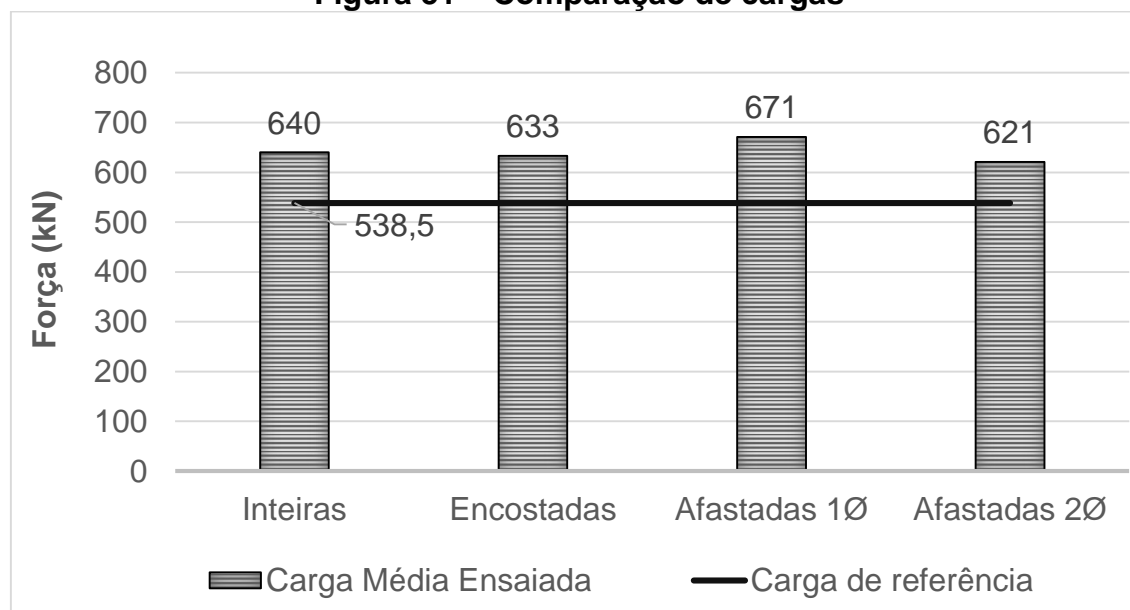
As cargas médias foram 632kN para os protótipos do Modelo 2, 628kN para afastados dois diâmetros e 661kN para um diâmetro, conforme mostram os gráficos da Figura 51 que segue. Os protótipos com as barras afastadas na ordem de um diâmetro foram os que apresentaram a maior resistência. Além disso, ainda mostra que mesmo os valores médios ficaram acima da carga referência de projeto.

Tabela 13 – Médias de dados dos modelos

Modelo	Força Média (kN)	Variação (%)	Desv. Padrão	Área Média (cm ²)	Tensão - σ (MPa)	Tensão Média - σ_m (MPa)
1	640,0	15,86	21,33	252,09	2,54	2,52
2	633,0	14,93		254,05	2,49	
3	671,0	19,75		252,14	2,66	
4	621,0	13,29		252,13	2,46	

Fonte: Autora, 2015

Figura 51 – Comparação de cargas



Fonte: Autora, 2015

De modo geral, quando analisados os resultados de carga resistida pelos doze protótipos que foram submetidos ao ensaio de compressão centrada, não houve significativa variação no valor de carga quando variados os espaçamentos das emendas.

O modelo usado como parâmetro, modelo 1 com barras inteiras, serviria de referência para a carga dos demais modelos, visto que as emendas devem ser

dimensionadas para suportar esforços de forma plena como uma barra contínua. Mesmo assim, os valores resistidos pelos protótipos 1A, 1B e 1C não foram os maiores. Nesta série, o valor médio suportado foi de 640kN, aproximadamente 16% acima do valor de referência calculado.

Quando se trata das barras encostadas o resultado também é satisfatório, uma média de 633kN foi obtida, ficando quase 15% acima do mínimo esperado. Assim, o que se acreditava ser o pior caso, considerando a falta de concreto participando da transferência dos esforços por bielas de compressão entre as barras, se mostrou também eficiente no suporte das cargas.

O modelo 3, que tinha as barras afastadas na ordem de uma vez o diâmetro nominal da barra, 10mm, foi o que apresentou maior valor de resistência: 685kN resistidos pelo corpo de prova 1A, mais de 21% acima do valor de referência, sendo que a média da série ficou quase 20% acima, 671kN. Isso nos mostrou que o concreto entre as barras emendadas ajuda a aumentar a eficiência da emenda, mas não lhe aumenta significativamente.

Muitos autores indicaram que o espaçamento de até quatro vezes o diâmetro nominal seria o ideal, e por isso havia expectativa de que o modelo com as barras afastadas duas vezes, 20mm, que seria a faixa média da teoria, se comportasse de forma mais eficaz. Os resultados dos ensaios mostraram que esta série foi a que menos suportou carga entre todos os modelos testados. Sua média ficou em 621kN, mesmo assim 13% acima do valor de referência.

É importante considerar que os protótipos foram feitos com duas moldagens de concreto, a moldagem 1 apresentando valor de 32MPa, enquanto a moldagem 2 ficou na faixa de 27MPa, valores que poderiam causar variação na eficiência dos protótipos moldados com o segundo, como no caso do modelo 4. Porém, analisando os resultados como um todo, os corpos de prova resistiram a carga de forma aleatória e independente da moldagem, tendo entre os piores resultados protótipos moldados com ambos os tipos. Portanto, o concreto puro não é tão expressivo na análise final dos resultados e provavelmente os resultados dos ensaios não teriam grandes diferenças se moldados todos protótipos com a mesma mistura.

6.3 Considerações quanto ao modo de ruptura

É possível fazer uma análise do comportamento dos pilares e suas diferentes armaduras, frente a compressão centrada aplicada analisando o modo de ruptura dos protótipos. A Figura 52 abaixo expõe seis dos doze modelos ensaiados: 1A, 1C, 2A, 3A, 3C e 4B.

Figura 52 – Protótipos pós ensaio de compressão centrada



Fonte: Autora, 2015.

Na figura acima, é possível observar que nenhum dos protótipos romperam por falha na emenda. Foi observado que o colapso ocorreu por esmagamento do concreto, o que é uma característica dos pilares curtos.

Considerando que a carga de ruptura esperada, a qual poderia ser obtida a partir dos resultados das resistências dos ensaios dos materiais aço e concreto, poderia ser superior às verificadas nos testes de pilares, é possível supor que tal resistência inferior possa ter ocorrido por possível pressão de ponta das barras de aço na base e topo dos pilares, conforme relatado no estudo de Quintana (2008).

Entretanto em nenhum dos testes realizados verificou-se visualmente este tipo de ruptura.

A partir dos valores de ruptura de pilares obtidos, os quais foram superiores à resistência de cálculo esperada é possível validar os testes realizados visto que mesmo com carga superior à de cálculo nenhum dos tipos de emendas testados falharam.

7 CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados, assim como das análises realizadas acerca destes resultados, foi possível chegar às conclusões deste trabalho, que serão apresentadas na sequência.

Todos os modelos de emendas testados resistiram a carga aplicada de forma satisfatória, ficando acima do valor de referência de projeto. Alguns corpos de prova obtiveram melhor resultado, porém foi independentemente do tipo de modelo, visto que as maiores cargas resistidas se apresentaram de forma aleatória entre os doze protótipos.

Desta forma, conclui-se que os diferentes espaçamentos funcionam, visto que a carga foi resistida seja com as barras encostadas, afastadas uma ou duas vezes o diâmetro, contrariando algumas teorias apresentadas pelos diferentes autores citados nas referências.

Ao final do presente estudo, após terem sido pesquisadas e realizados diferentes tipos de emenda, o conhecimento foi aprofundado em relação à emenda e todos os fatores que a influenciam.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, José Milton de. *Curso de Concreto Armado*. Ed. Dunas. Rio Grande, 2014.

GUERRIN, A.; LAVAU, R.C. *Tratado de Concreto Armado*. Ed. Hemus. Brasil, 2002. V. 2.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. *Construções de Concreto*. Editora Interciência. Rio de Janeiro, 1978. V. 3.

QUINTANA, C. B.; GUIMARÃES, G. B.; SHHATA, L. D. *Comportamento de emenda por traspasse de barras comprimidas em contato e separadas*. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais. Rio de Janeiro, 2008.

_____. NBR 5738:2003: Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR 6118:2014: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ANEXO A – Relatórios de Ensaio

