



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE FIBRAS DE AÇO EM CONSOLOS CURTOS E  
MONOLÍTICOS DE CONCRETO**

**Aluno: WILLIAN MENEZES DA SILVA**

**Orientador: Prof. Dr. MARCOS ANTÔNIO DE SOUZA SIMPLÍCIO**

**CAMPINA GRANDE**

**2017**

WILLIAN MENEZES DA SILVA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE FIBRAS DE AÇO EM CONSOLOS CURTOS E  
MONOLÍTICOS DE CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande como requisito obrigatório para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

**Orientador: Prof. Dr. MARCOS ANTÔNIO DE SOUZA SIMPLÍCIO**

CAMPINA GRANDE - PB

2017

WILLIAN MENEZES DA SILVA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE FIBRAS DE AÇO EM CONSOLOS CURTOS E  
MONOLÍTICOS DE CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande como requisito obrigatório para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil, sob a orientação da Prof Dr. Marcos Antônio de Souza Simplício.

TCC defendido e aprovado em: 05 de Setembro de 2017.

**BANCA EXAMINADORA**

Orientador: Marcos Antônio de Souza Simplício  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Examinador Interno: Milton Bezerra das Chagas Filho  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Examinador Externo: José Bezerra da Silva  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço infinitamente a todos que contribuíram de alguma forma para que este trabalho fosse realizado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Simplicio, por todos os auxílios.

Aos professores da banca examinadora, o Prof. Dr. Milton Bezerra das Chagas Filho, examinador interno, e ao Prof. Dr. José Bezerra, examinador externo, pelas sugestões e disponibilidade pra valorização deste trabalho.

À Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), pela oportunidade de me formar na profissão a qual sempre sonhei.

Aos meus familiares e amigos, em especial à JYW Engenharia, pela amizade e apoio.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema Estrutural de pórticos com pré-moldados.....	16
Figura 2 - Consolos para apoio em estruturas pré-moldadas.....	17
Figura 3- Posicionamento e dimensões de (a) e (d) de um consolo .....	18
Figura 4 - Tipos de carregamento e notação utilizada.....	19
Figura 5 - Exemplo de consolo no pilar para apoio para a viga .....	19
Figura 6 - Ruptura por flexão .....	20
Figura 7 - Ruptura fendilhamento da biela comprimida.....	21
Figura 8 - Ruptura por cisalhamento .....	21
Figura 9 - Ruptura por falta de ancoragem.....	22
Figura 10 - Ruptura devido à ação horizontal .....	23
Figura 11 - Ruptura devido ao esmagamento local .....	23
Figura 12 - Regiões de tensão no consolo .....	24
Figura 13 - Treliça simples idealizada para o comportamento estrutural do consolo ....	25
Figura 14 – Treliça idealizada do consolo curto e esquema das armaduras principais ..	25
Figura 15 - Análise estrutural dos consolos.....	27
Figura 16 - Armadura geral de consolos .....	27
Figura 17 - Posicionamento da armadura principal, costura e estribo.....	29
Figura 18 - Fibras de aço encontradas no mercado .....	32
Figura 19 - Classificação e geometria das fibras de aço.....	32
Figura 20 - Funcionamento das fibras metálicas .....	34
Figura 21 - Curva tensão de tração x deformação para vários percentuais de fibra .....	35
Figura 22 - Curva Carga x flecha e desenvolvimento de tensões normais .....	36
Figura 23 - Comportamento do volume de fibras .....	37
Figura 24 - Curvas de tensão-deformação para ausência, baixo e alto volume de fibras	38
Figura 25 - Fluxograma das etapas do trabalho realizado .....	40
Figura 26 - Características das fibras .....	41
Figura 27 - – Representação das dimensões do consolo. ....	42
Figura 28 - Consolo depois de concretado e desmoldado .....	43
Figura 29 - Fôrmas sendo preparadas para a concretagem dos consolos .....	44
Figura 30 - Preparação e montagem da armadura do modelo de consolo curto.....	45
Figura 31 - Detalhe da armadura dos modelos M1, M2 e M3.....	46
Figura 32 - Peneiramento e série normal de peneiras.....	47

Figura 33 - Amostras para o ensaio de granulometria.....	48
Figura 34 - Aparelho utilizado no ensaio de resistência à tração do aço.....	49
Figura 35 - Prensa utilizada para o ensaio de compressão nos corpos de prova.....	50
Figura 36 - Aplicação do desmoldante na fôrma.....	52
Figura 37 - Posicionamento da armadura na forma, com cobrimento de 2,5cm.....	52
Figura 38 - Produção do concreto na betoneira e adição das fibras de aço.....	53
Figura 39 - Fases durante o processo de concretagem.....	54
Figura 40 - Máquina de Ruptura Lousenhausen.....	55
Figura 41 - Posicionamento do modelo na máquina de ruptura.....	55
Figura 42 - Resultado do ensaio de granulometria dos agregados.....	56
Figura 43 - – Bitolas utilizadas no ensaio de resistência à tração do aço.....	57
Figura 44 - Ruptura dos CP's de concreto: (a) sem fibras e (b) com 1% de fibras.....	59
Figura 45 - Aparente ruptura através da biela de compressão do modelo M1.....	60
Figura 46 - Aparente ruptura através da biela de compressão do modelo M2.....	61
Figura 47 - Aparente ruptura através da biela de compressão do modelo M3.....	61
Figura 48 - Carga de ruptura dos modelos ensaiados.....	62
Figura 49 - Carga de ruptura dos modelos ensaiados em função do uso de fibras.....	63
Figura 50 - Primeira fissura nos consolos 1 e 2 do modelo M1, sem fibras.....	65
Figura 51 - Aparecimento da primeira fissura no modelo M2, denominada F1.....	66
Figura 52 - Aparecimento da primeira fissura no modelo M3.....	66

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Consumo de material em Kg/m <sup>3</sup> de concreto .....	41
Tabela 2: Características das fibras utilizadas na pesquisa .....	42
Tabela 3: Modelos de consolos curtos preparados para a pesquisa.....	46
Tabela 4: Série normal de peneiras pela NBR 7217/1987 .....	48
Tabela 5: Corpos de provas moldados no projeto .....	51
Tabela 6: Características dos agregados .....	56
Tabela 7: Resultados de resistência à tração do aço .....	57
Tabela 8: Resultados de Compressão Simples .....	58
Tabela 9: Resumo das cargas de ruptura .....	62
Tabela 10: Comparativo da carga de ruptura entre os modelos .....	64
Tabela 11: Características e resultado de ruptura do modelo-referência.....	64
Tabela 12: Comparativo consolo com fibras x consolo com armadura de costura .....	65
Tabela 13: Resumo das cargas de início de fissuração .....	67

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira Registrada
GPa	Gigapascal
MPa	Megapascal
ACI	American Concrete Institute

**LISTA DE SÍMBOLOS**

D	diâmetro da fibra
d	altura útil
a	distância do pilar até o ponto de aplicação da carga
h	altura do consolo
Vd	força vertical de cálculo
Hd	força horizontal de cálculo
b	base do pilar
f <sub>yd</sub>	resistência de cálculo ao escoamento do aço
f <sub>cd</sub>	resistência de cálculo a compressão do concreto

## RESUMO

Na construção civil, se dá cada vez mais importância à rapidez com que se produz e à economia no processo de construção, assim os elementos pré-moldados de concreto surgiram como resposta às necessidades do mercado, desde meados do pós-guerra. Dentre eles destaca-se o consolo, elemento em balanço que se projeta, por exemplo, nas laterais de pilares. Sua produção enfrenta problemas devido à necessidade de uma alta taxa de armadura num curto espaço, já que além da armadura principal há uma armadura de costura e os estribos verticais. Desta forma, este trabalho tem o objetivo de avaliar o aumento da resistência ao fendilhamento da biela de compressão quando se introduzem fibras metálicas em distintas proporções à matriz do concreto no consolo sem armadura de costura, em comparação ao sistema usual. Os ensaios laboratoriais foram de caracterização (granulometria) e mecânicos (resistência à tração do aço, resistência à compressão simples, ensaio de ruptura dos modelos) em três modelos de consolos: um sem fibras de aço e outros dois com fibras (0,5 e 1%). Por fim, este trabalho mostra a eficiência do uso das fibras de aço, onde aumentando o seu percentual na matriz do concreto, elevou-se a carga de ruptura do consolo, além de promover incrementos na carga de início de fissuração e indicar aumento de ductilidade das peças.

**Palavras-chave:** *consolo, fibras de aço, concreto.*

## ABSTRACT

Currently, in civil construction, more importance is given to the speed of production and the economy in the construction process, so the precast structural elements emerge as a response to market needs. Among them is the corbel, element in balance, on the sides of columns. Its production is facing problems due the need for a high reinforcement ratio in a very short space. Thus, this study aims to evaluate the increased resistance to cracking of the compression strut when are introduced steel fibers in different proportions to the concrete without in comparison to the usual system. Laboratory tests were characterized by (granulometry) and mechanics (tensile strength of steel, strength to compression simple, testing of rupture of the models) in three models of corbel: one without steel fibers and two others with fibers (0.5 and 1%). Finally, this study shows the efficiency of the use of steel fibers, where varying their percentage in the matrix of concrete, has increased the load that will cause the failure of the corbel, load that exceeds the conventional method with splitting reinforcement, besides promoting increments in the load of initiation of cracking and indicate an increase in ductility.

**Keywords:** corbel, steel fibers, concrete

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.2    Objetivos .....	14
1.2.1    Objetivo Geral .....	14
1.2.2    Objetivos específicos.....	14
1.3    Justificativa .....	14
<b>CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>16</b>
2.1    Pré-fabricados .....	16
2.2    Definição e tipos de consolo .....	17
2.3 Modos de ruptura dos consolos .....	19
2.3.1 Ruptura por flexão.....	20
2.3.2 Ruptura por fendilhamento da biela comprimida .....	20
2.3.3 Ruptura por cisalhamento.....	21
2.3.4 Ruptura por falta de ancoragem .....	22
2.3.5 Ruptura devido à ação horizontal .....	22
2.3.6 Ruptura por esmagamento local .....	23
2.4 Desempenho Estrutural de Consolos Curtos .....	23
2.5 Modelo de dimensionamento de consolos.....	26
2.5.1    Modelo biela-tirante .....	26
2.6    Concreto com fibras de aço .....	31
2.6.1    Fibras Metálicas .....	31
2.6.2    Classificação das fibras .....	32
2.6.3 Interação fibra-matriz.....	33
2.6.4    Resistência à compressão .....	34
2.6.5    Resistência à tração .....	35

	12
2.6.6 Comportamento à flexão .....	35
2.6.7 Teor de fibras.....	36
2.6.8 Alguns resultados da aplicação de fibras de aço no concreto.....	37
<b>CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>40</b>
3.1 Coleta e preparação do material .....	41
3.1.1 Concreto e fibras da pesquisa.....	41
3.1.2 Modelos Experimentais dos Consolos Curtos .....	42
<b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>56</b>
4.1 Caracterização física .....	56
4.2 Caracterização Mecânica.....	57
4.2.1 Resistência à tração do aço.....	57
4.2.2 Compressão do concreto em corpos de prova cilíndricos .....	58
4.2.3 Ensaio de ruptura dos consolos .....	59
<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>68</b>
5.1 Conclusões .....	68
5.2 Sugestões para trabalhos futuros .....	69
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>71</b>

## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

### 1.1 Introdução

Atualmente, em todas as áreas produtivas do país, dá-se cada vez mais importância à rapidez com que se produz e à economia, no entanto esses fatores nem sempre estão atrelados entre si, muito menos se levarmos em conta responsabilidade ambiental que concerne esse panorama. Na construção civil não é diferente, a exigência na eficácia da produção é essencial e a industrialização da construção torna-se necessária, em especial do ponto de vista da estrutura das edificações com o emprego de elementos pré-fabricados de concreto.

A pré-fabricação de elementos estruturais de concreto tem condições de atender em tempo hábil a velocidade que o mercado exige e com um alto padrão de qualidade e durabilidade. No entanto, segundo FIB (2002, apud Bezerra, 2010) “a construção em concreto moldado no local é a solução mais barata na grande maioria das obras convencionais, enquanto que o concreto pré-moldado apresenta a vantagem da execução rápida e com elementos de maior qualidade”. Assim, uma combinação das duas soluções se torna necessária.

Porém, para que haja essa melhora no processo industrial é necessário que se tenha um investimento maior por parte das empresas em inovação e otimização dos processos, como, por exemplo, com o uso de sistemas estruturais híbridos (não monolíticos) ou de novos materiais na composição dos elementos.

Dentre os inúmeros componentes de ligações, um dos mais usuais é o consolo, que funciona como um elemento em balanço que se projeta nas laterais de pilares, vigas e paredes a fim de que possa servir de apoio para outro elemento.

Apesar de trabalhar em balanço, para os esforços aos quais o consolo deverá ser dimensionado não vale a teoria clássica da flexão, pois trabalham de maneira diferente, tendo em vista que são curtos. Dessa forma, conforme a ABNT NBR 6118:2014 há outros modelos de cálculo para o seu dimensionamento, como o modelo biela-tirante, também conhecido como treliça, além do modelo atrito-cisalhamento, tendo cada caso a sua aplicação. Vale salientar que existem outros modelos na literatura, mas que não cabem maiores discussões nesse trabalho.

Em relação à produção industrial de consolos, ela enfrenta problemas geralmente devido à necessidade de uma alta taxa de armadura num curto espaço, assim a inovação

produtiva da utilização de uma determinada porcentagem de fibras metálicas pode contribuir para a economia de material e conseqüentemente aumento de produção.

Com isso, a proposta do presente trabalho é verificar o aumento da resistência ao fendilhamento quando se introduzem fibras metálicas em distintas proporções à matriz do concreto no consolo sem armadura de costura e compará-la com os sistemas usuais. Nesse contexto, o presente trabalho realizado no Laboratório de Estruturas da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) vem divulgar os resultados obtidos com o estudo experimental de metodologias de execução de consolos curtos.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Avaliar o aumento da resistência ao fendilhamento quando se introduzem fibras metálicas em distintas proporções à matriz do concreto no consolo sem armadura de costura, em comparação ao sistema usual.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Analisar o efeito dos esforços atuantes no conjunto elemento estrutural-consolo.
- Estudar a possibilidade de uso de consolo sem armadura de costura de acordo com o aumento da resistência do mesmo ao se introduzir fibras de aço.
- Avaliar o efeito do uso de fibras metálicas no controle da abertura de fissuras no concreto.
- Comparar a carga de ruína e a de início da abertura de fissuras em consolos com e sem fibras metálicas.

## **1.3 Justificativa**

- A análise, estudo e inovação da confecção das ligações em consolos são importantes para o desenvolvimento e evolução da pré-fabricação, pois assumem papel relevante na transmissão de esforços da estrutura e em sua estabilidade, refletindo no desempenho estrutural.

- Para que haja uma melhora no processo industrial da fabricação de pré-moldados, com agilidade e economia, é necessário recorrer a alternativas distintas das convencionais, tendo em vista que a fabricação de consolos enfrenta problemas geralmente devido à necessidade de uma alta taxa de armadura num curto espaço, então uma inovação produtiva pode contribuir para a economia de material e consequentemente aumento de produção.

#### **1.4 Organização do trabalho**

O trabalho está dividido em cinco capítulos. No segundo capítulo apresenta-se uma fundamentação teórica a respeito dos consolos e tudo que o envolve, sendo mostradas as principais características dos mesmos, vantagens, uso de fibras metálicas, entre outros. O terceiro capítulo traz informações sobre os materiais e métodos de pesquisa, descrevendo os materiais, os modelos e ensaios empregados no estudo experimental. No quarto, são mostrados os resultados experimentais e feitas discussões sobre eles. Finalmente, no último capítulo, mostra as conclusões obtidas no estudo e ainda sugestões para trabalhos futuros a respeito do assunto.

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os fundamentos do comportamento dos consolos, o modelo de cálculo mais usual, uma abordagem do seu desempenho estrutural, as formas de ruptura dos consolos de concreto e uma descrição sobre os efeitos gerais das fibras de aço no concreto armado.

### 2.1 Pré-fabricados

No Brasil, sistemas pré-fabricados vem ganhando cada vez mais seu espaço. Soares e Hanai (2001) afirmam que esses sistemas atendem as exigências de economia, prazo e qualidade técnica, em especial para edificações que contemplam amplos espaços. Como exemplo, têm-se os galpões de elementos pré-fabricados de concreto com sistema estrutural de pórticos, apresentando muito boa funcionalidade, normalmente destinados a indústrias, depósitos comerciais, oficinas, construções rurais etc. A Figura 1 apresenta a construção de um galpão com sistema estrutural de pórticos para telhado de duas águas.

Figura 1 – Sistema Estrutural de pórticos com pré-moldados



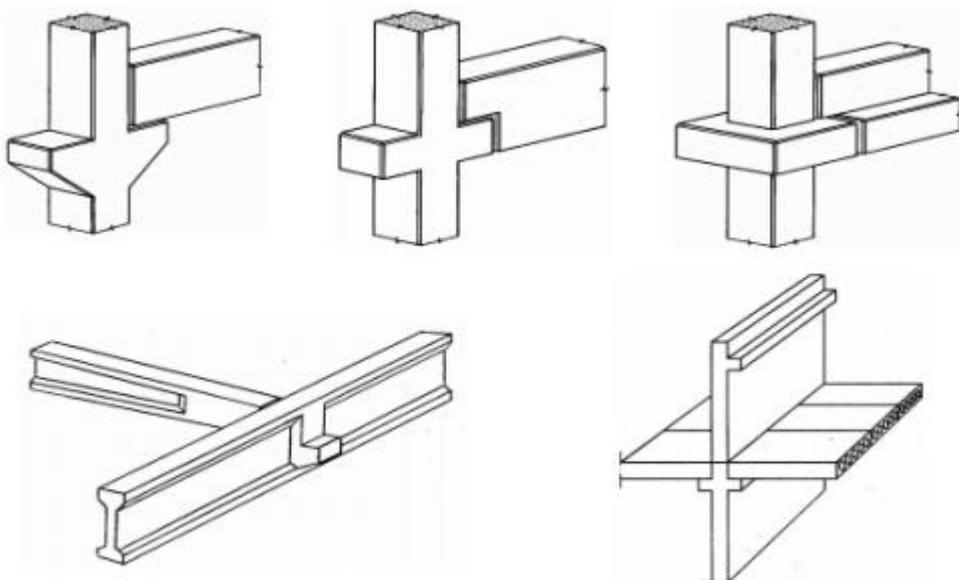
Fonte: Soares e Hanai (2001).

As estruturas de concreto pré-moldado se caracterizam por apresentar facilidade de execução de seus elementos, a complicação do processo está em realizar as ligações entre eles. Este detalhamento constitui a parte mais importante no projeto deste tipo de estrutura, tanto da execução da ligação, quanto do seu comportamento estrutural (El Debs, 2000).

As peças usadas em sistemas pré-fabricados, segundo Oliveira (2012), quando servem de apoio para outras peças, geralmente fazem uso de um consolo para a sua ligação. Usa-se, desta forma, consolos viga-viga, viga-pilar ou piso-parede.

A ligação entre pilar e viga em obra de concreto pré-moldado é feita simplesmente apoiando a viga sobre o consolo usando uma almofada intermediária de elastômero para regularizar a superfície das duas peças e assim transmitir os esforços verticais de compressão. A Figura 2 ilustra alguns usos de consolos para apoio em estruturas pré-moldadas.

Figura 2 - Consolos para apoio em estruturas pré-moldadas



Fonte: Van Acker (2002 apud Oliveira, 2009)

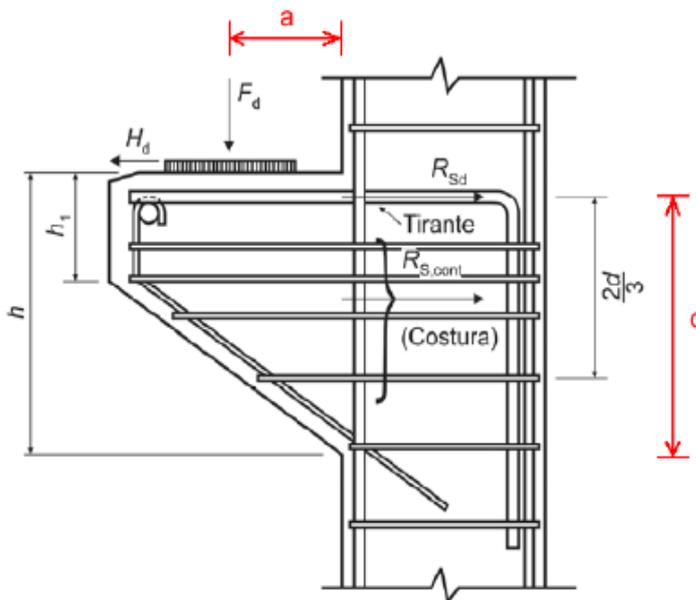
## 2.2 Definição e tipos de consolo

Consolos são peças de concreto armado salientes a pilares, carregado na extremidade livre com forças concentradas, a uma distância “a” medida da face do elemento ao qual ele está inserido até a linha de ação desses carregamentos.

Segundo Torres (1998), os consolos são classificados de acordo com a relação “a/d”, onde “d” representa a altura útil do consolo, conforme o critério descrito abaixo. A Figura 3 apresenta um típico consolo geralmente utilizado, adaptado da ABNT NBR 9062:2006, e as dimensões (a) e (d).

Viga em balanço:	$a/d \geq 1,0$
Consolo curto:	$0,5 < a/d < 1,0$
Consolo muito curto:	$a/d \leq 0,5$

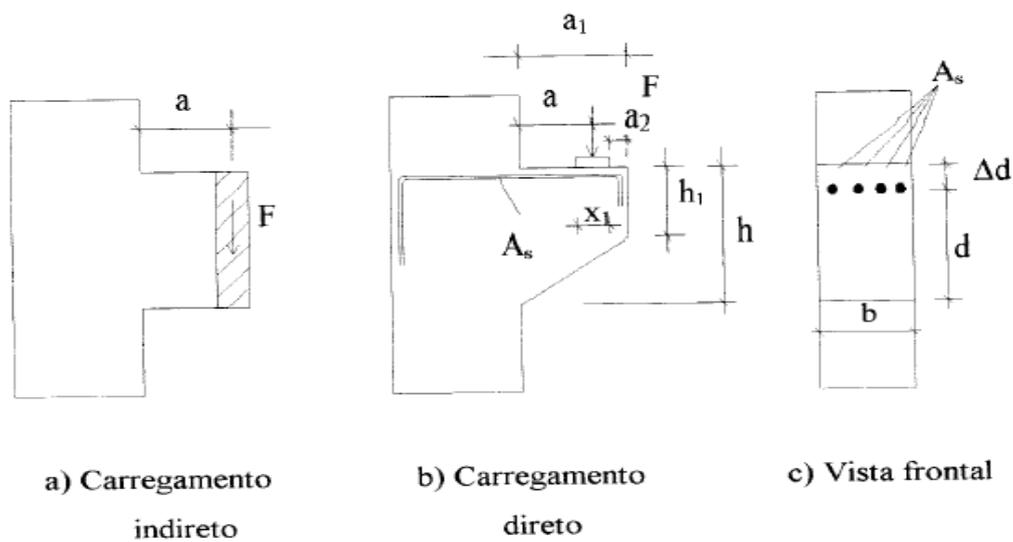
Figura 3- Posicionamento e dimensões de (a) e (d) de um consolo



Fonte: ABNT NBR 9062:2006

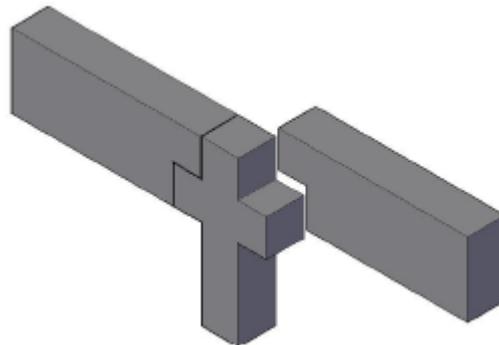
O carregamento ao qual o consolo está submetido também pode variar de acordo com a forma da aplicação da ação vertical, podendo ser um carregamento direto ou indireto. No primeiro caso, a força vertical está atuando diretamente sobre a face do consolo, já no segundo a ação atua ao longo de toda a altura do consolo ou está concentrada na face inferior do elemento. A Figura 4 indica os tipos de carregamento aos quais os consolos podem estar submetidos. Já a Figura 5 apresenta um exemplo de consolo no pilar que serve de apoio para viga.

Figura 4 - Tipos de carregamento e notação utilizada



Fonte: Oliveira (2012)

Figura 5 - Exemplo de consolo no pilar para apoio



Fonte: Oliveira (2012)

### 2.3 Modos de ruptura dos consolos

Existem alguns modos principais de ruptura dos consolos: ruptura por flexão, fendilhamento da biela de concreto, cisalhamento, por falta de ancoragem, devido à ação horizontal e por esmagamento local.

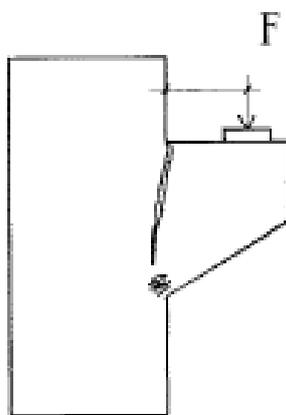
A diferença entre um e outro modo de ruptura depende da quantidade de armadura utilizada, da razão  $a/d$  e do  $f_{ck}$  do concreto.

### 2.3.1 Ruptura por flexão

Esse tipo de ruptura se caracteriza pelo aparecimento de fissuras na interface do consolo com o pilar, por exemplo. Além disso, ocorre uma abertura muito grande na face superior, chamada de fissura principal e o esmagamento do concreto da parte inferior.

As características desse tipo de ruína são oriundas do escoamento da armadura do tirante. A Figura 6 mostra o mecanismo de ruptura por flexão.

Figura 6 - Ruptura por flexão



Fonte: Torres (1998)

Do ponto de vista de segurança, Costa (2009) diz que “a ruptura por flexão é o modo mais desejável, porque demonstra grandes deformações e fissuras que são indicativos do colapso consequente. Desta forma, favorece reparos preventivos na estrutura”. Assim, este modo de ruptura é bem mais perceptível e dá maiores indícios da falha na estrutura de forma antecipada.

### 2.3.2 Ruptura por fendilhamento da biela comprimida

Acontece, como o nome diz, quando há o fendilhamento da biela comprimida de concreto, caracterizando por uma fissura de aproximadamente  $45^{\circ}$ , partindo da junção do pilar com o consolo, na parte inferior e caminha até o ponto de aplicação da carga.

De acordo com Oliveira (2012) “Esse tipo de ruína ocorre, normalmente, devido à seção insuficiente de concreto na região da biela comprimida ou por falta de armadura

distribuída ao longo da altura do consolo. Essa armadura aumenta a ductilidade da peça e a capacidade resistente da biela”. A Figura 7 apresenta o mecanismo de ruína por fendilhamento da biela comprimida.

Figura 7 - Ruptura fendilhamento da biela comprimida



Fonte: Costa (2009)

### 2.3.3 Ruptura por cisalhamento

Ocorre devido à aplicação de um carregamento no consolo muito próximo ao pilar, ou seja, geralmente em consolos muito curtos. Essa aplicação resulta no aparecimento de fissuras, inclinadas, ao longo da interface consolo-pilar, assim provocando o escorregamento. Na Figura 8 está indicando como é o aspecto da ruptura por cisalhamento.

Figura 8 - Ruptura por cisalhamento

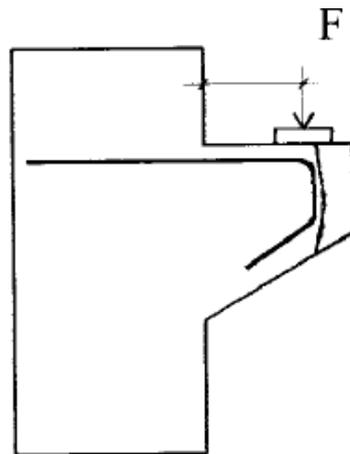


Fonte: Costa (2009)

### 2.3.4 Ruptura por falta de ancoragem

Esse tipo de ruptura é ocasionado pela aplicação de um carregamento próximo à extremidade do consolo, assim a ancoragem não será suficiente naquele ponto de aplicação. Pode ocorrer também devido a um mau detalhamento da armadura, como demonstra a Figura 9, indicando o modo de ruptura por falta de ancoragem.

Figura 9 - Ruptura por falta de ancoragem



Fonte: Torres (1998)

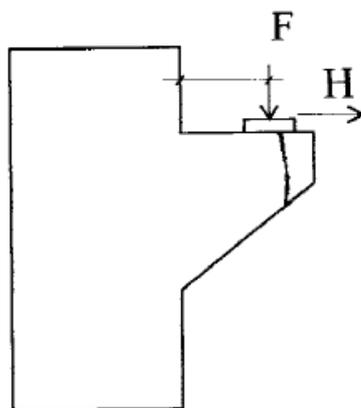
### 2.3.5 Ruptura devido à ação horizontal

Uma ação horizontal pode ocasionar ruptura em consolos, principalmente se a altura do consolo no bordo externo for consideravelmente menor que na junção com o pilar, provocando o surgimento de fissuras que não são contínuas até o pilar, mas que podem chegar até o bordo inferior.

O esforço horizontal pode ser ocasionado pela retração da peça de concreto, devido a pontes rolantes ou ainda pela ação do vento. A Figura 10 faz uma representação das fissuras na ruptura devido à ação horizontal.

De acordo com El Debs (2000, p.140) “O cálculo da força horizontal deve ser feito a partir das ações e com esquema estático compatível com o dos elementos e com os vínculos impostos pelas ligações. Seu valor não deve ser considerado menor que 20% da reação vertical”.

Figura 10 - Ruptura devido à ação horizontal

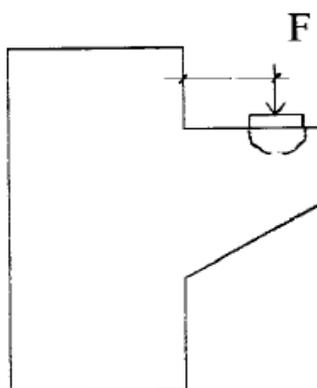


Fonte: Torres (1998)

### 2.3.6 Ruptura por esmagamento local

Ocorre quando a compressão é muito alta no local da aplicação do carregamento, fazendo com que o concreto não resista a forte tensão aplicada e haja assim o seu esmagamento. É fenômeno aprendido em mecânica dos materiais, onde a força aplicada supera a tensão admissível de esmagamento e a sua representação está mostrada na Figura 11.

Figura 11 - Ruptura devido ao esmagamento local



Fonte: Torres (1998)

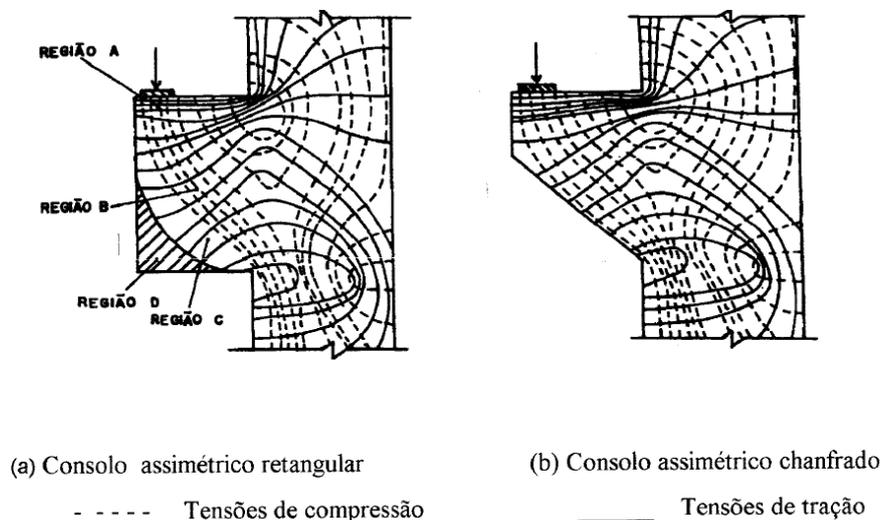
## 2.4 Desempenho Estrutural de Consolos Curtos

Segundo estudos experimentais, Franz e Niedenhoff (1963 apud Torres, 1998, p.8) definem e avaliam a distribuição das tensões nos consolos e a partir deles é possível

entender melhor o comportamento dessas peças. O estudo experimental foi realizado admitindo  $a/d = 0,5$  e considerando apenas o carregamento vertical, sem considerar uma força axial de compressão. Observando a Figura 12, que mostra as regiões de tensão no consolo, é possível chegar às seguintes conclusões:

- Região A – Com tensões de tração quase constantes na região superior do consolo, desde o carregamento até o pilar (parede, ou viga). Nesta área, então, fica caracterizado onde se deve colocar a armadura principal.
- Região B - Caracteriza-se pela formação de uma biela comprimida, apresentando tensões de compressão inclinadas e aproximadamente constantes a partir do ponto de aplicação da carga.
- Região C – Mudança de direção da força de compressão, provocando assim tensões de tração inclinadas, de pequena intensidade.
- Região D – Parte inferior externa do consolo reto que praticamente não é solicitada. Nesta região, como quase não há tensões, evidencia-se a opção de se usar consolos chanfrados, com altura variável.

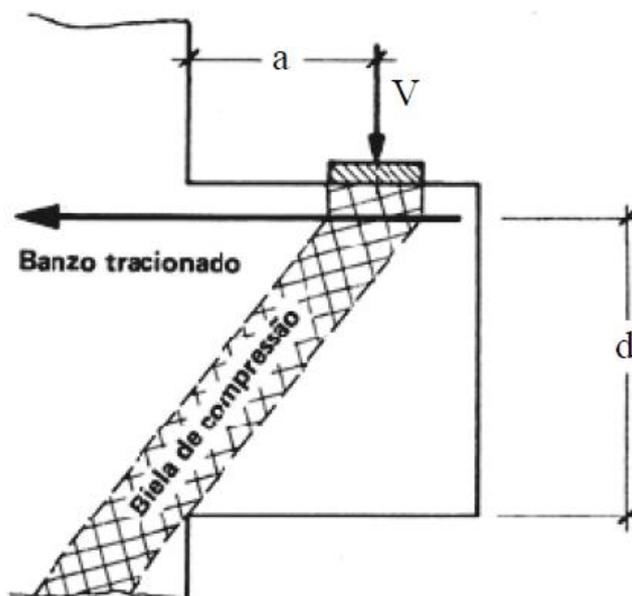
Figura 12 - Regiões de tensão no consolo



Fonte: Torres (1998)

Segundo Costa (2009, p.35) as tensões de tração no bordo superior, quase horizontais, e as de compressão inclinadas indicam que o consolo resiste aos esforços solicitantes como uma treliça simples, de acordo com a recomendação de Franz e Niedenhoff. A Figura 13 mostra uma treliça simples idealizada para o comportamento estrutural do consolo.

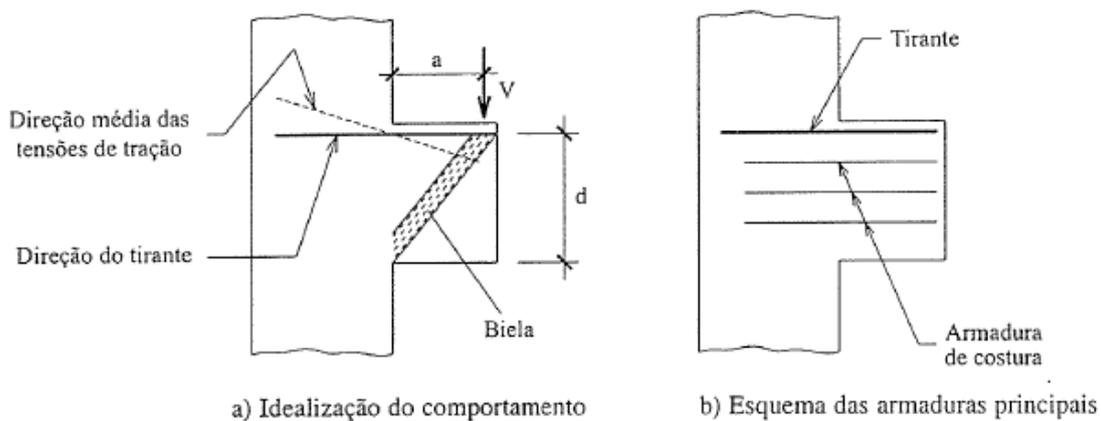
Figura 13 - Treliça simples idealizada para o comportamento estrutural do consolo



Fonte: Costa (2009)

Com uma análise análoga El Debs (2000, p.138) diz que “com base nos resultados obtidos, os autores (Franz e Niedenhoff) recomendavam o emprego de um modelo de treliça simples, formada por barra tracionada, o tirante, e por uma diagonal comprimida, a biela, conforme indicado na Figura 13. A Figura 14 traz o modelo de treliça simples representado por El debs.

Figura 14 - Treliça simples idealizada do consolo curto e esquema das armaduras principais



Fonte: El Debs (2000)

## 2.5 Modelo de dimensionamento de consolos

De acordo com as trajetórias tensões demonstradas por Franz e Niedenhoff (1963 apud Torres, 1998), dos modelos de atrito-cisalhamento e das análises plásticas, surgiram distintos métodos de cálculo de consolos cuja diferença entre eles eram: a adoção de coeficientes de segurança diferenciados, utilização de uma ou mais das teorias citadas e o grau de simplificação utilizado em cada norma. Os principais modelos utilizados no cálculo de consolos são: Modelo de biela e tirante e o Modelo atrito-cisalhamento. Dentre eles será destacado o modelo de biela e tirante, utilizado para consolos curtos.

### 2.5.1 Modelo biela-tirante

O modelo de biela e tirante aplicado a consolos foi evidenciado pelos estudos de Franz e Niedenhoff (1963 apud COSTA, 2009, p.37) sobre trajetórias de tensões. Também conhecido como modelo de treliça, ele idealiza um fluxo de tensões na estrutura e substitui os fluxos de tração por tirantes e os de compressão por bielas. Tirantes e bielas são unidos por nós e formam uma treliça idealizada.

Costa (2009) analisa que o cálculo das forças de tração e compressão na treliça idealizada é feito através do equilíbrio das forças internas e externas. Na posição dos tirantes são colocadas as armaduras, dimensionadas para resistir à força de tração. Já a biela (constituída de concreto), tem sua capacidade resistente verificada de acordo com a força de compressão e depende da resistência do concreto e da área da sua seção transversal.

Segundo a ABNT NBR 6118:2014, são considerados consolos curtos os elementos em balanço nos quais a distância “a” da carga aplicada à face do apoio é menor ou igual à altura útil “d” do consolo e maior ou igual à  $0,5d$ , sendo possível descrever seu comportamento por um modelo biela-tirante, onde as bielas são representações dos campos de compressão no concreto, desde a carga aplicada até a face do pilar ou qualquer que seja o apoio, já os tirantes são elementos lineares de eixo reto e seção solicitada por forças normais de tração.

A ABNT NBR 9062:2006 apresenta os passos necessários para o dimensionamento de consolos curtos. Para a análise estrutural, tem-se o modelo apresentado na Figura 15.



### 2.5.1.1 Armadura Principal e de Costura

A armadura total do tirante (armadura principal),  $A_{s,tir}$ , de consolos curtos é avaliada, segundo a NBR 9062 (ABNT, 2006), pela equação 1:

$$A_{s,tir} = \left(0,1 + \frac{a}{d}\right) * \frac{V_d}{f_{yd}} + \frac{H_d}{f_{yd}} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

$V_d$  : Força vertical de cálculo;

$F_{yd}$  : Resistência de cálculo ao escoamento do aço;

$H_d$  : Força horizontal de cálculo;

$a$ : Distância do ponto de aplicação da carga à face do pilar;

$d$ : Altura útil do consolo.

A NBR 9062 ainda prescreve que o tirante não pode ter diminuição da sua seção transversal entre o ponto de aplicação de carga e o engastamento, nas condições de ser consolo curto.

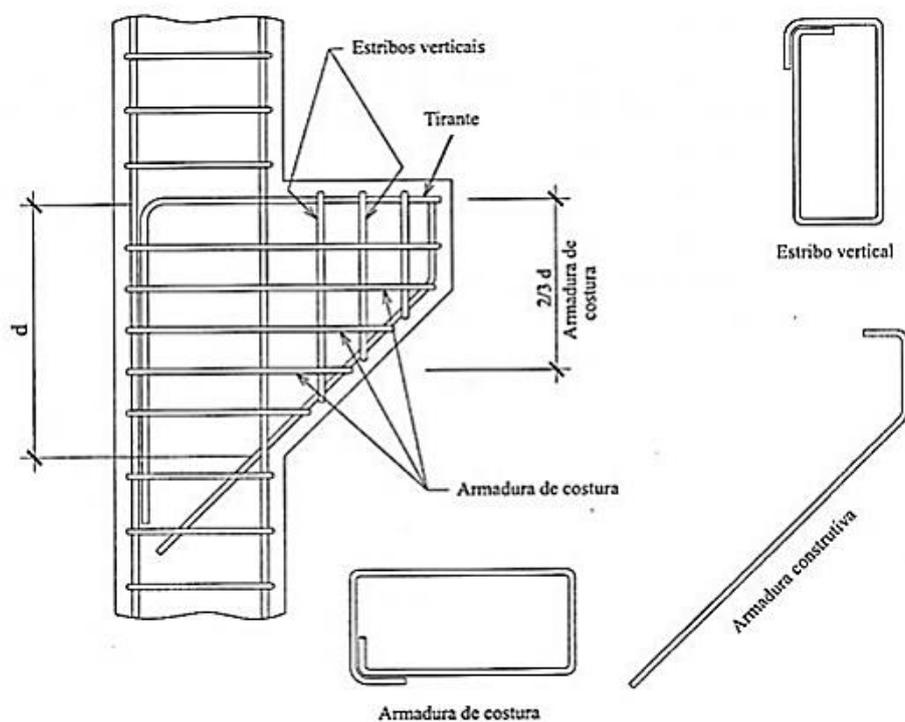
Como já demonstrado nas Figuras 3 e 16, a armadura de costura de consolos curtos proposta pela NBR 9062 deve ser distribuída em 2/3 da altura de cálculo do consolo ( $d$ ) e paralelos à armadura do tirante. Da equação 2, abaixo, é obtida a área de aço necessária para a armadura de costura e as variáveis são as mesmas descritas na equação 1.

$$A_{s_{cost}} = \left(0,1 + \frac{a}{d}\right) * \frac{H_d}{f_{yd}} * \frac{0,4}{d} \quad (\text{Eq. 2})$$

Vale salientar que no presente trabalho não será utilizada a armadura de costura a fim de análise proposta pelo trabalho, porém a ABNT NBR 9062:2006 afirma que seu uso é obrigatório. Segundo ensaios experimentais de Campione, La Mendola e Papia (2005) em consolos com relação  $a/d$  igual a 0,785 com e sem armadura de costura, verificou-se a partir de seus resultados que a presença de armadura de costura nos consolos aumentou a carga de ruptura em cerca de 27% quando comparados com os sem armadura de costura. Além disso, fizeram a substituição da armadura de costura por fibras de aço, verificando um aumento de 22% da carga de ruptura, assim como a carga de fissuração, aumentada em 72%.

Para os consolos com cargas diretas, os estribos verticais, quando construtivamente necessários, devem ser determinados segundo as taxas mínimas da ABNT NBR 6118:2014 para vigas de mesma largura  $b$  e altura igual à do consolo no engastamento. A Figura 17 ilustra o posicionamento da armadura transversal (estribos verticais), principal e de costura.

Figura 17 - Posicionamento das armaduras principal, costura e estribo.



Fonte: Luizetto e Grandó (2013)

### 2.5.1.2 Biela Comprimida

De acordo com a ABNT NBR 9062:2006, a tensão de compressão na biela em consolos curtos,  $\sigma_{cd}$ , não deve ultrapassar:

- a)  $f_{cd}$  para carga direta;
- b)  $0,85 f_{cd}$  para carga indireta.

Inicialmente deve-se buscar o valor da reação de compressão  $R_c$  para posteriormente calcular a tensão de compressão na biela. Do equilíbrio de momentos, obtém-se a seguinte equação 3:

$$Rc = \frac{V_d \cdot a + H_d \cdot d \cdot H_{bie}}{A_{bie}} \quad (\text{Eq. 3})$$

Os valores de  $A_{bie}$  e  $H_{bie}$  são calculados pelas equações 4 e 5:

$$A_{bie} = \frac{0,9 \cdot d \cdot a}{((0,9 \cdot d)^2 + a^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$H_{bie} = 0,2d \quad (\text{Eq. 5})$$

Substituindo o valor de  $A_{bie}$  resulta a equação 6:

$$Rc = \frac{V_d \cdot a + H_d \cdot d \cdot H_{bie}}{\frac{0,9 \cdot d \cdot a}{((0,9 \cdot d)^2 + a^2)^{\frac{1}{2}}}} \quad (\text{Eq. 6})$$

A tensão de compressão na biela é calculada com a expressão 7:

$$\sigma_c = \frac{Rc}{0,2 \cdot b \cdot d} = \frac{Vd}{0,18b \cdot d} * \left( 1 + \frac{H_d \cdot d \cdot H_{bie}}{V_d \cdot a} \right) * \left( 0,9^2 + \left( \frac{a}{d} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde:

$V_d$  : Força vertical de cálculo;

$F_{yd}$  : Resistência de cálculo ao escoamento do aço;

$H_d$  : Força horizontal de cálculo;

$a$ : Distância do ponto de aplicação da carga à face do pilar;

$d$ : Altura útil do consolo;

$Rc$ : Resultante de compressão na biela comprimida;

$b$ : largura do consolo;

$A_{bie}$  : Área da biela comprimida;

$H_{bie}$ : Altura da biela comprimida;

$\sigma_c$ : Tensão de compressão na biela;

Para simplificar a expressão 7, despreza-se o valor da parcela  $H_d \cdot d \cdot H_{bie} / V_d \cdot a$  que para os casos usuais é menor que 0,06, obtendo-se a equação 8.

$$\sigma_c = \frac{Vd}{0,18b \cdot d} * \left( 0,9^2 + \left( \frac{a}{d} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \leq \beta \cdot f_{cd} \quad (\text{Eq. 8})$$

De acordo com a ABNT NBR 9062:2006, adota-se  $\beta = 1$  no caso de forças diretas e  $\beta = 0,85$  para cargas indiretas.

Segundo o modelo da ABNT NBR 9062:2006 apresentado na Figura 15b, é possível determinar a força de ruína do consolo (F) quando ela se dá na biela comprimida, conhecidas a geometria do consolo e a resistência à compressão do concreto, dada pela equação 9:

$$F = \frac{f_{cd} \cdot b \cdot d^2 \cdot (c - \varphi - c_c - a)}{d^2 + (c - c_c - \varphi)^2} \quad (\text{Eq.9})$$

F: Força de ruína do consolo devido à ruptura da biela comprimida;

$f_{cd}$ : Resistência à compressão do concreto, valor de cálculo;

b: Largura do consolo;

c: Comprimento do consolo;

$\varphi$ : Diâmetro da barra de ancoragem do tirante;

$c_c$ : Cobrimento do concreto na ponta do tirante.

## 2.6 Concreto com fibras de aço

De acordo com Pasa (2007), materiais compósitos são a mistura de dois componentes: a matriz (que neste caso é o concreto) e o reforço, denominado fibra para o CRFA (concreto reforçado com fibra de aço). A matriz confere a estrutura ao compósito, preenchendo os espaços vazios, já as fibras são os componentes que reforçam as propriedades mecânicas, eletromagnéticas e até química do material. Esta união resulta um compósito final com propriedades superiores àquelas dos materiais originais.

### 2.6.1 Fibras Metálicas

O uso de fibras de aço no concreto armado não é uma técnica atual, é bastante antiga e utilizada com a ideia de aumentar a resistência à tração do concreto. Assim, as tensões de tração são absorvidas mais eficazmente e distribuída melhor por todo o material, juntamente com as barras de aço da armadura (Costa, 2009).

As fibras de aço são produzidas a partir de fios de aço trefilados, os quais cortados e comercializados em vários comprimentos e diâmetros. O ACI 544.1R (1996 apud Pasa, 2007) diz que as fibras destinadas ao reforço em concreto possuem comprimentos variando entre 12,7mm e 63,5mm e fator de forma (relação

comprimento-diâmetro) variando entre 30 e 100. Ou seja, curtas o suficiente para se dispersarem no concreto fresco. São confeccionadas com aço carbono ou inoxidável, com resistência à tração variando entre 500 e 2600 MPa e módulo de elasticidade em torno de 210GPa.

A utilização de fibras tem ganhado cada vez mais aceitação. Garcez (2005) diz que há uma variedade de tipos e morfologias de fibras, podendo ser encontradas do tipo retas, onduladas e torcidas, sendo que no Brasil as mais encontradas são as deformadas nas extremidades. A Figura 18 apresenta as fibras de aço encontradas no mercado.

Figura 18 - Fibras de aço encontradas no mercado



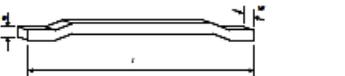
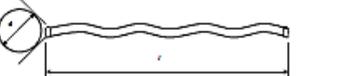
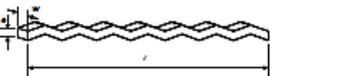
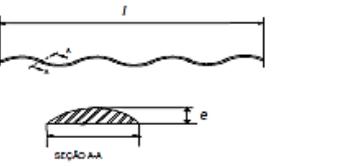
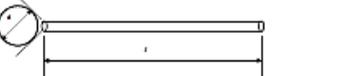
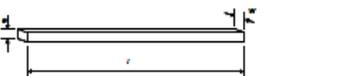
Fonte: Garcez (2005)

## 2.6.2 Classificação das fibras

O Brasil conta com uma norma de especificação para as fibras de aço, que é a ABNT NBR 15530:2007. Esta norma traz algumas classificações, como:

- Tipos de fibras, segundo sua conformação geométrica:
  - Tipo A: fibra de aço com ancoragens nas extremidades
  - Tipo C: fibra de aço corrugada
  - Tipo R: fibra de aço reta
- Classes de fibras, segundo o tipo de aço utilizado:
  - Classe I: fibra oriunda de arame trefilado a frio
  - Classe II: fibra oriunda de chapa laminada cortada a frio
  - Classe III: fibra oriunda de arame trefilado e escarificado

Figura 19 - Classificação e geometria das fibras de aço

Tipo	Classe da fibra	Geometria
A	I	
	II	
C	I	
	II	
	III	
R	I	
	II	

Fonte: Figueiredo (2008 apud Figueiredo, 2011)

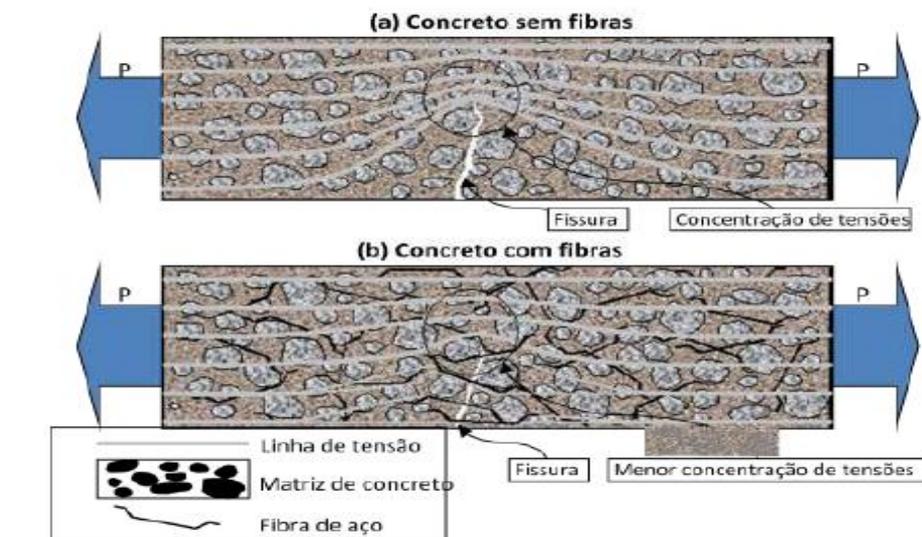
### 2.6.3 Interação fibra-matriz

Em Figueiredo (2011), mostra que no concreto sem fibras, apresentado na Figura 20, uma fissura irá apresentar uma barreira à propagação de tensões de tração, implicando numa concentração nas extremidades da fissura, podendo ocorrer a ruptura abrupta do material e, caso o esforço seja crítico, resulta na ruptura por fadiga. Porém, com a adição de fibras num teor apropriado, o concreto deixa de ter caráter frágil, pois a fibra serve como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, conforme ilustrado.

Como as fibras são distribuídas aleatoriamente, elas costumam as fissuras que não são alcançadas pela armadura convencional. Desta forma, Paso (2007) afirma que há um retardo no alargamento das fissuras, transferindo as solicitações de um lado a outro da matriz. Da mesma forma que Paso, Simplício (2008) indica que a presença de fibras no concreto reduz a abertura e crescimento das fissuras, conduzindo a um aumento da tenacidade do material.

Segundo Oliveira (2009), “Para o uso das fibras como reforço na matriz de concreto deve-se conhecer bem as propriedades das fibras (módulo de elasticidade e resistência), suas características geométricas (seção transversal, formato, comprimento e área superficial) e as propriedades do concreto a serem melhoradas”. Figueiredo (2005 apud OLIVEIRA, 2009) diz que é recomendável que o comprimento da fibra seja maior ou igual duas vezes o tamanho máximo do agregado. A Figura 20 demonstra o comportamento de um concreto com fibras.

Figura 20 - Funcionamento das fibras metálicas



Fonte: Figueiredo (2011)

As fibras metálicas usadas no concreto armado melhoram a ductilidade do concreto e combatem o aparecimento das microfissuras de forma prematura.

#### 2.6.4 Resistência à compressão

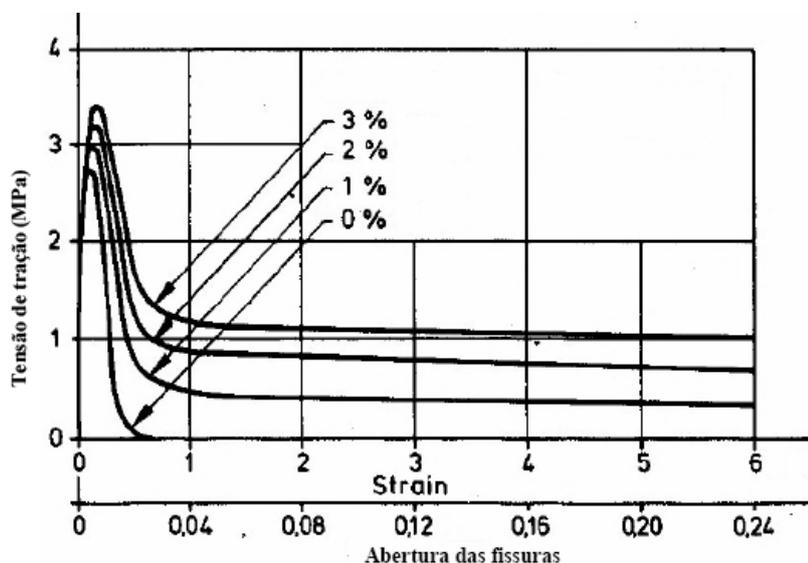
A adição de fibras não tem como objetivo e não implica necessariamente a alteração da resistência à compressão. De acordo com Simplício (2008), já foram feitos vários estudos sobre a adição de fibras ao concreto e não há consenso no resultado.

Apesar de alguns autores indicarem uma redução da resistência, devido a uma possível má compactação, a ACI 544.1R (apud Simplício, 2008) indica um ganho de até 15% para percentuais de fibra de 1,5%. Porém, independentemente do ganho ou não de resistência, o concreto também terá um ganho de tenacidade, já que as fibras atuam como ponte de transferência de tensões.

### 2.6.5 Resistência à tração

Simões (1998 apud Simplício, 2008) afirma que em relação à tração direta, o ganho de resistência é consenso, havendo relatos de aumento de 30% a 40% para adições até 1,5% de fibra. Apesar disso, a principal contribuição das fibras está na região pós-pico do diagrama tensão de tração-deformação, em virtude da resistência residual e do aumento de energia de deformação observados, como pode ser visto na Figura 21. Além da quantidade de fibras, outra análise importante é que quanto maior a relação entre comprimento  $L$  e o diâmetro  $d$  das fibras, mais eficiente será o reforço promovido.

Figura 21 - Curva tensão de tração x deformação para vários percentuais de fibra

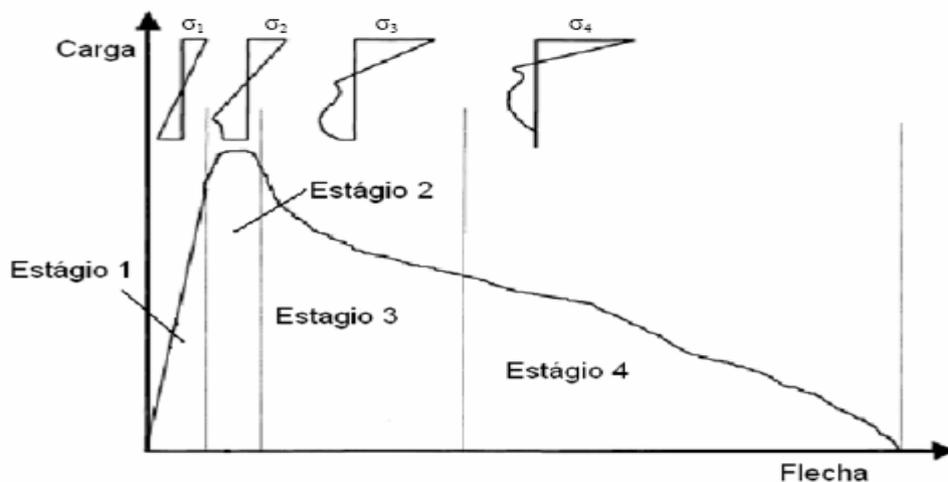


Fonte: Markovic (2006 apud Simplício, 2008)

### 2.6.6 Comportamento à flexão

Normalmente o efeito das fibras de aço é mais significativo na flexão do que na resistência à compressão ou até mesmo à tração (ACI 544.1R, 2004 apud SIMPLICIO, 2008). A Figura 22 demonstra o comportamento de uma viga de concreto reforçado com fibra submetida à flexão dividida em quatro estágios.

Figura 22 - Curva Carga x flecha e desenvolvimento de tensões normais



Fonte: Rbins et al (2001 apud Simplício, 2008)

No estágio 1, o concreto mostra-se sem fissurações e com comportamento estrutural linear elástico, mas vale salientar que ainda são cargas pequenas. O aumento das tensões de tração provoca o início da micro-fissuração, atingindo o estágio 2, diminuindo de forma progressiva a rigidez da estrutura. Para vigas de concreto sem fibras, a micro-fissuração converge para macro-fissuração. No caso de vigas reforçadas com fibras, ocorre a transferência inicial de tensões para fibra, estabilizando a fissuração e restringindo a micro-fissuração até que o carregamento máximo seja atingido.

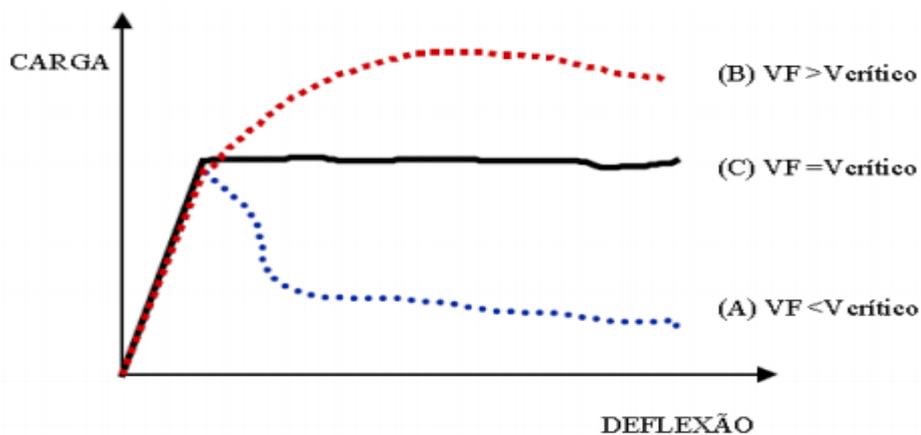
As macrofissuras propagam-se até atingir grande parte da altura da viga, causando arrancamento de fibras, no estágio 3. No estágio 4 são totalmente arrancadas ou rompidas, levando a estrutura ao colapso (ROBINS ET AL, 2001 apud SIMPLÍCIO, 2008).

### 2.6.7 Teor de fibras

Figueiredo (2011) afirma que o teor crítico de fibras pode ser definido como a quantidade que mantém a mesma capacidade portante do concreto, mesmo a partir da ruptura da matriz. Assim, quando se tem volumes acima do crítico, o concreto permanece aceitando níveis de carregamentos incrementais, mesmo após a ruptura fibra. Já volumes abaixo do teor crítico, no momento em que ocorre a ruptura da matriz, ocorre também uma redução na carga a qual o material tem a capacidade de suportar. A

Figura 23 apresenta o comportamento do volume de fibras ao nível de carregamento do concreto.

Figura 23 - Comportamento do volume de fibras



Fonte: Figueiredo (2011)

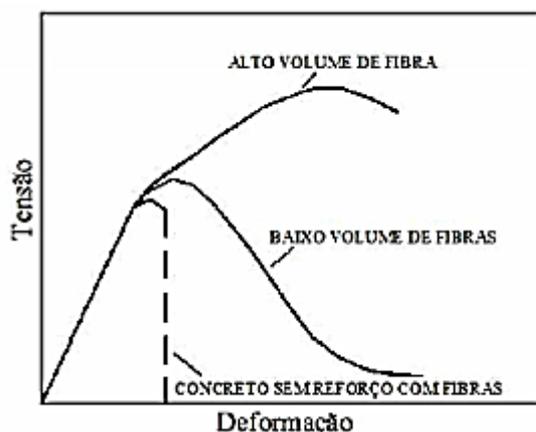
Mehta e Monteiro (2008), classificam o volume como sendo baixa fração volumétrica (menor que 1%), fração volumétrica moderada (entre 1% e 2%) e ainda em alta fração volumétrica (maior que 2%). A indicação para a baixa fração volumétrica é para redução de fissuras por retração e são usadas geralmente em lajes e pavimentos com superfícies grandes expostas. A fração volumétrica moderada tem a finalidade de aumento do módulo de ruptura, tenacidade à fratura e resistência ao impacto, sendo indicado ao uso em concretos projetados, e em estruturas que exigem capacidade de absorção de energia e fadiga. A alta fração corresponde aos compósitos de alto desempenho.

#### 2.6.8 Alguns resultados da aplicação de fibras de aço no concreto

Como exemplo do quanto que as fibras podem melhorar a ancoragem da armadura, os pesquisadores Harajli e Salloukh (apud COSTA, 2009) constataram que a presença de fibras de aço com ganchos melhora a distribuição de tensões entre a matriz de concreto e armadura sob tração. A utilização de uma porcentagem acima de 2% do volume de concreto melhora em 55% a resistência de ancoragem média das barras, quando comparado com o concreto tradicional não confinado.

Vale salientar também que a adição de fibras aumenta a segurança da estrutura, por isso é tão importante o seu uso na construção civil, pois o material sofre maiores deformações e de forma gradual antes de ir à ruína e isso é essencial, já que não haverá um colapso ou ruptura imediata. A Figura 24 mostra este fato, onde, segundo Garcez (2005), a adição de fibras pode modificar o gráfico da tensão-deformação, pois com o teor mesmo sendo baixo há uma melhora no comportamento plástico, expresso pelo alongamento da curva, graças ao maior controle da abertura das fissuras.

Figura 24 - Curvas típicas de tensão-deformação para ausência, baixo e alto volume de fibras



Fonte: Bentur e Mindess (1990 apud Garcez, 2005)

Campione, La Mendola e Papia (2005, apud OLIVEIRA 2009) avaliaram experimentalmente e analiticamente o comportamento à flexão de consolos de concreto simples e com fibras. Foram utilizadas fibras metálicas de 30mm de comprimento, 0.5mm de diâmetro e resistência nominal de 1115MPa, num percentual de 1,0% em relação ao volume de concreto. Os resultados apontaram que com o uso das fibras a presença de aberturas de fissuras foram bem menores até atingir a carga máxima, a qual aumentou cerca de 22% , além disso a força correspondente à primeira fissura foi cerca de 72% maior. Já a resistência à compressão do concreto foi de, aproximadamente, 80 MPa tanto para o concreto com fibras quanto para o concreto sem fibras.

Ainda de acordo Campione, La Mendola e Papia (2005, apud OLIVEIRA 2009), nos consolos sem fibras, de resistência à compressão de 80 MPa, taxa de armadura do tirante de 0,61%, equivalente a 2  $\varnothing$ 10, e sem armadura de costura, o modo de fratura foi caracterizado pelo escoamento da armadura do tirante seguido do esmagamento da biela de compressão. Quando foi adicionado 0,5% de fibras, foi observado um incremento de

cerca de 28% na força de escoamento do tirante e na força última. Já a adição de 1,0% de fibras aumentou em cerca de 64% a força de escoamento do tirante e a força última com relação ao consolo sem fibras.

Outros resultados também foram observados no mesmo experimento anteriormente mencionado, como o aumento na força de escoamento do tirante e na força última.

### CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos desse capítulo foram realizados no Laboratório de Estruturas da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Primeiramente, houve a coleta dos materiais para a realização dos ensaios, como formas para a moldagem dos consolos e do referente trecho do pilar, além de aço, cimento e agregados.

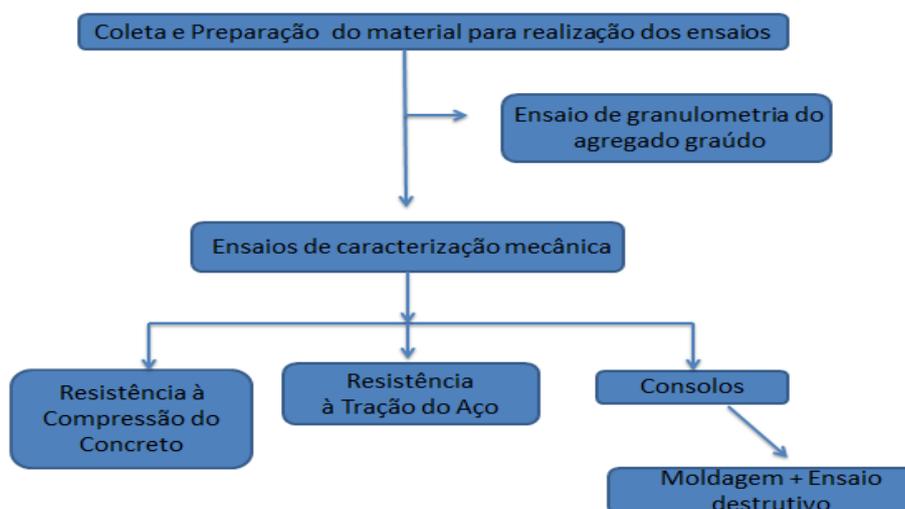
Após a obtenção dos materiais, teve a preparação da estrutura a ser ensaiada, através da forma e moldagem do conjunto pilar-consolo, com a devida taxa de armadura dimensionada de acordo com a carga aplicada e critério de dimensionamento, se baseando na ABNT NBR 9062:2006.

Na terceira etapa, depois de esperado os 22 dias de cura, parte-se para o experimento em si. Com a utilização de uma prensa hidráulica, destinada a realizar ensaios de compressão, aplica-se o carregamento até a ruptura do consolo, respeitando-se a relação  $a/d$  entre 0,5 e 1,0, que caracteriza o mesmo como curto.

Paralelamente à preparação e ensaio do conjunto pilar-consolo, foram feitos ensaios de caracterização física (granulometria do agregado graúdo) e mecânica do material.

Os métodos de ensaios utilizados baseiam-se em normas, entre elas a ABNT NBR 7217:1987 e a ABNT NBR 5739:2007. A Figura 25 mostra os procedimentos e apresenta um fluxograma resumindo as etapas de realização do trabalho.

Figura 25 - Fluxograma das etapas do trabalho realizado



Fonte: Autor

### 3.1 Coleta e preparação do material

#### 3.1.1 Concreto e fibras da pesquisa

Na confecção do concreto dos consolos e dos corpos de prova, foi utilizado sempre o mesmo material, utilizando apenas um traço para dosagem tanto do concreto com adição de fibra quanto do convencional.

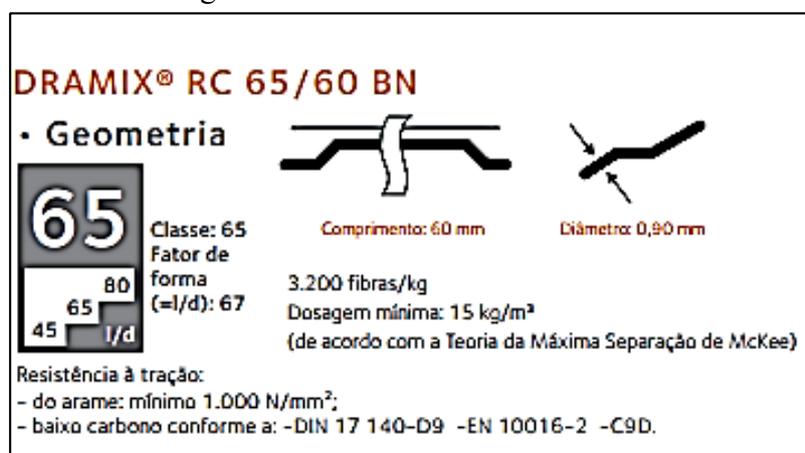
O aditivo superplastificante utilizado foi o Muraplast FK 100B e o cimento Portland composto CP II-Z. Na Tabela 1 pode ser vista a quantidade, em massa, de cada material utilizados para obtenção de um metro cúbico de concreto com resistência à compressão estimada em 35MPa.

Tabela 1: Consumo de material em Kg/m<sup>3</sup> de concreto

Material	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )
Cimento	405,29
Areia	656,57
Brita 1	1123,46
Superplastificante	1,84
Água	178,3

As fibras de aço utilizadas foram da Dramix RC 65/60-BN, que são fibras coladas em pentes com cola que desaparece ao longo da mistura promovendo uma distribuição perfeitamente homogênea. A Figura 26 ilustra as características das fibras Dramix e a Tabela 2 apresenta as suas características.

Figura 26 - Características das fibras



Fonte: Arcelormittal

Tabela 2: Características das fibras utilizadas na pesquisa

Tipo	Fator de forma (l/d)	Comprimento	Diâmetro	Fibras/kg
RC* 65/60	67	60 mm	0,9 mm	3200

\*RC = Fibra colada

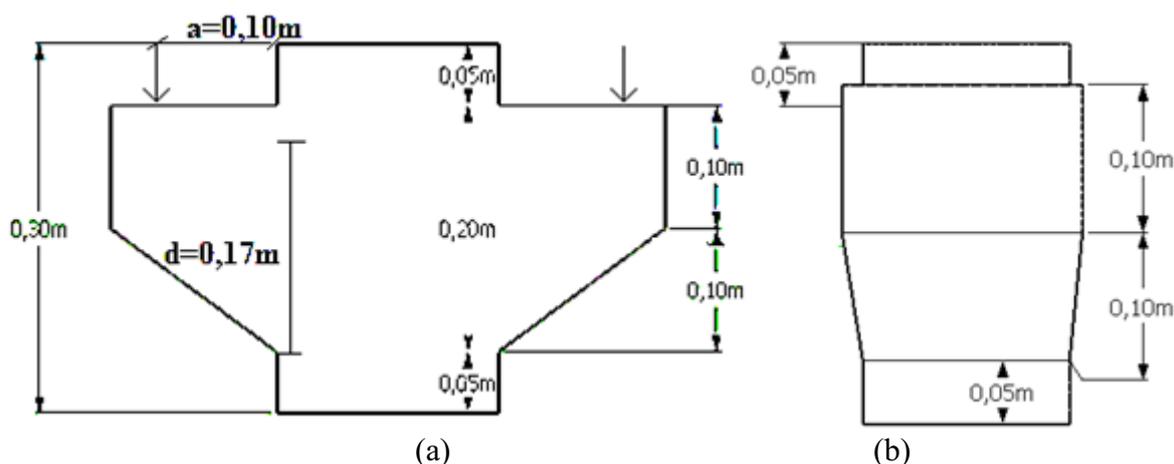
Fonte: Arcelormittal

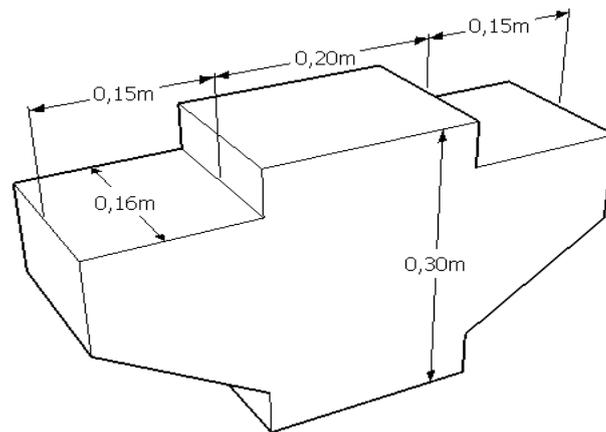
### 3.1.2 Modelos Experimentais dos Consolos Curtos

A geometria de todos os consolos teve a mesma forma, onde os pilares apresentaram as dimensões de 0,20m x 0,16m, com altura de 0,3m e os consolos são do tipo chanfrados, com face externa de 0,10m e a interna, em contato com o pilar, de 0,20m e a espessura 0,16m.

Como são consolos curtos, a aplicação da carga nos modelos foi feita a uma distância “a” de forma a estabelecer uma relação  $0,5 < a/d < 1,0$ , mais precisamente 0,588, onde  $d = 0,17m$  e  $a = 0,10m$ , respeitando também o cobrimento necessário para a armadura do tirante principal. A Figura 27 mostra algumas vistas para representação do consolo e a Figura 28 ilustra o mesmo após a cura.

Figura 27 – Representação das dimensões do consolo. (a) Vista frontal; (b) Vista lateral; (c) Vista em perspectiva.





(c)

Fonte: Autor

Figura 28 - Consolo depois de concretado e desmoldado



Fonte: Autor

### 3.1.2.1 Fôrmas

As fôrmas foram montadas a partir de chapas de madeira compensada plastificada de 18mm de espessura, obtidas na WB Bodocongó empreendimentos imobiliários. Além de ceder as chapas, a empresa participou do processo de confecção das fôrmas,

produzidas de forma a conferir ao consolo as dimensões preestabelecidas. A Figura 29 apresenta as fôrmas usadas no trabalho de pesquisa.

Figura 29 - Fôrmas sendo preparadas para a concretagem dos consolos



Fonte: Autor

### 3.1.2.2 Armaduras

A armaduras utilizadas na pesquisa são de aço CA-50, com diâmetros de 12,5 e 10mm, sendo a primeira a da armadura principal, calculada de acordo com o processo de dimensionamento descrito no item 2.5.1.1, a fim de resistir a uma carga de 30 toneladas, já a segunda é a armadura do pilar. Foi usado também o CA-60 para confecção dos estribos do pilar.

O critério de dimensionamento da armadura principal usado é proposto pela ABNT NBR 9062:2006, assim como os cobrimentos, porém não foi utilizada nenhuma armadura de costura, tendo em vista que o presente trabalho pretende comparar resultados sem a mesma.

Dentre as suas características diferenciadas, os modelos também não apresentam estribos verticais e horizontais, permanecendo apenas a armadura do tirante principal, que se molda de acordo com o chanfro do consolo.

Vale salientar também que as armaduras dos pilares foram dobradas em suas extremidades, de forma a garantir a ancoragem. As figuras 30 e 31 apresentam as armaduras utilizadas nos modelos, assim como alguns detalhes construtivos.

Figura 30 - Preparação e montagem da armadura do modelo de consolo curto: (a) Armadura principal; (b) Armadura do pilar; (c) Dobragem das barras e (d) Estrutura final da armadura.



(a)



(b)



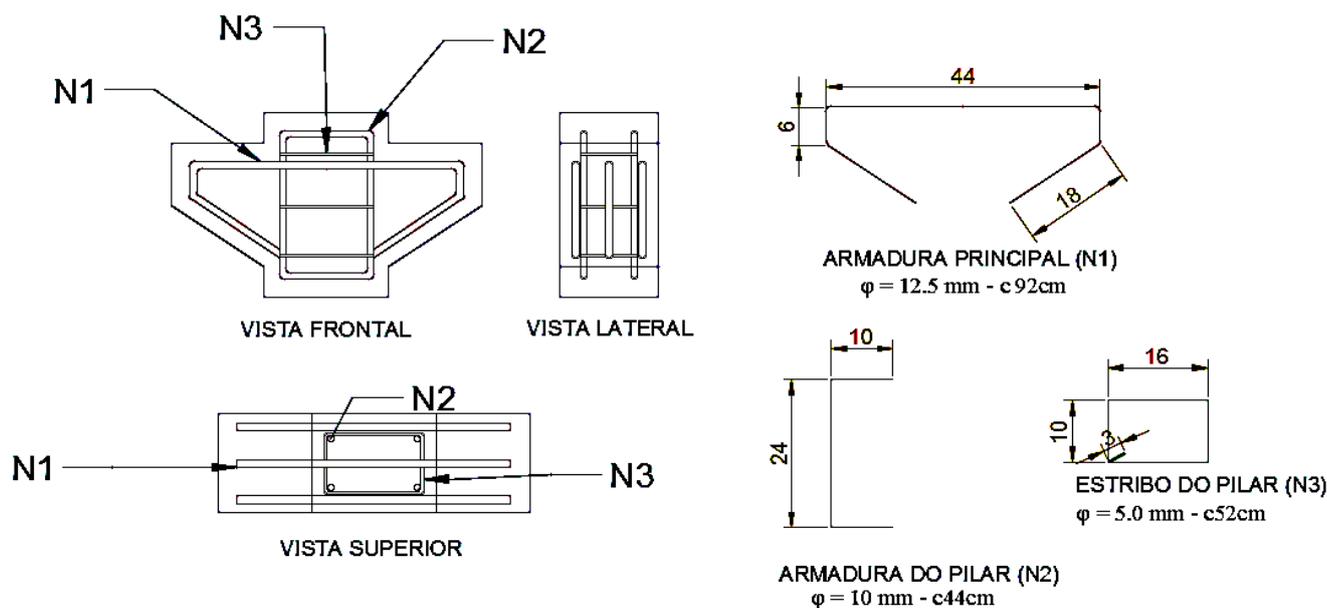
(c)



(d)

Fonte: Autor

Figura 31 - Detalhe da armadura dos modelos de consolo do trabalho.



Fonte: Autor

### 3.1.2.3 Tipos de modelos analisados na pesquisa

A fim de comparar os resultados da aplicação de fibra de aço na estrutura do concreto, foram moldados três modelos distintos de consolos curtos, de acordo com a utilização ou não de fibras metálicas e de sua proporção.

As proporções usadas estão dentro de uma faixa proposta pela literatura e já mencionado na fundamentação teórica, que indica uma variação de 0,5 a 2%. A Tabela 3 apresenta um resumo das características de cada modelo.

Tabela 3: Modelos de consolos curtos preparados para a pesquisa

Modelo	Armadura Principal	Armadura de Costura	Fibras de Aço	Porcentagem de fibras (%)
M1	3 $\phi$ 12.5mm	-	-	-
M2	3 $\phi$ 12.5mm	-	Sim	0,5
M3	3 $\phi$ 12.5mm	-	Sim	1

Assim, definidos os modelos utilizados na pesquisa, partiu-se para a etapa seguinte, a fim de caracterizar os consolos tanto fisicamente como mecanicamente através de ensaios laboratoriais.

## 3.2 Métodos

Como método de pesquisa, foram realizados alguns ensaios laboratoriais, seja com o consolo em si quanto com os materiais componentes do mesmo, a fim de determinar a granulometria do concreto, a resistência à tração do aço utilizado na sua estrutura, além do ensaio de compressão, seja nos corpos de prova quanto nos consolos propriamente ditos.

### 3.2.1 Caracterização Física

#### 3.2.1.1 Ensaio de Granulometria

A norma utilizada para o ensaio de granulometria foi a ABNT NBR 7217:1987. Esta norma traz os procedimentos a serem seguidos e consiste no peneiramento do material, onde utilizou-se nas amostras de agregado graúdo e miúdo um conjunto de peneiras da série normal e considerou-se, para traçar a curva granulométrica, a porcentagem de material passante, representando graficamente em função da abertura da peneira em escala logarítmica. A Figura 32 mostra a série de peneiras utilizada e a Tabela 4 a especificação das mesmas, com as devidas aberturas.

Figura 32 - Conjunto de peneiras da série normal



Fonte: Autor

Tabela 4: Conjunto de peneiras da série normal, segundo a ABNT NBR 7217:1987

<b>Peneiras (pol.)</b>	<b>Peneiras (mm)</b>
1pol.	25,4
3/4pol.	19,1
3/8pol.	9,5
Nº 4	4,8
Nº 8	2,4
Nº 16	1,2
Nº 30	0,6
Nº 50	0,3
Nº 100	0,15

Para o agregado miúdo foi utilizado uma amostra de 1kg e para o gráudo utilizou-se 5kg, pois a norma indica uma quantidade mínima de material a ser ensaiado em função do diâmetro máximo do agregado utilizado. A Figura 33 mostra utilização das amostras para o ensaio de granulometria.

Figura 33 - Amostras para o ensaio de granulometria



Fonte: Autor

### 3.2.2 Caracterização Mecânica

#### 3.2.2.1 Resistência à tração do aço

Para o ensaio de resistência à tração do aço, foram utilizadas as bitolas que utilizadas no consolo, ou seja, o tirante e a armadura do pilar. Assim, foram ensaiadas as barras de 10mm e 12,5mm de diâmetro. Vale salientar que as barras de 5mm utilizadas no estribo do pilar não foi possível de ser ensaiada, tendo em vista que o aparelho do laboratório não trabalha com tal diâmetro.

O experimento consiste em posicionar a barra de aço no aparelho, a prensa da marca Lousenhausen, encaixando-a de forma que as garras fixassem em suas extremidades, numa posição que permite ao equipamento aplicar-lhe uma força axial de tração.

A máquina de tração é hidráulica, movida pela pressão de óleo, e está ligada a um dinamômetro que mede a força aplicada ao corpo de prova. Assim, foi aplicada força de tração na barra até que houvesse o rompimento da mesma e anotado o valor da tensão de escoamento do aço, que corresponde à tensão a qual a barra continuou alongando sem a necessidade de aumentar a força axial. A Figura 34 mostra o aparelho utilizado no ensaio de resistência à tração do aço.

Figura 34 - Prensa utilizada no ensaio de resistência à tração do aço



Fonte: Autor

### 3.2.2.2 Compressão do concreto em corpos de prova cilíndricos

O ensaio de compressão do concreto com corpos de prova cilíndricos foi feito segundo as orientações da NBR 5739 (ABNT, 2007).

Os corpos foram preparados no empreendimento Benvenuto, da WB Engenharia, no mesmo instante em que foi feita a concretagem dos consolos, sendo um corpo de prova em cada betonada. Suas dimensões foram de 10cm de diâmetro e 20cm de altura, obedecendo a relação  $1,94 < h/d < 2,02$ , item 4.3 da referida NBR. Após 24 horas da concretagem, as amostras foram imersas em água a fim de se efetuar o processo de cura e retiradas um dia antes da realização do ensaio.

Segundo as orientações da mesma, os corpos foram posicionados de modo que, ao estar centrado, seu eixo coincidiu com o da máquina ELE, com célula de 2000 kN e velocidade controlada pelo operador, fazendo com que a resultante das forças passasse pelo centro. A Figura 35 demonstra a prensa utilizada, já a Tabela 5 apresenta os corpos de provas moldados no projeto.

Figura 35 - Prensa utilizada para o ensaio de compressão nos corpos de prova cilíndricos



Fonte: Autor

Tabela 5: Corpos de provas moldados no projeto

<b>Modelo</b>	<b>Porcentagem De fibras (%)</b>	<b>Data da moldagem</b>	<b>Data do ensaio dos corpos-de-prova e dos modelos</b>	<b>Idade</b>
CP1	Sem fibras	21/junho	13/julho	22
CP2	0,5	12/julho	03/agosto	22
CP3	1,0	12/julho	03/agosto	22

### 3.2.2.3 Ensaio de ruptura dos consolos

#### 3.2.2.3.1 Preparação dos Modelos

O ensaio de ruptura dos consolos foi o principal do trabalho. Antes do ensaio em si, houve o preparo, começando com a montagem da fôrma e confecção das armaduras, o processo de concretagem da peça consolo-pilar, a cura e, só posteriormente, a ruptura dos mesmos na prensa. Todos os modelos foram preparados no empreendimento Benvenuto, da WB Engenharia, localizado no bairro de Bodocongó e, após a cura, levados à UFCG para realização do ensaio.

Inicialmente, foi feito o corte, dobra e montagem das armaduras. A especificação das bitolas utilizadas e do processo de dobra das mesmas já foi descrito anteriormente.

Depois da montagem das armaduras, as formas foram preparadas para receber o concreto, posicionadas em local adequado, sendo plano e livre de entulhos ou qualquer outra atividade que pudesse danificar o modelo ou atrapalhar na concretagem. Assim, foi aplicado o desmoldante nas fôrmas a fim de impedir a aderência do concreto nas mesmas, aumentando a vida útil, a produtividade do processo de desmolde e um ótimo acabamento da peça. A figura 36 mostra a aplicação do desmoldante na fôrma antes da concretagem.

Figura 36 - Aplicação do desmoldante na fôrma



Fonte: Autor

Após a aplicação do desmoldante, foram posicionadas as armaduras na fôrma, através do uso de espaçadores de 2,5cm para garantir o cobrimento necessário do conjunto consolo-pilar, como ilustra a Figura 37.

Figura 37 - Posicionamento da armadura na forma, com cobrimento de 2,5cm



Fonte: Autor

Enquanto organizava-se o molde e o posicionamento da armadura, o concreto foi preparado na betoneira de 400l com o traço já especificado (o mesmo utilizado pela WB

Engenharia) e com o volume necessário para concretar os modelos em questão (M1, M2 e M3). A fim de garantir a porcentagem de 0,5% e 1% de fibras nos consolos M2 e M3, respectivamente, foi calculada a quantidade das mesmas a ser adicionada à betoneira. O modelo M1 não apresenta fibras metálicas e foi concretado em data diferente. A Figura 38 traz a produção do concreto na betoneira e a eminente mistura com as fibras.

Figura 38 - Produção do concreto na betoneira e adição das fibras de aço.



Fonte: Autor

Antes da concretagem dos consolos foram retiradas amostras cilíndricas de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura para o ensaio de resistência à compressão simples do concreto e foi realizado o ensaio slump test para determinar a consistência da mistura, ou seja, a trabalhabilidade do concreto. Dessa forma, foram preparados corpos de prova de concreto sem fibras, com 0,5% e, por fim, com 1% de fibras.

Finalmente, lançou-se o concreto nos consolos, realizando o adensamento dos modelos com vibrador de agulha. A figura 39 apresenta a realização do slump test e o lançamento do concreto no molde.

Figura 39 - Fases durante o processo de concretagem: (a) Realização do slump test e (b) lançamento do concreto nos moldes a fim de preparar os modelos.



(a)

(b)

Fonte: Autor

Após a concretagem, os modelos de ensaio foram levados do local de moldagem para o laboratório, na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

#### **3.2.2.3.2 Ensaio de ruptura (força última) dos consolos**

Os ensaios de ruptura dos modelos foram realizados no laboratório de estruturas, localizado no bloco BK, na UFCG. Nele, encontra-se uma máquina para ensaio de ruptura, a LOUSENHASEN, com capacidade de aplicação de 400KN de carga.

Após levar os modelos para o BK, os mesmos foram posicionados na máquina, de forma que cada consolo do modelo ficasse sobre um dos apoios. Vale salientar que para contornar uma possível irregularidade na face consolo-apoio, foram colocadas borrachas a fim de que houvesse uma igual transmissão dos esforços a cada consolo. Os modelos também foram colocados de forma que os chanfros ficassem voltados para

cima em relação aos apoios, logicamente. As Figuras 40 e 41 apresentam a máquina usada no ensaio e o posicionamento do consolo no mesmo, respectivamente.

Figura 40 - Prensa de Ruptura Lousenhausen, utilizada no ensaio de ruptura dos consolos.



Fonte: Autor

Figura 41 - Posicionamento do modelo na máquina de ruptura



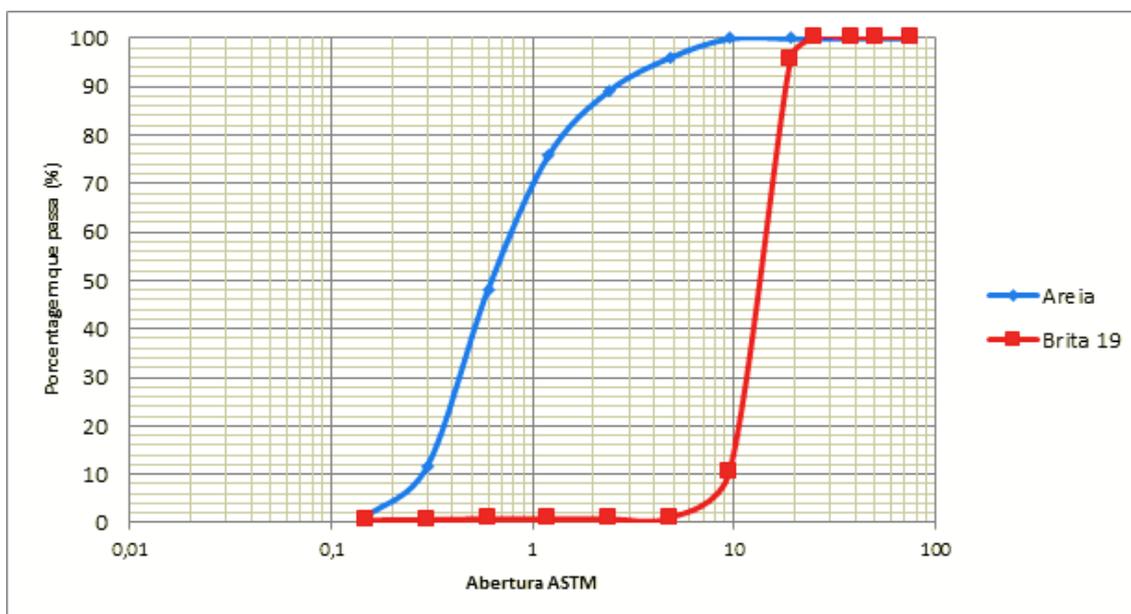
Fonte: Autor

## CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Caracterização física

Os resultados obtidos nos ensaios de granulometria são ilustrados na Figura 42.

Figura 42 - Resultado do ensaio de granulometria dos agregados



Fonte: Autor

De acordo com o gráfico de granulometria, pode-se identificar que o agregado miúdo (areia) é um material bem graduado e o agregado graúdo (brita) é mal graduado. A Tabela 6 apresenta as principais características dos agregados utilizados na produção do concreto, obtidas através de ensaios laboratoriais realizadas pela empresa TECNCOM (Tecnologia do Concreto e Engenharia).

Tabela 6: Características dos agregados

Características	Areia natural	Pedra granítica (Brita 19)	Cimento
Diâmetro máximo (mm)	4,8	19	-
Modulo de finura	3,30	6,83	3,19
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,62	2,65	-
Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )	1,54	1,47	-

## 4.2 Caracterização Mecânica

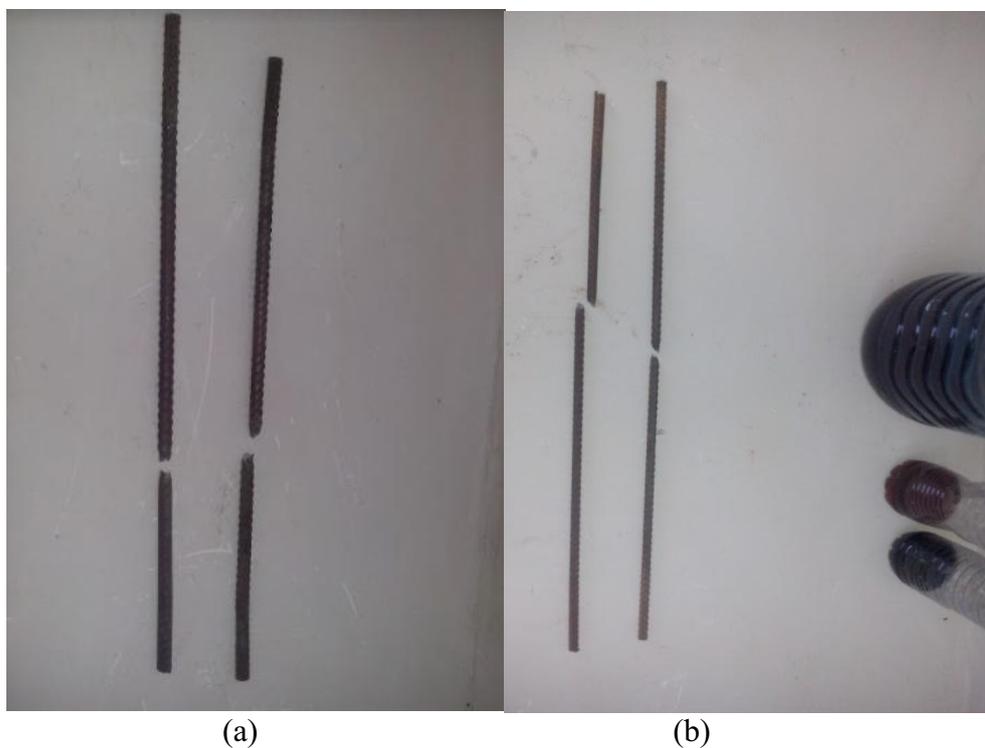
### 4.2.1 Resistência à tração do aço

Os ensaios de resistência à tração do aço estão mostradas na Tabela 7 e a figura 43 apresenta as amostras usadas.

Tabela 7: Resultados de resistência à tração do aço

Diâmetro (mm)	Amostras	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão última (MPa)
10	1	522	624
	2	522	637
12,5	1	502	611
	2	521	627

Figura 43 – Bitolas utilizadas no ensaio de resistência à tração do aço: (a) bitola de diâmetro 12,5mm e (b) bitola de diâmetro 10mm



Fonte: Autor

Tendo em vista que o aço utilizado para as referidas bitolas é o CA-50, ou seja, com resistência ao escoamento de 500MPa, o resultado apresentado foi satisfatório, já que todas as amostras obtiveram resistência ao escoamento acima desse valor esperado.

#### 4.2.2 Resistência à compressão do concreto em corpos de prova cilíndricos

Segundo a ABNT NBR 5739:1994, o resultado para a resistência à compressão do concreto ( $f_c$ ) deve ser obtido dividindo-se a carga da ruptura pela área da seção transversal do corpo-de-prova, devendo o resultado ser expresso com aproximação de 0,1 MPa. Já resistência média à compressão é a média aritmética dos corpos de prova e esses resultados estão apresentados na Tabela 8 para o concreto com fibra e sem fibra, para os modelos M1, M2 e M3.

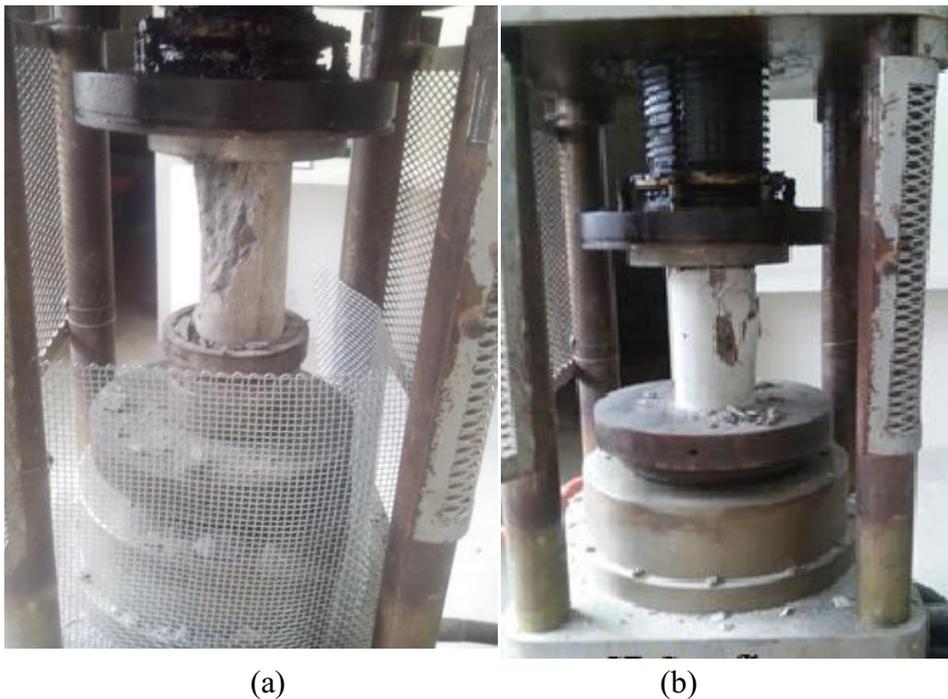
Tabela 8: Resultados de Compressão Simples

<b>Tipo de CP</b>	<b>Concreto</b>	<b>Corpo de prova</b>	<b><math>f_c</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{cm}</math> (MPa)</b>
CP1	Sem fibra	CP A	26,3	27,4
		CP B	28,5	
CP2	Com fibra (0,5%)	CP C	30,6	31,85
		CP D	33,1	
CP3	Com fibra (1%)	CP E	32,27	33,51
		CP F	34,75	

Como o concreto utilizado nos modelos foi o CP II-Z, com resistência estimada de 35MPa aos 28 dias, o resultado para o concreto sem fibras deveria se aproximar a tal valor esperado. Porém, deve-se levar em conta que devido à falta de tempo hábil de espera o ensaio foi realizado com 22 dias, podendo chegar próximo do esperado para os 28 dias.

Após a ruptura dos corpos de prova, foi observado também que os sem fibras obtiveram uma ruptura mais brusca, destacando uma maior quantidade de concreto em relação aos sem fibras. Esse fato mostra que há indícios que as fibras de aço aumentam a ductilidade do concreto. A figura 44 apresenta a ruptura de CP's de concreto sem fibras e com fibras, respectivamente, e demonstram este fato observado.

Figura 44 - Ruptura dos CP's de concreto: (a) sem fibras e (b) com 1% de fibras



Fonte: Autor

Ainda de acordo com a tabela, a resistência média à compressão do concreto aumentou de acordo com a adição das fibras, onde o incremento de 0,5% delas (CP 2) proporcionou um aumento na resistência à compressão de 16,3% em relação ao concreto sem fibras (CP1). Já o concreto com 1% de fibras (CP3) aumentou a resistência à compressão em 22,29% em relação ao concreto sem fibras e em 5,2% em relação ao concreto com 0,5% de fibras de aço.

#### 4.2.3 Ensaio de ruptura dos consolos

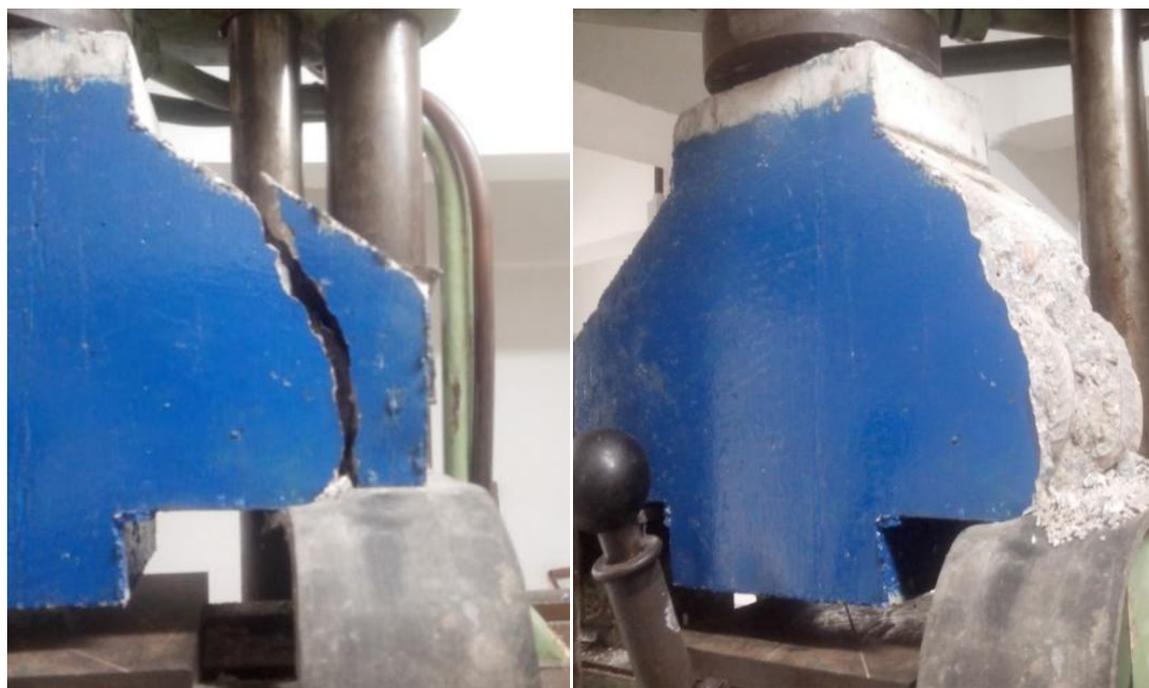
A seguir são descritos e ilustrados a forma de ruptura e o panorama de fissuração dos consolos. Em todos os modelos a ruptura foi caracterizada após alcançada a força última, ou seja, todos os ensaios só foram interrompidos após o pico da força.

Os resultados estão apresentados separadamente, primeiro de acordo com a força última suportada pelo modelo e posteriormente com o panorama de fissurações.

### 4.2.3.1 Força última

Os modelos foram ensaiados e a ruptura dos mesmos está ilustrada nas figuras 45, 46 e 47, para os modelos M1, M2 e M3, respectivamente.

Figura 45 - Aparente ruptura através da biela de compressão do modelo M1: (a) Na iminência da ruptura e (b) Rompido



(a)

(b)

Fonte: Autor

Figura 46 - Aparente ruptura através da biela de compressão do modelo M2: (a) Na iminência da ruptura e (b) Rompido



(a)



(b)

Fonte: Autor

Figura 47 - Aparente ruptura através da biela de compressão do modelo M3: (a) Na iminência da ruptura e (b) Rompido



(a)



(b)

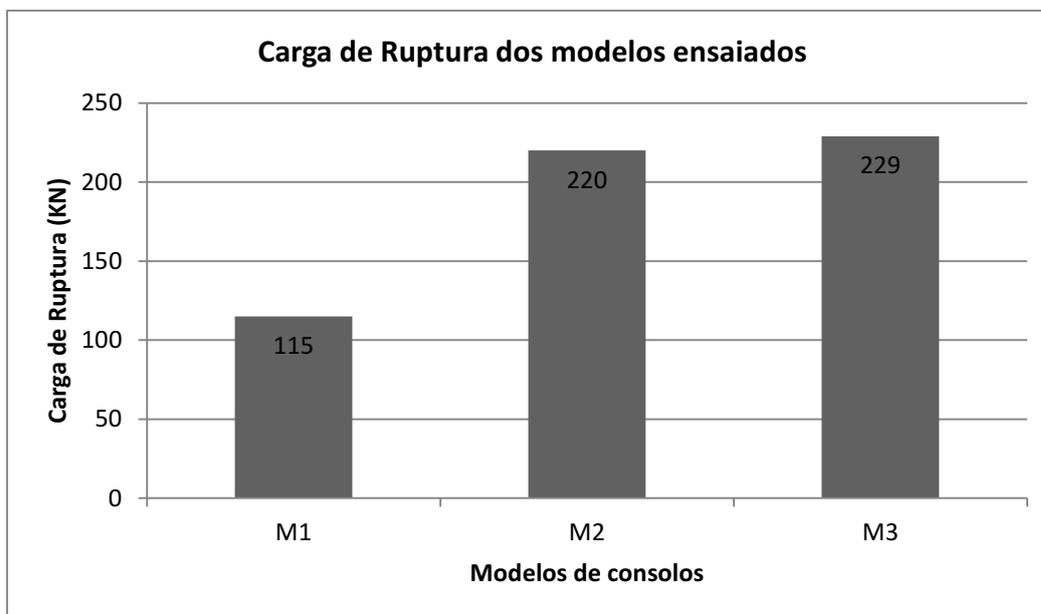
Fonte: Autor

O valor da carga última foi anotado para cada modelo. A Tabela 9 apresenta esses resultados e as Figuras 48 e 49 trazem relações da carga de ruptura em função do modelo de ensaio e da proporção de uso de fibras de aço, respectivamente.

Tabela 9: Resumo das cargas de ruptura

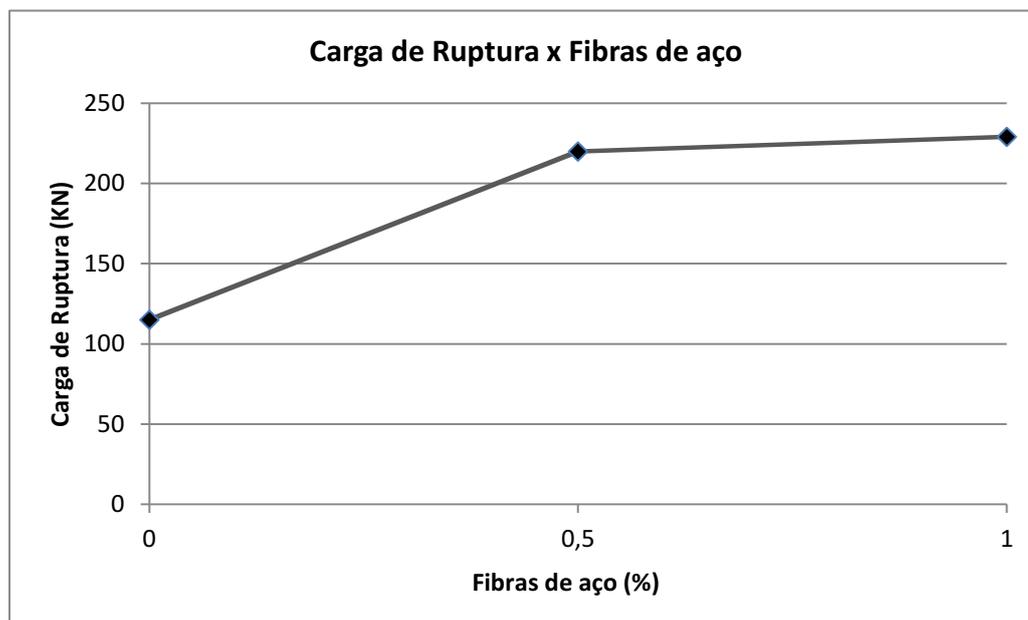
<b>Modelo</b>	<b>Carga experimental (kN)</b>	<b>Valor Teórico NBR9062:2006</b>	<b>Experimental/Teórico</b>
M1	115	194	0,6
M2	220	194	1,13
M3	229	194	1,18

Figura 48 - Carga de ruptura dos modelos ensaiados



Fonte: Autor

Figura 49 - Carga de ruptura dos modelos ensaiados em função do uso de fibras de aço



Fonte: Autor

Pela forma de fissuração mostrada nas fotos, há indícios que o modo de ruptura em todos os modelos foi pela biela de compressão, já que foram dimensionados e detalhados para tal, logo o resultado da ruína foi o esperado. Também vale salientar que a ruptura aconteceu em apenas um dos consolos em cada um dos modelos.

Os registros indicam uma tendência no aumento da ductilidade do concreto com fibras, pois no modelo M1 a ruptura foi bem mais abrupta (desprendendo-se uma grande quantidade de concreto), caracterizando um material mais frágil que os modelos M2 e M3 (com fibras), os quais as aberturas se propagaram mais lentamente e a ruína se deu de forma mais dúctil.

De maneira geral, a ruína ocorreu com um pequeno número de fissuras na região da biela comprimida. Entretanto, essas fissuras já apresentavam aberturas consideráveis.

Observa-se no gráfico da Figura 49 uma tendência de aumento da carga de ruptura de acordo com a maior utilização de fibras de aço na matriz do consolo. Comparando-se a inclinação do gráfico do primeiro com o segundo trecho, há uma diminuição da taxa de variação da carga última entre 0,5 e 1% em comparação ao intervalo de 0 a 0,5% do uso de fibras, ou seja, isto sugere que a resistência do consolo não aumenta proporcionalmente à medida que se aumentam as fibras na matriz do concreto e que esse aumento tende a estabilizar-se ainda para pequenos percentuais.

Pode-se também analisar o aumento porcentual da carga de ruptura entre os modelos, onde o modelo M2 apresentou um aumento de 91,3% em relação à M1 e a relação M3-M1 um aumento de 99,1%. A Tabela 10 apresenta um resumo dessas comparações.

Tabela 10: Comparativo da carga de ruptura entre os modelos

<b>Comparação de Modelos</b>	<b>Aumento no percentual de carga (%)</b>
M3-M1	99,1
M2-M1	91,3
M3-M2	4,1

Ferreira (2017) apresentou resultados para um modelo de consolo moldado nas mesmas condições deste trabalho, com a mesma resistência do concreto, traço, armadura principal e do pilar, porém com o uso de armadura de costura. Assim, pode-se usar o seu modelo de consolo como uma amostra de referência (MR), já que é o tipo de consolo utilizado usualmente: sem fibras de aço e com costura, faltando apenas o uso de estribos verticais. Entretanto, conforme indicam Leonhardt e Mönning (1978) os estribos verticais são inúteis para a transmissão da força ao consolo e controle das fissuras, então pode ser desprezado nesta comparação. A Tabela 11 apresenta as características deste modelo-referência e a carga última observada.

Tabela 11: Características e resultado de ruptura do modelo-referência

Modelo-Referência	Armadura principal (tirante)	Armadura de costura	Porcentagem de fibras de aço (%)	Carga de Ruptura (KN)
MR	3Φ12,5mm	4Φ4,2mm	0	163

Ao comparar M2 e M3 com MR, constatou-se que a substituição total da armadura de costura por fibras de aço elevou a carga de ruptura do consolo, indicando que essa alternativa pode ser satisfatória, diminuindo a taxa elevada de armadura do consolo e aumentando a força última suportada, sendo assim um método alternativo de fabricação. Vale salientar que ensaios complementares com análises de outros parâmetros podem e devem ser feitos a fim de provar essa afirmação. A Tabela 12 mostra a elevação percentual da carga de ruptura no uso das fibras de aço em substituição à armadura de costura.

Tabela 12: Comparativo consolo com fibras x consolo com armadura de costura

<b>Comparação de Modelos</b>	<b>Aumento no percentual de carga (%)</b>
M2-MR	35,0
M3-MR	40,5

#### 4.2.3.2 Panorama de fissurações

A seguir são descritos e ilustrados o panorama de fissuração observado em cada um dos modelos ensaiados, demonstrando o aparecimento da primeira fissura nos consolos.

Em todos os modelos a primeira fissuração observada surgiu na biela de compressão e a carga referente a essa fissura foi anotada. Com o aumento da carga aplicada, a fissura aumentou continuamente até o momento que culminou na ruptura do modelo através da biela.

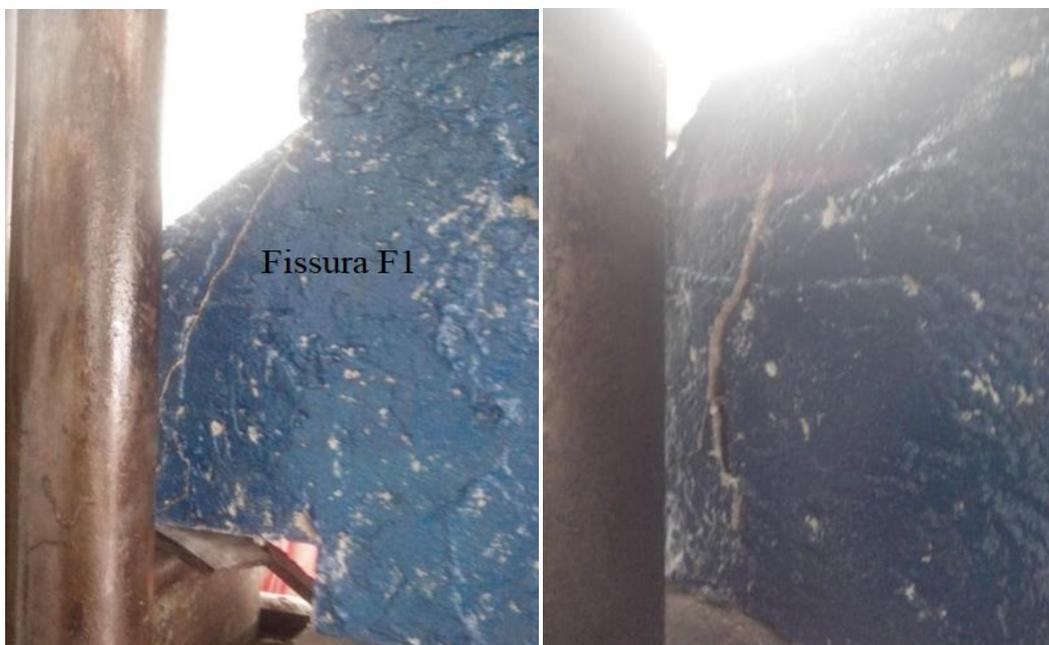
A partir do surgimento das fissuras na região da biela, quase não houve surgimento de novas fissuras. O que ocorreu foi um desenvolvimento e o aumento da abertura já existente. As Figuras 50, 51 e 52 correspondem aos modelos M1, M2 e M3, respectivamente

Figura 50 - Primeira fissura nos consolos 1 e 2 do modelo M1, sem fibras.



Fonte: Autor

Figura 51 - Aparecimento da primeira fissura no modelo M2, denominada F1, no consolo 1, com 0,5% de fibras.



Fonte: Autor

Figura 52 - Aparecimento da primeira fissura no modelo M3, com 1% de fibras, que se desenvolveu até a ruptura.



Fonte: Autor

As cargas de início de fissuração nos modelos estão indicados na Tabela 13. Os modelos M2 e M3 apresentaram fissuração apenas no consolo 1 e o modelo M1 foi o único que apresentou fissuras nos dois consolos, denominadas F1 e F2.

Tabela 13: Resumo das cargas de início de fissuração

<b>Modelo</b>	<b>Fibras de aço no Concreto (%)</b>	<b>Armadura de costura</b>	<b>Consolo-Fissura</b>	<b>Carga de fissuração (KN)</b>
M1	Sem fibra	Sem	C1-F1	90
			C2-F2	96
M2	0,5%	Sem	C1-F1	145
			C2-F2	-
M3	1,0%	Sem	C1-F1	156
			C2-F2	-

Nos modelos M2 e M3, ficou claro que os dois consolos do modelo não fissuraram de forma uniforme, sendo que o consolo 1 apresentou fissuras no canto superior do consolo e fissuração da biela de compressão, diferentemente do consolo 2, que não apresentou fissuras.

O modelo M1 representa o consolo sem fibras e a carga de fissuração (no consolo 1, que foi onde houve a ruptura) foi de 90KN e representa 78% da carga de ruptura

Nos consolos do modelo M2 a primeira fissura foi de 145KN, representando 65,3% da carga de ruptura. Já no modelo M3, o aparecimento da primeira fissura correspondeu a 68,1% da carga de ruptura.

A carga referente ao aparecimento da primeira fissura foi maior à medida que se aumentou a porcentagem de fibras na matriz do concreto, indicando que as fibras agem no controle da abertura de fissuras, como afirma a literatura.

Pode-se observar que no modelo M1 (sem adição de fibra), após o surgimento da primeira fissura, sua abertura se desenvolveu rapidamente devido à concentração de tensões, algo que não ocorreu nos modelos de consolos M2 e M3 (concreto com fibras), que além de aumentar a carga de início de fissuração, fez com que as fissuras se propagassem mais lentamente, dando indícios que as fibras de aço funcionam como uma costura ao consolo, aumentando sua ductilidade.

## CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Conclusões

A pesquisa consistiu em estudar a substituição completa da armadura de costura pela adição de fibras de aço na matriz de concreto, além de analisar a influência das fibras nos consolos em termos de redução de fissurações e aumento de carga última.

A partir dos resultados obtidos, alguns critérios puderam ser avaliados, chegando-se assim às seguintes conclusões:

- Há uma tendência no aumento da ductilidade do concreto com fibras metálicas, pois o modelo sem fibras caracterizou um material mais frágil, com aberturas de fissuras mais rápidas e que se propagam com maior velocidade.
- Os resultados mostram a eficiência do uso das fibras, onde quanto maior o seu percentual na matriz do concreto, maior a carga que causará a ruptura do consolo. Os modelos com 0,5% e 1% de fibras apresentaram um aumento de 91% e 99% da carga última, respectivamente, em comparação com o modelo sem o uso de fibras, respectivamente.
- O uso de fibras também eleva a carga de início de fissuração. O modelo M3, com 1% de fibras, por exemplo, aumentou em 73,3% a carga referente à primeira abertura de fissura em comparação com o modelo sem uso de fibras de aço.
- A substituição completa da armadura de costura por fibras de aço pode ser uma alternativa viável, constituindo assim um método alternativo de fabricação. Um consolo com 1% de fibras de aço na matriz do concreto em comparação a outro com armadura de costura e sem fibras eleva em 40,5% a força última do modelo. Tendo em vista que a produção de consolos enfrenta problemas geralmente devido à necessidade de uma alta taxa de armadura num curto espaço, a

inovação produtiva na utilização de fibras metálicas pode contribuir para a economia de material e, conseqüentemente, aumento de produção.

- Apesar da armadura de costura ser obrigatória em consolos curtos, em termos técnicos pode-se comprovar que a proposta de substituição total dessa armadura por fibras de aço se mostrou bastante eficiente diante dos resultados expostos.
- Os resultados podem, de certa forma, terem sido influenciados pela má graduação da brita.
- A carga de ruptura dos consolos pode ter sido afetada devido ao ensaio ter ocorrido aos 22 dias ao invés de 28 dias, diminuindo assim a força última suportada.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Os estudos realizados evidenciaram a importância do estudo de consolos com adição de fibra, porém é necessária a realização de outros estudos. A seguir são apresentadas sugestões para futuras pesquisas:

- Realizar uma maior variação de proporção de fibras nos modelos;
- Fazer ensaios variando a proporção  $a/d$ , por exemplo, o estudo em consolos muito curtos ( $a/d < 0,5$ ), analisando o comportamento na adição de fibras com substituição total ou parcial da armadura de costura;
- Uma proposta de substituição da armadura de costura por outros tipos de fibras, que possam trazer economia na produção dos consolos;
- Realizar pesquisas com ensaios a partir de cimento não pozolânico;
- Realizar os mesmos ensaios, porém para consolos não monolíticos e verificar a influência da adição de fibras, comparando com resultados em consolos monolíticos;

- Análise da influência da adição de fibras em consolos de concreto armado de alta resistência.

## REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014, 256 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062:** Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT. **Agregados – Determinação da composição granulométrica** – Especificações. NBR 7217:1987, ABNT, Rio de Janeiro, 1987.

ABNT. **Fibras de aço para concreto** – Especificações. NBR 15530:07, ABNT, Rio de Janeiro, 2007.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062:** Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado. Rio de Janeiro, 2006.

BARROS, F.C.G.M. de; et al. Avaliação de dispositivos de aderência em consolos curtos não monolíticos. Anais do 52º Congresso Brasileiro de Concreto, IBRACON, Outubro de 2010.

BEZERRA, L.M. **Propostas e estudo experimental de ligações entre pilares mistos preenchidos e vigas pré-moldadas de concreto por meio de consolo metálico.** Anais do 52º Congresso Brasileiro de Concreto, IBRACON, Outubro de 2010.

CAMPIONE, G., LA MENDOLA, L., PAPIA, M. Flexural behavior of concrete corbels containing steel fibers or wrapped with FRP sheets. **Materials and Structures**. Itália, v. 38, p. 617-625, 2005.

COSTA, J. B. A. **Estudo experimental de consolos de concreto com fibras moldados em etapas distintas dos pilares.** 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

EL DEBS, M. K. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. São Carlos: EESC\_USP, 2000.

FIGUEIREDO, A.D. Concreto Com Fibras. In: **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: Ed. G. C. ISAIA, IBRACON, 2005.

FIGUEIREDO, A.D. Concreto Com Fibras. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2011.

FRANZ, G.; NIEDENHOFF, H. (1963). Die Bewehrung Von Konsolen and gedrunenen Balken. Beton-und Stahibetonbau, v.58, n.5, p. 112-120.

GARCEZ, E.O. **Análise teórico-experimental do comportamento de concretos reforçados com fibras de aço submetidos a cargas de impacto**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Rio Grande de Sul, 2005.

FERREIRA, J.G. Estudo da adição de fibras de aço ao concreto para redução da taxa de armadura de consolos curtos. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Campina Grande, 2017.

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

LUIZETTO, E.C.; GRANDO, F. **Estudo das soluções empregadas em consolos curtos monolíticos de pilares pré-moldados na região de pato branco – PR**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Pato Branco, 2013.

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

NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

OLIVEIRA, Edilene Muniz de. Consolos de concreto moldados em duas etapas: influência do tratamento da interface e da adição de fibras de aço. Goiás, 2012.

OLIVEIRA JÚNIOR, L. A. et al. Influência das fibras de aço e das adições minerais na fissuração de tirantes de concreto armado. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 2, n. 2, p. 142-165, jun. 2009.

PASA, V.F. **Análise do comportamento de estruturas de concreto reforçado com fibras de aço via método dos elementos finitos.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Rio Grande de Sul, 2007.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. CONCRETO, Microestrutura, Propriedades e Materiais. Edição N.P. Hasparyk. 1.ed. São Paulo, IBRACON, 2008.

PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE – PCI. **PCI Design Handbook.** 6th Edition, 736 p., 2010.

SIMPLÍCIO, M A. de S. Estudos sobre a aderência entre barras de aço e concreto reforçado com fibras. Recife: O autor, 2008. 261 pg.

SOARES, A.M.M.; HANAI, J.B. de. **Análise estrutural de pórticos planos de elementos pré-fabricados de concreto considerando a deformabilidade das ligações.** Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, n. 17, p. 29-57, 2001.

TORRES, Fernando Montenegro. Análise teórico-experimental de consolos de concreto armado. São Carlos, 1998.

