



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS CAMPINA GRANDE - PB

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE CONSOLOS CURTOS DE CONCRETO
REFORÇADO COM FIBRA DE AÇO**

Josyverton Gomes Ferreira

CAMPINA GRANDE – PB

2017

JOSYVERTON GOMES FERREIRA

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE CONSOLOS CURTOS DE CONCRETO
REFORÇADO COM FIBRA DE AÇO

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

JOSYVERTON GOMES FERREIRA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE CONSOLOS CURTOS DE CONCRETO
REFORÇADO COM FIBRA DE AÇO**

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 do Prof. Dr. Marcos Antônio De Souza Simplício.

TCC defendido e aprovado em: ____/____ de 2017.

BANCA EXAMINADORA

(Assinatura): _____

Prof. Dr. Marcos Antônio De Souza Simplício

(Orientador)

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura): _____

Prof. Dr. José Bezerra da Silva

(Examinador Interno)

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura): _____

Prof. Marinaldo dos Santos Júnior

(Examinador Externo)

Universidade Estadual da Paraíba – UEPB

AGRADECIMENTOS

À Deus, por tudo que ele me proporcionou para chegar até aqui, me dando forças em todas as situações.

Ao meu pai, José, pelos ensinamentos, por todo apoio e inspirações a cada dia.

A minha mãe, Eliene, pelos ensinamentos, por todo apoio e orações a mim destinadas.

A minha irmã Jysllayny que mesmo distante sempre torceu pela minha vitória.

A minha namorada Adália, por todo o companheirismo, ajuda e paciência em momentos difíceis, desde o início dessa jornada. Te amo!

A toda minha família que sempre quis a minha vitória e torceu muito por esse momento, em especial a minha vó Lindalva e minha Tia Ednalva.

Aos amigos conquistados na UFCG, pelos momentos difíceis que passamos juntos e na conquista que hoje se torna real, em especial ao amigo Willian.

Aos meus amigos que estiveram comigo nessa jornada longa, João, Arthur, Kletônio, Danilo, em especial a minha prima Joelma, vocês foram parte importantíssima nisso.

A meu orientador, Dr. Marcos Simplício, por ter aceitado a me orientar. Pelo empenho, paciência no período de orientação, pela ajuda e conhecimentos transmitidos ao longo dessa jornada. Muito obrigado!

Ao técnico do Laboratório de Engenharia de Estruturas, Edvaldo, pela ajuda sempre que precisei.

A todos os professores do curso de Engenharia civil pelo empenho em transmitir o conhecimento, vocês foram grandes mestres. Em especial aos professores Macel e Laércio que foram meus orientadores de monitoria e a professora Lêda pelas oportunidades dadas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Armadura típica de consolo	15
Figura 2: Ensaio Slump test.....	17
Figura 3: Alguns tipos de fibras de aço	19
Figura 4: Fibras longas e curtas com várias relações L/D.....	20
Figura 5: Esquema de concentração de tensões para um concreto sem (a) e com reforço de fibras (b).....	21
Figura 6: Curva tensão de tração x deformação para vários percentuais de fibra	22
Figura 7: Curva Carga x flecha e desenvolvimento de tensões normais	23
Figura 8: Galpão industrial	24
Figura 9: Exemplo de consolo no pilar para apoio de viga	25
Figura 10: Aplicação de força em consolos.....	25
Figura 11: Tipos de carregamento	26
Figura 12: Ruptura por flexão	28
Figura 13: Ruptura por fendilhamento da biela de concreto	29
Figura 14: Ruptura por cisalhamento	29
Figura 15: Ruptura por falta de ancoragem	30
Figura 16: Ruptura devida à ação horizontal	30
Figura 17: Ruptura por esmagamento local	31
Figura 18: Trajetórias de tensão em consolos.....	32
Figura 19: Treliça simples idealizada para o comportamento estrutural do consolo.....	33
Figura 20: Análise estrutural de consolo	34
Figura 21: Armadura de consolos proposta pela norma.....	35
Figura 22: Carregamento direto e indireto.....	37
Figura 23: Modelo de atrito-cisalhamento.....	38
Figura 24: Detalhe da armadura de costura de acordo com a NBR 9062/2006.....	40
Figura 25: Fluxograma das atividades realizadas na pesquisa	42
Figura 26: Características das fibras.....	43
Figura 27: Dimensões adotadas para os modelos experimentais	44
Figura 28: Fôrma padrão dos consolos.....	44
Figura 29: Detalhe das armaduras do modelo 1 (M1).....	45
Figura 30: Detalhe das armaduras dos modelos 2 (M2) e 3 (M3).....	46
Figura 31: Armadura dos consolos.....	46
Figura 32: Peneiramento e série normal de peneiras	47
Figura 33: Amostras para o ensaio de granulometria	48
Figura 34: Detalhe do equipamento.....	49
Figura 35: Detalhe do equipamento.....	50
Figura 36: Passo 1 - Armadura montada e fôrmas.....	51
Figura 37: Passo 2 - Aplicação do desmoldante e posicionamento da armadura	51
Figura 38: Passo 3 - Determinação do slump test.....	52
Figura 39: Passo 4 - Concretagem dos modelos	52
Figura 40: Adição das fibras ao concreto	53
Figura 41: Posicionamento do modelo	54
Figura 42: Esquema do ensaio.....	54

Figura 43: Granulometria dos agregados.....	55
Figura 44: Ruptura dos corpos de prova.....	56
Figura 45: Ruptura das amostras	57
Figura 46: Ruptura do modelo 1.....	58
Figura 47: Ruptura do modelo 2.....	58
Figura 48: Ruptura do modelo 3.....	58
Figura 49: Cargas últimas	59
Figura 50: Primeira (F1) e segunda (F2) fissuras do modelo M1	60
Figura 51: Primeira (F1) e segunda (F2) fissuras do modelo M2	60
Figura 52: Primeira (F1) e segunda (F2) fissuras do modelo M3	61
Figura 53: Panorama de progressão de fissuras do modelo M1	61
Figura 54: Panorama de progressão de fissuras do modelo M3	62
Figura 55: Gráfico carga x fissura	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Coeficientes do modelo atrito-cisalhamento recomendados pelo PCI (2010).....	39
Tabela 2: Consumo de material em kg/m ³ de concreto.....	42
Tabela 3: Características das fibras usadas.....	43
Tabela 4: Resumo das armaduras dos modelos.....	47
Tabela 5: Série normal de peneiras pela NBR 7217/1987.....	48
Tabela 6: Cronograma de concretagem.....	53
Tabela 7: Características dos agregados.....	55
Tabela 8: Resultados de Compressão Simples.....	56
Tabela 9: Resultados de Resistência à Tração do aço.....	57
Tabela 10: Comparativo entre os modelos ensaiados.....	59
Tabela 11: Resumo das cargas de início de fissuração.....	63
Tabela 12: Comparativo entre os modelos ensaiados.....	63

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 a aplicação da carga
h	altura do consolo
Vd	força vertical de cálculo
Hd	força horizontal de cálculo
b	base do pilar
f _{yd}	resistência de cálculo ao escoamento do aço
f _{cd}	resistência de cálculo à compressão do concreto

RESUMO

Um dos problemas recorrentes na execução da pré-moldagem de estruturas é a necessidade das ligações entre os elementos com objetivo de garantir estabilidade e uma boa distribuição de esforços. O consolo é amplamente utilizado em estruturas pré-moldadas, pois serve como elemento de ligação entre dois componentes tais como viga-pilar. Apesar da eficiência na distribuição dos esforços, os consolos apresentam a dificuldade de concretagem no processo de pré-moldagem devido à grande taxa de armadura necessária em pouco espaço. Além da armadura do tirante principal, geralmente se utilizam estribos verticais e horizontais (Armadura de costura). Diante disto, esse trabalho surge com objetivo de estudar a influência da adição de fibras de aço ao concreto convencional utilizado na moldagem de consolos curtos visando a diminuição da armadura de costura e melhoria da característica frágil do concreto. A fase experimental foi dividida em duas (2) etapas: Ensaio de caracterização do material e ensaios mecânicos (Resistência à compressão simples, resistência à tração e ensaio destrutivo dos modelos). Foram ensaiados três modelos de consolos em que dois deles moldados sem incorporação de fibra sendo um com metade da armadura de costura ($A_{s,cost}$) e o outro com o $A_{s,cost}$ total proposta pela NBR 9062/2006, e o terceiro com metade do armadura de costura e adição de 0,5% de fibra de aço. De modo geral essa pesquisa mostrou que a adição de fibras de aço ao concreto promoveu incrementos na capacidade de carga de consolos aumentando a carga última e a carga de início de fissuração do modelo ensaiado.

Palavras-chave: *consolos, armadura de costura, fibra de aço.*

ABSTRACT

One of the recurring problems in the implementation of the pre-molding of the structures is the need of the connections between the elements with the aim of ensuring stability and a good distribution of efforts. The corbels is widely used in pre-molded, in that it serves as a connecting element between two components such as beam-pillar. In spite of the efficiency in the distribution of efforts, the consolation presents the difficulty of concreting in the process of pre-molding due to the large amount of armor required in little space. In addition to the main strut armature, generally if they use stirrups in vertical and horizontal (Armor of sewing). Consequently, this work arises with the aim to study the influence of addition of steel fiber to the concrete in the conventional used in the molding of corbels short, aiming at reducing the armor's seam and the improvement of the characteristic of a fragile concrete. The experimental phase was divided into two (2) steps: Tests for material characterization and mechanical tests (Resistance to compression simple tensile strength testing and destructive of the models). Have been tested three models of corbels being two of them molded without incorporation of fiber one with half the armor of the seam ($A_s, cost$) and the other with the $A_s, cost$ total proposed by the NBR 9062/2006, and the third with half of the armor stitching and addition of 0.5% steel fibre. In general this research showed that the addition of steel fiber to the concrete promoted increments in the load capacity of corbels increasing the load of break and the Beginning of cracking of the model tested.

Key-words: corbels, Sewing armor, steel fiber.

Sumário

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	14
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	14
1.2. OBJETIVOS.....	16
1.2.1. OBJETIVO GERAL.....	16
1.2.2. OBJETIVO GERAL.....	16
CAPÍTULO II - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1. CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO.....	17
2.2. CONCRETO COM FIBRA DE AÇO	18
2.2.1. TIPOS DE FIBRAS DE AÇO	19
2.2.2. INTERAÇÃO FIBRA-MATRIZ.....	20
2.2.3. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	21
2.2.4. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	21
2.2.5. COMPORTAMENTO À FLEXÃO.....	22
2.2.6. FLUÊNCIA E RETRAÇÃO.....	23
2.3. PRÉ-MOLDADOS.....	24
2.4. CONSOLOS.....	25
2.5. CONSOLOS DE CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO	27
2.6. FORMAS DE RUPTURAS EM CONSOLOS	28
2.6.1. RUPTURA POR FLEXÃO	28
2.6.2. RUPTURA POR FENDILHAMENTO DA BIELA DE CONCRETO.....	28
2.6.3. RUPTURA POR CISALHAMENTO.....	29
2.6.4. RUPTURA POR FALTA DE ANCORAGEM	29
2.6.5. RUPTURA DEVIDA À AÇÃO HORIZONTAL	30
2.6.6. RUPTURA POR ESMAGAMENTO LOCAL	30
2.7. DESEMPENHO ESTRUTURAL DE CONSOLOS CURTOS	31
2.8. MODELOS DE DIMENSIONAMENTO DE CONSOLOS.....	33
2.8.1. MODELO BIELA-TIRANTE	33
2.8.2. MODELO ATRITO-CISALHAMENTO	37
2.9. ARMADURA DE COSTURA	40
CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1. MATERIAIS	42
3.1.1. CONCRETO DOS MODELOS.....	42

3.1.2.	MODELOS EXPERIMENTAIS DOS CONSOLOS CURTOS	43
3.2.	METODOLOGIA	47
3.2.1.	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	47
3.2.2.	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	48
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSÕES		55
4.1.	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	55
4.2.	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.....	56
4.2.1.	CONCRETO	56
4.2.2.	AÇO	57
4.2.3.	CONSOLOS.....	57
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES		65
CAPÍTULO VI - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS		66
CAPÍTULO VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		67

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O setor da construção civil corresponde com um dos índices mais elevados de desperdício de recursos pelo fato de a mão-de-obra ser determinante na qualidade do produto final e por muitas vezes, na realidade dos canteiros de obra, ser desqualificada e sem conhecimento. Devido a isto, surge a necessidade de buscar alternativas que visem o desenvolvimento de tais processos construtivos, aliados a um controle de qualidade que promova a melhoria contínua destes processos.

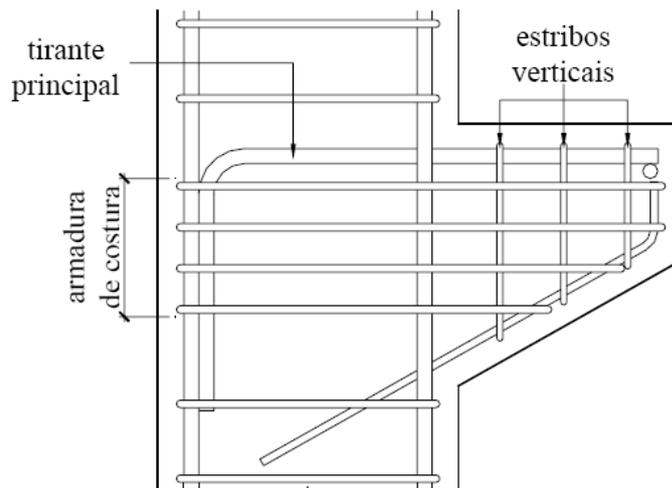
Do ponto de vista das estruturas das edificações, a melhoria nos processos e a sua industrialização podem ser alcançadas com o emprego de elementos pré-fabricados de concreto. Tal técnica, se bem aplicada, apresenta uma série de vantagens como a redução do desperdício de materiais durante a produção, o melhor controle de qualidade das peças estruturais, a rapidez na montagem da estrutura em obra e a mecanização e padronização do processo de produção. O maior controle de qualidade utilizado na confecção das peças de concreto em fábricas, quando comparadas às estruturas moldadas no local, faz com que as primeiras apresentem, nitidamente, maior durabilidade.

Entretanto, a necessidade de ligações entre os elementos implica em dificuldades no processo de pré-moldagem, pois elas são os pontos mais importantes dessas estruturas, servindo não só na distribuição de esforços na estrutura como também em sua estabilidade. Diante de sua notável relevância as ligações são objetos de inúmeras pesquisas na área do concreto pré-moldado.

Os consolos servem como elemento de ligação entre: viga-pilar, viga-viga, laje-viga, laje-pilar e laje-parede, e por isso são muito utilizados na indústria de pré-moldados. Estes funcionam como elementos em balanço que se projetam das laterais de pilares, vigas e paredes e dá suporte para equipamentos tais como pontes rolantes, ou então, como apoio para outros elementos estruturais, principalmente em edifícios que necessitam de juntas de dilatação.

Tais peças representam trechos de singularidade, devido ao seu balanço ser bastante curto, para os quais não vale a teoria da flexão, evidenciando a necessidade de um método de cálculo específico. A Figura 1 representa o arranjo usual de armadura de um consolo.

Figura 1: Armadura típica de consolo



Fonte: Adaptado de El Debs (2000).

A armadura do consolo é composta de um tirante principal, com diâmetros e espaçamentos calculados por equações apresentadas na literatura. Além dela normalmente utilizam-se também estribos verticais e horizontais (armadura de costura). Leonhardt & Monning (1978, *apud* COSTA, 2009) afirmam que os estribos verticais são inúteis para a transmissão da força ao consolo e servem apenas para enrijecer a armadura.

Os estribos horizontais conhecidos como armadura de costura, abaixo da armadura do tirante tracionado, são distribuídos ao longo da altura útil do consolo e tem a finalidade de “costurar” as fissuras da interface consolo-pilar. Além disso essa armadura proporciona um aumento da capacidade resistente das bielas de compressão quando dispostos com pequeno espaçamento, além de melhorar o comportamento do consolo quanto à ductilidade.

O elemento consolo é utilizado com grande repetição em estruturas pré-moldadas. A produção industrial deste elemento, todavia, apresenta dificuldades devido à grande quantidade de armadura em um espaço pequeno (BASTOS, 2000). Diante disto, apresenta-se a possibilidade de adição de fibras metálicas a matriz de concreto com o objetivo de melhorar as características de fragilidade, suscetibilidade a fissurações e ruptura do concreto bem como redução da taxa de armadura do consolo.

As fibras de aço proporcionam um aumento na tenacidade das estruturas de concreto, melhorando sua resistência ao impacto e à fadiga, contribuindo para o aumento da durabilidade dessas estruturas, pois tais fibras possuem um alto módulo de elasticidade, elevada resistência à tração e ductilidade. Diante da grande quantidade de

armadura necessária para garantir o bom desempenho dos consolos, surge como proposta a substituição de parte da armadura de costura utilizando a adição de fibras metálicas.

Esse trabalho tem como foco o estudo de consolos como elemento de ligação entre pilar e viga, evidenciando uma das maneiras de redução da armadura dos consolos através da utilização de uma armadura difusa no concreto com a adição de fibras de aço a sua matriz.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo desse trabalho é avaliar a influência do uso de fibras de aço na matriz de concreto empregados na moldagem de consolos curtos como forma de redução da armadura de costura proposta pela norma NBR 9062/2006.

1.2.2 OBJETIVO GERAL

- Avaliar o comportamento estrutural de consolos de concreto com adição de fibras metálicas;
- Avaliar a influência da armadura de costura em consolos curtos;
- Comparar a carga de ruína e de início de fissuração dos consolos com adição de fibras às cargas obtidas em consolos sem fibra;
- Avaliar a redução da armadura de costura dos consolos a partir da utilização de fibras de aço na matriz do concreto.

CAPÍTULO II - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

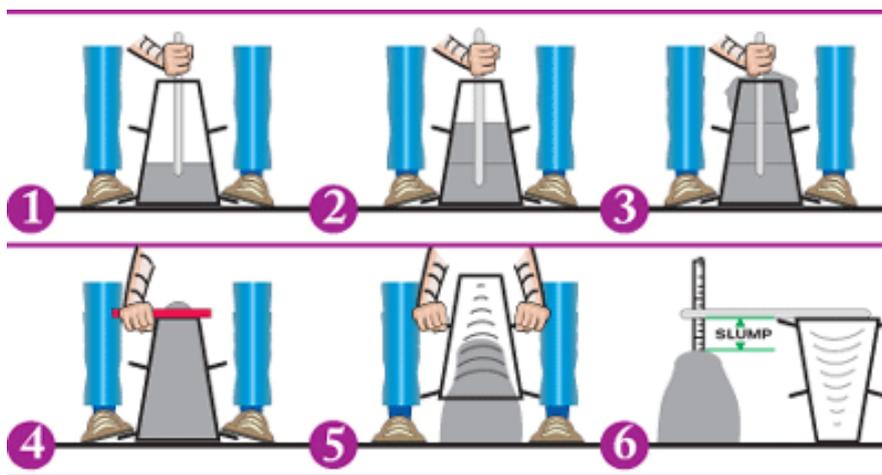
2.1. CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO

O concreto é um dos materiais mais utilizados no Brasil e no mundo nos últimos anos, pois possui vantagens como economia em relação aos outros materiais estruturais. Permite as mais variadas concepções arquitetônicas, apresenta alta durabilidade e facilidade de execução. O concreto apresenta características de um material frágil, ou seja, com pouco ou nenhum escoamento. É obtido a partir de uma mistura de cimento, água, agregados finos e graúdos e, em alguns casos, são utilizados aditivos.

Segundo Recena (2011, *apud* GRANDO, 2014) um fator importante na produção de concreto é a sua dosagem. Esse processo consiste na escolha dos materiais determinando a melhor proporção entre cimento, agregados, aditivos e água, de modo que o produto dessa mistura atenda a determinados requisitos físicos, químicos e mecânicos, ao menor custo possível. O concreto apresenta dois estados aos quais se pode destacar: estado fresco e endurecido.

Diante das propriedades do concreto fresco pode-se citar a consistência, trabalhabilidade e homogeneidade. A consistência é a relativa mobilidade ou facilidade de escoamento do concreto. O ensaio que permite determinar essa característica é o Slump test (figura 2), que consiste em encher um cone, com dimensões padronizadas, em 3 partes, aplicando 25 golpes em cada camada. Após o preenchimento, faz-se o arrasamento e retira-se o cone, medindo a diferença entre a cota do topo do concreto deformado e o cone. Quanto maior for o slump determinado menor será a consistência do concreto, indicando um concreto fluido e fácil de ser adensado, caracterizando uma boa trabalhabilidade.

Figura 2: Ensaio Slump test



Fonte: The constructor, 2017.

Outra característica que merece destaque é a homogeneidade. Trata-se da uniformidade da distribuição dos agregados graúdos dentro da mistura. De acordo com Carvalho (2013) quanto mais homogêneo for o concreto melhor será sua qualidade, pois irá diminuir a permeabilidade e conseqüentemente proporcionará uma maior proteção à armadura.

Por fim, temos a trabalhabilidade que consiste nas características e condições que o concreto possui para ser adequadamente misturado, transportado, lançado e adensado de maneira fácil e sem perda de homogeneidade, obtendo um concreto com um mínimo de vazios.

Segundo Carvalho (2013) as características importantes para o concreto endurecido são as mecânicas. Dentre estas, destaca-se a resistência à compressão, que é função do tempo de duração da solitação, da idade do concreto, do tempo de cura, propriedades dos agregados, entre outros fatores. A resistência à compressão é obtida a partir do ensaio de compressão centrada. O ensaio consiste em moldar um corpo de prova (CP) cilíndrico de dimensões padronizadas, preenchendo o cilindro em duas camadas de 12 golpes para cada camada. Deve ser feita a cura úmida do CP dentro de um tanque com água até o rompimento. De acordo com a NBR 5738/2003, deverá ser 28 dias após a moldagem.

2.2. CONCRETO COM FIBRA DE AÇO

Materiais constituídos de no mínimo duas fases distintas principais podem ser definidos como compósitos (FIGUEIREDO, 2005 *apud* SIMPLÍCIO, 2008). Diante disto o concreto com fibras é considerado um compósito, se considerarmos como fases o concreto (matriz) e as fibras.

Desde a antiguidade a técnica de reforçar o concreto armado com fibras é utilizada, e se baseia na ideia de aumentar a resistência à tração do concreto. Dessa forma, as tensões de tração são absorvidas de maneira mais distribuída por todo o material, em auxílio às barras de aço da armadura.

As fibras são elementos descontínuos, cujo comprimento é bem maior que a maior dimensão da seção transversal. As fibras destinadas ao reforço do concreto são atualmente chamadas de maneira genérica como macro-fibras e podem ser de aço, poliméricas ou vegetais.

2.2.1. TIPOS DE FIBRAS DE AÇO

O Brasil já conta com a norma de especificação para as fibras de aço - ABNT NBR 15530 (2007) - que traz várias contribuições como a determinação de uma tipologia e classificação de fibras de aço (FIGUEIREDO, 2008). São previstos na norma três tipos básicos de fibras em função de sua conformação geométrica:

- Tipo A: fibra de aço com ancoragens nas extremidades;
- Tipo B: fibra de aço corrugada;
- Tipo C: fibra de aço reta.

Entretanto, esta configuração geométrica, associada a cada um dos tipos de fibras de aço não contempla o formato da seção transversal, mas somente o perfil longitudinal da fibra. Com isso, além dos tipos, a especificação brasileira prevê três classes de fibras, as quais foram associadas ao tipo de aço que deu origem às mesmas:

- 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.

No que diz respeito à geometria das fibras, atualmente existem várias formas: com seção circular, retangular ou onduladas como pode ser visto na figura 3.

Figura 3: Alguns tipos de fibras de aço

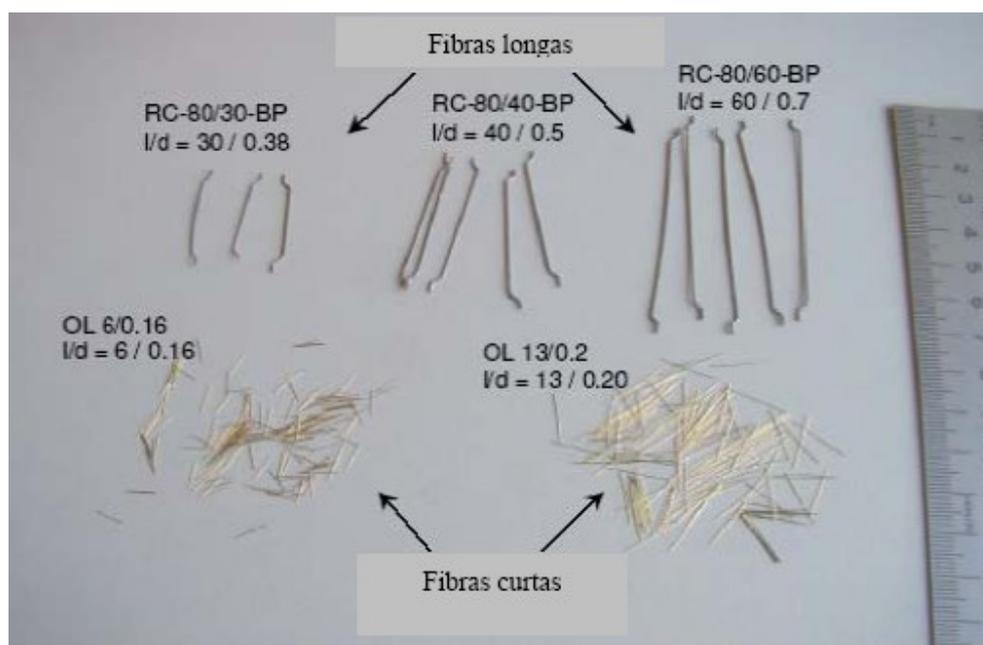


Fonte: WEILER, 1996.

De acordo com Simplício (2008) o tipo de aço geralmente utilizado na fabricação das fibras é o aço carbono, sendo também, o aço liga bastante utilizado para fibras resistentes à corrosão em estruturas refratárias ou marítimas. Lopes (2005) afirma que as fibras de aço possuem tensão de tração entre 300 a 2100 MPa, módulo de elasticidade de 200 a 210 GPa e deformação na ruptura de 0,5% a 3,5%.

As fibras de aço podem também ser classificadas de acordo com seu comprimento em curtas e longas bem como entre a relação entre o seu comprimento e o diâmetro (L/D), como ilustra a figura 4.

Figura 4: Fibras longas e curtas com várias relações L/D



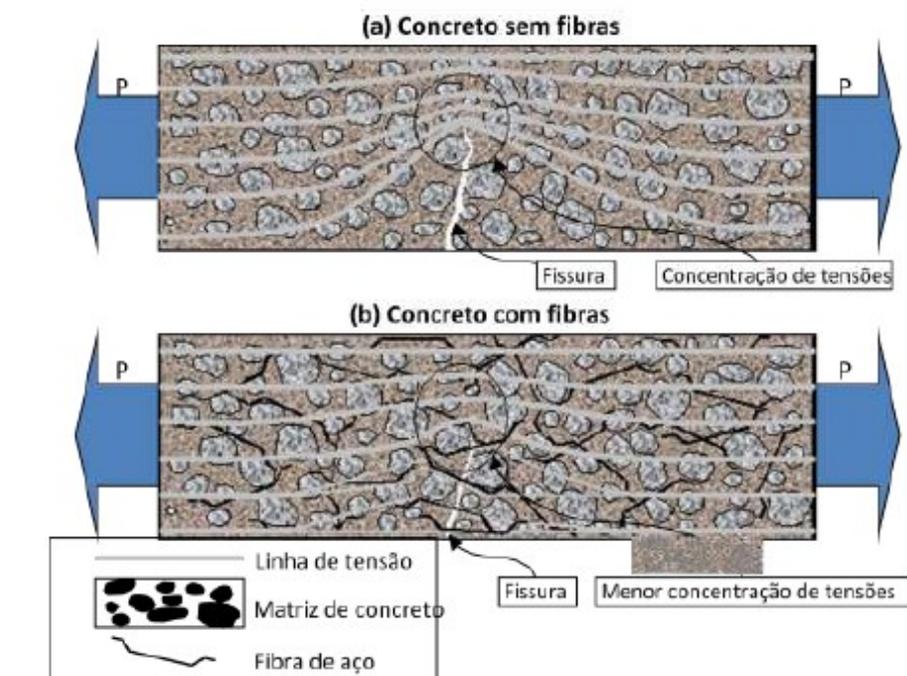
Fonte: BEKAERT, 2017.

2.2.2. INTERAÇÃO FIBRA-MATRIZ

Quando uma peça de concreto é submetida a tensões de tração, microfissuras, que são fissuras cujo comprimento pode ser considerado pequeno em relação ao tamanho da estrutura, inicialmente surgem distribuídas ao longo do seu volume (ROSSI, 2001, *apud* SIMPLICIO, 2008). Essas fissuras provocam um desvio das linhas de tensão implicando numa concentração de tensões em suas extremidades e no caso dessa tensão superar o valor da tensão crítica, ocorrerá a ruptura abrupta do material, como pode ser visto na figura 5. A cada ciclo de desvio de tensões ocorre uma propagação das microfissuras e, conseqüentemente, um aumento progressivo na concentração de tensões em sua extremidade até que ocorra a ruptura completa do material, caracterizando um comportamento tipicamente frágil.

A adição de fibras de resistência e módulo de elasticidade adequados e num teor apropriado proporciona uma maior ductilidade ao concreto. Isso ocorre, pois a fibra serve como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, caracterizando uma forma de costura das microfissuras retardando o seu progresso, proporcionando ao compósito uma maior capacidade de carga ao nível da estrutura. Para atuar dessa forma, as fibras devem ser em pequenos diâmetros e longas, de forma a ter ancoragem na matriz. A dosagem da fibra deve ser tal que atenda às necessidades, porém sem comprometer a trabalhabilidade da mistura. A figura 5 ilustra o funcionamento das fibras.

Figura 5: Esquema de concentração de tensões para um concreto sem (a) e com reforço de fibras (b)



Fonte: FIGUEIREDO, 2000.

2.2.3. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os estudos feitos sobre a adição de fibras ao concreto em que a resistência à compressão era avaliada são bastante controversos, alguns trabalhos apontam uma redução nos valores obtidos para a resistência à compressão devida a uma compactação mal executada, por outro lado, o ACI 544.1R (2004, *apud* SIMPLICIO, 2008) indica haver um ganho de até 15% de resistência a compressão para percentuais de fibra de 1,5%.

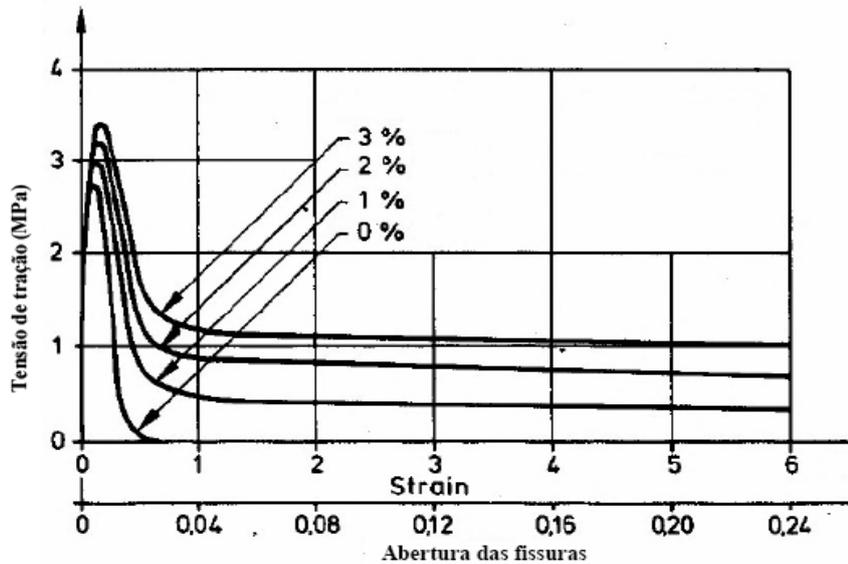
Entretanto, o objetivo da adição de fibras ao concreto não é alterar a resistência a compressão do mesmo já que a função delas é atuar como pontes de transferência de tensões sejam essas causadas por esforços de tração ou cisalhamento, fazendo com que o concreto apresente também um ganho quanto à tenacidade.

2.2.4. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Na tração direta há relatos de aumento de 30% a 40% para adições de até 1,5% de fibra, sendo um ganho de resistência considerável. Apesar deste acréscimo, 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 6. Outro fator importante, além da quantidade de fibras, é quanto maior a relação entre comprimento l e o diâmetro equivalente d da fibra, mais eficiente será o reforço promovido.

Figura 6: Curva tensão de tração x deformação para vários percentuais de fibra



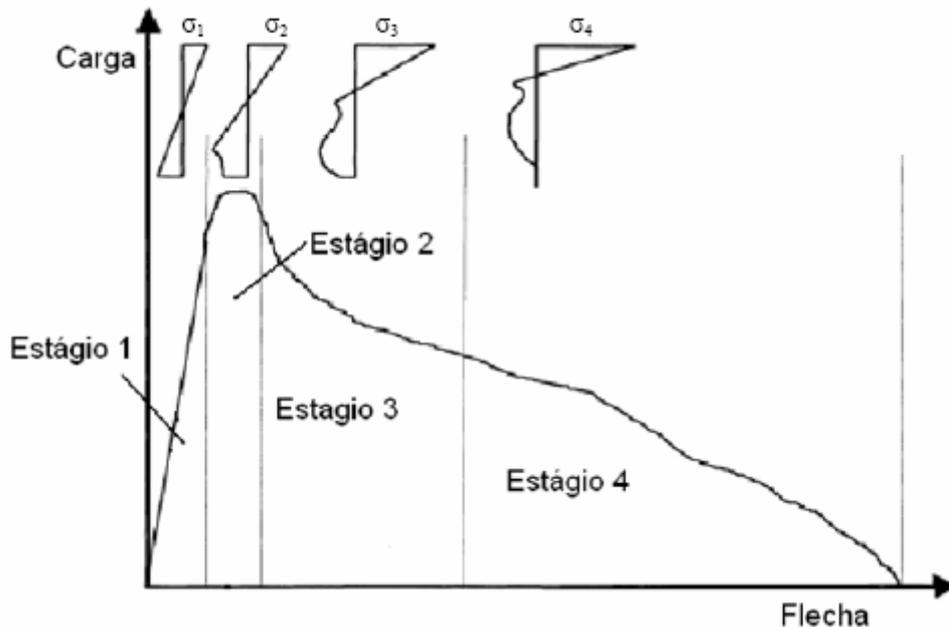
Fonte: MARKOVIC, 2006.

2.2.5. 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). De acordo com Bentur e Mindess (1990, *apud* SIMPLICIO, 2008) o volume de fibras e o fator de forma (relação l/d da fibra) são as principais características que têm influência na melhoria da resistência à flexão.

A figura 7 apresenta o comportamento de uma viga de concreto reforçado com fibra submetida à flexão dividido em 4 estágios.

Figura 7: Curva Carga x flecha e desenvolvimento de tensões normais



Fonte: ROBINS ET AL, 2001.

No estágio 1, em que as cargas são pequenas, o concreto mostra-se sem fissurações e com comportamento estrutural elástico-linear. 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. Porém, 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.

Ocorrendo isso, as microfissuras 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).

2.2.6. FLUÊNCIA E RETRAÇÃO

De acordo com Lopes (2005) há uma falta de consenso entre os pesquisadores a respeito da influência das fibras de aço na fluência e retração, indicando a necessidade de maiores pesquisas sobre esses assuntos.

As fibras com ancoragem podem reduzir a retração livre do concreto em cerca de 40% afirma Mangat e Azari (1988, *apud* SIMPLÍCIO, 2008)

2.3. PRÉ-MOLDADOS

Os elementos estruturais em concreto pré-moldado tornaram-se uma ferramenta cada vez mais utilizada em edifícios comerciais, galpões, indústrias e construções em residências tanto no Brasil como no mundo todo, como pode ser visto na figura 8. Tais elementos são executados industrialmente com realização de inspeção em todos os processos de produção, controle tecnológico e ensaios que atestam a qualidade da peça produzida.

Figura 8: Galpão industrial



Fonte: Construtora cajamar

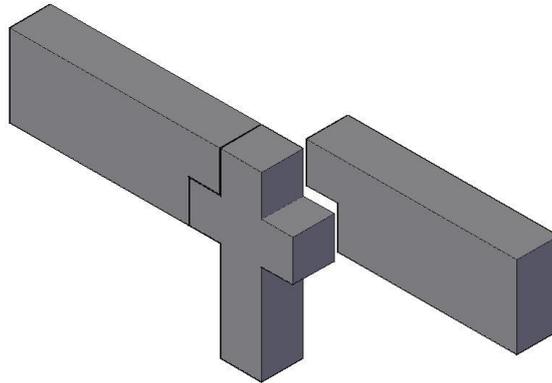
Segundo a NBR 9062/2006 – Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado – a definição de estrutura pré-fabricada é a seguinte: “O elemento pré-moldado executado industrialmente, em instalações permanentes de empresa destinada para este fim, que se enquadram e atendem aos requisitos mínimos das especificações” (NBR 9062, 2006, pg. 4).

Uma característica importante das estruturas de concreto pré-fabricado é a possibilidade de ser dividida em elementos. Essa divisão se faz necessária para a realização das ligações, obtendo assim a configuração final da estrutura de acordo com Ebeling (2006).

Um dos mais usuais elementos de ligação é o consolo que funciona como elemento em balanço, projetado de pilares e paredes, para apoio de outros elementos como lajes e vigas, por exemplo. Albarran (1998, *apud* SILVA, 2008), relata que, no caso de consolos de concreto armado, ao ser montados, deve-se garantir um apoio mínimo para a viga, a fim de evitar o risco de ruptura ou de queda da própria viga

durante a sua colocação. Após a montagem dos elementos, os nichos são preenchidos com graute. A figura 9 ilustra a ligação pilar-viga através do consolo.

Figura 9: Exemplo de consolo no pilar para apoio de viga

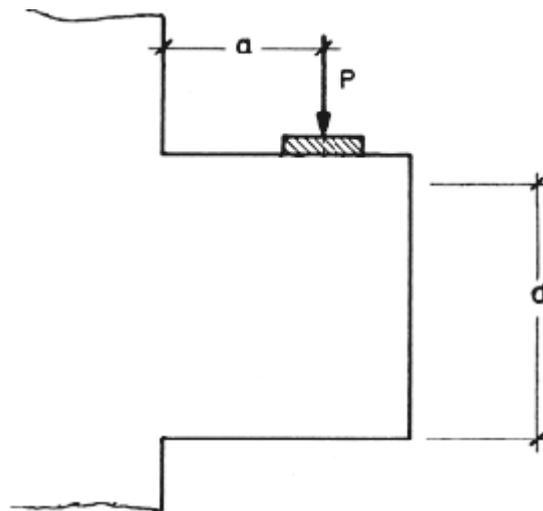


Fonte: OLIVEIRA, 2012.

2.4. CONSOLOS

Consolos são peças pré-moldadas de concreto armado que servem como elemento de ligação entre diversos componentes, tais como pilar-viga e são carregados na extremidade livre com forças concentradas aplicadas a uma distância “a” entre a face do pilar e o ponto de aplicação da força, como ilustra a figura 10.

Figura 10: Aplicação de força em consolos



Fonte: COSTA, 2009.

Sendo “d” a altura útil do consolo, a norma brasileira NBR 9062/2006 faz a seguinte indicação quanto ao modelo de cálculo a ser utilizado:

- Para os consolos com relação $1,0 < a/d < 2,0$, o dimensionamento deve ser feito como viga em balanço como disposto na NBR 6118 (ABNT, 2014);

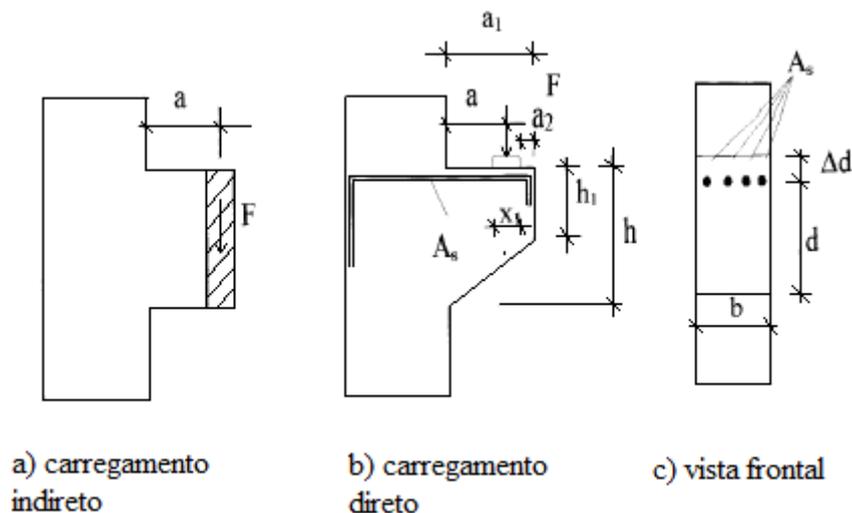
- Para os consolos com relação $0,5 < a/d < 1,0$ (consolos curtos), o dimensionamento deve ser feito conforme o modelo matemático de uma treliça de duas barras, uma tracionada (tirante) e outra comprimida (biela) conhecido como modelo de biela-tirante;

- Para os consolos com relação $a/d < 0,5$ (consolos muito curtos), o dimensionamento deve ser feito supondo a ruptura ao longo do plano de ligação do consolo com seu suporte, podendo-se considerar o efeito favorável do engrenamento dos agregados desde que a interface seja atravessada por barras de aço perpendiculares à mesma.

Os consolos podem apresentar carregamentos diretos ou indiretos, de acordo com a forma de aplicação da ação vertical. A figura 11 mostra o caso de carregamento indireto em que a ação está aplicada verticalmente ao longo de toda a altura do consolo ou está concentrada na face inferior desse elemento. Isso impossibilita a execução de chanfros. Em casos como esse se faz necessário o uso de uma armadura de suspensão, tanto vertical como inclinada (LEONHARD E MONNIG, 1978 *apud* TORRES, 1998).

O carregamento direto consiste na aplicação da carga, geralmente, sobre apoios que devem proporcionar uma distribuição mais uniforme das pressões na superfície de contato.

Figura 11: Tipos de carregamento



Fonte: TORRES, 1998

2.5. CONSOLOS DE CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

A adição de fibras ao concreto tem a função de transmitir as tensões através das fissuras com o objetivo de reduzir a concentração de tensões em suas extremidades. Para o uso das fibras como reforço na matriz de concreto deve-se conhecer bem suas propriedades (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) recomenda que o comprimento da fibra seja maior ou igual a duas vezes o tamanho máximo do agregado.

Diversas pesquisas têm mostrado que as fibras de aço proporcionam o efeito de confinamento do concreto nas regiões das bielas de compressão dos consolos. E o concreto, quando confinado, tende a alcançar valores de resistência mais elevados

A partir da década de 80 o estudo de consolos com fibras teve uma grande relevância no meio acadêmico. Fattuhi (1987, *apud* TORRES, 1998) ensaiou consolos com adição de fibra e mostrou que os mesmos apresentaram força de ruína cerca de 40% superior e força de início de fissuração cerca de 74% superior em relação aos consolos sem fibras, indicando também um comportamento mais dúctil, tanto para cargas de serviço como na ruína.

Outros autores como Campione, la Mendola e Mangiavillano (2007) estudaram a influência do grau de resistência do concreto, do percentual de fibras e do percentual da armadura do tirante no comportamento à flexão dos consolos de concreto. Foram ensaiados doze diferentes modelos de consolos, sendo que cada modelo foi duplicado, totalizando, assim, vinte e quatro consolos. Nesse estudo, além de consolos de concreto com armadura do tirante de 10 mm de diâmetro foi também utilizada armadura do tirante de 16 mm de diâmetro e houve variação no percentual das fibras de aço (0,5% e 1,0%).

Foi utilizado na pesquisa concretos com resistência à compressão de, aproximadamente, 80 MPa tanto para o concreto com fibras quanto para o concreto sem fibras. Foram utilizadas fibras metálicas com 30 mm de comprimento, 0,5 mm de diâmetro e resistência nominal de 1115 MPa.

Para os consolos com armadura do tirante de $2\phi 10$, os resultados mostraram que a adição de 0,5% de fibras provocou um incremento de cerca de 28% na força de escoamento do tirante e na força última. Já a adição de 1% de fibra aumentou em cerca de 64% a força de escoamento do tirante e a força última com relação ao consolo sem fibras.

E para os consolos com armadura do tirante de $2\phi 16$, os resultados mostraram que quando foi adicionado 0,5% de fibras não foi observada significativa diferença na resistência última dos consolos. Porém, a adição de 1% de fibra aumentou em cerca de 37% a força de escoamento do tirante e a força última.

2.6. FORMAS DE RUPTURAS EM CONSOLOS

Park & Paulay (1983, *apud* OLIVEIRA, 2012) sugerem seis tipos de formas de rupturas em consolos: ruptura por flexão, fendilhamento da biela de concreto, cisalhamento, falta de ancoragem, devido ação horizontal não prevista e esmagamento local. Tais ruínas são descritas a seguir.

2.6.1. RUPTURA POR FLEXÃO

Esse tipo de ruína se caracteriza por aberturas de grandes fissuras na parte superior da ligação do consolo com o pilar, decorrentes do escoamento da armadura do tirante acompanhado do esmagamento do concreto da biela.

A ruptura por flexão é a mais desejada, do ponto de vista de segurança, pois permite que a estrutura apresente indícios de colapso através de grandes deformações e fissuras, como mostra a figura 12.

Figura 12: Ruptura por flexão



Fonte: COSTA, 2009

2.6.2. RUPTURA POR FENDILHAMENTO DA BIELA DE CONCRETO

Essa ruptura é causada pela falta de armadura distribuída ao longo da altura do consolo que serve como confinamento para a biela, minimizando os efeitos do fendilhamento. Também pode ocorrer, devido à insuficiência de seção de concreto resistente na região comprimida. O aspecto da fissuração é apresentado na figura 13.

Figura 13: Ruptura por fendilhamento da biela de concreto



Fonte: COSTA, 2009.

2.6.3. RUPTURA POR CISALHAMENTO

Essa forma de ruptura ocorre geralmente em consolos muito curtos, ou seja, o carregamento é aplicado muito próximo ao pilar, e é caracterizada pelo surgimento de fissuras inclinadas no plano de contato do consolo com o pilar provocando escorregamento. As fissuras podem ser vistas na figura 14.

Figura 14: Ruptura por cisalhamento

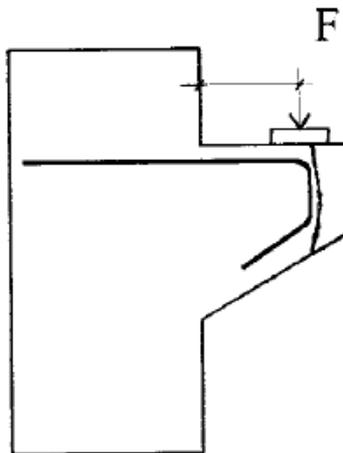


Fonte: COSTA, 2009.

2.6.4. RUPTURA POR FALTA DE ANCORAGEM

Essa ruína ocorre quando a força está aplicada muito próxima da extremidade do consolo e a armadura principal do tirante não possui ancoragem suficiente provocando o surgimento de fissuras que se prolongam no entorno da armação como pode ser visto na figura 15.

Figura 15: Ruptura por falta de ancoragem

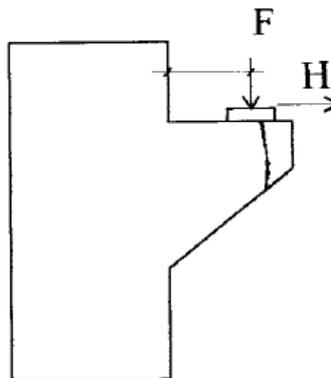


Fonte: TORRES, 1998.

2.6.5. RUPTURA DEVIDA À AÇÃO HORIZONTAL

Apesar de nem sempre ser conhecida, a ação horizontal é um efeito que pode surgir em decorrência da retração da peça de concreto apoiada sobre o consolo ou mesmo pela ação dos ventos provocando um esforço adicional não previsto. Além disso, também pode ocorrer como reação de ponte rolante. Esse tipo de situação provoca o surgimento de fissuras que não se desenvolvem até o pilar, mas atravessam o consolo, como ilustra a figura 16.

Figura 16: Ruptura devida à ação horizontal

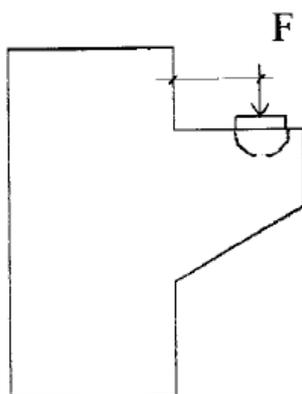


Fonte: TORRES, 1998.

2.6.6. RUPTURA POR ESMAGAMENTO LOCAL

A ruptura por esmagamento local ocorre quando a tensão de compressão na região de aplicação do carregamento é muito alta, provocando esmagamento do concreto. O aspecto da fissuração é apresentado na figura 17.

Figura 17: Ruptura por esmagamento local



Fonte: TORRES, 1998.

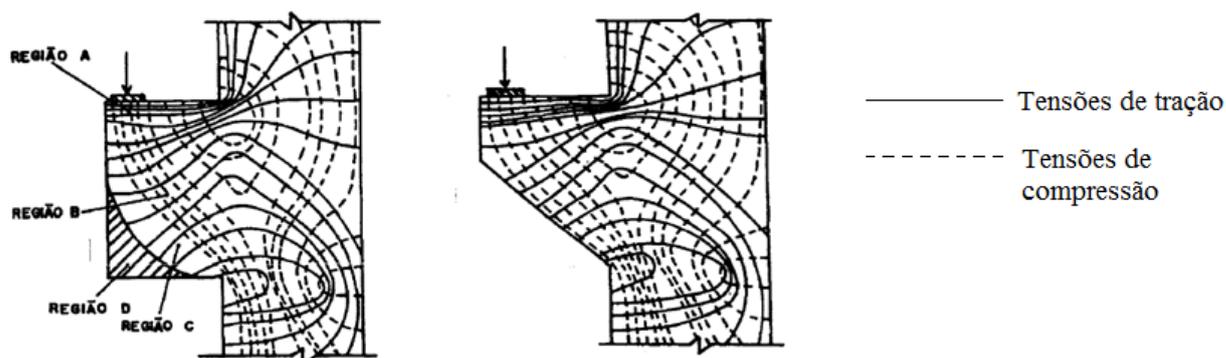
2.7. DESEMPENHO ESTRUTURAL DE CONSOLOS CURTOS

FRANZ & NIEDENHOFFL (1963, apud LEONHARDT & MÖNNING, 1978) foram os primeiros a estudarem teórica e experimentalmente os consolos. Foram estudados especialmente consolos com $a/h = 0,5$ a $0,6$; onde “a” representa a distância entre a face do pilar e o ponto de aplicação da força, e “h” a altura do consolo.

FRANZ (1963) afirma que a teoria de vigas de Navier não se aplica aos consolos e vigas curtas, pois esses elementos apresentam alturas maiores que seus comprimentos e com isso têm um comportamento estrutural diferenciado em relação aos esforços internos normalmente observados em vigas submetidas à flexão. A distribuição linear de tensões na seção transversal não é válida para este tipo de peça.

As trajetórias de tensões para consolos com $a/h = 0,5$, com base nos estudos experimentais de fotoelasticidade realizados por FRANZ & NIEDENHOFFL (1963, apud LEONHARDT & MÖNNING, 1978), revelam que em consolos retangulares o canto inferior é livre de tensões, sendo, portanto, dispensável. Por isso têm comportamento semelhante ao dos consolos chanfrados.

Figura 18: Trajetórias de tensão em consolos

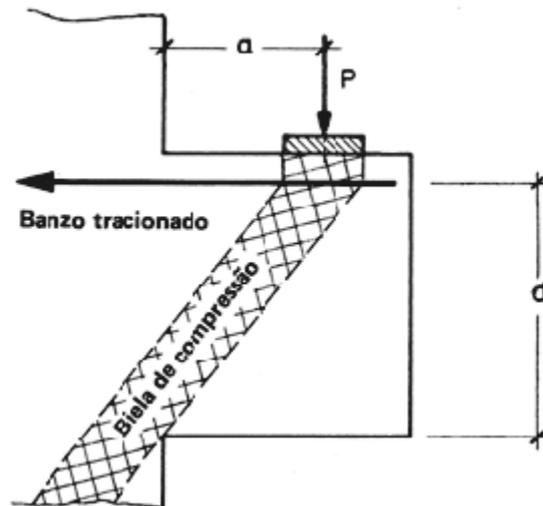


Fonte: TORRES, 1998.

Na região A, entre o ponto de carregamento e a face do pilar, surgem tensões de tração quase constantes caracterizando a área onde deve ser colocada a armadura principal. A região B é onde se caracteriza a formação da biela de comprimida, pois surgem tensões de compressão inclinadas quase constantes que se iniciam no ponto de aplicação da carga. O ponto C representa a região onde ocorre mudança de direção da força de compressão provocando o surgimento de pequenas tensões de tração inclinadas. Por fim, a região D se caracteriza em consolos retangulares, porém é um local onde praticamente não há tensões, justificando a utilização de consolos chanfrados.

Nos dois tipos de consolos mostrados, a direção do fluxo das tensões de tração no bordo superior é levemente inclinada em relação à face superior. Entretanto, por motivo de simplificação, o tirante é idealizado como sendo horizontal, assim como a armadura utilizada para resistir a essas tensões. O fluxo das tensões de compressão tem uma direção que vai do ponto de aplicação da força até a base do consolo. Nesta mesma direção, portanto, é idealizada uma biela de compressão com a resistência do concreto. A ilustração pode ser vista na figura 19.

Figura 19: Treliça simples idealizada para o comportamento estrutural do consolo



Fonte: adaptado de LEONHARDT & MÖNNING.

A armadura do tirante principal deve ser dimensionada para resistir aos esforços verticais sobre o consolo, predominantes, e também aos esforços horizontais. Os esforços horizontais podem surgir por causa do impedimento da variação de comprimento da peça estrutural que está apoiada sobre o consolo, devido à variação de temperatura ou à retração. Para minimizar os esforços horizontais são utilizados elastômeros nos pontos de apoio sobre o consolo, que permitem, dentro de certos limites, deslocamentos horizontais e pequenas rotações, além de proporcionar uma distribuição mais uniforme das pressões na superfície de contato

2.8. MODELOS DE DIMENSIONAMENTO DE CONSOLOS

A partir do estudo das trajetórias de tensões realizado por FRANZ E NIEDENHOFFL (1963 apud TORRES, 1998), dos modelos de atrito-cisalhamento e das análises plásticas, surgiram diferentes métodos de cálculo de consolos cuja diferença entre eles eram: a utilização de uma ou mais das teorias citadas, a adoção de coeficientes de segurança diferenciados e o grau de simplificação utilizado em cada norma. Os principais modelos utilizados no cálculo de consolos são:

- Modelo de bielas e tirantes;
- Modelo atrito-cisalhamento.

2.8.1. MODELO BIELA-TIRANTE

O modelo Biela-tirante consiste em idealizar a distribuição de tensões do consolo em dois fluxos distintos, os fluxos das tensões de compressão que são

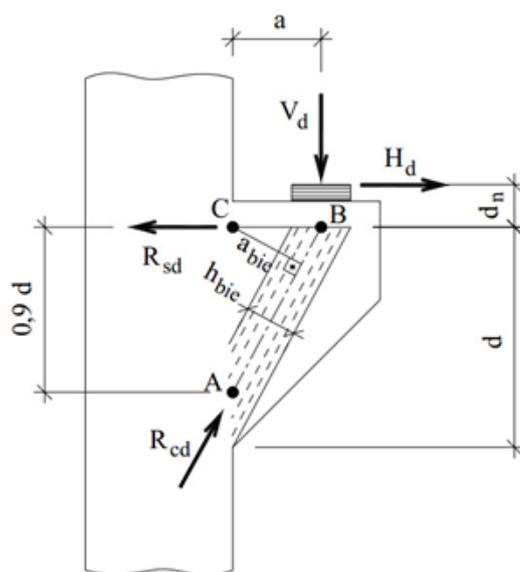
absorvidas pela biela e o fluxo das tensões de tração por tirantes. Os nós são as regiões de união entre tirantes e bielas, pontos de aplicação de forças ou de reação de apoio. Para que o consolo tenha um comportamento dúctil é indispensável que os tirantes cheguem à ruína antes das bielas ou das regiões nodais.

Adotando esse modelo, as forças nas bielas e nos tirantes são obtidas a partir do equilíbrio de forças internas e externas para posteriormente ser feito o dimensionamento do tirante e as verificações na biela.

Os esforços de tração do tirante são resistidos pela armadura e, portanto, sua capacidade resistente depende da área de aço adotada e do tipo de aço utilizado. Analogamente, a capacidade resistente do elemento comprimido é função da resistência do concreto e da área da seção transversal da biela.

A seguir vemos os passos necessários para o dimensionamento de consolos curtos de acordo com a NBR 9062/2006. Para a análise estrutural temos o modelo apresentado na figura 20.

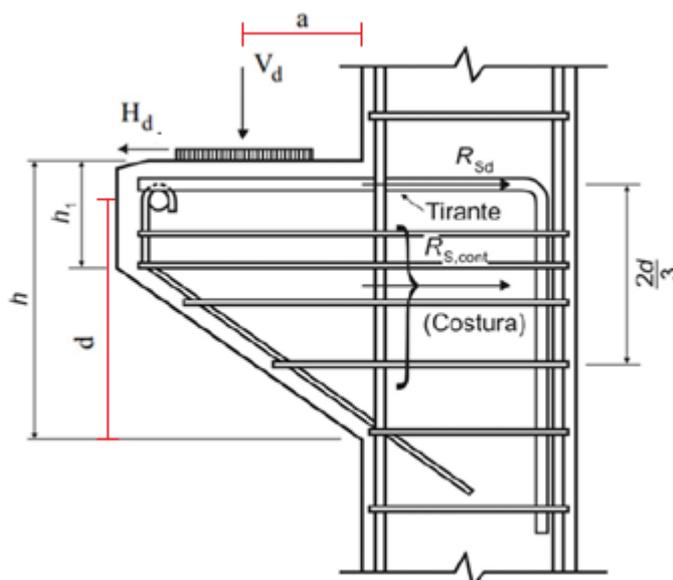
Figura 20: Análise estrutural de consolo



Fonte: El Debs, 2000.

Após análise estrutural e o cálculo dos esforços, a solução para armaduras, proposta pela norma NBR 9062/2006, que se busca é apresentado conforme a Figura 21.

Figura 21: Armadura de consolos proposta pela norma



Fonte: NBR 9062/2006.

2.8.1.1. ARMADURA PRINCIPAL

Como o tirante é muito curto, da face externa do consolo até a face oposta do pilar (ou apoio), é necessário dar atenção especial à ancoragem da armadura prevista para esse tirante, nas duas extremidades, especialmente naquela junto à extremidade do consolo.

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

$$A_{s,tir} = \left(0,1 + \frac{a}{d}\right) * \frac{Vd}{fyd} + \frac{Hd}{fyd} \quad (\text{Eq. 1})$$

Sendo que:

- V_d é a força vertical de cálculo;
- f_{yd} é a resistência de cálculo ao escoamento do aço;
- H_d é a força horizontal de cálculo.

A armadura de costura de consolos curtos proposta pela NBR 9062/2006 deve ser distribuída em $2/3$ da altura de cálculo do consolo (d) adjacentes à armadura do tirante. A área de aço necessária para a armadura de costura ($A_{s,cost}$) é avaliada pela equação 2:

$$A_{s,cost} = \left(0,1 + \frac{a}{d}\right) * \frac{Vd}{fyd} * \frac{0,4}{d} \quad (\text{Eq. 2})$$

2.8.1.2. BIELA COMPRIMIDA

De acordo com a NBR 9062/2006, a tensão de compressão na biela em consolos curtos, σ_{cd} , deve ser limitada em:

- f_{cd} para carga direta;
- $0,85 f_{cd}$ 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 em relação ao ponto C (figura 20), obtemos a seguinte equação 3:

$$R_c = \frac{Vd*a + Hd*dh}{a_{bie}} \quad (\text{Eq. 3})$$

Os valores de a_{bie} e h_{bie} são calculados pelas equações 4 e 5:

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

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

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

$$R_c = \frac{Vd*a + Hd*dh}{\frac{0,9*d*a}{((0,9*d)^2 + a^2)^{\frac{1}{2}}}} \quad (\text{Eq. 6})$$

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

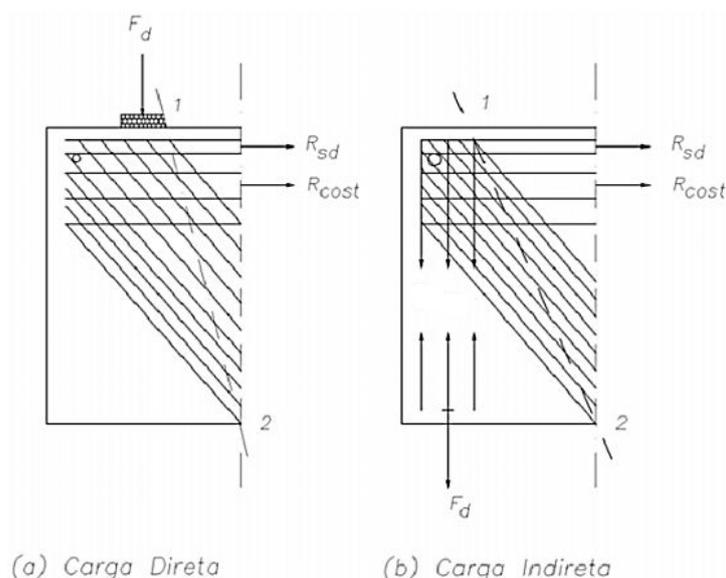
$$\sigma_c = \frac{R_c}{0,2*b*d} = \frac{Vd}{0,18b*d} * \left(1 + \frac{Hd*dh}{Vd*a} \right) * \left(0,9^2 + \left(\frac{a}{d} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Eq. 7})$$

Para simplificar a expressão 7, despreza-se o valor da parcela $Hd*dh/Vd*a$ que para os casos usuais é menor que 0,06, obtendo-se a equação 8.

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

Onde se adota $\beta = 1$ no caso de forças diretas e $\beta = 0,85$ para forças indiretas, de acordo com a NBR 9062/2006, como mostrado na figura 22:

Figura 22: Carregamento direto e indireto



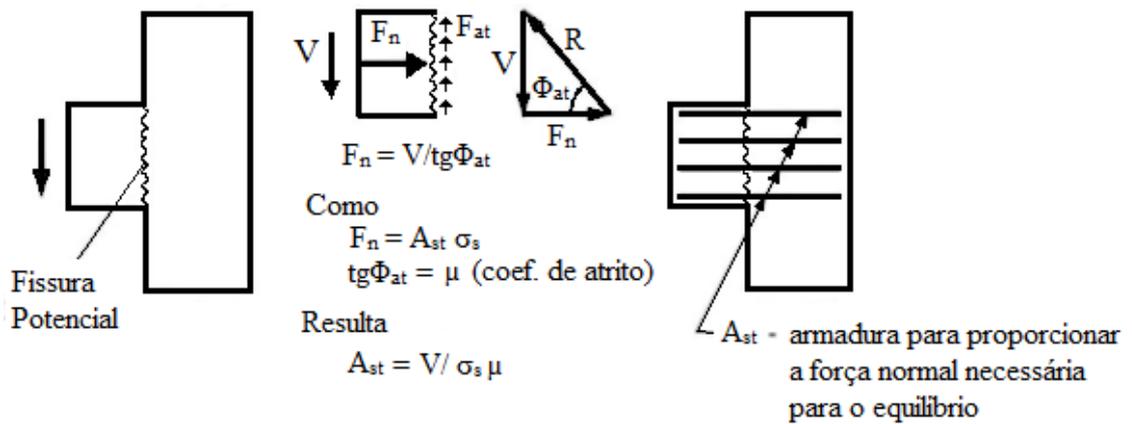
Fonte: NBR 9062/2006.

2.8.2. MODELO ATRITO-CISALHAMENTO

Essa teoria de atrito-cisalhamento deve ser utilizada no dimensionamento de consolos muito curtos em que a relação $a/d < 0,5$. Esse método consiste em considerar a ocorrência de uma fissura potencial ao longo do plano de cisalhamento considerado, que no caso do consolo moldado em duas etapas é a interface entre a peça suporte (pilar, viga ou parede) e o consolo. A integridade das duas partes é garantida pela colocação de uma armadura cruzando essa superfície, que irá produzir força normal e, que conseqüentemente, mobilizará forças de atrito que equilibram o cisalhamento.

Essa armadura deve atravessar o plano de fissuração e ser devidamente ancorada em ambos os lados por ganchos ou solda. O mecanismo desse modelo é ilustrado na Figura 23.

Figura 23: Modelo de atrito-cisalhamento



Fonte: modificado pelo autor - EL DEBS, 2000.

A NBR 9062/2006 recomenda o modelo de atrito-cisalhamento para o cálculo de consolos muito curtos.

A armadura total do tirante é avaliada pela equação 9:

$$A_{s,tir} = \frac{0,8Vd}{f_{yd}*\mu} + \frac{Hd}{f_{yd}} \quad (\text{Eq. 9})$$

Sendo que μ é o coeficiente de atrito efetivo dado por:

- $\mu=1,4$ para concreto lançado monoliticamente;
- $\mu=1,0$ para concreto lançado sobre concreto endurecido com superfície intencionalmente áspera com rugosidade mínima de 0,5 cm a 3,0 cm;
- $\mu=0,6$ para concreto lançado sobre concreto endurecido com interface lisa.

A tensão de cisalhamento na interface deve ser limitada em:

$$\tau_{wd} = \frac{Vd}{b*d} \leq \tau_{wu} \quad (\text{Eq. 10})$$

Onde:

$$\tau_{wu} \leq \begin{cases} 0,27 * \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) * f_{cd} \\ 8 \text{ MPa} \end{cases} \quad (\text{Eq. 11})$$

De acordo com o manual do PCI (2010), a armadura perpendicular ao plano de fissuração, A_{vf} , é avaliada pela equação 12:

$$A_{vf} = \frac{Vu}{\phi * f_{yk} * \mu e} \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde:

$$\mu_e = \frac{6894 * \lambda * A_{cr} * \mu}{V_u} \quad (\text{Eq. 13})$$

Na equação 12, V_u é a força cisalhante que atua no plano de fissuração; μ_e é o coeficiente de atrito-cisalhamento efetivo, dado pela equação 13, observado os limites dados na Tabela 1; λ é o fator modificador que representa a redução nas propriedades mecânicas do concreto, sendo igual a 1,0 para concreto de peso normal e igual a 0,75 para concreto leve; A_{cr} é a área na interface da fissura potencial, dada em m²; e μ é o coeficiente de atrito-cisalhamento dado na Tabela 1:

Tabela 1: Coeficientes do modelo atrito-cisalhamento recomendados pelo PCI (2010)

Tipos de interface	μ recomendado	Máximo μ_e
Concreto moldado monoliticamente	1,4 λ	3,4
Concreto moldado contra concreto endurecido com superfície intencionalmente rugosa, com ranhuras de profundidade de, aproximadamente 6 mm	1,0 λ	2,9
Concreto moldado contra concreto endurecido com superfície lisa	0,6 λ	2,2
Concreto ligado a estrutura em aço	0,7 λ	2,4

Quando houver uma força normal atuando no plano cisalhante, uma armadura adicional deve ser acrescentada, calculada pela equação 14:

$$A_n = \frac{N_u}{\phi * f_y k} \quad (\text{Eq. 14})$$

Onde

- N_u é a força horizontal aplicada.

Deve-se prever também uma armadura de costura com área não inferior a 0,5 A_s para esse tipo de consolo, em que essa armadura deve ser distribuída em uma altura de dois terços de “d”, adjacente à armadura principal.

2.9. ARMADURA DE COSTURA

Segundo a NBR 9062/2006 a armadura de costura é obrigatória e, em consolos com relação $0,5 < \frac{a}{d} \leq 1$, considerada adequada quando distribuída em $\frac{2}{3}d$ adjacentes ao tirante calculada a partir da equação 15. Seu diâmetro não deve ser maior que um quinze avos de menor dimensão do consolo no engastamento e seu espaçamento na vertical não deve ser maior que um quinto da altura útil “d” no engastamento, 20 cm e “a” que é a distância de aplicação da força até a interface do pilar.

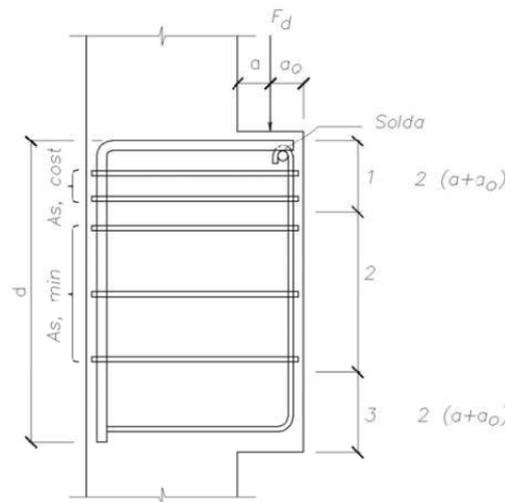
$$\left(\frac{As}{s}\right)_{cost} \geq 0,4 * \left(\frac{Asv}{d}\right) \quad (\text{Eq. 15})$$

Sendo que:

- A_{sv} é a armadura do tirante principal;
- d é a altura útil do consolo.

A armadura de costura é disposta na forma de estribos horizontais espaçados verticalmente, de forma a aumentar o confinamento da biela de compressão melhorando sua resistência, bem como de “costurar” as fissuras na interface do consolo aumentando a ductilidade do elemento. Contudo, além da armadura de costura é prevista armadura do tirante principal e, em alguns casos, estribos horizontais para melhorar a estabilidade do consolo, isso faz com que em um pequeno espaço seja disposta uma grande quantidade de armadura, dificultando o processo de concretagem em escala industrial.

Figura 24: Detalhe da armadura de costura de acordo com a NBR 9062/2006



Fonte: NBR 9062/2006

Geralmente, alguns modelos de cálculo de resistência dos consolos, não consideram a contribuição da armadura de costura, pois as formulações propostas para

sua consideração são um pouco mais trabalhosas que a apresentada na norma NBR 9062/2006. Porém, deve-se buscar um refinamento do projeto desses elementos em função da repetição dos elementos pré-moldados.

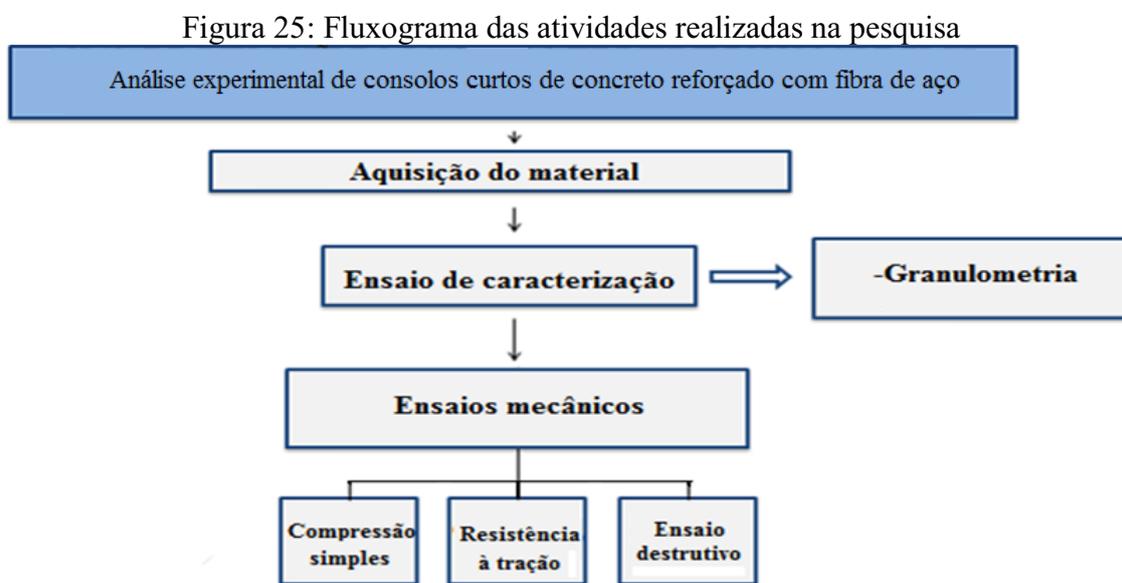
KRIZ & RATHS (1965) ensaiaram consolos que indicaram que a armadura de costura praticamente não contribui para a capacidade resistente do consolo, quando atuam simultaneamente forças horizontais além das verticais, isso fez com que durante a realização dos ensaios fosse aplicada apenas forças verticais.

Segundo avaliações experimentais e analíticas de Campione, La Mendola e Papia (2005) que estudaram consolos com relação a/d constante em 0,785 com e sem armadura de costura, verificaram a partir de seus resultados que a presença de armadura de costura nos consolos, aumentou a carga máxima em cerca de 27% quando comparados com os sem armadura de costura. Além disso, observaram menores aberturas de fissuras até atingir a carga máxima e maior ductilidade após atingir esta carga.

Os mesmos autores fizeram análises substituindo a armadura de costura por fibras de aço, verificando um aumento de 22% da carga máxima, bem como a força correspondente à primeira fissura foi, cerca de, 72% maior para os consolos com adição de fibra.

CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos os materiais utilizados durante a fase experimental da pesquisa, além dos procedimentos e especificações para a obtenção das propriedades físicas dos materiais e do comportamento mecânico dos consolos. O Fluxograma da figura 25 apresenta a sequência das atividades realizadas no desenvolvimento desta pesquisa.



Fonte: Autor

3.1. MATERIAIS

3.1.1. CONCRETO DOS MODELOS

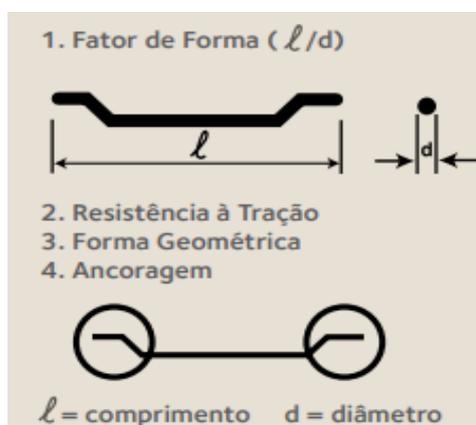
Para confecção do concreto dos modelos foi empregado o mesmo material, utilizando apenas um traço para dosagem tanto do concreto com adição de fibra quanto do convencional. Na tabela 2, podem ser vistas as quantidades, em kg, de cada material utilizados para obtenção de um metro cúbico de concreto com resistência à compressão estimada em 35MPa.

Tabela 2: Consumo de material em kg/m³de concreto

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

O cimento utilizado foi o Portland composto CP II-Z e o aditivo superplastificante foi o Muraplast FK 100B. As fibras de aço utilizadas foram da Dramix RC 65/60-BN, com características descritas na tabela 3, 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.

Figura 26: Características das fibras



Fonte: Belgo Bekaert, 2017

Tabela 3: Características das fibras usadas

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

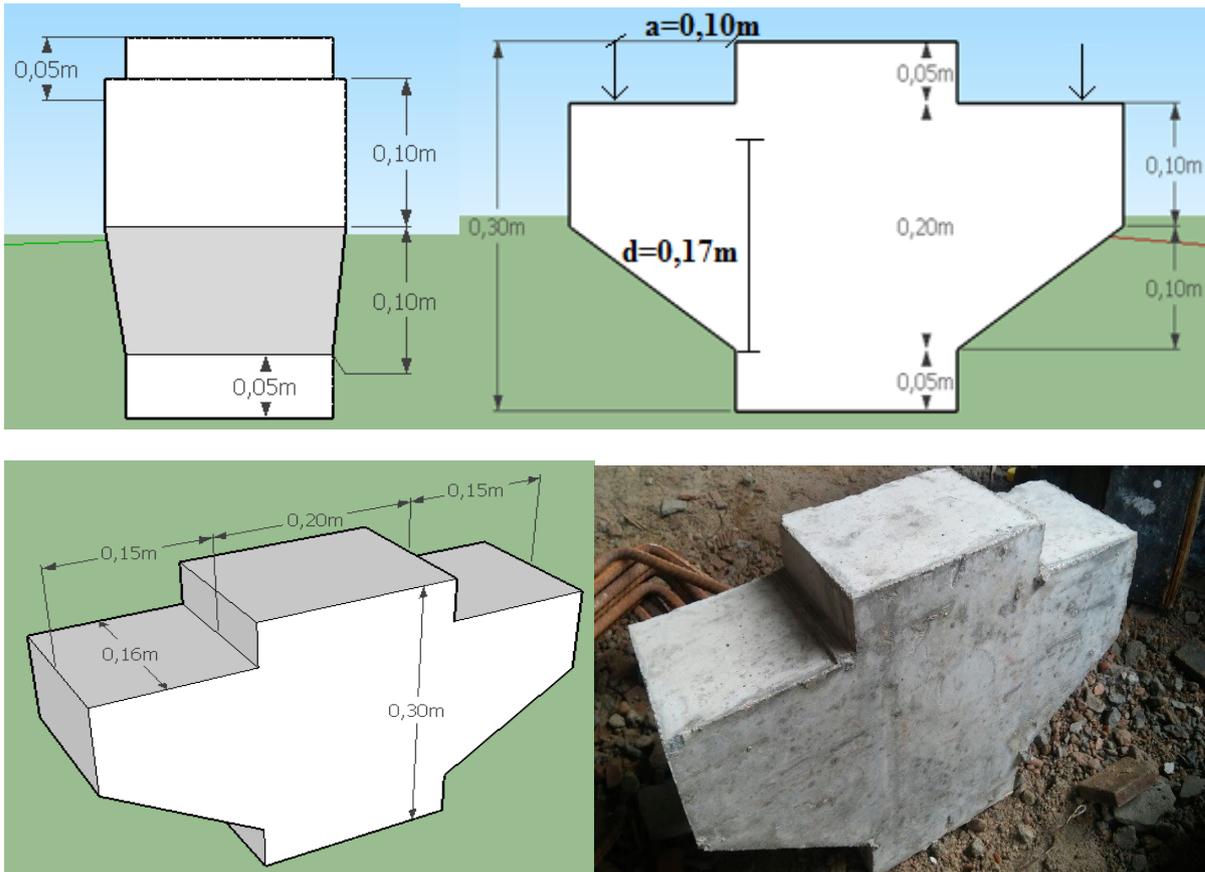
*RC = Fibra colada

3.1.2. MODELOS EXPERIMENTAIS DOS CONSOLOS CURTOS

3.1.2.1. Dimensões dos consolos e Fôrmas

Todos os modelos moldados apresentaram a mesma geometria e dimensões. Diante das limitações da prensa utilizada no ensaio foi considerado um pilar de dimensões 16 cm x 20 cm, com altura de 30 cm. Os consolos têm comprimento, altura e largura, respectivamente, iguais a 15 cm, 20 cm e 16 cm. Para garantir que o consolo seja caracterizado como curto satisfazendo a relação $0,5 < \frac{a}{d} < 1$, foi adotado um $a = 10$ cm e $d = 17$ cm obtendo uma relação $\frac{a}{d} = 0,59$. A figura 27 ilustra o modelo ensaiado.

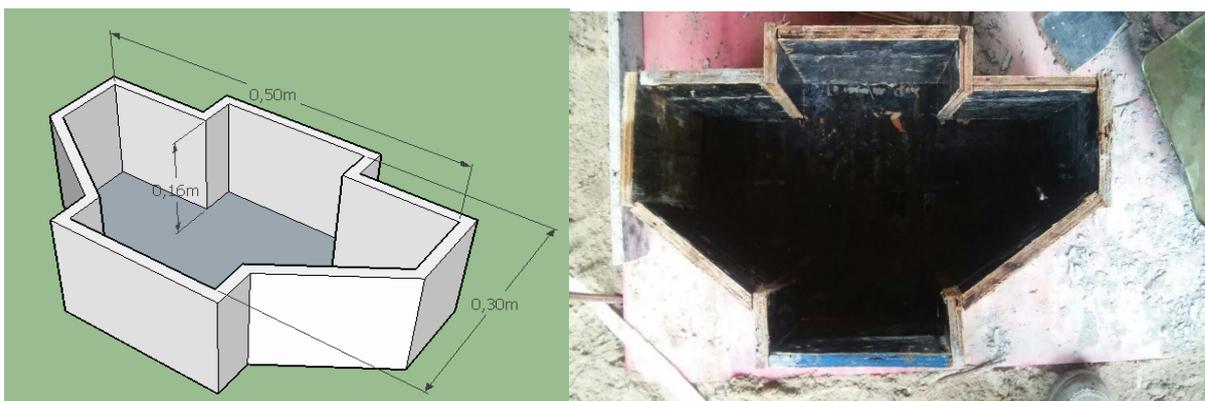
Figura 27: Dimensões adotadas para os modelos experimentais



Fonte: Autor

Para a confecção das fôrmas utilizou-se chapas de madeira compensada plastificada de 18mm de espessura. Foram cedidas e confeccionadas pela WB Bodocongó empreendimentos imobiliários. Executou-se duas fôrmas de modo que fosse possível a moldagem de dois consolos no mesmo dia com concretagem monolítica das peças. As dimensões das fôrmas, ilustradas na figura 28, são as mesmas para todos os modelos moldados.

Figura 28: Fôrma padrão dos consolos



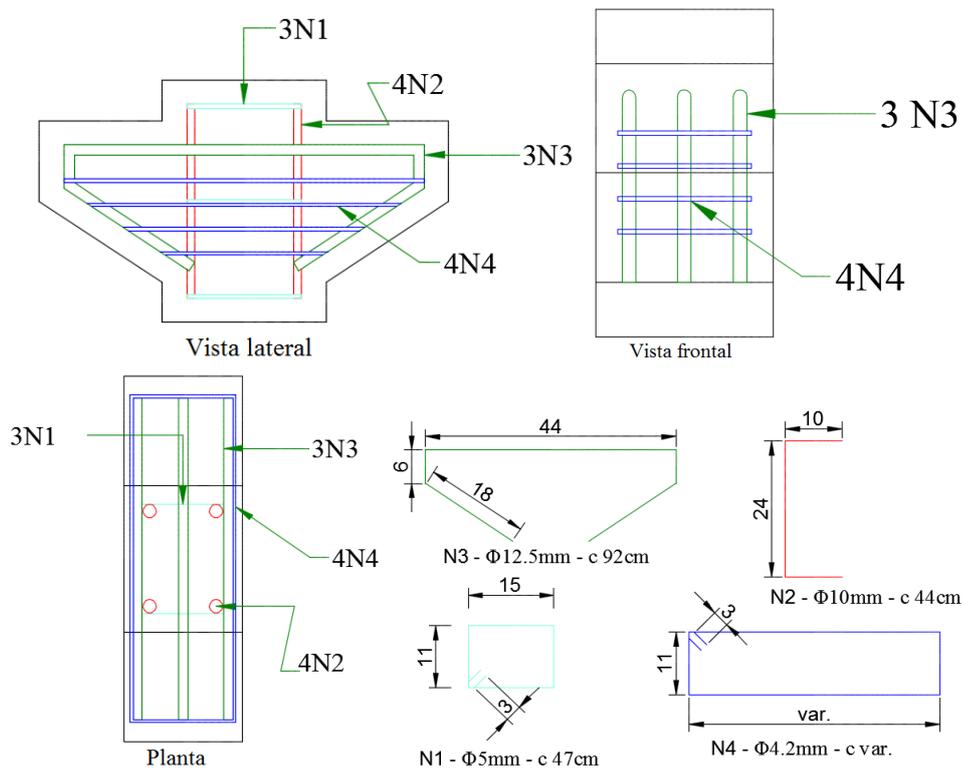
Fonte: Autor

3.1.2.2. Armadura

Na pesquisa foram utilizados aços CA-50 de diâmetros 10 mm e 12,5 mm e CA-60 de diâmetros 4.2 mm e 5 mm. Para a melhor análise da influência da adição de fibra ao concreto, a armadura do tirante foi dimensionada para que ocorresse ruptura da biela comprimida de concreto ao invés do escoamento do tirante.

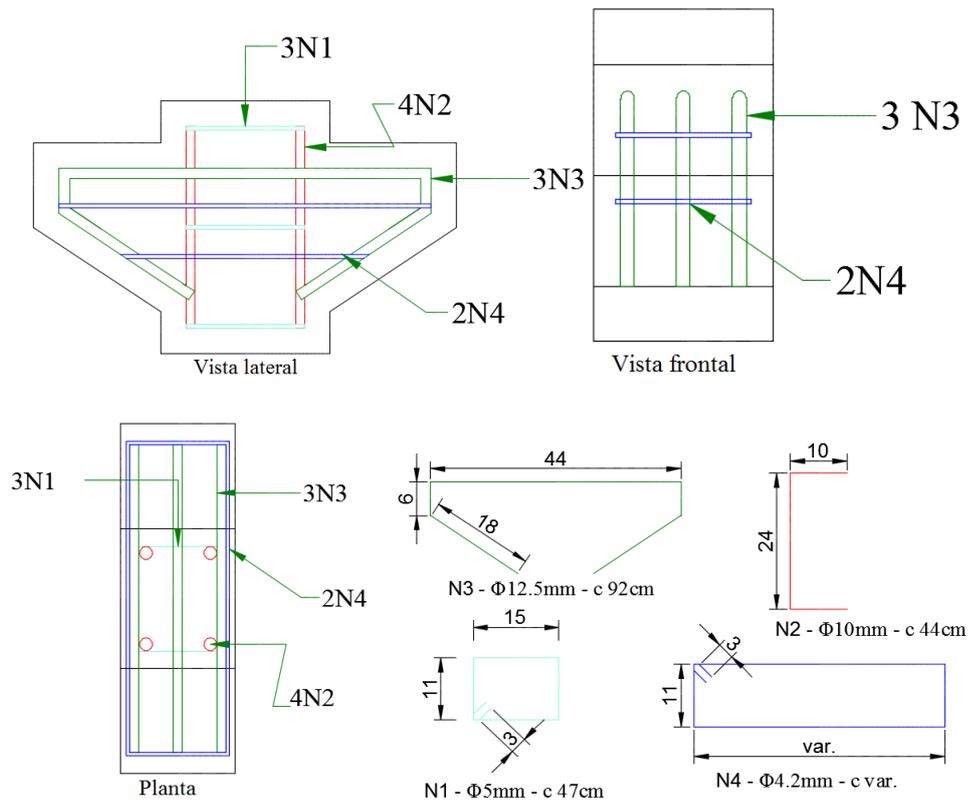
A armadura do tirante foi dobrada acompanhando a geometria chanfrada do consolo de modo a garantir a ancoragem necessária. Foi feito um gancho na armadura do pilar para garantir a ancoragem diante das dimensões reduzidas do modelo. As figuras 29, 30 e 31 ilustram a distribuição das armaduras nos consolos bem como o seu detalhe executivo.

Figura 29: Detalhe das armaduras do modelo 1 (M1)



Fonte: Autor

Figura 30: Detalhe das armaduras dos modelos 2 (M2) e 3 (M3)



Fonte: Autor

Figura 31: Armadura dos consolos



Fonte: Autor

Todos os modelos apresentaram a mesma taxa de armadura no tirante tracionado, variando apenas o percentual de armadura de costura e a taxa de fibra adicionada. Em termos construtivos, foi adotado a ancoragem e cobrimentos sugeridos pela NBR 6118/2014 e NBR 9062/2006. A tabela 4 indica o resumo das armaduras utilizadas nos modelos.

Tabela 4: Resumo das armaduras dos modelos

Modelo	Armadura principal (tirante)	Armadura de costura	Porcentagem de fibras de aço (%)
M1	3Φ12,5mm	4Φ4.2mm	0
M2	3Φ12,5mm	2Φ4.2mm	0
M3	3Φ12,5mm	2Φ4.2mm	0,5

3.2. METODOLOGIA

A metodologia utilizada na pesquisa baseou-se nas informações contidas na literatura e foram realizados os ensaios de caracterização física e mecânica.

3.2.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

3.2.1.1. Granulometria

O ensaio de granulometria foi realizado de acordo com a norma NBR 7217/1987 e consiste no peneiramento do material, como ilustra a figura 32. Amostras de agregado graúdo e miúdo foram submetidas à série normal (Tabela 5) de peneiras normatizadas pela ABNT. Considerou-se, para traçar a curva granulométrica, a porcentagem de material “que passa” representando graficamente em função da abertura da peneira em escala logarítmica.

Figura 32: Peneiramento e série normal de peneiras



Fonte: Autor

Tabela 5: Série normal de peneiras pela NBR 7217/1987

Peneiras (pol)	Peneiras (mm)
1	25,4
3/4	19,1
3/8	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

A norma indica uma quantidade mínima de material a ser ensaiado em função do diâmetro máximo do agregado utilizado. Para o agregado miúdo foi utilizado uma amostra de 1kg e 5kg para o gráudo, preconizado pela NBR 7217/1987, como ilustra a figura 33.

Figura 33: Amostras para o ensaio de granulometria



Fonte: Autor

3.2.2. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

3.2.2.1. Compressão do concreto

Os corpos de prova (CP's) foram moldados em cilindros com altura de 20 cm e diâmetro de 10 cm durante a concretagem, retirando duas amostras para cada betonada.

Após 24h da moldagem, os CP's foram colocados em câmaras com água e submetidos a cura úmida. Um dia antes da realização do ensaio as amostras foram retiradas da câmara para secagem ao ar livre.

O ensaio para determinar a resistência à compressão simples foi realizado nos corpos-de-prova seguindo as prescrições indicadas pela NBR 5739 (ABNT, 2007). A prensa utilizada foi a ELE com célula de 2000 kN, com velocidade controlada pelo operador (Figura 34).

Figura 34: Detalhe do equipamento



Fonte: Autor

Ensaíram-se quatro amostras de concreto convencional e duas de concreto com adição de fibras. Posicionou-se os CP's no equipamento e para diminuir quaisquer irregularidades na parte superior do corpo de prova foi utilizado um disco com borracha neoprene para melhor distribuição de tensões. Posteriormente foi aplicado carga até a ruptura da amostra.

3.2.2.2. Resistência à tração do aço

Para o ensaio de resistência a tração do aço foram utilizados os diâmetros de 12,5 mm (Utilizado no tirante principal) e 10 mm (Utilizado no pilar) e ensaiados duas amostras de 50 cm de comprimento para cada, totalizando quatro amostras. Tentou-se ensaiar amostras com diâmetros de 5 mm, porém as garras do equipamento utilizado não comportavam dimensões muito pequenas.

O ensaio consistiu em posicionar as barras no equipamento de modo que as garras firmassem na amostra, após isso foi iniciado a aplicação de carga até a ruptura. Durante a realização do ensaio a carga aplicada manteve-se constante em um certo intervalo antes que ocorresse ruptura da amostra, com isso foi adotado esse ponto como o de escoamento do aço e foi anotado a carga correspondente.

Figura 35: Detalhe do equipamento



Fonte: Autor

3.2.2.3. Moldagem dos consolos

O procedimento de produção do concreto convencional consistiu em adicionar parte da água e todo o agregado graúdo para promover a lavagem do material, posteriormente foram adicionados o cimento e o agregado miúdo, nessa sequência. Por fim, foi adicionado o restante da água e o superplastificante. Para o concreto com fibra o procedimento foi o mesmo, sendo que foi adicionado ao final do processo a quantidade de fibra necessária para garantir o percentual de 0,5%.

Todos os modelos (Consolo-pilar) ensaiados foram concretados monoliticamente, ou seja, em etapa única. A concretagem foi realizada no canteiro de obras da WB Bodocongó Empreendimentos localizado nas proximidades da Universidade Federal de Campina Grande. A confecção do traço foi realizada com o auxílio de uma betoneira de 400l de queda livre, sendo que as propriedades do concreto fresco foram obtidas a partir do ensaio de abatimento do tronco de cone (ABNT, NBR NM 67, 1998).

Todos os consolos moldados com concreto convencional seguiram o mesmo procedimento descrito a seguir:

- 1º Passo: Inicialmente foi feita a confecção das formas, corte, dobra e montagem das armaduras com arame 18 recozido;
- 2º Passo: Posteriormente, foi feita a aplicação do desmoldante nas fôrmas e o posicionamento da armadura utilizando espaçadores de 2,5 cm;
- 3º Passo: 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;
- 4º Passo: Foi realizada a concretagem e o adensamento dos modelos com vibrador de agulha;
- 5º Passo: Após 24h, as amostras cilíndricas foram desmoldadas e encaminhadas ao laboratório de estruturas do Bloco BK da UFCG, onde foram conservados em câmara úmida até a data do ensaio. Foi feita cura dos consolos ao ar livre, realizado diariamente a molhagem dos modelos.

Figura 36: Passo 1 - Armadura montada e fôrmas



Fonte: Autor

Figura 37: Passo 2 - Aplicação do desmoldante e posicionamento da armadura



Fonte: Autor

Figura 38: Passo 3 - Determinação do slump test



Fonte: Autor

Figura 39: Passo 4 - Concretagem dos modelos



Fonte: Autor

O procedimento para a concretagem dos consolos com fibra é praticamente o mesmo descrito acima, porém antes da terceira etapa durante a produção do concreto foi adicionado a quantidade de fibra necessária para garantir o percentual de 0,5% ao traço. Na etapa 4 foram retiradas 4 amostras do concreto convencional e 2 amostras do concreto com adição de fibra para realização do ensaio de resistência à compressão preconizado pela NBR 5739/2007.

Figura 40: Adição das fibras ao concreto



Fonte: Autor

O cronograma de moldagem dos corpos de prova está descrito na tabela 6.

Tabela 6: Cronograma de concretagem

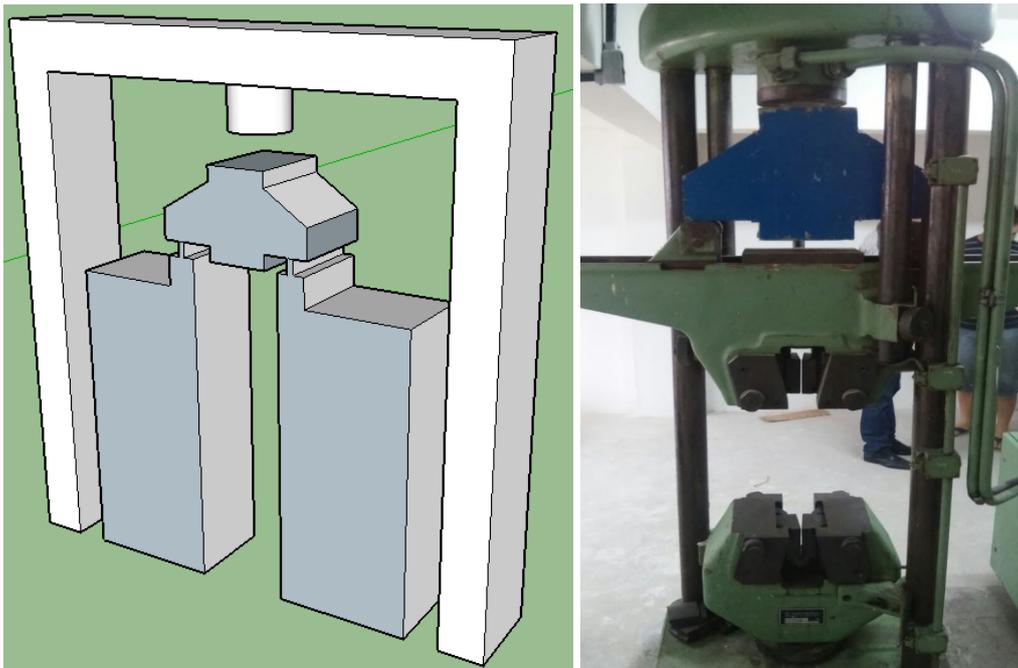
Modelo	Data da moldagem	Data do ensaio dos corpos-de-prova e dos modelos	Idade
M1	21/junho	13/julho	22
M2	07/junho	29/junho	22
M3	07/junho	29/junho	22

3.2.2.4. Ensaio destrutivo dos consolos

Todos os consolos e corpos-de-prova moldados foram ensaiados no laboratório de estruturas do bloco BK, na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Os modelos foram ensaiados utilizando a máquina LOSENHAUSEN, com capacidade de carga nominal máxima de 400kN. Diante das limitações, buscou-se determinar a força de início de fissuração de forma visual e a força máxima resistida pelos modelos.

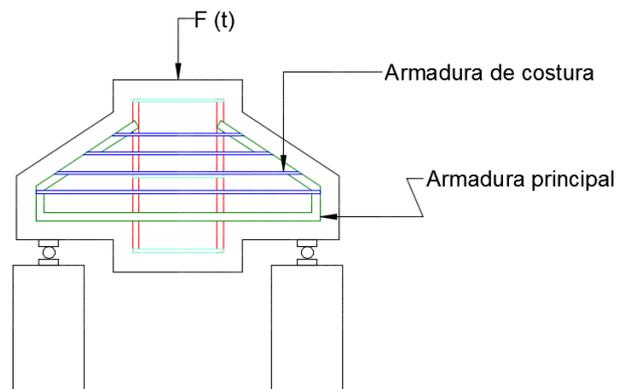
Por conveniência, os consolos foram posicionados com o topo para baixo de modo que o tirante principal aparecesse na face inferior sendo apoiado em roletes metálicos garantindo a rotulação dos apoios, como ilustra a figura 42. Sobre os apoios metálicos foram utilizados borrachas de modo que a distribuição de cargas ocorresse igualmente.

Figura 41: Posicionamento do modelo



Fonte: Autor

Figura 42: Esquema do ensaio



Fonte: Autor

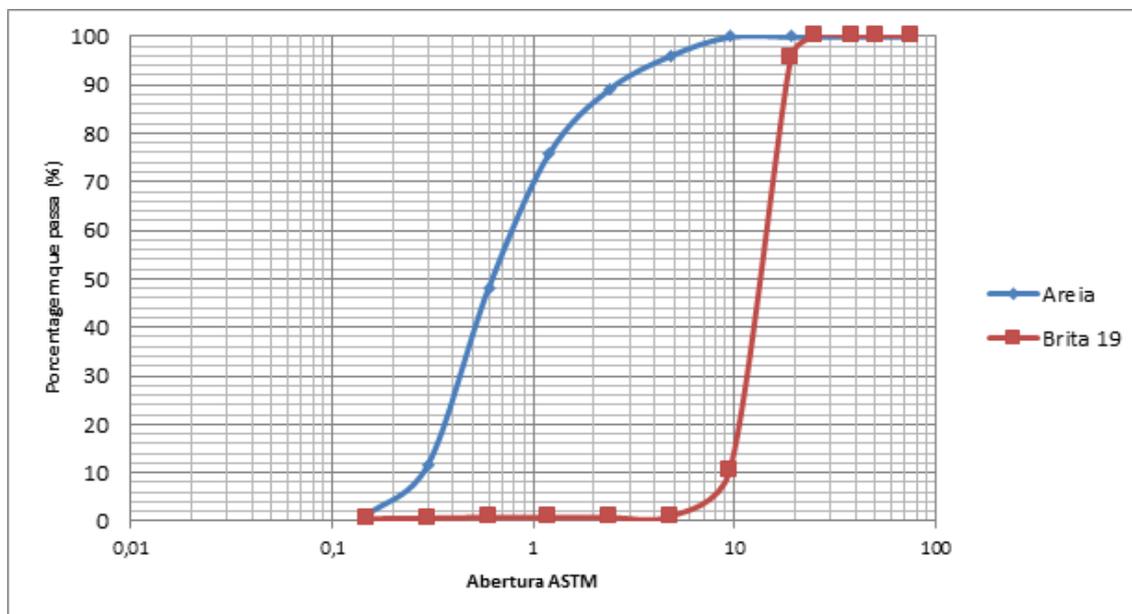
Durante o ensaio foi feito o acompanhamento das fissuras que surgiam na peça. A carga foi aplicada de forma contínua até que houvesse ruptura total do modelo, ao final do processo foi registrada a carga última suportada pelos consolos.

CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Os resultados obtidos no ensaio de granulometria são ilustrados na figura 43.

Figura 43: Granulometria dos agregados



Fonte: Autor

De acordo com o gráfico de granulometria podemos identificar que o agregado miúdo (areia) é um material bem graduado e o agregado graúdo (brita) é mau graduado. A tabela 7 apresenta as principais características dos agregados utilizados na produção do concreto.

Tabela 7: 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 ³)	2,62	2,65	-
Massa unitária (kg/m ³)	1,54	1,47	-

Os resultados obtidos serviram como parâmetros para determinação do traço de concreto utilizado na pesquisa.

4.2. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

4.2.1. CONCRETO

Os resultados obtidos para a resistência média à compressão do concreto aos 22 dias estão apresentados na tabela 8, para o concreto com fibra e sem fibra.

Tabela 8: Resultados de Compressão Simples

Modelo	Concreto	Corpo de prova	f_{c22} (MPa)	f_{cm22} (MPa)
M1	Sem fibra	CP 1	26,3	27,4
		CP 2	28,5	
M2	Sem fibra	CP3	25,5	28,05
		CP4	30,6	
M3	Com fibra	CP5	30,6	31,85
		CP6	33,1	

As fibras incorporadas ao concreto geraram um aumento médio de 14,95% à resistência a compressão dos corpos de prova ensaiados. Além disso podemos observar que nos CP's de concreto com adição de fibra o destacamento das placas de concreto ocorreu com menor intensidade quando comparado com os sem fibra, como ilustra a figura 44, caracterizando um possível aumento de ductilidade da peça.

Figura 44: Ruptura dos corpos de prova



Fonte: Autor

4.2.2. AÇO

Na tabela 9 estão apresentados os resultados da tensão última e da tensão de escoamento observadas durante a realização do ensaio.

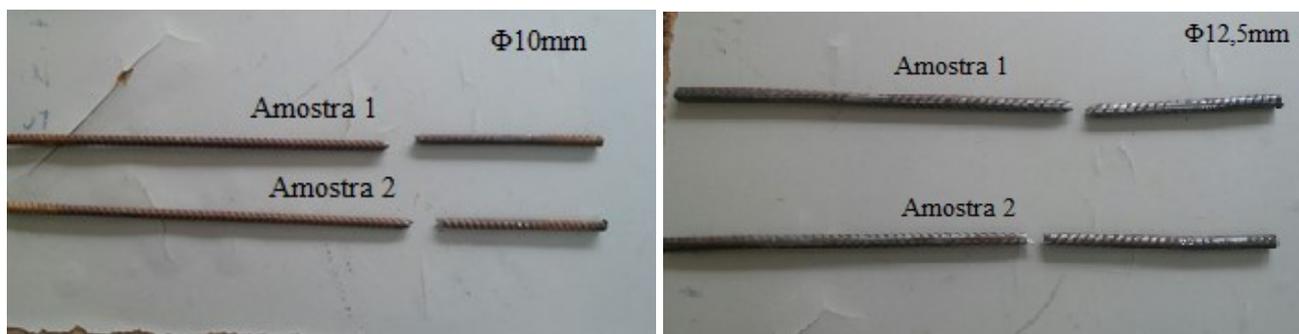
Tabela 9: Resultados de Resistência à Tração do aço

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

Para os aços ensaiados de CA50 espera-se que a tensão de escoamento seja próxima de 500 MPa, ou seja, os resultados indicados na tabela estão condizentes.

A figura 45 ilustra que as amostras tiveram formas de ruptura semelhantes rompendo um pouco abaixo do seu centro.

Figura 45: Ruptura das amostras



Fonte: Autor

4.2.3. CONSOLOS

4.2.3.1. Carga última

Durante a realização do ensaio destrutivo dos modelos, as cargas foram aplicadas gradativamente até a ruína dos consolos, registrando ao final a carga última. As figuras 46, 47 e 48 ilustram as formas de ruptura dos modelos.

Figura 46: Ruptura do modelo 1



Fonte: Autor

Figura 47: Ruptura do modelo 2



Fonte: Autor

Figura 48: Ruptura do modelo 3



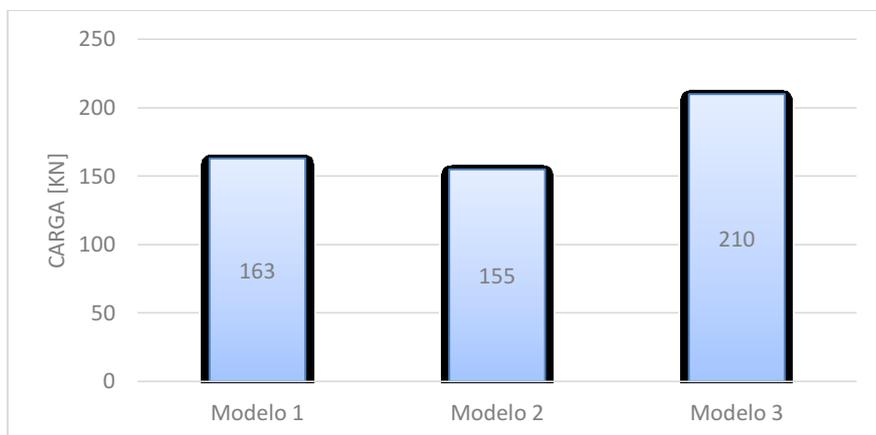
Fonte: Autor

Diante das fissuras identificadas na biela de compressão dos modelos pode-se observar que provavelmente não houve escoamento do tirante tracionado e que todos apresentaram como forma de ruptura característica o fendilhamento das bielas de concreto. Outro destaque está no destacamento das placas de concreto que ocorre nos modelos M1 e M2, porém o

modelo M3 não apresenta essa característica, indicando um possível aumento na ductilidade dos consolos.

A figura 49 apresenta as cargas últimas de cada modelo.

Figura 49: Cargas últimas



Fonte: Autor

A tabela 10 indica a comparação entre as cargas últimas dos modelos ensaiados em termos percentuais.

Tabela 10: Comparativo entre os modelos ensaiados

Relação entre os modelos	Diferença percentual de carga entre os modelos ensaiados (%)
M1-M2	5,17
M3-M1	28,83
M3-M2	35,48

A partir da tabela 10 podemos identificar que o modelo com fibra (M3) apresentou uma carga de ruptura 28,83% maior que o modelo com 100% da armadura de costura (M1) que é o modelo padrão proposto pela norma. Outro fator de destaque é a diferença de carga percentual entre os modelos M1 e M2, pois o segundo modelo apresenta metade da armadura de costura do primeiro, porém a carga de ruptura é apenas 5,17% inferior ao modelo 1, indicando pouca influência da armadura de costura na carga última de consolos.

4.2.3.2. Análise da fissuração nos modelos

Diante das limitações foi feito apenas o acompanhamento visual das aberturas de fissuras externas durante a realização dos ensaios, registrando a carga da primeira e segunda fissuras que surgiram em cada modelo. Em todos os modelos os panoramas de

fissuração foram semelhantes, sendo que as primeiras surgiram nas bielas de compressão dos modelos e aumentaram progressivamente com o aumento da carga aplicada. Posteriormente foram surgindo fissuras nas laterais dos modelos e no pilar, até o esmagamento das bielas de compressão, finalizando o ensaio.

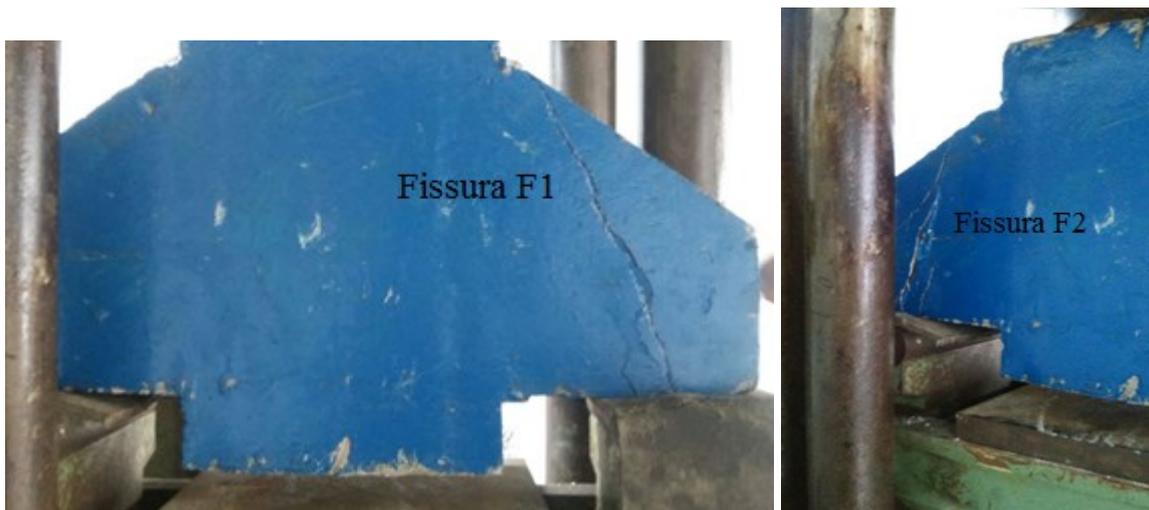
As figuras 50, 51, 52, 53 e 54 ilustram o panorama de fissuras dos modelos M1, M2 e M3 ao longo do ensaio.

Figura 50: Primeira (F1) e segunda (F2) fissuras do modelo M1



Fonte: Autor

Figura 51: Primeira (F1) e segunda (F2) fissuras do modelo M2



Fonte: Autor

Figura 52: Primeira (F1) e segunda (F2) fissuras do modelo M3



Fonte: Autor

Figura 53: Panorama de progressão de fissuras do modelo M1



Fonte: Autor

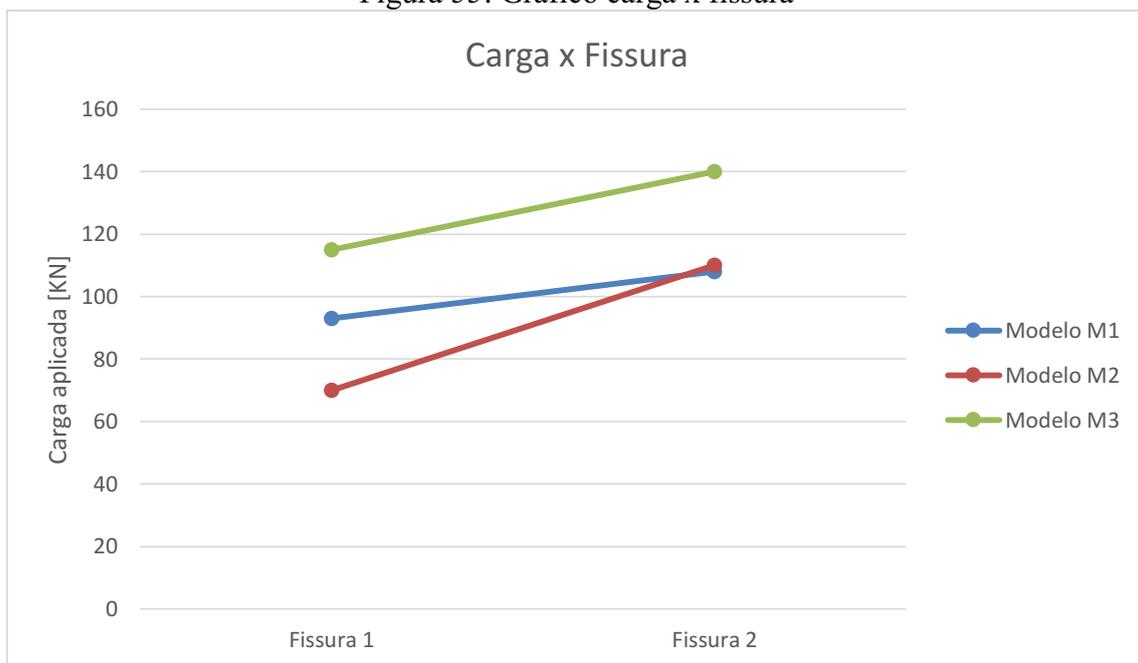
Figura 54: Panorama de progressão de fissuras do modelo M3



Fonte: Autor

Os resultados das cargas de fissuração para os modelos M1, M2 e M3 estão indicados na figura 55.

Figura 55: Gráfico carga x fissura



Fonte: Autor

A tabela 11 indica o resumo das cargas de início de fissuração relacionando ao modelo ensaiado.

Tabela 11: Resumo das cargas de início de fissuração

Modelo	Concreto	Armadura de costura	Fissura	Carga de fissuração (kN)
M1	Sem fibra	100%	F1	93
			F2	108
M2	Sem fibra	50%	F1	70
			F2	110
M3	Com fibra	50%	F1	115
			F2	140

No modelo M1, o início de fissuração se deu para a carga de 93 kN que corresponde a 57% da carga última. Para o modelo M2 a primeira fissura observada ocorreu para a carga de 70kN correspondente a 45,2% da carga última. Para o modelo M3 as fissuras só surgiram para a carga de 115kN equivalente a 54,8% da carga última aplicada a os consolos.

Pode-se observar que nos consolos com concreto sem adição de fibra após o surgimento da primeira fissura sua abertura se desenvolveu rapidamente, devido a concentração de tensões, algo que não ocorreu nos consolos com concreto com fibra que além de aumentar a carga de início de fissuração, fez com que as fissuras se propagassem mais lentamente, indicando também um possível aumentando de ductilidade do consolo.

Considerando os resultados da tabela 11, podemos comparar em termos percentuais a diferença de valores entre as cargas de fissuração dos modelos ensaiados, indicadas na tabela 11.

Tabela 12: Comparativo entre os modelos ensaiados

Relação entre os modelos	Fissura	Diferença percentual de carga entre os modelos ensaiados
M1 e M2	F1	32,9%
M3 e M1	F1	23,7%
M3 e M2	F1	64,3%

Comparando os modelos 1 e 3 os resultados da tabela indicam que os consolos de concreto com adição de fibra de aço (M3) possuíram carga de início de fissuração 23,7% maior do que os sem fibra (M1), ou seja, as fibras serviram como uma espécie de costura ao consolo aumentando sua resistência a fissuração. Outro ponto que se deve destacar é a importância da armadura de costura para controle de fissuração do concreto, pois comparando os modelos M1 e M2 há uma significativa diferença de carga de início

de fissuração do consolo com metade da armadura de costura para o consolo que apresenta 100% dessa armadura.

CAPÍTULO V - CONCLUSÕES

A pesquisa consistiu em estudar a proposta de substituição de parte da armadura de costura pela adição de fibra metálica a matriz de concreto, além de estudar a influência da armadura dos consolos em termos de redução de fissurações. A partir dos resultados obtidos pode-se avaliar critérios como a carga última, carga de fissuração, o panorama de fissuração e a forma de ruptura dos consolos.

Com isso conclui-se que:

- Consolos com adição de fibras de aço apresentaram um comportamento mais dúctil durante a aplicação do carregamento, não promovendo o destacamento de placas de concreto como foi o caso dos consolos de concreto sem adição de fibras;
- Foi constatado que a armadura de costura pouco influenciou na capacidade de carga dos consolos, mostrando que para uma redução de metade da armadura de costura proposta pela norma houve uma diminuição de apenas 5,17% da carga suportada. Porém, em termo de fissuração ela se mostrou bastante eficiente pois indicou uma diferença de 32,9% para carga de início de fissuração, entre o modelo 1 e o modelo 2;
- A partir dos resultados obtidos pode-se notar que a adição de fibras a matriz de concreto se mostrou bastante eficiente, pois além de aumentar a carga de início de fissuração em 23,7% e 64,3% comparado com os modelos 1 e 2, respectivamente, ela aumentou a capacidade de carga dos consolos em 28,83% quando comparados com consolos sem fibra;
- Com isso, apesar de a armadura de costura ser obrigatória em consolos curtos, em termos técnicos pode-se comprovar que a proposta de substituição parcial dessa armadura se mostrou bastante eficiente diante dos resultados expostos.

CAPÍTULO VI - 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:

- Proposta de substituição total da armadura de costura por um concreto com adição de fibras de aço, visando maior redução da taxa de armadura dos modelos.
- Estudar a adição de outras fibras buscando soluções mais viáveis economicamente;
- Realizar ensaios variando os percentuais de fibra utilizados na moldagem dos consolos, para verificar a variação da capacidade de carga dos modelos em função da adição de diferentes quantidades de fibras.
- Aumentar a quantidade de modelos ensaiados a fim de evitar possíveis erros experimentais;
- Realizar ensaios variando a relação a/d e estudar o comportamento dos consolos com adição de fibra;
- Realizar os mesmos ensaios, porém para consolos muito curtos e verificar a influência da adição de fibra metálica.

CAPÍTULO VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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 – NBR NM 67: Concreto – **Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. (Procedimento). Rio de Janeiro, Fev. 1998/8 pág.

ACI Committee 544, **State-of-the-art Report on Fiber Reinforced Concrete**, Detroit , USA, 2004;

ALBARRAN, E.G. Construção com Elementos Pré-Fabricados em Betão Armado. Dissertação de Mestrado. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 1998.

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

BASTOS, Paulo S.S . **Concreto com Fibras de Aço**, Tese (doutorado), Capítulo 4, São Paulo, 2000.

Belgo Bekaert. **Catálogo de fibras de aço Dramix**. Disponível em: <http://www.belgobekaert.com.br/Produtos/Documents/Catalogo-Dramix.pdf>. Acesso em 22/06/2017 às 23:25hrs.

BENTUR A., MINDESS, S., **Fibre reinforced cementitious composites**, Elsevier Applied Science, 1ed, London, England, 1990;

CAMPIONE, G., LA MENDOLA, L., MANGIAVILLANO, M. L. Steel fiber-reinforced concrete corbels: Experimental behavior and shear strength prediction. **ACI Structural Journal**. v. 104, nº 5, p. 570-579, 2007.

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.

CARVALHO, Roberto Chust, FIGUEREDO, Jasson R. Filho. Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118:2003. 3. ed. – São Carlos: EdUFSCar, 2013.

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.

EBELLING, E.B. Análise de Base de Pilares Pré-Moldados na Ligação com Cálce de Fundação. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2006.

EL DEBS, M. K. **Concreto Pré-Moldado: Fundamentos e Aplicações**. 1. ed. São Carlos: EESC-USP, 2000. 456 p.

FATTUHI, N. I. (1987). SFRC corbels tests. ACI Structural Journal, v. 84, n. 2, p. 119-123.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto com fibras de aço. Boletim Técnico (BT/PCC/260). São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Construção Civil, 2000.

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

FIGUEIREDO, A. D. – A nova especialização brasileira das fibras de aço para concreto In: 50º Congresso Brasileiro do Concreto, Salvador, 2008. **Anais**. Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON. São Paulo, 2008.

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

GRANDO, Fabiana, LUIZETTO, Eduardo C. **Estudo das soluções empregadas em consolos curtos monolíticos de pilares pré-moldados na região da cidade de Pato Branco – PR**. 2014. 132 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2014.

KRIZ, L. B.; RATHS, C. H. Connections proposals for reinforced concrete corbes. **PCI Journal**, v.10, n.1, p.16-61, Fev., 1965.

LEONHARDT, F.; MONNING, F. (1978). Construções de concreto. Rio de Janeiro, Interciência, v.2, p. 51-58.

LOPES, M. M. - **Substituição Parcial de Armadura de Flexão por Fibras de Aço em Vigas de Concreto**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2005;

MANGAT, P. S., AZARI, M. M., “Shrinkage of Steel fiber Reinforced Cement Composites”, **Materiaux et Construction (RILEM)**, v 21, pp 163-171, 1988;

MARKOVIC, I. **High-Performance Hybrid-Fibre Concrete - Development and Utilisation**. PhD Thesis, Technische Universiteit Delft, Delft, Netherlands, 2006;

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.

PARK, R.; PAULAY, T. (1983). Reinforced concrete structures. New York, John Wiley & Sons, p.690-700.

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

RECENA, Fernando A. P. Dosagem e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento Portland. 3. ed. – Porto Alegre: EDIPUCRS, 2011.

ROBINS, P., AUSTIN, S., CHANDLER, J., JONES, P. “Flexural Strain and Crack Width Measurement of Steel-fibre-reinforced Concrete by Optical Grid and Electrical Gauge Methods” **Cement and Concrete Research**, V 31, pp 719-729, January, 2001.

ROSSI, P. –“Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concretes”- Concrete International Magazine , Dec 2001;

SILVA, I.S. (2008). *Concreto de alta resistência: composição, propriedades e dimensionamento*. São Carlos. 129 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SIMPLÍCIO, Marcos Antônio de Souza. Estudos sobre a aderência entre barras de aço e concreto reforçado com fibras. Recife: O autor, 2008. 261 pg.

The constructor. Ensaio Slump test. Disponível em: <https://theconstructor.org/concrete/concrete-slump-test/1558/>. Acesso em 19/06/2017 às 21:22 hrs.

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

WEILER, B., GROSSE, C. “AUSZIEHVERHALTEN VON FASERN in STAHLFASERBETON “(em ingles). **Otto-Graf Journal**, Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland, 1996. Disponível no site <http://www.mpa.uni-stuttgart.de/publikationen/publikationen.html>. Acesso em dezembro de 2016.