

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

Walter Klein Pfeifer

**PROJETO DE CONSOLO DE CONCRETO ARMADO DE
ALTA RESISTÊNCIA COM USO DO MÉTODO DAS BIELAS
E TIRANTES**

Porto Alegre

julho 2017

WALTER KLEIN PFEIFER

**PROJETO DE CONSOLO DE CONCRETO ARMADO DE
ALTA RESISTÊNCIA COM USO DO MÉTODO DAS BIELAS
E TIRANTES**

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

Orientador: Alexandre Rodrigues Pacheco

Porto Alegre

julho 2017

WALTER KLEIN PFEIFER

**PROJETO DE CONSOLO DE CONCRETO ARMADO DE
ALTA RESISTÊNCIA COM USO DO MÉTODO DAS BIELAS
E TIRANTES**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado pela banca examinadora e, em sua forma final, pelo Professor Orientador.

Porto Alegre, julho de 2017

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

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Américo Campos Filho (UFRGS)
Dr. pela Universidade de São Paulo

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

RESUMO

Consolos são elementos estruturais prismáticos que servem de apoio para outros elementos estruturais, comumente usados para transferir esforços de vigas a pilares, especialmente em ligações de estruturas pré-fabricadas. Para dimensionamento desses elementos em concreto armado, pode-se fazer uso de métodos racionais, como o Método das Bielas e Tirantes, que propõe uma estrutura resistente, na forma de treliça, capaz de substituir a estrutura real. No entanto, com a crescente utilização de concretos de alto desempenho, os quais englobam também os concretos de alta resistência, se faz necessário estudos que avaliem a performance dos elementos estruturais construídos com esses materiais, principalmente daqueles com resistência característica à compressão acima dos 90 MPa, que não são abordados na NBR 6118 (2014). A proposta deste trabalho foi, portanto, de se projetar consolos com concreto de alta resistência, mas de acordo com a normatização vigente, avaliando-se o desempenho estrutural através de comparações com resultados experimentais disponíveis na literatura e análises computacionais pelo Método dos Elementos Finitos. Para o caso analisado neste trabalho, a NBR 6118 (2014) levou a resultados que puderam depois ser comprovados pela modelagem numérica.

Palavras-chave: Consolo de concreto armado. Concreto de alto desempenho.

Método das Bielas e Tirantes. ANSYS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Passarela construída com uso do concreto de pós-reativo, na cidade de Sheerbrooke, Canadá	15
Figura 2 - Curva tensão-deformação para CAD sem fibras	22
Figura 3 - Curva tensão-deformação para CAD com fibras (1.0 - 2.5% em volume).....	22
Figura 4 - Dimensões usadas na classificação de consolos	24
Figura 5 - Tipos de ruptura em consolos	26
Figura 6 - Modelo biela-tirante para consolos.....	27
Figura 7 - Detalhamento de armaduras de tirante e de costura	32
Figura 8 - Detalhamento de armadura de suspensão	32
Figura 9 - Região D (área sombreada) em um consolo	35
Figura 10 - Configurações típicas de campos de compressão	37
Figura 11 - Tipos de nós em uma região D	40
Figura 12 - Vistas lateral e frontal, respectivamente, da geometria do consolo escolhido, com unidades em centímetros	41
Figura 13 - Arranjo das cargas e distribuição das tensões pelo consolo	42
Figura 14 - Modelo biela-tirante proposto para o consolo de estudo	44
Figura 15 - Forças atuantes no equilíbrio do Nó 1	45
Figura 16 - Geometria do consolo experimental da literatura, com unidades em milímetros..	50
Figura 17 - Geometria do modelo experimental no Ansys.....	51
Figura 18 - Disposição das armaduras do modelo experimental no Ansys.....	52

Figura 19 - Vista superior do consolo, destacando em vermelho as ligações das faces dos aparelhos de apoio com as faces do consolo	52
Figura 20 - Instrumentação do experimento.....	53
Figura 21 - Situação experimental representada em modelo no Ansys.....	54
Figura 22- Curva tensão deformação do aço considerado na modelagem do experimento	55
Figura 23 - Curva tensão deformação do concreto utilizado na modelagem do experimento	57
Figura 24 - Tensões principais mínimas atuantes no momento da ruptura do experimento	58
Figura 25 - Fissuração e plastificação do consolo experimental.....	58
Figura 26 - Malha em elementos finitos do consolo projetado	60
Figura 27 - Posicionamento da armadura do consolo projetado	60
Figura 28 - Tensões principais mínimas para carregamento de 1304 kN	61
Figura 29 – Tensões principais mínimas na ruptura do consolo projetado	62
Figura 30 - Deformações principais máximas na ruptura do consolo projetado	62
Figura 31 - Ruptura do consolo projetado	63
Figura 32 - Curva deslocamento por carga obtida da modelagem	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplo de composição de concretos de diferentes tipos de desempenho	21
Tabela 2 - Classificação de consolos	25
Tabela 3 - Armaduras adotadas no projeto do consolo	47
Tabela 4 – Carregamentos admissíveis para o consolo projetado	49
Tabela 5 - Propriedades do aço considerado na modelagem do experimento.....	55
Tabela 6 - Propriedades do concreto utilizado na modelagem do experimento.....	56

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CAD – Concreto de Alto Desempenho

MBT – Método das Bielas e Tirantes

NBR – Norma Brasileira

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

LISTA DE SÍMBOLOS

a – distância da carga aplicada à face do apoio do consolo

A – ponto extremo sobre a resultante de tração, ao se subtrair o cobrimento e o diâmetro do estribo externo

AB – distância entre os pontos A e B

AC – distância entre os pontos A e C

$A_{s, cost}$ – área de armadura de costura

$A_{s, min}$ – área de armadura mínima

$A_{s, tir}$ – área de armadura de tirante

A_{sv} – área de armadura para esforços verticais necessária

B – ponto de encontro sobre a resultante de tração, do prolongamento da força resultante externa atuante sobre o consolo

BC – distância entre os pontos B e C

b_w – largura do consolo, normal à seção do mesmo, em cm;

c – cobrimento

C – ponto sobre a resultante de tração, igualmente distanciado de A , mas no sentido oposto ao ponto B

d – altura útil do consolo

d' – altura adjacente à útil do consolo, de forma que a soma das duas é igual à altura total do mesmo, acrescido da altura do aparelho de apoio, se for o caso

D – esforço atuante na biela de compressão

f_{cd} – resistência à compressão de cálculo do concreto

f_{cd}^* – resistência limite à compressão de cálculo do concreto

f_{cd1} – tensão resistente máxima no concreto, em verificações pelo MBT, em regiões com tensões de compressão transversal ou sem tensões de tração transversal e em nós onde confluem somente bielas de compressão

f_{cd2} – tensão resistente máxima no concreto, em verificações pelo MBT, em regiões com tensões de tração transversal e em nós onde confluem dois ou mais tirantes tracionados

f_{cd3} – tensão resistente máxima no concreto, em verificações pelo MBT, em nós onde conflui um tirante tracionado

f_{ck} – resistência característica à compressão do concreto

F_d – esforço vertical de cálculo que atua sobre o consolo

F_i – esforço na biela ou tirante i

f_{yd} – tensão de escoamento de cálculo do aço

h – altura do consolo

H_d – esforço horizontal de cálculo que atua sobre o consolo

l – largura do pilar adjacente ao consolo

l_i – comprimento do elemento i

M_d – momento de cálculo

R_{sd} – valor de cálculo da força de tração que atua sobre o tirante

R_{st} – valor característico da força de tração que atua sobre o tirante

s – espaçamento da armadura de costura

v – largura da biela de compressão

z – dimensão em relação ao eixo global vertical da biela de compressão

α – ângulo de inclinação

α_{v2} – coeficiente que depende da resistência à compressão do concreto

ϕ – diâmetro da seção de armadura

σ – tensão normal

σ_c – tensão atuante sobre a biela comprimida do consolo

σ_{cd} – resistência de cálculo uniaxial do concreto

ε_{mi} – deformação média do elemento i

τ_{wu} – tensão de cisalhamento

γ – ângulo da força resultante em relação à vertical

θ – ângulo de inclinação da biela comprimida

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	DIRETRIZES DA PESQUISA.....	17
2.1	QUESTÕES DE PESQUISA.....	17
2.2	OBJETIVOS DE PESQUISA.....	17
2.2.1	<i>Objetivo principal.....</i>	<i>17</i>
2.2.2	<i>Objetivos secundários</i>	<i>17</i>
2.3	PRESSUPOSTO.....	17
2.4	LIMITAÇÕES	18
2.5	DELINEAMENTO	18
3	CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO.....	20
3.1	COMPOSIÇÃO E MICROESTRUTURA	20
3.2	PROPRIEDADES	21
3.2.1	<i>Resistência à compressão.....</i>	<i>21</i>
3.2.2	<i>Resistência à tração</i>	<i>22</i>
3.2.3	<i>Módulo de elasticidade.....</i>	<i>22</i>
3.2.4	<i>Fluência.....</i>	<i>22</i>
3.2.5	<i>Durabilidade.....</i>	<i>23</i>
4	CONSOLOS.....	24
4.1	DEFINIÇÃO.....	24
4.2	TIPOS DE RUPTURA	25
4.2.1	<i>Ruptura por flexão.....</i>	<i>25</i>
4.2.2	<i>Ruptura por fendilhamento da biela comprimida</i>	<i>25</i>
4.2.3	<i>Ruptura por cisalhamento</i>	<i>25</i>
4.2.4	<i>Ruptura por falha na ancoragem</i>	<i>25</i>
4.2.5	<i>Ruptura por esmagamento</i>	<i>26</i>
4.2.6	<i>Ruptura por ações horizontais</i>	<i>26</i>
4.3	COMPORTAMENTO ESTRUTURAL.....	27
4.3.1	<i>Verificação da biela comprimida</i>	<i>28</i>
4.3.2	<i>Transmissão de esforços horizontais.....</i>	<i>29</i>
4.4	DIMENSIONAMENTO.....	29
4.4.1	<i>Armadura do tirante</i>	<i>29</i>
4.4.2	<i>Armadura de costura.....</i>	<i>31</i>

4.4.3	<i>Armadura de suspensão</i>	32
4.4.4	<i>Aparelho de apoio</i>	33
5	MÉTODO DAS BIELAS E TIRANTES	34
5.1	GEOMETRIA DO MODELO	34
5.2	REGIÕES B E D DA ESTRUTURA	35
5.3	DETERMINAÇÃO DO CAMINHO DAS FORÇAS	36
5.4	DIMENSIONAMENTO	36
5.4.1	<i>Bielas</i>	36
5.4.2	<i>Tirantes</i>	38
5.4.3	<i>Nós</i>	39
6	PROJETO DO CONSOLO	41
6.1	GEOMETRIA	41
6.2	CARGAS CONSIDERADAS NO DIMENSIONAMENTO	42
6.3	VERIFICAÇÃO DA BIELA COMPRIMIDA	45
6.4	CÁLCULO DAS ARMADURAS	46
6.5	CARREGAMENTO ADMISSÍVEL DO CONSOLO PROJETADO	47
7	MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS	50
7.1	CALIBRAGEM DO MODELO A PARTIR DE EXPERIMENTO DISPONÍVEL NA LITERATURA	50
7.1.1	<i>Modelo básico e condições de equilíbrio</i>	50
7.1.2	<i>Propriedades dos materiais utilizados no modelo</i>	54
7.1.3	<i>Reprodução dos resultados experimentais</i>	57
7.2	MODELAGEM DO CONSOLO PROJETADO	59
7.2.1	<i>Resultados obtidos</i>	61
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
	REFERÊNCIAS	66
	APÊNDICE A	68

1 INTRODUÇÃO

Com a evolução do cálculo estrutural notada nos últimos anos, muito disso em decorrência do desenvolvimento de novas e sofisticadas ferramentas computacionais, aliado com um maior conhecimento do comportamento e da microestrutura dos materiais utilizados, se possibilita, cada vez mais, o projeto de estruturas mais arrojadas e de maior desempenho. Nesse tipo de aplicação, os chamados concretos convencionais muitas vezes deixam de atender os requisitos estruturais necessários, evidenciando a necessidade da utilização de concretos de maior desempenho.

O emprego mais racional desse material também leva ao melhor aproveitamento dos recursos naturais, reduzindo os efeitos negativos no meio ambiente, pois as estruturas passam a ter maior durabilidade e o consumo de matéria-prima passa a ser menor. Uma evidência disso é o relatório do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, que quantificou o consumo anual no Brasil de cimento Portland, material utilizado na produção de concreto, em torno de 65,3 milhões de toneladas para o ano de 2015. E por menor que seja a diminuição no consumo, por se tratar de um material amplamente utilizado, os impactos já seriam significativos.

Os motivos acima citados já justificam a utilização dos concretos de alto desempenho, que no Brasil vêm sendo empregado na construção civil há algum tempo. Um exemplo dessa aplicação é o edifício e-Tower, da cidade de São Paulo, tido como um dos edifícios construídos com concreto de resistência à compressão mais alto no país na década passada (Helene e Hartman, 2003), com 125 MPa de resistência à compressão média, 115 MPa de resistência característica estimada e 80 MPa de resistência de projeto.

Em outras partes do mundo, há registros de concretos com resistências ainda mais elevadas já utilizados em obras de construção civil, como é o caso do edifício Taisei Technology Center, no Japão, onde foram utilizados concretos com f_{ck} de 300 MPa (Taisei Annual Report, 2013, p.21).

No ano de 1993, a empresa francesa Bouygues desenvolveu uma geração ainda mais avançada de concretos, os chamados concretos de pós-reativos. Apesar do relativo pouco tempo de pesquisa nele aplicado, devido ao seu recente surgimento, esse tipo de concreto já é inclusive aplicado no campo da construção civil, muito em consequência do fato que ele possui elevadas propriedades mecânicas e excelente durabilidade. Esses concretos podem atingir resistências

na ordem dos 800 MPa, também tendo outras características, como a baixa porosidade e a elevada tenacidade (Song et al., 2016, p. 1).

Exemplos de aplicações dos concretos de pós-reativos não são poucos, podendo ser citada a primeira passarela feita com o material em questão, localizada em Sherbrooke, na província do Québec, Canadá, que adota uma estrutura treliçada de 60 metros de vão, sendo as treliças feitas em aço (Song et al., 2016, p. 1). Nessa estrutura, o concreto de pós-reativo é utilizado tanto na laje da passarela, como no preenchimento dos tubos de aço treliçados, conforme pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Passarela construída com uso do concreto de pós-reativo, na cidade de Sheerbrooke, Canadá



(fonte: disponível em
<<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/hpc/13060/images/fig18.jpg>>.
Acesso em 19 abr. 2017)

A utilização de concretos de alta resistência e, de modo geral, desempenho, implica, porém, em cuidados especiais com os elementos a serem dimensionados, entre eles os consolos, focos do presente trabalho. Como a utilização desses tipos de concretos implica em estruturas mais leves, de menor espessura e com a possibilidade de vencerem vãos maiores, é esperado também a mudança de seus comportamentos estruturais, que passam para um regime onde se observam

rupturas mais frágeis, evidenciando o maior cuidado necessário com a distribuição das tensões e critérios de falha.

Para consolos produzidos em concreto armado, que se tratam de elementos especiais prismáticos, não valem simplificações como as adotadas pela clássica Hipótese de Bernoulli, que enuncia que todas seções planas permanecem planas após a flexão, necessitando, portanto, de abordagens racionais para dimensionamento estrutural, neste caso sendo utilizado um modelo de bielas e tirantes.

Sendo também regiões muito singulares, os consolos ainda necessitam de avaliações mais detalhadas dos esforços solicitantes que neles atuam e, para este propósito, um modelo de elementos finitos, que esteja bem calibrado com resultados reais (experimentais), pode dar uma noção mais exata acerca desses esforços e das formas com que eles se propagam em um consolo.

O presente trabalho procura, portanto, situar e sustentar a utilização de consolos construídos com concretos de alta resistência, a partir de um projeto de dimensionamento estrutural seguindo as premissas normativas vigentes, para posteriormente se aplicar esses resultados encontrados em uma modelagem numérica computacional, com o uso do software ANSYS, a partir da qual se farão possíveis avaliações dos esforços solicitantes e das condições de segurança da estrutura. Com isso, busca-se, também, verificar a validade da normatização vigente para o projeto de consolos de concreto armado com resistências superiores a 90 MPa, dado que a mesma é limitada a essa resistência.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

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

2.1 QUESTÕES DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: as premissas normativas atuais são suficientes para o projeto de consolos de concreto armado de alta resistência?

2.2 OBJETIVOS DE PESQUISA

Os objetivos de pesquisa podem ser classificados em principal e secundário, e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é verificar se as premissas normativas atuais de dimensionamento estrutural para consolos de concreto armado conseguem atender os requerimentos de comportamento estrutural se concretos de alto desempenho forem considerados, ou seja, aqueles com resistências acima das limitações de norma.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários do trabalho se concentram nas avaliações que se fará dos procedimentos metodológicos. Em particular, se o Método das Bielas e Tirantes se adaptaria bem às condições proporcionadas pelos concretos de alta resistência. Outro aspecto a ser avaliado na metodologia seria se as análises obtidas via Método dos Elementos Finitos (ANSYS) poderiam reproduzir adequadamente resultados reais (experimentos).

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho proposto está sujeito à premissa de que a simulação computacional do Método dos Elementos Finitos, a partir do ANSYS, consegue representar satisfatoriamente o comportamento real de consolos de concreto armado de alto desempenho.

2.4 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) os elementos estruturais a serem estudados (consolos) terão formatos e dimensões pré-estabelecidos, não cobrindo toda uma variedade de combinações que se poderia ter;
- b) as resistências dos concretos consideradas estarão limitadas a valores encontrados em ensaios experimentais disponibilizados na literatura;
- c) não serão avaliadas as condições estruturais dos pilares adjacentes aos consolos, nem as condições de ancoragem das armaduras, por não serem objetos de estudo do presente trabalho.

2.5 DELINEAMENTO

O trabalho será realizado com base nas etapas a seguir, também descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) aplicação do Método das Bielas e Tirantes;
- c) construção do modelo computacional;
- d) calibração do modelo computacional;
- e) análise dos resultados;
- f) conclusões e sugestões.

A **pesquisa bibliográfica** foi realizada de modo a se construir o entendimento da produção, do uso atual e das propriedades de concretos de alta resistência, a definição e os comportamentos estruturais de consolos de concreto armado, a descrição do dimensionamento pelo Método das Bielas e Tirantes, e a abordagem do Método dos Elementos Finitos pelo ANSYS. A pesquisa se inicia junto ao presente trabalho e se estenderá até o fim do mesmo, com objetivo de mantê-lo atualizado em relação às publicações que forem sendo feitas e que sejam pertinentes ao tema aqui discorrido.

A **aplicação do Método das Bielas e Tirantes** (MBT) decorrerá da pesquisa bibliográfica, a fim de se dimensionar os consolos de concreto armado pela abordagem normativa vigente. A partir dessa aplicação, se obterão resultados de dimensionamento a serem comparados na sequência do trabalho.

Com uso do software ANSYS, será, então, **construído o modelo computacional** a partir do Método dos Elementos Finitos. Para efeitos de **calibração do modelo computacional** serão utilizados os dados experimentais levantados na literatura. Os modelos calibrados do ANSYS servirão, mais adiante, como base de comparação para se avaliar o dimensionamento dos elementos estruturais conforme as normativas atuais.

Por último, será feita uma **análise dos resultados** obtidos, da qual serão tiradas **conclusões e sugestões** pertinentes. O desempenho dos modelos realizados via ANSYS poderão ser confrontados com os resultados experimentais disponíveis e, depois, servirão para se avaliar o desempenho dos modelos obtidos via MBT e normatização vigente para os concretos de alto desempenho (resistência) considerados.

3 CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

Novos tipos de estruturas e novas tecnologias de construção cada vez mais exigem maiores requerimentos para os materiais empregados, e exatamente dentro dessa tendência surgem os concretos de alto desempenho, que são concretos desenvolvidos com certas características desejadas para aplicações específicas. Dessa forma, é possível alcançar melhores performances da estrutura como um todo, do ambiente ao qual ela será exposta e dos carregamentos ao qual será sujeita em sua vida útil.

Um dos grandes avanços nessa área foi o desenvolvimento dos concretos chamados como de ultra alto desempenho, com f_{ck} superiores a 150 MPa e notável aumento na durabilidade. Segundo Sun et al. (2015, p. 587), a excelente performance desses materiais os concedem alto potencial para aplicações em estruturas de forma econômica e sustentável, sendo fortemente acreditado que eles estejam bem adequados para utilização na próxima geração das construções de infraestrutura.

A produção desse tipo de material envolve metodologias especiais com relação às misturas utilizadas, à aplicação e à cura do mesmo.

3.1 COMPOSIÇÃO E MICROESTRUTURA

Com o avanço de tecnologias de análise de materiais, o processo de hidratação e desenvolvimento da microestrutura dos concretos de alto desempenho passaram a ser melhor entendidos, possibilitando aos pesquisadores desenvolverem formas de produção com maior sustentabilidade e custo de material reduzido. Assim, materiais cimentícios suplementares, como cinzas volantes, escórias granuladas de alto forno e fumo de sílica passam a ser usados, reduzindo, em parte, o consumo de cimento. Além disso, os concretos de alto desempenho podem agora ser preparados com temperaturas normais de cura, em contrapartida às altas temperaturas necessárias anteriormente.

Segundo Sun et al. (2015, p. 589), após décadas de desenvolvimento, uma das melhores maneiras de se obter concretos de alto desempenho é através da utilização de cimentos de alta qualidade, relações baixas de água/cimento e água/ligante, com adição de materiais cimentícios suplementares, agregados finos, superplastificante e fibras de aço ou orgânicas. O princípio chave da questão está em melhorar a homogeneidade, a partir da eliminação de agregados

gráudos, e a densidade de empacotamento da mistura, seguindo uma melhor distribuição dos tamanhos de partículas dos materiais.

Tuan (2011, p. 13) comparou as composições de concretos de diferentes tipos de desempenho, cujos detalhes de análise se encontram na Tabela 1.

Tabela 1 - Exemplo de composição de concretos de diferentes tipos de desempenho

Componente (em kg/m ³)	Concreto		
	Convencional	Alto Desempenho	Ultra Alto Desempenho
Cimento Portland	< 400	400	600 - 1000
Agregado graúdo	1000	900	-
Areia	700	600	1000 - 1200
Fumo de sílica	-	40	50 - 300
Reforço/fibras	-	-	40 - 250
Superplastificante	-	5	10 - 70
Água	> 200	100 - 150	110 - 260
Outros parâmetros			
Maior dimensão agregado (mm)	19,0 - 25,5	9,5 - 12,5	0,15 - 0,6
Relação água/cimento (massa)	0,4 - 0,7	0,24 - 0,38	0,14 - 0,27
Relação água/ligante (massa)	-	< 0,28	< 0,27

(fonte: Tuan, 2011, p. 13, tradução nossa)

3.2 PROPRIEDADES

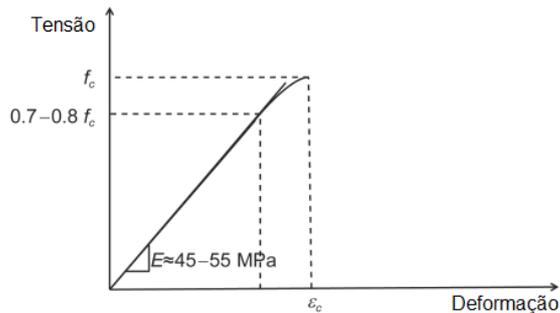
Neste item serão brevemente descritas algumas propriedades e características dos concretos de alto desempenho, como proposto por Sun et al. (2015, p. 591-592, tradução nossa).

3.2.1 Resistência à compressão

A resistência característica à compressão é uma propriedade muito importante no projeto de qualquer estrutura de concreto, e parte de valores na faixa de 120 MPa nos concretos de alto desempenho. Esses concretos apresentam comportamento elástico linear até cerca de 70 a 80% da resistência compressiva. A falha por compressão para concretos sem uso de fibras é de natureza frágil, sendo que a Figura 2 mostra uma típica curva tensão-deformação para este caso. A adição de fibras, por sua vez, pode melhorar esse comportamento, conforme pode ser observado na Figura 3. De modo geral, mudanças que melhoram a resistência do concreto

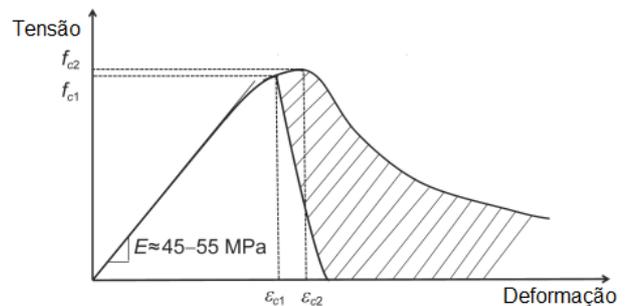
também interferem positivamente em aspectos de performance e durabilidade, portanto as características de concretos de alta resistência são similares às de concretos de alto desempenho.

Figura 2 - Curva tensão-deformação para CAD sem fibras



(fonte: Sun et al., 2015, p.591)

Figura 3 - Curva tensão-deformação para CAD com fibras (1.0 - 2.5% em volume)



(fonte: Sun et al., 2015, p.591)

3.2.2 Resistência à tração

A resistência à tração do CAD varia com a utilização ou não de fibras, ainda dependendo do tipo de fibra utilizada, mas fica, normalmente, na faixa dos 7 aos 15 MPa. Assim como na resistência à compressão, o não uso de fibras acarreta em uma ruptura mais frágil, enquanto que o uso delas torna o comportamento à tração dúctil.

3.2.3 Módulo de elasticidade

Devido a sua densa microestrutura, o módulo de elasticidade do CAD é mais alto que o de concretos convencionais quando o mesmo tipo e quantidade de agregados são utilizados. Normalmente esses valores variam entre 40 a 70 GPa, dependendo da composição da mistura, dos agregados utilizados e do regime de cura.

3.2.4 Fluência

A fluência de concretos de alto desempenho é, de modo geral, menor que a de concretos convencionais. A fluência específica do CAD, expressa em função da tensão aplicada, fica geralmente na faixa entre 5 a 47 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$, enquanto que a de concretos convencionais fica na faixa entre 35 a 140 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$.

3.2.5 Durabilidade

Os concretos de alto desempenho possuem ótima qualidade em termos de durabilidade, em muito determinada pela sua microestrutura, especialmente sua porosidade. Enquanto que nos concretos convencionais há transporte de água e agentes nocivos, como cloretos e sulfetos, por capilaridades, os CAD são considerados como não tendo capilaridade. Por essa razão, o CAD é considerado um material com ótima resistência a agentes nocivos.

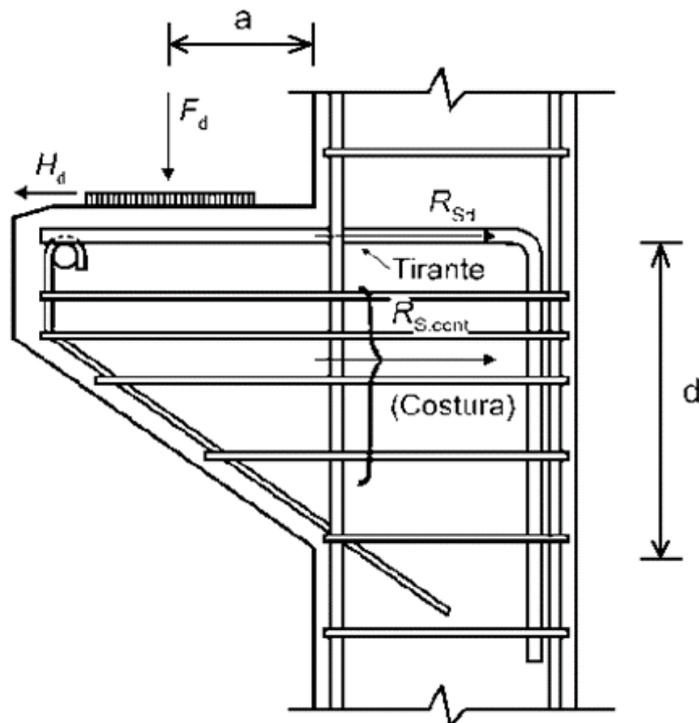
4 CONSOLOS

Neste capítulo será feita uma introdução aos consolos, onde será apresentada sua definição, seu comportamento estrutural e as abordagens de cálculo recomendadas pela literatura e pela norma.

4.1 DEFINIÇÃO

Consolos são elementos estruturais prismáticos que servem de apoio para outros elementos, sendo comumente usados para transferir esforços de vigas a pilares, sendo usados, por exemplo, em pontes e estruturas pré-fabricadas. Em uma definição mais específica, a NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 198) define como consolo os “elementos em balanço nos quais a distância (a) da carga aplicada à face do apoio é menor ou igual a altura útil (d) do consolo [...]”, vide Figura 4, classificando-os em dois tipos, como curtos ou muito curtos, conforme sua relação a/d . Ainda segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 198), elementos nos quais a é maior que d devem ser tratados como vigas em balanço, e não como consolos. A Tabela 2 mostra os intervalos dessas relações e suas respectivas classificações.

Figura 4 - Dimensões usadas na classificação de consolos



(fonte: adaptado da NBR 6118, 2014, p. 201)

Tabela 2 - Classificação de consolos

	Consolo muito curto	Consolo curto	Viga em balanço
NBR 6118 (2014)	$a/d \leq 0,5$	$0,5 < a/d \leq 1,0$	$a/d > 1,0$

(fonte: elaborado pelo autor)

4.2 TIPOS DE RUPTURA

Park e Paulay (1974, p. 692) descrevem seis tipos de ruptura possíveis para consolos de concreto armado, a serem descritos a seguir.

4.2.1 Ruptura por flexão

Ocorre devido ao escoamento excessivo da armadura principal, causando grandes fissuras na parte superior e esmagamento do concreto na parte inferior do consolo, como observado na Figura 5a.

4.2.2 Ruptura por fendilhamento da biela comprimida

Após a formação de fissuras por flexão, passam-se a formar também fissuras nas bielas comprimidas. A ruína se dá ultimamente por cisalhamento num estado de compressão das bielas, conforme Figura 5b.

4.2.3 Ruptura por cisalhamento

Uma série de fissuras curtas e inclinadas podem acarretar uma falha por cisalhamento, uma vez que elas se interconectem, separando o próprio consolo da face do pilar, conforme mostrado na Figura 5c.

4.2.4 Ruptura por falha na ancoragem

Ocorre quando a força é aplicada muito próxima à extremidade do consolo, de forma que a ancoragem não envolve adequadamente o carregamento, gerando fissuras que seguem o contorno da amarração, conforme Figura 5d.

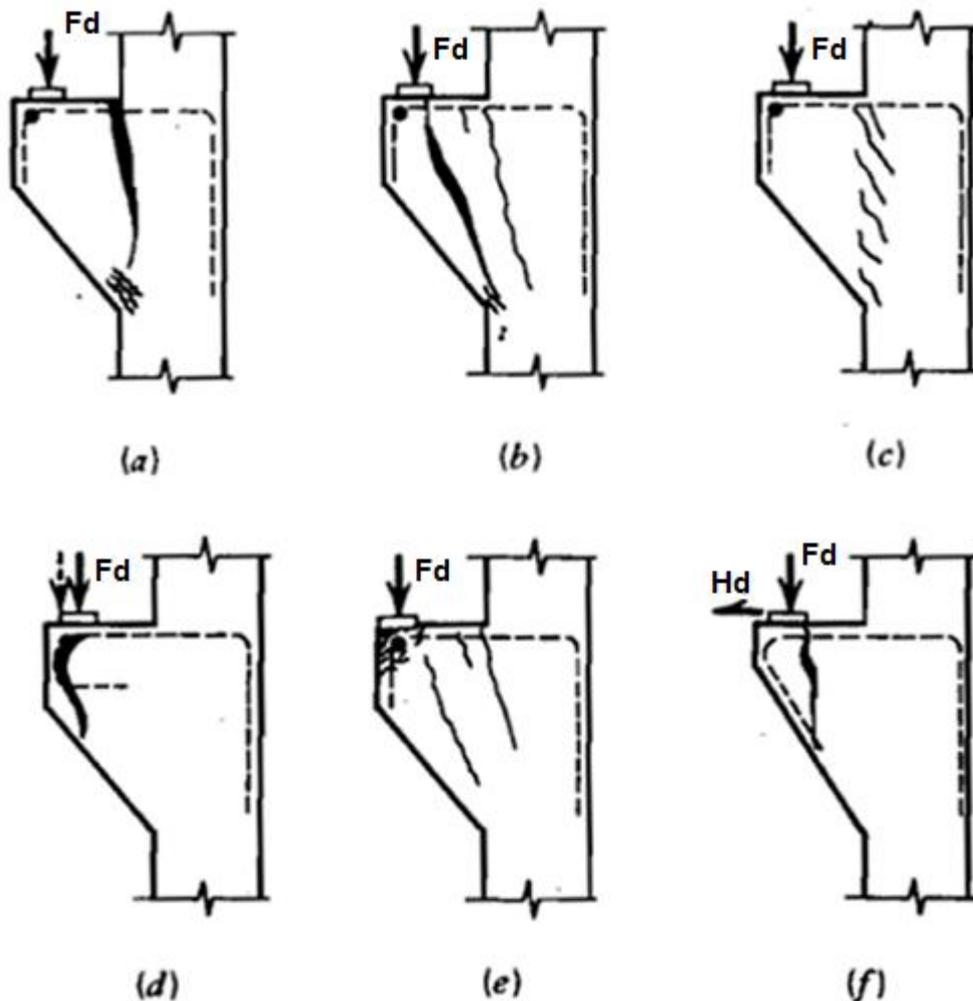
4.2.5 Ruptura por esmagamento

Ocorre quando a região de aplicação da força é muito estreita ou flexível, gerando falhas por esmagamento local, conforme Figura 5e.

4.2.6 Ruptura por ações horizontais

Quando em adição ao carregamento vertical, também há um horizontal, muitos dos mecanismos de falha descritos anteriormente são acentuados. Essa ação pode surgir de efeitos dinâmicos, ou ser induzida por encolhimentos, deformações e variações de temperaturas. Os efeitos causados por ações horizontais podem ser visualizados na Figura 5f.

Figura 5 - Tipos de ruptura em consolos: (a) por flexão; (b) por fendilhamento da biela comprimida; (c) por cisalhamento; (d) por falha na ancoragem; (e) por esmagamento; (f) por ações horizontais



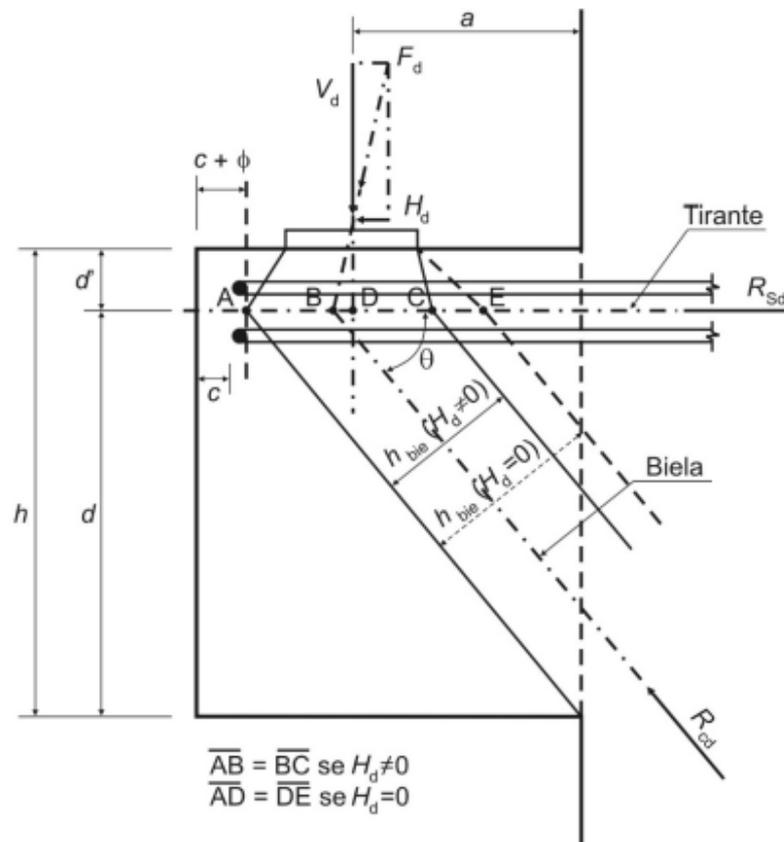
(fonte: adaptado de PARK; PAULAY, 1974, p. 693)

4.3 COMPORTAMENTO ESTRUTURAL

Sendo elementos tridimensionais, nos quais as três dimensões são significantes, isto é, possuem a mesma ordem de grandeza, os consolos possuem trechos de singularidade nos quais não vale a teoria geral da flexão, evidenciando, assim, a necessidade da adoção de métodos específicos de cálculo.

Os consolos curtos têm um comportamento típico que pode ser descrito por um modelo biela-tirante, conforme pode ser observado na Figura 6. Neste modelo, o tirante se ancora na biela sob a carga externa vertical F_d por um lado, e no pilar ou apoio do outro. A biela inclinada, por sua vez, se faz presente em toda a altura disponível do consolo, desde a carga até a face do pilar ou apoio.

Figura 6 - Modelo biela-tirante para consolos



(fonte: NBR 6118, 2014, p. 199)

Já nos consolos muito curtos, conforme a biela se encurva ou arqueia no plano do consolo, se faz maior a importância da armadura de costura, passando a ter maior participação na resistência do consolo. Apesar disso, pode-se dizer que, de modo geral, os comportamentos dos consolos curtos e dos muito curtos são parecidos.

A NBR 6118 (2014, p. 199) recomenda que alguns aspectos sejam seguidos para um adequado comportamento estrutural do consolo:

- a) ancoragem adequada do tirante, abraçando a biela logo abaixo do aparelho de apoio;
- b) a taxa de armadura do tirante a ser considerada no cálculo deve ser limitada superiormente, de modo a garantir o escoamento, antes da ruptura do concreto;
- c) verificação da resistência à compressão da biela ou do cisalhamento equivalente na face do pilar, garantindo com segurança adequada que a ruptura frágil, pela biela, seja afastada. Para a verificação da biela pode ser considerada a abertura de carga sob a placa de apoio, conforme indicado na Figura 6, limitada a uma inclinação máxima de 1:2 em relação à vertical, nos pontos extremos A e C (ou E) da área de apoio ampliada;
- d) é fundamental a consideração de esforços horizontais no dimensionamento dos consolos e o seu consequente efeito desfavorável na inclinação da resultante F_d , conforme Figura 6.
- e) no caso geral em que existam cargas horizontais, transversais ou excentricidade da carga vertical na largura do consolo, diz-se que existe torção do consolo; o comportamento estrutural que se observa, nesse caso, é o de um modelo biela-tirante fora do plano médio do consolo, usualmente com biela e tirante mais estreitos, ou seja, não se forma a treliça espacial observada na torção de vigas, uma vez que falta comprimento suficiente para tal.

4.3.1 Verificação da biela comprimida

Para os consolos curtos, segundo recomendação da NBR 9062 (2006, p. 26), a tensão de compressão na biela inclinada não deve ultrapassar:

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

Já para os consolos muito curtos, ainda segundo a NBR 9062 (2006, p. 26), essa verificação é realizada em função da tensão de cisalhamento, conforme equação 1.

$$\tau_{wu} = 0,27 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) f_{cd} \leq 8 \text{ MPa} \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

τ_{wu} = tensão de cisalhamento, em MPa;

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

f_{cd} = resistência de projeto à compressão do concreto, em MPa.

4.3.2 Transmissão de esforços horizontais

Nos casos onde não haja impedimento ao movimento horizontal, a NBR 9062 (2006, p. 27) permite estimar a força horizontal H_d a partir da vertical F_d , a partir das seguintes relações:

- a) $H_d = 0,8 F_d$ para juntas a seco;
- b) $H_d = 0,5 F_d$ para elemento assentado com argamassa;
- c) $H_d = 0,16 F_d$ para almofadas de elastômero;
- d) $H_d = 0,08 F_d$ para almofadas revestidas de plástico politetrafluoretileno (PTFE);
- e) $H_d = 0,25 F_d$ para apoios realizados entre chapas metálicas não soldadas;
- f) $H_d = 0,4 F_d$ para apoios realizados entre concreto e chapas metálicas;
- g) para concretagens in loco, ligação por meio de solda ou apoio com graute, é necessário um estudo detalhado da força horizontal aplicada.

4.4 DIMENSIONAMENTO

Neste item, se fará um resumo das recomendações da NBR 6118 (2014) em relação ao dimensionamento e detalhamento das armaduras, assim como as disposições necessárias para projeto de consolos de concreto armado.

4.4.1 Armadura do tirante

Para consolos curtos, o dimensionamento da armadura do tirante se faz com uso das equações 2 e 3.

$$A_{sv} = \left(0,1 + \frac{a}{d}\right) \frac{F_d}{f_{yd}} \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

A_{sv} = área de armadura para esforços verticais necessária, em cm²;

a = distância da carga aplicada à face do apoio do consolo, em cm;

d = altura útil do consolo, em cm;

f_{yd} = tensão de escoamento de cálculo do aço, em kN/cm²;

F_d = esforço vertical de cálculo que atua sobre o consolo, em kN.

$$A_{s,tir} = A_{sv} + \frac{H_d}{f_{yd}} \quad (\text{equação 3})$$

Onde:

$A_{s,tir}$ = área de armadura do tirante, em cm²;

A_{sv} = área de armadura para esforços verticais necessária, em cm²;

f_{yd} = tensão de escoamento de cálculo do aço, em kN/cm²;

H_d = esforço horizontal de cálculo que atua sobre o consolo, em kN.

Para os consolos muito curtos, por sua vez, o dimensionamento da armadura de tirante se faz com uso das equações 4 e 5.

$$A_{sv} = 0,8 \frac{F_d}{f_{yd}} \mu \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

A_{sv} = área de armadura para esforços verticais necessária, em cm²;

f_{yd} = tensão de escoamento de cálculo do aço, em kN/cm²;

F_d = esforço vertical de cálculo que atua sobre o consolo, em kN.

μ = coeficiente referente à condição de lançamento do concreto, adimensional.

O coeficiente μ leva em conta a forma de lançamento do concreto e, de acordo com a NBR 9062 (2006, p. 27) seus valores são obtidos da seguinte forma:

- a) $\mu = 1,4$ para concreto lançado monoliticamente;

- b) $\mu = 1,0$ para concreto lançado sobre concreto endurecido com interface rugosa, cuja rugosidade mínima é de 0,5 cm em 3,0 cm;
- c) $\mu = 0,6$ para concreto lançado sobre concreto endurecido com interface lisa.

$$A_{s,tir} = A_{sv} + \frac{H_d}{f_{yd}} \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

$A_{s,tir}$ = área de armadura do tirante, em cm^2 ;

A_{sv} = área de armadura para esforços verticais necessária, em cm^2 ;

f_{yd} = tensão de escoamento de cálculo do aço, em kN/cm^2 ;

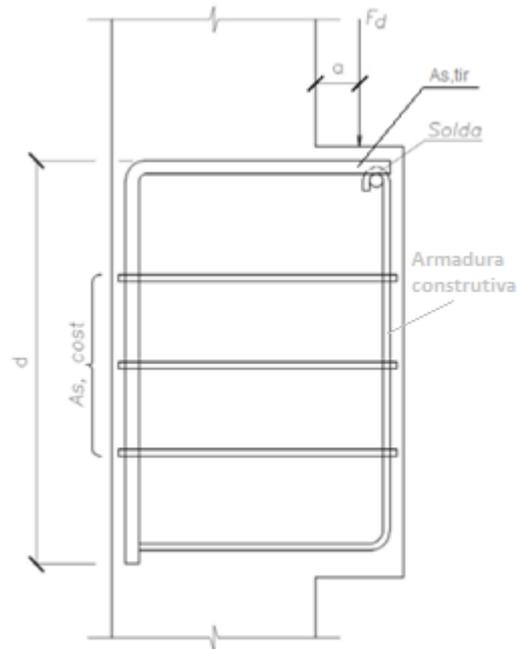
H_d = esforço horizontal que atua sobre o consolo, em kN.

Também é de grande importância garantir a devida ancoragem da armadura do tirante, pois o mesmo é muito curto. Para tal, deve-se evitar o uso de ganchos no plano vertical, que poderiam causar ruínas por ruptura de canto, buscando-se usar uma ancoragem mais eficiente, como alças no plano horizontal, barras transversais soldadas à armadura do tirante ou chapas metálicas soldadas nas extremidades das barras da armadura do tirante. Um exemplo de detalhamento de armadura de tirante, ancorada com uso de barra transversal soldada, pode ser visualizado na Figura 7.

4.4.2 Armadura de costura

Tanto consolos curtos quanto os muito curtos sempre requerem o uso de armaduras de costura, que age aumentando a ductilidade do consolo, sem permitir a redução da carga de ruptura. No caso dos consolos curtos, é necessária uma armadura de costura mínima igual a 40% da armadura do tirante, distribuída na forma de estribos horizontais em uma altura igual a $2/3 d$. Já no caso dos consolos muito curtos, adota-se armadura de costura mínima igual a 50% da armadura do tirante, com distribuição e disposição iguais às armaduras de costura para consolos curtos. O detalhamento da armadura de costura pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 - Detalhamento de armaduras de tirante e de costura

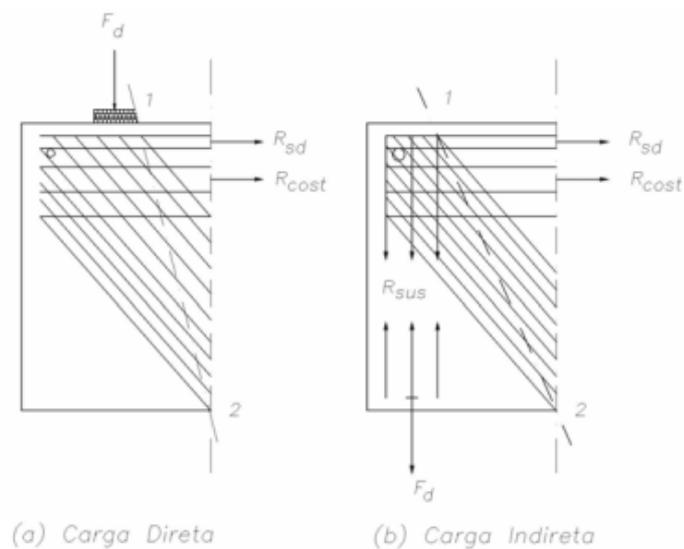


(fonte: adaptado de NBR 9062, 2006, p. 25)

4.4.3 Armadura de suspensão

No caso de haver carga indireta, deve existir armadura de suspensão capaz de resistir totalmente a carga aplicada e eventuais reações indiretas, vide Figura 8.

Figura 8 - Detalhamento de armadura de suspensão: (a) para cargas diretas; (b) para cargas indiretas



(fonte: NBR 9062, 2006, p. 26)

4.4.4 Aparelho de apoio

A posição e as dimensões do aparelho de apoio devem ser adotadas de forma a permitir que o tirante abrace a biela, levando-se em conta o efeito desfavorável da resultante inclinada das cargas sobre a placa de apoio, devido às forças horizontais.

5 MÉTODO DAS BIELAS E TIRANTES

A ideia inicial que deu origem ao MBT veio da analogia de treliça introduzida pelos pesquisadores Karl Wilhelm Ritter e Emil Mörsch no início dos anos 1900. Esse método designa uma treliça como modelo para demonstrar a transmissão dos esforços em uma viga de concreto fissurada (estádio II). Deste então, este método passou por modificações e se aperfeiçoou, passando a ter reconhecimento mundial e sendo considerada uma das concepções mais duradouras da história do concreto armado (SILVA; GIONGO, 2000, p. 3).

O MBT consiste na concepção de um modelo de bielas e tirantes que represente discretamente os campos de tensões (tração e compressão) nos elementos estruturais de concreto armado. Neste modelo, as bielas ficam responsáveis por representar os campos de tensões de compressão no concreto em sua própria direção, e os tirantes, por sua vez, os campos de tensões de tração. Os elementos comprimidos e tracionados concentram, portanto, todos os esforços, e são ligados entre si por nós. As solicitações nas bielas e tirantes são finalmente calculadas através de equações de equilíbrio entre as forças internas e externas (SILVA; GIONGO, 2000, p. 4-5).

5.1 GEOMETRIA DO MODELO

Silva e Giongo (2000, p. 6) recomendam que a geometria do modelo, ou seja, a disposição das bielas e tirantes, deve ser obtida mediante análise dos seguintes fatores:

- a) tipos de ações atuantes na estrutura;
- b) ângulos entre bielas e tirantes;
- c) área de aplicação das ações e reações;
- d) número de camadas da armadura;
- e) cobrimento da armadura.

Ainda em relação aos itens enumerados acima, é importante observar que os ângulos formados entre as bielas e tirantes estão relacionados com a distribuição de tensões elásticas produzidas pelas ações atuantes, não podendo possuir valores pequenos, a fim de acomodar propriamente as dimensões das bielas e tirantes. A área de aplicação das ações e reações, o número de camadas da armadura e o cobrimento da mesma influem, por sua vez, diretamente nas dimensões das bielas e regiões nodais.

Wight e Macgregor (2012, p. 889-890) ainda recomendam que as bielas e tirantes estejam dispostos de forma que os centros de gravidade de cada membro do modelo, bem como as linhas de ação de todas as solicitações aplicadas externamente, coincidam em cada um dos nós.

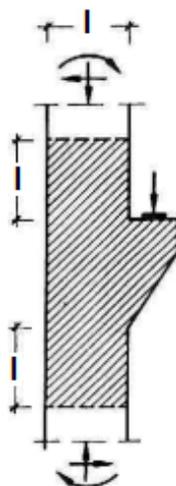
5.2 REGIÕES B E D DA ESTRUTURA

Segundo Campos Filho (1996, p. 3) as regiões B são aquelas nas quais a hipótese de Bernoulli de distribuição linear de deformações é válida. Essas regiões são projetadas com precisão, e seu estado interno de tensões é facilmente obtido dos esforços seccionais (momentos de flexão e torção, esforço cortante e normal). Enquanto a seção não está fissurada, as tensões podem ser calculadas com auxílio das propriedades da seção, como áreas e momentos de inércia, já quando ela está fissurada, pode ser projetada utilizando-se os modelos de treliça usuais.

Ainda segundo o mesmo autor, as regiões D são aquelas onde a distribuição das deformações não é linear, o que ocorre, por exemplo, próximo a cargas concentradas, aberturas e descontinuidades. Essas regiões, quando não fissuradas, podem ser analisadas por modelos elásticos lineares; quando fissuradas, porém, o campo de tensões sofre perturbações, necessitando, portanto, da aplicação do MBT.

A NBR 6118 (2014, p. 195) sugere que consolos de concreto armado são compostos inteiramente pela região D, que se estende por um comprimento l para cada lado da descontinuidade, igual à largura do elemento adjacente ao consolo, conforme Figura 9.

Figura 9 - Região D (área sombreada) em um consolo



5.3 DETERMINAÇÃO DO CAMINHO DAS FORÇAS

Segundo Campos Filho (1996, p. 5), os modelos de bielas e tirantes podem ser desenvolvidos a partir da determinação do fluxo ou caminho das forças por dentro da região D, da seguinte forma:

- a) todas as forças aplicadas nos contornos da região D são subdivididas de tal forma que as resultantes individuais de tensões nos lados opostos das regiões D tenham a mesma intensidade e possam ser ligadas por linhas de fluxo que não se cruzam;
- b) após traçar as linhas de fluxo, deve-se substituí-las por poligonais, cuidando-se para adicionar bielas e tirantes para o equilíbrio transversal do modelo.

O autor ainda sugere que o traçado das linhas de fluxo seja feito com uso de um programa de elementos finitos, e que qualquer modelo é aceitável, desde que atenda as condições de equilíbrio, seja orientado conforme a teoria de elasticidade e resulte em uma posição prática para a armadura; a melhor solução, porém, será aquela em que os caminhos das forças sejam os menores possíveis, o que pode ser expresso a partir da Equação 6.

$$\sum F_i l_i \varepsilon_{mi} = \text{mínimo} \quad (\text{equação 6})$$

Onde:

F_i = esforço na biela ou tirante i, em kN;

l_i = comprimento do elemento i, em cm;

ε_{mi} = deformação média do elemento i, adimensional.

5.4 DIMENSIONAMENTO

Neste item será feito o dimensionamento estrutural das bielas, tirantes e nós que compõe o modelo.

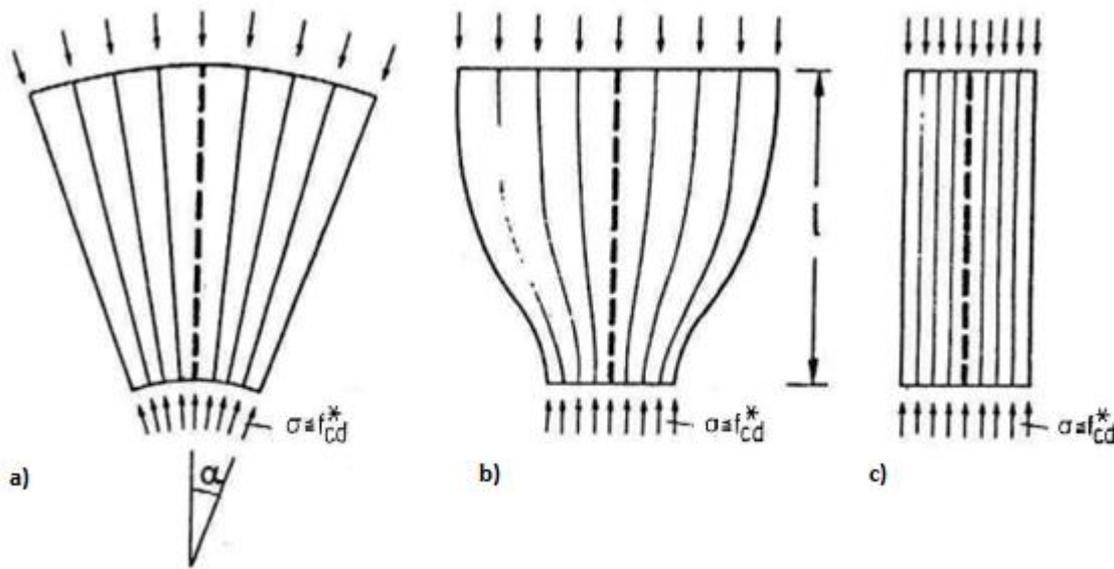
5.4.1 Bielas

No modelo proposto, as bielas são responsáveis por representar os campos de tensões de compressão que atuam no elemento de concreto, sendo que estas se encontram na mesma direção dos campos de tensão. Segundo Campos Filho (1996, p. 8), três configurações típicas

são suficientes para cobrir todos os casos de campos de compressão, incluindo os que aparecem em regiões B:

- em forma de leque, com uma curvatura desprezível e sem tensões transversais, conforme Figura 10a;
- em forma de garrafa, com consideráveis tensões transversais de compressão no pescoço da garrafa e tração na base, conforme Figura 10b;
- em forma de prisma, que é um caso particular dos dois anteriores e típico de regiões B, conforme Figura 10c.

Figura 10 - Configurações típicas de campos de compressão: (a) em forma de leque; (b) em forma de garrafa; (c) em forma de prisma



(fonte: CAMPOS FILHO, 1996, p. 9)

A NBR 6118 (2014, p. 195-196) define que os eixos das bielas devem ser escolhidos de maneira a se aproximar o máximo possível das tensões principais de compressão, sendo que as bielas inclinadas deverão ter ângulo de inclinação cuja tangente esteja entre 0,57 e 2 em relação ao eixo da armadura longitudinal do elemento estrutural. Para a verificação das tensões de compressão máximas, se faz uso das equações 7, 8 e 9.

$$f_{cd1} = 0,85 \alpha_{v2} f_{cd} \quad (\text{equação 7})$$

$$f_{cd2} = 0,60 \alpha_{v2} f_{cd} \quad (\text{equação 8})$$

$$f_{cd3} = 0,72 \alpha_{v2} f_{cd} \quad (\text{equação 9})$$

Onde:

f_{cd1} = tensão resistente máxima no concreto, em verificações pelo MBT, em regiões com tensões de compressão transversal ou sem tensões de tração transversal e em nós onde confluem somente bielas de compressão, em MPa;

f_{cd2} = tensão resistente máxima no concreto, em verificações pelo MBT, em regiões com tensões de tração transversal e em nós onde confluem dois ou mais tirantes tracionados, em MPa;

f_{cd3} = tensão resistente máxima no concreto, em verificações pelo MBT, em nós onde conflui um tirante tracionado, em MPa;

α_{v2} = coeficiente que depende da resistência à compressão do concreto, adimensional;

f_{cd} = resistência de cálculo à compressão do concreto, em MPa.

A NBR 6118 (2014, p. 152) define a Equação 10 para o cálculo do coeficiente α_{v2} .

$$\alpha_{v2} = 1 - \frac{f_{ck}}{250} \quad (\text{equação 10})$$

Onde:

α_{v2} = coeficiente que depende da resistência à compressão do concreto, adimensional;

f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto, em MPa.

5.4.2 Tirantes

Os tirantes, por sua vez, são a representação das armaduras que resistem aos esforços de tração. Segundo Campos Filho (1996, p. 10), usando o fluxo de forças para definição dos modelos de bielas e tirantes, podem ocorrer situações em que o equilíbrio só é satisfeito quando a resistência do concreto à tração é considerada, por exemplo em ancoragens, nós de pórticos, bielas não ancoradas, entre outros. Nestes casos, o concreto age em conjunto com o aço aumentando a rigidez axial do tirante e, por consequência, da região como um todo.

Em cada caso específico, ainda deve-se definir qual fração da resistência à tração pode ser usada para suportar as cargas, e qual fração fica responsável para tensões decorrentes da retração e variações de temperatura (CAMPOS FILHO, 1996, p. 10).

A NBR 6118 (2014, p. 196) define que a área de aço a ser aplicada em cada tirante é calculada pela Equação 11.

$$A_{s,tir} = \frac{R_{sd}}{f_{yd}} \quad (\text{equação 11})$$

Onde:

$A_{s,tir}$ = área de armadura do tirante, em cm²;

R_{sd} = valor de cálculo da força de tração que atua sobre o tirante, em kN;

f_{yd} = tensão de escoamento de cálculo do aço, em kN/cm².

Nepomuceno (2012, p. 17) recomenda a utilização de bitolas mais finas e em maior quantidade de camadas para a ancoragem destas armaduras nas extremidades das regiões nodais, pois isto evitaria o esmagamento local destas regiões.

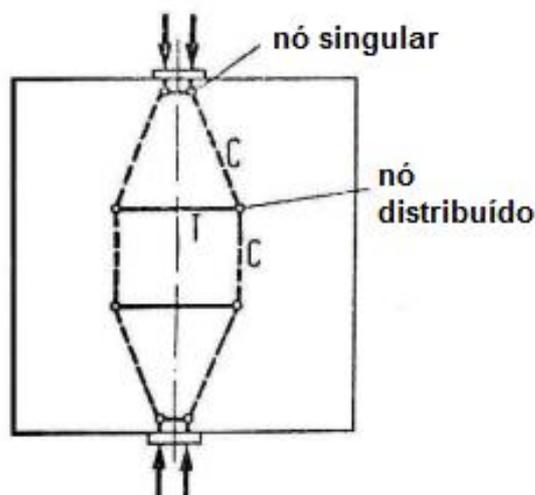
5.4.3 Nós

Silva e Giongo (2000, p. 23) definem um nó do modelo de bielas e tirantes como sendo um volume de concreto que envolve as interseções das bielas comprimidas, em combinação com forças de ancoragem e/ou forças de compressão externas. Os nós são uma idealização simplificada da realidade e, no MBT, aparecem onde há uma mudança repentina na direção das forças.

Campos Filho (1996, p. 10) classifica os nós em duas categorias:

- a) singulares ou concentrados, no caso em que uma das bielas ou tirantes, que se ligam em um determinado nó, representa um campo de tensões concentrado, vide Figura 11;
- b) distribuídos ou contínuos, quando se têm campos de tensão no concreto que envolvam muitas barras de armaduras distribuídas, vide Figura 11.

Figura 11 - Tipos de nós em uma região D



(fonte: CAMPOS FILHO, 1996, p. 11)

Ainda segundo o mesmo autor:

Os nós distribuídos não são críticos e é suficiente verificar a ancoragem das barras de armadura e se as fibras mais externas dos campos de tensões de compressão têm em seus desvios barras de armadura. Já os nós singulares devem ser analisados com maior cuidado.

Para a verificação dos nós singulares, além de verificar a ancoragem dos tirantes nos nós conforme as normas, devem-se observar que as tensões médias de compressão nos contornos da região nodal não ultrapassem os seguintes valores (CAMPOS FILHO, 1996, p. 11):

- a) $f_{cd}^* = 1,1 \sigma_{cd}$, nos nós onde haja apenas tensões de compressão, criando um estado de tensões bi ou tridimensional;
- b) $f_{cd}^* = 0,8 \sigma_{cd}$, nos nós onde as barras tracionadas são ancoradas, após devido desconto na resistência.

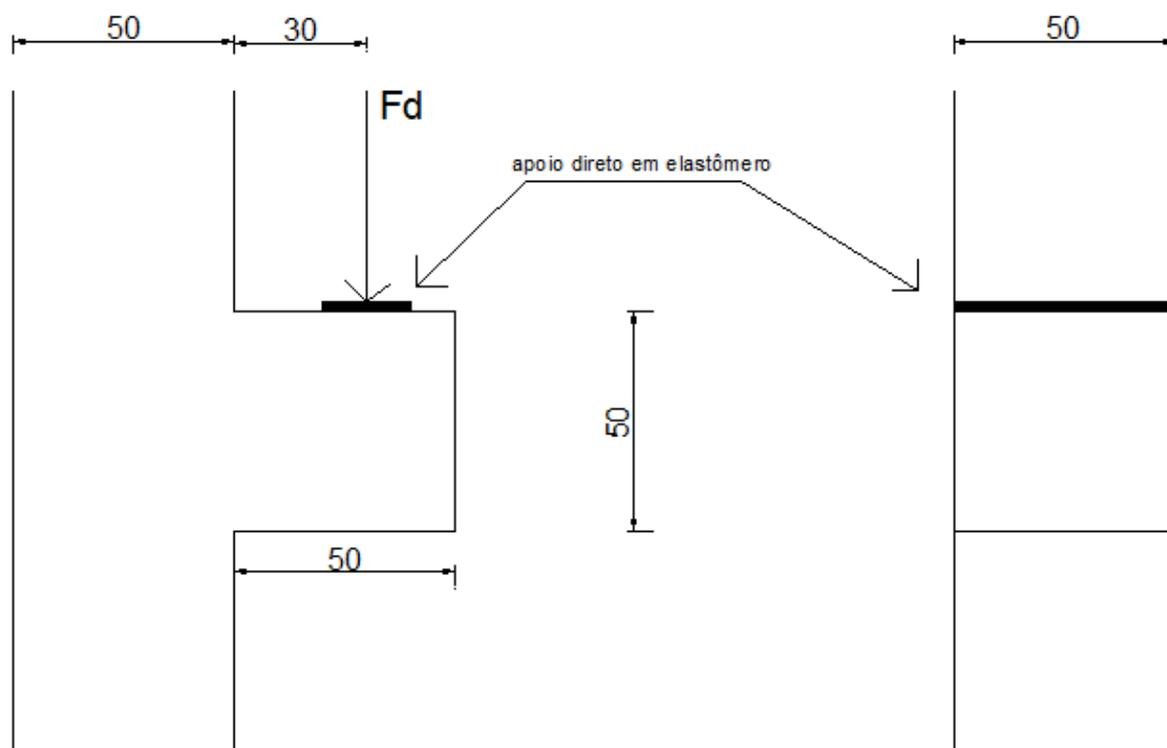
6 PROJETO DO CONSOLO

Neste capítulo será apresentado o consolo que será projetado segundo a normatização juntamente do Método das Bielas e Tirantes.

6.1 GEOMETRIA

A geometria do consolo de estudo do presente trabalho foi elaborada pelo autor, utilizando dimensões múltiplas de um fator comum, a fim de se facilitar a análise por elementos finitos, como será explicado no próximo capítulo. A geometria do consolo escolhida pode ser observada na Figura 12.

Figura 12 - Vistas lateral e frontal, respectivamente, da geometria do consolo escolhido, com unidades em centímetros



(fonte: elaborado pelo autor)

Como aparelho de apoio das cargas, optou-se pela escolha de almofadas de elastômero, como por exemplo as de Neoprene fretado, disponibilizadas comercialmente e cujo uso para tal fim é previsto pela NBR 6118 (2014, p. 27).

6.2 CARGAS CONSIDERADAS NO DIMENSIONAMENTO

A fim de se possibilitar o propósito deste trabalho, que é a análise nos limites de resistência do consolo estudado, foram adotadas cargas externas atuantes que levam a valores extremos de resistência da biela comprimida (idealização da resistência do concreto), ao se adotar a utilização de concreto com f_{ck} de 105 MPa. A força de cálculo cujo valor chegou perto dos limites, conforme será demonstrado a seguir, foi de 1827 kN, utilizada, então, para o dimensionamento do consolo.

Conforme recomendação da norma, melhor explicitada no capítulo 4 deste trabalho, as forças horizontais, no caso de aparelho de apoio em elastômero, foram obtidas a partir da seguinte equação.

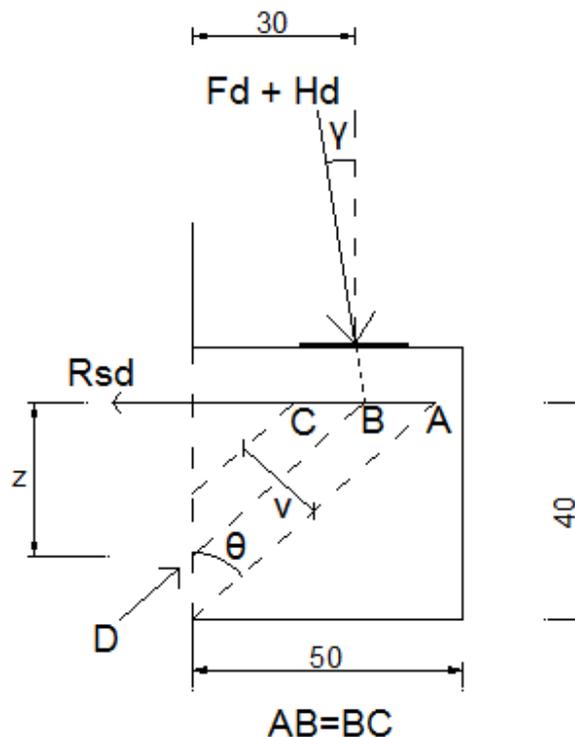
$$H_d = 0,16 F_d = 292,3 \text{ kN}$$

Onde:

F_d = esforço de cálculo vertical externo que atua sobre o consolo, em kN;

H_d = esforço de cálculo horizontal que atua sobre o consolo, em kN.

Figura 13 - Arranjo das cargas e distribuição das tensões pelo consolo



(fonte: elaborado pelo autor)

A primeira informação que se tira do arranjo das cargas e tensões a partir da Figura 13 é a respeito da classificação do consolo a partir da relação a/d . O valor de a já havia sido pré-definido na escolha da geometria do consolo, sendo de 30 centímetros, enquanto que o valor de d foi obtido a partir do posicionamento da resultante de tração atuante no consolo, que é a idealização do posicionamento da armadura de tirante, resultando em um valor de d de 40 centímetros. A relação a/d passa a ser, portanto, de 0.75, o que classifica o consolo em questão como sendo do tipo curto.

Os pontos A, B e C, sobre a resultante de tração do consolo, definem as dimensões da biela de compressão, de forma que as distâncias de A e C em relação ao ponto B são iguais. Essas distâncias, assim como os ângulos γ e θ , podem ser definidos a partir das seguintes relações geométricas.

$$\gamma = \arctan\left(\frac{0,16 Fd}{Fd}\right) = \arctan 0,16 = 9,09^\circ$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{l - (c + \phi)}{d}\right) = \arctan\left(\frac{50 - 5}{40}\right) = 48,37^\circ$$

$$AB = BC = (l - a) - (c + \phi) - (d' \tan \gamma) = (50 - 30) - 5 - (11 \tan 9,09^\circ) = 13,24 \text{ cm}$$

$$AC = AB + BC = 13,24 + 13,24 = 26,48 \text{ cm}$$

$$z = \frac{a + d' \tan \gamma}{\tan \theta} = \frac{30 + 11 \tan 9,09^\circ}{\tan 48,37^\circ} = 28,23 \text{ cm}$$

$$v = AC \sin(90^\circ - \theta) = 26,48 \sin(90^\circ - 48,37^\circ) = 17,59 \text{ cm}$$

Onde:

a = distância da carga aplicada à face do apoio do consolo, em cm;

AB = distância entre os pontos A e B, conforme Figura 13, em cm;

AC = distância entre os pontos A e C, conforme Figura 13, em cm;

BC = distância entre os pontos B e C, conforme Figura 13, em cm;

c = cobrimento, em cm;

d = altura útil do consolo, em cm;

d' = altura adjacente à útil do consolo, acrescido da altura do aparelho de apoio, em cm;

Fd = esforço de cálculo vertical externo que atua sobre o consolo, em kN;

l = comprimento do consolo, em cm;

v – largura da biela de compressão, em cm;

z – dimensão em relação ao eixo global vertical da biela de compressão, em cm;

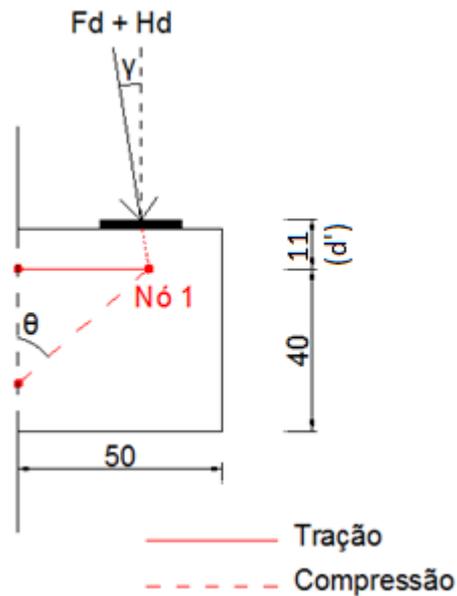
ϕ = diâmetro da seção de armadura, em cm;

γ = ângulo da força resultante em relação à vertical, em graus;

θ = ângulo de inclinação da biela comprimida, em graus.

Uma vez definida a geometria da distribuição das tensões no consolo, é possível partir para o cálculo das solicitações. A Figura 14 mostra o modelo biela-tirante proposto para o consolo em questão, conforme recomendado pela NBR 6118 (2014, p.199).

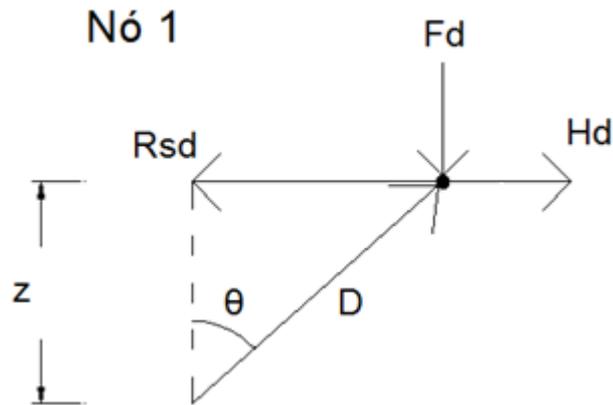
Figura 14 - Modelo biela-tirante proposto para o consolo de estudo



(fonte: elaborado pelo autor)

É possível observar que é no Nó 1 que as principais forças que devem ser levadas em conta para o dimensionamento convergem. O melhor detalhamento deste nó e a designação das forças que nele atuam podem ser observadas na Figura 15.

Figura 15 - Forças atuantes no equilíbrio do Nó 1



(fonte: elaborado pelo autor)

Fazendo-se o equilíbrio das forças atuantes no Nó 1, conforme Figura 15, cujos ângulos já foram calculados anteriormente, chega-se às seguintes relações.

$$D = \frac{Fd}{\cos \theta} = \frac{1827}{\cos 48,37^\circ} = 2748,3 \text{ kN}$$

$$R_{sd} = Fd \tan \theta + Hd = 1827 \tan 48,37^\circ + 292,3 = 2348 \text{ kN}$$

Onde:

D = esforço atuante na biela de compressão, em kN;

Fd = esforço vertical de cálculo que atua sobre o consolo, em kN;

Hd = esforço horizontal de cálculo que atua sobre o consolo, em kN;

R_{sd} = valor de cálculo da força de tração que atua sobre o tirante, em kN;

θ = ângulo de inclinação da biela comprimida, em graus.

6.3 VERIFICAÇÃO DA BIELA COMPRIMIDA

Com o valor do esforço atuante sobre a biela comprimida já calculado, é possível calcular a tensão atuante sobre a mesma.

$$\sigma_c = \frac{D}{v bw} = \frac{2748,3}{17,59 * 50} = 3,124 \text{ kN/cm}^2$$

Onde:

σ_c = tensão atuante sobre a biela comprimida do consolo, em kN/cm²;

b_w = largura do consolo, normal à seção do mesmo, em cm;

D = esforço atuante na biela de compressão, em kN;

v = largura da biela de compressão, em cm.

A tensão resistente do concreto para o nó em questão, por sua vez, é calculada a partir das equações 9 e 10, conforme apresentadas no Capítulo 5.

$$\alpha_{v2} = 1 - \frac{f_{ck}}{250} = 1 - \frac{105}{250} = 0,58$$

$$f_{cd3} = 0,72 \alpha_{v2} f_{cd} = 0,72 * 0,58 * \frac{105}{1,4} = 31,32 \text{ MPa}$$

Onde:

α_{v2} = coeficiente que depende da resistência à compressão do concreto, adimensional;

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

f_{cd3} = tensão resistente máxima no concreto, em verificações pelo MBT, em MPa;

f_{cd} = resistência de cálculo à compressão do concreto, em MPa.

Da avaliação dos esforços na biela comprimida, se verifica que a tensão de compressão atuante, de 31,24 MPa, é inferior à resistência à compressão do concreto, de 31,32 MPa, portanto se diz que o consolo está seguro em relação às tensões de compressão.

6.4 CÁLCULO DAS ARMADURAS

Conforme descrito no Capítulo 4, a armadura do tirante do consolo pode ser calculada a partir da seguinte relação.

$$A_{s,tir} = \frac{R_{sd}}{f_{yd}} = \frac{2348}{43,48} = 54 \text{ cm}^2$$

Onde:

$A_{s,tir}$ = área de armadura de tirante, em cm^2 ;

R_{sd} = valor de cálculo da força de tração que atua sobre o tirante, em kN;

f_{yd} = resistência de cálculo de escoamento do aço, em kN/cm^2 .

Com o valor de d já calculado prevendo a utilização de duas camadas de armadura de tirante, foi definido, então, o uso de 10 barras de 32 milímetros ($80,5 \text{ cm}^2$), dispostas nestas duas camadas.

Para a armadura de costura foi inicialmente definido um espaçamento de 15 centímetros, por disposições construtivas, a partir do qual, a armadura é calculada pela seguinte relação.

$$A_{s,cost} = 0,4 A_{s,tir} \frac{s}{d} = 0,4 * 80,5 * \frac{15}{40} = 12,08 \text{ cm}^2$$

Onde:

$A_{s,cost}$ = área de armadura de costura, em cm^2 ;

$A_{s,tir}$ = área de armadura de tirante, em cm^2 ;

s = espaçamento da armadura de tirante, em cm;

d = altura útil do consolo, em cm.

Considerando a disposição construtiva da armadura de costura, como definido pela norma e melhor descrito no Capítulo 4 deste trabalho, idealizada na forma de um estribo horizontal, foi definido, então, o uso de estribos de 32 milímetros, cujos dois tramos somam $16,08 \text{ cm}^2$ de área de aço.

A Tabela 3 resume as armaduras adotadas para o consolo projetado.

Tabela 3 - Armaduras adotadas no projeto do consolo

	Armadura adotada	Armadura efetiva
Armadura de tirante	10 ϕ 32	$80,5 \text{ cm}^2$
Armadura de costura	estribo ϕ 32 cada 15 cm	$16,08 \text{ cm}^2$

(fonte: elaborado pelo autor)

6.5 CARREGAMENTO ADMISSÍVEL DO CONSOLO PROJETADO

Uma vez projetado o consolo, será feita a verificação do carregamento máximo admissível pelo mesmo. Para tal será avaliada apenas uma carga vertical, desconsiderando a horizontal, para seguir o mesmo critério do experimento realizado por Foster et al. Também será avaliado o carregamento máximo em duas situações distintas:

- Levando em conta os limites que a NBR 6118 (2014) propõe para f_{cd} ;

- b) Desprezando os limites da NBR 6118 (2014) para f_{cd} , ou seja, adotando-se o próprio valor de f_{cd} como tensão limite da biela comprimida.

A primeira situação ocorre quando a biela comprimida atinge o valor limite de f_{cd3} , que foi exatamente o fator limitante do projeto. Portanto a única diferença se dá na não consideração da carga horizontal no experimento, para um mesmo valor de esforço atuante na biela comprimida do consolo. A força vertical de cálculo máxima pode ser, então, definida pela seguinte relação.

$$F_d = D \cos \theta = 2748,3 \cos 48,37^\circ = 1826 \text{ kN}$$

Onde:

D = esforço atuante na biela de compressão, em kN;

Fd = esforço de cálculo vertical externo que atua sobre o consolo, em kN;

θ = ângulo de inclinação da biela comprimida, em graus.

A segunda situação ocorre com esforço máximo da armadura efetiva do tirante tracionado. A carga vertical máxima por ser encontrada, portanto, a partir das seguintes relações.

$$R_{st} = A_{s,tir} f_{yd} = 80,5 * 43,5 = 3500 \text{ kN}$$

$$F_d = \frac{R_{st}}{\tan \theta} = \frac{3500}{\tan 48,37^\circ} = 3110 \text{ kN}$$

Onde:

$A_{s,tir}$ = área de armadura de tirante, em cm²;

Fd = esforço de cálculo vertical externo que atua sobre o consolo, em kN;

R_{sd} = valor de cálculo da força de tração que atua sobre o tirante, em kN;

f_{yd} = tensão de escoamento do aço, em kN/cm²;

θ = ângulo de inclinação da biela comprimida, em graus.

Para estes valores encontrados, será ainda calculada a resultante da biela comprimida e a tensão atuante na mesma, a partir das seguintes relações.

$$D = \frac{F_d}{\cos \theta} = \frac{3110}{\cos 48,37^\circ} = 4681,5 \text{ kN}$$

$$\sigma_c = \frac{D}{v bw} = \frac{4681,5}{17,59 * 50} = 5,32 \text{ kN/cm}^2$$

Onde:

bw = largura do consolo, normal à seção do mesmo, em cm;

F_d = esforço de cálculo vertical externo que atua sobre o consolo, em kN;

D = esforço atuante na biela de compressão, em kN;

v = largura da biela de compressão, em cm;

σ_c = tensão atuante sobre a biela comprimida do consolo, em kN/cm²;

θ = ângulo de inclinação da biela comprimida, em graus.

A Tabela 4 resume as duas situações consideradas, indicando as tensões máximas atuantes e a força vertical máxima que o consolo resiste para cada situação.

Tabela 4 – Carregamentos admissíveis para o consolo projetado

	Biela comprimida		Tirante tracionado		Força vertical admissível
	Tensão limite	Tensão atuante	Armadura necessária	Armadura efetiva	
Situação a) Limitando f_c	31,32 MPa	31,32 MPa	54 cm ²	80,5 cm ²	1826 kN
Situação b) Sem limite de f_c	-	53,2 MPa	80,5 cm ²	80,5 cm ²	3110 kN

(fonte: elaborado pelo autor)

7 MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS

Para análise de desempenho estrutural dos consolos, foram montados modelos tridimensionais em elementos finitos, com uso da versão 17.0 do programa Ansys.

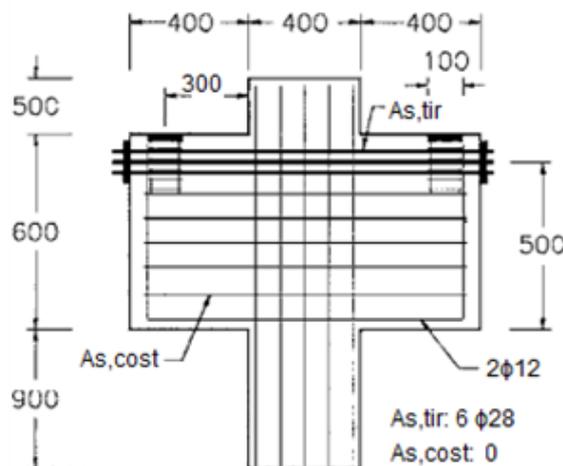
7.1 CALIBRAGEM DO MODELO A PARTIR DE EXPERIMENTO DISPONÍVEL NA LITERATURA

Para validação da proposta de se avaliar um projeto a partir de uma modelagem em elementos finitos pelo Ansys, primeiramente buscou-se reproduzir, com uso do mesmo, resultados obtidos experimentalmente. Foster et al. (1996) fizeram testes de carga com 30 consolos diferentes, com as resistências à compressão dos concretos utilizados variando entre 45 e 105 MPa. Dessa publicação foi, então, escolhido um consolo com concreto de resistência de 105 MPa, nomeado como PB1, cujos resultados serviram de base para calibrar o modelo proposto e construído no decorrer deste trabalho.

7.1.1 Modelo básico e condições de equilíbrio

Na Figura 16 é possível observar a geometria do consolo escolhido, sendo que sua largura (normal à seção apresentada) é de 15 centímetros. Além disso, é importante notar que para o consolo em questão, o PB1, não foi adotada armadura de costura (Foster et al., 1996, p.558).

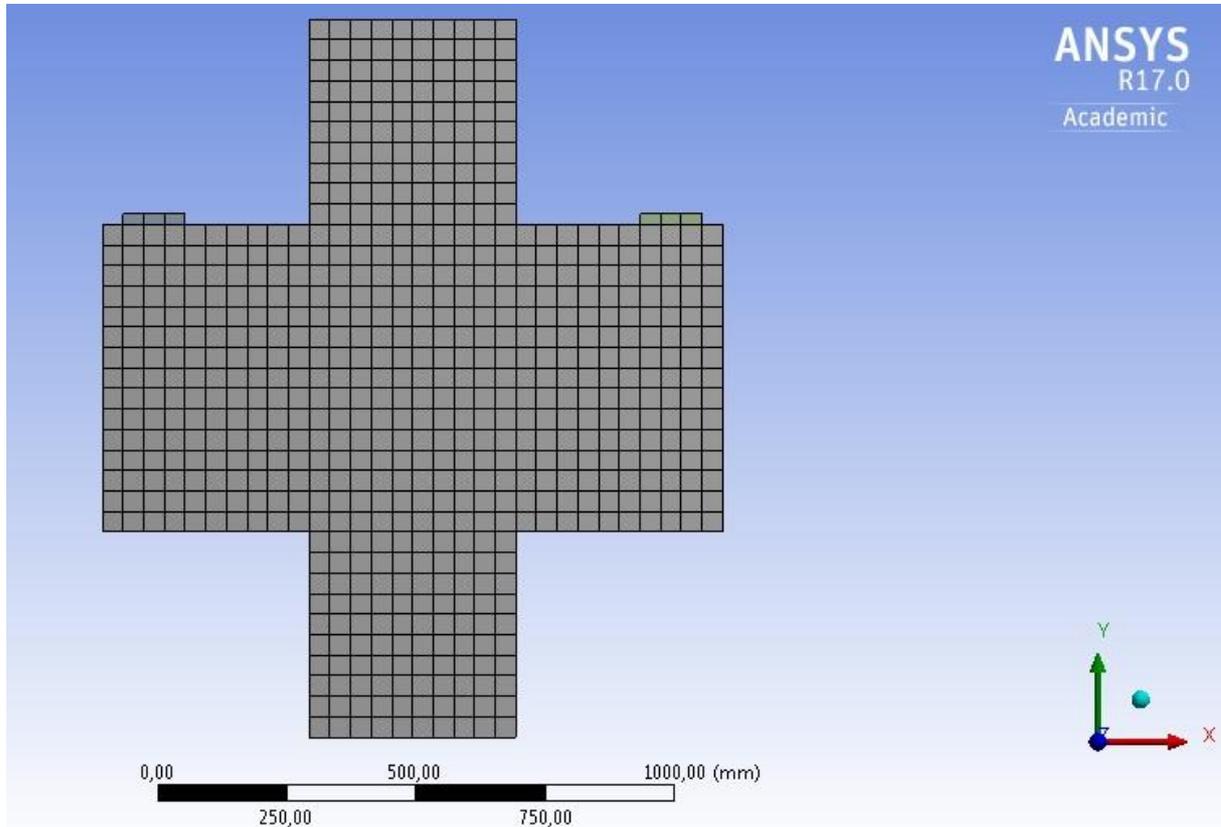
Figura 16 - Geometria do consolo experimental da literatura, com unidades em milímetros



(fonte: adaptado de Foster et al., 1996, p.557)

Na Figura 17 é possível visualizar a geometria do modelo, juntamente com a malha de elementos finitos sobre o concreto.

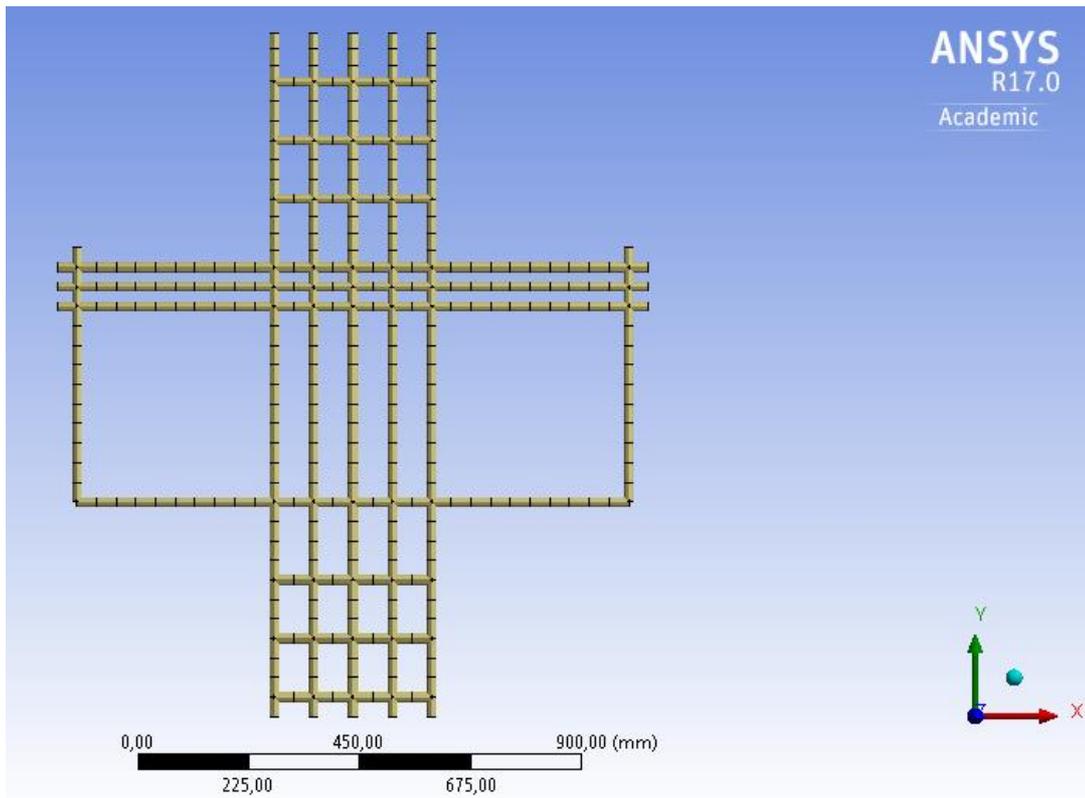
Figura 17 - Geometria do modelo experimental no Ansys



(fonte: elaborado pelo autor)

Já a Figura 18 mostra a disposição das armaduras na seção do consolo. É importante observar que elas aparecem simplesmente como elementos de linha, já com sua própria malha, mas com diâmetros genéricos. A correta definição dos diâmetros dos elementos linha foi realizada no comando específico a ser adicionado na parte de processamento do modelo, conforme pode ser observado, juntamente com os outros comandos utilizados, no Apêndice A deste presente trabalho.

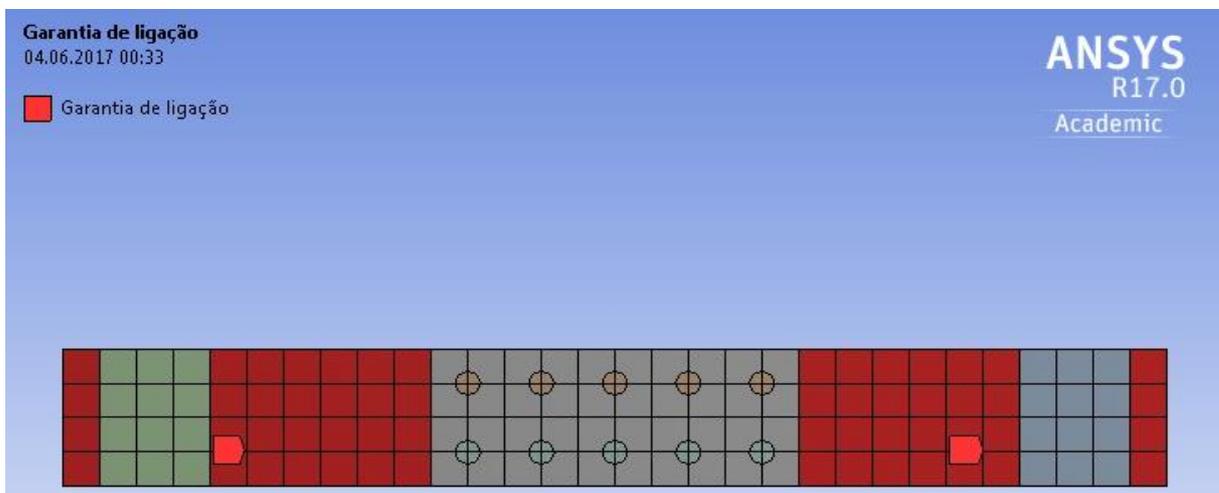
Figura 18 - Disposição das armaduras do modelo experimental no Ansys



(fonte: elaborado pelo autor)

Na modelagem foi utilizado o método “garantia de ligação” (Ansys 17.0, tradução nossa) entre as faces de ambos aparelhos de apoio e do consolo, sem permitir deslocamentos relativos entre eles, conforme pode ser observado na Figura 19.

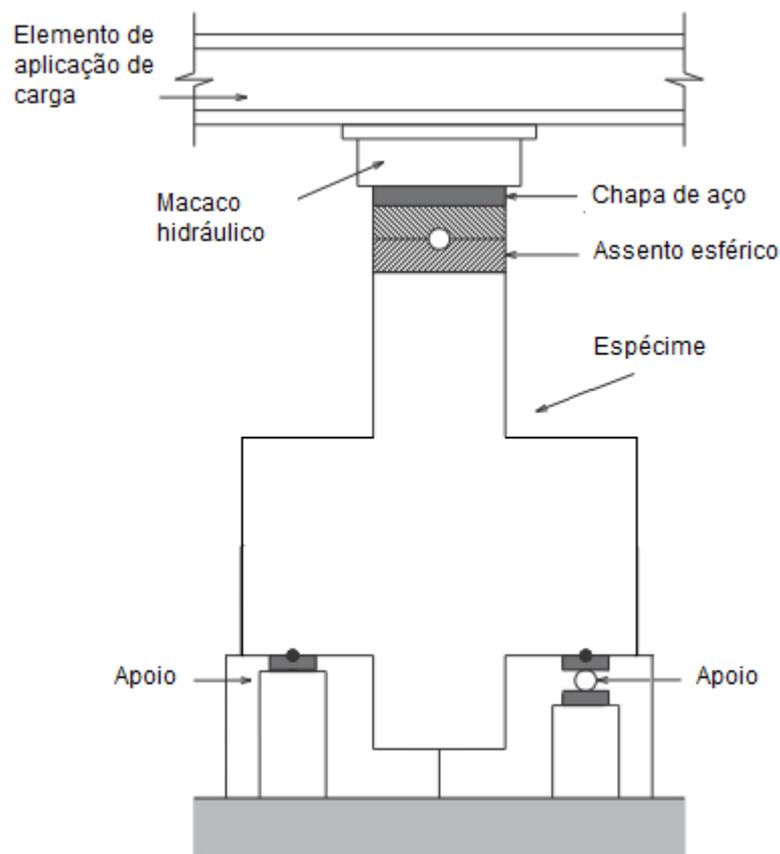
Figura 19 - Vista superior do consolo, destacando em vermelho as ligações das faces dos aparelhos de apoio com as faces do consolo



(fonte: elaborado pelo autor)

É importante destacar a forma com a qual os consolos foram submetidos à prova de carga nos experimentos de Foster et al. (1996, p.559, tradução nossa). O espécime foi virado ao contrário, de modo que a carga foi aplicada no que seria a face inferior do pilar adjacente ao consolo, e seus aparelhos de apoio serviram no sentido de prover as reações de suporte, conforme Figura 20.

Figura 20 - Instrumentação do experimento



(fonte: adaptado de Canha et al., 2014, p.133)

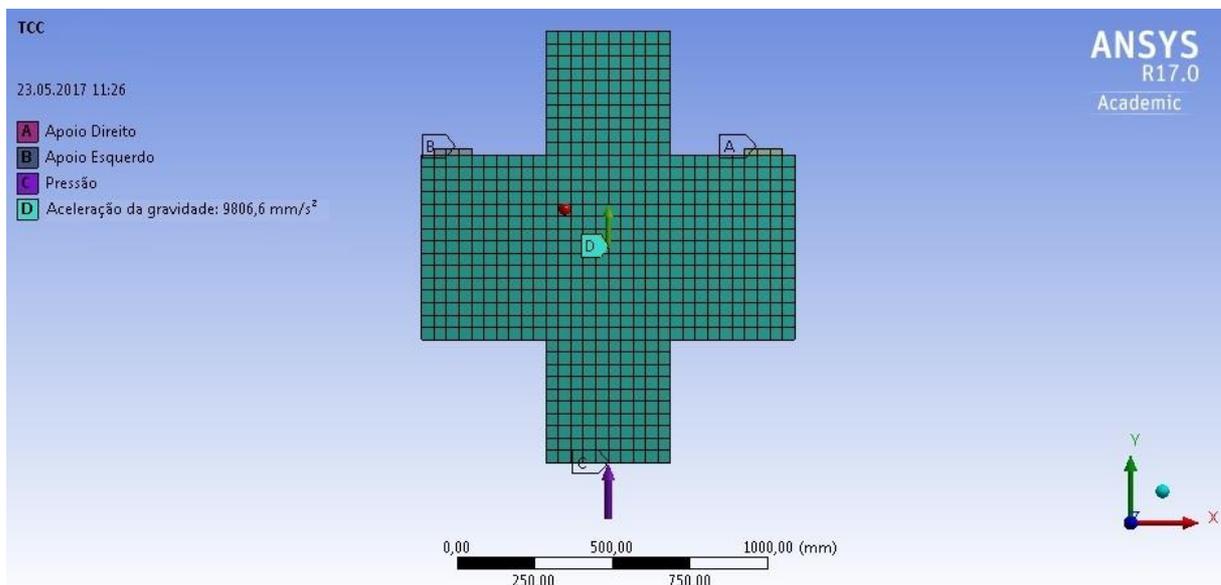
As principais informações obtidas dessa instrumentação foram em relação à transmissão da carga ao espécime e às condições de apoio do mesmo.

É notável a quantidade de elementos utilizados a fim de se uniformizar e garantir a transmissão homogênea de tensões à face inferior do pilar; no caso da modelagem, isso se transcreveu na aplicação de uma pressão direta à face do mesmo, sem uso da função padrão “efeito de superfície” (tradução nossa), o que significa que a força originalmente aplicada no experimento foi trocada por uma pressão uniforme equivalente, sem considerar possíveis esmagamentos e perdas de tensões na superfície do pilar.

Pode-se também notar que os aparelhos de apoio ficam responsáveis apenas pela restrição de movimento no eixo vertical, enquanto que as duas componentes horizontais ficam restritas por elementos não pertencentes à estrutura de projeto, a partir das faces laterais do pilar, e ao atrito. Em uma modelagem numérica com precisão geométrica e que representa uma situação ideal, essas restrições ao movimento em direções nas quais não atuam forças externas não se fazem tão importantes, sendo, portanto, arbitrariamente repassadas aos aparelhos de apoio, a fim de simplificar o modelo e sem que haja redistribuição das tensões.

A Figura 21 resume, portanto, as condições de equilíbrio externas consideradas para representação do caso experimental na forma de modelo no Ansys.

Figura 21 - Situação experimental representada em modelo no Ansys



(fonte: elaborado pelo autor)

Ainda na interface de modelagem do programa, foram utilizados comandos específicos para ligação dos nós de elementos diferentes, isto é, do concreto com o aço, e de consideração e futura impressão de aberturas de fissuras e plastificação no concreto. Esses comandos podem ser observados no Apêndice A do presente trabalho.

7.1.2 Propriedades dos materiais utilizados no modelo

Passada a etapa da modelagem básica, iniciou-se a etapa em que, de fato, é feita a calibração do modelo, que é a definição das propriedades dos materiais utilizados. A partir do modelo

básico definido e cujo resultado aproxima os resultados experimentais, a ideia básica é, portanto, escolher e variar alguns parâmetros até que se obtenha melhor precisão nos resultados, seguindo, porém, os limites característicos do material, conforme apresentado no Capítulo 3 do presente trabalho. Se salienta, também, o fato de que a utilização do Ansys permite análise não-linear do comportamento dos materiais.

No caso do aço das armaduras, Foster et al. (1996, p.558, tradução nossa) definem para a resistência do mesmo ao escoamento o valor de 495 MPa e o módulo de elasticidade foi definido como 210 GPa (NBR 6118, 2014, p.29). Um resumo das propriedades do aço considerado se encontra na Tabela 5. Para a curva tensão deformação do aço, se propôs comportamento isotrópico bilinear, conforme Figura 22.

Tabela 5 - Propriedades do aço considerado na modelagem do experimento

Densidade (kg/m ³)	7850
Módulo de elasticidade (GPa)	210
Resistência ao escoamento (MPa)	495
Módulo da tangente (MPa)	2100
Coefficiente de Poisson	0,3

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 22- Curva tensão deformação do aço considerado na modelagem do experimento



(fonte: elaborado pelo autor)

Os aparelhos de apoio foram genericamente modelados com o aço padrão disponibilizado na livraria do Ansys, pois seu comportamento estrutural não é alvo de estudo no presente trabalho. A sua única função na modelagem é em relação à geometria de apoio do consolo, isto é, a geometria do aparelho de apoio define a região onde as tensões de compressão sobre o concreto armado são mais intensas.

No caso do concreto, o único dado disponibilizado por Foster et al. (1996, p.558, tradução nossa) é a resistência à compressão, sendo que as outras propriedades necessárias para modelagem no Ansys devem vir de critérios de projeto, dentro dos limites previstos no Capítulo 3 deste presente trabalho, quando for o caso. A Tabela 6 resume as propriedades adotadas na modelagem, e a Figura 23 mostra a curva ideal de tensão deformação adotada para o concreto, sendo que no modelo numérico essa curva é aproximada em um comportamento isotrópico multilinear, apresentando comportamento elástico linear, porém, até cerca de 80% do total da resistência compressiva, assim como sugerido por Sun et al. (2015, p.591, tradução nossa).

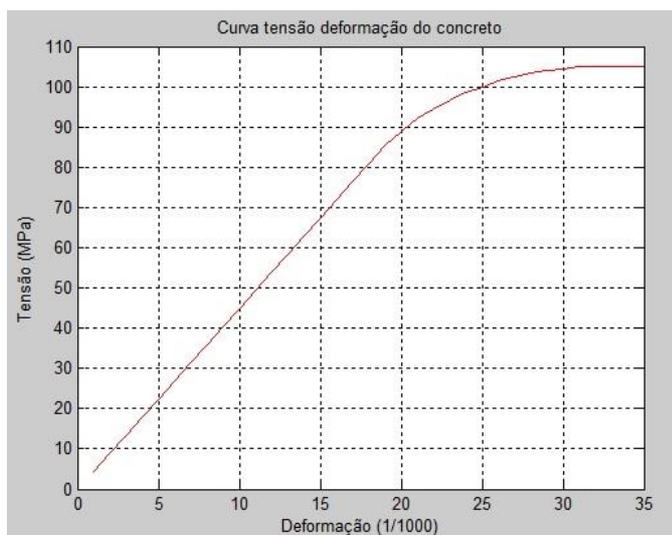
Tabela 6 - Propriedades do concreto utilizado na modelagem do experimento

Densidade (kg/m ³)	2500
Módulo de elasticidade (GPa)	42
Coefficiente de Poisson	0,2
Resistência à compressão (MPa)	105
Resistência à tração (MPa)	7
Coefficiente de transmissão de esforços em fissuras abertas	0,3
Coefficiente de transmissão de esforços em fissuras fechadas	0,8

(fonte: elaborado pelo autor)

As propriedades dos materiais, conforme descritos anteriormente, são introduzidas no modelo do Ansys a partir de comandos específicos, conforme Apêndice A do presente trabalho.

Figura 23 - Curva tensão deformação do concreto utilizado na modelagem do experimento



(fonte: elaborado pelo autor)

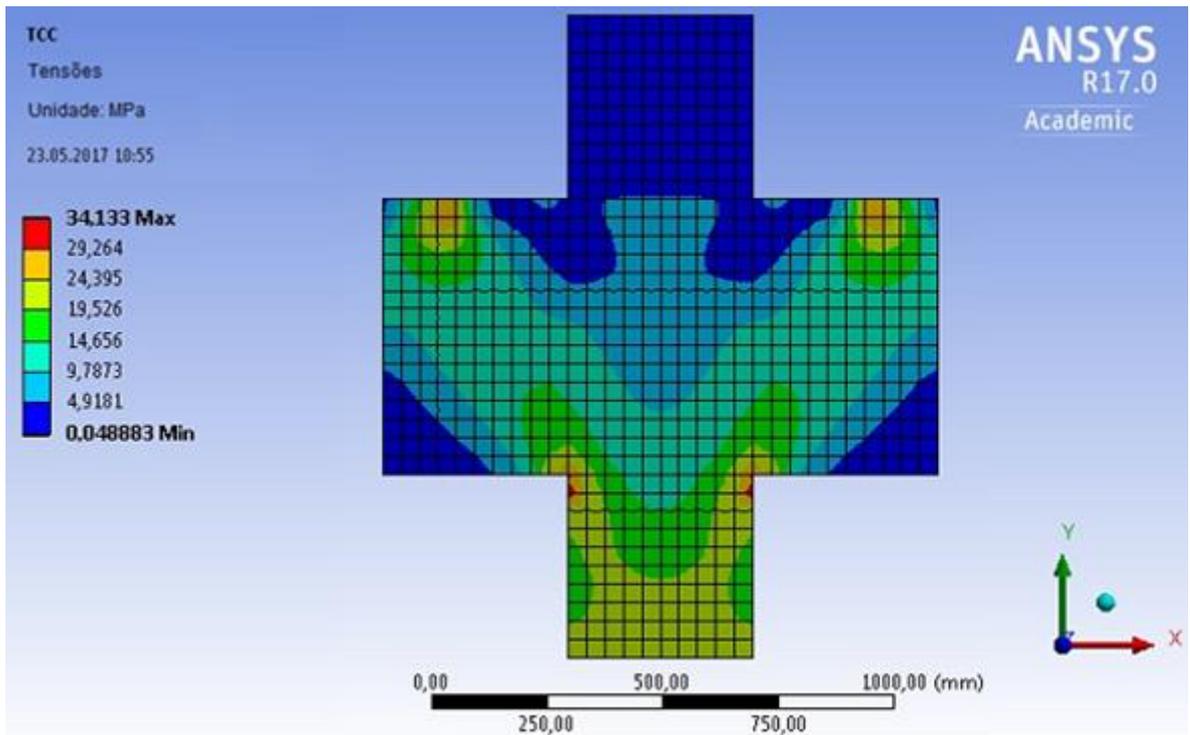
7.1.3 Reprodução dos resultados experimentais

O consolo escolhido até então para a calibragem foi o PB1 (Foster et al., 1996, p.558-559), tendo falhado por fendilhamento da biela comprimida sob uma carga de 1180 kN. Para efeitos da modelagem, conforme explicado anteriormente, essa carga foi transformada em uma pressão equivalente de 19,67 MPa, atuando uniformemente sobre a face inferior do pilar.

O procedimento básico de calibragem e validação do modelo foi variar as propriedades dos materiais utilizados até se chegar a um comportamento estrutural numérico semelhante ao descrito experimentalmente para um mesmo consolo. As propriedades finais dos materiais descritas no item 7.1.2 do presente trabalho foram, portanto, consequência da atual etapa.

A análise computacional via Ansys resultou em rompimento do consolo sob pressão equivalente de 19,84 MPa, que corresponde a uma carga de 1190,4 kN, apresentando, portanto, uma diferença de 0,88% em relação ao resultado experimental. As Figuras 24 e 25 mostram, respectivamente, as tensões e a fissuração no concreto, quando do momento de ruptura.

Figura 24 - Tensões principais mínimas atuantes no momento da ruptura do experimento



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 25 - Fissuração e plastificação do consolo experimental



(fonte: elaborado pelo autor)

Na Figura 25 também é possível notar o tipo de ruptura sofrido pelo consolo, sendo caracterizado como por fendilhamento da biela de compressão segundo a classificação proposta por Park e Paulay (1974, p.692).

Tendo-se chegado, portanto, a um modelo cujos resultados aproximam os valores obtidos experimentalmente (diferença de 0,88%), apresentando o mesmo tipo de ruptura, diz-se que a sua calibragem é suficiente e que o modelo é válido para avaliar o comportamento de projetos de consolos de concreto armado.

7.2 MODELAGEM DO CONSOLO PROJETADO

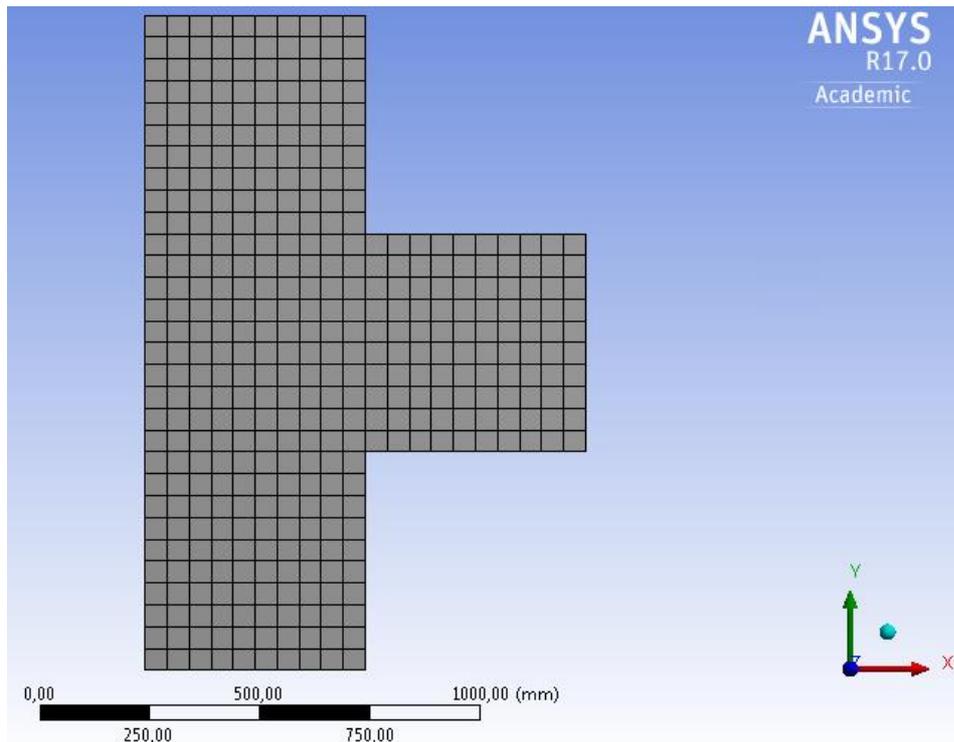
Uma vez calibrado e validado o modelo experimental, será feita a modelagem do projeto desenvolvido no Capítulo 6 do presente trabalho, ou seja, o projeto realizado com as premissas normativas brasileiras e utilizando o Método das Bielas e Tirantes.

Nesta seção são usados os mesmos critérios utilizados anteriormente, assim como as mesmas propriedades para o aço e o concreto. A única diferença em relação aos materiais se deu na resistência ao escoamento do aço, que passou de 495 MPa no caso experimental proveniente da literatura, para 500 MPa, valor utilizado mais comumente no Brasil.

Como discutido no Capítulo 6 do presente trabalho, a geometria do consolo projetado foi determinada a fim de simplificar a malha em elementos finitos do modelo, já que o programa Ansys limita a quantidade de elementos na versão acadêmica, que é a versão aqui utilizada. A adoção de geometrias oblíquas e de dimensões não múltiplas requereria malhas menores e com elementos angulares para gerar resultados com qualidade numérica, o que excederia esse limite da versão acadêmica. Na Figura 26 é possível observar que essa geometria simplificada resultou em uma malha homogênea e de boa qualidade.

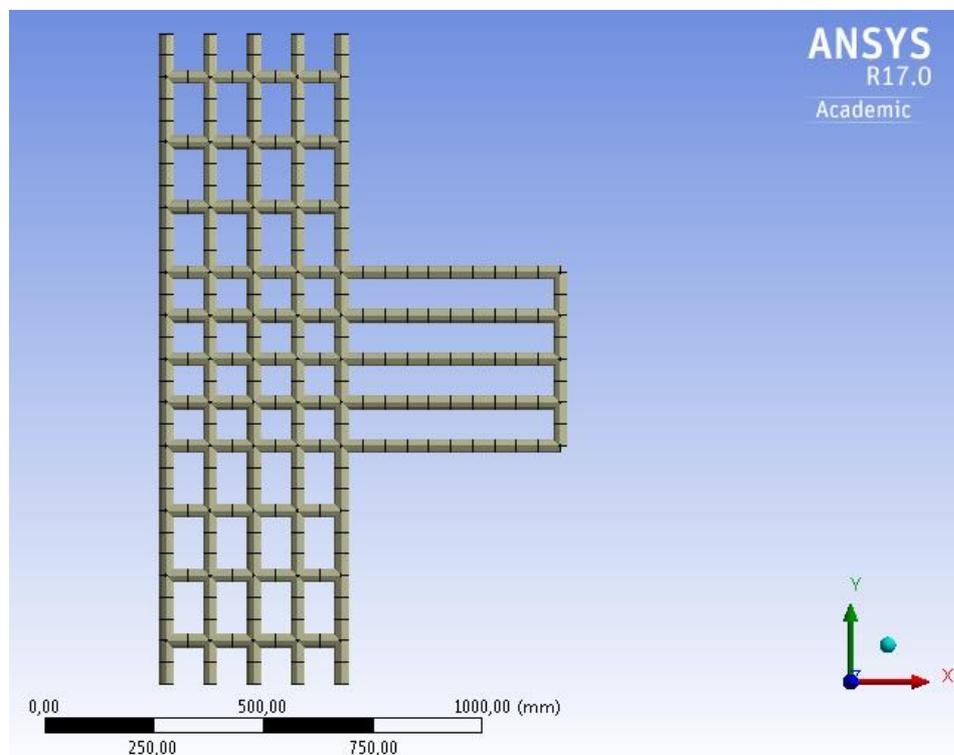
Em relação às armaduras, novamente foi apenas definida a posição das mesmas no modelo geométrico, conforme Figura 27, sendo suas propriedades, entre as quais o diâmetro da bitola, definidas separadamente por comando específico, conforme pode ser observado no Apêndice A do presente trabalho.

Figura 26 - Malha em elementos finitos do consolo projetado



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 27 - Posicionamento da armadura do consolo projetado

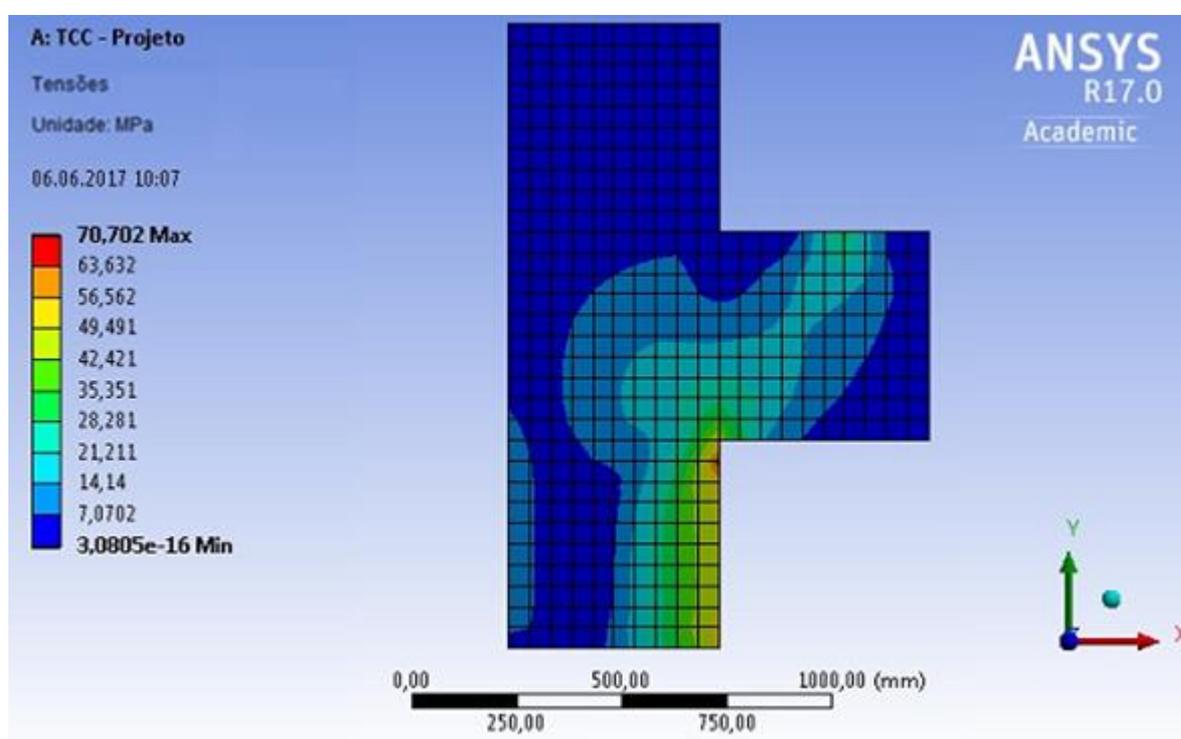


(fonte: elaborado pelo autor)

7.2.1 Resultados obtidos

A primeira avaliação realizada foi em relação à primeira situação considerada no item 6.5 do presente trabalho, ou seja, levando em conta os limites das tensões de compressão, o que acarretaria em uma carga vertical externa admissível de 1304 kN. O comportamento numérico apresentado pelo Ansys para esta situação mostra que o consolo resiste a tal carregamento, apresentando alguma fissuração interna, porém sem comprometer a função estrutural dos elementos. A Figura 28 mostra as tensões atuantes no concreto para este carregamento.

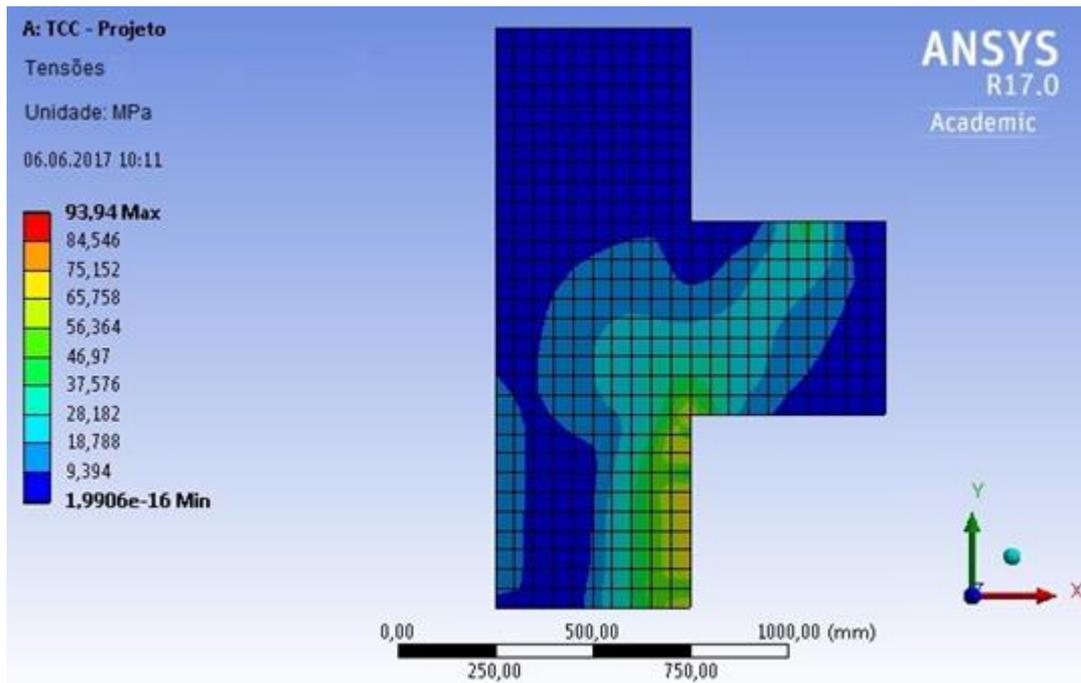
Figura 28 - Tensões principais mínimas para carregamento de 1304 kN



(fonte: elaborado pelo autor)

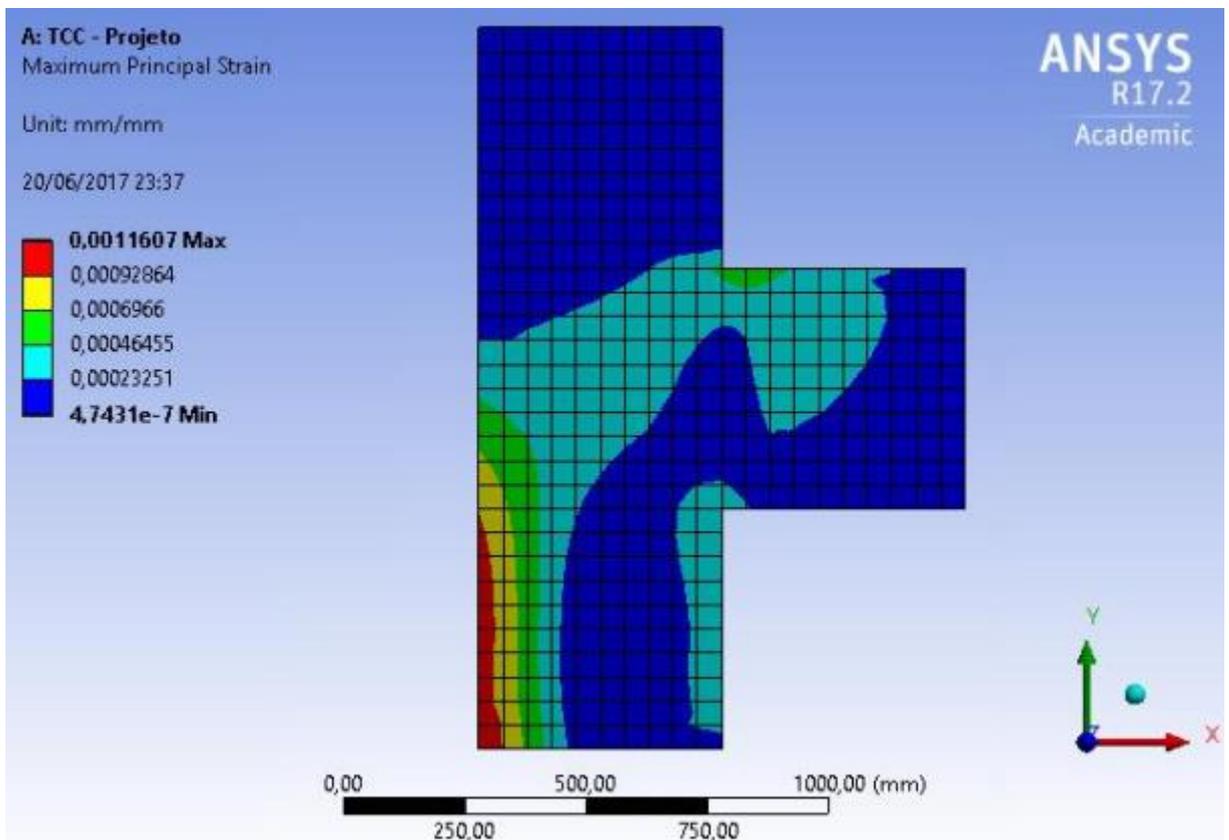
Nesta mesma figura, pode-se comprovar que a distribuição das tensões pelo consolo está dentro do esperado quando da aplicação do Método das Bielas e Tirantes. Enquanto a figura indica uma tensão média de 21,21 MPa, a tensão previamente calculada foi de 32,24 MPa, que levava, porém, majoração de 40%; retirando-se essa majoração, chega-se a uma tensão de 23 MPa, próxima da encontrada numericamente. Seguiu-se então com a avaliação, aumentando-se as cargas até a ruptura do consolo, que ocorreu para uma carga de 1960 kN, apresentando tensões atuantes de compressão conforme visto na Figura 29, deformações sob tração conforme a Figura 30, e fissuração conforme a Figura 31.

Figura 29 – Tensões principais mínimas na ruptura do consolo projetado



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 30 - Deformações principais máximas na ruptura do consolo projetado



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 31 - Ruptura do consolo projetado



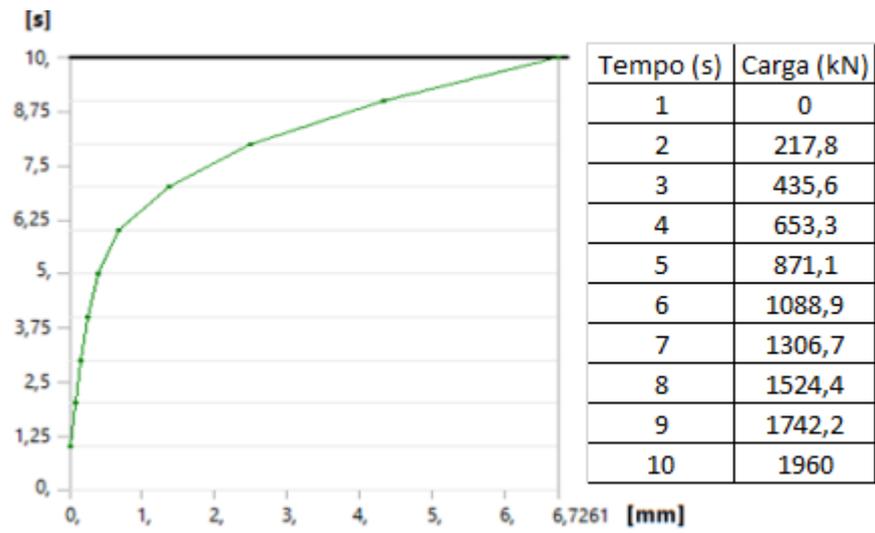
(fonte: elaborado pelo autor)

A partir das Figuras 29 e 30 é possível observar o comportamento do espécime modelado aos esforços de compressão e de tração, respectivamente.

Nota-se pelos resultados que a falha crítica que ocasionou a ruptura do consolo se deu na porção superior da seção de encontro com o pilar, caracterizando ruptura por flexão. Além disso, pode-se também observar que o consolo já apresentava bastante fissuração na biela comprimida, chegando a aparecer fissuras abertas nos extremos da mesma.

Ainda foi brevemente avaliado o deslocamento sofrido pelo consolo conforme aumento da carga aplicada, até o momento da ruptura. Não se entrará muito na discussão desses resultados, por não se dispor de resultados experimentais como base de comparação; os resultados servem, entretanto, para avaliar a ductilidade dos materiais utilizados no consolo. A Figura 32 mostra a curva obtida de deslocamento por carga.

Figura 32 - Curva deslocamento por carga obtida da modelagem



(fonte: elaborado pelo autor)

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No projeto do consolo, foram testadas duas situações distintas: uma seguindo os critérios da norma com todas as limitações possíveis, e outra desprezando os limites que a NBR 6118 (2014) propõe às tensões de compressão. No primeiro caso a norma levou a resultados que puderam ser comprovados na modelagem numérica, ainda com uma pequena margem de segurança. No segundo caso, chegou-se a uma situação com falta de segurança, com o consolo rompendo sob carga inferior à esperada.

Nota-se, também, que o consolo que não fez uso de armadura de costura apresentou maiores problemas na biela de compressão, tendo rompido por fendilhamento da mesma; o consolo projetado com armadura de costura, por outro lado, apresentou maior ductilidade, falhando finalmente por flexão.

Levando tudo isso em conta, pode-se concluir que para este caso específico, seguir os critérios e limitações da NBR 6118 (2014) foram suficientes para o projeto, porém cada caso deve ser avaliado individualmente, especialmente ao se fazer uso de concretos com resistências ainda maiores.

REFERÊNCIAS

- ANSYS INC. **ANSYS 17.0**. Versão acadêmica. Programa de Elementos Finitos.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- _____. **NBR 9062**: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- CANHA, R. M. F.; KUCHMA, D. A.; EL DEBS, M. K.; DE SOUZA, R. A. **Numerical analysis of reinforced high strength concrete corbels**. Engineering Structures, v.74, p.130-144, 2014.
- CAMPOS FILHO, A. **Detalhamento das estruturas de concreto pelo Método das Bielas e Tirantes**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996. Disponível em: <<https://chasqueweb.ufrgs.br/~americo/topicos/bielas.pdf>>. Acesso em 10 nov. 2016.
- FOSTER S. J.; POWELL R. E.; SELIM H. S. **Performance of High-Strength Concrete Corbels**. ACI, American Concrete Institute, v.93, n.05, p.555-563, 1996.
- HARTMANN, C.; HELENE, P. **HPCC in Brazilian Office Tower**. Concrete Internacional. ACI, American Concrete Institute, v. 25, n. 12, p. 64-68, 2003.
- NEPOMUCENO, C. L. **Análise de vigas-parede aplicando modelo de biela e tirante e microtreliça**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil. Brasília: Universidade de Brasília, 2012.
- PAULAY, T.; PARK, R. **Reinforced Concrete Structures**. Christchurch: University of Canterbury, 1974.
- RANA, N.; TIWARI, A.; SRIVASTAVA, A. K. **High Performance Concrete and its Applications in the Field of Civil Engineering Construction**. International Journal of Current Engineering and Technology, v. 6, n. 3, 2016.
- SILVA, R. C. da; GIONGO, J. S. **Modelos de bielas e tirantes aplicados a estruturas de concreto armado**. São Carlos: EESC-USP, 2000.

SNIC. **Relatório Consumo Mensal 2016.** Disponível em <<http://www.snic.org.br/numeros/numeros.asp?path=Consumomensal2016.gif>>. Acesso em: 15 out. 2016.

SONG, J; LIU, S. **Properties of Reactive Powder Concrete and Its Application in Highway Bridge.** Hindawi Publishing Corporation, 2016. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1155/2016/5460241>>. Acesso em 16 out. 2016.

SUN, W; YE, G.; GU, C. **Ultrahigh performance concrete – properties, applications and perspectives.** Science China Technological Sciences, v. 58, n. 4, p. 587-599, 2015.

TUAN, N. **Rice Husk ash as a mineral admixture for ultra high performance concrete.** Dissertation for the Doctor Degree. Delft: Delft University of Technology, 2011. Disponível em <<http://resolver.tudelft.nl/uuid:2e77e209-ce36-4a9e-be3c-760181f71ae6>>. Acesso em 10 out. 2016.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho.** IBRACON, cap. 36, 2011. Disponível em <<https://de.scribd.com/doc/312689821/lc53-pdf>>. Acesso em 08 out. 2016.

WIGHT, J. K.; MACGREGOR, J. G. **Reinforced concrete: mechanics and design.** 6ª edição. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2012.

APÊNDICE A – Comandos utilizados no Ansys

Neste Apêndice serão listados os comandos utilizados no programa Ansys para as modelagens realizadas. As unidades aqui utilizadas são mm, kg e N.

O primeiro comando é em relação ao concreto utilizado na modelagem.

```
ET,MATID,SOLID65  
R,MATID,0,0,0,0,0,0  
RMORE,0,0,0,0,0
```

```
MP,EX,MATID,42000  
MP,PRXY,MATID,0.2  
MPTEMP,MATID,0
```

```
TB,CONCR,MATID,1,9  
TBDATA,1,0.3,0.8,7,90
```

```
TB,MISO,MATID,1,35,0  
TBTEMP,22  
TBPT,,0.0001,4.2  
TBPT,,0.0002,8.4  
TBPT,,0.0003,12.6  
TBPT,,0.0004,16.8  
TBPT,,0.0005,21  
TBPT,,0.0006,25.2  
TBPT,,0.0007,29.4  
TBPT,,0.0008,33.6  
TBPT,,0.0009,37.8  
TBPT,,0.001,42  
TBPT,,0.0011,46.2  
TBPT,,0.0012,50.4  
TBPT,,0.0013,54.6  
TBPT,,0.0014,58.8  
TBPT,,0.0015,63  
TBPT,,0.0016,67.2  
TBPT,,0.0017,71.4  
TBPT,,0.0018,75.6  
TBPT,,0.0019,79.8  
TBPT,,0.002,84  
TBPT,,0.0021,88  
TBPT,,0.0022,91.7  
TBPT,,0.0023,94.2  
TBPT,,0.0024,97  
TBPT,,0.0025,99.4  
TBPT,,0.0026,101.4  
TBPT,,0.0027,103  
TBPT,,0.0028,104.2  
TBPT,,0.0029,105  
TBPT,,0.003,105  
TBPT,,0.0031,105
```

```

TBPT,,0.0032,105
TBPT,,0.0033,105
TBPT,,0.0034,105
TBPT,,0.0035,105

```

O segundo comando define o material aço utilizado nas armaduras. Esse comando é adicionado separadamente para cada elemento linha, que representam as armaduras, encontrados na modelagem. Na última linha é indicado o raio do elemento em questão, valor que varia para cada um deles.

```

ET,MATID,LINK180
MPDATA,EX,MATID,,210000
MPDATA,PRXY,MATID,,0.3
TB,BISO,MATID,1,2
TBDATA,,500,2100
R,MATID,16,,0

```

O terceiro comando é utilizado no processamento numérico da modelagem, e serve para unir os nós de elementos diferentes em um mesmo sólido, ou seja, para unir o concreto, idealizado no primeiro comando como “SOLID65”, e o aço das armaduras, idealizado no segundo comando como “LINK180”.

```

/PREP7
ESEL,S,ENAME,,65
ESEL,A,ENAME,,180
ALLSEL,BELOW,ELEM
CPINTF,ALL,0.00001,
ALLSEL,ALL
/SOLU
OUTRES,ALL,ALL

```

O quarto e último comando é utilizado no pós-processamento do modelo, sendo responsável pela impressão de uma figura que mostra a fissuração e a plastificação do concreto.

```

/SHOW,png
/ANG,1,
/VIEW,1,0,0,0
/DEVICE,VECTOR,ON
SET,Last
PLCRACK

```