

**CENTRO UNIVERSITARIO FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ
EVERTON PITOL**

**DIMENSIONAMENTO DE FÔRMA METÁLICA MOLDANTE DE CONCRETO PARA
PILAR**

**CASCAVEL - PR
2017**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ
EVERTON PITOL**

**DIMENSIONAMENTO DE FÔRMA METÁLICA MOLDANTE DE CONCRETO PARA
PILAR**

Trabalho apresentado na disciplina e Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de Engenharia Mecânica, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Professor Orientador: Eng. Mec. José Cláudio Terra

CASCADEL - PR

2017

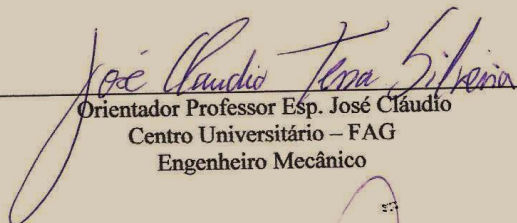
FACULDADE ASSIS GURGACZ - FAG


EVERTON PITOL

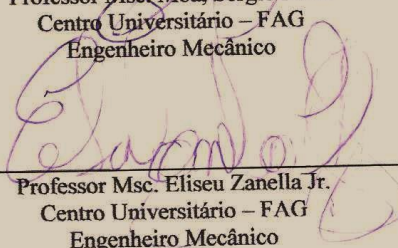
**DIMENSIONAMENTO DE FÔRMA METÁLICA MOLDANTE DE
CONCRETO PARA PILAR**

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Mecânica, da FAG, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, sob orientação do Professor José Claudio.

BANCA EXAMINADORA


Orientador Professor Esp. José Claudio
Centro Universitário – FAG
Engenheiro Mecânico


Professor Msc. Mba, Sergio Mota
Centro Universitário – FAG
Engenheiro Mecânico


Professor Msc. Eliseu Zanella Jr.
Centro Universitário – FAG
Engenheiro Mecânico

Cascavel, 04 de Dezembro de 2017.

Aos meus pais, obrigado pela dedicação e apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus por iluminar e guiar o meu caminho para que eu não desfocasse dos meus objetivos desde o começo.

À toda minha família que me deu força e me incentivou para não desistir quando me esbarrei na dificuldade, por me definirem como pessoa e por me ensinarem os caminhos certos na vida. É a eles que eu devo tudo o que é mais precioso no mundo.

À minha namorada, a todo apoio que me deu em todos os momentos, ela é a fonte de renovação das minhas forças e me engrandece como pessoa.

Ao meu orientador José Claudio Terra, pelo suporte, sugestões e críticas que engradeceram esse trabalho, sou grato pois ele não mediu esforços para sanar todas as dúvidas que apareceram no decorrer do trabalho.

A todos os professores que se colocaram à disposição a me ajudar no decorrer da faculdade e neste trabalho, a contribuição, dedicação e a experiência de cada um foi de suma importância para o meu crescimento profissional.

A todos os meus amigos que conquistei no decorrer da faculdade, a amizade, ajuda, companheirismo de cada um é muito gratificante. Nunca esquecerei dos momentos em que passamos juntos, as risadas e as trapalhadas, sou muito grato por ter essa conquista.

RESUMO

As empresas fabricante de equipamentos para pré-moldados estão sendo cada vez mais solicitada na qualidade e preço baixo do produto, nesse contexto, a redução de material e desperdícios são fundamentais no quesito preço baixo. Para a qualidade do produto é necessário um dimensionamento correto. O presente trabalho foi realizado em uma empresa fabricante de fôrma pra pré-moldado e tratou de dimensionar fôrmas que são patenteadas, sendo assim foi analisado a deflexão de cada componente afim de verificar coerência com a norma. Após a análise, foi alterado o espaçamento entre reforços e também um componente da fôrma, diminuindo material. A diminuição de material chegou à 36,67%, com essa redução consegue-se pagar toda a comissão que os funcionários ganham na fôrma.

PALAVRAS-CHAVE: Redução de material. Economia. Aço

ABSTRACT

The companies that manufacture mold for precast are being increasingly requested in the quality and low price of the product, in this context, the reduction of material and waste are fundamental in the low price issue. For the product quality is necessary a correct sizing. The present work was carried out in a company that manufactures precast molding and tried to scale out molds that are patented, thus the deflection of each component was analyzed in order to verify coherency with the standard. After the analysis, the spacing between reinforcements and a mold component was changed, decreasing the material. The decrease of material reached 36,67%, with this reduction is possible to pay all the commission that employees earn in the mold.

PALAVRAS-CHAVE: Reduction of material. Steel. Economy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Espaçamento para borracha de vedação	17
Figura 2 – Montagem do leito com seus componentes	18
Figura 3 – Conjunto fôrma	19
Figura 4 – Pressões do concreto aplicado na fôrma.	20
Figura 5 – Pressão hidrostática na lateral da fôrma	20
Figura 6 – Cargas Distribuídas e Cargas Resultantes	22
Figura 7 – Força axial a barra.....	23
Figura 8 – Barra sujeita a esforço de tração	23
Figura 9 – Deformação elástica de um material	26
Figura 10 – Correlação entre as ciências.....	28
Figura 11 – Gráfico Tensão Deformação para materiais dúcteis (Aço com baixo teor de carbono).....	29
Figura 12 – Centro de Gravidade de uma área simples	31
Figura 13 – Centro de gravidade para caso de simetria.....	32
Figura 14 – Centro de Gravidade de áreas compostas	32
Figura 15 – Trava	39
Figura 16 – Força na Trava	40
Figura 17 – Medida Reforço “U”	42
Figura 18 – Localização do Reforço “U”	44
Figura 19 – Ferro chato entre travas	45
Figura 20 – Dimensões do Jota.....	46
Figura 21 – Relação de Altura	48
Figura 22 – Garra	49
Figura 23 – Localização da Garra	51
Figura 24 – Leito.....	52
Figura 25 – Distância entre “Us”	54
Figura 26 – Resultante do concreto na chapa lateral	55
Figura 27 – Centro de Gravidade do Reforço “U”	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Tolerâncias para as dimensões longitudinais	17
Tabela 2 – Pressão Hidrostática na Lateral	58
Tabela 3 – Carga Aplicada no Leito	59
Tabela 4 – Resultante na trava.....	59
Tabela 5 – Resistências da Trava	60
Tabela 6 – Carga distribuída conforme dimensão do Reforço “U”	61
Tabela 7 – Deflexão do Reforço “U”	62
Tabela 8 – Carregamento distribuído no chato entre as travas	63
Tabela 9 – Deflexão do chato entre as travas	63
Tabela 10 – Deflexão do chato entre as travas menor	63
Tabela 11 – Carregamento distribuído no Jota.....	64
Tabela 12 – Deflexão do Jota	65
Tabela 13 – Deflexão da Garra	65
Tabela 14 – Momento de inércia do Leito para Comprimento	66
Tabela 15 – Carga Aplicada no Leito sentido comprimento.....	67
Tabela 16 – Deflexão do Leito no sentido comprimento	67
Tabela 17 – Deflexão do Leito sentido largura	68
Tabela 18 – Momento de inércia da chapa entre reforço “U”	69
Tabela 19 – Carregamento distribuído na chapa entre reforço “U”	69
Tabela 20 – Deflexão da chapa entre o reforço “U”	70
Tabela 21 – Distância máxima entre Reforços	70
Tabela 22 – Redução de material em 1 metro de lateral da fôrma	71
Tabela 23 – Peso dos componentes na lateral da fôrma existente x fôrma dimensionada	72

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Pressão Hidrostática	20
Equação 2 – Carga do Concreto no Leito	21
Equação 3 – Resistência na seção dos Furos	24
Equação 4 – Resistência na área bruta	24
Equação 5 – Cisalhamento do pino.....	24
Equação 6 – Resistência de pressão de contato em furos	24
Equação 7 – Centro de Gravidade para peça composta.....	32
Equação 8 – Momento de Inércia.....	33
Equação 9 – Carga distribuída no Reforço "U"	43

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	13
1.1 INTRODUÇÃO	13
1.2 OBJETIVOS	15
1.2.1 Objetivo geral	15
1.2.2 Objetivos específicos	15
CAPÍTULO 2	16
2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1.1 Fôrmas.....	16
2.1.1.2 Propriedade das fôrmas (Resistência).....	16
2.1.2 Protótipo para Dimensionamento	17
2.1.3 Ação do Concreto na Fôrma.....	19
2.1.3.1 Carregamento Axial nas peças	22
2.1.3.2 Deflexão dos Materiais	26
2.1.4 Resistência dos materiais	27
2.1.5 Diagrama Tensão–Deformação	29
2.1.5.1 Deformação Elástica	30
2.1.5.2 Deformação Plástica ou Permanente	30
2.1.6 Diagrama de Corpo Livre.....	31
2.1.7 Centro de gravidade de uma peça	31
2.1.8 Momento de inércia.....	33
2.1.9 Peso específico do aço	34
CAPÍTULO 3	35
3.1 MATERIAL.....	35
3.1.1 Livro Resistência dos materiais, R.C. Hibbeler.....	35
3.1.2 Livro Estruturas Metálicas, A. C. F. B. Pinheiro.....	35
3.1.3 Livro Tecnologia Mecânica, V. Chiaverini.	35
3.1.4 SolidWorks®.....	36
3.1.5 Excel®	36
3.1.6 ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) - NBR 9062	36
3.2 MÉTODOS	36
3.2.1 Definição das Dimensões das formas existentes	37
3.2.2 Cálculo da Força Hidrostática exercida pelo concreto nas fôrmas.....	37

3.2.3 Definições de Resistência do aço para cálculos	38
3.2.4 Cálculos dos esforços nos Componentes da Fôrma.....	38
3.2.4.1 Trava.....	39
3.2.4.2 Reforço “U”	42
3.2.4.3 Ferro Chato entre Travas	44
3.2.4.4 Jota.....	46
3.2.4.5 Garra.....	49
3.2.4.6 Leito	51
3.2.4.6.1 Deflexão do Leito sentido Comprimento	51
3.2.4.6.1 Deflexão do Leito sentido Largura	53
3.2.4.7 Chapa entre Reforços “U”	55
3.2.5 Cálculos de Deflexão conforme a NBR 9062	56
3.2.5.1 Cálculo de redução dos espaçamento dos reforços “U”	56
3.2.5.2 Cálculo de redução do Ferro Chato entre Travas	57
CAPÍTULO 4	58
4.1 ANÁLISE E DISCUSSÕES DE RESULTADOS	58
4.1.1 Verificação da pressão hidrostática	58
4.1.2 verificação da deflexão dos componentes perante a norma.....	59
4.1.2.1 Trava.....	59
4.1.2.2 Reforço “U”	60
4.1.2.3 Ferro chato entre Travas	62
4.1.2.4 Jota.....	64
4.1.2.5 Garra.....	65
4.1.2.6 Leito	66
4.1.2.6.1 Leito no sentido Comprimento	66
4.1.2.6.2 Leito no sentido Largura	68
4.1.2.7 Chapa entre Reforços “U”	69
4.1.3 COMPARAÇÃO DE PESOS ENTRE LATERAIS.....	71
CAPÍTULO 5	73
5.1 CONCLUSÃO.....	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
ANEXO A – DEFORMAÇÃO DAS VIGAS	76
ANEXO B – MOMENTOS DE INÉRCIA DE FIGURAS PLANAS	77

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUÇÃO

Grandes obras são construídas cada vez mais rapidamente e facilmente em virtude do uso de equipamentos que minimizam e até mesmo eliminam problemas nas edificações. Entre os exemplos estão as peças de concreto pré-moldadas, cujo uso auxilia na finalização mais rápida das construções.

As empresas que ofertam fôrmas moldante de concreto estão cada vez sendo mais solicitadas na entrega dos equipamentos, principalmente nos quesitos de rapidez, qualidade e preço baixo.

A preocupação com o meio ambiente começou a ganhar espaço, o reaproveitamento de material, a qualidade no acabamento do concreto e a facilidade da montagem e desmontagem da fôrma fizeram com que o mercado ficasse mais competitivo entre as empresas que ofertam esse equipamento.

De acordo com o Instituto Aço Brasil (2012), o produto mais reciclado e mais reciclável do mundo é o aço, basta olharmos para qualquer lado que temos o aço empregado, carros, geladeiras, barras e arames são breves exemplos de produtos que são reciclados e produzidos novamente com a mesma qualidade.

O Brasil tem o maior parque fabril de aço da América Latina composto por 29 siderúrgicas divididos em 11 grupos empresariais, conseqüentemente é o 9º maior produtor mundial de aço, exportando aproximadamente 10,8 milhões de toneladas, produzindo no total 35,2 milhões de toneladas em 2011 (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2012).

As empresas que são associadas no Instituto Aço Brasil, geram anualmente cerca de 20 milhões de toneladas de sucatas. Parte dela é reciclada e volta ao mercado, desta maneira a sucata da empresa Metal mecânica retorna como matéria-prima, assim sendo o desperdício deve ser minimizado, de modo a reduzir gastos (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2012).

Com esses números, o ramo de fabricantes de fôrmas metálicas fica claro a necessidade de obter melhor aproveitamento de material evitando possíveis perdas, diminuindo relativamente o preço das fôrmas e tendo uma eficiência melhor no mercado contra os concorrentes.

O aumento do número de empresas fabricantes de fôrmas metálicas torna necessário obter melhor aproveitamento de material evitando possíveis perdas, diminuindo relativamente o preço das fôrmas e tendo uma eficiência melhor no mercado contra os concorrentes.

Por conta de uma falta de dimensionamento, as empresas não possuem base de quanto material desperdiçam, e compram material novo pagando um preço elevado, sendo que esse material foi desperdiçado pela própria empresa e foi reciclado. Com o dimensionamento da fôrma o material será melhor aproveitado, reduzindo custos e conseqüentemente subtraindo o preço do produto final.

Como as fôrmas são constituídas em peças feitas de aço que são fixados com solda para suportar os esforços que o concreto aplica, e seguem um padrão de fabricação sem dimensionamento, passando por processos pré-estipulados para sua construção, o estudo em foco limita-se em calcular os esforços atuantes na fôrma metálica para pilar e em dimensionar as peças da fôrma porém sem o cálculo de solda.

O cálculo da solda não irá interferir diretamente na redução do material usado e reciclado, satisfazendo a necessidade da indústria produtora da fôrma na redução de custos e conseguindo diminuir gradativamente o preço do produto.

A empresa em que esse trabalho é realizado, atualmente utiliza dois tipos de sistemas de fôrmas, o SI – SISTEMA INTEIRO e o AMBF – Articulado Móvel com Borracha Fixa porém a pesquisa vai focar na fôrma com o sistema patenteado AMBF. Por ser um sistema patenteado, jamais foi feito algum cálculo de dimensionamento garantido que a lateral da fôrma irá resistir aos esforços aplicados pelo concreto.

Nessas condições, o trabalho buscou ter um dimensionamento calculado evitando possíveis perdas de materiais resultando em um menor preço do produto, e buscou respostas que respondam a seguinte incógnita: As fôrmas sem dimensionamento calculado estão sendo fabricadas sem excesso de material?

Lembrou-se também que o dimensionamento impactará também na garantia oferecida ao cliente, visto que as quantidades de materiais empregados não serão mais baseados apenas no senso comum.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Através do projeto de dimensionamento, verificar a possibilidade de reduzir custos com materiais sem comprometer a qualidade.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar esforços do concreto exercido na fôrma metálica e em seus componentes;
- Calcular a deflexão da fôrma existente e do seus componentes afim de verificar sua deflexão em relação a norma;
- Comparar peso das laterais da fôrma existente com as de projeto de dimensionamento;

CAPÍTULO 2

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção são apresentados os principais conceitos e ferramentas para o desenvolvimento do trabalho, com base na pesquisa teórica realizada.

2.1.1 Fôrmas

Na definição de fôrma Barros e Melhado (1998), relatam que ela é um item auxiliar para se conseguir definir uma geometria para o concreto, tendo como a principal função resistir ao esforço do concreto até que sua resistência se auto suporte.

O custo das fôrmas na produção de uma peça, que contem sua base em concreto, variam de 30 a 70% consistindo principalmente em mão de obras e materiais. (PEURIFOY *et al*; 2015).

2.1.1.2 Propriedade das fôrmas (Resistência)

Barros e Melhado (1998) expressam que uma fôrma necessita ter a resistência a ruptura onde se garante que a fôrma vai tolerar os esforços aplicados do concreto, além do seu próprio peso, ou a necessidade de uma resistência a deformação, o que expressa que a fôrma apresente uma resistência suficiente para guardar a geometria e dimensões e que tenham uma deformação adequada que são previstas no projeto.

Para a deformação a NBR 9062 (ABNT, 2001) estabelece que para as dimensões transversais do perfil do concreto, a tolerância é de aproximadamente 0,5 cm, e para dimensões ao longo do concreto, as tolerâncias seguem dimensões conforme a Tabela 1.

Tabela 1– Tolerâncias para as dimensões longitudinais

Comprimento (m)	Tolerância (cm)
Até 5,00	± 1,0
De 5,00 à 15,00	± 1,5
Acima de 15,00	± 2,0

Fonte: Adaptado de: ABNT (2001, p. 4).

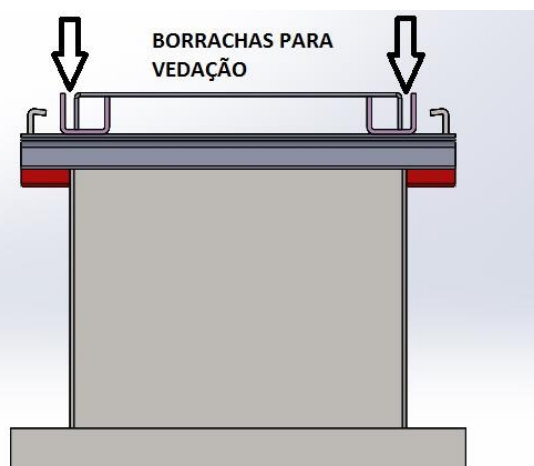
2.1.2 Protótipo para Dimensionamento

Conforme as observações do estágio realizado pelo autor na empresa em que o estudo foi desenvolvido, as fôrmas a serem dimensionadas são constituídas por dois componentes, sendo o leito e a fôrma.

O Leito é uma estrutura constituída em aço onde o concreto é deixado em cima para secar após ser feito a sua moldagem. Os seus componentes são:

- Chapa do Leito: Padrão de chapa dobrada conforme a largura do concreto que será moldado;
- Garras: Peça importante nos quesitos de desmolde e na tolerância de medida, tendo em vista que ela sustenta a pressão exercida pelo concreto;
- “U”: Garante a vedação durante o enchimento da fôrma devido à aplicação de borrachas (Figura 1) entre a chapa do leito e o “U”.

Figura 1 – Espaçamento para borracha de vedação

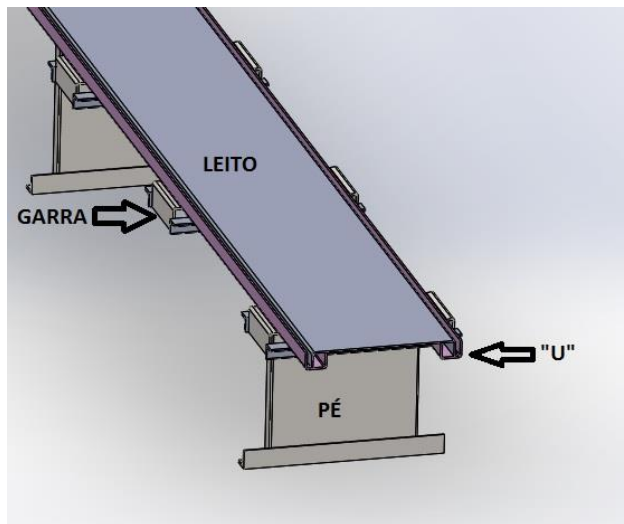


Fonte: O autor (2017).

- Pé: Tem a função de deixar mais elevado o leito melhorando o trabalho do operador com a estrutura, além de deixar o leito alinhado afim de não transpor a tolerância.

Na Figura 2 ilustra a estrutura do leito completa com os seus devidos componentes.

Figura 2 – Montagem do leito com seus componentes



Fonte: O autor (2017).

Já a Fôrma é constituída por um conjunto de chapas e reforços aplicados a fim de evitar que a chapa de aço não se deforme além do limites de tolerância exigidas por norma.

A lateral da fôrma é montada com uma chapa de aço dobrada conforme será feito o perfil do concreto, reforços, travas, e o principal, o “jota” que completa o sistema patenteado no qual se nomeia AMBF – Articulado Móvel com Borracha Fixa.

Com base nos fatos, pode-se dizer que a lateral da fôrma é o conjunto da fôrma metálica que contem mais material aplicado.

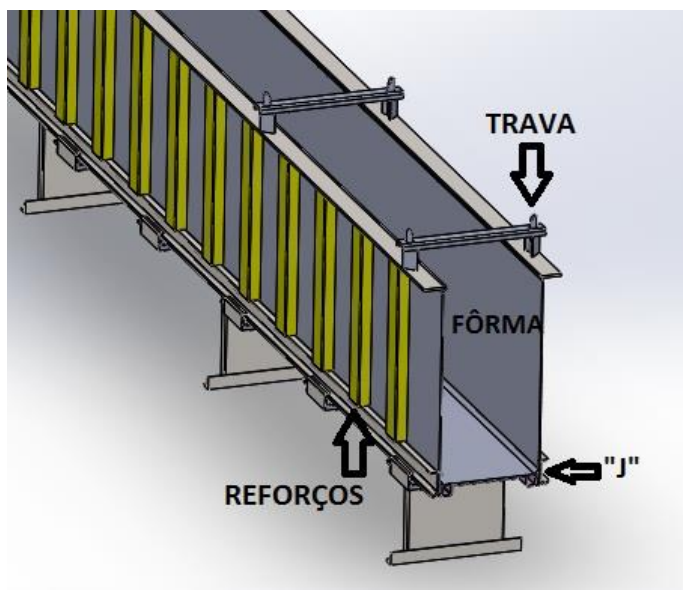
As partes constituintes da fôrma são:

- Chapa da fôrma: Principal componente dá a forma e a garantia de tolerância estabelecida para o concreto;
- Reforços: Principal função é a de não deixar a chapa se deformar ultrapassando a tolerância;

- Jota: Tem o nome jota justamente pelo seu formato, tem a função de desmolde juntamente com a garra. É parte do sistema patenteado;
- Trava: Sua função é travar a fôrma garantindo a dimensão estipulada e evitando que a fôrma se abra conforme o concreto exerce pressão na chapa da fôrma.

Na Figura 3 é demonstrado um esboço completo de uma forma metálica para pilar com o leito e a sua lateral.

Figura 3 – Conjunto fôrma



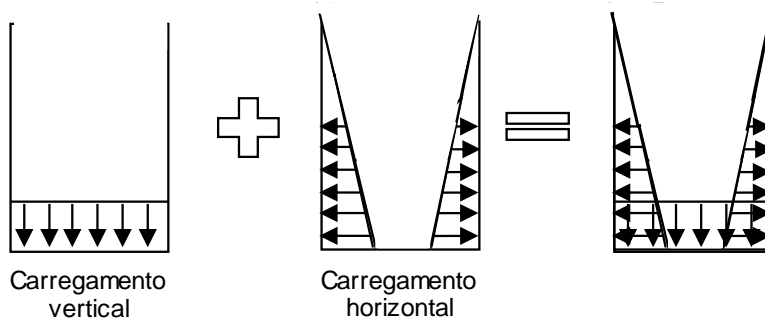
Fonte: O autor (2017).

2.1.3 Ação do Concreto na Fôrma

Gardner *apud* Da Cruz (1997) discorre que quando o concreto fresco é lançado sobre a fôrma, ocorre uma colisão entre o concreto e a fôrma. Após o lançamento do concreto sobre a fôrma se faz um adensamento no concreto manualmente ou mecanicamente, vibrando o concreto com o intuito de retirar o ar preso na fôrma.

O concreto após ser lançado na forma passará a se comportar como um líquido, aplicando uma pressão caracterizada como hidrostática na lateral da fôrma (Figura 4).

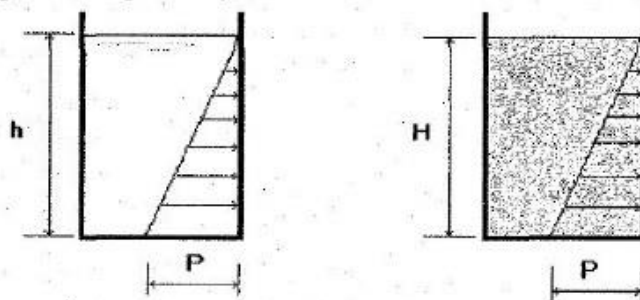
Figura 4 – Pressões do concreto aplicado na fôrma.



Fonte: Adaptado de Araújo e Freire (2004, p. 9).

A Lateral da fôrma tende a resistir à pressão do concreto após ser lançada na fôrma, Da Cruz (1997, p.23) relata que o concreto ficara em repouso agindo como um fluido até sua solidificação. A pressão exercida na lateral da fôrma será a multiplicação da sua massa volumétrica e da sua altura final (Figura 5).

Figura 5 – Pressão hidrostática na lateral da fôrma



Fonte: Adaptado de: da Cruz (1997, p.24).

Gardner *apud* Da Cruz (1997) escreve que para se calcular a pressão hidrostática do concreto na lateral da fôrma, pode se usar a equação 1, além do mais define o valor de $\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$ porque estamos trabalhando com concreto armado.

$$P_c = \gamma_c \cdot h \quad (1)$$

Onde:

P: Pressão (kN/m^2)

γ_c : Peso específico (kN/m^3)

h: Altura (m)

Bastos (2015) define o peso próprio do concreto para o carregamento vertical onde é aplicado uma carga no leito (Figura 4), a carga pode ser calculada pela Equação 2.

$$P_c = \gamma_c \cdot h \cdot l \quad (2)$$

Onde:

P: Pressão (kN/m)

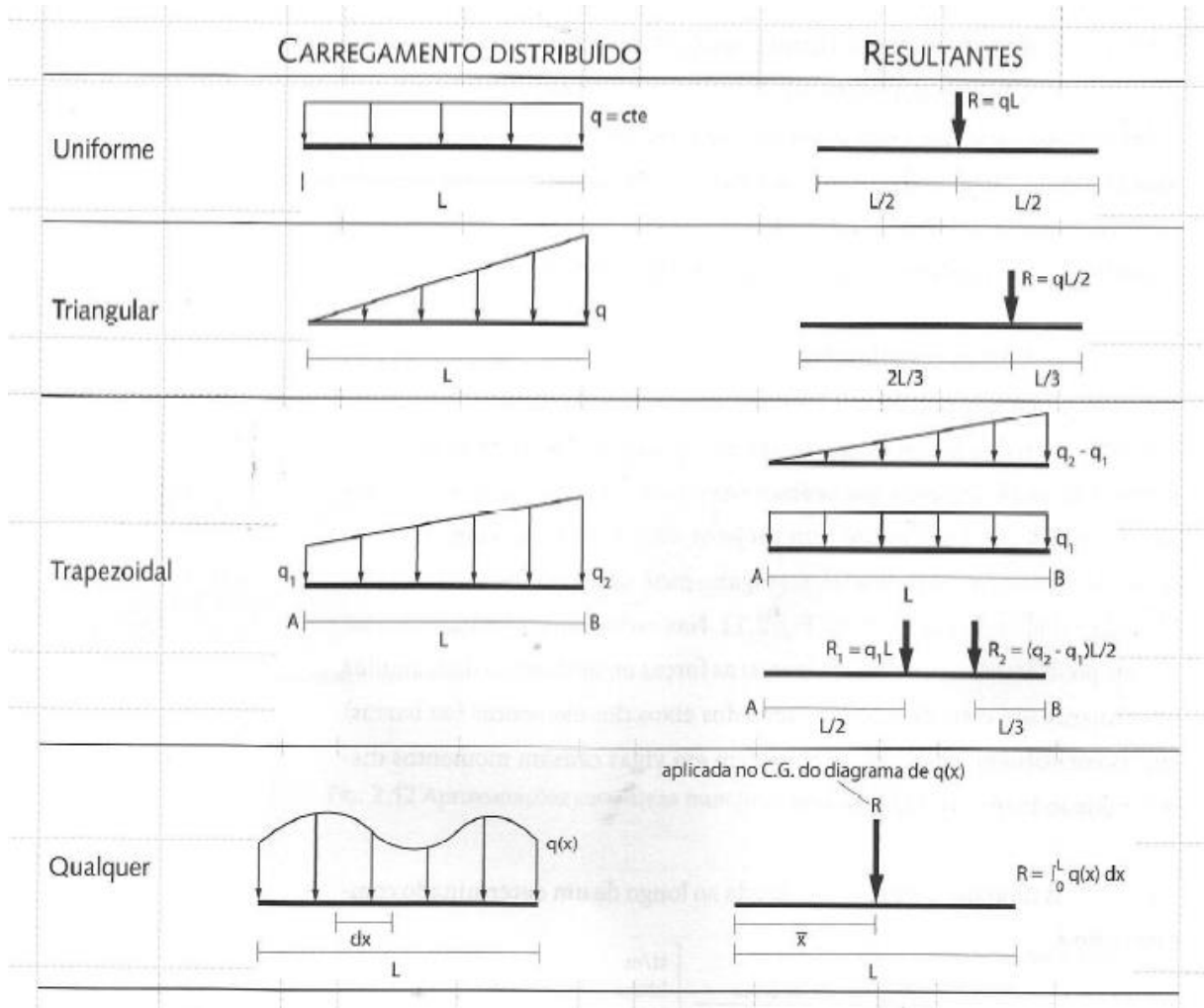
γ_c : Peso específico (kN/m³)

h: Altura (m)

l: Largura (m)

Para o valor de P, se tem uma carga distribuída na fôrma, Almeida (2009, p. 29) define carga distribuída como forças aplicadas ao longo de um comprimento, que pode ser transformada e aplicada coincidentemente com o centro de gravidade da peça. A força aplicada no centro de gravidade pode ser chamado de força concentrada ou resultante ou uma combinação das duas forças. A Figura 6 demonstra a carga distribuída e como ela pode ser aplicada apenas como carga resultante.

Figura 6 – Cargas Distribuídas e Cargas Resultantes



Fonte: Almeida (2009, p.30)

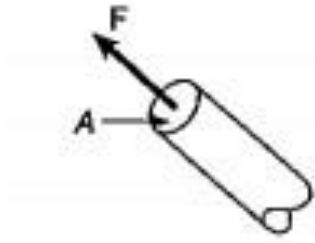
2.1.3.1 Carregamento Axial nas peças

O concreto após ser lançado na fôrma aplica solicitações de esforços em seus componentes. Uma dessas solicitações é o carregamento axial nos elementos estruturais que compõe uma fôrma.

Os elementos estruturais estão sujeitos a compressão e tração com alta repetitividade, além do mais, são aplicados carregamentos axiais na suas extremidades (HIBBELER, 2010).

Conforme Beer e Johnston (1995), carregamento axial é quando forças são aplicadas no material e se um tem uma força aplicada no mesmo sentido que o eixo da barra. Logo existe uma força perpendicular a uma área transversal (Figura 7).

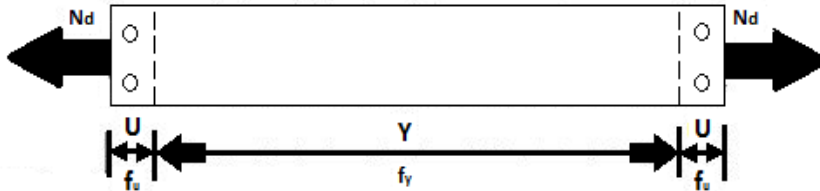
Figura 7 – Força axial a barra



Fonte: Adaptado de: Beer e Johnston (1995, p.3).

Suponha que uma barra de aço tenha uma aplicação de uma força perpendicular à uma área (Figura 8), e nela será aplicada o método de dimensionamento pelo estados limites.

Figura 8 – Barra sujeita a esforço de tração



Fonte: Adaptado de: Pinheiro (2005, p.35).

Pinheiro (2005) relata que para a região Y, não é permitido que ocorra um escoamento geral, pois assim a peça irá ser inutilizada, devido a peça sair da sua dimensão. Já na região U, ele descreve que por ser uma região com furo, não se tem uma uniformidade de tensão, então assim podendo ocorrer o escoamento localizado, mas não a ruptura do material.

Com isso, obtém-se as equações 3, 4, 5 e 6 para o cálculo da resistência na barra na seção dos furos, na área bruta, o cálculo do cisalhamento do pino que está no furos e também o cálculo do esforço do contato do pino sobre o furo, respectivamente:

$$N_{df \text{ furos}} = \frac{\{[espessura.largura] - [(D+0,003).espessura].C_t\}.F_u \Phi}{\gamma} \quad (3)$$

Onde:

$N_{df \text{ furos}}$: Resistência na seção dos Furos (kN);

D : Diâmetro do furo (m);

$espessura$: Espessura da peça (m);

$largura$: Largura da peça (m);

C_t : Coeficiente de redução para cálculo da área líquida efetiva;

F_u : Limite de resistência à tração do Aço (Mpa);

Φ : Coeficiente de resistência;

γ : Coeficiente de ponderação das ações.

$$N_{dbruta} = \frac{(espessura.largura).F_y.\Phi}{\gamma} \quad (4)$$

Onde:

N_{dbruta} : Resistência na seção da Área Bruta (kN);

F_y : Limite de escoamento do Aço (Mpa);

Φ : Coeficiente de resistência;

A_g : Área bruta (m²);

γ : Coeficiente de ponderação das ações.

$$R_{nvpino} = \frac{\left(0,7 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}\right) \cdot (0,6 \cdot F_u) \cdot \Phi_v}{\gamma} \quad (5)$$

Onde:

R_{nvpino} : Resistência nominal dos Pinos (kN);

D : Diâmetro do furo (m);

F_u : Limite de resistência à tração do Aço (Mpa);

Φ_v : Coeficiente de resistência para parafuso;

γ : Coeficiente de ponderação das ações.

$$R_{nrasg} = \frac{\left(\frac{e}{largura}\right) \cdot (espessura \cdot D) \cdot F_u \cdot \Phi_{cs}}{\gamma} \quad (6)$$

Onde:

R_{nrasg} : Resistência de pressão de contato em furos (kN);

e : Distância do eixo do furo até a borda da peça (m);

$largura$: Largura da peça (m);

$espessura$: Espessura da peça (m);

D : Diâmetro do furo (m);

F_u : Limite de resistência à tração do Aço (Mpa);

Φ_{cs} : Coeficiente de resistência da pressão do contato do pino no furo;

γ : Coeficiente de ponderação das ações.

Para usarmos essas equações é necessário saber definir os valores para os coeficientes presentes nelas:

- Coeficiente de resistência (Φ): Pinheiro (2005) determina que para esse coeficiente, devemos usar 0,9 na área bruta e 0,75 na área efetiva (Furos);
- Diâmetro do furo: Nota-se que para o diâmetro do furo da Equação 4 é somado um valor de 0,0035 metros, Pinheiro (2005) relata que deve-se somar 3,5 milímetros devido a folga máxima entre o furo e o parafuso e também por causa da danificação do furo devido ao puncionamento¹;
- Coeficiente de redução para cálculo da área líquida efetiva (C_t): Pinheiro (2005) escreve que para esse coeficiente, o valor deve ser 1,0 quando a transmissão de esforços é feita por todas as faces da peça em que está sendo aplicada a carga;
- Coeficiente de ponderação das ações (γ): Pinheiro (2005) discorre que ao você ter um determinado valor de resistência calculado, você necessita dividir esse valor por 1,4 como coeficiente de segurança;
- Coeficiente de resistência para parafuso (Φ_v): Pinheiro (2005) determina que para parafusos com limite de resistência à tração até 415 MPa, você tem que utilizar 0,6 para esse coeficiente;

¹ Puncionamento é um processo no qual é feito um furo com uma ferramenta (punção) na chapa de uma peça.

- Coeficiente de resistência da pressão do contato do pino no furo (ϕ_{cs}): Para esse coeficiente, Pinheiro (2005) relata que como o pino irá exercer uma pressão no furo da peça, ele determina o valor de 0,75 para qualquer caso em que um parafuso ou um elemento de fixação exerça pressão de um pino em um furo.

2.1.3.2 Deflexão dos Materiais

O Lançamento do concreto na fôrma aplica solicitações de deformação em seus componentes, essas deformações podem ser através da deflexão dos materiais visto que a deformação elástica e a deflexão estão diretamente ligadas.

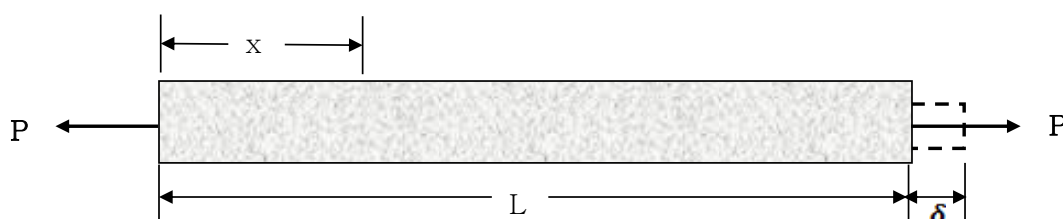
Para se determinar a deformação elástica de um material (Figura 9), necessita-se que o material seja homogêneo, ou seja, que seu módulo de elasticidade (E) seja constante e além disso, necessita também que uma força seja aplicada continuamente (HIBBELER, 2010).

Além do mais, Hibbeler (2010), define o valor do módulo de elasticidade do aço em 200×10^9 Pascal.

O módulo de elasticidade de um material para Melconian (2014) é intensidade da força aplicada em um determinado material fazendo com que ele se deforme.

Ademais, está ligado diretamente com a rigidez do material, portanto ao aplicarmos uma mesma força em dois materiais distintos um deformará mais que o outro devido ao seu módulo de elasticidade.

Figura 9 – Deformação elástica de um material



Fonte: adaptado de Hibbeler (2010, p.87).

Beer e Johnston (1995), explicam que se a carga que atua no material não excede o seu limite de proporcionalidade pode ser aplicada para a deformação elástica ou deflexão.

Para outras forças aplicadas em vigas no anexo A, demonstra alguns tipos de deflexão sujeitas na peça quando se é aplicado um determinado carregamento em seu corpo. Mostra também a sua linha elástica juntamente com sua flecha máxima.

É necessário fazer uma limitação do grau de deflexão que uma viga ou eixo pode sofrer quando este é submetido a uma carga, pois uma peça que deflete mais que o projetado não tem nenhuma função dentro do projeto (HIBBELER, 2010).

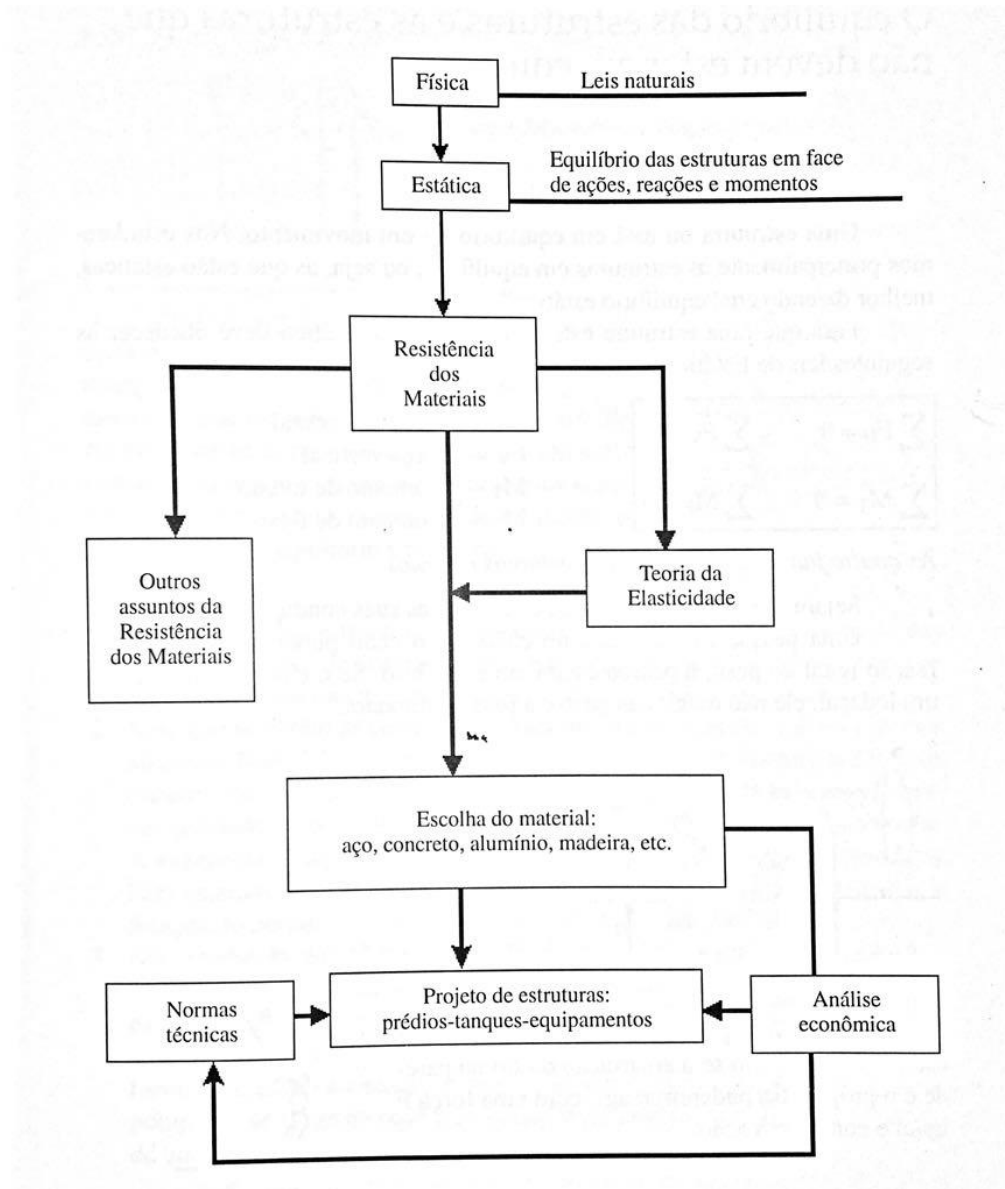
2.1.4 Resistência dos materiais

De acordo com Hibbeler (2010), A resistência dos materiais é uma parte da mecânica que estuda o comportamento do corpo quando este é sujeito a esforços externos envolvendo o cálculo das deformações do corpo proporcionando a sua estabilidade através de estudos.

Em primeiro lugar se faz necessário utilizar os princípios da estática para determinação de forças atuantes que são aplicadas externa e internamente em vários elementos. A deflexão, a sua estabilidade e o seu tamanho dependem também de que material é feito o elemento.

Segundo Botelho (1998), na resistência dos materiais existe um correlação entre as várias ciências existente, sendo elas, física, estática, resistência dos materiais, teoria da elasticidade, escolha do material adequado, análise econômica, normas técnicas, projetos de estruturas (Figura 10).

Figura 10 – Correlação entre as ciências



Fonte: Botelho (1998, p.15).

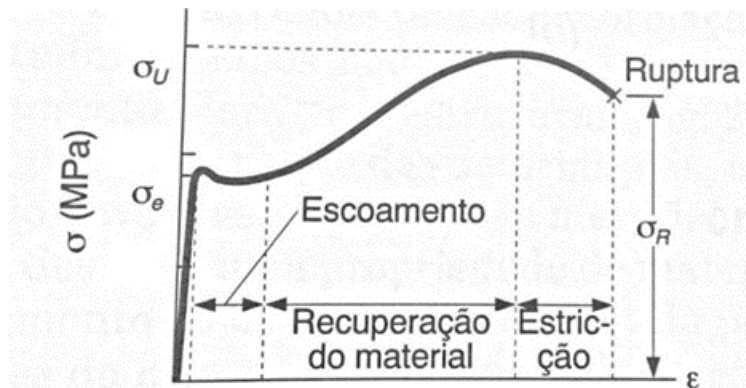
Sabendo o material aplicado na estrutura e suas dimensões com base em normas técnicas e aplicando-o uma força nesse material, a resistência dos materiais determinará quais deformações que vão ocorrer no material, assim pode-se fazer uma análise econômica na estrutura (BOTELHO, 1998).

2.1.5 Diagrama Tensão–Deformação

Conforme Hibbeler (2010), o diagrama tensão-deformação é altamente importante na engenharia, pois através dele que é adquirido dados sobre a resistência de um material, sendo a resistência a tração ou a resistência a compressão, não considerando a sua geometria.

Para um mesmo material o diagrama tensão-deformação é altamente variável justamente por depender de dois fatores que são a velocidade de crescimento da carga e a temperatura do corpo de prova. Assim pode se dividir os materiais em dois grupos, sendo respectivamente os materiais frágeis e os materiais dúcteis (BEER, JOHNSTON, 1995).

Figura 11 – Gráfico Tensão Deformação para materiais dúcteis (Aço com baixo teor de carbono)



Fonte: adaptado de: Beer, Johnston (1995, p.71).

Budynas e Nisbeth (2016) explicam que o ponto de escoamento, se dá quando o a deformação do material aumenta rapidamente e não é acompanhada pelo aumento da tensão no teste de tração. Um material terá sua estrição quando sua deformação é plástica, ou seja, quando o material se deforma até se romper.

O material terá sua recuperação quando não atingir a sua estrição tendo um deformação elástica, voltando a sua forma original.

2.1.5.1 Deformação Elástica

Conforme Beer e Johnston (1995), a elasticidade de um material está ligada a sua deformação causada por um determinado carregamento aplicado sobre o seu corpo, sendo que após retirado essa carga, o material volta a ter o seu formato original. Logo temos que um material é elástico quando a tensão aplicada a si, é menor que o valor de escoamento.

Budynas e Nisbett (2011) descrevem que elasticidade é a propriedade de uma material que possibilita a retomada para a sua configuração original.

Chiaverini (1986) relata que o limite de escoamento do aço pode variar de 19 a 40 kgf/mm², ou seja, na deformação elástica um mesmo material com alteração na sua composição pode ter uma variação na deformação.

Já para o ferro comercialmente puro, Chiaverini (1986) determina que o valor de limite de escoamento seja 29,4 kgf/mm².

2.1.5.2 Deformação Plástica ou Permanente

Ao aplicar uma tensão em um determinado material que passe o limite elástico dele, após aliviar essa tensão o material não volta ao seu formato original, esse material apresentou uma deformação plástica ou permanente (BUDYNAS E NISBETT, 2011).

Beer e Johnston (1995) expressam que deformação plástica para a maioria dos materiais não apenas depende só da tensão extrema, mas também do tempo que a carga é retirada do material.

Chiaverini (1986) escreve que o limite de resistência à tração do aço pode variar de 28 a 50 kgf/mm², ou seja, na deformação plástica um mesmo material com alteração na sua composição pode ter uma variação de resistência quando é sujeita a uma mesma carga.

Já para o ferro comercialmente puro, Chiaverini (1986) fixa o valor de resistência à tração em 18,2 kgf/mm².

2.1.6 Diagrama de Corpo Livre

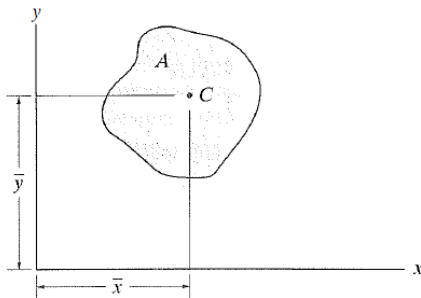
Budynas e Nisbett (2016) dissertam que diagrama de corpo livre é um jeito de isolar um componente de uma máquina ou de uma estrutura que contém um grau elevado de identificação das forças atuantes sobre a peça, simplificando o raciocínio e auxiliando em um planejamento quando se trata em um entendimento lógico do problema.

Diagrama do corpo livre é uma abreviação de um componente de um sistema mostrando as forças que agem externamente nesse corpo, tais como força gravitacional, forças ativas, forças aplicadas e forças reativas (POTTER *et al.*, 2013).

2.1.7 Centro de gravidade de uma peça

Hibbeler (2010) disserta que o centro de gravidade da área de uma peça simples tem referência ao ponto onde é definido o centro geográfico dele (Figura 12).

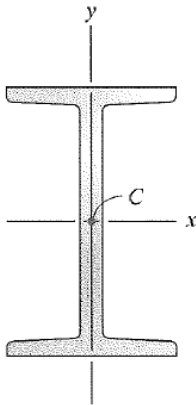
Figura 12 – Centro de Gravidade de uma área simples



Fonte: Hibbeler (2010, p.568).

O centro de gravidade da área de uma peça pode ser especificada parcial ou completamente pelas condições de simetria, se uma peça contém um eixo de simetria o centro de gravidade estará localizado ao longo desse eixo (Figura 13) (HIBBELER, 2010).

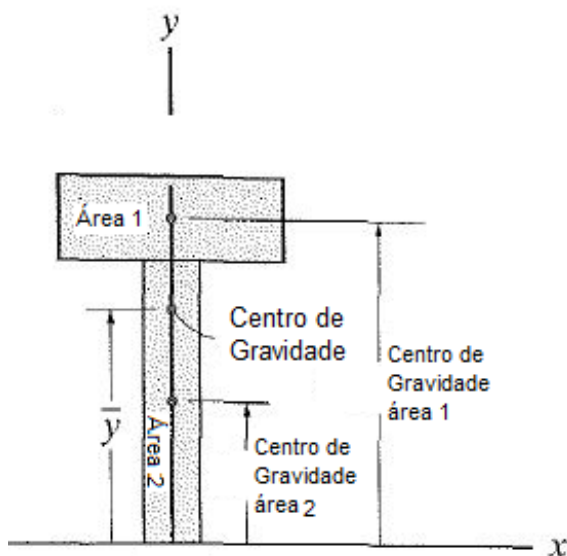
Figura 13 – Centro de gravidade para caso de simetria



Fonte: Hibbeler (2010, p.568).

Para peças que compostas, Hibbeler (2010) relata que muitas vezes a área pode ser dividida em várias partes, porem com geometria mais simples. Ao saber o centro de gravidade dessas áreas mais simples consegue encontrar o centro de gravidade da peça (Figura 14).

Figura 14 – Centro de Gravidade de áreas compostas



Fonte: Adaptado de: Hibbeler (2010, p.569).

O centro de gravidade pode ser calculado pela Equação 7.

$$\bar{x}; \bar{y} = \frac{\sum(\bar{x};\bar{y}).A}{\sum A} \quad (7)$$

Onde:

\bar{x} ; \bar{y} : Distâncias no eixo x ou y do centroide de cada parte composta (m);

A: Área da parte composta (m²).

2.1.8 Momento de inércia

Momento de inércia são as medidas de uma área que é distribuída uniformemente em torno de um ponto no centro do material onde ela possa se equilibrar (POTTER *et al.*, 2013).

Em outras palavras, momento de inércia interfere diretamente nas deformações dos materiais quando se é aplicado uma carga atuante.

Hibbeler (2010) descreve que muitas áreas de seção transversal compostas consistem de várias formas mais simples interligadas, sendo estes, triângulos, retângulos e semicírculos. Ao sabermos o momento de inércia de cada uma das formas, a área da forma e a distância do centro de gravidade até um eixo estabelecido, o momento de inércia pode ser determinado como a soma algébrica de todos os momentos de inércia.

Além disso, Hibbeler (2010) escreve que para se calcular o momento de inércia, pode se usar a Equação 8.

$$I = \sum I + (A \cdot d^2) \quad (8)$$

Onde:

I: Momento de Inércia (m⁴);

A: Área da parte composta (m²);

d: Distância do centro de gravidade até o eixo referencial (m).

Para um melhor entendimento do momento de inércia, o anexo B mostra algumas figuras planas onde se tem algumas fórmulas para calcular o momento de inércia para cada um dos exemplos.

2.1.9 Peso específico do aço

A densidade de um material também pode ser chamada de peso específico, onde a densidade é definida como a massa de um volume unitário de material. (PLESHA *et al*; 2014).

PLESHA *et al* (2014) ainda contempla que o peso específico do aço ($\gamma_{aço}$) é fixado em 7850 kg/m³.

CAPÍTULO 3

3.1 MATERIAL

Os materiais têm grande importância para a confecção de trabalhos, tendo este parâmetro, lista-se os principais materiais para a construção desse trabalho.

3.1.1 Livro Resistência dos materiais, R.C. Hibbeler.

O livro oferta ao estudante vários detalhes da teoria dos princípios fundamentais da resistência dos materiais e as suas aplicações (HIBBELER, 2010).

Este livro é dividido em 14 capítulos, onde cada um deles foca em uma área diferente da resistência dos materiais, composto com vários exercícios que um engenheiro possa encontrar no mercado de trabalho.

3.1.2 Livro Estruturas Metálicas, A.C.F.B. Pinheiro.

Pinheiro (2005) descreve que esse livro extremamente prático, onde pode ser usado como referencial para consulta profissional de engenheiros que irão calcular estruturas metálicas em geral.

3.1.3 Livro Tecnologia Mecânica, V. Chiaverini.

Chiaverini (1986) discorre que nesse livro o tema de abordagem dele é os metais e suas principais ligas, onde está ligada os pontos de vistas de constituições, as propriedades específicas e as aplicações dos metais.

3.1.4 Solidworks®

Ferramenta utilizada por muitos engenheiros projetista e acadêmicos para a produção de projetos em geral, sua funcionalidade é simples, mas com suma importância para o usuário.

3.1.5 Microsoft Excel®

Programa visto por muitos como desnecessário em trabalhos similar como este, porém, tem grande auxílio na confecção de resultados devido as variáveis apresentadas no decorrer deste trabalho.

3.1.6 ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) - NBR 9062

Como referencial teórico, essa norma foi utilizada para saber o quanto de deformação pode ter o concreto.

3.2 MÉTODOS

Na realização deste projeto de pesquisa foi realizado um estudo de caso com dados quantitativos.

A pesquisa quantitativa tem como objetivo compreender os dados, tendências e indicadores que são observáveis, gerando assim uma medida com alta confiança e seguindo um caminho correto (LANDIM *et al.*, 2006).

Severino (2007) ainda contempla que pesquisa quantitativa é um conjunto de metodologia que engloba várias referências epistemológicas.

3.2.1 Definição das Dimensões das formas existentes

As fôrmas tem variações de dimensão, logo, o primeiro passo foi definir quais as dimensões de leito e de laterais que iriam ser dimensionadas. As dimensões selecionadas conforme a necessidade da empresa são às seguintes:

- Leito: 150, 200, 250 e 300 milímetros;
- Lateral: 200, 250, 300, 350, 400, 500 milímetros.

Após a definição das dimensões do leito e da lateral foi identificado que necessitava da medida do conjunto (forma mais o leito), pois para a verificação da deflexão da estrutura do leito, é necessário saber a carga que o concreto exerce com a força do seu próprio peso, então as dimensões mais frequentes do conjunto (Leito x Lateral) são respectivamente:

- 150 x 200;
- 150 x 250;
- 200 x 250;
- 200 x 300;
- 200 x 350;
- 250 x 350;
- 250 x 400;
- 300 x 500.

Para cálculos foi usado como base o conjunto 150x200 milímetros, pois esse conjunto tem uma menor dimensão e o mesmo material usado em fôrmas maiores.

3.2.2 Cálculo da Força Hidrostática exercida pelo concreto nas fôrmas

Para ter o conhecimento da carga atuante que a fôrma precisa suportar, foi necessário calcular as cargas atuantes que o concreto aplica em uma fôrma.

Conforme relatado no capítulo 2 no item 2.1.3 deste trabalho, foi calculado as pressões hidrostáticas para o lateral e a carga aplicada no leito conforme as equações descritas.

Para a lateral, foi necessário saber apenas a altura dela para calcular a pressão hidrostática, pois a variação de carga não varia conforme o leito aumenta. Como foi definido a fôrma padrão de cálculo, foi aplicado os valores na dessa fôrma na fórmula da pressão hidrostática (Equação 1) e obtemos os seguintes resultados:

$$P_c = \gamma_c \cdot h$$

$$P_c = 25.0,2$$

$$P_c = 5 \text{ kN/m}^2$$

Em contrapartida, para que tenha um valor de carga solicitante do concreto no leito, necessitou que fosse calculada a solitação dada do concreto no conjunto (forma e leito) através da Equação 2, uma vez que esse valor varia conforme a largura e a altura do concreto.

$$P_c = \gamma_c \cdot h \cdot l$$

$$P_c = 25.0,2.0,15$$

$$P_c = 0,75 \text{ kN/m}$$

3.2.3 Definições de Resistência do aço para cálculos

Para o cálculo de resistência, é necessário a utilização de parâmetros fundamentais como, limite de resistência à tração e o limite de escoamento do aço.

No capítulo 2, no item 2.1.5.1 e 2.1.5.2, tem-se uma variação de resistência do aço para a elasticidade e para a ruptura.

Neste trabalho foi definido o mínimo valor desses módulos, pois na fôrma é usado aço 1008, porém não foi encontrado em nenhuma literatura com as propriedades mecânicas desse aço. Nessas condições, como se trata de um dimensionamento, o autor deste trabalho tratou como usar a resistência de pior valor desta variação.

3.2.4 Cálculos dos esforços nos Componentes da Fôrma

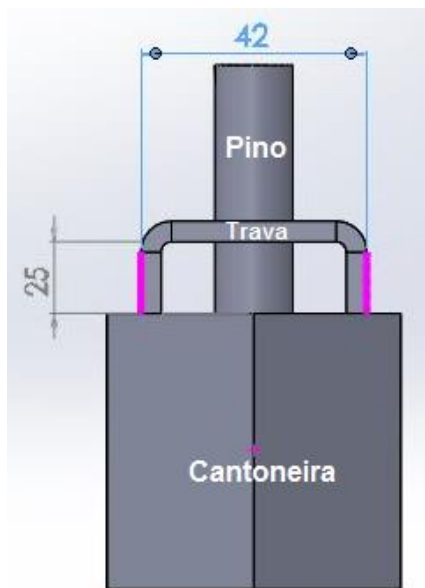
Foram feitos os cálculos dos esforços no componentes da fôrma apenas para uma medida padrão (150x200 milímetros), após ter os devidos resultados para

esta fôrma, foi utilizado o Microsoft Excel® como ferramenta para auxiliar os cálculos das outras fôrmas devido a sua quantidade de dimensões.

3.2.4.1 Trava

A trava é composta de chapa, pino maciço e cantoneiras, a espessura da chapa é de 3,75 milímetros e tem uma variação do seu comprimento conforme a largura da fôrma. O pino tem um diâmetro efetivo de 14,28 milímetros e o furo em que o pino é encaixado tem 20 milímetros, a distância do eixo do furo até a borda da peça tem 35 milímetros. Suas outras dimensões é mostrada pela Figura 15.

Figura 15 – Trava

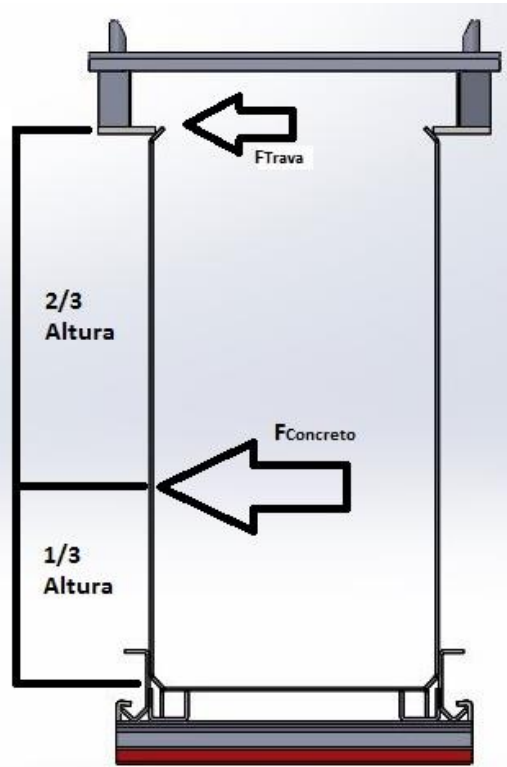


Fonte: O autor (2017).

Para o cálculo da trava, foi necessário saber o esforço que o concreto aplica nela. Como se tem variações de medidas da altura, têm-se valores diferentes para as forças que age sobre a trava. Conjuntamente, quando foi calculado a resultante do carregamento distribuído do concreto sobre a lateral da fôrma, foi preciso ter o conhecimento da força aplicada na trava, onde foi feito a relação de altura (Figura 16).

O valor do comprimento da lateral utilizado para o cálculo do carregamento distribuído é de 1,2 metros devido as travas estar posicionadas com esse espaçamento.

Figura 16 – Força na Trava



Fonte: O autor (2017).

O esforço que o concreto aplica na lateral da fôrma padrão foi calculado através da Equação triangular da Figura 6 e então foi encontrado o seguinte resultado:

$$F_{\text{Concreto}} = \frac{(P_c \cdot \text{Comprimento}) \cdot h}{2}$$

$$F_{\text{Concreto}} = \frac{(5,1,2) \cdot 0,2}{2}$$

$$F_{\text{Concreto}} = 0,6 \text{ kN}$$

Com o resultado de F_{Concreto} foi calculado a resultante que o concreto aplica na trava, o cálculo da resultante se deu pela Fórmula da resultante Triangular da Figura 6:

$$F_{Trava} = \frac{F_{Concreto} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot h\right)}{2}$$

$$F_{Trava} = \frac{0,6 \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot 0,2\right)}{0,2}$$

$$F_{Trava} = 0,2 \text{ kN}$$

Com os parâmetros obtidos para uma altura, foi feito uma tabela em que foi calculado a resultante do concreto aplicado na trava conforme a altura da lateral da fôrma. Essa tabela estará representada no próximo capítulo.

As travas das fôrmas são padrões, não existe uma variedade para cada altura de lateral. Com isso, foi aplicado os valores do esforço do concreto e foi comparado com o resultado a resistência da trava.

A resistência da trava foi obtido pelas equações 3,4,5 e 6 deste trabalho, então, aplicando os parâmetros da trava nas fórmulas, obtemos os seguintes valores:

a) Resistência da trava nos furos

$$N_{df \text{ furos}} = \frac{\{[espessura.largura] - [(D+0,003).espessura].C_t\}.F_u \Phi}{\gamma}$$

$$N_{df \text{ furos}} = \frac{\{[0,00375.0,092] - [(0,02+0,003).0,00375].0,75\}.280 \times 10^6.0,75}{1,4}$$

$$N_{df \text{ furos}} = 34,41 \text{ kN}$$

b) Resistência da trava na área bruta

$$N_{dbruta} = \frac{(espessura.largura).F_y \cdot \Phi}{\gamma}$$

$$N_{dbruta} = \frac{(0,00375.0,092).190 \times 10^6.0,9}{1,4}$$

$$N_{dbruta} = 42,14 \text{ kN}$$

c) Resistência do Pino

$$R_{nvpino} = \frac{\left(0,7 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}\right) \cdot (0,6 \cdot F_u) \cdot \Phi_v}{\gamma}$$

$$R_{nvpino} = \frac{\left(0,7 \cdot \frac{\pi \cdot 0,01428^2}{4}\right) \cdot (0,6 \cdot 294 \times 10^6) \cdot 0,6}{1,4}$$

$$R_{nvpino} = 8,47 \text{ kN}$$

d) Resistência da pressão do pino encostado no furo

$$R_{nrasg} = \frac{\left(\frac{e}{largura}\right) \cdot (espessura \cdot D) \cdot F_u \cdot \Phi_{cs}}{\gamma}$$

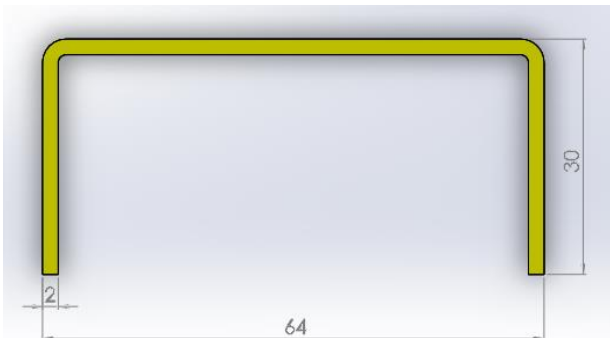
$$R_{nrasg} = \frac{\left(\frac{0,035}{0,020}\right) \cdot (0,00375 \cdot 0,01428) \cdot 280 \times 10^6 \cdot 0,75}{1,4}$$

$$R_{nrasg} = 14,05 \text{ kN}$$

3.2.4.2 Reforço “U”

Todos os reforços “U” da fôrma são feitos com chapa que tem a espessura de 2 milímetros. Sua largura é 64 milímetros, altura é 30 milímetros e seu comprimento é variável conforme a altura da fôrma (Figura 17).

Figura 17 – Medida Reforço “U”



Fonte: O autor (2017).

Com essas medidas foi calculado o centro de gravidade da peça e o seu momento de inércia:

A) Centro de gravidade

$$\bar{x}; \bar{y} = \frac{\sum(\bar{x}; \bar{y}) \cdot A}{\sum A}$$

$$\bar{x} = \frac{([0,064 \cdot 0,002] \cdot 0,029) + \{2 \cdot ([0,028 \cdot 0,002] \cdot 0,014)\}}{(0,0064 \cdot 0,002) + (2 \cdot [0,028 \cdot 0,002])}$$

$$\bar{x} = 0,022 \text{ metros}$$

B) Momento de inércia

$$I = \sum I + (A \cdot d^2)$$

$$I = \left[\left(\frac{0,064 \cdot 0,002^3}{12} \right) + (0,064 \cdot 0,002) \cdot (0,029 - 0,022)^2 \right]$$

$$+ 2 \cdot \left[\left(\frac{0,002 \cdot 0,028^3}{12} \right) + (0,028 \cdot 0,002) \cdot (0,022 - 0,014)^2 \right]$$

$$I = 2,0799 \times 10^{-8} \text{ m}^4$$

Para que fosse calculado a deflexão desse reforço, foi necessário ter a ciência da força aplicada pelo concreto. Então a força aplicada pelo concreto foi determinada pela multiplicação da largura do reforço e da pressão hidrostática.

$$P_{Ref"U"} = P \cdot \text{Largura do "U"} \quad (9)$$

Onde:

$P_{Ref"U"}$: Carregamento distribuído (kN/m);

P : Pressão hidrostática (kN/m²);

Largura do "U" : Largura da peça (m).

$$P_{Ref"U"} = P \cdot \text{Largura do "U"}$$

$$P_{Ref"U"} = 5,0,064$$

$$P_{Ref"U"} = 0,32 \text{ kN}$$

Foi considerado que o reforço é bi apoiado no ferro chato entre as travas e o jota, então resultado da deflexão se deu através da fórmula 6 do anexo A.

$$\vartheta = 0,00652 \cdot \left(\frac{P_{Ref"U"} \cdot l^4}{E \cdot I} \right)$$

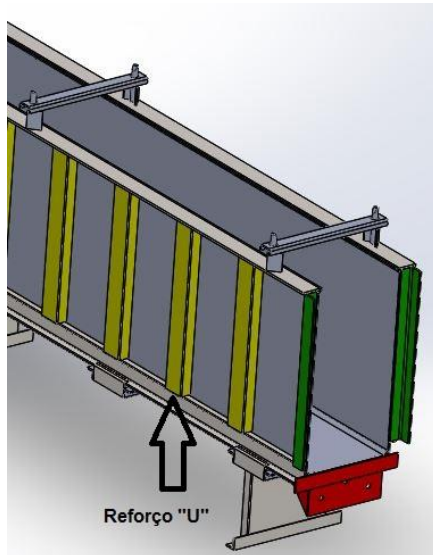
$$\vartheta = 0,00652 \cdot \left(\frac{0,32 \times 10^3 \cdot 0,2^4}{200 \times 10^9 \cdot 2,0799 \times 10^{-8}} \right)$$

$$\vartheta = 0,000000802 \text{ metros}$$

$$\vartheta = 0,000802 \text{ milímetros}$$

A Figura 18 mostra como o reforço é posicionado e onde é localizado na fôrma.

Figura 18 – Localização do Reforço “U”



Fonte: O autor (2017).

3.2.4.3 Ferro Chato entre Travas

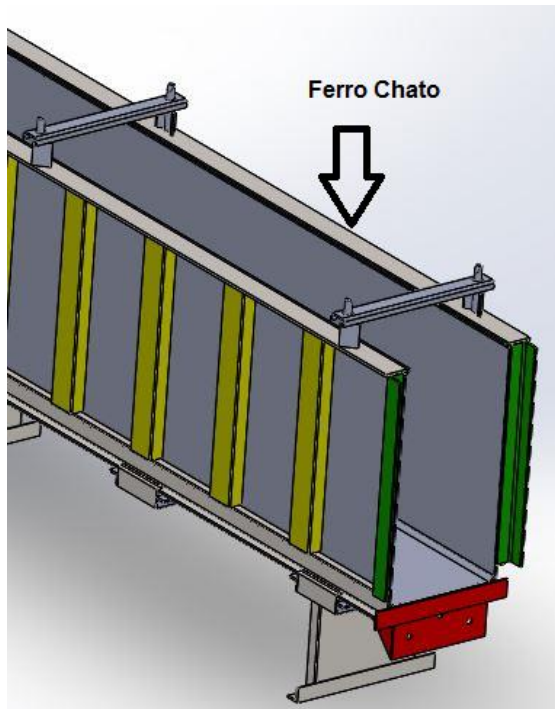
Para a obtenção do resultado da deflexão do ferro chato que está localizado entre as travas da fôrma (Figura 19), foi calculado o seu momento de inércia através da equação do retângulo do anexo B:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$$I = \frac{0,00635 \cdot 0,0508^3}{12}$$

$$I = 6,9371 \times 10^{-8} m^4$$

Figura 19 – Ferro chato entre travas



Fonte: O autor (2017).

Após achar o momento de inércia, foi calculado o carregamento distribuído no ferro chato. Então foi pegado valor da resultante da pressão hidrostática aplicada na trava e foi dividido pela distância dos reforços “U” para achar a pressão por metro.

A distância entre os reforços atualmente para todas as fôrmas é de 300 milímetros de eixo, com isso seu vão livre onde o concreto irá atuar no ferro chato, equivale a 236 milímetros. Desta fôrma obtemos o seguinte resultado para o carregamento distribuído no ferro chato:

$$P = \frac{F_{Trava}}{Distância\ reforços}$$

$$P = \frac{0,2}{0,236}$$

$$P = 0,8474\text{ kN/m}$$

Foi definido que o ferro chato está bi apoiado e assim foi calculado a sua deflexão pela Equação 4 do anexo A.

$$\vartheta = \frac{5 \cdot P \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

$$\vartheta = \frac{5,0,8474 \cdot 10^3 \cdot 0,236^4}{384.200 \cdot 10^9 \cdot 6,9371 \times 10^{-8}}$$

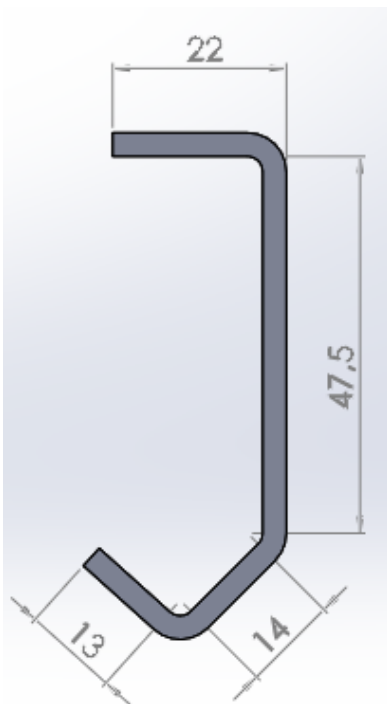
$$\vartheta = 0,0000024672 \text{ metros}$$

$$\vartheta = 0,0024672 \text{ milímetros}$$

3.2.4.4 Jota

Com o mesmo procedimento do reforço “u”, foi calculado o centro de gravidade e o momento de inércia do jota. Porém, ao contrário do reforço “u”, suas dimensões são padrões e a espessura da chapa é de 3,75 milímetros (Figura 20), além disso, as dimensões não mudam conforme as dimensões da fôrma.

Figura 20 – Dimensões do Jota



Fonte: O autor (2017).

A) Centro de gravidade

$$\bar{x}; \bar{y} = \frac{\sum(\bar{x}; \bar{y}) \cdot A}{\sum A}$$

$$\bar{x} = \frac{([82,5] \cdot 11) + ([178,125] \cdot 1,875) + ([52,5] \cdot 7,25) + ([48,75] \cdot 19,75)}{82,5 + 178,125 + 52,5 + 48,75}$$

$$\bar{x} = 7,20 \text{ milímetros}$$

$$\bar{x} = 0,00720 \text{ metros}$$

B) Momento de inércia

$$I = \sum I + (A \cdot d^2)$$

$$I = \left[\left(\frac{3,75 \cdot 22^3}{12} \right) + (22 \cdot 3,75) \cdot (7,25)^2 \right]$$

$$+ \left[\left(\frac{47,5 \cdot 3,75^3}{12} \right) + (178,125) \cdot (1,875)^2 \right]$$

$$+ \left[\left(\frac{14 \cdot 3,75^3}{12} \right) + (52,5) \cdot (7,25)^2 \right]$$

$$+ \left[\left(\frac{13 \cdot 3,75^3}{12} \right) + (48,75) \cdot (18,25)^2 \right]$$

$$I = 2,87309 \times 10^{-8} \text{ m}^4$$

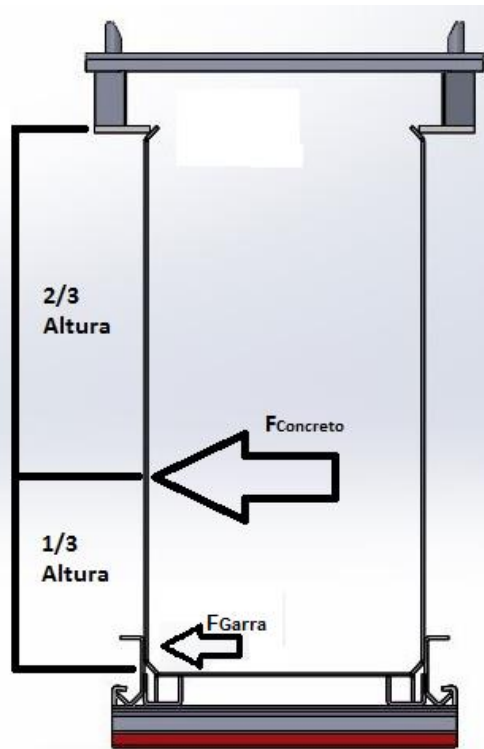
Com as dimensões já estabelecidas e os cálculos do centro de gravidade e do momento de inércia feitos, foi calculado a resultante do carregamento distribuído do concreto sobre a lateral da fôrma através da equação da resultante triangular da Figura 6, com isso foi preciso ter o conhecimento da força aplicada na garra, onde foi feito a relação de altura. (Figura 21).

$$F_{\text{Concreto}} = \frac{(P_c \cdot \text{Comprimento}) \cdot h}{2}$$

$$F_{\text{Concreto}} = \frac{(5,1,2) \cdot 0,2}{2}$$

$$F_{\text{Concreto}} = 0,6 \text{ kN}$$

Figura 21 – Relação de Altura



Fonte: O autor (2017).

Com o resultado de $F_{Concreto}$ foi calculado a reação que o concreto aplica na garra:

$$F_{Garra} = \frac{F_{Concreto} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot h\right)}{2}$$

$$F_{Garra} = \frac{0,6 \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot 0,2\right)}{0,2}$$

$$F_{Garra} = 0,4 \text{ kN}$$

Com o conhecimento dessa força, foi considerado para cálculos de deflexão que o Jota seria engastado nas garras, desta maneira, a Equação 1 do anexo A foi utilizada para o cálculo de deflexão.

A distância livre entre as garras atualmente é colocada a cada 0,48 metros, com isso temos todos os parâmetros para o cálculo da deflexão do jota.

$$\vartheta = \frac{P.L^3}{48.E.I}$$

$$\vartheta = \frac{0,4.10^3.0,48^4}{48.200.10^9.2,87309x10^{-8}}$$

$$\vartheta = 0,00016039 \text{ metros}$$

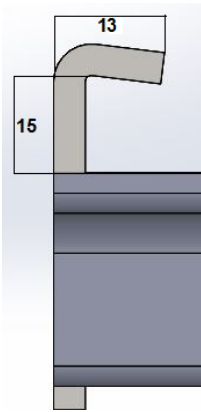
$$\vartheta = 0,16039 \text{ milímetros}$$

3.2.4.5 Garra

Com o mesmo tratamento de cálculo do jota, foi calculado o centro de gravidade e o momento de inércia da garra. Além do mais, suas dimensões também são padrões, feita na chapa com espessura de 3,75 milímetros e não mudam conforme as dimensões da fôrma.

As dimensões que foram consideradas, para cálculo de centro de gravidade, momento de inércia e deflexão podem ser observadas pela Figura 22.

Figura 22 – Garra



Fonte: O autor (2017).

Logo, com esses valores e aplicando às fórmulas temos os seguintes resultados:

A) Centro de gravidade

$$\bar{x}; \bar{y} = \frac{\sum(\bar{x}; \bar{y}) \cdot A}{\sum A}$$

$$\bar{x} = \frac{([0,00375 \cdot 0,015] \cdot 0,001875) + ([0,00375 \cdot 0,013] \cdot 0,0065)}{(0,00375 \cdot 0,015) + (0,00375 \cdot 0,013)}$$

$$\bar{x} = 0,00402 \text{ metros}$$

B) Momento de inércia

$$I = \sum I + (A \cdot d^2)$$

$$I = \left[\left(\frac{15 \cdot 3,75^3}{12} \right) + (56,25) \cdot (2,145)^2 \right]$$

$$+ \left[\left(\frac{3,75 \cdot 13^3}{12} \right) + (48,75) \cdot (2,48)^2 \right]$$

$$I = 1,31 \times 10^{-9} \text{ m}^4$$

Foi estabelecido que a garra fosse engastada na cantoneira e a força aplicada do concreto sobre a garra foi considerado a mesma sobre o jota. Devido a esses parâmetros, foi calculado a deflexão da garra pela a Equação 7 do anexo A.

$$\vartheta = \frac{P \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I}$$

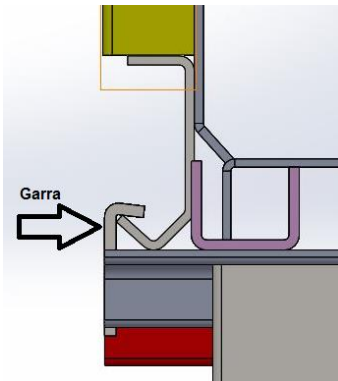
$$\vartheta = \frac{0,4 \cdot 10^3 \cdot 0,015^3}{3 \cdot 200 \cdot 10^9 \cdot 1,31 \times 10^{-9}}$$

$$\vartheta = 0,00000172 \text{ metros}$$

$$\vartheta = 0,00172 \text{ milímetros}$$

Para se ter uma noção de onde a garra é localizada, o autor desse trabalho tratou de expor a figura 23.

Figura 23 – Localização da Garra



Fonte: O autor (2017).

3.2.4.6 Leito

3.2.4.6.1 Deflexão do Leito sentido Comprimento

Com o propósito de calcular a deflexão do leito no sentido do comprimento, foi necessário saber o centro de gravidade e o momento de inércia do conjunto, mais as duas chapas laterais.

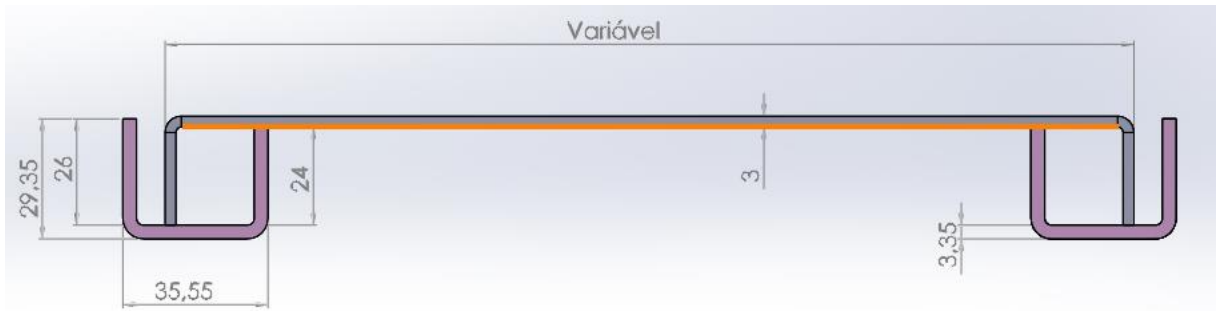
O conjunto é referido por uma chapa mãe com espessura de 3 milímetros dobrada com 2 “Us” também feita em chapa, com espessura de 3,35 milímetros onde está posicionada em cada dobra da chapa mãe. Sua representação juntamente com suas dimensões esta ilustrada pela Figura 24.

As chapas laterais são variáveis em sua altura, porém se tem um padrão de 3 milímetros para sua espessura.

Para o cálculo do centro de gravidade e da inércia, foi necessário saber a altura da lateral. Como adotamos a forma 150 x 200 milímetros como padrão, o centro de gravidade e o momento de inércia foi calculado em cima dela, e com ajuda do Excel® foi calculado o momento de inércia dos demais conjuntos.

Do modo em que temos uma variação na largura do leito, temos uma variável. Essa variável é definida através da largura do concreto menos 13 milímetros. Então para o conjunto padrão a variável equivale a 137 milímetros.

Figura 24 – Leito



Fonte: O autor (2017).

Tendo todos os parâmetros, eles foram aplicados nas equações 3 e 4 e assim foi encontrado os valores do centro de gravidade e momento de inércia do conjunto respectivamente:

A) Centro de gravidade

$$\bar{x}; \bar{y} = \frac{\sum(\bar{x}; \bar{y}) \cdot A}{\sum A}$$

$$\bar{x} = \frac{([411] \cdot 27,85) + 2 \cdot ([79,05] \cdot 16,53) + 2 \cdot ([118,9] \cdot 1,675)}{411 + 79,05 + 118,9}$$

$$+ \frac{2 \cdot ([87,1] \cdot 16,35) + 2 \cdot ([80,4] \cdot 15,3) + 2 \cdot ([600] \cdot 127,85)}{87,1 + 80,4 + 600}$$

$$\bar{x} = 73,33 \text{ milímetros}$$

$$\bar{y} = 0,07333 \text{ metros}$$

B) Momento de inércia

$$I = \sum I + (A \cdot d^2)$$

$$I = \left[2 \cdot \left(\frac{3 \cdot 23,35^3}{12} \right) + (79,05) \cdot (73,33 - 15,025)^2 \right]$$

$$+ \left[\left(\frac{137 \cdot 3^3}{12} \right) + (411) \cdot (73,33 - 27,35)^2 \right]$$

$$+ \left[2 \cdot \left(\frac{35,5 \cdot 3,35^3}{12} \right) + (118,925) \cdot (73,3 - 1,675)^2 \right]$$

$$+ \left[2 \cdot \left(\frac{3,35 \cdot 26^3}{12} \right) + (87,1) \cdot (73,33 - 16,35)^2 \right]$$

$$\begin{aligned}
& + \left[2 \cdot \left(\frac{3.35 \cdot 24^3}{12} \right) + (80,4) \cdot (73,33 - 15,35)^2 \right] \\
& + \left[2 \cdot \left(\frac{3 \cdot 200^3}{12} \right) + (600) \cdot (100 - 73,33)^2 \right] \\
& I = 10553091 \text{ mm}^4 \\
& I = 1,0553091 \times 10^{-5} \text{ m}^4
\end{aligned}$$

A deflexão deste conjunto depende também da resultante que o concreto aplica sobre o leito, com base nisso, foi pego o carregamento distribuído que o concreto aplica no conjunto da fôrma e foi multiplicado pela distância dos pés. Os pés são posicionados a cada 1,2 metros.

$$P_{Leito} = P_c \cdot \text{Distância entre pés}$$

$$P_c = 0,75 \cdot 1,2$$

$$P_c = 0,9 \text{ kN}$$

Desta maneira, sabendo todos os parâmetros necessário para cálculo e definindo que o leito é bi apoiado nos pés, foi utilizado a Equação 1 do anexo A.

$$\begin{aligned}
\vartheta &= \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I} \\
\vartheta &= \frac{0,9 \cdot 10^3 \cdot 1,2^4}{48 \cdot 200 \cdot 10^9 \cdot 1,0553091 \times 10^{-5}} \\
\vartheta &= 0,00001805 \text{ metros} \\
\vartheta &= 0,01805 \text{ milímetros}
\end{aligned}$$

3.2.4.6.1 Deflexão do Leito sentido Largura

Com o mesmo propósito de cálculo do item anterior, buscou-se através de cálculos a deflexão do leito, porém no sentido da largura da fôrma.

Foi calculado o momento de inércia do componente através da equação retangular do anexo B, e também o carregamento dado pelo concreto. O

carregamento do concreto no sentido da largura do leito foi calculado através da equação 2 e tem o valor de 0,75 kN/m.

Já para o cálculo do momento de inércia, a distância adotada para o cálculo foi a distância entre as garras. Para todas as fôrmas, essa distância é de 480 milímetros. Com isso obtemos o seguinte resultado para o momento de inércia:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$$I = \frac{0,480 \cdot 0,003^3}{12}$$

$$I = 1,08 \times 10^{-9} m^4$$

Após ter conhecimento dos valores da resultante do concreto no leito e do momento de inércia, foi calculado através da equação 4 do anexo A.

$$\vartheta = \frac{5 \cdot P \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

$$\vartheta = \frac{5 \cdot 0,750 \cdot 10^3 \cdot 0,0917^4}{384 \cdot 200 \cdot 10^9 \cdot 1,08 \times 10^{-9}}$$

$$\vartheta = 0,0000031329 \text{ metros}$$

$$\vartheta = 0,0031329 \text{ milímetros}$$

A distância de adotada para cálculo de deflexão foi a distância entre “Us” (Figura 25).

Figura 25 – Distância entre “Us”



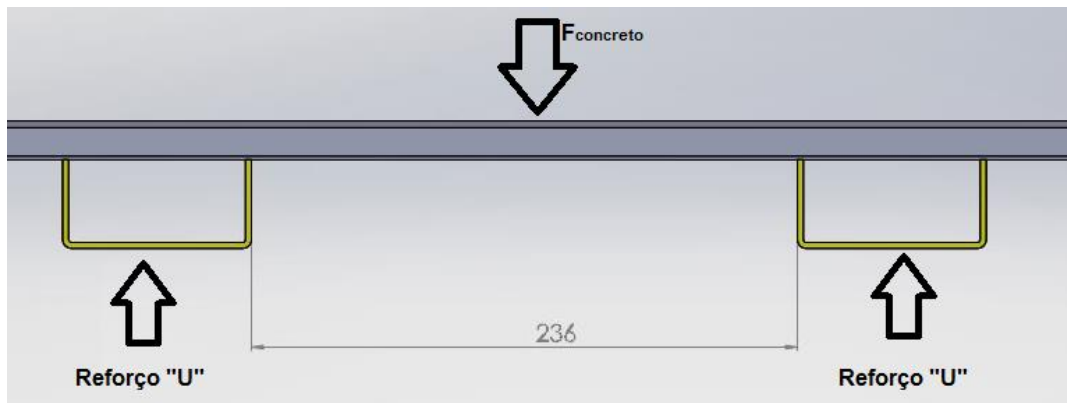
Fonte: O autor (2017).

3.2.4.7 Chapa entre Reforços "U"

Último componente à ser calculado e verificado a sua deflexão, foi a lateral da fôrma. Não diferente dos outros componentes foi calculado o momento de inércia da chapa lateral através da equação retangular do anexo B.

Para todas as fôrmas, a chapa tem espessura de 3 milímetros e a distância entre os reforços é de 236 milímetros. Desta forma a resultante do concreto é demonstrado pela Figura 26.

Figura 26 – Resultante do concreto na chapa lateral



Fonte: O autor (2017).

Com isso, o resultado do momento de inércia é de:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$$I = \frac{0,2 \cdot 0,003^3}{12}$$

$$I = 4,5 \times 10^{-10} \text{m}^4$$

Para a carga concentrada desse caso, foi utilizado a pressão hidrostática calculada na equação 1 com o valor de 5 kN/m^2 e multiplicado pela distância entre os reforços.

$$P_{\text{EntreChp}} = P_c \cdot \text{Distância entre chapas}$$

$$P_c = 5,0,236$$

$$P_c = 1,18 \text{ kN/m}$$

Com todos os parâmetros definidos e calculados foi utilizado a fórmula 4 do Anexo A afim de verificar a deflexão do componente.

$$\vartheta = \frac{5 \cdot P \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

$$\vartheta = \frac{5 \cdot 1,18 \times 10^3 \cdot 0,236^4}{384 \cdot 200 \cdot 10^9 \cdot 4,5 \times 10^{-10}}$$

$$\vartheta = 0,00005295 \text{ metros}$$

$$\vartheta = 0,5295 \text{ milímetros}$$

3.2.5 Cálculos de Deflexão conforme a NBR 9062

3.2.5.1 Cálculo de redução dos espaçamento dos reforços “U”

Após a verificação da deflexão de todos os componentes, foi feito o processo “Reverso” para os reforços “U”. Com o objetivo de diminuir material, cogitou a possibilidades de alteração do espaçamento entre os reforços que hoje atualmente conta com 236 milímetros.

Para a alteração de espaçamento foi utilizado a tolerância de deflexão dado pela Norma e foi aplicada na mesma fórmula usada para o cálculo de deflexão do reforço “U”, com isso foi deixado o parâmetro distância entre apoios “L” como variável.

O processo reverso foi calculado apenas na forma padrão de cálculo, nesse caso, a fôrma com dimensões 150 x 200 milímetros em sua largura e altura respectivamente.

Com base no relatado a fórmula e o resultado para o respectivo item se dá por:

$$\vartheta = \frac{5 \cdot P \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

$$\vartheta = \frac{5.(\gamma_c \cdot h \cdot L) \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

$$0,0025 = \frac{5.25 \times 10^3 \cdot 0,2 \cdot L \cdot L^4}{384.200 \cdot 10^9 \cdot 4,5 \times 10^{-10}}$$

$$L = 0,321895 \text{ metros}$$

$$L = 321,895 \text{ milímetros}$$

3.2.5.2 Cálculo de redução do Ferro Chato entre Travas

Outro componente que pode ser redimensionado é o ferro chato entre as travas. Para esse componente foi escolhido o menor perfil que tem na empresa (Ferro Chato 3/16 x 1.1/2") e calculado o seu momento de inércia através da Fórmula do retângulo do anexo B.

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$$I = \frac{0,00476 \cdot 0,0381^3}{12}$$

$$I = 2,194970 \times 10^{-8} m^4$$

Após o cálculo do momento de inércia do perfil, foi verificado a sua deflexão através Fórmula 5 do anexo A. Lembra-se que os valores de carga do concreto sobre o ferro chato é o mesmo do item 3.2.4.3, ou seja, 0,8474kN/m.

A distância entre os reforços para esse cálculo já foi adotada a nova distância calculada pelo item 3.2.5.1 (321,825 milímetros).

$$\vartheta = \frac{5 \cdot P \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

$$\vartheta = \frac{5 \cdot 0,8474 \times 10^3 \cdot 0,321825^4}{384.200 \times 10^9 \cdot 2,194970 \times 10^{-8}}$$

$$\vartheta = 0,000026961 \text{ metros}$$

$$\vartheta = 0,026961 \text{ milímetros}$$

CAPÍTULO 4

4.1 ANÁLISE E DISCUSSÕES DE RESULTADOS

Com base nos cálculos do capítulo anterior, o capítulo atual tem como foco analisar e discutir os resultados da fôrma padrão e as demais fôrmas.

4.1.1 Verificação da pressão hidrostática

Para que se chegasse ao resultado de pressão hidrostática foi utilizado a Equação 1, onde seus dados foram definidos pelo item 3.2.1. Para a lateral da fôrma, a Tabela 2 demonstra os valores obtidos através da equação utilizada.

Tabela 2 – Pressão Hidrostática na Lateral

Lateral (Metros)	P = kN/m ²
0,20	5,00
0,25	6,25
0,30	7,50
0,35	8,75
0,40	10,00
0,50	12,50

Fonte: O autor (2017).

Em contrapartida, para que temos um valor de carga solicitante do concreto no leito, necessitou saber a solitação dada do concreto no conjunto, uma vez que esse valor varia conforme a largura e a altura do concreto. Prontamente, a Tabela 3 expõe dados para a carga aplicada no leito.

Tabela 3 – Carga Aplicada no Leito

Conjunto (Metro x Metro)	F=kN/m
0,15 x 0,20	0,7500
0,15 x 0,25	0,9375
0,20 x 0,25	1,2500
0,20 x 0,30	1,5000
0,20 x 0,35	1,7500
0,25 x 0,35	2,1875
0,25 x 0,40	2,5000
0,30 x 0,50	3,7500

Fonte: O autor (2017).

4.1.2 Verificação da deflexão dos componentes perante a norma

4.1.2.1 Trava

Com a carga distribuída definida através da pressão do concreto, foi calculado a sua resultante na lateral da fôrma através da equação triangular da Figura 6. Na Tabela 4 demonstra as forças que o concreto aplica na trava da fôrma em quilo Newton.

Tabela 4 – Resultante na trava

Altura Lateral (Metros)	Resultante na Trava (kN)
0,20	0,2000
0,25	0,3125
0,30	0,4500
0,35	0,6125
0,40	0,8000
0,50	1,2500

Fonte: O autor (2017).

Após o cálculo da resultante na trava, como as dimensões são padrões e são definidos no item 3.2.4.1, calculou-se através das equações 3,4,5 e 6 o quanto a trava resiste à esforços. A Tabela 5 nos traz os devidos valores para as resistências na seção do furo, na área bruta, do cisalhamento do pino e da resistência sob contato do pino nos furos.

Tabela 5 – Resistências da Trava

Resistências	Resultantes (kN)
Resistência na seção do furo	34,41 kN
Resistência na área bruta	42,14 kN
Resistência do cisalhamento do pino	08,47 kN
Resistência sob contato do pino nos furos	14,05 kN

Fonte: O autor (2017).

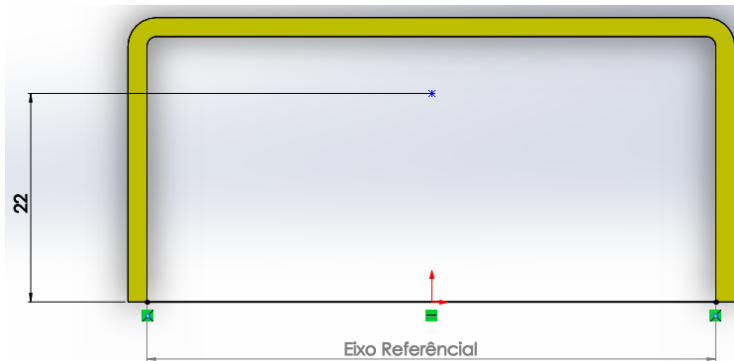
A partir desses resultados da Tabela 5 e comparando com os resultados da Tabela 4, pode-se observar que a trava resiste a solicitação dada pelo concreto garantindo os parâmetros tolerados pela norma.

A redução de material da trava pode ser aplicada na chapa dobrada, porém o dono da empresa não abre mão dela por conta de estética da fôrma. Cogitou trocar a chapa por ferro chato, mas após essa decisão a troca foi desconsiderada.

4.1.2.2 Reforço “U”

Para o cálculo da deflexão para o reforço foi calculado o seu centro de gravidade através da Equação 7. O valor para o centro de gravidade para o reforço “U” foi achado com 0,022 metros do eixo referencial, a Figura 27 mostra a peça com o centro de gravidade encontrado.

Figura 27 – Centro de Gravidade do Reforço “U”



Fonte: O autor (2017).

Posteriormente ao cálculo do centro de gravidade, achou-se o valor de $2,079999 \times 10^{-8} \text{ m}^4$ para o momento de inércia da peça aplicando os dados na fórmula 4.

O carregamento distribuído do concreto no reforço “U”, se dá pelo valor de P dado pela tabela 2 multiplicado pela largura do reforço “U”.

Como se tem várias alturas da fôrma e o reforço varia conforme a altura, a Tabela 6 ilustra o $P_{\text{ref}}^{\text{U}}$ para cada valor da altura do reforço.

Tabela 6 – Carga distribuída conforme dimensão do Reforço “U”

Dimensão (Altura) - Metros	Carregamento distribuída (kN/m)
0,20	0,32
0,25	0,40
0,30	0,48
0,35	0,56
0,40	0,64
0,50	0,80

Fonte: O autor (2017).

Com isso, tendo o valor do momento de inércia, o valor de $P_{\text{ref}}^{\text{U}}$ e aplicando esses valores à fórmula 6 do anexo A, obtém-se a deflexão do reforço “U” demonstrado pela Tabela 7.

Tabela 7 – Deflexão do Reforço “U”

Dimensão (Altura) - Metros	Deflexão (mm)
0,20	0,000802
0,25	0,002449
0,30	0,006094
0,35	0,013171
0,40	0,025679
0,50	0,078366

Fonte: O autor (2017).

Considerando os valores da Tabela 7, os reforços estão dentro do limite de variação conforme a norma.

Por questão de dobra e aproveitamento de chapa os reforços são feitos com essas dimensões.

A redução de material desse componente poderia ser feito através de diminuição da suas dimensões, porém, na empresa a menor espessura de chapa é empregada neste material e ao reduzir a parte do meio do reforço, implicará que a dobradeira ao fazer o processo de dobra acabe entortando o material, onde as abas do reforço bata na lâmina de dobra da dobradeira.

4.1.2.3 Ferro chato entre Travas

Para o cálculo da deflexão do chato entre as travas, primeiramente foi feito o cálculo do momento de inércia do ferro chato utilizando a fórmula do momento de inércia do retângulo do anexo B. O resultado do momento de inércia que foi encontrado é de $6,9371 \times 10^{-8} \text{ m}^4$.

Após encontrar o valor do momento de inércia, foi calculado a força que o concreto aplica no ferro chato. A distância entre reforços é padrão (236 milímetros), porém como existe uma variação conforme a altura da forma, se tem uma variação de força aplicada no ferro chato. A tabela 8 demonstra os valores de carregamento distribuído que foi calculado conforme descrito no item 3.2.4.3.

Tabela 8 – Carregamento distribuído no chato entre as travas

Dimensão (Altura) - Metros	Carregamento distribuído (kN/m)
0,20	0,2000
0,25	0,3125
0,30	0,4500
0,35	0,6125
0,40	0,8000
0,50	1,2500

Fonte: O autor (2017).

Após ter conhecimento do carregamento distribuído e do momento de inércia, foi aplicado os dados na equação 4 do anexo A e assim foi obtido os valores de deflexão para cada altura (Tabela 9).

Tabela 9 – Deflexão do chato entre as travas

Dimensão (Altura) - Metros	Deflexão (mm)
0,20	0,0024672
0,25	0,0038549
0,30	0,0055511
0,35	0,0075557
0,40	0,0098686
0,50	0,0154197

Fonte: O autor (2017).

Com base nos dados da Tabela 9, nota-se uma deflexão menor do que a permitida por norma. A redução de material deste item foi calculada, para o menor perfil de ferro chato que se tem em estoque na empresa, diante disso a Tabela 10 demonstra os valores de deflexão para o menor ferro chato entre travas conforme a variação de altura.

Tabela 10 – Deflexão do chato entre as travas menor

Dimensão (Altura) - Metros	Deflexão (mm)
0,20	0,007797
0,25	0,012183
0,30	0,017544
0,35	0,023879
0,40	0,031189
0,50	0,048733

Fonte: O autor (2017).

Comparando os resultados entre a Tabela 9 e Tabela 10, nota-se que é possível a redução de material devido a deflexão do menor ferro chato ainda estar dentro do limite estipulado pela norma.

Tendo isso em vista, comparando os dois perfil de ferro chato, temos uma redução de $1,4112875 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ de aço. Aplicando isso em 1 metro de lateral de fôrma e multiplicando pelo peso específico do aço ($\gamma_{aço}$) que é 7850 kg/m^3 é possível reduzir 1,1078 kg da lateral por metro, considerando que para a fôrma são 2 laterais, são 2,2156 kg reduzidos.

4.1.2.4 Jota

Para a verificação da deflexão do componente Jota da fôrma, foi calculado o seu centro de gravidade através da equação 7 e posteriormente o seu momento de inércia com a equação 8. O Resultado do momento de inércia achado por meio dos cálculos foi de $2,87309 \times 10^{-8} \text{ m}^4$.

Não diferente dos demais componentes, a pressão que o concreto aplica sobre o Jota é variável conforme a altura da lateral da fôrma, tendo isso como base, a Tabela 11 demonstra os valores de carga para o cálculo da deflexão.

Tabela 11 – Carregamento distribuído no Jota

Dimensão (Altura) - Metros	Carregamento distribuído (kN/m)
0,20	0,400
0,25	0,625
0,30	0,900
0,35	1,125
0,40	1,600
0,50	2,500

Fonte: O autor (2017).

Tendo conhecimento dos valores de carregamento distribuído e do momento de inércia, foi aplicado os mesmos na equação 1 do anexo A. O resultado da aplicação na equação para obter a deflexão é demonstrado pela Tabela 12.

Tabela 12 – Deflexão do Jota

Dimensão (Altura) - Metros	Deflexão (mm)
0,20	0,160390
0,25	0,250609
0,30	0,360877
0,35	0,491194
0,40	0,641559
0,50	1,002436

Fonte: O autor (2017).

A partir da Tabela 12, nota-se que a deflexão do componente Jota está dentro da tolerância estipulada por norma para todas as alturas da lateral da fôrma.

4.1.2.5 Garra

Para o cálculo da deflexão da garra, foi calculado primeiramente o centro de gravidade da garra através da equação 7 e o momento de inércia com a equação 8. O valor do momento de inércia calculado foi de $1,31 \times 10^{-9} \text{ m}^4$.

O carregamento aplicado na garra foram os mesmos valores da Tabela 11. Com isso foi calculado a deflexão da garra (Tabela 13) com a fórmula 7 do anexo A.

Tabela 13 – Deflexão da Garra

Dimensão (Altura) - Metros	Deflexão (mm)
0,20	0,00172
0,25	0,00268
0,30	0,00386
0,35	0,00526
0,40	0,00687
0,50	0,01073

Fonte: O autor (2017).

Comparando os dados da Tabela 13 com a tolerância da norma, este componente está dentro dos limites de tolerância de variação.

4.1.2.6 Leito

4.1.2.6.1 Leito no sentido Comprimento

Para o cálculo da deflexão do leito no sentido comprimento da fôrma, primeiramente foi calculado o centro de gravidade do conjunto através da equação 7 e posteriormente foi feito o cálculo do momento de inércia com a equação 8. Os valores do momento de inércia para cada conjunto (Leito x Fôrma), é demonstrado pela tabela 14.

Tabela 14 – Momento de inércia do Leito para Comprimento

Conjunto (Metro x Metro)	Inércia m⁴
0,15 x 0,20	1,05536x10 ⁻⁵
0,15 x 0,25	1,89638x10 ⁻⁵
0,20 x 0,25	1,91316x10 ⁻⁵
0,20 x 0,30	3,12322x10 ⁻⁵
0,20 x 0,35	4,76294x10 ⁻⁵
0,25 x 0,35	4,78638x10 ⁻⁵
0,25 x 0,40	6,92754x10 ⁻⁵
0,30 x 0,50	1,29963x10 ⁻⁴

Fonte: O autor (2017).

Após o cálculo do valor de inércia do conjunto, foi calculado o carregamento distribuído para o conjunto (leito x fôrma).

O valores da resultante que o concreto aplica no leito sentido comprimento para cada conjunto está exposta na tabela 15.

Tabela 15 – Carga Aplicada no Leito sentido comprimento

Conjunto (Metro x Metro)	Resultante (kN)
0,15 x 0,20	0,900
0,15 x 0,25	1,125
0,20 x 0,25	1,500
0,20 x 0,30	1,800
0,20 x 0,35	2,100
0,25 x 0,35	2,625
0,25 x 0,40	3,000
0,30 x 0,50	4,500

Fonte: O autor (2017).

Tendo um embasamento dos parâmetros da Tabela 15 e do momento de inércia do conjunto foi aplicado os valores na equação 1 do anexo A onde obteve o resultado da deflexão para cada conjunto e que são descritos na Tabela 16.

Tabela 16 – Deflexão do Leito no sentido comprimento

Conjunto (Metro x Metro)	Deflexão (mm)
0,15 x 0,20	0,018423
0,15 x 0,25	0,012813
0,20 x 0,25	0,016935
0,20 x 0,30	0,012448
0,20 x 0,35	0,009470
0,25 x 0,35	0,011846
0,25 x 0,40	0,009353
0,30 x 0,50	0,007479

Fonte: O autor (2017).

De acordo com esses dados, nenhum conjunto de fôrma passa do limite estipulado pela norma.

4.1.2.6.2 Leito no sentido Largura

Para o cálculo de deflexão do leito no sentido largura, foi necessário primeiramente calcular o momento de inércia. A base para o cálculo do momento de inércia é de 480 milímetros, que é a distância entre as garras. E a altura é de 3 milímetros que se dá através da espessura da chapa. Como as garras são colocadas nessa distância padrão, o momento de inércia é o mesmo para todos os conjuntos. Nesse caso o momento de inércia é igual a $1,08 \times 10^{-9} \text{m}^4$.

O carregamento dado pelo concreto na fôrma varia conforme a largura e a altura, se baseando nisso temos como a Tabela 3 uma referência para a utilização dos valores para carregamento distribuído.

Ademais, para a deflexão do leito no sentido largura para todos os conjuntos é demonstrado pela Tabela 17. Os resultados obtidos foram calculados através da equação 4 do anexo A.

Tabela 17 – Deflexão do Leito sentido largura

Conjunto (Metro x Metro)	Deflexão (mm)
0,15 x 0,20	0,00319686
0,15 x 0,25	0,00399608
0,20 x 0,25	0,03037907
0,20 x 0,30	0,03645488
0,20 x 0,35	0,04253069
0,25 x 0,35	0,17808262
0,25 x 0,40	0,20352350
0,30 x 0,50	0,77147685

Fonte: O autor (2017).

A deflexão para o leito no sentido da largura está de acordo com a norma, não tendo sua deflexão maior do que 2,5 milímetros.

4.1.2.7 Chapa entre Reforços “U”

Para a verificação da deflexão da chapa entre o reforço “U”, primeiramente foi calculado o momento de inércia da chapa da lateral utilizando a sua altura e a sua espessura. Como se tem várias alturas todos os momentos de inércia para cada altura está descrita pela Tabela 18.

Tabela 18 – Momento de inércia da chapa entre reforço “U”

Dimensão (Altura) - Metros	Inércia m⁴
0,20	4,500x10 ⁻¹⁰
0,25	5,625x10 ⁻¹⁰
0,30	6,750x10 ⁻¹⁰
0,35	7,875x10 ⁻¹⁰
0,40	9,000x10 ⁻¹⁰
0,50	1,125x10 ⁻⁰⁹

Fonte: O autor (2017).

Com os valores do momento de inércia, foi calculado o carregamento para os devidos valores para cada altura. Para a obtenção do resultado do carregamento distribuído, foi pego o valor da Tabela 2 e multiplicado pela distância entre os reforços “U”, este valor é de 236 milímetros. Os valores para o referido descrito, são demonstrados pela Tabela 19.

Tabela 19 – Carregamento distribuído na chapa entre reforço “U”

Dimensão (Altura) - Metros	Carregamento distribuído (kN/m)
0,20	1,180
0,25	1,475
0,30	1,770
0,35	2,065
0,40	2,360
0,50	2,950

Fonte: O autor (2017).

Com os valores obtidos pela Tabela 18 e 19, foi calculado a deflexão da chapa entre os reforços “U”. A fórmula usada para o cálculo foi a equação 4 do anexo A e os valores são descritos através da Tabela 20.

Tabela 20 – Deflexão da chapa entre o reforço “U”

Dimensão (Altura) - Metros	Deflexão (mm)
0,20	0,529574
0,25	0,529574
0,30	0,529574
0,35	0,529574
0,40	0,529574
0,50	0,529574

Fonte: O autor (2017).

Analisando os dados descrito pela Tabela 20, nota-se que temos o mesmo valor de deflexão para todas as alturas, pois a distância entre os reforços “U” são a mesma para todos as alturas da lateral e conforme a altura varia, tem-se uma variação no momento de inércia e no carregamento distribuído aplicado pelo concreto e ainda, a espessura da chapa é a mesma para todas as alturas.

Com esses parâmetros de deflexão, a chapa não irá defletir mais do que a tolerância da norma.

A redução de material nesse caso foi feito através do aumento entre a distância dos reforços, desta maneira foi feito o cálculo inverso com a mesma fórmula usada para o cálculo da deflexão, utilizando 2,5 milímetros de deflexão e o parâmetro distância como variável.

Os valores da máxima distância entre os reforços para cada altura estão descritas pela Tabela 21.

Tabela 21 – Distância máxima entre Reforços

Dimensão (Altura) - Metros	Deflexão (mm)
0,20	321,89
0,25	321,89
0,30	321,89
0,35	321,89
0,40	321,89
0,50	321,89

Fonte: O autor (2017).

Para os valores da Tabela 21 segue a mesma analogia feita da Tabela 20. Como todos os parâmetros da fórmula são iguais e tendo variação apenas no

carregamento distribuído e o momento de inércia conforme os valores de altura, a distância entre os reforços para todas as alturas são a mesma.

Tendo esses valores de distância como parâmetro e aplicando os reforços na lateral da fôrma, a cada 1 metro de lateral consegue reduzir 1 reforço, ou seja são reduzido 25% de reforços a cada 1 metro de lateral.

Redução de material pode ser analisada também em kg, basta pegar a área da seção transversal do reforço “U” e o seu comprimento e multiplicar pelo peso específico do aço ($\gamma_{aço}$) que é 7850 kg/m^3 .

A seção transversal do reforço “U” com base na Figura 17, é de $2,4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, esse valor é obtido através dos parâmetro da espessura da chapa e a soma de todos os lados do reforço.

A quantidade de redução de material em 1 metro de lateral da fôrma pode ser vista pela Tabela 22.

Tabela 22 – Redução de material em 1 metro de lateral da fôrma

Dimensão (Altura) - Metros	Redução de material (Kg)
0,20	0,3768
0,25	0,4710
0,30	0,5652
0,35	0,6594
0,40	0,7536
0,50	0,9420

Fonte: O autor (2017).

4.1.3 COMPARAÇÃO DE PESOS ENTRE LATERAIS

Fazendo uma comparação do peso das laterais da fôrma existente com a de projeto do dimensionamento foi calculado o peso em Kg/m para os componentes que tiveram alteração de dimensão e de espaçamento de ambas laterais, que é o ferro chato entre as travas e o reforço “U” respectivamente.

Após o cálculo do peso, foi feita a comparação de redução de material em Kg/m para a lateral existente e para a lateral do projeto de dimensionamento.

Ademais, foi usado as 2 laterais que consiste em uma fôrma para o cálculo de redução. Para o referido descrito, os valores estão apresentados pela Tabela 23.

Tabela 23 – Peso dos componentes na lateral da fôrma existente x fôrma dimensionada

Componentes	Fôrma Existente			Fôrma de Projeto de Dimensionamento			Redução (Kg/m)
	Kg/m	Quantidade e por metro	Total Kg/m	Kg/m	Quantidade e por metro	Total Kg/m	
Ferro Chato entre Travas	2,53	2	5,06	1,426	2	2,852	2,2128
Reforço "U"	0,3768	8	3,0144	0,3768	6	2,2608	0,7536

Fonte: O autor (2017).

Analisando a fôrma existente antes do dimensionamento, nota-se que tinha um valor total dos componentes de 8,0744 kg/m quando são somado o total de peso dos dois componentes, e após o dimensionamento o valor diminuiu para 5,1128 kg/m, com isso a diferença de 2,9616 kg/m a menos com o projeto de dimensionamento. A redução do material é de 36,67% por metro de fôrma.

CAPÍTULO 5

5.1 CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou diminuir o material aplicado em uma fôrma metálica para pilar fazendo o dimensionamento não se baseando no senso comum conforme é feito atualmente.

Para a redução de material, primeiramente, foi analisado os esforços que o concreto exerce na fôrma metálica e em cada um do seus componentes e assim, foi verificado que nenhum componente teve que ser redimensionado, por terem suas deflexões de acordo com a norma 9062.

Em comparação com os pesos da lateral existente com a de projeto de dimensionamento, chegou-se ao valor de 36,67% de redução de material que era empregado na fôrma.

Atualmente, o consumo de aço em Kg/mês da empresa fabricante da fôrma é de em média 9.000 kg. Se em cada fôrma fosse reduzido 36,67% de material, teríamos um desconto de 3.300 Kg em cada mês. Com isso a empresa conseguirá abaixar o preço do equipamento produzido para competir diretamente com as empresas concorrentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Maria Cascão Ferreira. **Estruturas Isostáticas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

ARAÚJO, Luís O. C.; FREIRE, Tomás M. **Tecnologia e gestão de sistemas construtivos de edifícios**. São Paulo: Ufscar, 2004. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3089794/mod_resource/content/0/Tecnologia%20e%20gest%C3%A3o%20de%20sistemas%20construtivos%20de%20edif%C3%ADcios.pdf>. Acesso em: 5 de Maio de 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062:Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: <<https://00823371279406245456/NBR%209062%20NB%20949%20-%20Projeto%20e%20execucao%20de%20estruturas%20de%20concreto%20pre-moldado.pdf>>. Acesso em: 28 de Abril de 2017.

BARROS, M.M.S.B.; MELHADO, S.B. **Recomendações para a produção de estruturas de concreto armado em edifícios**. São Paulo, 1998. Texto Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil, TT/PCC/004. Disponível em <http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/TT_00004.pdf>. Acesso em: 4 de Maio de 2017.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Lajes de concreto**, 1-31 de Março de 2015. 115 p. Notas de Aula. Disponível em: <<https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/40136619/Lajes.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1507086411&Signature=pzVaWLeVvt%2B%2F8rZg7ak98U%2FLOM%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DLajes.pdf>>. Acesso em: 03 de Outubro de 2017.

BEER, Ferdinand P; JOHNSTON, E. Russell. **Resistência dos materiais**, 3 ed. São Paulo: Makron Books, 1995.

BOTELHO, Manoel Henrique Campos. **Resistência dos materiais para entender e gostar**. São Paulo: Studio Nobel, 1998.

BUDYNAS, Richard G; NISBETH, J. Keith. **Elementos de máquinas de Shigley**, 10 ed. Porto Alegre: McGraw Hill Brasil, 2016.

BUDYNAS, Richard G; NISBETH, J. Keith. **Elementos de máquinas de Shigley**, 8 ed. Porto Alegre: McGraw Hill Brasil, 2011.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica**, 2 ed. São Paulo: McGraw Hill Brasil, 1986.

DA CRUZ, Rosana M. **Pressão lateral em fôrmas para concreto**. Campinas, 1997. 163 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 1997. Disponível

em:<<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000131204>>.
Acesso em: 18 de Maio de 2017.

HIBBELER, R.C. **Resistência dos Materiais**, 7 ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2010.

INSTITUTO AÇO BRASIL, **A indústria do aço no Brasil**. São Paulo, 2012. Disponível em <http://www.acobrasil.org.br/site2015/downloads/livro_cni.pdf>. Acesso em: 17 de Agosto de 2017.

LANDIM, Fátima L.; LOURINHO, Lídia A.; LIRA, Roberta C., & SANTOS, Zélia. M. **Uma reflexão sobre as abordagens empesquisa com ênfase na integraçãoQualitativo-Quantitativa**. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/html/408/40819110>>. Acesso em: 16 de Agosto de 2017.

MELCONIAN, Marcos Vinícius. **Modelagem numérica e computacional com similitude e elementos finitos**. São Paulo: Blucher, 2014.

PINHEIRO, Antônio Carlos da Fonseca Bragança. **Estruturas Metálicas**. São Paulo: Blucher, 2005.

PEURIFOY, Robert L. et al. **Planejamento, equipamentos e métodos para a construção civil**. 8 ed. São Paulo: McGraw Hill Brasil, 2015.

PLESHA, Michael E. et al. **Mecânica para engenharia estática**. Porto Alegre: Bookman, 2014.

PORTAL DO CONCRETO, Fôrmas para concreto. Disponível em <<http://www.portaldoconcreto.com.br/cimento/concreto/forma.html>>. Acesso em: 15 de Março de 2017.

POTTER, Merle C. et al. **Engenharia Mecânica Estática**. São Paulo: Bookman, 2013.

SEVERINO, Antônio Joaquim. **Metodologia do trabalho científico**. São Paulo: Cortez, 2007. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3480016/mod_label/intro/SEVERINO_Metodologia_do_Trabalho_Cientifico_2007.pdf>. Acesso em: 16 de Agosto de 2017.

ANEXO A – DEFORMAÇÃO DAS VIGAS

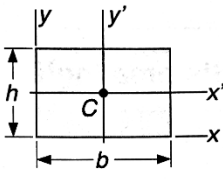
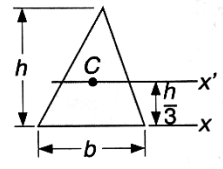
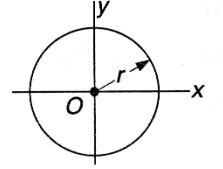
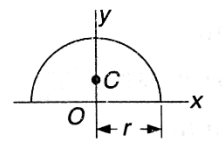
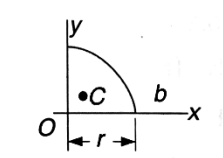
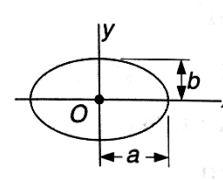
Tabela para calculus de deformação de vigas

Inclinações e deslocamentos de vigas simplesmente apoiadas			
Viga	Inclinação	Deflexão	Curva da linha elástica
	$\theta_{\max} = \frac{-PL^2}{16EI}$	1 $v_{\max} = \frac{-PL^3}{48EI}$	$v = \frac{-Px}{48EI}(3L^2 - 4x^2)$ $0 \leq x \leq L/2$
	$\theta_1 = \frac{-Pab(L+b)}{6EIL}$ $\theta_2 = \frac{Pab(L+a)}{6EIL}$	2 $v _{x=a} = \frac{-Pba}{6EIL}(L^2 - b^2 - a^2)$	$v = \frac{-Pbx}{6EIL}(L^2 - b^2 - x^2)$ $0 \leq x \leq a$
	$\theta_1 = \frac{-M_0L}{3EI}$ $\theta_2 = \frac{M_0L}{6EI}$	3 $v_{\max} = \frac{-M_0L^2}{\sqrt{243EI}}$	$v = \frac{-M_0x}{6EIL}(x^2 - 3Lx + 2L^2)$
	$\theta_{\max} = \frac{-wL^3}{24EI}$	4 $v_{\max} = \frac{-5wL^4}{384EI}$	$v = \frac{-wx}{24EI}(x^3 - 2Lx^2 + L^3)$
	$\theta_1 = \frac{-3wL^3}{128EI}$ $\theta_2 = \frac{7wL^3}{384EI}$	5 $v _{x=L/2} = \frac{-5wL^4}{768EI}$ $v_{\max} = -0,006563 \frac{wL^4}{EI}$ em $x = 0,4598L$	$v = \frac{-wx}{384EI}(16x^3 - 24Lx^2 + 9L^3)$ $0 \leq x \leq L/2$ $v = \frac{-wL}{384EI}(8x^3 - 24Lx^2 + 17L^2x - L^3)$ $L/2 \leq x < L$
	$\theta_1 = \frac{-7w_0L^3}{360EI}$ $\theta_2 = \frac{w_0L^3}{45EI}$	6 $v_{\max} = -0,00652 \frac{w_0L^4}{EI}$ em $x = 0,5193L$	$v = \frac{-w_0x}{360EIL}(3x^4 - 10L^2x^2 + 7L^4)$
	$\theta_{\max} = \frac{-PL^2}{2EI}$	7 $v_{\max} = \frac{-PL^3}{3EI}$	$v = \frac{-Px^2}{6EI}(3L - x)$
	$\theta_{\max} = \frac{-PL^2}{8EI}$	8 $v_{\max} = \frac{-5PL^3}{48EI}$	$v = \frac{-Px^2}{6EI}(\frac{3}{2}L - x) \quad 0 \leq x \leq L/2$ $v = \frac{-PL^2}{24EI}(3x - \frac{1}{2}L) \quad L/2 \leq x \leq L$
	$\theta_{\max} = \frac{-wL^3}{6EI}$	9 $v_{\max} = \frac{-wL^4}{8EI}$	$v = \frac{-wx^2}{24EI}(x^2 - 4Lx + 6L^2)$
	$\theta_{\max} = \frac{M_0L}{EI}$	10 $v_{\max} = \frac{M_0L^2}{2EI}$	$v = \frac{M_0x^2}{2EI}$
	$\theta_{\max} = \frac{-wL^3}{48EI}$	11 $v_{\max} = \frac{-7wL^4}{384EI}$	$v = \frac{-wx^2}{24EI}(x^2 - 2Lx + \frac{3}{2}L^2)$ $0 \leq x \leq L/2$ $v = \frac{-wL^3}{192EI}(4x - L/2)$ $L/2 \leq x \leq L$
	$\theta_{\max} = \frac{-w_0L^3}{24EI}$	12 $v_{\max} = \frac{-w_0L^4}{30EI}$	$v = \frac{-w_0x^2}{120EIL}(10L^3 - 10L^2x + 5Lx^2 - x^3)$

Fonte: Adaptado de: Hibbeler (2010, p.586-587).

ANEXO B – MOMENTOS DE INÉRCIA DE FIGURAS PLANAS

Tabela para calculo do momento de inércia de figuras planas

Retângulo		$\bar{I}_{x'} = \frac{1}{12} bh^3$ $\bar{I}_{y'} = \frac{1}{12} b^3 h$ $I_x = \frac{1}{3} bh^3$ $I_y = \frac{1}{3} b^3 h$ $J_C = \frac{1}{12} bh(b^2 + h^2)$
Triângulo		$\bar{I}_{x'} = \frac{1}{36} bh^3$ $\bar{I}_{y'} = \frac{1}{12} bh^3$
Círculo		$\bar{I}_x = \bar{I}_y = \frac{1}{4} \pi r^4$ $J_O = \frac{1}{2} \pi r^4$
Semicírculo		$I_x = I_y = \frac{1}{8} \pi r^4$ $J_O = \frac{1}{4} \pi r^4$
Quadrante		$I_x = I_y = \frac{1}{16} \pi r^4$ $J_O = \frac{1}{8} \pi r^4$
Elipse		$\bar{I}_{x'} = \frac{1}{4} \pi ab^3$ $\bar{I}_{y'} = \frac{1}{4} \pi a^3 b$ $J_O = \frac{1}{4} \pi ab(a^2 + b^2)$

Fonte: Beer e Johnston (1995, p.1203).