



Anais do
60º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2018
Setembro / 2018



@ 2018 - IBRACON - ISSN 2175-8182

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM SEÇÃO RETANGULAR SOB FLEXÃO SIMPLES

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH RECTANGULAR SECTION UNDER SIMPLE BENDING

João Lucas Silva do Nascimento (1); Bruna Gouveia Gurgel (2); Maurílio Medeiros de Lucena (3)

(1) *Engenheiro Civil, Vistos Engenharia & Serviços LTDA;*

(2) *Engenheira Civil, INBEC;*

(3) *Professor Mestre, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações
R. Serra das Cruzes, 8016, Natal-RN*

Resumo

Elementos estruturais de concreto armado com seção retangular estão constantemente sofrendo solicitações que causam efeitos nas próprias peças estruturais. Considerando um carregamento perpendicular à linha neutra do elemento, há ocorrência da flexão simples na peça, devido à aplicação do momento fletor na seção. Diante disso, em vigas têm-se a necessidade de verificar o efeito do esforço cortante, que será combatido pela armadura transversal, através da analogia da Treliça de Morsch. Dessa forma, o trabalho tem como objetivo realizar uma análise experimental dos efeitos causados por flexão simples, quantificando a carga de ruptura, desenvolvimento da fissuração e, posteriormente, o estudo comparativo com a teoria dos temas abordados. Através do estudo teórico e seguindo as normas técnicas, foram realizados os ensaios de consistência e compressão do concreto. Em seguida, executou-se o ensaio de Stuttgart, aplicando cargas que simulasse a flexão simples em elementos de seção retangular até sua ruptura. Desse modo, foi diagnosticado que nos ensaios de Stuttgart, a armadura longitudinal da Viga 1 estava subarmada e as armaduras transversais das duas vigas estavam com espaçamento maior do que o necessário, provocando suas respectivas rupturas.

Palavra-Chave: Estruturas. Seção retangular. Flexão simples. Ensaios.

Abstract

Structural reinforced concrete elements with rectangular section are constantly suffering requests that cause effects in their own structural parts. Considering a load perpendicular to the neutral line of the element, there is an occurrence of simple bending in that piece, due to the application of bending moment in the section. Given this, in beams is necessary to check the effect of the shear force, which will be fought by the transverse armor, by analogy to the Morsch trellis. Thus, the work aims to present an experimental analysis of the effects caused by simple bending, quantifying the breaking load, development of cracking and, subsequently, the comparative study with the theory of the topics discussed. Through theoretical study and following technical standards, the consistency tests and the concrete compression were conducted. Then the Stuttgart test was ran, applying loads that simulate the simple bending of rectangular section parts until their break. Thus, was diagnosed that in the Stuttgart tests, that the longitudinal armor of the beam 1 did not have enough reinforcements and the transverse armor on the two beams were spaced more than necessary, causing their rupture.

Keywords: Structures. Rectangular section. Simple bending. Tests.

1 Introdução

Para projetar estruturas de concreto armado, é recomendado que os engenheiros se atentem aos diversos fatores e adversidades que possam atrapalhar o desenvolvimento do projeto. Em elementos com seção retangular como as vigas, um dos efeitos que deve ser levado em consideração é o da flexão simples, que segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2015), é quando não há atuação do esforço normal na seção do elemento estudado, mas é considerado os efeitos do esforço de momento fletor e cortante. A influência do esforço cortante em vigas de concreto armado gerada a partir de ações externas, pode ser entendida na Teoria da Trelança de Mörsch, onde designará as tensões principais atuantes na viga e seus devidos comportamentos. A pesquisa tem como objetivo realizar o estudo experimental da flexão simples até seu colapso, em vigas de concreto armado com seção retangular. O trabalho será baseado em uma revisão bibliográfica sobre flexão simples, especificamente em vigas de concreto armado. Para uma melhor compreensão prática do assunto, serão realizados ensaios laboratoriais para determinar a resistência à compressão do concreto, sua consistência; e também, simular a ruptura das peças em estudo, através do ensaio de Stuttgart. Por fim, se faz necessário entender o processo do colapso de elementos estruturais com seções retangulares, apresentando conceitos e definições da flexão simples e comparando-os com resultados obtidos nos ensaios propostos.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Flexão simples

Os carregamentos em uma edificação geram solicitações nos elementos estruturais como lajes e vigas. O momento fletor é uma solicitação que gera tendência de giro nas seções de uma viga, assim, ocasionando a flexão. De acordo com Carvalho e Figueiredo Filho (2015), a flexão é um esforço que propicia tensões normais de compressão e tração nas seções transversais dos elementos, causando-lhe uma flecha como consequência. A Figura 1 mostra a ocorrência da flexão simples em uma viga, com a aplicação de duas cargas equidistantes concentradas e perpendiculares à linha neutra, gerando o esforço do momento fletor e cortante, por isso, sendo denominada de flexão simples.

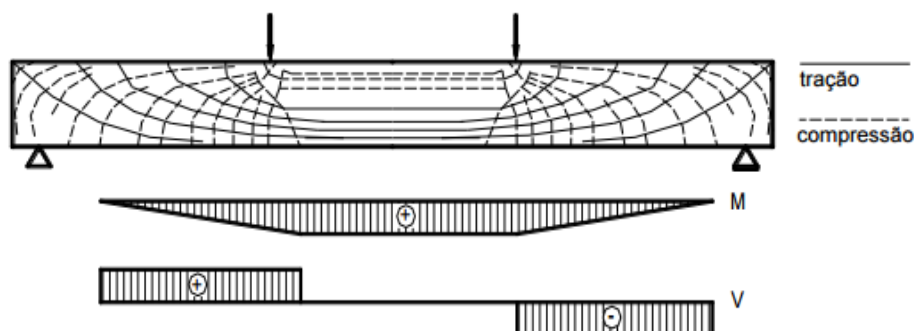


Figura 1 - Planos de tensões e diagramas do momento fletor e esforço cortante (Bastos (2015))

2.2 Domínios de deformação

De acordo com a Norma ABNT NBR 6118 (2014), para o dimensionamento de estruturas de concreto armado, é aconselhável que as estruturas tenham deformações nos domínios 2 ou 3, assim, garantindo boas condições de ductilidade e respeitando os limites da posição da linha neutra. Para o domínio 2 a norma afirma que não há ruptura por compressão do concreto e o aço atingindo seu escoamento máximo; no domínio 3 o concreto atinge sua plasticidade, ocasionando a ruptura à compressão e o aço obtendo deformação plástica. A relação entre Linha Neutra e Altura útil tem o limite de 0,45, assim, evitando com que o elemento estrutural tenha uma ruptura frágil. Na Figura 2, contém o diagrama de deformação do aço e concreto, para os domínios 2, 3, 4.

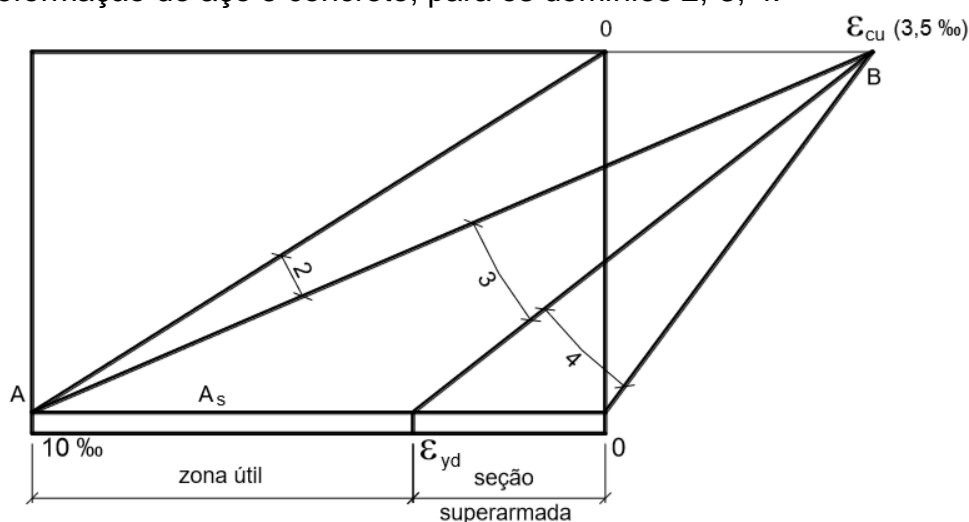


Figura 2 - Diagrama dos domínios de deformação (Bastos (2015))

2.3 Treliça de Morsch

No século XX, Karl Wilhelm Ritter e Emil Morsch desenvolveram o modelo clássico da treliça de Morsch, baseado na analogia de uma viga com fissuras a uma treliça, devido seu formato. Ritter afirma que devido às tensões de tração no concreto em uma viga, o modelo de comportamento do elemento fissurado pode ser caracterizado por: banzo superior comprimido; banzo inferior tracionado; diagonais comprimidas (bielas de concreto entre fissuras); diagonais tracionadas (estribos). O modelo é representado na Figura 3.

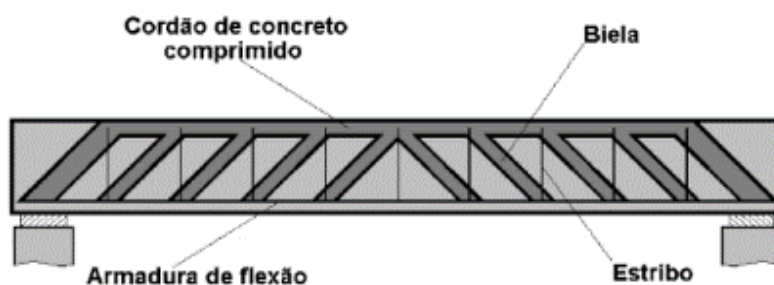


Figura 3 - Modelo da Treliça de Morsch (Hirata (2013))

2.4 Modelos de ruptura

2.4.1 Ruptura por flexão

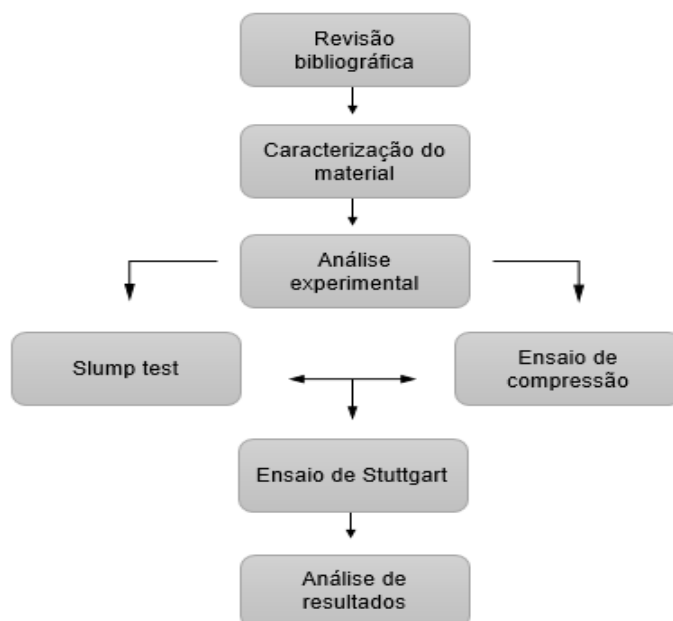
Conforme defendido por Leonhardt e Mönning (1977), as rupturas por flexão podem ser ocasionadas quando o aço atinge sua deformação limite antes do esgotamento da zona de compressão, assim, a armadura de flexão rompe por tração. No caso das armaduras longitudinais superdimensionadas, a deformação do concreto é atingida primeiro e, conseqüentemente acontece a plastificação do concreto na zona comprimida.

2.4.2 Ruptura por força cortante

Esse tipo de ruptura pode ser ocasionado pelo esmagamento da diagonal comprimida, que ocorre quando as tensões principais de compressão, inclinadas, atingem valores superiores de resistência do concreto. A ruptura por força cortante na tração é devido a deficiência da armadura de cisalhamento, no qual, o aumento da carga e o surgimento das fissuras de cisalhamento irão contribuir para que ocorra a ruptura.

3 Metodologia

O estudo baseia-se na revisão de literatura vista no capítulo anterior e em resultados experimentais de vigas de concreto armado com seção retangular, como expõe o fluxograma a seguir. Os ensaios foram executados no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).



Fluxograma - Metodologia adotada (Autores (2017))

3.1 Concreto

Para a realização dos ensaios, foi preparado concreto de Cimento Portland do tipo CP II-Z-32-RS, areia média natural e brita 1 (19 mm) com o traço 1:1,63:2,5:0,47. Foi produzido 62 litros (0,062 m³) de concreto na betoneira para abastecer 2 vigas, 4 corpos de prova e a realização do *slump test*. Seguindo a norma ABNT NBR 5738:2003, os corpos de prova (CP's) moldados tinham dimensões de 20x10 cm. Logo em seguida, as vigas e os CP's foram armazenados em um tanque com água saturada e hidróxido de cálcio, para ser realizada a cura do concreto.

3.1.1 Ensaio de compressão

Obedecendo a norma ABNT NBR 5739 de 2007, ao completar a idade de 28 dias, foi realizado os rompimentos dos CP's na prensa. Após as rupturas, a média entre valores de resistência a compressão do concreto foi considerada como a resistência à compressão do concreto dosado em laboratório, como expõe o Tabela 1, resultando em $\sigma_c = 24,21$ MPa.

Tabela 1 - Resistência do concreto à compressão (Autores (2017))

Corpo de prova	Força máxima (Kgf)	Área (mm ²)	F _{cj} (MPa)
CP1	19700	7853,75	24,61
CP2	18750	7853,75	23,42
CP3	19200	7853,75	23,98
CP4	19750	7806,70	24,82

3.1.2 Ensaio de consistência

Para encontrar a consistência do concreto utilizado nos demais ensaios, foi executado o *slump test*, chegando ao abatimento do tronco de cone de 60 milímetros (Figura 4). Esse procedimento foi realizado seguindo a norma ABNT NBR NM 67:1998. Segundo Campiteli (2011), para abatimento de 60 milímetros, a consistência do material é considerada plástica (média), sendo utilizada para estruturas correntes e concreto bombeado; com suas condições de adensamento sendo de vibração normal.



Figura 4 - Ensaio Slump Test (Autores (2017))

3.2 Aço

Para a composição das peças (vigas) de concreto armado, empregaram-se os aços CA-50 e CA-60. As armaduras foram escolhidas sem critério de dimensionamento antes das ruínas, com o intuito de estudar a ruptura das peças. Na parte inferior possuíam duas barras de 10 milímetros (CA-50); na parte superior possuíam duas barras de 10 milímetros (CA-50) e, suas armaduras transversais dispostas a cada 10 centímetros, com espessura de 5 milímetros (CA-60) cada barra. A Figura 5 expõe a disposição das armaduras nas vigas.



Figura 5 - Disposição das armaduras (Autores (2017))

3.3 Ensaio de Stuttgart

Com o objetivo da obtenção dos resultados sobre o comportamento da peça, foi realizado o ensaio de Stuttgart nas duas vigas previamente concretadas. Desenvolvido no século XX por Leonhardt e Walther na Alemanha, o experimento consiste no carregamento gradativo de uma viga de seção retangular biapoiada, com duas cargas concentradas e equidistantes dos seus devidos apoios, fazendo com que ocorra flexão no elemento estrutural. Com o aumento do carregamento, há o acréscimo do momento fletor e esforço cortante, conseqüentemente, levando a peça ruína. Na realização do ensaio foram executadas duas vigas com seção de 15x15 cm e comprimento de 75 cm. Empregou-se duas barras com diâmetro de 10 mm na região tracionada e também, duas barras com diâmetro de 10 mm na região comprimida. As armaduras de cisalhamento foram dispostas a cada 10 cm e com diâmetro de 5 mm. O espaçamento entre barras longitudinais foi de 10 cm. A seção do elemento está representada na Figura 6.

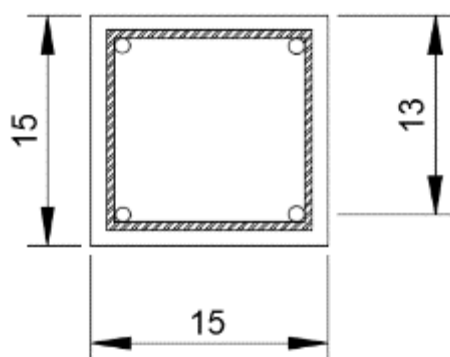


Figura 6 - Seção das vigas 1 e 2 (Autores (2017))

O ensaio foi executado na máquina universal de ensaios da Amsler. Na realização do procedimento, foi programado uma breve paralisação à cada aumento de carregamento, sendo este aumento de 1 tf por paralisação, para observar o comportamento da peça e efetuar os registros fotográficos. A ilustração a seguir retrata como foi ordenado os carregamentos e seus devidos apoios.

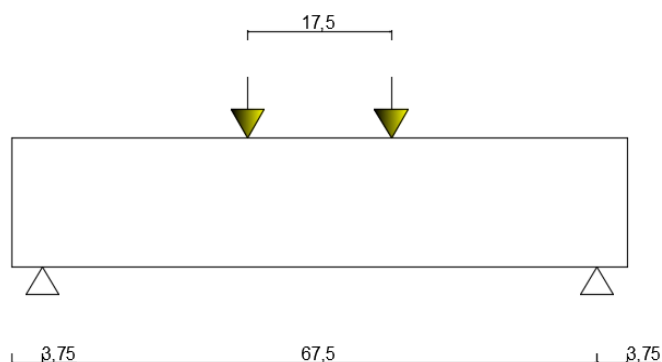


Figura 7 - Modelo de carregamento (Autores (2017))

A Figura 8 retrata o início do carregamento na peça estrutural e a disposição do carregamento.



Figura 8 - Início do carregamento na peça (Autores (2017))

3.4 Análise teórica

Após a realização dos ensaios propostos, o trabalho segue com a análise teórica. Esta análise foi desenvolvida a partir dos valores das cargas de rupturas das vigas ensaiadas. Com isso, usou-se as formulações do livro de Carvalho e Figueiredo Filho (2014), para concretos de resistência inferior a 50 MPa (Grupo I). Os resultados obtidos através das formulações, serão confrontados com os resultados e dados dos ensaios já executados. Com a intenção de identificar se a seção resistirá ao momento aplicado pela carga, é indispensável calcular a altura útil mínima da seção demonstrada na Equação 1, a fim de constatar a utilização de armadura simples ou dupla.

$$d_{\min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{M}{b_w \cdot \sigma_c}} \quad (\text{Equação 1})$$

Para conhecer a área de aço necessária para combater o momento na flexão simples, foi utilizada a Equação 2 para seus devidos casos.

$$A_s = \frac{M}{f_y \cdot z} \quad (\text{Equação 2})$$

Também se faz necessário verificar o esforço cortante aplicado na peça de concreto armado e, conseqüentemente calcular o espaçamento entre armaduras transversais, com o intuito da armadura combater ao cisalhamento. Com isso, usou-se a Equação 3.

$$s = \frac{0,9 \cdot 43,5 \cdot A_{sw}}{V_{sw}} \quad (\text{Equação 3})$$

Já conhecida as dimensões dos elementos estudados, utilizou-se a Equação 4 para encontrar a altura da linha neutra na ruptura e a Equação 5 para obter o momento último resistido. Através da altura da linha neutra, pode-se constatar seu domínio de

deformação, que será demonstrado nos resultados.

$$x = 1,25 \cdot d \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{M}{0,425 \cdot b_w \cdot d^2 \cdot \sigma_c}} \right] \quad (\text{Equação 4})$$

$$M_u = 0,68 \cdot b_w \cdot x \cdot \sigma_c \cdot (d - 0,4 \cdot x) \quad (\text{Equação 5})$$

4 Resultados e discussões

Com a execução do ensaio de Stuttgart para as duas vigas, foram obtidas suas cargas de ruptura e posteriormente o estudo comparativo entre a ruína das peças, com resultados obtidos das formulações de cada elemento. Os resultados entre as duas peças foram próximos, tanto nas cargas de ruptura, quanto no aparecimento de fissuras. Para uma maior proximidade entre os experimentos e a análise teórica, não foram utilizados valores ponderadores (Gama) de resistência e esforços nos cálculos da análise teórica, como também, a classe do concreto empregado nas formulações se manteve no valor de 24,21 MPa (média entre os CP's).

4.1 Viga 01

Com o início do carregamento neste elemento, verificou-se o aparecimento das fissuras de flexão a partir da carga de 4 tf, com a fissuração perpendicular às tensões principal de tração na região de flexão pura, assim, caracterizando a mudança do Estádio I para Estádio II. O surgimento das fissuras de flexão com cisalhamento é observado nas regiões entre a aplicação da carga até o apoio, quando o carregamento chegou a 5 tf. A ruptura da peça ocorreu com o carregamento de 8,02 tf, no qual, foi observado que as fissuras de cisalhamento se desenvolveram em direção a região comprimida, devido as armaduras transversais estarem subarmadas, como demonstrada nas Figuras 9 e 10. Portanto, pode-se constatar que houve uma ruptura de cisalhamento por tração.



Figura 9 - Viga 1 após sua ruptura (Autores (2017))



Figura 10 - Viga 1 após sua ruptura (Autores (2017))

A partir da carga de ruptura calculou-se o momento fletor da peça, resultando em 1006,25 kN.cm. Com este resultado, através do equilíbrio das forças em seção retangular de concreto armado, foram calculados o Esforço cortante, Altura útil mínima (obtendo armadura simples), Espaçamento entre estribos para esta situação, Domínio de deformação e seu Momento resistente, que se aproximou do já calculado anteriormente. Estes resultados teóricos estão expostos no Tabela 2.

Tabela 2 - Viga 1 (Autores (2017))

Esforço cortante (kN)	Altura útil mínima (cm)	Armadura longitudinal (cm²)	Espaçamento entre estribos (cm)	Domínio de deformação	Momento Resistente (kN.cm)
40,25	10,53	1,73 (3 ϕ 10mm)	7,5	3	1005,1

4.2 Viga 02

Após se iniciar o carregamento, constatou-se o surgimento das fissuras de flexão com o carregamento de 3 tf, na região de flexão pura, no qual, caracterizou a passagem para o Estádio II. Já na região onde ocorre a flexão não pura, há aparição das fissuras de flexão com cisalhamento e fissuras de cisalhamento, com a aplicação de 5 tf. Estas situações de fissuração no elemento, se evidenciam nas Figuras 11 e 12.



Figura 11 - Viga 2 em estado de fissuração (Autores (2017))

A ruptura da peça estrutural ocorreu com o carregamento de 7,7 tf, no qual, foi observado que as fissuras de cisalhamento atravessavam da região tracionada até a comprimida, conforme aumentava o momento fletor. Logo, identificou a ruptura de cisalhamento por tração, como demonstrada na Figura 12.



Figura 12 - Viga 2 após sofrer a ruptura (Autores (2017))

No Tabela 3, estão representados os resultados a partir do carregamento em que ocasionou sua ruptura, propiciando um momento fletor de 962,5 kN.cm, como foi realizado na viga anterior.

Tabela 3 - Viga 2 (Autores (2017))

Esforço cortante (kN)	Altura útil mínima (cm)	Armadura longitudinal (cm²)	Espaçamento entre estribos (cm)	Domínio de deformação	Momento Resistente (kN.cm)
38,50	10,30	1,65 (2 ϕ 10mm)	8	2	962,03

5 Conclusão

Em virtude dos fatos mencionados, foi realizado o estudo comparativo entre o comportamento de vigas sob flexão simples e formulações fornecidas nas literaturas, que através dos resultados encontrados, pode-se afirmar que estas formulações têm proximidade com a prática. Também foi conclusivo, que nos ensaios de Stuttgart as duas rupturas foram influenciadas pela ineficiência das armaduras de cisalhamento, devido seu espaçamento necessário ser menor que o aplicado nas vigas, sendo necessário, na viga 01 ter espaçamento de 7,5 cm e na viga 02 ter espaçamento de 8 cm. O fato da Viga 01



Anais do
60º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2018
Setembro / 2018



@ 2018 - IBRACON - ISSN 2175-8182

estar subarmada nas armaduras de flexão, não foi preponderante para sua ruptura, devido a diferença entre a área de aço necessária e área de aço efetiva ser de 10,19%. Por fim, o trabalho teve sua importância no entendimento do comportamento dos elementos com seção retangular, pois para futuros dimensionamentos haverá um melhor diagnóstico em problemas no âmbito estrutural.

6 Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Protendido. Rio de Janeiro: Abnt, 2014.
- BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Flexão Normal Simples - Vigas**. Bauru: UNESP, 2015. Notas de Aula.
- CAMPITELI, Vicente Coney. **Fundamentos da dosagem de concretos**. Ponta Grossa: UEPG, 2011.
- CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**. 4. ed. São Carlos: Edurscar, 2015.
- HIRATA, Fernando Pessoto. **Análise comparativa entre modelos de predição de norma e dados de ensaios na determinação da resistência ao cisalhamento**. 2013. 232 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- LEONHARDT, Fritz; MÖNNIG, Eduard. **Construções de Concreto: Princípios Básicos do Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado**. Rio de Janeiro: Editora Interciência Ltda, 1977.