

SOFTWARE PARA ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE VIGAS BI APOIADAS DE CONCRETO ARMADO COM SEÇÃO RETANGULAR.

Murilo Lima Schivinin¹
Rafael da Silva Candeloro²
Vinicius Slompo Pinto³

RESUMO

Com o avanço tecnológico cada vez mais presente no mercado da construção civil, o processo de dimensionamento de vigas de concreto armado pode ser otimizado com a utilização de recursos computacionais para a elaboração dos cálculos, contribuindo com o cotidiano do profissional, economizando tempo e prevenindo erros. O objetivo deste trabalho é desenvolver um *software* para realizar o dimensionamento de vigas de concreto armado bi apoiadas com seção retangular, possibilitando, ao final dos procedimentos numéricos, realizar análises quanto as áreas de aço encontradas e o esforço atuante na estrutura. As modelagens numéricas serão efetuadas utilizando o método das equações de equilíbrio para o dimensionamento. Apresenta-se como resultados, comportamentos inesperados de cálculo em vigas submetidas à flexão, com concretos de alta resistência, sendo deles desde o C55 até o C90. Conclui-se que, para os dimensionamentos das vigas submetidas a altos esforços, em que se faz necessário a utilização de armadura dupla, pode não ser vantajoso a utilização de concretos de alta resistência no dimensionamento.

Palavras-chaves: Vigas bi apoiadas. Concreto armado. Dimensionamento.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de *softwares* modernizou o mercado da construção civil, facilitando os processos numéricos e o dimensionamento de estruturas, possibilitando um projeto com mais praticidade e agilidade na definição de determinadas etapas (SOUZA; MARTINS; MONNERAT, 2016).

Os *softwares* para cálculo no ramo da engenharia civil são funcionais e rápidos na resolução de cálculos complexos, os quais apresentam alto grau de dificuldade, e seriam custosos caso fossem resolvidos de forma manual, exigindo uma alta demanda de tempo (LIMA; NETO; ARAÚJO, 2013).

Para o planejamento e projeto estrutural de um edifício são necessárias várias etapas, desde o lançamento dos esforços solicitantes, concepção estrutural, e detalhamento dos elementos, até a impressão e plotagem de projetos. Todas essas

¹ Graduando em Engenharia Civil no Centro Universitário UNIFAFIBE de Bebedouro, SP. E-mail: murilo.skiva@gmail.com

² Graduando em Engenharia Civil no Centro Universitário UNIFAFIBE de Bebedouro, SP. E-mail: rafaelscandeloro@hotmail.com

³ Professor Mestre, no Centro Universitário UNIFAFIBE de Bebedouro, SP. E-mail: vinicius.pinto@prof.unifafibe.edu.br

etapas são influenciadas de alguma forma pela agilidade e precisão que a tecnologia proporciona (KIMURA, 2007).

A utilização do recurso computacional na otimização de vigas de concreto armado contribui no quesito da agilidade do dimensionamento do elemento estrutural e na economia do custo dos materiais, considerando, ainda, a segurança da estrutura. Tendo em vista tal praticidade, o intuito da utilização de ferramentas para a otimização e melhoria da execução de serviços faz com que a estrutura dimensionada ganhe uma melhor relação custo x benefício (IBRACON, 2019).

Em busca de garantir requisitos mínimos de qualidade da estrutura de concreto, é possível classificá-los em três grupos distintos conforme a ABNT NBR 6118:2014, sendo eles: capacidade resistente, que equivale a segurança à ruptura; desempenho em serviço, ou seja, a estrutura deve se manter em condições plena de utilização perante a sua vida útil, evitando aparições de falhas que arrisquem parcialmente ou completamente o uso para a qual foi projetada, e a durabilidade da estrutura, que está associada à resistência de agentes agressivos externos e desempenho da estrutura.

O dimensionamento das armaduras longitudinais tem como objetivo combater os esforços de tração gerado pela flexão das vigas, enquanto que as armaduras transversais são dimensionadas para combater o esforço cortante nas vigas de concreto armado. Os principais procedimentos para o dimensionamento de vigas consistem na determinação da armadura transversal e longitudinal, possibilitando a verificação das deformações na viga e o detalhamento da armadura de aço (ABNT NBR 6118:2014).

O objetivo deste trabalho é a criação de um *software* de dimensionamento e análise de armaduras de aço longitudinais e transversais de vigas de concreto armado com seção retangular, utilizando a linguagem de programação *JavaScript*.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

No atual tópico são esclarecidos e aprofundados, os assuntos essenciais para a compreensão do artigo como um todo.

2.1 CONCRETO

No item 12.3.3 da ABNT NBR 6118:2014 está presente a definição da resistência de cálculo à compressão do concreto, de modo que, quando a verificação

desta resistência ocorre com prazo igual ou superior aos 28 dias, adota-se a expressão 1. O valor da resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) é definida como um parâmetro que tem probabilidade de 95% da amostragem dentre todos os ensaios realizados, estarem com os valores maiores que o estipulado (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (1)$$

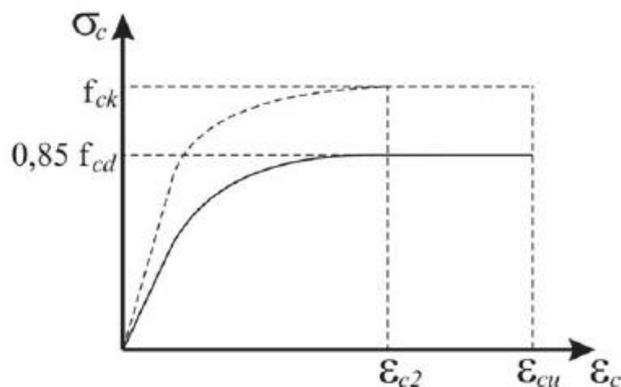
Em que:

- f_{cd} – resistência de cálculo à compressão do concreto;
- f_{ck} – resistência característica à compressão do concreto;
- γ_c – coeficiente de ponderação da resistência do concreto;

2.1.1 DIAGRAMA TENSÃO DEFORMAÇÃO DO CONCRETO

Os diagramas tensão-deformação do concreto apresentam as relações entre as tensões (σ) aplicadas e as deformações específicas (ϵ) sofridas (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014). Para realizar as análises no Estado Limite Último (ELU), a ABNT NBR 6118:2014 idealiza no item 8.2.10.1 o diagrama apresentado na Figura 1, o qual examina a região comprimida do concreto para concretos que se delimitem à uma resistência máxima de 90 MPa.

FIGURA 1: Diagrama tensão-deformação do concreto na compressão



Fonte: Pinto (2017)

Verifica-se, através da figura 1, que o formato do diagrama exibe dois segmentos. Na equação (2) representa-se a tensão σ_c onde o valor de deformação apresentada pelo concreto está situado entre $0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2}$, enquanto que a equação (3) apresenta o valor da deformação do concreto entre $\varepsilon_c \geq \varepsilon_{c2}$ (ABNT, 2014):

$$\sigma_c = \alpha_c \cdot f_{cd} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^{\eta} \right] \quad (2)$$

$$\sigma_c = \alpha_c \cdot f_{cd} \quad (3)$$

Ficando como valor de η , α_c , ε_{c2} , e ε_{cu} para concretos de classe até C50 (ABNT, 2014) os valores apresentados nas equações 4, 5, 6, e 7.

$$\eta = 2,0 \quad (4)$$

$$\alpha_c = 0,85 \quad (5)$$

$$\varepsilon_{c2} = 2,0\% \quad (6)$$

$$\varepsilon_{cu} = 3,5\% \quad (7)$$

Para concretos pertencentes às classes de C55 a C90, os valores de η , α_c , ε_{c2} , e ε_{cu} são calculados através das equações 8, 9, 10 e 11 (ABNT, 2014):

$$\eta = 1,4 + 23,4 \cdot \left[\frac{(90 - f_{ck})}{100} \right]^4 \quad (8)$$

$$\alpha_c = 0,85 \cdot \left[1 - \frac{(f_{ck} - 50)}{200} \right] \quad (9)$$

$$\varepsilon_{c2} = 2,0\% + 0,085\% \cdot (f_{ck} - 50)^{0,53} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{cu} = 2,6\% + 35\% \cdot \left[\frac{(90 - f_{ck})}{100} \right]^4 \quad (11)$$

2.1.2 ESTADO LIMITE ÚLTIMO

O Estado Limite Último (ELU) corresponde à capacidade máxima portante da estrutura, e está diretamente associado ao colapso, ou qualquer outro modo de ruína

das estruturas, determinando o fim da vida útil e encerramento do uso estrutural (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2003).

O item 12.4 da ABNT NBR 6118:2014 define que as resistências dos materiais precisam ser minoradas para efeitos de cálculos através de um coeficiente. No caso do estado-limite último, o coeficiente de ponderação para as combinações normais, especiais ou de construção e excepcionais é dado conforme com a tabela 1.

TABELA 1: Coeficientes de ponderação γ_c e γ_s

Combinações	Concreto (γ_c)	Aço (γ_s)
Normais	1,4	1,15
Especiais ou de construção	1,2	1,15
Excepcionais	1,2	1,0

Fonte: Adaptado ABNT (2014)

2.2 AÇO

Na construção civil, quando se trata de concreto armado são utilizadas 3 classes diferentes de aço: CA25, CA50 e CA60 (a sigla CA refere-se à concreto armado, e o número posterior a ela, à resistência de escoamento, em kN/cm²). Sendo assim, as principais características mecânicas para a definição de um aço são: resistência característica de escoamento, alongamento na ruptura e limite de resistência (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

A máxima tensão que uma barra ou fio deve suportar é definida como: resistência característica de escoamento do aço (f_{yk}), de modo que, a partir desse valor de tensão, os aços com patamar de escoamento definidos (CA25 e CA50) passam a sofrer deformações permanentes, voltando ao seu formato inicial assim que o ensaio de tração for interrompido. No caso do aço CA60, o valor de f_{yk} é o da tensão correspondente a uma deformação específica permanente de 2‰, uma vez que o seu patamar de escoamento não tem valor definido (FERRAZ, 2005).

2.2.1 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Define-se módulo de elasticidade como a resistência do material à deformação elástica, de modo que, quanto maior for este módulo menor será a deformação

elástica resultante de uma tensão, ocasionando em um material mais rígido (CALLISTER, 2012).

A lei de *Hooke* determina que o módulo de elasticidade é a razão entre tensão e a deformação relativa, dentro do limite elástico, de modo que a deformação é proporcional à tensão (MEZZOMO; MORAES, 2020).

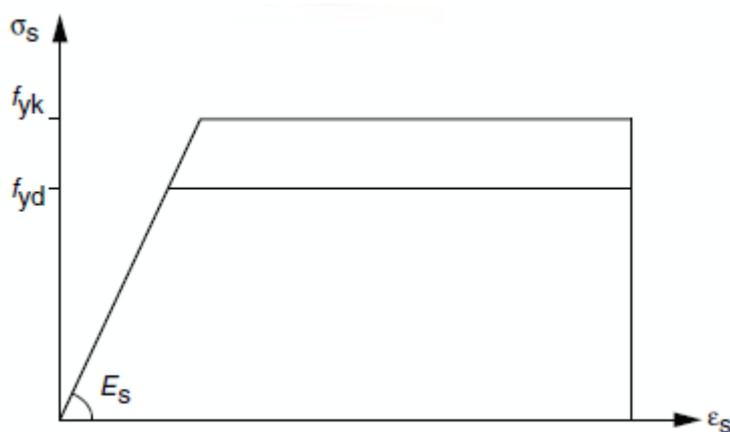
De acordo com o item 8.3.5 da ABNT NBR 6118:2014, quando há a ausência de ensaios ou valores previamente proporcionados pelo fabricante, o módulo de elasticidade do aço pode ser admitido igual a 210 GPa.

2.2.2 DIAGRAMA TENSÃO-DEFORMAÇÃO

O diagrama tensão-deformação do aço consiste em regiões em que o elemento estrutural está submetido à força de tração e em alguns casos também à compressão. Sendo assim, entende-se que toda a tração a qual o elemento em análise está submetido é absorvida pelo aço da armadura (PINTO, 2017).

Para o cálculo nos estados-limites de serviço e estados-limites último pode ser utilizado o diagrama simplificado conforme a figura 2, retirado do item 8.3.6 da ABNT NBR 6118:2014.

FIGURA 2 – Diagrama tensão-deformação para aços de armaduras passivas



Fonte: ABNT (2014)

Apresenta-se no diagrama tensão-deformação do aço a tensão de escoamento f_{yd} , que é definida pela equação 12 (ABNT, 2014):

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (12)$$

Em que:

- f_{yk} representa o valor característico da resistência de escoamento do aço, definida no item 2.2 desse texto;
- γ_s é o coeficiente de ponderação já mencionado no item 2.1.2 desse texto.

2.3 CONCRETO ARMADO

Com intuito de atribuir resistência à tração ao elemento estrutural, é importante associar o concreto a um material que apresente boa resistência à tração. Diante disso, normalmente são posicionadas barras de aço na seção que sofre esses esforços (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

Pinheiro, Muzardo, Santos (2003) citam que o aço fornece ductilidade às vigas de concreto armado. A ductilidade refere-se a uma propriedade mecânica em que o material, sob a aplicação de cargas, se deforma plasticamente sem se romper, podendo ser medida através de alongamento específico ou da estrição.

Para um trabalho conjunto entre as barras de aço e o concreto, é necessário uma boa aderência e ancoragem entre eles. A aderência é estipulada como a propriedade que impossibilita o escorregamento da barra em relação ao concreto, permitindo a solidariedade dos materiais, fazendo com que ambos resistam os esforços solicitantes. A ancoragem trata-se da propriedade de fixação da barra no concreto e transferência de esforços entre os elementos estruturais (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2003).

2.3.1 DOMÍNIOS DE DEFORMAÇÃO NA RUÍNA

De acordo com a ABNT NBR 6118:2014 os domínios de deformação referem-se às deformações sofridas pelo elemento estrutural em determinadas situações em que no mínimo um dos materiais que o integra (aço ou concreto) atinge o seu limite máximo de deformação, caracterizando dessa maneira, os estados limites últimos:

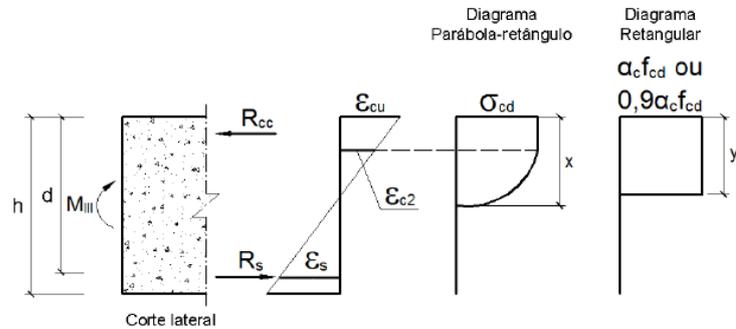
- Alongamento último do aço

$$\varepsilon_{su} = 1\%$$

- Encurtamento último do concreto

pequenas e aceitáveis, não sendo necessário a utilização de coeficiente de correção adicional (ABNT, 2014).

FIGURA 4 – Diagrama retangular.



Fonte: (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2004)

O valor do parâmetro λ pode ser definido através das equações 13 e 14.

Para concretos de classe C20 a C50 utiliza-se a equação 13:

$$\lambda = 0,8 \quad (13)$$

Nos casos de concretos de classe C55 a C90, utiliza-se a equação 14:

$$\lambda = 0,8 - \frac{(f_{ck} - 50)}{400} \quad (14)$$

A tensão presente até a profundidade “y” pode ser definida através de $\alpha_c \cdot f_{cd}$ nos casos em que a largura da seção, medida paralelamente à linha neutra, não reduzir a partir desta para a borda comprimida, ou, nos casos contrários, utiliza-se $0,9 \alpha_c \cdot f_{cd}$ sendo α_c definido de acordo com a equação 15 (para concretos de classe até C50, e equação 16 (para concretos de classe entre C50 até C90) (ABNT, 2014):

$$\alpha_c = 0,85 \quad (15)$$

$$\alpha_c = 0,85 \cdot \left[\frac{1,0 - (f_{ck} - 50)}{200} \right] \quad (16)$$

2.3.2.1 LINHA NEUTRA

Segundo Pinheiro, Muzardo, Santos (2003), a linha neutra (x) consiste em um ponto da seção do elemento estrutural no qual ocorre a divisão entre a parte tracionada e a parte comprimida da estrutura.

A sua posição no ELU está atribuída à capacidade de rotação dos elementos estruturais, de modo que, quanto menor for o valor de β_x , maior será essa capacidade. O valor de β_x corresponde a relação da linha neutra e altura útil da viga, e é definido de acordo com a equação 15 (ABNT, 2014):

$$\beta_x = \frac{x}{d} \quad (17)$$

Nos dimensionamentos limitados a armadura simples, para garantir a ductilidade das vigas, o valor de β_x deve ser menor ou igual a 0,45 para concretos com f_{ck} menor ou igual a 50 MPa e 0,35 para concretos com f_{ck} superior a 55 MPa e menor ou igual a 90 MPa (ABNT, 2014).

2.4 VIGAS

As vigas podem ser definidas como componentes lineares nas quais a flexão é o esforço predominante (ABNT, 2014). São estruturas que dispõem de comprimento longitudinal maior, em ao menos três vezes a proporção da seção transversal. Sua principal função é servir como apoio para as lajes e paredes superiores a ela, conduzindo as cargas solicitantes até os pilares e posteriormente para as fundações (PINHEIRO; MUZARDO e SANTOS, 2003).

Giongo (2007) complementa que as vigas são submetidas principalmente à flexão, porém também estão sujeitas a tensões tangenciais, cuja origem é a ação da força cortante, e em alguns casos, torção.

2.4.1 ARMADURA DUPLA E ARMADURA DE PELE

De acordo com a ABNT NBR 6118:2014 define-se seção com armadura dupla os casos nos quais, além da armadura longitudinal tracionada (A_s), algumas vigas também apresentam armadura longitudinal na região comprimida (A'_s).

A utilização da armadura dupla é um recurso que permite dimensionar as seções quando apresentarem valores de β_x maiores que os valores limites estabelecidos, de forma a inviabilizar seu dimensionamento (ABNT, 2014).

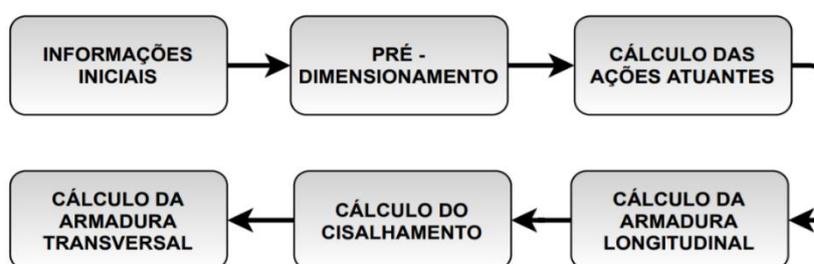
Nos casos de vigas com altura maior que 60cm, é recomendado considerar no dimensionamento a utilização de armadura lateral, denominada de armadura de pele, de modo que, a mínima armadura lateral é dimensionada em relação a $0,10\% \times A_{c,alma}$ para cada uma das faces da alma da viga, podendo ser composta por barras de aço CA50 ou CA60, com espaçamento não superior que 20cm e devidamente ancorada nos apoios da estrutura, respeitando o limite de $5\text{cm}^2/\text{m}$ (ABNT, 2014).

3 METODOLOGIA

Para o dimensionamento de vigas de concreto armado é necessário efetuar a determinação da área de aço para a armadura longitudinal e transversal. Para o dimensionamento do elemento estrutural em questão deve-se garantir que os valores das solicitações de cálculo (S_d) sejam menores ou iguais aos valores das resistências de cálculo (R_d).

A figura 5 apresenta o fluxograma das etapas realizadas neste trabalho:

FIGURA 5 – Fluxograma das etapas desenvolvidas



Fonte: Autoria própria

a) Dados iniciais

Para o dimensionamento das vigas de concreto armado bi apoiadas de seção retangular por meio do *software* elaborado, é necessário definir alguns parâmetros iniciais:

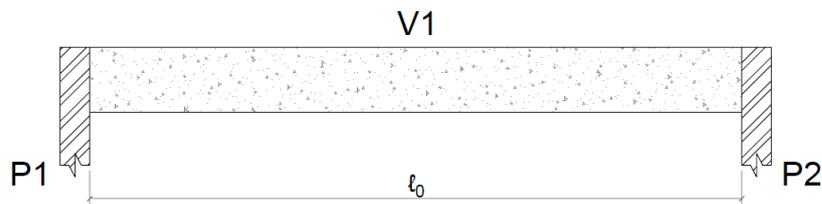
- Classe de Resistência Característica do Concreto (f_{ck});
- Classe de Resistência Característica do Aço (f_{yk});
- Vão Efetivo da Viga;
- Largura da Viga (B_w);
- Classe de agressividade ambiental de acordo com o item 6.4.2 da ABNT NBR 6118:2014;
- Momento Fletor característico do concreto (M_k);
- Força Cortante característica do concreto (V_{sk});

O *software* considera para efeitos de cálculo a vinculação dos apoios sendo simplesmente apoiado.

b) Vão efetivo

O vão livre adotado é representado por ℓ_0 , assim como demonstra a figura 6:

Figura 6 – Dimensões da viga



Fonte: Autoria própria

A determinação do vão efetivo, ocorre de acordo com a equação 18, presente no item 16.6.2.4 da ABNT NBR 6118:2014:

$$l_{ef} = l_0 + a_1 + a_2 \quad (18)$$

$$\text{Com } a_1 \leq \begin{cases} t_1/2 \\ 0,3 \cdot h \end{cases} \text{ e } a_2 \leq \begin{cases} t_2/2 \\ 0,3 \cdot h \end{cases}$$

Em que:

- t_1 e t_2 – dimensão do apoio da viga;
- h – altura da viga;

c) Pré-dimensionamento

A viga não deve apresentar largura inferior a 12 cm, porém, em casos excepcionais, essa limitação pode ser reduzida até 10 cm, respeitando as condições exigidas pelo item 13.2.2 da ABNT NBR 6118:2014

Respeitando a arquitetura do projeto, aconselha-se adotar a largura da viga, de modo que a fique embutida nas faces da parede. A altura pré-dimensionada da viga é obtida através de uma estimativa grosseira, fornecida pelas equações:

$$h_{est} = \frac{\ell_0}{12}: \text{ No caso de tramos internos;} \quad (18)$$

$$h_{est} = \frac{\ell_0}{10}: \text{ Em casos de tramos externos e vigas bi apoiadas;} \quad (19)$$

$$h_{est} = \frac{\ell_0}{5}: \text{ Em casos de vigas em balanço.} \quad (20)$$

d) Cálculos das ações atuantes na viga

De modo geral, as ações que atuam sobre a viga são: cargas permanentes, abrangendo o peso próprio da estrutura, cargas provenientes da laje, peso das paredes superiores e carga variável, na qual considera-se o carregamento acidental de acordo com o tipo de edificação em concordância com a ABNT NBR 6120:2019.

e) Momento fletor

O cálculo dos momentos fletores atuantes na estrutura são obtidos através de *softwares* de cálculo ou de forma manual. Dessa forma, a fim de efetuar o dimensionamento, o valor do momento fletor já obtido é inserido no *software* desenvolvido, que por sua vez realiza a majoração dos esforços e efetua o dimensionamento da viga.

f) Cisalhamento

Em uma determinada seção transversal, a resistência do elemento estrutural deve ser considerada satisfatória, quando a força cortante solicitante de cálculo (V_{Sd}) é menor ou igual à força cortante relacionada à ruína das bielas comprimidas de concreto (V_{Rd2}), de acordo com as equações 21 e 22 referentes ao modelo de cálculo 1:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd2} \quad (21)$$

$$V_{Rd2} = 0,27 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \quad (22)$$

Em que:

- V_{sd} – força cortante solicitante de cálculo;
- V_{Rd2} – força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína das bielas comprimidas de concreto;
- $\alpha_{v2} = \frac{(1-f_{ck})}{250}$ sendo f_{ck} expresso em megapascal (MPa);
- f_{cd} – resistência de cálculo à compressão do concreto;
- b_w – largura da alma da viga;
- d – altura útil da viga;

g) Cálculo das armaduras longitudinais

Para o dimensionamento das vigas, o cálculo da armadura longitudinal é realizado através das equações de equilíbrio, relacionando a força resistente do concreto (R_c) com a força resistente dos aços (R'_s e R_s), possibilitando o cálculo da área de aço para vigas que necessitem de armadura simples e armadura dupla.

O dimensionamento da armadura longitudinal é obtido de acordo com as equações de equilíbrio 23 e 24 para concretos de classe C20 à C50:

$$R_c + R'_s - R_s = 0,68 \cdot b \cdot d \cdot \beta_x \cdot f_{cd} + A'_s \cdot \sigma'_s - A_s \cdot \sigma_s = 0 \quad (23)$$

$$M_d = 0,68 \cdot b \cdot d^2 \cdot \beta_x \cdot f_{cd} \cdot (1 - 0,4 \cdot \beta_x) + A'_s \cdot \sigma'_s \cdot (d - d') \quad (24)$$

Para concretos de classe C55 à C90, utiliza-se as equações 25 e 26:

$$b \cdot d \cdot \beta_x \cdot f_{cd} \cdot \alpha_c \cdot \lambda + A'_s \sigma'_s - A_s \sigma_s = 0 \quad (25)$$

$$M_d = b \cdot d^2 \cdot \beta_x \cdot f_{cd} \cdot \lambda \cdot \alpha_c \cdot (1 - \frac{\lambda}{2} \cdot \beta_x) + A'_s \cdot \sigma'_s \cdot (d - d') \quad (26)$$

Em que:

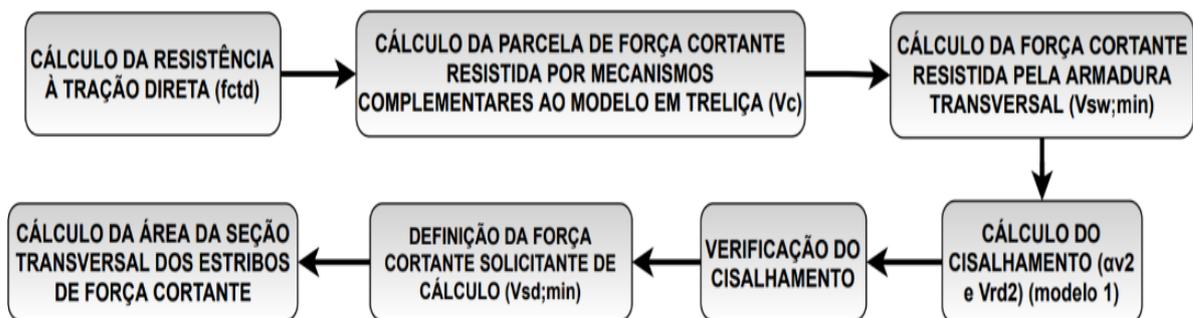
- R_c – força resistente do concreto;
- R_s – força resistente da armadura tracionada;
- R'_s – força resistente da armadura comprimida;
- b – largura da alma da viga;

- d – altura útil da viga;
- β_x – relação entre a posição da linha neutra e altura útil da viga;
- f_{cd} – resistência de cálculo à compressão do concreto;
- λ – relação entre a profundidade y do diagrama retangular e a profundidade efetiva X da linha neutra, de acordo com o item 2.3.2 do texto;
- α_c – parâmetro de redução da resistência do concreto na compressão, de acordo com o item 2.1.1 do texto;
- A'_s e A_s – área de aço na zona comprimida e tracionada respectivamente;
- σ'_s e σ_s – tensão normal do aço na armadura comprimida e tracionada respectivamente;
- M_d – momento fletor de cálculo;

h) Cálculo das armaduras transversais

Para o dimensionamento da armadura transversal (estribos), o cálculo deve ser realizado de acordo com o fluxograma ilustrado na figura 8:

FIGURA 8 – Definição de armadura transversal



Fonte: Autoria própria

Após desenvolvido o *software* estima-se uma redução no tempo para realizar o dimensionamento das vigas de concreto armado, possibilitando realizar inúmeros dimensionamentos em menor tempo.

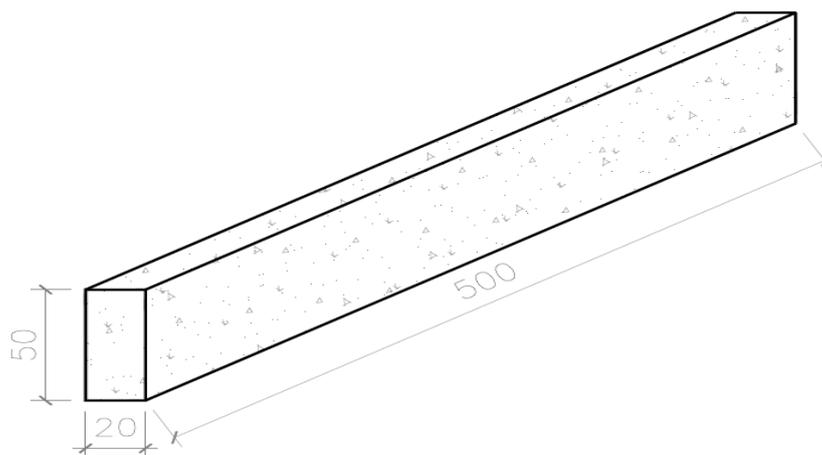
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste t3pico, apresenta-se os resultados obtidos com o desenvolvimento do *software* e a discuss3o da an3lise entre a resultante da 3rea de a3o longitudinal e transversal, em rela33o a varia33o de momento fletor e for3a cortante, respectivamente.

4.1 RELA33O ENTRE MOMENTO FLETOR E 3REA DE A3O LONGITUDINAL

Visando encontrar a 3rea de a3o total, adota-se uma viga padr3o como exemplo, ilustrada na figura 9, com v3o de 5,0 metros e largura de 20cm. A escolha desses par3metros 3 justificada j3 que se trata de um comprimento de viga bastante usual em resid4ncias. Essa viga foi submetida a diferentes valores de momentos fletores. A altura da viga 3 obtida atrav3s do pr3-dimensionamento realizado pelo *software* de forma a ter 50cm.

FIGURA 9 – Viga modelo utilizada no dimensionamento



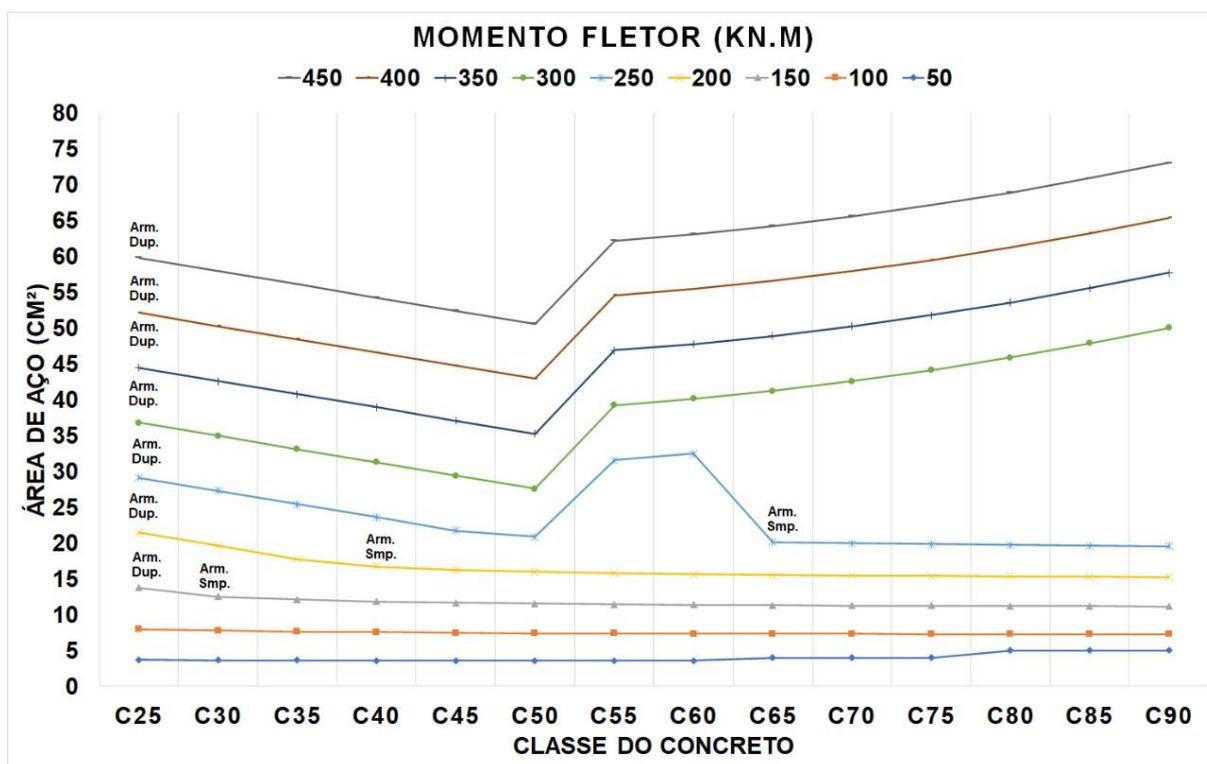
Fonte: Autoria pr3pria

Para os dimensionamentos realizados, define-se o a3o como CA-50, e a varia33o de momento fletor a cada 50 kN.m. Os valores da 3rea de a3o adotada para a elabora33o do gr3fico, consistem na rela33o da maior 3rea entre a armadura m3nima e armadura calculada. J3 nos casos de armadura dupla, os pontos est3o destacados no gr3fico e consistem na soma entre armadura longitudinal tracionada e armadura longitudinal comprimida.

Todas as classes de concretos contempladas pela ABNT NBR 6118:2014 foram analisadas. Insere-se os dados iniciais descritos no item 3 no *software*, e os

resultados do dimensionamento, como a área de aço em cm^2 , foram organizados no gráfico presente na figura 10.

FIGURA 10 – Classe de concreto x Área de aço x Momento Fletor



Fonte: Autoria própria

Nota-se que ocorre uma variação da área de aço em relação ao aumento gradativo do momento fletor, de modo que, conforme a classe de resistência do concreto aumenta, é possível diminuir a área de aço para o mesmo momento fletor no qual a viga é submetida. Porém, tal comportamento somente ocorre para momentos fletores relativamente baixos e para concretos de classe C25 à C50.

Para concretos de classes entre C55 a C90, a partir do momento que torna-se necessário a utilização de armadura dupla, mesmo com o aumento da classe de resistência, a área de aço adota um comportamento inesperado e passa a aumentar, como ocorrido a partir da análise do momento fletor de 250kN.m.

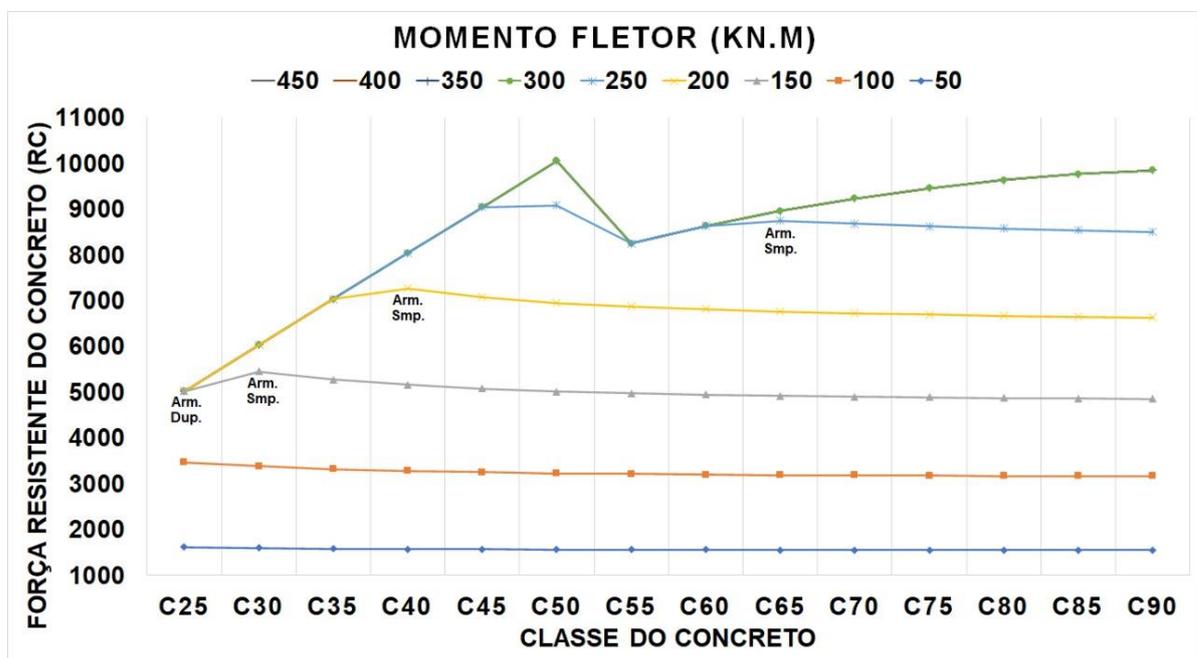
Entende-se que para os casos em que se faz necessário o uso de armadura simples, o valor de R_c (definido no item 3 deste texto) diminui conforme o aumento da classe do concreto. Entretanto, nos casos em que o momento fletor atuante na estrutura tem valor elevado, o valor de R_c passa a aumentar conforme ocorre o aumento da classe de concreto, acarretando armadura dupla, podendo voltar a

diminuir se, no decorrer do dimensionamento, utilizar-se armadura simples novamente.

Esse comportamento é explicado através do conceito de linha neutra, já que, para pequenos carregamentos, a linha neutra está próxima da parte superior da seção, acarretando menor compressão e maior tração (gerando menor influência do concreto na seção). Já no caso em que há elevado momento fletor, a linha neutra se aproxima da parte inferior da seção, acarretando maior área comprimida da peça, gerando, assim, maior contribuição da força resistiva do concreto.

Conseqüentemente, com o aumento da força resistiva do concreto, com base nas equações de equilíbrio, é necessária uma área de aço longitudinal cada vez maior. Os dados referentes a esse comportamento estão presentes no gráfico da figura 11, no qual, ainda é possível perceber que, nos casos dos momentos fletores de valores entre 300kN.m à 450kN.m, as linhas ficaram sobrepostas, representando um mesmo comportamento para esses esforços.

FIGURA 11 – Força resistente do concreto x Classe do concreto x Momento Fletor



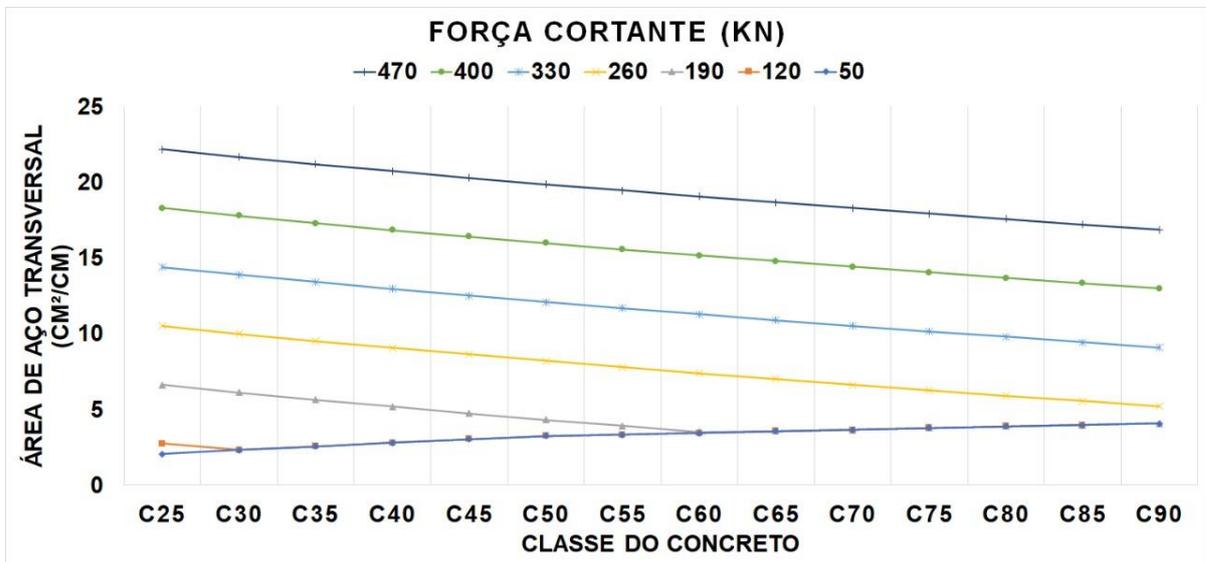
Fonte: Autoria própria

4.2 RELAÇÃO ENTRE FORÇA CORTANTE E ÁREA DE AÇO TRANSVERSAL

Para o dimensionamento da área de aço transversal, define-se o aço como CA-50, e varia-se o valor da força cortante a cada 70kN para a mesma viga adotada na

figura 9. Os resultados obtidos com o dimensionamento foram organizados no gráfico presente na figura 12.

FIGURA 12 – Classe de concreto x Área de aço x Força Cortante



Fonte: Autoria própria

Neste caso, nota-se uma linearidade dos valores de área de aço quando a viga é submetida a uma força cortante mais elevada, seguindo a lógica esperada de que, conforme a classe do concreto aumenta, é possível adotar valores de armaduras menores para uma variação maior de esforços solicitantes. Ou seja, para elevados valores de força cortante, quanto maior a classe do concreto, menor a área de aço. Porém, nos casos em que apresenta-se um valor menor de força cortante, a área de aço transversal sofre um leve aumento, não correspondendo com o comportamento esperado.

Esse comportamento é explicado devido à variação da taxa mínima de armadura, uma vez que, conforme a classe do concreto aumenta, o valor da taxa mínima de armadura também aumenta, e conseqüentemente, é necessária uma área transversal cada vez maior.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apresenta-se um comportamento inesperado quando se analisa a área de aço longitudinal nas vigas submetidas a elevados momentos flettores dimensionadas com concretos de alta resistência. De acordo com o gráfico apresentado na figura 10, quando uma viga é submetida à baixos valores de momentos flettores e não se faz

necessário o uso de armadura dupla, a área de aço diminui, conforme ocorre o aumento da classe do concreto. Com isso, conclui-se que para vigas de concreto armado submetidas a baixos valores de momentos fletores, o concreto de alta resistência se mostrou levemente eficiente na diminuição da área de aço utilizada.

Como exemplo, cita-se o caso da viga presente na figura 9, submetida ao valor de momento fletor de 105kN com concreto C90, em que houve uma diminuição de 9,43% (de 8,47 cm² para 7,67 cm²) da área de aço em relação a mesma viga, com os mesmos carregamentos, porém de concreto C25.

Entretanto, de acordo com a figura 10, nos casos das vigas submetidas à altos valores de momentos fletores, dimensionadas com concretos de alta resistência, em que se faz necessário a utilização de armadura dupla, devido ao aumento da linha neutra, a área de aço efetiva sofre um aumento brusco e inesperado no valor. Dessa forma, entende-se que nos casos de vigas altamente carregadas, não é benéfico a utilização de concretos de alta resistência, uma vez que o mesmo demanda uma maior área de aço no dimensionamento das vigas quando comparado a concretos convencionais.

Como parâmetro de análise, tem-se a viga presente na figura 10, submetida ao valor de momento fletor de 315kN dimensionada com concreto C90, em que houve um aumento de 33,92% (de 39,09 cm² para 52,35 cm²) da área de aço em relação a mesma viga, submetida aos mesmos carregamentos, porém dimensionada com concreto C25.

Para os casos da armadura transversal, nota-se que, nos casos em que a força cortante é baixa, a área de aço transversal sofre um acréscimo, conforme aumenta-se a classe do concreto.

Como exemplo cita-se o caso da viga presente na figura 9, submetida ao valor de força cortante de 70kN dimensionada com concreto C90, em que houve um aumento de 97,08% (de 2,06 cm²/cm para 4,06 cm²/cm) da área de aço em relação a mesma viga, submetida aos mesmos esforços, porém dimensionada com concreto C25.

Em contrapartida, para vigas submetidas à valores de força cortante elevados, nota-se uma linearidade no gráfico presente na figura 12, de modo que, conforme a classe do concreto aumenta, ocorre uma diminuição na área de aço transversal. Dessa forma, para vigas de concreto armado submetida a altos valores de força

cortante, o uso de concretos de alta resistência se mostrou eficiente na diminuição da área de aço transversal.

Como parâmetro de análise, tem-se a viga presente na figura 9, submetida ao valor de força cortante de 280kN dimensionada com concreto C90, em que houve uma diminuição de 45,65% (de 11,62 cm²/cm para 6,31 cm²/cm) da área de aço em relação a mesma viga, submetida aos mesmos esforços, porém dimensionada com concreto C25.

De modo geral, quando uma viga de concreto armado bi apoiada é submetida a altos valores de momentos fletores, conseqüentemente também estará submetida a valores elevados de força cortante. Dessa forma, em um dimensionamento que segue esses parâmetros de carregamentos, e que utiliza-se concreto de alta resistência, a área de aço longitudinal será maior quando comparada ao dimensionamento com concretos convencionais, enquanto a área de aço transversal será menor. Tendo em conta que, a área de aço longitudinal representa um valor mais significativo, quando se trata de quantidade de aço, a utilização de concretos de alta resistência não é o caminho mais viável para diminuir a área de aço no dimensionamento das vigas.

Levando em consideração o custo mais elevado do concreto de alta resistência, evidentemente a alteração na classe do concreto pode não ser o caminho mais viável para diminuir o gasto com aço no dimensionamento das vigas, fazendo necessário, outros estudos, como, uma análise de custos para viabilizar a implantação de concretos de alta resistência no dimensionamento das vigas.

REFEFÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto** — Procedimento. 2014.

CALLISTER, JR., WILLIAM D., **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução** Rio de Janeiro, LTC, 2012.

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo ABNT NBR 6118:2014**. 4. ed. São Carlos: Edufscar, 2014.

FERRAZ, Henrique. **O Aço na Construção Civil**. 2005. 16 f. TCC (Graduação) - Curso de Arquitetura, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

GIONGO, José Samuel. **Concreto armado: projeto estrutural de edifícios**. 2007. 184 f. Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlo, São Carlos, 2007.

IBRACON. Ouro Preto: Scielo, v. 12, n. 6, 2019. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S198341952019000601428&script=sci_arttext&tlng=pt. Acesso em: 05 abr. 2021.

KIMURA, Alio Ernesto. **Informática aplicada em estruturas de concreto armado: cálculo de edifícios com o uso de sistemas computacionais**. São Paulo: Pini, 2007.

LIMA, T. S.; NETO, G. F.; ARAÚJO JÚNIOR, L. O. **Análise comparativa do uso do software proprietário versus software livre nos cursos de graduação em engenharia**. Anais XLI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia. Gramado: Associação Brasileira de Educação de Engenharia, 2013.

PINHEIRO, Libânio M.; MUZARDO, Cassiane D.; SANTOS, Sandro P.. **FUNDAMENTOS DO CONCRETO E PROJETO DE EDIFÍCIOS**: Vigas. 2003. 282 f. Curso de Engenharia Civil, Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2003. Cap. 15.

PINHEIRO, Libânio M.; MUZARDO, Cassiane D.; SANTOS, Sandro P.. **ESTRUTURAS DE CONCRETO**. 2004. 380 f. Curso de Engenharia Civil, Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004. Cap. 1.

PINTO, Vinicius Slompo. **Dimensionamento de pilares de concreto com seção transversal retangular usando envoltórias de momentos**. 2017. 314 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2017.

SOUZA, Flávia Ribeiro; MARTINS, Samuel Lima; MONNERAT, Lúcia Patrícia. **O uso do software Revit na Construção Civil**. ANAIS SIMPAC, v. 8, n. 1, 2016.

MEZZOMO, Mateus Henrique; MORAES, Amauri Gomes de. **Determinação do módulo de elasticidade em aço e alumínio através da frequência natural comparado ao ensaio de tração**. Matéria (Rio de Janeiro), [S.L.], v. 25, n. 2, p. 1-13, jan. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200002.1035>.