UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VIII
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

JEOVÁ DE SOUTO MATIAS OLIVEIRA

OTIMIZAÇÃO DO CUSTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM A FERRAMENTA *SOLVER* DO MICROSOFT EXCEL

ARARUNA/PB
2017

JEOVÁ DE SOUTO MATIAS OLIVEIRA

OTIMIZAÇÃO DO CUSTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM A FERRAMENTA *SOLVER* DO MICROSOFT EXCEL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Prof. Marinaldo dos Santos Junior.

ARARUNA/PB
2017

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

O48o Oliveira, Jeová de Souto Matias.
Otimização do custo de vigas de concreto armado com a ferramenta solver do microsoft excel [manuscrito] : / Jeová de Souto Matias Oliveira. - 2017.
89 p. : il. colorido.

Digitado.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, 2017.
"Orientação : Prof. Esp. Marinaldo dos Santos Júnior, Coordenação do Curso de Engenharia Civil - CCTS."

1. Microsoft Excel. 2. Softwares de Otimização. 3. Ferramenta Solver. 4. Altura Ótima.

21. ed. CDD 624.183 41

JEOVÁ DE SOUTO MATIAS OLIVEIRA

OTIMIZAÇÃO DO CUSTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM A FERRAMENTA *SOLVER* DO MICROSOFT EXCEL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estrutura.

Aprovado em: 07 / 12 / 2017

BANCA EXAMINADORA

Marinaldo dos Santos Júnior
Prof. Marinaldo dos Santos Júnior (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Pedro Filipe de Luna Cunha
Prof. Me Pedro Filipe de Luna Cunha
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Leonardo Medeiros da Costa
Prof. Me Leonardo Medeiros da Costa
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Dedico este trabalho a toda minha família, em especial a minha mãe Delaide, meu pai Graciliano, minhas irmãs Julye e Juany e a minha tia Antônia Lúcia e como sempre a Deus que sempre esteve ao meu lado me guiando durante toda minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado discernimento e força, para superar todas as dificuldades e pelo seu amor condicional.

Ao corpo docente, da universidade, que ao decorrer desse percurso formaram meus princípios éticos e morais, além do meu conhecimento adquirido sobre a área que escolhi vivenciar por minha vida.

Ao meu orientador, o professor Marinaldo dos Santos Junior, pelo incentivo desse trabalho e por sua disponibilidade em correções, para o mesmo.

Aos meus pais Delaide Cordeiro de Souto Oliveira e Graciliano Matias de Oliveira, por todo incentivo no decorrer de todo esse ciclo, pelo amor dado constantemente e apoio incondicional.

As minhas irmãs, Julye de Souto Matias Oliveira e Juany de Souto Matias Oliveira, por acreditarem em meu potencial e estarem comigo, em todos os momentos ao decorrer desses cinco anos.

Aos meus familiares avos, primos, tios e em especial a minha segunda mãe, que me deu todo o amor, carinho e afeto ao decorrer de toda minha vida Antônia Lúcia Matias de Oliveira.

A todos os meus amigos, que estiveram junto comigo nesta caminhada, durante os bons e maus momentos, muito obrigado pela amizade fiel e verdadeira, que vou levar por toda minha via.

“Temos o destino que merecemos. O nosso destino está de acordo com os nossos méritos.” (Albert Einstein).

RESUMO

Ao longo do tempo o homem vem executando diversos tipos de obras, visando o crescimento e bem estar da sociedade. Com o avanço de novas pesquisas e o desenvolvimento da tecnologia, existe cada vez mais a necessidade de construir estruturas com maior custo benefício, que tragam conforto e segurança. E um dos métodos que pode ser utilizado para encontrar o equilíbrio entre os requisitos normativos e trazer um melhor custo benefício é o emprego dos softwares de otimização. Dessa forma o objetivo deste trabalho é realizar o dimensionamento de vigas de concreto armado utilizando o Software Microsoft Excel, para diferentes tipos de carregamento, comprimentos de vãos teóricos, classes de agressividade ambiental e tipos de concreto. Junto ao dimensionamento fez-se o cálculo do custo total da estrutura, levando em consideração o preço referente à forma, ao aço e ao concreto. Com a finalidade de que através do emprego da ferramenta de otimização sugerida, fosse verificada a altura ótima de dimensionamento e analisadas as características da estrutura com tal definição. Foi verificado que a altura de pré-projeto igual a 10% do vão teórico, a qual é sugerida por alguns autores, encaixou-se nos dados encontrados. Quanto a variação da classe de agressividade ambiental, foi analisado que não acarretava em mudanças significativas no preço ótimo da viga. Como já era esperado o aumento do carregamento sobre a estrutura trouxe acréscimo no preço ótimo. O aumento da resistência característica a compressão do concreto nem sempre trouxe um acréscimo no preço, onde também foi observada uma tendência especialmente em vigas de grandes vãos e submetidas a maiores carregamentos de diminuírem o preço com o aumento da classe do concreto. Quanto as características das estruturas com altura ótima, como as armaduras escolhidas pelo programa bem como a altura útil, a sua análise teve como objetivo trazer uma base de dados para nortear futuros dimensionamentos.

Palavras-Chave: Microsoft Excel. Softwares de Otimização. Ferramenta Solver. Altura Ótima.

ABSTRACT

Over time, man has performed various types of constructions, aiming at the growth and well-being of society. With the advancement of new researches and the development of technology, there is a growing need to build cost effective structures that provide comfort and security. And one of the methods that can be used for find out the balance between the regulatory requirements and bring a better cost-benefit is the use of the optimization softwares. In this way, the purpose of this search is made the sizing of the beams, made of reinforced concrete, using the software microsoft excel, for different loading types, lengths of theoretical gaps, environmental aggressiveness classes and concrete types. Besides the sizing it was made the calculation of the total cost of the structure, considering the regarding price for the form, steel and concrete. So that using the tool *Solver* of the program itself was verified the optimum height of the design and analyzed the characteristics of the structure with such definition. It was verified that the pre-project height equal to 10% of the theoretical gap, which is suggested by some authors, was fitted to the data found. About the variation of the environmental aggressiveness class, it was analyze that did not cause significant changes in the optimal price of the beam. As expected the increase of the loading on the structure brought an increase in the optimal price. The growth in the compressive strenght of the concrete didn't always produced an increase in the cost, where a tendency was also observed especially in beams of larger spans and exposed to greater loads to decrease their price with the increase of the concrete class. About the characteristics of the structures with optimum height, such as armors chosen by the program as well as the useful height, their analysis had the objective to bring a database to guide in futures sizing.

Keywords: Microsoft Excel. Optimization Software. Solver tool. Optimal height.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma representativo do processo de otimização.....21
Figura 2 – Configuração da armadura da viga. 24
Figura 3 – Trajetória das tensões principais de tração e de compressão da viga.....25
Figura 4 – Trajetória das tensões principais.....26
Figura 5 – Comprimento efetivo de cálculo dos vãos. 35
Figura 6 – Modelo de cálculo para as vigas em estudo. 36
Figura 7 – Modelo de cálculo da seção das vigas em estudo. 37
Figura 8 – Diagrama possível dos domínios de deformações. 38
Figura 9 – Espaçamentos livres entre as faces das barras de aço. 45
Figura 10 – Modelo de cálculo para escalonamento das vigas. 54
Figura 11 – Representação das armaduras presentes nas vigas em estudo. 54
Figura 12 – Gráfico Preço x Carregamento para vigas com C-25. 69
Figura 13 – Gráfico Preço x Carregamento para vigas com C-30. 69
Figura 14 – Gráfico Preço x Carregamento para vigas com C-40. 70

LISTA DE GUADROS

Quadro 1 – Informações iniciais do exemplo proposto.....23
Quadro 2 – Resultados conseguidos com a utilização do *Solver* para o exemplo proposto.....23
Quadro 3 – Variáveis de projeto.....28
Quadro 4 – Classes de agressividade ambiental (CAA).....33
Quadro 5 – Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto.....33
Quadro 6 – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para DC =10mm.....34
Quadro 7 – Preços dos tipos de concreto.....55
Quadro 8 – Preços das bitolas de aço.....55
Quadro 9 – Massa nominal por metro quadrado das armaduras.....56
Quadro 10 - Resultados obtidos para as vigas de 2m com C-25.....57
Quadro 11 - Resultados obtidos para as vigas de 2m com C-30.....58
Quadro 12 - Resultados obtidos para as vigas de 2m com C-40.....58
Quadro 13 - Resultados obtidos para as vigas de 3m com C-25.....59
Quadro 14 - Resultados obtidos para as vigas de 3m com C-30.....59
Quadro 15 - Resultados obtidos para as vigas de 3m com C-40.....60
Quadro 16 - Resultados obtidos para as vigas de 4m com C-25.....60
Quadro 17 - Resultados obtidos para as vigas de 4m com C-30.....61
Quadro 18 - Resultados obtidos para as vigas de 4m com C-40.....61
Quadro 19 - Resultados obtidos para as vigas de 5m com C-25.....62
Quadro 20 - Resultados obtidos para as vigas de 5m com C-30.....62
Quadro 21 - Resultados obtidos para as vigas de 5m com C-40.....63
Quadro 22 – Relação altura / vão.....64
Quadro 23 – Variação do preço referente a mudança da classe de agressividade ambiental...65
Quadro 24 – Resultados referentes à mudança da carga para vigas.....67
Quadro 25 – Resultados referentes à mudança da classe de concreto nas vigas.....71
Quadro 26 – Variação percentual verificada entre o maior e o menor preço resultante para cada tipo de carregamento e vão teórico.....73
Quadro 27 – Variáveis de projeto.....74
Quadro 28 – Variação da altura útil em relação a mínima para vigas de vãos de 2 m.....75

Quadro 29 – Variação da altura útil em relação a mínima para vigas de vãos de 3 m.....75
Quadro 30 – Variação da altura útil em relação a mínima para vigas de vãos de 4 m.....75
Quadro 31 – Variação da altura útil em relação a mínima para vigas de vãos de 5 m.....75
Quadro 32 – Resultados para K_V encontrados em vigas de 2 m.....76
Quadro 33 – Resultados para K_V encontrados em vigas de 3 m.....76
Quadro 34 – Resultados para K_V encontrados em vigas de 4 m.....76
Quadro 35 – Resultados para K_V encontrados em vigas de 5 m.....77
Quadro 36 – Resultados para $K_{M1\ e\ M2}$ encontrados em vigas de 2 m.....77
Quadro 37 – Resultados para K_{M3} encontrados em vigas de 2 m.....77
Quadro 38 – Resultados para $K_{M1\ e\ M2}$ encontrados em vigas de 3 m.....78
Quadro 39 – Resultados para K_{M3} encontrados em vigas de 3 m.....78
Quadro 40 – Resultados para $K_{M1\ e\ M2}$ encontrados em vigas de 4 m.....78
Quadro 41 – Resultados para K_{M3} encontrados em vigas de 4 m.....78
Quadro 42 – Resultados para $K_{M1\ e\ M2}$ encontrados em vigas de 5 m.....79
Quadro 43 – Resultados para K_{M3} encontrados em vigas de 5 m.....79
Quadro 44 – Resultados para K_{Apoio} encontrados em vigas de 2 m.....80
Quadro 45 – Resultados para K_{Apoio} encontrados em vigas de 3 m.....80
Quadro 46 – Resultados para K_{Apoio} encontrados em vigas de 4 m.....80
Quadro 47 – Resultados para K_{Apoio} encontrados em vigas de 5 m.....81
Quadro 48 – Resultados para o preço: concreto, aço e forma em vigas de vãos de 2 m.....81
Quadro 49 – Resultados para o preço: concreto, aço e forma em vigas de vãos de 3 m.....82
Quadro 50 – Resultados para o preço: concreto, aço e forma em vigas de vãos de 4 m.....82
Quadro 51 – Resultados para o preço: concreto, aço e forma em vigas de vãos de 5 m.....82

LISTA DE ABREVATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CA	Concreto Armado
CAA	Classe De Agressividade Ambiental
CEB	Comité Euro-International du Béton
ECP	Engenheiros Capacitados e Produtivos
ELU	Estado Limite Último
NBR	Norma Brasileira Registrada

LISTA DE SÍMBOLOS

K_V	Posição em ordem crescente da armadura de aço que possui área imediatamente maior, mais próxima a necessária para o estribo referente aos vãos
$K_{M1\ e\ M2}$	Posição em ordem crescente da armadura de aço que possui área imediatamente maior, mais próxima a necessária para os momentos positivos no primeiro e segundo vão
K_{M3}	Posição em ordem crescente da armadura de aço que possui área imediatamente maior, mais próxima a necessária para o momento negativo no apoio intermediário
d'_1	Altura inicial suposta para a diferença entre a altura útil e total da viga, para a armadura referente ao momento negativo nos vãos
d'_3	Altura inicial suposta para a diferença entre a altura útil e total da viga, para a armadura referente ao momento positivo no apoio intermediário
$K_{Apoio\ 1}$	Posição em ordem crescente da armadura de aço que possui área imediatamente maior, mais próxima a necessária para o momento negativo no apoio 1
$K_{Apoio\ 2}$	Posição em ordem crescente da armadura de aço que possui área imediatamente maior, mais próxima a necessária para o momento negativo no apoio 2
C_t	Custo total da viga
C_{forma}	Custo referente à forma de madeira.
$C_{aço}$	Custo referente ao aço utilizado.
$C_{concreto}$	Custo referente ao concreto utilizado.
L_1	Comprimento do primeiro vão
L_2	Comprimento do segundo vão
h	Altura da viga
b	Base da viga
$C_{unit,forma}$	Custo unitário da forma de madeira por m²
$C_{unit,concreto}$	Custo unitário do concreto utilizado por m³
α_c	Coeficiente de dilatação térmica do concreto
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto

f_{ctm}	Resistência média a tração do concreto
f_{yk}	Resistência característica de escoamento do aço
α_a	Coeficiente de dilatação térmica do aço
l_0	Comprimento entre os pilares
$L_{ef,1}$	Vão teórico 1
$L_{ef,2}$	Vão teórico 2
E	Módulo de elasticidade
I	Momento de inércia
d'	Valor a ser considerado pelo programa, para realizar o cálculo da altura útil, que depende da quantidade de barras na seção e da sua configuração
x	Posição da linha neutra
d	Altura útil da viga
f_{cd}	Resistência de cálculo do concreto à compressão
m_d	Momento de cálculo.
A_s	Armadura de aço necessária longitudinal
$f_{y\omega d}$	Resistência de dimensionamento do aço ao escoamento
$As_{,mín}$	Armadura máxima longitudinal
$As_{,max}$	Armadura mínima longitudinal
b_ω	Largura da seção retangular
A_c	Multiplicação da altura pela largura da seção retangular
V_{sk}	Maior esforço cortante do vão.
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto
V_c	Esforço cortante resistido pelo concreto
$\frac{A_{s\omega}}{S}$	Armadura de aço necessária transversal
V_{Rd2}	Esforço cortante limite
$A_{s\omega,mín}$	Armadura mínima transversal
$Ah_{mín}$	Espaçamento livre horizontal mínimo entre as faces de duas barras da mesma camada
$Av_{mín}$	Espaçamento livre vertical mínimo entre as faces de duas barras de camadas adjacentes
$d_{máx,agr}$	Dimensão máxima característica do agregado graúdo utilizado no concreto
$\emptyset_l$	Diâmetro da barra, do feixe ou da luva

$\emptyset_{est}$	Diâmetro do estribo
$S_{max,ramos}$	Espaçamento máximo entre ramos verticais dos estribos
$S_{max,estri}$	Espaçamento máximo entre estribos
$lb_{,nec}$	Comprimento necessário para ancoragem
$As_{,cal}$	Área de aço necessária longitudinal
As_e	Área de aço da sessão longitudinal escolhida
$lb_{mín}$	Comprimento de ancoragem mínimo
As_{apoio}	Armadura de aço necessária no apoio da viga
V_k	Esforço cortante no apoio da viga.
$lb_{nec,gancho}$	Comprimento necessário para ancoragem com gancho
$lb_{nec,reto}$	Comprimento necessário para ancoragem reta
V_d	Esforço cortante de cálculo
ψ_3	Coeficiente determinado pelo tipo de esforço, no caso do problema ocorre flexão simples, assim ele fica igual a 0,09
C_{nom}	Cobrimento nominal
ΔC	Parâmetro acrescentado ao comprimento referente a dobra do estribo, determinado pela tabela A3.7-VOL 2 do livro José Milton de Araújo (2010)
l	Comprimento verificado entre o pilar de extremidade e o pilar central
S_e	Espaçamento dos estribos encontrado com o seu dimensionamento
As_{apoio}	Armadura de aço necessária no apoio da viga
l_b	Comprimento de ancoragem necessário
Q_e	Quantidade de estribos
$L_{ef,1}$	Comprimento efetivo do primeiro vão
$L_{ef,2}$	Comprimento efetivo do segundo vão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 18

2. OBJETIVO GERAL 19

2.1. OBJETIVO ESPECÍFICO 19

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 20

3.1. OTIMIZAÇÃO 20

3.1.1. Técnicas de otimização 21

3.2. FERRAMENTA SOLVER DO MICROSOFT EXCEL 22

3.3. VIGAS DE CONCRETO ARMADO 23

3.3.1. Conceitos gerais 23

3.3.2. Comportamento de vigas de concreto armado submetidas à flexão simples . 24

4. MATERIAIS E MÉTODOS 27

4.1. OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL UTILIZADA 27

4.1.1. Variáveis de projeto 27

4.1.2. Função objetivo 29

4.1.3. Restrições das variáveis 30

4.2. METODOLOGIA DE CÁLCULO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS À FLEXÃO SIMPLES 31

4.2.1. Dimensionamento 35

4.2.1.1. Momento fletor e esforço cortante 36

4.2.1.2. Dimensionamento da armadura longitudinal 37

4.2.1.2.1. Altura ótima da viga 37

4.2.1.2.2. Domínios de Deformações 38

4.2.1.2.2.1. Classificação dos Domínios 38

4.2.1.2.3. Determinação da Posição da Linha Neutra 40

4.2.1.2.4. Armadura de Flexão 41

4.2.1.2.5. Armadura Mínima e Máxima 41

4.2.1.2.6. Definição das Armaduras 42

4.2.1.3. Dimensionamento das Armaduras Transversais 42
4.2.1.3.1. Verificação de Compressão nas Bielas 42
4.2.1.3.2. Cálculo da Armadura Transversal (Estribo) 43
4.2.1.3.3. Cálculo da Armadura Mínima (Estribo) 43
4.2.1.3.4. Definição das Armaduras 44
4.2.1.4. Definições construtivas sobre as armaduras dimensionadas 44
4.2.1.4.1. Armadura longitudinal 44
4.2.1.4.1.1. Espaçamento livre entre faces das barras 44
4.2.1.4.1.2. Valor de** d **e** d′ **para seção 45
4.2.1.4.2. Armadura Transversal 45
4.2.1.4.2.1. Diâmetro do estribo 45
4.2.1.4.2.2. Espaçamento máximo entre estribos 46
4.2.1.4.2.3. Espaçamento máximo entre ramos verticais dos estribos 46
4.2.1.5. Comprimento de ancoragem nos apoios 47
4.2.1.5.1. Ancoragem reta 47
4.2.1.6. Ancoragem nos apoios de extremidade 47
4.2.1.6.1. Comprimento de ancoragem reta 48
4.2.1.6.2. Comprimento de ancoragem com gancho 48
4.2.1.7. Armadura construtiva 49
4.2.2. Detalhamento das armaduras 49
4.2.2.1. Escalonamento da armadura longitudinal 49
4.2.2.2. Detalhamento da armadura transversal 51
4.2.2.3. Detalhamento das armaduras negativas nos apoios 52
4.2.2.4. Detalhamento da armadura construtiva 53
4.3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE ESTUDO 53
4.4. CUSTO DOS MATERIAIS 54
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 57

5.1. RELAÇÃO ALTURA - VÃO TEÓRICO 63
5.2. CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL X PREÇO DA VIGA 65
5.3. CARREGAMENTO X PREÇO DA VIGA 66
5.4. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO X PREÇO DA VIGA 70
5.5. RESULTADOS REFERENTES ÀS CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS OBTIDAS PELO PROGRAMA 74
5.5.1. Análise dos dados obtidos sobre: d'1 e d'3 75
5.5.2. Análise dos dados obtidos sobre: KV 76
5.5.3. Análise dos dados obtidos sobre: KM1 e M2 e KM3 77
5.5.4. Análise dos dados obtidos sobre: K Apoio 1 e K Apoio 2 79
5.6. RESULTADOS REFERENTES AO PREÇO DO CONCRETO, AÇO E FÔRMA..... 81
6. CONCLUSÃO 84
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 86
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 87

1. INTRODUÇÃO

Deste os tempos antigos, o homem a fim de continuar o seu progresso, construiu diversas obras para o bem estar e desenvolvimento da sociedade. Sabe-se que antigamente as construções eram muito baseadas na experiência dos engenheiros, o que em alguns casos acarretava num superdimensionamento. Fazendo com que essas obras ficassem muito seguras e perpetuassem por muito tempo, por outro lado as mesmas tinham um custo elevado.

Assim, vê-se que a engenharia veio com o objetivo de encontrar o equilíbrio entre as condições de conforto e segurança com a necessidade de construir obras mais viáveis economicamente. O que é alcançado através de diversos estudos e pesquisas realizadas para os diversos campos de atuação da engenharia. Assim, pode-se dizer que a engenharia tem como objetivo melhorar o custo benefício das construções e transpassar conforto e segurança aos seus usuários.

Diante disso, ainda tem-se que o dimensionamento convencional de estruturas de concreto armado visa o detalhamento de uma armadura, a qual consiga resistir aos esforços solicitantes à estrutura e esteja de acordo com os requisitos normativos. Entretanto, existem várias disposições que satisfazem essas condições e assim várias soluções para o mesmo problema.

Este empasse resultante da necessidade de equilíbrio entre segurança e custo e da grande quantidade de soluções provenientes do dimensionamento estrutural pode ser solucionado a partir da utilização dos processos de otimização, cujo objetivo é determinar a solução ideal entre uma gama de desfechos, fundamentado na alteração de variáveis as quais possuem limitações para seus valores, a fim de obter um valor mais próximo do ideal.

Assim, este trabalho visa fazer o dimensionamento de vigas de concreto armado utilizando a ferramenta *Solver* do Microsoft Excel, para se conseguir um dimensionamento otimizado, onde sejam respeitadas as condições de segurança referentes a norma NBR 6118 (ABNT, 2014) e se obtenha um custo mínimo para os elementos dimensionados sob as condições determinadas.

2. OBJETIVO GERAL

Realizar o dimensionamento otimizado de vigas de concreto armado, para diferentes classes de agressividade, classes de resistência de concreto, carregamentos atuantes e vãos teóricos, a fim de analisar o comportamento do preço ótimo encontrado em cada uma das amostras, bem como as características das vigas dimensionadas. Utilizando a ferramenta *Solver* do Microsoft Excel, a qual realiza variações de células pré-determinadas, possuintes de valores limitados, com o objetivo de encontrar um valor, máximo, mínimo ou pré-fixado de uma célula objetivo, determinada anteriormente.

2.1. OBJETIVO ESPECÍFICO

- Análise da relação altura-vão para as vigas otimizadas;
- Estudo da variação do preço ótimo com a mudança da classe de agressividade ambiental;
- Interpretação das mudanças causadas no preço ótimo pela variação do carregamento sobre a viga;
- Investigação das alterações causadas pela variação da classe do concreto no preço ótimo encontrado;
- Encontrar características em comum nas amostras realizadas com a finalidade de nortear dimensionamentos futuros, para que se aproximem de um custo ótimo;
- Analisar as características das vigas de estudo que apresentam maior significância no custo da estrutura, a fim de determinar os pontos que exigem maior importância no dimensionamento.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. OTIMIZAÇÃO

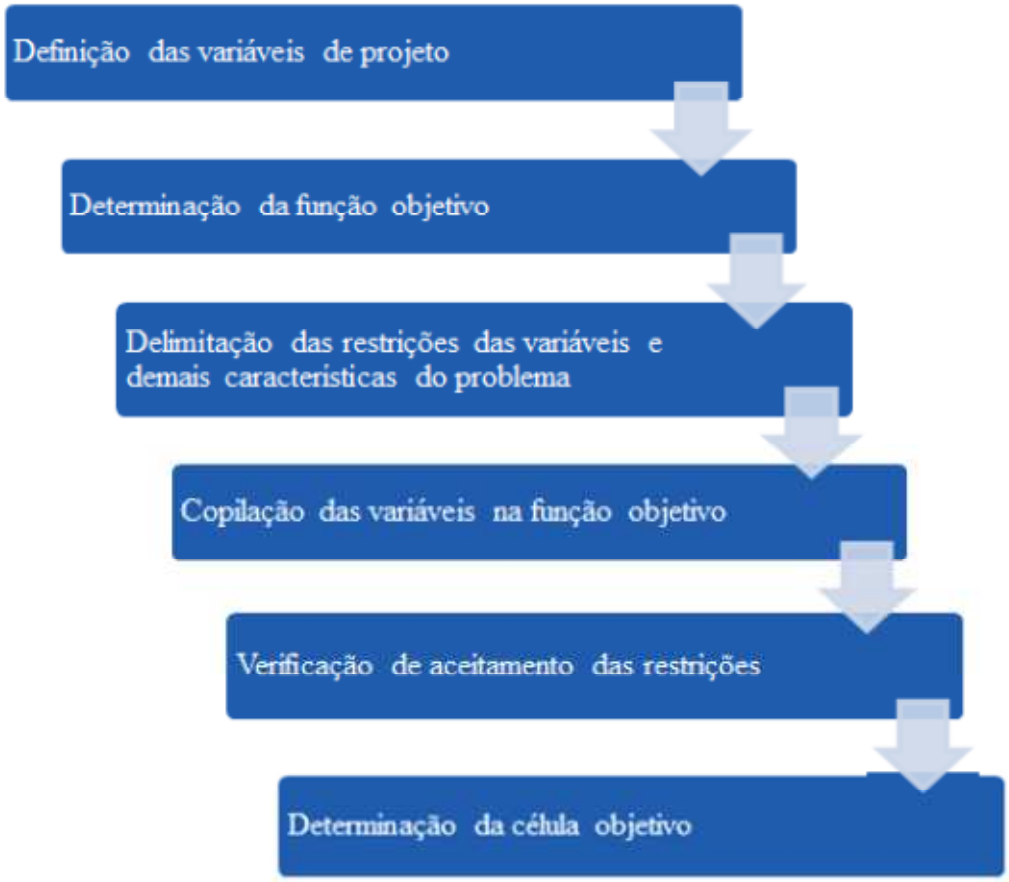
A otimização ou programação matemática, pode ser definida como uma técnica que possui o objetivo de determinar a melhor solução para problemas matemáticos, os quais por diversas ocasiões podem ser representados pela modelagem de um problema físico. Com o passar do tempo a otimização vem sendo cada vez mais estudada, por diversos ramos e entre eles temos a engenharia, como por exemplo em projetos, plantas, processo sistemáticos, escolha de equipamentos e maquinário e etc. Pelo fato de que com a sua utilização pode-se conseguir a melhor solução entre diversas disponíveis.

Um ponto a se ressaltar sobre a otimização é que em alguns dos casos a solução ótima pode não ser alcançada em um tempo viável, obtendo-se assim um resultado aproximado. O que nos deixa afirmar que a otimização não procura pelo melhor valor absoluto e sim pela melhor solução que traga um valor ideal respeitando as restrições.

O problema da otimização tem início com a determinação de variáveis e parâmetros, que definem o problema em questão. Em seguida são concluídas as restrições para essas variáveis, bem como a função objetivo que poderá ser maximizada, minimizada ou lhe ser pré-determinado um valor ideal a ser alcançado ou aproximado. O tempo limite determinado para que o valor da função objetivo possa ficar sem sofrer variações significativas, a quantidade de iterações a serem realizadas e a precisão da taxa significativa de variação da célula objetivo, representam a qualidade da solução encontrada.

Assim, quanto menor a taxa de mutação e maior o tempo ocioso e o tamanho da população melhor será o produto final encontrado. Como já sabemos, o projeto estrutural visa um equilíbrio ente a segurança e a diminuição dos custos, onde na prática a otimização vem a buscar o ponto de melhor equilíbrio entre esses termos, diante de que eles acabam se contrapondo. Sendo assim o trabalho apresentado visa conseguir uma minimização da função custo de vigas de concreto armado. Onde no fluxograma apresentado a seguir este processo é melhor apresentado.

Figura 1 - Fluxograma representativo do processo de otimização.



Fonte: autor.

3.1.1. Técnicas de otimização

Os algoritmos são componentes matemáticos de suma importância para o processo de otimização. Podem ser definidos como agregado de etapas e regras, com quantidade finita que se destinam a resolver um problema. No caso da otimização ocorrem processos iterativos para se chegar a resolução esperada, onde se é utilizado alguma ferramenta computacional moldada de forma a receber valores de entrada e reproduzir valores resposta de acordo com necessidade do problema.

O problema da programação matemática é uma técnica de otimização bem utilizada, que tem como objetivo investigar uma célula ou ponto admissível numericamente, dada a função objetivo. Este método é classificado em programação linear e não-linear.

Na programação linear tanto as restrições quanto a função objetivo são funções lineares das incógnitas de projeto, possuem simplicidade no processo de encontro da solução e não geram grande esforço matemático. A programação não-linear tem um maior grau de

complexidade, pelo fato de que as funções utilizadas são não-lineares, sendo assim os problemas que utilizam essa metodologia são divididos em irrestritos e restritos

Outra técnica é a utilização do algoritmo genérico, esse método forja o problema buscando a solução ótima baseado em técnicas de biologia evolutiva. Algumas características que o diferem dos métodos de otimização comuns são que os resultados são apresentados em forma de uma população e não de uma única solução, nele não é necessária uma correlação direta entre as variáveis e nesse processo são utilizadas alternações probabilísticas e não regras determinísticas.

Assim, vê-se que existem diversas técnicas de otimização, que utilizam algum tipo de algoritmo modelado para se chegar a solução desejada ou algum software que possua esse tipo de ferramenta nele. O que é o caso dessa pesquisa, na qual para o processo de otimização foi utilizado o Microsoft Excel, mais precisamente a ferramenta *Solver*, disponível no programa, que executa otimizações lineares e não-lineares.

3.2. FERRAMENTA *SOLVER* DO MICROSOFT EXCEL

O *Solver* é um suplemento do Microsoft Excel que pode ser utilizado para descobrir um valor ideal, podendo ele ser máximo, mínimo ou pré-determinado, de determinada célula regida por restrições, ou limites, definidos pelo usuário, pela variação de outras células em uma planilha.

A ferramenta utiliza uma amostra de células, chamadas variáveis de decisão, usadas na computação das fórmulas referentes às células objetivo e das restrições. Assim, o *Solver* define valores para as células variáveis a fim de contentar os limites e restrições estabelecidos e por fim gerar o resultado desejado para a célula objetivo.

Para melhor apresentar a ferramenta, pode-se citar o exemplo de uma determinada montadora de peças, que precisa saber a quantidade de peças “X”, “Y”, “Z” e “W”, que podem ser comprados. Diante as informações apresentadas no quadro a seguir:

Quadro 1 - Informações iniciais do exemplo proposto.

Peças	Preço (R$)	Quant. mínima	Quant. Máxima
X	4,4	25	63
Y	1,5	12	37
Z	3,5	17	29
W	2,8	6	57

Fonte: autor.

Sabendo que a montadora precisa comprar 120 peças no total e com objetivo de conseguir um gasto mínimo na compra. A utilização do *Solver*, selecionando o custo final como célula objetivo, as quantidades como células variáveis e informando as restrições. Traz os resultados expostos no seguinte quadro.

Quadro 2 - Resultados conseguidos com a utilização do *Solver*.

Peças	Quantidade	Preço (R$)	Quant. mínima	Quant. máxima	Valor final (R$)
X	25	4,4	25	63	108,75
Y	55	3,0	6	55	165,00
Z	30	3,5	10	70	105,00
W	10	2,8	6	57	27,50
Total	120				
Custo final	406,25				

Fonte: autor.

Onde verifica-se a confirmação das restrições e têm-se as quantidades de cada peça que resultaram num preço mínimo.

3.3. VIGAS DE CONCRETO ARMADO

3.3.1. Conceitos gerais

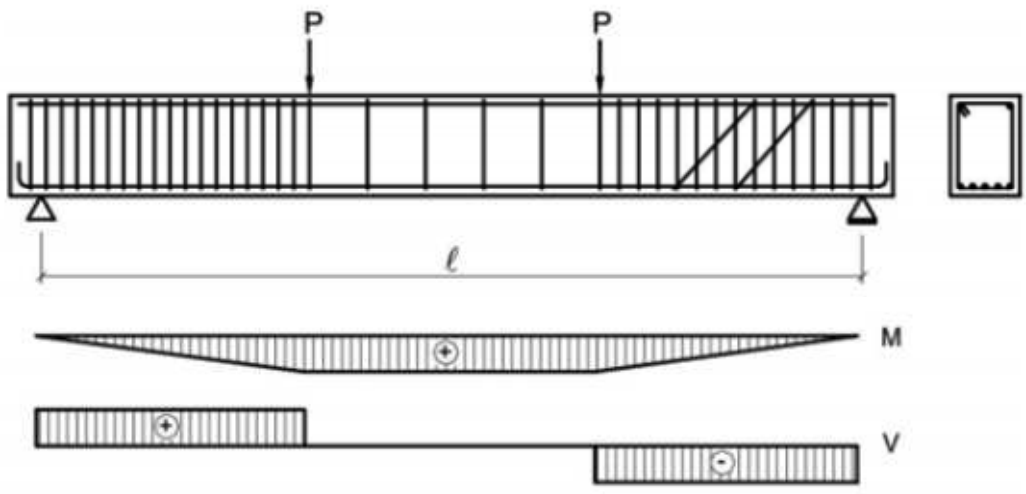
As vigas são os componentes estruturais que recebem as cargas das lajes e as transmitem para os pilares, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014, p.83) “são elementos lineares em que a flexão é preponderante”. Tendo sua classificação como barras, são normalmente retas e horizontais, destinadas a receber ações das lajes, de outras vigas, de paredes de alvenaria, eventualmente de pilares e etc.

3.3.2. Comportamento de vigas de concreto armado submetidas à flexão simples

Normalmente, vigas sujeitas a esforços de flexão simples, são submetidas a carregamentos acarretando em uma curvatura que tem intensidade influenciada pela força da carga aplicada e que ainda é responsável por gerar uma distribuição de forças no interior do elemento resultando em um momento fletor.

O professor Bastos (2005), exemplifica que ao considerar uma viga biapoiada de concreto armado submetida a duas forças concentradas P crescentes de igual intensidade. A configuração da armadura é composta por armadura longitudinal que resiste a tração oriunda da flexão e armadura transversal a qual se impõe aos esforços cortantes como vê-se na figura seguinte.

Figura 2 - Configuração da armadura da viga.

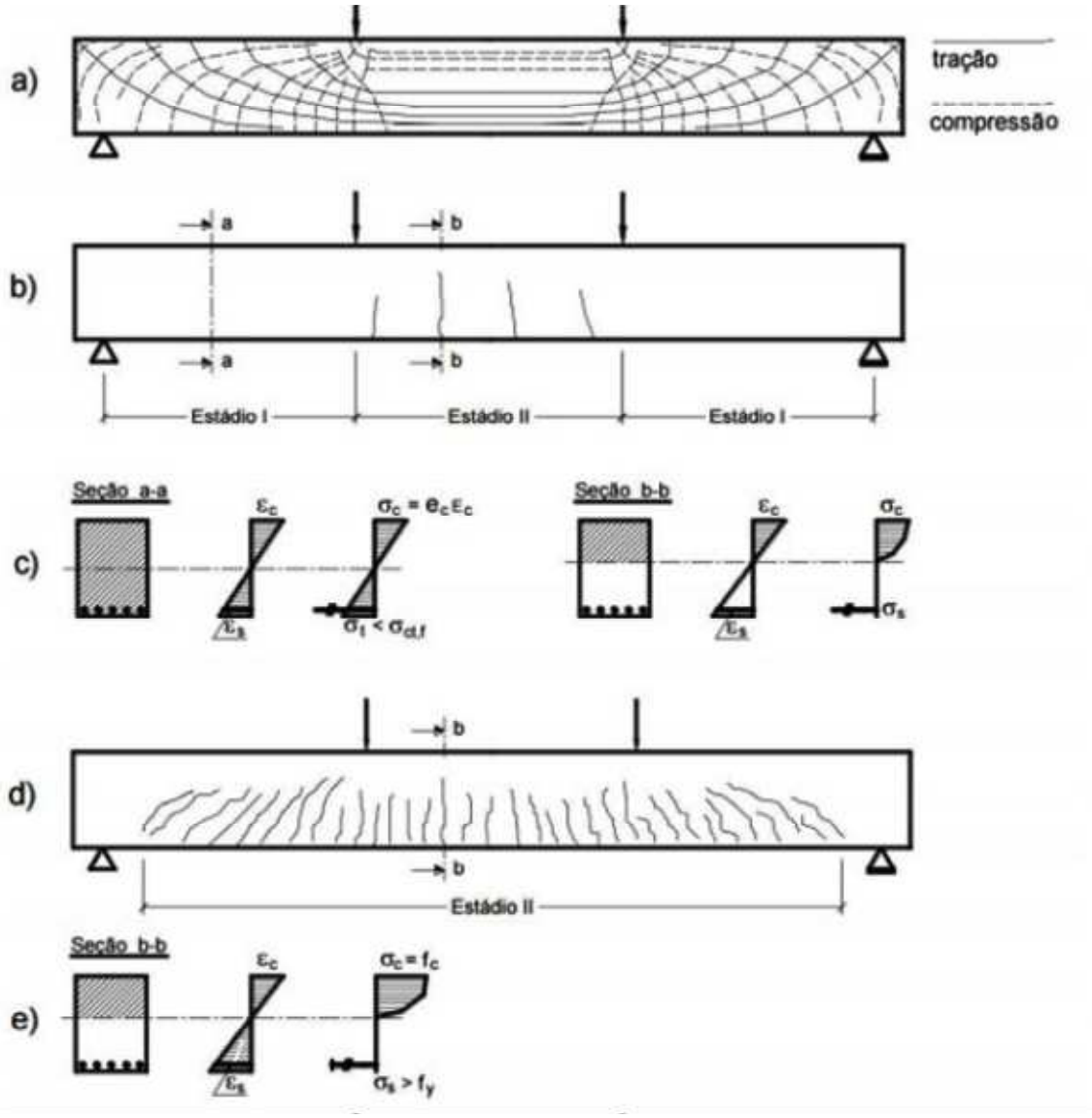


Fonte: (LEONHARDT:MONNIG, 1982).

A figura 2 mostra a trajetória das tensões principais de tração e de compressão da viga. Vale-se salientar ainda que em trechos onde ocorre somente flexão o curso das tensões existentes é paralelo ao eixo longitudinal da viga. Nos demais pontos as trajetórias são inclinadas devido à presença dos esforços cortantes.

As fissuras em vigas surgem, a partir do momento em que as tensões principais de tração tenham maior intensidade em relação à resistência a tração do concreto, manifestando-se nos pontos de máximos momentos fletores, como vê-se na figura 2b. Nesse cenário a viga aponta trechos fissurados no estágio II e trechos não fissurados no estágio I, onde a inclinação das fissuras é aproximadamente perpendicular à direção das tensões principais de tração, sendo assim, essa direção depende da inclinação das tensões principais de tração. Por esse motivo, nas regiões de flexão pura as fissuras tendem a ser verticais.

Figura 3 - Trajetória das tensões principais de tração e de compressão da viga.



Fonte: (LEONHARDT:MONNIG, 1982).

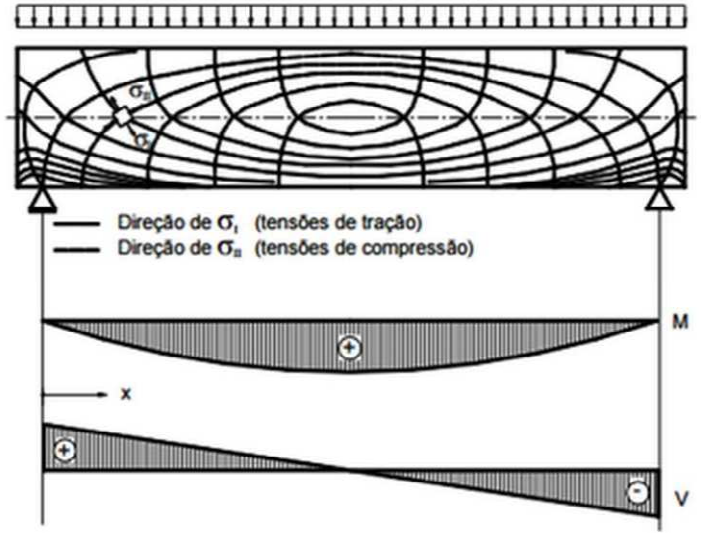
Pela figura 2c é possível analisar o diagrama de deformações e tensões das seções a e b, referentes à viga apresentada na imagem 2b, propiciando a análise do elemento nos estágios I e II. Onde no estágio I, a máxima tensão de compressão, ainda pode ser equacionada pela lei de Hooke. O que não se pode realizar para o estágio II, pelo fato da lei de Hooke ser relativa ao comportamento elástico do material, e no segundo caso o regime plástico foi atingido.

No momento em que surgem fissuras inclinadas nas proximidades dos apoios, significa que o carregamento atingiu uma intensidade maior. E esse fenômeno ocorre devido à interação das forças cortantes com os momentos fletores. Esse fato é citado como fissuras de cisalhamento, entretanto o professor Bastos (2005) se refere a ele como fissuras de “flexão com cortante”. Desta forma sob carregamentos de níveis elevados a viga se apresenta em

quase toda sua extensão no estágio II, apenas nos pontos próximos aos apoios o elemento fica sujeito ao estágio I, o que se verifica na figura 2d.

Em vigas biapoiadas submetidas a carregamentos uniformes, no estágio I, como pode-se verificar na figura 3, as tensões principais na altura da linha neutra apresentam inclinação de aproximadamente 45^{o} em relação ao eixo longitudinal da viga. E nas regiões próximas aos apoios as trajetórias das tensões principais possuem uma maior inclinação por influencia das forças cortantes.

Figura 4 - Trajetória das tensões principais.



Fonte: (LEONHARDT:MONNIG, 1982).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL UTILIZADA

O processo de otimização utilizado buscou o estudo de vigas de dois vãos iguais de concreto armado para diferentes comprimentos dos vãos, de classe de agressividade ambiental, classe de concreto e carregamentos. Utilizou-se um memorial de cálculo feito no Microsoft Excel, que executa o dimensionamento e escalonamento de uma viga de dois vãos. E com esse memorial foi executada a ferramenta *Solver* do próprio programa, na qual é possível realizar diversas iterações de determinadas células. Escolhidas para se encontrar uma célula objetivo, que dependendo da necessidade, pode ter um valor mínimo, máximo ou pré-definido. No estudo feito, foi determinado que a célula objetivo, referente ao preço final da viga, tivesse o valor mínimo.

As variáveis de projeto foram estipuladas visando as características que podem ficar a cargo do projetista escolher como a armadura de aço e a altura da viga. E ainda foram impostas restrições para os valores dessas variáveis das quais são feitas as iterações e também para alguns outros pontos visando características construtivas a serem seguidas.

O processo de iteração executado no *Solver*, teve como método de solução o mecanismo *Evolucionary*, que é usado para problemas de *Solver* não suaves, com uma precisão de 0,001 para a variação mínima da célula objetivo, com subproblemas máximos de 10000 e com tempo máximo sem aperfeiçoamento de 300 segundos.

Pode-se então definir a otimização utilizada a partir de 3 pontos gerais, como se segue.

4.1.1. Variáveis de projeto

Como já foi citado, as variáveis de projeto ficam sujeitas a sofrer mudanças com objetivo de realizar as iterações, assim elas foram:

Quadro 3 - Variáveis de projeto.

K_V
$K_{M1\ e\ M2}$
K_{M3}
d'_1
d'_3
$K_{\ Apoio\ 1}$
$K_{\ Apoio\ 2}$
h

Fonte: autor.

Onde:

- K_V: Posição em ordem crescente da armadura de aço que possui área imediatamente maior, mais próxima a necessária para o estribo referente aos vãos. Exemplificando, caso o *Solver* resulte em $K_V = 1$, significa que a armadura escolhida para o estribo é aquela possuinte da menor área de aço dentre as que superam a necessária encontrada no dimensionamento. Caso resulte em $K_V = 2$, utiliza-se a segunda área de aço mais próxima a necessária, dentre aquelas que superem a necessária e assim sucessivamente. A mesma explicação segue para os dados: $K_{M1\ e\ M2}$, K_{M3}, $K_{\ Apoio\ 1}$ e $K_{\ Apoio\ 2}$;
- $K_{M1\ e\ M2}$: Posição em ordem crescente da armadura de aço que possui área imediatamente maior, mais próxima a necessária para os momentos positivos no primeiro e segundo vão;
- K_{M3}: Posição em ordem crescente da armadura de aço que possui área imediatamente maior, mais próxima a necessária para o momento negativo no apoio intermediário;
- d'_1: Altura inicial suposta para a diferença entre a altura útil e total da viga, para a armadura referente ao momento negativo nos vãos;
- d'_3: Altura inicial suposta para a diferença entre a altura útil e total da viga, para a armadura referente ao momento positivo no apoio intermediário;
- $K_{\ Apoio\ 1}$: Posição em ordem crescente da armadura de aço que possui área imediatamente maior, mais próxima a necessária para o momento negativo no apoio 1;
- $K_{\ Apoio\ 2}$: Posição em ordem crescente da armadura de aço que possui área imediatamente maior, mais próxima a necessária para o momento negativo no apoio 2;
- h: Altura total da viga em estudo.

4.1.2. Função objetivo

A função objetivo é definida como o custo total da viga, que considera o dimensionamento das seções de acordo com a norma NBR 6118 (ABNT, 2014) além de levar em conta algumas restrições determinadas por efeitos construtivos. Assim temos que o custo final fica referente à forma, ao aço e ao concreto utilizado na peça em estudo. Temos então:

$$C_t = C_{aço} + C_{fôrma} + C_{concreto} \qquad \text{Equação (1)}$$

Onde:

C_t: Custo total da viga.

$C_{fôrma}$: Custo referente à fôrma de madeira.

$C_{aço}$: Custo referente ao aço utilizado.

$C_{concreto}$: Custo referente ao concreto utilizado.

O custo relativo ao aço é conseguido a partir do dimensionamento da área de aço necessária pela norma NBR 6118 (ABNT, 2014), juntamente com o seu escalonamento, conseguindo assim as bitolas e comprimento das barras de aço em cada dimensionamento, esse calculo é feito de forma automática pelo memorial de cálculo executado no próprio programa.

Para o estudo foi escolhida uma forma de madeira, supondo vigas isoladas, que tem seu custo calculado pela seguinte fórmula:

$$C_{fôrma} = (L_1 + L_2) \,.\, (2 \,.\, h + b) \,.\, C_{unit,fôrma} \qquad \text{Equação (2)}$$

Onde:

L_1: Comprimento do primeiro vão.

L_2: Comprimento do segundo vão.

h: Altura da viga.

b: Base da viga.

$C_{unit,fôrma}$: Custo unitário da fôrma de madeira por m².

E para o custo do concreto foi apenas calculado o volume da viga e multiplicado pelo custo unitário do tipo de concreto da viga em questão, como mostra a fórmula.

$$C_{concreto} = (L_1 + L_2) \,.\, b \,.\, h \,.\, C_{unit,concreto} \qquad \text{Equação (3)}$$

Onde:

L_1: Comprimento do primeiro vão.

L_2: Comprimento do segundo vão.

h: Altura da viga.

b: Base da viga.

$C_{unit,concreto}$: Custo unitário do concreto utilizado por m³.

4.1.3. Restrições das variáveis

Como citado anteriormente, as restrições são utilizadas para que as variáveis se encaixem nas regras de segurança da norma e condições construtivas, além do que a ferramenta *Solver* exige que as variáveis tenham restrições superiores e inferiores para o inicio das iterações. As restrições feitas são as seguintes:

- A seção só é dimensionada para que haja armadura simples, visto a dificuldade de executar o escalonamento no caso de armadura dupla;
- A altura útil da viga inicialmente é suposta para se desenvolver os cálculos referentes ao dimensionamento, entretanto depois de selecionada a armadura do elemento deve-se calcular a nova altura útil da viga, para que seja verificado se ela esta dentro do intervalo de ± 2 da altura útil inicialmente suposta para o dimensionamento;
- O comprimento de ancoragem das armaduras nos apoios deve ser inferior ou igual ao comprimento disponível em cada um deles;
- A configuração da seção depois de dimensionadas as armaduras e sabido o cobrimento deve ter altura menor ou igual a escolhida;
- A configuração da seção depois de dimensionadas as armaduras e sabido o cobrimento deve ter largura menor ou igual a escolhida;
- Por fins construtivos as dimensões das alturas, devem ser múltiplas de cinco centímetros;
- O d'₁ e o d'₃ devem ter dimensões mínimas iguais ao cobrimento nominal mais 1, pois como sabe-se o d'_{min} dever ser igual a:

$$d'_{min} = C + \emptyset_t + \frac{\emptyset_l}{2} \qquad \text{Equação (4)}$$

Onde:

$\emptyset_t = 0{,}5\ (Diâmetro\ da\ armadura\ transversal)$;

$\emptyset_l = 1\ (Diâmetro\ da\ armadura\ longitudinal)$.

- O d'₁ e o d'₃ devem ter dimensões máximas iguais 15 cm. Esse dado apenas foi disposto para que o solver executasse as iterações, visto que os valores para d'_1 e o d'_3 são geralmente próximos ao mínimo;

- A disposição das armaduras nos apoios deve ter uma largura mínima ou igual a escolhida para a configuração da viga;
- A altura mínima da viga de acordo com a norma deve ser de 12 cm, entretanto por fins construtivos já citados, os valores das dimensões da seção devem ser múltiplos de cinco centímetros, assim temos uma altura mínima de 15 cm;
- A altura máxima da viga deve ser de 60 cm para evitar a utilização de armadura de pele;
- O K_V deve ser um número inteiro e estar entre 1 e 15, essa limitação superior máxima foi imposta pelo fato do Solver necessitar de uma restrição inferior e superior para as variáveis;
- O $K_{M1\ e\ M2}$ deve ser um número inteiro e estar entre 1 e 15, essa limitação superior máxima foi imposta pelo fato do Solver necessitar de uma restrição inferior e superior para as variáveis;
- O K_{M3} deve ser um número inteiro e estar entre 1 e 15, essa limitação superior máxima foi imposta pelo fato do Solver necessitar de uma restrição inferior e superior para as variáveis;
- O $K_{apoio\ 1}$ deve ser um número inteiro e estar entre 1 e 15, essa limitação superior máxima foi imposta pelo fato do Solver necessitar de uma restrição inferior e superior para as variáveis;
- O $K_{apoio\ 2}$ deve ser um número inteiro e estar entre 1 e 15 essa limitação superior máxima foi imposta pelo fato do Solver necessitar de uma restrição inferior e superior para as variáveis.

4.2. METODOLOGIA DE CÁLCULO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS À FLEXÃO SIMPLES

O processo de otimização aplicado no presente trabalho, utiliza um memorial de cálculo feito a fim de dimensionar o elemento, o qual foi executado de acordo com a norma vigente NBR 6118 (ABNT, 2014). As vigas estudadas possuem dois vãos iguais, carregamentos atuantes uniformemente distribuídos e foram supostos apoios do segundo gênero.

Para evitar a utilização de armadura de pele, a altura das vigas foi limitada a 60 cm. Assim sendo, o dimensionamento busca definir armaduras transversais e longitudinais, a fim de realizar o escalonamento das armaduras e conseguir a quantidade total de aço na peça.

Desta forma, a metodologia é apresentada definindo inicialmente as seguintes características para dimensionamento:

- Coeficiente de dilatação térmica do concreto (α_c) igual a $10^{-5}ºC^{-1}$.
- Resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}), onde nas amostras estudadas foram utilizados f_{ck} de 25 MPa, 30 MPa e 40 MPa;
- Resistência média à tração do concreto (f_{ctm}), a qual foi estimada em função do f_{ck}.
- Peso específico do concreto armado, suposto igual a 25,0 KN/m³;
- Resistência característica de escoamento do aço (f_{yk}), definida no trabalho como barras para o CA-50 e de fios para o CA-60;
- Coeficiente de dilatação térmica do aço (α_a), adotado de $10^{-5}ºC^{-1}$;
- Módulo de elasticidade, suposto pela norma, sendo igual a 210 GPa;
- Cobrimento, determinado pela classe de agressividade ambiental, que dependo do local onde esta sendo executada a construção, como se apresenta nos seguintes quadros.

Quadro 4 - Classes de agressividade ambiental (CAA).

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente pare efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana [a, b]	Pequeno
III	Forte	Marinha [a]	Grande
		Industrial [a, b]	
IV	Muito forte	Industrial [a, c]	Elevado
		Respingos de Maré	

[a] Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade ambiental mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residências e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamasse e pintura.

[b] Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade ambiental mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

[c] Ambiente quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel armazéns de fertilizantes, industrias químicas.

Fonte: adaptado da NBR 6118 (ABNT, 2014).

A partir desses valores a NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece cobrimentos mínimos, para cada tipo de classe de agressividade ambiental em que a estrutura esta presente, bem como a classe mínima do concreto, como é representado nos próximos quadros.

Quadro 5 – Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto.

Concreto [a]	Tipo [b, c]	Classe de agressividade (Tabela 6.1)			
		I	II	II	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,6	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,6	≤ 0,55	≤ 0,5	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

[a] O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

[b] CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

[c] corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: adaptado da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Quadro 6 – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para △C =10mm.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV [c]
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje [b]	30		40	50
	Viga/pilar				
	Elementos estruturais em contato com o solo [d]				
Concreto protendido [a]	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

[a] Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

[b] Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamasse de revestimento de acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitando um cobrimento nominal ≥ 15mm.

[c] Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

[d] No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nomina ≥ 45mm.

Fonte: adaptado da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Assim, foram utilizadas todas as classes de agressividade, com o objetivo de supor diferentes localidades para execução de construções.

- Dimensões mínimas.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) conforme o item 13.2.2, diz que a seção transversal das vigas não pode apresentar largura menor que 12 cm e a das vigas-parede, menor que 15 cm. Estes limites podem ser reduzidos, respeitando-se um mínimo absoluto de 10 cm em casos excepcionais, sendo obrigatoriamente respeitadas as condições estabelecidas na norma. No presente trabalho as vigas dimensionadas tiveram largura mínima de 20 cm, a fim de supor condições reais de dimensionamento onde valores múltiplos de cinco centímetros são mais utilizados, pela sua maior facilidade de execução em campo;

- Cargas nas vigas.

Em uma situação real as cargas sobre os elementos estudados podem ter diversas origens, que devem ter suas contribuições calculadas de forma a se dimensionar para uma situação segura. Essas contribuições são: peso próprio da viga, alvenarias, ações das lajes e em alguns casos das ações das vigas e dos pilares. No estudo realizado essas cargas foram

supostas de 10KN/m, 20KN/m, 30KN/m e 40KN/m, onde junto a essa carga ainda era somado o peso próprio da viga;

- Vãos teóricos.

O vão teórico é a distancia entre os centros dos apoios, pela norma vigente deve ser calculado por:

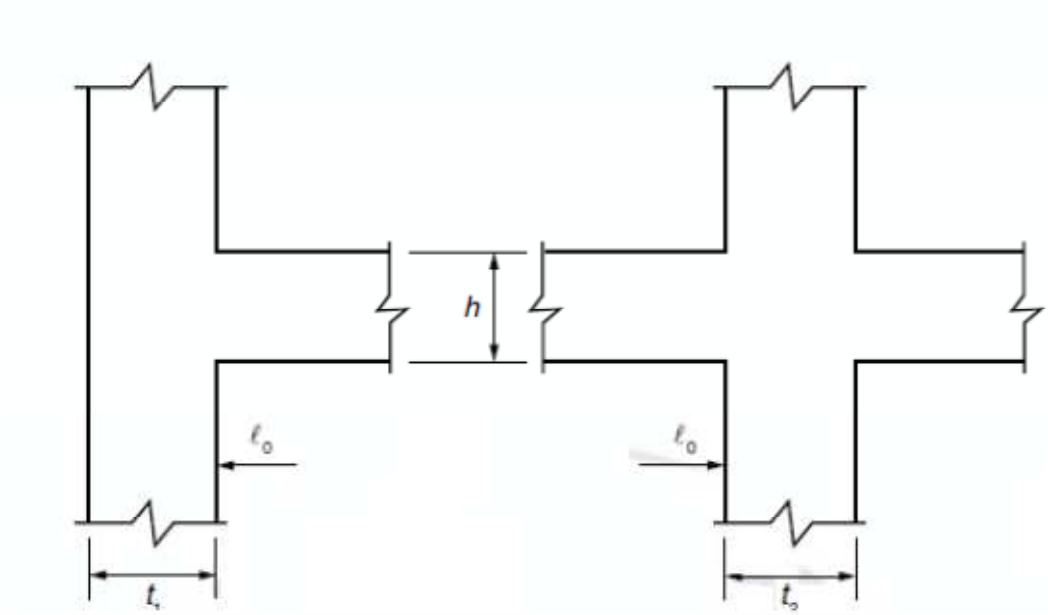
$$l_{ef} = l_0 + a_1 + a_2 \qquad \text{Equação (5)}$$

Onde:

l_0 : Comprimento entre os pilares;

Com a_1 sendo o menor valor entre ($\frac{t_1}{2}$ e $0{,}3h$) e a_2 o menor valor entre ($\frac{t_2}{2}$ e $0{,}3h$), conforme a seguinte figura;

Figura 5 – Comprimento efetivo de cálculo dos vãos.



Fonte: adaptado da NBR 6118 (ABNT, 2014).

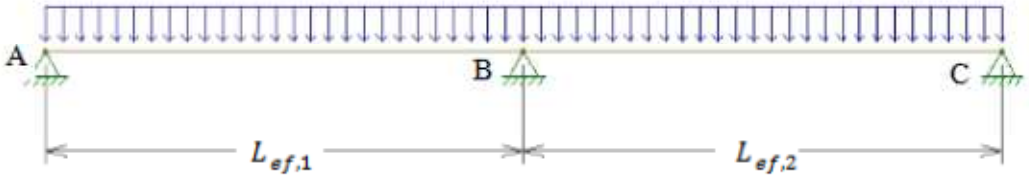
4.2.1. Dimensionamento

Em posse dessas características, o próximo passo para o dimensionamento é a determinação dos momentos fletores máximos atuantes e das reações nos apoios da viga, para o cálculo das armaduras necessárias, que são divididas em longitudinal e transversal.

4.2.1.1. Momento fletor e esforço cortante

A estrutura em estudo é composta por dois vãos, tem apoios do segundo gênero e possui carregamento uniformemente distribuído, podendo ser exposto o seguinte modelo de cálculo.

Figura 6 – Modelo de cálculo para as vigas em estudo.



Fonte: autor.

Com essa configuração a estrutura terá duas reações em cada apoio, entretanto as reações horizontais são nulas visto que não ocorre esforços horizontal. Sendo assim, temos três reações verticais e três equações podem ser utilizadas: somatório das forças verticais, somatório das forças horizontais e somatório dos momentos. Entretanto, o somatório das forças horizontais não será utilizado, por não haverem forças nesse sentido. Assim, temos três incógnitas e duas equações, um problema hiperestático.

Para resolver esse cenário foi utilizado o método dos deslocamentos, travando o apoio central e encontrando inicialmente os momentos de engaste perfeito para o campo real, em seguida para o campo virtual e por fim os esforços em cada vão. Com a utilização do método citado anteriormente, foi encontrado um momento máximo de igual valor em cada vão. Onde esses esforços foram utilizados no cálculo das armaduras longitudinais inferiores existentes em cada vão teórico.

Também foi encontrado um momento máximo sobre o apoio central, esse que seria utilizado para a definição da armadura longitudinal superior sobre o apoio intermediário. Em posse dos momentos foram determinadas as reações verticais em cada apoio e definido o esforço cortante máximo em cada vão, onde com esse dado foi dimensionada a armadura transversal. Vale salientar que cada um desses esforços encontrados ainda deve ser majorado pelo fator de 1,4.

4.2.1.2. Dimensionamento da armadura longitudinal

O processo apresentado a seguir para o cálculo da armadura longitudinal deve ser realizado duas vezes para cada vão e uma vez para o apoio central, visto que a viga possui dois vãos. Entretanto, a metodologia a ser empregue deve ser a mesma.

4.2.1.2.1. Altura ótima da viga

Em posse dos momentos, a próxima etapa é determinar a altura útil (d), considerada da fibra mais comprimida até o centro da seção da armadura longitudinal tracionada, pela fórmula.

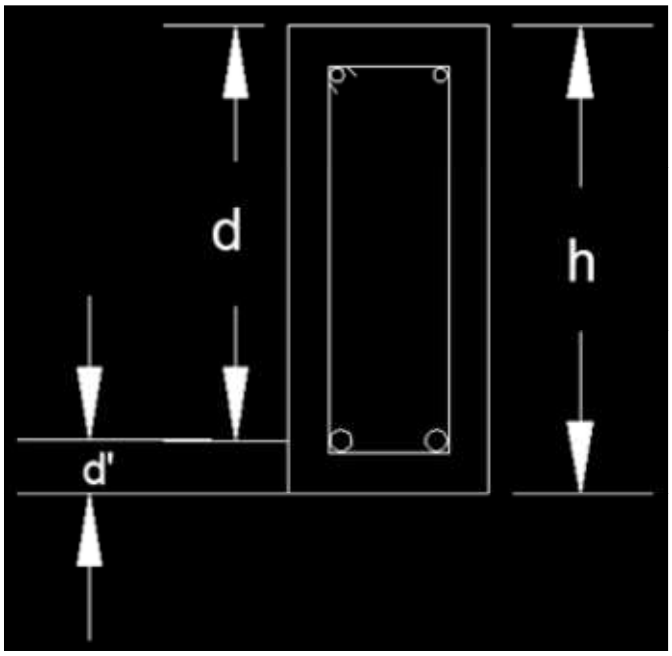
$$d = h - d' \qquad \text{Equação (6)}$$

Onde:

h : Altura total da viga, valor esse que vai ser suposto durante as iterações pela ferramenta utilizada.

d': Valor a ser considerado pelo programa, para realizar o cálculo da altura útil, que depende da quantidade de barras na seção e da sua configuração.

Figura 7 – Modelo de cálculo da seção das vigas em estudo.



Fonte: autor.

Para realizar o dimensionamento, o valor de d' foi uma das variáveis de projeto que a ferramenta *Solver* modificava durante as iterações e por fim, gerava um valor correspondente à seção ótima. Assim, inicialmente a ferramenta supunha um valor para o d', e o integrava

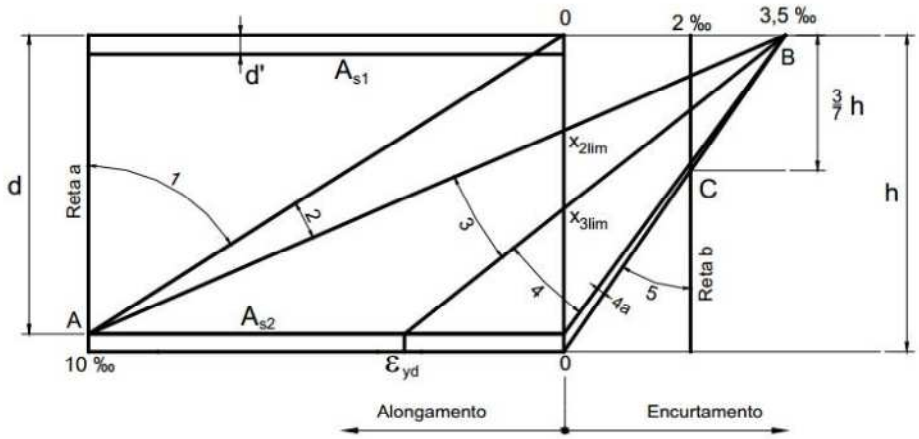
nos cálculos. Depois de dimensionada a seção o valor inicial da altura ótima tinha de estar entre o intervalo de ± 2 mediante a altura encontrada para a configuração designada, essa que no caso era uma das restrições do programa.

4.2.1.2.2. Domínios de Deformações

Para continuar o dimensionamento, agora deve-se encontrar a posição da linha neutra e para isso é importante conhecer os domínios de deformações.

Os domínios são representações das deformações que ocorrem na seção transversal dos elementos estruturais. As deformações são de alongamento e de encurtamento, oriundas de tensões de tração e compressão, respectivamente. Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) (item 17.2.2), o estado limite último (ELU) de elementos lineares sujeitos a solicitações normais é caracterizado quando a distribuição das deformações na seção transversal pertencer a um dos domínios definidos na Figura abaixo.

Figura 8 – Diagrama possível dos domínios de deformações.



Fonte: Araújo, 2014.

4.2.1.2.2.1. Classificação dos Domínios

Domínio 1

O domínio 1, ocorre quando a força normal de tração não é aplicada no centro de gravidade da seção transversal, isto é, existe uma excentricidade da força normal em relação ao centro de gravidade. Neste domínio, ocorre a tração não uniforme, e a seção ainda está inteiramente tracionada.

Domínio 2

No domínio 2, ocorrem os casos de solicitação de flexão simples, tração excêntrica com grande excentricidade e compressão excêntrica com grande excentricidade, a seção transversal tem parte tracionada e parte comprimida. O domínio 2 é caracterizado pela deformação de alongamento fixada em 10 ‰ na armadura tracionada.

Domínio 3

Os casos de solicitação são os mesmos do domínio 2, ou seja, flexão simples, tração excêntrica com grande excentricidade e compressão excêntrica com grande excentricidade. A seção transversal tem parte tracionada e parte comprimida. O domínio 3 é caracterizado pela deformação de encurtamento máxima fixada em 3,5 ‰ no concreto da borda comprimida.

Domínio 4

Os casos de solicitação do domínio 4 são a flexão simples e a flexão composta (flexo-compressão ou compressão excêntrica com grande excentricidade), a seção transversal tem parte tracionada e parte comprimida. O domínio 4 é caracterizado pela deformação de encurtamento máxima fixada em 3,5 ‰ no concreto da borda comprimida.

Domínio 4a

No domínio 4a a solicitação é de flexão composta (flexo-compressão), a seção transversal tem uma pequena parte tracionada e a maior parte comprimida. O domínio 4a também é caracterizado pela deformação de encurtamento máxima fixada em 3,5 ‰ no concreto da borda comprimida.

Domínio 5

No domínio 5 ocorre a compressão não uniforme ou flexo-compressão com pequena excentricidade (flexão composta). A linha neutra não corta a seção transversal, que está completamente comprimida, embora com deformações diferentes. As duas armaduras também estão comprimidas.

A posição da linha neutra pode variar, desde o valor x2lim até x3lim ($x2lim \leq x \leq x3lim$), que delimita os domínios 3 e 4. A deformação de encurtamento na armadura comprimida é menor, mas próxima a 3,5 ‰, por estar próxima à borda comprimida, onde a deformação é 3,5 ‰.

Na situação última a ruptura do concreto comprimido ocorre simultaneamente com o escoamento da armadura tracionada.

4.2.1.2.3. Determinação da Posição da Linha Neutra

É necessário que seja calculada para todos os momentos fletores de dimensionamento que atuam na viga e que sejam dimensionados para os domínios 2 e 3, assim, primeiro tem-se que fazer:

$$X_{23}, lim = 0{,}26 \cdot d \qquad \text{Equação (7)}$$

$$X_{34}, lim = 0{,}63 \cdot d \qquad \text{Equação (8)}$$

Em seguida faz-se, para os momentos de cálculo:

$$m_d = 0{,}68 \cdot b_w \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (d - 0{,}4 \cdot x) \qquad \text{Equação (9)}$$

Onde:

b_w : Largura da seção retangular;

x: Posição da linha neutra;

d: Altura útil da viga;

f_{cd}: Resistência de cálculo do concreto à compressão;

m_d: Momento de cálculo.

Essa é uma equação do segundo grau com:

$$a = 0{,}68 \cdot b_w \cdot f_{cd} \cdot 0{,}4 \qquad \text{Equação (10)}$$

$$b = -0{,}68 \cdot b_w \cdot f_{cd} \cdot 0{,}4 \,.\, d \qquad \text{Equação (11)}$$

$$c = m_d \qquad \text{Equação (12)}$$

Resolvendo a equação, encontram-se dois valores, onde o menor valor será utilizado, entre:

$$x' \text{ e } x''$$

Com o valor da profundidade da linha neutra, deve-se verificar em qual domínio ela esta localizada, lembrando que ela deve estar entre os domínios 2 ou 3, que são os domínios de dimensionamento. Para se analisar tal fato faz-se:

$$X_{23}, lim > x'$$

Se isso acontecer a linha neutra esta no domínio 2 se não ela esta no domínio 3. Ainda com os dados sobre a linha neutra, verifica-se a necessidade de utilizar armadura dupla, utilizando a metodologia do CEB/90, que afirma um limite máximo para o ε_{lim} de 0,45 para concretos de f_{ck} menores ou iguais a 35 Mpa e de 0,35 para concretos de f_{ck} maiores de 35

Mpa. Se o valor de ε_{lim}, o qual é igual à divisão da profundidade limite da linha neutra pela altura útil da viga, for maior que essas limitações citadas, a viga necessita de armadura dupla. Nas amostras utilizadas uma das restrições foi a utilização apenas de armadura simples, assim os valores de ε_{lim} deveriam estar entre o necessário para tal fato.

4.2.1.2.4. Armadura de Flexão

Essa armadura é determinada com o momento máximo em cada vão e no apoio central. Tem como função dimensionar a armadura longitudinal inferior, que será aplicada ao longo dos dois vãos da viga, pois eles são iguais e a armadura longitudinal superior no apoio central.

Assim, deve-se encontrar a área de aço necessária, pela fórmula:

$$A_s = \frac{m_d}{f_{y\omega d} \cdot (d - 0{,}4 \cdot x)} \qquad \text{Equação (13)}$$

Onde:

A_s: Armadura de aço necessária longitudinal;

m_d : Momento fletor de cálculo;

$f_{y\omega d}$: Resistência de dimensionamento do aço ao escoamento;

d : Altura útil da viga;

x : Profundidade da linha neutra.

4.2.1.2.5. Armadura Mínima e Máxima

Ainda sobre a área de aço calculada, deve-se verificar a área mínima e máxima, o que se faz com as fórmulas:

$$As_{,mín} = \rho_{mín} \cdot b_\omega \cdot h \qquad \text{Equação (14)}$$

$$As_{,max} = 4\% A_c \qquad \text{Equação (15)}$$

Onde:

$As_{,mín}$: Armadura máxima longitudinal;

$As_{,max}$: Armadura mínima longitudinal;

b_ω : Largura da seção retangular;

h : Altura da seção retangular;

A_c: Multiplicação da altura pela largura da seção retangular.

4.2.1.2.6. Definição das Armaduras

Com o valor encontrado para a área de aço necessária, deve-se selecionar uma área de aço maior ou igual à encontrada e que esteja entre as áreas mínima e máxima calculadas, utilizando as tabelas de dimensionamento. Aqui será utilizada a tabela A3.2-VOL 2 do livro Araújo (2014). A ferramenta de otimização nesse ponto vai escolher a área de aço em relação ao preço final da viga, onde cada área corresponde a certa quantidade de barras de determinado diâmetro.

4.2.1.3. Dimensionamento das Armaduras Transversais

Essa armadura é determinada pelo maior esforço cortante ao longo do vão, assim, cada vão terá uma armadura transversal a ser dimensionada, essa armadura nada mais é do que o estribo.

4.2.1.3.1. Verificação de Compressão nas Bielas

Para tal verificação deve-se fazer:

$$V_{sd} \leq V_{Rd2} \qquad \text{Equação (16)}$$

Com:

$$V_{sd} = 1{,}4 \cdot V_{sk} \qquad \text{Equação (17)}$$

$$V_{Rd2} = 0{,}27 \cdot \alpha_b \cdot f_{cd} \cdot b\omega \cdot d \qquad \text{Equação (18)}$$

$$\alpha_b = (1 - \frac{f_{ck}}{250}) \qquad \text{Equação (19)}$$

Onde:

V_{Rd2}: Esforço cortante limite.

V_{sk}: Maior esforço cortante do vão.

f_{cd} : Resistência de cálculo à compressão do concreto;

$b\omega$: Largura da seção retangular;

d: Altura útil da viga;

f_{ck}: Resistência característica à compressão do concreto.

4.2.1.3.2. *Cálculo da Armadura Transversal (Estribo)*

Primeiro faz-se:

$$V_c = V_{cd} = 0{,}6 \cdot f_{ctd} \cdot b\omega \cdot d \qquad \text{Equação (20)}$$

Onde:

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inferior}}{\gamma_c} \qquad \text{Equação (21)}$$

$$f_{ctk,inferior} = 0{,}7 \cdot f_{ctm} \qquad \text{Equação (22)}$$

$$f_{ctm} = 0{,}3 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}{}^2} \qquad \text{Equação (23)}$$

Em posse destes valores, faz-se o seguinte:

$$V_{s\omega} = V_{sd} - V_c \qquad \text{Equação (24)}$$

Com o valor de $V_{s\omega}$, calcula-se a área de aço necessária em resposta ao esforço cortante de cálculo.

$$\frac{A_{s\omega}}{S} = \frac{V_{s\omega}}{0{,}9 \cdot d \cdot f_{y\omega d}} \qquad \text{Equação (25)}$$

Onde:

V_c : Esforço cortante resistido pelo concreto;

$\frac{A_{s\omega}}{S}$: Armadura de aço necessária transversal;

d: Altura útil da viga;

$f_{y\omega d}$: Resistência de dimensionamento do aço ao escoamento.

4.2.1.3.3. *Cálculo da Armadura Mínima (Estribo)*

A área dimensionada no cálculo anterior possui uma limitação, ela deve ser maior que uma área mínima, a qual se encontra da seguinte forma.

$$A_{s\omega,mín} = \frac{20 \cdot f_{ctm}}{f_{y\omega k}} \cdot b\omega \qquad \text{Equação (26)}$$

Onde:

$A_{sω,mín}$: Armadura mínima transversal.

4.2.1.3.4. Definição das Armaduras

Com o valor encontrado para a área de aço necessária, deve-se selecionar uma área de aço maior ou igual à encontrada e que esteja entre as áreas mínima e máxima calculadas, utilizando as tabelas de dimensionamento. Aqui será utilizada a tabela A3.3-VOL 2 do livro Araújo (2014). A ferramenta de otimização nesse ponto vai escolher a área de aço em relação ao preço final da viga, onde cada área corresponde a um especifico diâmetro com determinado espaçamento.

4.2.1.4. Definições construtivas sobre as armaduras dimensionadas

4.2.1.4.1. Armadura longitudinal

4.2.1.4.1.1. Espaçamento livre entre faces das barras

A disposição das barras entre os ramos verticais do estribo deve proporcionar uma distância livre entre as barras suficiente para a passagem do concreto, a fim de evitar o surgimento de nichos de concretagem. O espaçamento livre horizontal e vertical mínimo entre as barras é importante para verificar se a configuração escolhida pelo programa se encaixa no espaço limite vertical e horizontal da viga, onde esses valores são dados por:

$$Ah_{mín} \geq \left\{ \begin{matrix} 2cm \\ \emptyset_l \\ 1{,}2d_{máx,agregado} \end{matrix} \right\} \qquad \text{Equação (27)}$$

$$Av_{mín} \geq \left\{ \begin{matrix} 2cm \\ \emptyset_l \\ 0{,}5d_{máx,agregado} \end{matrix} \right\} \qquad \text{Equação (28)}$$

Onde:

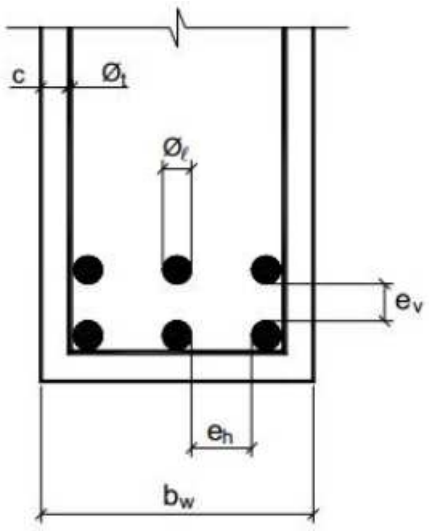
$Ah_{mín}$: Espaçamento livre horizontal mínimo entre as faces de duas barras da mesma camada;

$Av_{mín}$: Espaçamento livre vertical mínimo entre as faces de duas barras de camadas adjacentes;

$d_{máx,agr}$: Dimensão máxima característica do agregado graúdo utilizado no concreto;

$\emptyset_l$: Diâmetro da barra, do feixe ou da luva.

Figura 9 – Espaçamentos livres entre as faces das barras de aço.



Fonte: Araújo, 2014.

4.2.1.4.1.2. Valor de d e d′ para seção

A distância d, medida entre o centro de gravidade da armadura tracionada e a fibra mais tracionada da seção transversal, depende da configuração da seção. Pois o número de barras e o seu diâmetro irá definir o centro de gravidade da armadura tracionada.

No presente trabalho o programa quando executa as iterações supõe valores para 'h' e para d′. Os integra aos cálculos e após determinada a configuração da peça, executa o cálculo da altura útil real, se esse valor estiver entre o intervalo de ± 2cm da altura útil suposta inicialmente, ele é considerado verdadeiro e o dimensionamento é aceito.

4.2.1.4.2. Armadura Transversal

4.2.1.4.2.1. Diâmetro do estribo

O valor do diâmetro do estribo deve estar entre o intervalo de:

$$5\ mm \leq \emptyset_{est} \leq \frac{b_w}{10} \qquad \text{Equação (29)}$$

Onde:

$\emptyset_{est}$: Diâmetro do estribo;

b_w : Base da viga.

4.2.1.4.2.2. Espaçamento máximo entre estribos

Nesse caso deve-se verificar:

$$V_{sd} > 0{,}67.V_{rd2} \qquad \text{Equação (30)}$$

Se isso acontecer, encontra-se um espaçamento máximo igual a:

$$S_{max,estri} = 0{,}3\,.\,d \qquad \text{Equação (31)}$$

Se não ocorrer tem-se:

$$S_{max,estri} = 0{,}6\,.\,d \qquad \text{Equação (32)}$$

Sabendo que esses valores devem ser menores que 30 cm.

Onde:

V_{sd}: Esforço cortante de cálculo;

V_{rd2}: Esforço cortante limite;

$S_{max,estri}$: Espaçamento máximo entre estribos;

d : Altura útil da viga.

4.2.1.4.2.3. Espaçamento máximo entre ramos verticais dos estribos

Outro ponto a se verificar é:

$$V_{sd} < 0{,}2 \cdot VR_{d2} \qquad \text{Equação (33)}$$

Se isso acontecer, encontra-se um espaçamento máximo de igual a:

$$S_{max,ramos} = 06\,.\,d \qquad \text{Equação (34)}$$

Se não ocorrer tem-se:

$$S_{max,ramos} = d \qquad \text{Equação (35)}$$

E nesse caso esses valores devem ser menores que 80 cm.

Onde:

V_{sd}: Esforço cortante de cálculo;

V_{rd2}: Esforço cortante limite;

$S_{max,ramos}$: Espaçamento máximo entre ramos verticais dos estribos;

d : Altura útil da viga.

4.2.1.5. Comprimento de ancoragem nos apoios

4.2.1.5.1. Ancoragem reta

Primeiro tem-se que determinar o comprimento necessário para ancoragem, usando a fórmula:

$$lb_{,nec} = l_b \frac{As_{,cal}}{As_e} \geq lb_{mín} \qquad \text{Equação (36)}$$

Onde:

$lb_{,nec}$: Comprimento necessário para ancoragem;

$As_{,cal}$: Área de aço necessária longitudinal;

As_e: Área de aço da sessão longitudinal escolhida;

$lb_{mín}$: Comprimento de ancoragem mínimo.

$$l_b = \frac{\emptyset_l}{4} . \frac{f_{yd}}{f_{bd}} \qquad \text{Equação (37)}$$

Sabendo-se que:

$$f_{bd} = 0{,}42(f_{ck})^{2/3} \qquad \text{Equação (38)}$$

Desta forma, ainda deve-se verificar se a ancoragem necessária é maior que a mínima da seguinte forma:

$$lb_{mín} \geq \begin{Bmatrix} 0{,}3 \,.\, l_b \\ 10 \,.\, \emptyset_l \\ 10\ cm \end{Bmatrix} \qquad \text{Equação (39)}$$

Onde:

$\emptyset_l$: Diâmetro da armadura longitudinal da viga.

4.2.1.6. Ancoragem nos apoios de extremidade

Primeiro encontra-se o esforço cortante nos apoios e em seguida utiliza-se:

$$As_{apoio} = \frac{V_k . 1{,}4}{f_{yd}} \qquad \text{Equação (40)}$$

Onde:

As_{apoio}: Armadura de aço necessária no apoio da viga;

V_k: Esforço cortante no apoio da viga.

Com o valor encontrado para a área de aço, deve-se selecionar uma área de aço maior ou igual à encontrada, utilizando as tabelas de dimensionamento. Aqui será utilizada a tabela A3.2-VOL 2 do livro Araújo (2014). A ferramenta de otimização nesse ponto vai escolher a área de aço em relação ao preço final da viga, onde cada área corresponde a certa quantidade de barras de determinado diâmetro.

4.2.1.6.1. Comprimento de ancoragem reta

Com a área de aço escolhida para a seção, agora vamos definir o comprimento de ancoragem reta, primeiro será utilizada novamente a fórmula referente ao comprimento de ancoragem necessário, entretanto agora utiliza-se os valores encontrados com o dimensionamento anterior.

$$lb_{nec,reto} = l_b \frac{As_{,cal}}{As_e} \qquad \text{Equação (41)}$$

Onde:

$lb_{nec,reto}$: Comprimento necessário para ancoragem com gancho;

$As_{,cal}$: Área de aço necessária longitudinal;

As_e: Área de aço da sessão longitudinal escolhida.

Lembrado que esse valor deve ser maior do que a ancoragem mínima encontrada na tabela A3.5-VOL 2 do livro Araújo (2014).

4.2.1.6.2. Comprimento de ancoragem com gancho

Nessa etapa faz-se o seguinte:

$$lb_{nec,gancho} = 0{,}7 \cdot lb_{nec,reto} \qquad \text{Equação (42)}$$

Onde:

$lb_{nec,gancho}$: Comprimento necessário para ancoragem com gancho;

$lb_{nec,reto}$: Comprimento necessário para ancoragem reta.

Onde ainda temos o $lb_{mín}$, que é retirado da tabela A3.5-VOL 2 Araújo (2014).

4.2.1.7. Armadura construtiva

Esse tipo de armadura é aplicada caso em algum ponto da viga não seja necessário a utilização de uma armadura calculada. Assim, para que não ocorra problemas diante a armação e com a aplicação dos estribos é recorrido a armadura construtiva, que deve ter diâmetro maior ou igual ao do estribo.

4.2.2. Detalhamento das armaduras

Os cálculos referidos anteriormente dão o valor das áreas de aço necessárias ao longo da viga, lembrando que elas representam: armadura longitudinal positiva ao longo dos dois vãos, armadura longitudinal central negativa no apoio intermediário, armadura transversal ao longo de toda viga (estribo), armadura negativa nos apoios laterais e armadura construtiva.

Como no presente trabalho o objetivo do dimensionamento das vigas é conseguir a quantidade de aço total gasto na estrutura, para que assim, possa ser feito o cálculo do seu preço. Então deve-se, não apenas dimensionar a bitola e a quantidade de barras na seção, mas também o comprimento das barras calculadas.

4.2.2.1. Escalonamento da armadura longitudinal

Foi realizado o escalonamento das armaduras de acordo com o exposto no VOL 2 do livro Araújo (2014). Desta forma, para iniciar-se o processo, o referido livro afirma que a força na armadura longitudinal de tração em uma determinada seção transversal é proporcional ao momento fletor em uma seção vizinha, dela afastada de uma distância igual a a_l. Assim, a força de tração na armadura longitudinal pode ser encontrada considerando-se um diagrama de momentos fletores deslocados de a_l no sentido desfavorável.

No memorial de cálculo os valores do comprimento da viga, das cargas e das reações sobre ela foram impostos no problema. Assim, foi possível identificar a equação descrita pelo momento fletor sobre cada vão, como os dois são espelhados o cálculo foi feito apenas para um deles e repetido para o outro. No caso da armadura sobre o apoio central foi calculado apenas metade do seu comprimento e depois ela foi espelhada para o outro vão.

Diante do exposto como já se tem compreensão sobre a equação do momento fletor o próximo passo é determinar o valor a_l. O qual representa o afastamento do gráfico resultante

do momento fletor. Assim, vamos utilizar a seguinte fórmula, que é válida quando utiliza-se estribos verticais:

$$a_l = \frac{\tau_{wd}}{2.(\tau_{wd}-\tau_c)} d \geq 0{,}5.d \qquad \text{Equação (43)}$$

Onde:

$$\tau_{wd} = \frac{V_d}{b.d} \qquad \text{Equação (44)}$$

$$\tau_c = \psi_3.(f_{ck})^{2/3} \qquad \text{Equação (45)}$$

a_l: Valor do deslocamento do gráfico do momento fletor;

V_d : Esforço cortante de cálculo;

b: Base da viga;

d : Altura útil da viga;

f_{ck}: Resistência a tração do concreto;

ψ_3: Coeficiente determinado pelo tipo de esforço, no caso do problema ocorre flexão simples, assim ele fica igual a 0,09.

Uma vez deslocado o diagrama dos momentos fletores e como já é sabido o valor das bitolas e a quantidade de barras, o próximo passo a se fazer é dividir o diagrama através de linhas paralelas ao eixo da viga. Onde cada uma delas é correspondente a uma fração do momento máximo, a quantidade de linhas é igual ao número de barras escolhidas no dimensionamento da seção, pode-se dizer que cada barra irá absorver certa quantidade do momento fletor máximo. Simplificando tem-se que o momento fletor máximo será dividido pelo número de barras escolhidas.

Vale salientar que no dimensionamento executado para uma seção de aço sempre forram escolhidas bitolas de mesmo diâmetro, se assim não tivesse sido feito. A divisão do momento fletor máximo deveria ter levando em consideração a área de cada bitola.

Como já dito anteriormente a equação do momento fletor sobre a viga é de fácil determinação, desta forma agora tem-se que calcular a distância entre os dois pontos correspondentes ao valor de cada uma das divisões do momento fletor máximo. Executado esse passo em seguida deve-se somar a grandeza encontrada com o valor de a_l multiplicada por 2, visto que o afastamento do diagrama se dá nas duas direções, ainda nessa soma deve-se adicionar o valor do comprimento de ancoragem reta, encontrada para cada conjunto de barras, em cada uma das extremidades.

Esse processo deve ser executado com cada uma das barras, entretanto deve-se levar em consideração algumas restrições. As barras da primeira camada obtidas no dimensionamento da armadura longitudinal positiva devem entrar no apoio central um valor

mínimo de 10Ø, além disso, pelo menos 2 barras ou 1/3 da armadura longitudinal de tração nos vãos devem ser prolongadas até os apoios de extremidade. Lembrando que se o valor encontrado para a barra for superior ao comprimento da viga deve-se armar a viga no comprimento total disponível.

A armadura no apoio central não necessita entrar nos apoios externos, mas como sua primeira camada estará em contato com as barras da armadura construtiva ou da armadura no apoio ela deve ultrapassar a armadura vizinha em no mínimo 10Ø, para garantir sua ancoragem.

Outro ponto importante se refere ao caso em que um feixe de barras não consiga adentrar na seção de ancoragem do feixe superior, assim deve-se prolongar esse feixe até que ele ultrapasse o superior em um valor mínimo de 10Ø.

Como citado anteriormente às armaduras nos vãos da viga devem atingir os apoios externos com certa quantidade mínima, com isso elas devem entrar nos pilares externos um valor, que foi calculado durante o dimensionamento da seção. Igual ao comprimento necessário de ancoragem com gancho e o referido gancho deve ter seu comprimento de acordo com a bitola da armadura, determinado pela tabela A3.5-VOL 2 do livro Araújo (2014).

Para a configuração da viga foi determinada a não utilização de bitolas de 5mm nas armaduras longitudinais. De acordo, com as bitolas foi utilizado um tipo de configuração, se o diâmetro das armaduras fosse menor que 25mm, então seria permitido no máximo camadas com 3 barras, se a bitola fosse maior ou igual a 25mm as camadas deveriam ter 2 barras no máximo, em ambos casos o número máximo de camadas foi de 4. Sabendo que só se utilizaria a próxima camada se a anterior estivesse com barras no máximo.

4.2.2.2. Detalhamento da armadura transversal

O comprimento total da armadura de aço transversal pode ser determinado pela fórmula:

$$C_e = 2(h + b - 4.C_{nom}) + \Delta C \qquad \text{Equação (46)}$$

Onde:

h: Altura da viga;

b: Base da viga;

C_{nom}: Cobrimento nominal;

ΔC: Parâmetro acrescentado ao comprimento referente à dobra do estribo, determinado pela tabela A3.7-VOL 2 do livro Araújo (2014).

A quantidade de estribos ao longo dos dois vãos é calculada com a seguinte fórmula:

$$Q_e = 2.(\frac{l}{S_e} + 1) \qquad \text{Equação (47)}$$

Onde:

Q_e : Quantidade de estribos;

l: Comprimento disponível para distribuição do estribo no primeiro vão;

S_e: Espaçamento dos estribos encontrado com o seu dimensionamento.

Na fórmula anterior o valor é multiplicado por 2 visto que na verdade são dois vãos iguais e se por acaso o valor calculado para a quantidade de estribos resultar em um número decimal deve-se arredondar o valor para o próximo numero inteiro.

Vale salientar que essa quantidade calculada deve ser verificada se encaixa no comprimento disponível.

4.2.2.3. Detalhamento das armaduras negativas nos apoios

Essa armadura é dimensionada para ancorar a viga no pilar, assim sendo, ela deve entrar no pilar um valor no mínimo igual ao comprimento de ancoragem com gancho para ela anteriormente calculado e o seu gancho deve respeitar o determinado na tabela A3.5-VOL 2 do livro Araújo (2014). A parte dessa armadura que fica dentro da viga é determinada pela fórmula:

$$a \geq \begin{matrix} 0{,}15\, l + h \\ l_b + h \end{matrix} \qquad \text{Equação (48)}$$

Onde:

a: Parte da armadura que fica dentro do viga;

l_b: Comprimento de ancoragem necessário;

h: Altura da viga;

l: Comprimento verificado entre o pilar de extremidade e o pilar central.

Simplificando podemos dizer que o comprimento total da armadura nos apoios é o somatório da parte que fica dentro da viga com a seção que adentra o pilar junto com o gancho, lembrando que essa armadura fica ao lado da armadura construtiva ou da armadura longitudinal do pilar central, assim sendo ela deve ultrapassar a armadura vizinha em no

mínimo de 10Ø. E ainda temos, que salientar o fato dessa armadura existir em cada um dos apoios externos.

4.2.2.4. Detalhamento da armadura construtiva

Essa armadura deve existir sempre que houver um local na viga, no qual não foi necessário algum tipo de armadura calculada. No problema suposto a norma regente diz que sempre deve haver uma quantidade mínima de armadura na parte inferior da viga, como já foi citado anteriormente.

Assim, apenas na parte superior da viga pode acontecer de algum ramo ficar sem armação. Fica fácil dessa maneira, verificar a necessidade ou não da armadura construtiva, para tal avaliação basta somar o comprimento da armadura longitudinal no pilar central com o comprimento de ancoragem das armaduras nos apoios junto com as suas partes dentro da viga. Se esse valor for inferior ao comprimento total da viga menos duas vezes o cobrimento nominal, verifica-se a necessidade da armadura construtiva. A qual deve ter bitola com diâmetro mínimo igual ao do estribo e comprimento referente à parte sem armadura no ramo. Lembrando que para ser executada sua ancoragem nas barras vizinhas ela deve ultrapassar cada uma em no mínimo 10Ø.

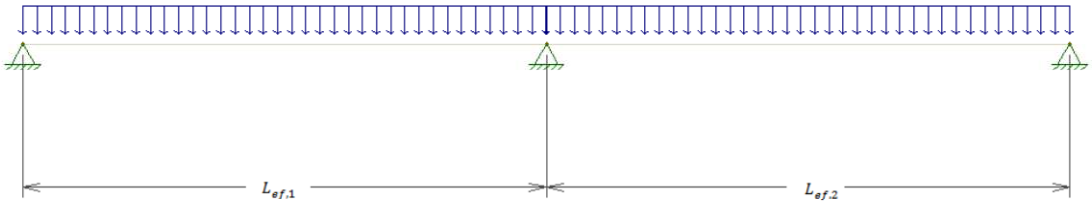
4.3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE ESTUDO

O estudo tem como base o dimensionamento de uma viga composta de dois vãos iguais, o escalonamento das suas armaduras e por fim o somatório dos custos relativos à armadura, forma e ao concreto, como já foi explicado anteriormente.

Para o cálculo foi suposto que os pilares onde a viga se apoia tinham largura de 20 cm e para o modelo estrutural foi realizada uma simplificação fazendo com que os apoios sejam considerados de segundo gênero.

Os elementos estudados foram dimensionados com cargas de 10 KN/m, 20 KN/m, 30 KN/m e 40 KN/m, nas quais ainda era acrescentado o peso próprio do elemento, por vez, distribuídas de forma uniforme sobre a estrutura, como exemplificado na figura a seguir.

Figura 10 – Modelo de cálculo para escalonamento das vigas.



Fonte: autor.

Onde:

$L_{ef,1}$: Comprimento efetivo do primeiro vão.

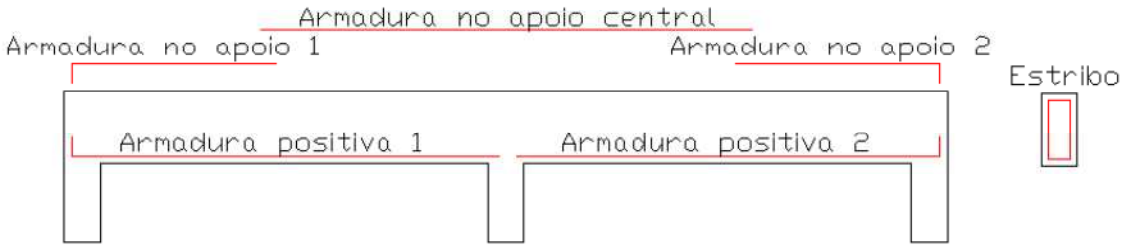
$L_{ef,2}$: Comprimento efetivo do segundo vão.

Os comprimentos efetivos dos vãos foram variados de 2 a 5 metros, para se supor vigas usuais. Além disso, a base da viga foi considerada constante e igual a 20 cm para todas as ocasiões e o peso específico do concreto armado foi tomado como de 25 KN/m³.

Ainda foram utilizados concretos C-25, C-30 e C-40, por vez em cada uma das amostras, as quais ainda tiveram a variação da classe de agressividade ambiental, a fim de presumir construções em diferentes locais.

Um ponto a se ressaltar são as armaduras a serem dimensionadas, as quais são exemplificadas na figura a seguir.

Figura 11 – Representação das armaduras presentes nas vigas em estudo.



Fonte: autor

.

4.4. CUSTO DOS MATERIAIS

Os custos dos materiais foram extraídos das tabelas SINAPI referente à cidade de João Pessoa no mês de fevereiro de 2017, para os tipos de concreto, para a fôrma e as bitolas de aço. Lembrando que não será levando em consideração os custos referentes a mão de obra para execução das vigas.

O custo relativo à fôrma retirado da SINAPI foi um custo unitário de 38,55 R$/m², pois foram supostas chapas de madeira compensada plastificada para forma de concreto de 2,20 x 1,10 m e espessura de 6mm, vale salientar que em construções usuais pode ocorrer a reutilização das fôrmas, em casos de vigas iguais, entretanto no presente trabalho foi suposto que para a execução de cada viga em estudo era necessária a confecção de uma fôrma.

Quanto ao concreto os preços são determinados pelo tipo escolhido, onde foram utilizados concretos C-25, C-30 e C-40, usinados bombeáveis com brita 0 e 1, slump = 100 ± 20mm incluindo serviço de bombeamento. Os preços estão dispostos nos quadros que se seguem.

Quadro 7 – Preços dos tipos de concreto.

Classes de concreto	Preço (R$/m³)
25	307,42
30	317,77
35	329,15
40	341,57
45	384,01

Fonte: adaptado da SINAPI, 2017.

Os preços das bitolas de aço retirados da SINAPI são referentes ao vergalhão de aço CA-50 e CA-60 (exclusivamente para a bitola de 5mm) e estão dispostos no próximo quadro.

Quadro 8 – Preços das bitolas de aço.

Aço CA-50 e CA-60	
Bitola (mm)	Preço (R$ / kg)
5	4,17
6,3	4,40
8	4,94
10	4,20
12,5	4,00
16	4,00
20	3,47
25	4,32
32	4,32

Fonte: adaptado da SINAPI, 2017.

Para o cálculo dos preços das barras de aço ainda é necessária à massa nominal por metro para cada tipo de bitola, que esta representada no quadro seguinte.

Quadro 9 – Massa nominal por metro quadrado das armaduras.

CA	Bitola (mm)	Massa Nominal (kg/m)
60	5	0,154
50	6,3	0,245
50	8	0,395
50	10	0,617
50	12,5	0,963
50	16	1,578
50	20	2,466
50	25	3,853
50	32	6,313

Fonte: Araújo, 2014.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados encontrados para o dimensionamento das vigas estão apresentados nos quadros a seguir. Nos quais observa-se a altura que gera um preço ótimo da viga, em função da variação da classe de agressividade ambiental, para cada tipo de concreto, carregamento atuante e comprimento de vão teórico. Lembrando que foi seguido o descrito no quadro 5 adaptado da NBR 6118 (ABNT, 2014). No qual existe uma recomendação da classe de concreto mínima a ser escolhida de acordo com a classe de agressividade ambiental.

Desta forma têm-se inicialmente, que foram encontrados 36 resultados para o dimensionamento das vigas de 2 vãos de 2, 3 e 4m. Entretanto, nas vigas com 5m de comprimento em cada vão foram obtidos apenas 34 amostras, pois, em duas das amostras não foi possível o cálculo da armadura negativa no apoio. Fazendo com que estas, não fossem consideradas para o estudo. Totalizando assim, 142 vigas dimensionadas com a ferramenta *Solver*.

Como foram encontrados muitos resultados, os seguintes quadros apresentam os dados obtidos discriminando-os pelo comprimento do vão teórico:

- Para vigas com vãos de 2m.

Quadro 10 - Resultados obtidos para as vigas de 2m com C-25.

C-25			
Classe de agressividade ambiental	**Carregamento (KN/m)**	**Altura da viga (cm)**	**Preço ótimo (R$)**
I	10	15	155,039
II	10	15	158,809
III	10	-	-
IV	10	-	-
I	20	20	189,732
II	20	20	192,765
III	20	20	-
IV	20	20	-
I	30	20	219,141
II	30	25	218,174
III	30	-	-
IV	30	-	-
I	40	25	253,712
II	40	25	252,693
III	40	-	-
IV	40	-	-

Fonte: autor.

Quadro 11 - Resultados obtidos para as vigas de 2m com C-30.

C-30			
Classe de agressividade ambiental	**Carregamento (KN/m)**	**Altura da viga (cm)**	**Preço ótimo (R$)**
I	10	15	158,258
II	10	15	168,384
III	10	15	171,873
IV	10	-	-
I	20	15	186,575
II	20	15	193,861
III	20	20	196,583
IV	20	-	-
I	30	20	218,571
II	30	20	218,708
III	30	20	222,989
IV	30	-	-
I	40	20	250,129
II	40	25	253,787
III	40	25	251,683
IV	40	-	-

Fonte: autor.

Quadro 12 - Resultados obtidos para as vigas de 2m com C-40.

C-40			
Classe de agressividade ambiental	**Carregamento (KN/m)**	**Altura da viga (cm)**	**Preço ótimo (R$)**
I	10	15	160,399
II	10	15	159,562
III	10	15	174,570
IV	10	20	186,807
I	20	15	186,018
II	20	20	202,713
III	20	20	204,199
IV	20	20	202,758
I	30	20	210,882
II	30	20	219,440
III	30	20	225,153
IV	30	20	235,227
I	40	20	246,869
II	40	20	251,684
III	40	25	256,471
IV	40	25	261,729

Fonte: autor.

- Para vigas com vãos de 3m.

Quadro 13 - Resultados obtidos para as vigas de 3m com C-25.

C-25			
Classe de agressividade ambiental	**Carregamento (KN/m)**	**Altura da viga (cm)**	**Preço ótimo (R$)**
I	10	20	291,376
II	10	20	296,815
III	10	-	-
IV	10	-	-
I	20	25	369,615
II	20	25	370,315
III	20	-	-
IV	20	-	-
I	30	30	446,801
II	30	30	446,844
III	30	-	-
IV	30	-	-
I	40	35	520,131
II	40	35	522,776
III	40	-	-
IV	40	-	-

Fonte: autor.

Quadro 14 - Resultados obtidos para as vigas de 3m com C-30.

C-30			
Classe de agressividade ambiental	**Carregamento (KN/m)**	**Altura da viga (cm)**	**Preço ótimo (R$)**
I	10	20	299,850
II	10	20	297,800
III	10	20	307,739
IV	10	-	-
I	20	25	365,817
II	20	25	370,110
III	20	25	369,558
IV	20	-	-
I	30	30	437,939
II	30	30	439,679
III	30	30	443,267
IV	30	-	-
I	40	30	501,504
II	40	30	518,332
III	40	30	525,001
IV	40	-	-

Fonte: autor.

Quadro 15 - Resultados obtidos para as vigas de 3m com C-40.

C-40			
Classe de agressividade ambiental	**Carregamento (KN/m)**	**Altura da viga (cm)**	**Preço ótimo (R$)**
I	10	20	297,016
II	10	20	295,710
III	10	20	303,086
IV	10	20	315,204
I	20	25	378,054
II	20	25	378,575
III	20	25	379,307
IV	20	25	375,969
I	30	25	433,729
II	30	25	440,809
III	30	30	437,996
IV	30	30	445,215
I	40	30	500,758
II	40	30	509,230
III	40	30	509,181
IV	40	30	510,352

Fonte: autor.

- Para vigas com vãos de 4m.

Quadro 16 - Resultados obtidos para as vigas de 4m com C-25.

C-25			
Classe de agressividade ambiental	**Carregamento (KN/m)**	**Altura da viga (cm)**	**Preço ótimo (R$)**
I	10	25	469,676
II	10	25	470,859
III	10	-	-
IV	10	-	-
I	20	30	602,801
II	20	30	608,624
III	20	-	-
IV	20	-	-
I	30	40	752,719
II	30	40	749,706
III	30	-	-
IV	30	-	-
I	40	40	891,508
II	40	45	913,914
III	40	-	-
IV	40	-	-

Fonte: autor.

Quadro 17 - Resultados obtidos para as vigas de 4m com C-30.

C-30			
Classe de agressividade ambiental	**Carregamento (KN/m)**	**Altura da viga (cm)**	**Preço ótimo (R$)**
I	10	25	489,650
II	10	25	485,876
III	10	25	487,440
IV	10	-	-
I	20	30	583,614
II	20	30	600,736
III	20	30	599,011
IV	20	-	-
I	30	35	717,836
II	30	35	733,562
III	30	35	743,952
IV	30	-	-
I	40	40	847,672
II	40	40	851,647
III	40	40	898,131
IV	40	-	-

Fonte: autor.

Quadro 18 - Resultados obtidos para as vigas de 4m com C-40.

C-40			
Classe de agressividade ambiental	**Carregamento (KN/m)**	**Altura da viga (cm)**	**Preço ótimo (R$)**
I	10	20	460,958
II	10	25	473,570
III	10	25	493,082
IV	10	25	507,463
I	20	30	598,379
II	20	30	595,349
III	20	30	601,900
IV	20	30	599,542
I	30	35	707,399
II	30	35	708,978
III	30	35	743,184
IV	30	35	740,368
I	40	40	839,079
II	40	40	844,856
III	40	40	853,684
IV	40	40	860,046

Fonte: autor.

- Para vigas com vãos de 5m.

Quadro 19 - Resultados obtidos para as vigas de 5m com C-25.

C-25			
Classe de agressividade ambiental	**Carregamento (KN/m)**	**Altura da viga (cm)**	**Preço ótimo (R$)**
I	10	30	687,275
II	10	30	684,266
III	10	-	-
IV	10	-	-
I	20	40	915,521
II	20	40	912,807
III	20	-	-
IV	20	-	-
I	30	45	1105,336
II	30	45	1125,382
III	30	-	-
IV	30	-	-
I	40	50	1332,170
II	40	-	-
III	40	-	-
IV	40	-	-

Fonte: autor.

Quadro 20 - Resultados obtidos para as vigas de 5m com C-30.

C-30			
Classe de agressividade ambiental	**Carregamento (KN/m)**	**Altura da viga (cm)**	**Preço ótimo (R$)**
I	10	25	657,165
II	10	30	707,296
III	10	30	696,836
IV	10	-	-
I	20	35	890,352
II	20	35	889,506
III	20	35	913,882
IV	20	-	-
I	30	40	1115,335
II	30	45	1103,813
III	30	45	1112,438
IV	30	-	-
I	40	45	1290,648
II	40	50	1290,223
III	40	50	1302,567
IV	40	-	-

Fonte: autor.

Quadro 21 - Resultados obtidos para as vigas de 5m com C-40.

C-40			
Classe de agressividade ambiental	**Carregamento (KN/m)**	**Altura da viga (cm)**	**Preço ótimo (R$)**
I	10	25	672,070
II	10	25	682,734
III	10	30	724,679
IV	10	30	744,194
I	20	35	892,532
II	20	35	892,219
III	20	35	895,434
IV	20	35	934,525
I	30	40	1053,259
II	30	40	1077,778
III	30	40	1090,117
IV	30	45	1115,135
I	40	45	1225,442
II	40	45	1239,795
III	40	45	1297,931
IV	40	-	-

Fonte: autor.

Com os dados expostos, vê-se que o maior custo obtido foi para a viga de vãos de 5m, com classe de agressividade ambiental I, concreto C-25 e carregamento de 40 KN/m e o menor foi encontrado na viga de vãos de 2m, com classe de agressividade ambiental I, concreto C-25 e carregamento de 10 KN/m.

Essas observações mostram que quanto maior o vão e o carregamento maior será o preço ótimo encontrado. Enquanto, a variação da classe de agressividade ambiental e do tipo de concreto acarretam mudanças no preço, que nem sempre trazem um maior custo.

Com isso, nos seguintes tópicos serão melhor analisadas as relações entre as características que definem a viga e o preço ótimo encontrado.

5.1. RELAÇÃO ALTURA - VÃO TEÓRICO

Algumas bibliografias acerca de dimensionamento sugerem que a altura inicial de pré-projeto deve ser de 10 % do vão teórico, como por exemplo, é abordado por Margarido (2007) e Pinheiro (2007). Com isso foi calculado tal relação e os dados estão descritos no seguinte quadro.

Quadro 22 – Relação altura / vão.

Vãos (m)	Quantidade	Altura (cm)	Altura / Vão
2	11	15	7,50%
	18	20	10,00%
	7	25	12,50%
3	9	20	6,67%
	11	25	8,33%
	14	30	10,00%
	2	35	11,67%
4	1	20	5,00%
	8	25	6,25%
	9	30	7,50%
	7	35	8,75%
	10	40	10,00%
	1	45	11,25%
5	3	25	5,00%
	6	30	6,00%
	7	35	7,00%
	6	40	8,00%
	9	45	9,00%
	3	50	10,00%

Fonte: autor.

De acordo com o quadro acima, pôde-se notar que os dados obtidos da relação entre altura e vão ficaram em torno do valor de 10 %. Entretanto outros resultados foram encontrados, principalmente para as vigas de 5m, nas quais o valor de 10 % não foi o que mais teve recorrência. Outro ponto a se destacar é que quanto maior o vão teórico mais tipos de alturas podem ser utilizadas, onde nota-se que é possível utilizar relações altura/vão menores, com o aumento do vão.

Assim, de acordo com os dados conseguidos supõem-se que para vigas com vão teórico maior ou igual a 5 m a altura de pré-projeto pode ser considerada menor que 10%, principalmente se ocorrer carregamentos pequenos sobre à estrutura.

Pode-se dizer então que a dimensão sugerida para pré-projeto está de acordo com os dados alcançados neste trabalho. Todavia, a altura de projeto final deve ser sempre otimizada, visto que sua determinação depende de várias características e não apenas do vão teórico.

5.2. CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL X PREÇO DA VIGA

Observou-se ver que para a mesma classe do concreto, carregamento e vão teórico, a mudança de preço relativa à variação apenas da classe de agressividade não gera grande alteração no preço.

A média entre a variação do menor para o maior preço referente as características citadas anteriormente é dada no próximo quadro, para cada vão.

Quadro 23 – Variação do preço referente a mudança da classe de agressividade ambiental.

Vão	Δ
2 m	5,56%
3 m	2,09%
4 m	3,02%
5 m	3,52%

Fonte: autor.

Com isso vê-se que a variação do preço é muito pequena, quando se altera apenas a classe de agressividade ambiental. O que pode ser explicado pelo fato de, mantendo-se a classe do concreto constante, a única variação que a alteração na classe de agressividade ambiental provoca é o cobrimento nominal, além do fator água-cimento que não altera os cálculos. Assim, verifica-se que em relação ao preço a determinação da classe de agressividade não é um ponto que necessita de grande estudo.

Ainda sobre a variação de preço causada pela mudança da classe de agressividade ambiental, na maioria dos casos o aumento da classe acarreta num aumento do preço, mesmo que este, como já explanado, seja pequeno. Entretanto, em algumas vigas ocorreu uma diminuição do custo, fato esse que se explica por que, nesses casos, a mudança da classe de agressividade não altera a área de aço necessária no dimensionamento. Assim, é utilizada a mesma armadura, todavia com comprimento menor. Temos então que, essa relação entre perda de aço e ganho de concreto resultou em diminuição do preço em alguns casos.

5.3. CARREGAMENTO X PREÇO DA VIGA

Neste tópico mostrar-se-á a correlação entre o carregamento sobre a viga e o seu preço ótimo. Como já visto, a variação do preço apenas pela alteração da classe de agressividade ambiental não gera grandes mudanças. Assim, serão pegos os dados médios para cada grupo de classe de agressividade.

A fim de verificar a mudança de preço para o mesmo tipo de concreto e vão teórico, bem como o acréscimo percentual apresentado em cada grupo de mesmo vão e classe de concreto, em relação ao valor correspondente ao custo obtido com o menor carregamento.

Para a apresentação destes dados será utilizado um código para discriminar as vigas em estudo, que possuem o código base: Viga-AA-BB-CC.

Onde:

- AA representa o comprimento dos vãos teóricos em metros;
- BB representa a classe do concreto utilizado em MPa;
- CC representa o carregamento sobre a viga em KN/m.

Quadro 24 – Resultados referentes à mudança da carga para vigas.

Código	Preço (R$)	Aumento percentual
Viga-2-25-10	156,92	0,00%
Viga-2-25-20	191,25	21,88%
Viga-2-25-30	218,66	39,34%
Viga-2-25-40	253,2	61,36%
Viga-2-30-10	166,17	0,00%
Viga-2-30-20	192,34	15,75%
Viga-2-30-30	220,09	32,45%
Viga-2-30-40	251,87	51,57%
Viga-2-40-10	170,33	0,00%
Viga-2-40-20	198,92	16,79%
Viga-2-40-30	222,68	30,73%
Viga-2-40-40	254,19	49,23%
Viga-3-25-10	294,1	0,00%
Viga-3-25-20	369,97	25,80%
Viga-3-25-30	446,82	51,93%
Viga-3-25-40	521,45	77,30%
Viga-3-30-10	301,8	0,00%
Viga-3-30-20	368,49	22,10%
Viga-3-30-30	440,3	45,89%
Viga-3-30-40	514,95	70,63%
Viga-3-40-10	302,75	0,00%
Viga-3-40-20	377,98	24,85%
Viga-3-40-30	439,44	45,15%
Viga-3-40-40	507,38	67,59%
Viga-4-25-10	470,27	0,00%
Viga-4-25-20	605,71	28,80%
Viga-4-25-30	751,21	59,74%
Viga-4-25-40	902,71	91,96%
Viga-4-30-10	487,66	0,00%
Viga-4-30-20	594,45	21,90%
Viga-4-30-30	731,78	50,06%

Código	Preço (R$)	Aumento percentual
Viga-4-30-40	865,82	77,55%
Viga-4-40-10	483,77	0,00%
Viga-4-40-20	598,79	23,78%
Viga-4-40-30	724,98	49,86%
Viga-4-40-40	849,42	75,58%
Viga-5-25-10	685,77	0,00%
Viga-5-25-20	914,16	33,30%
Viga-5-25-30	1115,36	62,64%
Viga-5-25-40	1332,17	94,26%
Viga-5-30-10	687,1	0,00%
Viga-5-30-20	897,91	30,68%
Viga-5-30-30	1110,53	61,63%
Viga-5-30-40	1294,48	88,40%
Viga-5-40-10	705,92	0,00%
Viga-5-40-20	903,68	28,01%
Viga-5-40-30	1084,07	53,57%
Viga-5-40-40	1254,39	77,70%

Fonte: autor.

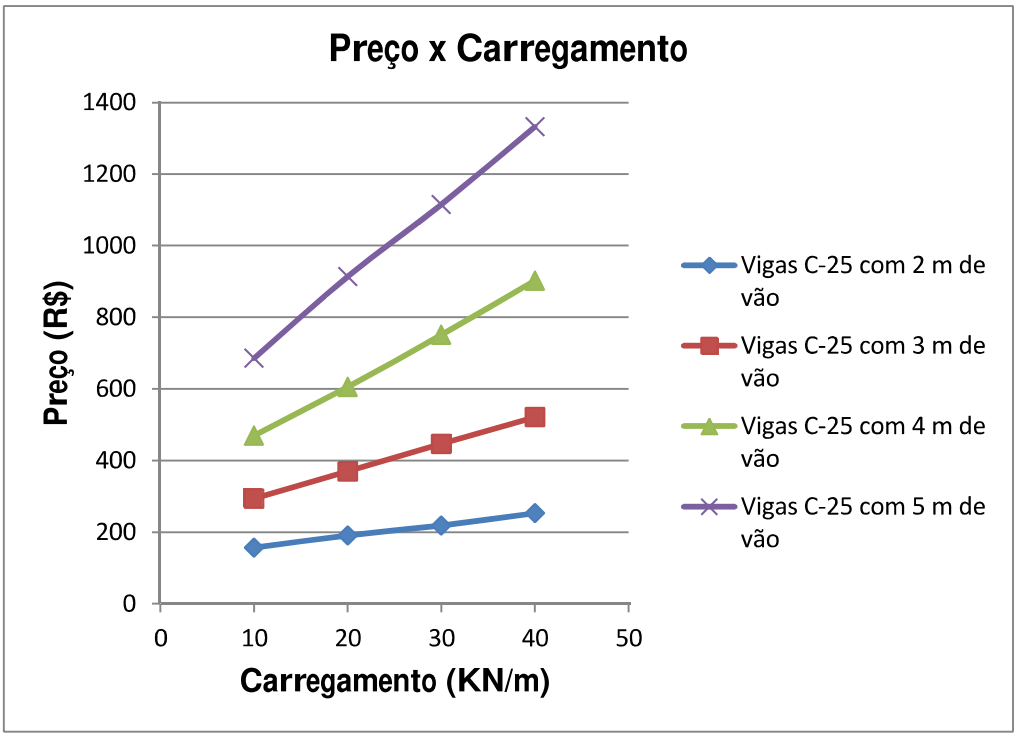
Verifica-se que em todos os casos o aumento do carregamento sobre o elemento causou um acréscimo no preço, o que já era esperado. Pelo fato de que esse aumento da carga acarreta em maiores esforços de cálculo e assim, consequentemente, num gasto maior de armadura.

Desta forma, em relação ao preço, vê-se a necessidade da realização de uma boa analise dos carregamentos sobre a estrutura a ser dimensionada, para que não sejam cometidos erros referentes ao superdimensionamento, onde a utilização de um carregamento maior pode resultar em acréscimo considerável no preço.

Para melhor apresentar esse aumento referente ao acréscimo do carregamento, a seguir são apresentados gráficos relacionando o carregamento com o preço ótimo encontrado.

- Para as vigas com concreto C-25:

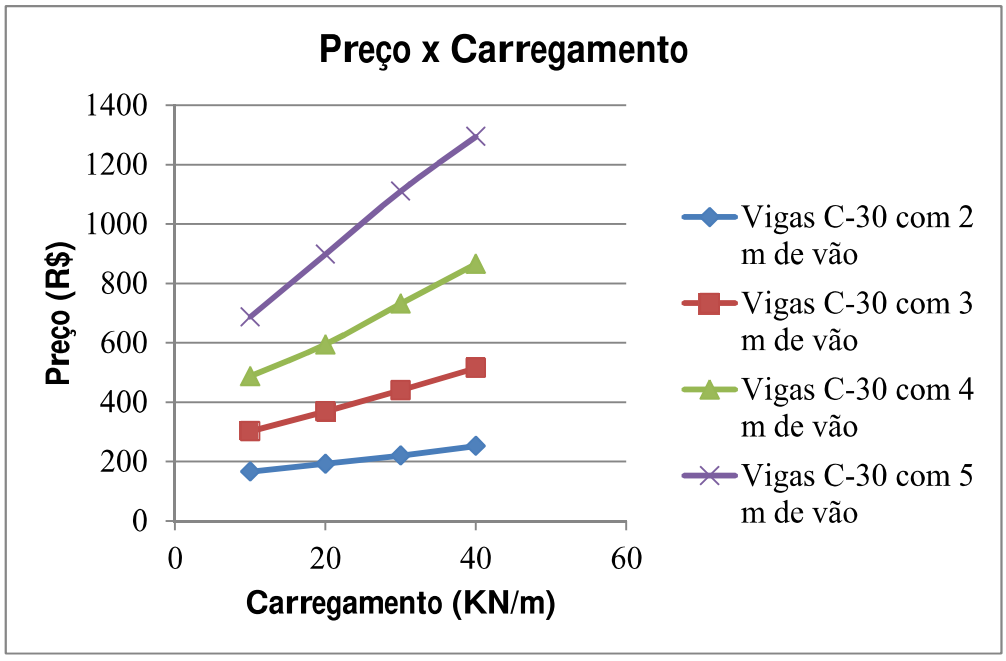
Figura 12 – Gráfico Preço x Carregamento para vigas com C-25.



Fonte: autor.

- Para as vigas com concreto C-30:

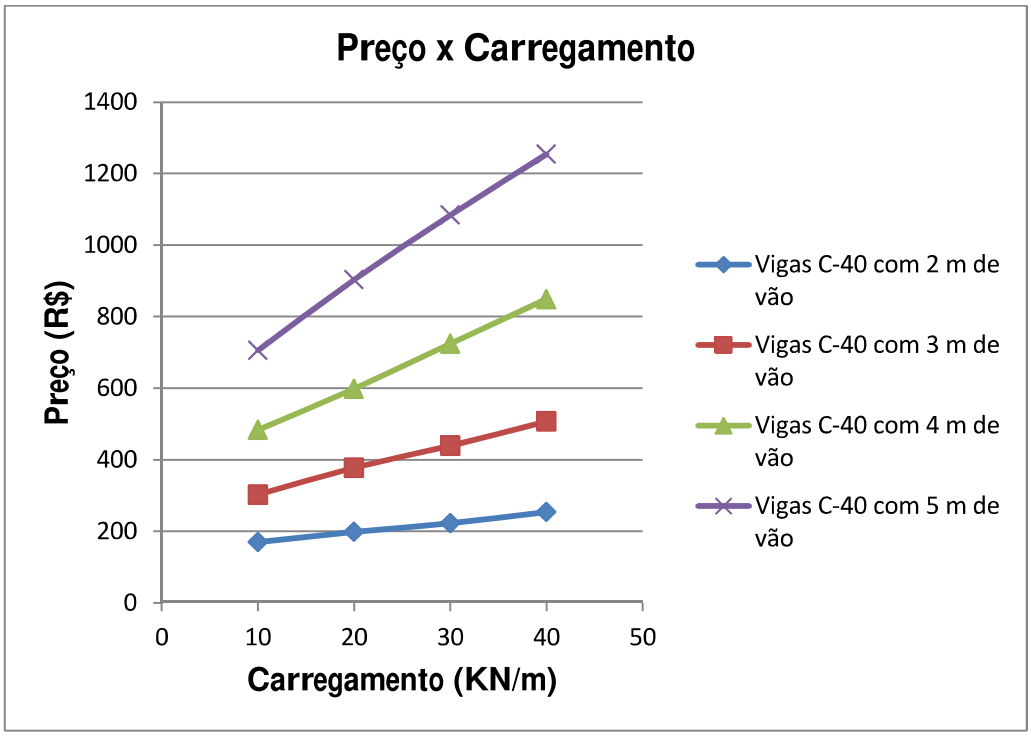
Figura 13 – Gráfico Preço x Carregamento para vigas com C-30.



Fonte: autor.

- Para as vigas com concreto C-40:

Figura 14 – Gráfico Preço x Carregamento para vigas com C-40



Fonte: autor.

A partir da análise dos gráficos anteriores observou-se, que a configuração geral de cada um, ficou bastante semelhante. Além disso, vê-se uma maior inclinação nas retas representativas do aumento do preço com o carregamento, nas series com maiores vãos teóricos.

Permitindo assim, afirmar que existe uma maior variação no preço das vigas, pelo aumento do carregamento naquelas com maiores vãos teóricos. Fato esse que pode ser explicado, por que o aumento do vão causa maiores esforços de cálculo.

5.4. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO X PREÇO DA VIGA

Outra das características importantes para o preço das vigas é a sua resistência característica a compressão. Pelo fato de determinar o preço do concreto escolhido, essa propriedade tem grande importância no seu dimensionamento. Com isso, sabe-se que o tipo utilizado deve ser bastante analisado.

A seguir estão apresentados os dados que verificam a variação do preço ótimo das vigas em função da classe de concreto. Onde também será utilizado um código, que tem como base: Viga-DD-EE-FF.

Onde

- DD representa o comprimento dos vãos teóricos em metros;
- EE representa a classe do concreto em MPa;
- FF representa o carregamento sobre a viga em KN/m.

Quadro 25 – Resultados referentes à mudança da classe de concreto nas vigas.

Código	Preço (R$)
Viga-2-25-10	156,92
Viga-2-30-10	166,17
Viga-2-40-10	170,33
Viga-2-25-20	191,25
Viga-2-30-20	192,34
Viga-2-40-20	198,92
Viga-2-25-30	218,66
Viga-2-30-30	220,09
Viga-2-40-30	222,68
Viga-2-25-40	253,2
Viga-2-30-40	251,87
Viga-2-40-40	254,19
Viga-3-25-10	294,1
Viga-3-30-10	301,8
Viga-3-40-10	302,75
Viga-3-25-20	369,97
Viga-3-30-20	368,49
Viga-3-40-20	377,98
Viga-3-25-30	446,82
Viga-3-30-30	440,3
Viga-3-40-30	439,44
Viga-3-25-40	521,45
Viga-3-30-40	514,95
Viga-3-40-40	507,38
Viga-4-25-10	470,27
Viga-4-30-10	487,66

Código	Preço (R$)
Viga-4-40-10	483,77
Viga-4-25-20	605,71
Viga-4-30-20	594,45
Viga-4-40-20	598,79
Viga-4-25-30	751,21
Viga-4-30-30	731,78
Viga-4-40-30	724,98
Viga-4-25-40	902,71
Viga-4-30-40	865,82
Viga-4-40-40	849,42
Viga-5-25-10	685,77
Viga-5-30-10	687,1
Viga-5-40-10	705,92
Viga-5-25-20	914,16
Viga-5-30-20	897,91
Viga-5-40-20	903,68
Viga-5-25-30	1115,36
Viga-5-30-30	1110,53
Viga-5-40-30	1084,07
Viga-5-25-40	1332,17
Viga-5-30-40	1294,48
Viga-5-40-40	1254,39

Fonte: autor.

Com esses dados verifica-se que nem em todos os casos o aumento da classe do concreto resultou em um acréscimo no preço ótimo. Assim, os próximos quadros mostram a maior variação percentual verificada entre o maior e o menor preço resultante, para cada tipo de carregamento e vão teórico.

Quadro 26 – Variação percentual verificada entre o maior e o menor preço resultante para cada tipo de carregamento e vão teórico.

Vão (m)	Carregamento (KN/m)	Variação percentual
2	10	8,55%
	20	4,01%
	30	1,84%
	40	0,92%
3	10	2,94%
	20	2,57%
	30	1,68%
	40	2,77%
4	10	3,70%
	20	1,89%
	30	3,62%
	40	6,27%
5	10	2,94%
	20	1,81%
	30	2,89%
	40	6,20%

Fonte: autor.

Verifica-se uma variação percentual pequena, com média geral de 3,41 %. Entretanto, como a resistência a compressão do concreto é uma característica de fundamental importância no dimensionamento das vigas, a variação encontrada, mesmo que pequena, nos mostra relevância para a decisão da escolha do tipo de concreto.

Como essa característica tem grande importância para a execução da viga, ainda pode-se explanar sobre ela que geralmente se vê aumento no preço com a utilização de concretos de resistência maior. Os dados obtidos mostram que nem sempre essa afirmação é verdadeira e sim que, ocorre uma tendência dos preços das vigas diminuírem, onde essa característica é mais vista nas vigas submetidas a carregamentos maiores e com grandes vãos.

Tal fato é verificado por que nesses casos o aumento da resistência do concreto culmina na possibilidade de diminuição da altura ótima da viga, o que resulta em uma diminuição significativa do preço da viga.

Assim, pode-se dizer que na utilização de vigas com grandes vãos e submetidas a carregamentos de maior intensidade, o emprego de concretos com maior resistência além de

diminuir a altura ótima, deixando a viga mais esbelta, também vem a diminuir o seu preço final.

5.5. RESULTADOS REFERENTES ÀS CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS OBTIDAS PELO PROGRAMA

O programa de otimização teve como principal função encontrar o preço mínimo da viga, diante de determinadas restrições. Entretanto, as variáveis de projeto também foram encontradas pelo programa, as quais foram:

Quadro 27 – Variáveis de projeto.

K_V
$K_{M1\ e\ M2}$
K_{M3}
d'_1
d'_3
$K_{\ Apoio\ 1}$
$K_{\ Apoio\ 2}$
h

Fonte: autor.

Esses valores já foram caracterizados anteriormente, mas relembrando:

$K_{V:}$ Posição em ordem crescente da armadura de aço que possui área imediatamente maior, mais próxima a necessária para o estribo referente aos vãos.

$K_{M1\ e\ M2}$: Posição em ordem crescente da armadura de aço que possui área imediatamente maior, mais próxima a necessária para os momentos positivos no primeiro e segundo vão.

K_{M3}: Posição em ordem crescente da armadura de aço que possui área imediatamente maior, mais próxima a necessária para o momento negativo no apoio intermediário.

d'_1: Altura inicial suposta para a diferença entre a altura útil e total da viga, para a armadura referente ao momento negativo nos vãos.

d'_3: Altura inicial suposta para a diferença entre a altura útil e total da viga, para a armadura referente ao momento positivo no apoio intermediário.

$K_{\ Apoio\ 1}$: Posição em ordem crescente da armadura de aço que possui área imediatamente maior, mais próxima a necessária para o momento negativo no apoio 1.

$K_{Apoio\ 2}$: Posição em ordem crescente da armadura de aço que possui área imediatamente maior, mais próxima a necessária para o momento negativo no apoio 2.

h: Altura total da viga em estudo.

A configuração desses valores é o que resulta no preço ótimo final encontrado, por isso deve-se discutir melhor estes dados. A análise desses valores também é importante para servir de auxilio a futuros dimensionamentos, norteando a escolha para armaduras de aço e altura útil inicial.

Como a altura da viga já foi discutida anteriormente, nos próximos tópicos serão tratados os demais dados representados como variáveis de projeto.

5.5.1. Análise dos dados obtidos sobre: d'_1 e d'_3

O programa de otimização obteve os valores de d'_1 e d'_3, com limitações já citadas. Assim, os dados encontrados tiveram uma variação média percentual em torno do valor mínimo, o qual dependia do cobrimento nominal, apresentada pelos quadros a seguir.

Quadro 28 – Variação da altura útil em relação a mínima para vigas de vãos de 2 m.

Vão de 2 m
Variação média de d'
11,15%

Fonte: autor.

Quadro 29 – Variação da altura útil em relação a mínima para vigas de vãos de 3 m.

Vão de 3 m
Variação média de d'
16,21%

Fonte: autor.

Quadro 30 – Variação da altura útil em relação a mínima para vigas de vãos de 4 m.

Vão de 4 m
Variação média de d'
29,23%

Fonte: autor.

Quadro 31 – Variação da altura útil em relação a mínima para vigas de vãos de 5 m.

Vão de 5 m
Variação média de d'
29,35%

Fonte: autor.

Com isso nota-se que os valores da diferença entre a altura da viga e a altura útil ficaram próximos ao valor mínimo. Observando-se que essa variação cresce com o aumento do vão teórico.

5.5.2. Análise dos dados obtidos sobre: K_V

O valor de K_V representa nada mais que a armadura de aço transversal a ser escolhida para a estrutura. Onde $K_V = 1$ resultava na armadura que possuísse área de aço mais próxima à necessária, $K_V = 2$ na segunda armadura que possuísse área de aço mais próxima à necessária e assim sucessivamente. Diante do exposto, foram encontrados os seguintes dados.

Quadro 32 – Resultados para K_V encontrados em vigas de 2 m.

Vão (m)	K_v	Quantidade	Porcentagem
2	1	23	63,89%
	2	3	8,33%
	3	0	0,00%
	4	10	27,78%

Fonte: autor.

Quadro 33 – Resultados para K_V encontrados em vigas de 3 m.

Vão (m)	K_v	Quantidade	Porcentagem
3	1	11	30,56%
	2	10	27,78%
	3	4	11,11%
	4	10	27,78%
	5	1	2,78%

Fonte: autor.

Quadro 34 – Resultados para K_V encontrados em vigas de 4 m.

Vão (m)	K_v	Quantidade	Porcentagem
4	1	11	30,56%
	2	11	30,56%
	3	7	19,44%
	4	7	19,44%

Fonte: autor.

Quadro 35 – Resultados para K_V encontrados em vigas de 5 m.

Vão (m)	K_v	Quantidade	Porcentagem
5	1	14	41,18%
	2	13	38,24%
	3	3	8,82%
	4	4	11,76%

Fonte: autor.

Com esses dados vê-se que visando o preço ótimo da viga a armadura de aço transversal deve ser escolhida dentre as armaduras que possuírem Kv entre 1 e 4. Ou seja, a fim de determinar um menor custo da viga verifica-se que é importante escolher uma das 4 menores áreas de aço para a armadura transversal que sejam maiores que a necessária.

Além desse fato, foi verificado que para os estribos escolhidos optou-se na maioria das vezes aqueles que tinham a menor bitola e o maior espaçamento, nessa ordem de importância para escolha, dentre os disponíveis de acordo com a área de aço necessária.

5.5.3. Análise dos dados obtidos sobre: $K_{M1\ e\ M2}$ e K_{M3}

Esses dados representam as armaduras longitudinais inferiores e superiores de flexão, a mesma explicação dada para K_V se aplica para essas características. Assim, temos os dados encontrados com a otimização.

Quadro 36 – Resultados para $K_{M1\ e\ M2}$ encontrados em vigas de 2 m.

Vão (m)	$K_{M1\ e\ M2}$	Quantidade	Porcentagem
2	1	20	55,56%
	2	7	19,44%
	3	9	25,00%

Fonte: autor.

Quadro 37 – Resultados para K_{M3} encontrados em vigas de 2 m.

Vão (m)	K_{M3}	Quantidade	Porcentagem
2	1	17	47,22%
	2	8	22,22%
	3	7	19,44%
	4	4	11,11%

Fonte: autor.

Quadro 38 – Resultados para $K_{M1\ e\ M2}$ encontrados em vigas de 3 m.

Vão (m)	$K_{M1\ e\ M2}$	Quantidade	Porcentagem
3	1	21	58,33%
	2	8	22,22%
	3	7	19,44%

Fonte: autor.

Quadro 39 – Resultados para K_{M3} encontrados em vigas de 3 m.

Vão (m)	K_{M3}	Quantidade	Porcentagem
3	1	21	58,33%
	2	8	22,22%
	3	2	5,56%
	4	3	8,33%
	5	2	5,56%

Fonte: autor.

Quadro 40 – Resultados para $K_{M1\ e\ M2}$ encontrados em vigas de 4 m.

Vão (m)	$K_{M1\ e\ M2}$	Quantidade	Porcentagem
4	1	19	52,78%
	2	15	41,67%
	3	2	5,56%

Fonte: autor.

Quadro 41 – Resultados para K_{M3} encontrados em vigas de 4 m.

Vão (m)	K_{M3}	Quantidade	Porcentagem
4	1	16	44,44%
	2	13	36,11%
	3	2	5,56%
	4	4	11,11%
	5	0	0,00%
	6	1	2,78%

Fonte: autor.

Quadro 42 – Resultados para $K_{M1\ e\ M2}$ encontrados em vigas de 5 m.

Vão (m)	$K_{M1\ e\ M2}$	Quantidade	Porcentagem
5	1	17	50,00%
	2	10	29,41%
	3	1	2,94%
	4	1	2,94%
	5	5	14,71%

Fonte: autor.

Quadro 43 – Resultados para K_{M3} encontrados em vigas de 5 m.

Vão (m)	K_{M3}	Quantidade	Porcentagem
5	1	11	32,35%
	2	12	35,29%
	3	4	11,76%
	4	4	11,76%
	5	2	5,88%
	6	1	2,94%

Fonte: autor.

Com o apresentado, vê-se que tanto $K_{M1\ e\ M2}$ quanto K_{M3} tem a maioria dos seus valores entre 1 e 3, apenas as vigas de 5m de vão possuem valores de $K_{M1\ e\ M2}$ e K_{M3} acima de 3 em quantidades consideráveis. Assim, visando um menor custo da viga verifica-se que é importante escolher uma das 3 menores áreas de aço para a armadura longitudinal que sejam maiores que a necessária.

Também é importante ressaltar que os dados referentes às bitolas não tiveram uma regra a ser seguida para sua escolha. Entretanto todas as vigas calculadas pelo método de otimização utilizado foram bem armadas, tendo sua altura e largura necessárias próximas as disponíveis.

Esse ponto pode ser explicado pelo fato de que desta forma a seção da viga tem uma contribuição mais bem aproveitada. Contudo dificuldades referentes à armação poderiam ser encontradas na execução destas vigas, pelo fato da sua grande quantidade de aço.

5.5.4. Análise dos dados obtidos sobre: $K_{Apoio\ 1}$ e $K_{Apoio\ 2}$

Os valores para $K_{Apoio\ 1}$ e $K_{Apoio\ 2}$ são iguais pois as vigas possuem vãos com mesmas dimensões, esses valores representam as armaduras negativas de ancoragem nos apoios

extremos. A mesma explicação dada para K_V se aplica para essas características. Assim, temos os dados encontrados com a otimização.

Quadro 44 – Resultados para K_{Apoio} encontrados em vigas de 2 m.

Vão (m)	K_{Apoio}	Quantidade	Porcentagem
2	1	30	83,33%
	2	5	13,89%
	3	0	0,00%
	4	0	0,00%
	5	1	2,78%

Fonte: autor.

Quadro 45 – Resultados para K_{Apoio} encontrados em vigas de 3 m.

Vão (m)	K_{Apoio}	Quantidade	Porcentagem
3	1	30	83,33%
	2	0	0,00%
	3	2	5,56%
	4	3	8,33%
	5	0	0,00%
	6	1	2,78%

Fonte: autor.

Quadro 46 – Resultados para K_{Apoio} encontrados em vigas de 4 m.

Vão (m)	K_{Apoio}	Quantidade	Porcentagem
4	1	25	69,44%
	2	0	0,00%
	3	3	8,33%
	4	4	11,11%
	5	2	5,56%
	6	0	0,00%
	7	0	0,00%
	8	1	2,78%
	9	1	2,78%

Fonte: autor.

Quadro 47 – Resultados para K_{Apoio} encontrados em vigas de 5 m.

Vão (m)	K_{Apoio}	Quantidade	Porcentagem
5	1	16	47,06%
	2	6	17,65%
	3	0	0,00%
	4	2	5,88%
	5	6	17,65%
	6	4	11,76%

Fonte: autor.

Têm-se, que várias armaduras foram utilizadas, entretanto, os valores para K_{Apoio}, foram na maioria das vezes igual a 1. Analisando os dados, foi concluído que a escolha do K_{Apoio} deve ser feita da seguinte forma, a fim de minimizar o custo da estrutura.

O preferencial é se escolher um valor igual a 1, entretanto, esse dado deve resultar em uma armadura que tenha configuração apta a se adequar a largura disponível da viga e resulte num comprimento de ancoragem menor que o disponível. Se a armadura não seguir essas restrições é escolhido um K_{Apoio} maior e verificado tais condições.

5.6. RESULTADOS REFERENTES AO PREÇO DO CONCRETO, AÇO E FÔRMA

O preço geral das vigas é composto por três características: o concreto, o aço e a forma. Assim, agora será analisado o percentual de cada um desses componentes, em relação ao preço total da viga. Com isso, foram feitas as médias dos valores para cada vão individualmente e desta forma, encontrados os seguintes dados.

- Para vigas de vãos de 2 m cada:

Quadro 48 – Resultados para o preço: concreto, aço e forma em vigas de vãos de 2 m.

	Preço (R$)	Porcentagem
Concreto	51,87	24,93%
Aço	65,59	31,53%
Fôrma	90,59	43,54%
Total	208,05	100,00%

Fonte: autor.

- Para vigas de vãos de 3 m cada:

Quadro 49 – Resultados para o preço: concreto, aço e forma em vigas de vãos de 3 m.

	Preço (R$)	Porcentagem
Concreto	104,44	25,65%
Aço	134,02	32,92%
Fôrma	168,66	41,43%
Total	407,12	100,00%

Fonte: autor.

- Para vigas de vãos de 4 m cada:

Quadro 50 – Resultados para o preço: concreto, aço e forma em vigas de vãos de 4 m.

	Preço (R$)	Porcentagem
Concreto	172,27	25,63%
Aço	234,59	34,90%
Fôrma	265,35	39,47%
Total	672,21	100,00%

Fonte: autor.

- Para vigas de vãos de 5 m cada:

Quadro 51 – Resultados para o preço: concreto, aço e forma em vigas de vãos de 5 m.

	Preço (R$)	Porcentagem
Concreto	253,00	25,33%
Aço	367,52	36,80%
Fôrma	378,27	37,87%
Total	998,80	100,00%

Fonte: autor.

Com os dados acima apresentados vê-se que, os valores médios mostram o concreto como o parcela de menor contribuição no preço seguido pelo aço e por fim pela fôrma. Nas vigas com vãos de 5 m a porcentagem referente ao aço e a fôrma tiveram grande proximidade, onde em algumas ocasiões o valor do aço foi superior. Essa característica também é vista nas demais vigas. Assim, pode-se dizer que o aumento do vão acarreta numa proximidade da porcentagem referente ao preço do aço e da fôrma.

Como já foi discutida, a escolha do concreto para execução, bem como a área de aço utilizada nas diversas armaduras, um ponto importante a se verificar neste tópico é sobre a fôrma utilizada, por que este elemento possuiu nas médias de todas as vigas a maior porcentagem sobre o preço final.

Assim vê-se que pesquisar sobre materiais mais duráveis, analisar o seu reaproveitamento ou aplicar outros com um melhor custo benefício, para a utilização das fôrmas, pode trazer diminuição significativa no preço da estrutura, lembrando que no estudo realizado foi suposto que para a execução de cada viga também seria confeccionada uma fôrma. Com isso, caso fosse considerado um fator de reutilização para as fôrmas, o custo final das vigas teria uma redução significativa.

Os resultados mostram também que as porcentagens são próximas. Com isso vê-se que cada componente do preço possui suma importância. Sendo assim, todos eles devem ser bem analisados e estudados antes da fixação da sua escolha.

6. CONCLUSÃO

Com o explanado sobre o preço ótimo das vigas de estudo, pode-se afirmar que a altura de pré-projeto para os elementos, igual a 10 % do vão teórico, que é sugerida por alguns autores, encaixou-se nos dados encontrados, mostrando que é um ótimo valor inicial para adoção no dimensionamento de vigas de concreto armado, pois foi a relação mais encontrada nos cálculos. Entretanto, também viu-se que quão maior o vão da viga mais alturas ótimas são encontradas quando se varia as suas características, onde verificou-se que para vigas com vão teórico maior ou igual a 5m, pode ser utilizada uma relação menor que a citada, confirmando a necessidade de um dimensionamento detalhado para cada elemento.

A variação apenas da classe de agressividade ambiental no dimensionamento das vigas não gerou mudanças significativas no seu preço ótimo. Tendo sido encontrada uma variação no preço final de 5,56% para vigas com vãos de 2 metros, de 2,09 % para as de 3 metros, de 3,02 % para as vigas com 4 metros de vão e de 3,52 % para as de 5 metros. Com isso, conclui-se que em relação ao preço das vigas a classe de agressividade ambiental não possui influência relevante.

Referente ao carregamento atuante nas vigas, os dados encontrados mostraram que quanto maior os esforços sobre o elemento maior é o preço ótimo encontrado. Esse resultado já era esperado, pelo fato de que o acréscimo de carga acarreta maiores esforços de cálculos, trazendo assim a necessidade de uma seção com maior resistência. Ainda sobre a variação dos preços foi verificado que o aumento do vão resultava num acréscimo na variação dos custos apresentados. Além disso, analisou-se que vigas com concreto de maior resistência, sofrem menos variação no seu preço quando tem o carregamento disposto sobre elas aumentado.

A resistência característica à compressão do concreto, possui grande importância no dimensionamento das vigas. Quanto aos resultados finais expostos sobre a variação dessa característica, viu-se que o aumento da classe do concreto não resultou, em todos os casos, num acréscimo do preço ótimo da viga. Assim sendo, encontrou-se uma variação média de 3,41 % entre os preços para cada tipo de concreto. Esses dados representaram uma variação pequena, contudo essa característica deve ser bem estudada para a sua definição final, visto que ela também apresenta papel fundamental no dimensionamento da estrutura.

Ainda sobre a mudança da classe de concreto, vê-se uma tendência nos elementos de terem o seu preço ótimo diminuído quando se aumenta sua resistência à compressão, principalmente nas vigas com carregamentos maiores e maiores vãos. Como anteriormente citado, durante a apresentação dos resultados, tal episódio foi verificado por que em algumas

vigas o aumento da resistência do concreto fez com que fosse reduzida a altura da viga, diminuindo significativamente o seu preço ótimo.

Quanto aos resultados referentes às variáveis de projeto selecionadas pela ferramenta de otimização, pode-se primeiro citar que o valor utilizado para a diferença entre a altura total da viga e altura ótima, dimensão essa utilizada durante o dimensionamento, teve uma variação média percentual em relação ao valor mínimo de 11,15 % para vigas de 2 metros de vãos, de 16,21 % para aquelas com 3 metros, de 29,33 % referentes às com vãos de 4 metros e de 29,35 % para as de 5 metros de vão. Assim, pode-se concluir que esse valor gira em torno do mínimo e que essa variação cresce com o aumento do vão.

Sobre a escolha das armaduras quanto aos valores para os estribos, notou-se que visando o preço ótimo deve-se escolher uma das 4 armaduras com área de aço imediatamente maiores a necessária. Também foi visto que na escolha da armadura transversal, na maioria dos casos, àquela a ser escolhida tinha a menor bitola e o maior espaçamento, nessa ordem de importância para escolha.

Para as armaduras longitudinais, viu-se que a escolha da área de aço fica entre uma das 3 imediatamente maiores a necessária. E para as armaduras negativas nos apoios externos foi verificado que deve-se escolher a área de aço imediatamente maior a necessária, importando apenas se essa armadura trazia largura menor que a disponível na viga e um comprimento de ancoragem menor que o disponível.

Acerca das três características gerais que compõem o preço, vê-se que a fração de menor contribuição é o concreto, seguido do aço e por fim a fôrma. Também foi percebido que o aumento do vão acarreta numa proximidade da porcentagem referente ao preço do aço e da fôrma.

O aço ocupou a segunda colocação em importância para o preço ótimo visto que todas as vigas dimensionadas foram bem armadas, para que fosse melhor utilizada a sua seção. Entretanto sabe-se que tal ponto traz dificuldades quanto à armação.

A fôrma, por se apresentar como o material com maior contribuição no preço final, faz com que haja a necessidade de analisar melhor esse ponto. Com isso, observa-se que pesquisar sobre materiais mais duráveis, analisar o seu reaproveitamento ou aplicar outros com um melhor custo benefício, para a utilização das formas, é uma opção interessante visando diminuir o custo das vigas. Onde a sua reutilização, que acontece em alguns casos em obras usuais, tem fator preponderante, quanto ao preço final da viga.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para que seja continuada a pesquisa sobre o tema abordado no trabalho, são propostos os seguintes temas:

- Dimensionamento estrutural de vigas de concreto armado, fazendo o comparativo dos resultados para o preço ótimo obtido com a ferramenta utilizada com o preço referente ao dimensionamento a partir de softwares avançados ou comumente utilizados por engenheiros.
- Análise do comportamento do preço ótimo de vigas de concreto armado, levando em consideração não somente o preço devido aos materiais envolvidos, mas também ao preço referente à mão de obra para execução final da viga, a fim de conseguir uma melhor avaliação do preço global;
- Considerar durante os cálculos a utilização do estado limite de serviço, fazendo com que o dimensionamento fique mais próximo a condições reais.

REFERÊNCIAS BIBILGRÁFICAS

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

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. **Construções de concreto: Princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado**. Rio de Janeiro: Interciência, 1982.

MARGARIDO, A. F. **Fundamentos de Estruturas**. 3 ed. São Paulo: Zigurarte, 2007.

MELDRANO, M.S. (1994) **Aplicações de programação matemática em análise estrutural**. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade Estadual de São Paulo.

MILTON, José. **Curso de concreto armado**. 3 ed. Rio Grande: Dunas, 2010.

MILTON, José. **Curso de concreto armado**. 3 ed. Rio Grande: Dunas, 2014.

MILTON, José. **Projeto estrutural de edifícios de concreto armado**. 2 ed. Rio Grande: Dunas, 2009.

PINHEIRO, L. M. **Fundamentos do Concreto e Projeto de Edifícios**. Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, 2007.

SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL. Sinapi. Disponível em: <http://www.caixa.gov.br/poder-publico/apoio-poder-publico/sinapi/paginas/default.aspx>. Acesso em: 10 fev. 2017.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. **Notas de aula de flexão normal simples** – 2015. São Paulo, 2015.