



**CISNE FACULDADE DE QUIXADÁ
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

HELAYNE DA SILVA OLIVEIRA

**OTIMIZAÇÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO DE SEÇÃO RETANGULAR
EM EDIFÍCIOS DE PEQUENO PORTE UTILIZANDO A FERRAMENTA SOLVER
DO MICROSOFT EXCEL**

QUIXADÁ

2019

HELAYNE DA SILVA OLIVEIRA

OTIMIZAÇÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO DE SEÇÃO RETANGULAR
EM EDIFÍCIOS DE PEQUENO PORTE UTILIZANDO A FERRAMENTA SOLVER
DO MICROSOFT EXCEL

Artigo Científico apresentado ao Curso de Engenharia Civil da CISNE - Faculdade de Quixadá, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Bergson da Silva Matias.

QUIXADÁ

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
CISNE - Faculdade de Quixadá
Biblioteca Rachel de Queiroz
Mayra Helena de Sousa Oliveira CRB-3/1624

- O47o Oliveira, Helayne da Silva.
 Otimização de vigas de concreto armado de seção retangular em edifícios de pequeno porte utilizando a ferramenta solver do Microsoft Excel / Helayne da Silva Oliveira. – 2019.
 58 f. : il. color.
 Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – CISNE - Faculdade de Quixadá, Curso de Engenharia Civil, Quixadá, 2019.
 Orientação: Prof. Me. Bergson da Silva Matias.
1. Dimensionamento estrutural. 2. Otimização. 3. Estruturas.
I. Título.

CDD 615.82

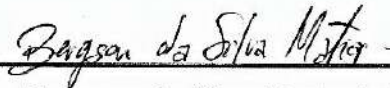
HELAYNE DA SILVA OLIVEIRA

OTIMIZAÇÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO DE SEÇÃO RETANGULAR
UTILIZANDO A FERRAMENTA SOLVER DO MICROSOFT EXCEL EM EDIFÍCIOS
DE PEQUENO PORTE

Artigo científico apresentado ao Curso de Engenharia Civil da CISNE Faculdade de Quixadá, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 02 / 12 / 2019

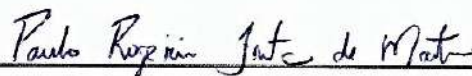
BANCA EXAMINADORA



Prof(a)Me. Bergson da Silva Matias(orientador(a))
CISNE Faculdade de Quixadá



Prof (a) Esp. Evangelista Miranda de Sousa(Membro)
CISNE Faculdade de Quixadá



Prof (a) Esp. Paulo Rogério Freitas de Matos(Membro)
CISNE Faculdade de Quixadá

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por todas as oportunidades que surgiram em minha vida, me guiando e dando forças para seguir frente aos obstáculos.

Ao meu esposo, Guartinele Batista do Nascimento, por toda a paciência, compreensão, apoio incondicional nos momentos mais difíceis de minha jornada, pelos incentivos para continuar, me mostrando que sou capaz de realizar e alcançar meus objetivos e por investir na minha formação.

Aos meus pais, Zulene Machado da Silva e José Maria Camurça Oliveira, por sempre apoiarem minhas decisões.

Ao Prof. MSc. Bergson da Silva Matias, pela excelente orientação, disponibilidade para as correções e paciência.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. Esp. Evangelista Miranda de Sousa e Prof. Esp. Paulo Rogério Freitas de Matos, pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos amigos e colegas que de alguma forma fizeram parte do meu percurso.

Por fim, a todos os professores do curso pela dedicação diária e ensinamentos.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 PROBLEMA.....	10
1.2 JUSTIFICATIVA.....	10
1.3 OBJETIVOS	11
1.3.1 OBJETIVO GERAL.....	11
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1 Conceitos gerais	11
2.1.1 Dimensionamento de vigas de concreto armado	11
2.1.2 Otimização	13
2.1.3 A ferramenta <i>solver</i>	14
2.2 Roteiro de cálculo	15
2.2.1 Hipóteses de cálculo.....	15
2.2.2 Diagrama tensão-deformação do Concreto à compressão	15
2.2.3 Aço para concreto armado.....	16
2.2.4 Estádios de fissuração.....	16
2.2.5 Domínios de deformação na ruptura.....	18
2.2.6 Dimensionamento à flexão simples	20
2.2.7 Cálculo da armadura transversal (estribos)	22
2.2.8 Classes de Agressividade Ambiental.....	23
2.2.9 Deformação em Vigas	24
3 METODOLOGIA.....	29
3.1 Elementos de um Problema de Otimização.....	30
3.1.1 Função Objetivo	30
3.1.2 Variáveis.....	32
3.1.3 Restrições	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	33
4.1 Composição de custos após a otimização	39
4.2 Relação da altura ótima x vão da viga	44
5 CONCLUSÃO.....	46
REFERÊNCIAS	47

APÊNDICE	49
APÊNDICE A – Modelo de planilha para otimização.....	49
ANEXOS.....	50
ANEXO A – Custos da composição da Fôrma	50
ANEXO B – Custos da composição da Armadura CA-50 Média	51
ANEXO C – Custos da composição da Armadura CA-50 Grossa	52
ANEXO D – Custos da composição da Armadura CA-60 Fina.....	53
ANEXO E - Custos da composição do Concreto fck 25 MPa	54
ANEXO F - Custos da composição do Concreto fck 30 MPa	55
ANEXO G - Custos da composição do Concreto fck 35 MPa.....	56
ANEXO H - Custos da composição do Concreto fck 40 MPa	57
ANEXO I - Custos da composição do Concreto fck 50 MPa.....	58

OTIMIZAÇÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO DE SEÇÃO RETANGULAR EM EDIFÍCIOS DE PEQUENO PORTE UTILIZANDO A FERRAMENTA SOLVER DO MICROSOFT EXCEL

RESUMO

Para assegurar uma obra de qualidade e garantir a sobrevivência no mercado de trabalho cada vez mais competitivo, há uma necessidade da engenharia civil em equilibrar as variáveis custo e segurança, buscando para isso formas para otimizar o custo benefício. Dessa forma, esta pesquisa tem como objetivo geral comparar o dimensionamento convencional e o dimensionamento de forma otimizada para vigas de concreto armado com seção retangular em edifícios através da utilização da ferramenta SOLVER do Microsoft Excel. E como objetivos específicos: realizar uma pesquisa bibliográfica sobre o dimensionamento de estruturas e otimização estrutural; fazer o dimensionamento convencional de uma viga de concreto armado de seção retangular; elaborar uma planilha de cálculo no Excel; fazer o dimensionamento otimizado utilizando a planilha elaborada e a ferramenta Solver do Microsoft Excel; e comparar os resultados obtidos nos dimensionamentos. Assim através de uma metodologia de natureza aplicada; abordagem: quantitativa; exploratória; E com procedimentos técnicos: experimental e bibliográfica, poderemos desenvolver os seguintes resultados: Na construção civil, é a estrutura que garante a sustentação da edificação. Existem dois tipos de dimensionamento, o convencional e o otimizado, sendo este último mais adequado para projetos que querem aliar custo e benefício. Pois, os resultados apresentados comprovam a eficiência do método de otimização e para trabalhos futuros sugere-se a aplicação desse método aliado a meios que possibilitem a reutilização das fôrmas, buscando uma padronização das seções nos problemas mais usuais, visto que é o elemento que apresentou o maior custo.

Palavras chave: Dimensionamento estrutural. Otimização. Estruturas

ABSTRACT

To ensure quality work and ensure survival in the increasingly competitive labor market, there is a need for civil engineering to balance cost and safety variables, seeking ways to optimize cost-effectiveness. Thus, this research has as a general objective to compare the conventional design and the optimized design for reinforced concrete beams with rectangular section in buildings through the use of the Microsoft Excel SOLVER tool. And as specific objectives: to carry out a bibliographic research on the structural design and structural optimization; to do a conventional reinforced concrete beam with rectangular cross section structural design; prepare a spreadsheet in Excel; to do an optimized design using the spreadsheet and the Microsoft Excel Solver tool; and compare the results obtained in the two designs. Thus, through a methodology of an applied nature; approach: quantitative; exploratory; And with technical procedures: experimental and bibliographical, we can develop the following results: In civil construction, it is the structure that guarantees the sustainability of the building. There are two types of design, conventional and optimized, the latter being more suitable for projects that want to combine cost and benefit. For, the presented results prove the efficiency of the optimization method and for future works it is suggested the application of this method allied to means that allow the reuse of the forms, seeking a standardization of the sections in the most common problems, since it is the element that presented the highest cost.

Keywords: Structural design. Optimization. Structures

1 INTRODUÇÃO

As construções de antigamente geralmente eram baseadas na experiência dos engenheiros ou em outros projetos semelhantes, o que, em alguns casos acarretava em um superdimensionamento da edificação. Eram obras muito seguras, porém as mesmas tinham um custo bem elevado. Este tipo de obra hoje em dia não é economicamente viável.

Nesse sentido, há uma necessidade em equilibrar as variáveis custo e segurança, para tanto, a engenharia, através de vários estudos e aplicações vem buscando excelência em formas para otimizar o custo benefício e, como complemento, obter um produto competitivo em virtude da concorrência de mercado na elaboração de projetos cada vez mais econômicos, visto que a etapa de estruturas tem um valor relevante. Para entender como isso é possível, é preciso compreender um projeto convencional e um projeto ótimo.

As estruturas de concreto devem atender aos requisitos mínimos de qualidade, como capacidade de resistência, desempenho em serviço, durabilidade e outros requisitos estabelecidos em conjunto entre o autor do projeto estrutural e o contratante (NBR 6118, 2014).

A finalidade de dimensionar uma estrutura em concreto armado é garantir que ela resista às solicitações, de modo satisfatório e seguro, a que estará sujeita durante sua execução e utilização. Além de manter as características para a qual foi projetada (CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO, 2014).

O dimensionamento convencional é um processo no qual o projetista pré-dimensiona a seção dos elementos estruturais e verifica se estas são capazes de suportar os esforços solicitantes com segurança, satisfazendo os critérios normativos. Caso o pré-dimensionamento apresente algum critério que não possa ser satisfeito, uma nova estrutura deverá ser pré-dimensionada e uma nova fase de análise e dimensionamento deverá ser executada. Esse processo é feito até que todas as restrições estejam satisfeitas simultaneamente. Este dimensionamento é baseado em recomendações da literatura ou na experiência do projetista, sendo uma boa solução, mas não a mais econômica.

Já o dimensionamento otimizado, consiste em encontrar a solução ideal através de métodos computacionais, alterações de variáveis e limitações em busca de uma combinação entre os parâmetros que, além de satisfazer os critérios

normativos tenha o melhor desempenho.

Muitos projetistas têm como propósito a elaboração de projetos que proporcionem funcionalidade e segurança com o mínimo custo possível, ou seja, uma busca por um projeto ótimo. Com o avanço da tecnologia, é possível investigar um maior número de variáveis e restrições dentro de um projeto, diminuindo as simplificações e tornando o modelo cada vez mais representativo do comportamento real (BORDIGNON, 2012).

Nesse contexto, o presente trabalho visa o estudo do método de dimensionamento otimizado de vigas de concreto armado de seções retangulares, fazendo uso de uma planilha de cálculos elaborada no Microsoft Excel e da ferramenta de otimização *Solver*.

1.1 PROBLEMA

Através do dimensionamento convencional obtém-se uma viga capaz de resistir aos esforços solicitantes atendendo às normas técnicas, em alguns casos ocorre um superdimensionamento fazendo com que a relação custo-benefício não seja alcançada.

Logo, surge o questionamento: de que forma se pode reduzir os custos de uma estrutura e ao mesmo tempo melhorar seu desempenho, aliando eficiência e economia, conforto e segurança?

1.2 JUSTIFICATIVA

Há uma necessidade em equilibrar as variáveis custo e segurança, a fim de obter um produto competitivo. Isto se dá devido à forte concorrência de mercado na elaboração de projetos cada vez mais econômicos, visto que a etapa de estruturas tem um valor significativo. Este trabalho se justifica pela necessidade de um estudo mais aprofundado sobre o dimensionamento com o intuito de contribuir positivamente para o mercado de trabalho.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GERAL

Comparar o dimensionamento convencional com o dimensionamento de forma otimizada para vigas de concreto armado com seção retangular em edifícios através da utilização da ferramenta SOLVER do Microsoft Excel.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar uma pesquisa bibliográfica sobre o dimensionamento de estruturas e otimização estrutural;
- Elaborar uma planilha de cálculo no Excel;
- Fazer o dimensionamento otimizado utilizando a planilha elaborada e a ferramenta Solver do Microsoft Excel;
- Analisar os resultados obtidos nos dimensionamentos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Conceitos gerais

Abaixo serão abordados os principais assuntos pertinentes a este trabalho, a fim de se obter êxito nos resultados.

2.1.1 Dimensionamento de vigas de concreto armado

Na construção civil, é a estrutura que garante a sustentação da edificação, tornando o projeto estrutural uma das partes mais importantes. O projeto estrutural compreende o dimensionamento das estruturas como lajes, vigas, pilares e fundação. Uma de suas finalidades é garantir que não ocorrerão problemas futuros, além de trazer maior segurança, economia, resistência e durabilidade.

É importante compreender o comportamento e funcionamento de cada um dos elementos do sistema estrutural. As vigas, por exemplo, são parte integrante da estrutura de uma edificação recebendo a carga da laje e as transferindo para o pilar.

Ou seja, elas atuam em conjunto com os demais elementos estruturais transferindo a carga da edificação para o solo.

Nesse sentido, a NBR 6118 (2014, p. 83) conceitua vigas como “elementos lineares em que a flexão é preponderante.” A norma também define como elemento linear todo aquele em que o comprimento longitudinal supera em pelo menos três vezes a maior dimensão da seção transversal.

No dimensionamento convencional de uma viga de concreto armado é determinado qual a seção das fôrmas e da área de aço e também verificado se atende os requisitos normativos. Para se determinar a área de aço, primeiramente é preciso definir as propriedades geométricas, as características dos materiais, os esforços atuantes e, logo após, fazer as devidas verificações. São quatro domínios em que as vigas podem ser dimensionadas de acordo a NBR 6118 (2014) para a verificação do estado limite último (ELU) e referem-se ao aproveitamento dos materiais e a possibilidade de ruína.

A NBR 6118 (2014, p. 4) define que: “Estado limite último é o estado limite relacionado ao colapso, ou a qualquer outra forma de ruína estrutural, que determine a paralisação do uso da estrutura.”

Ou seja, é um processo no qual o projetista pré-dimensiona a seção da viga e verifica se os esforços resistentes são capazes de suportar os esforços solicitantes com segurança, satisfazendo os critérios normativos. Onde a melhoria é feita de maneira intuitiva e interativa (CHRISTENSEN e KLARBRING, 2009). Desse modo, caso o pré-dimensionamento apresente algum critério que não possa ser satisfeito, uma nova estrutura deverá ser pré-dimensionada e uma nova fase de análise e dimensionamento deverá ser executada. Logo, é realizado esse processo até que todas as restrições estejam satisfeitas simultaneamente. Conforme comentado anteriormente, é uma boa solução, porém não é a mais econômica.

No entanto, ao longo dos anos foram desenvolvidas diversas ferramentas computacionais a fim de determinar um valor ideal para uma estrutura ótima, pois é necessário achar um equilíbrio entre os requisitos normativos e as variáveis.

Segundo Lopez e Miguel (2013) o método convencional é um processo de evolução lenta em busca dos melhores resultados, onde muitas vezes tentativas e erros são bastante comuns. Conseqüentemente, as técnicas de otimização acabam sendo atraentes, visto que é possível formular matematicamente um problema e buscar a melhor solução possível dentre a gama de possibilidades.

2.1.2 Otimização

“A otimização ou programação matemática pode ser definida como a técnica de se encontrar a melhor solução para problemas matematicamente definidos, que são frequentemente a modelagem de um problema físico” (MEDRANO, 1994). Como o próprio nome indica, é um processo que objetiva determinar uma solução ótima para um dado problema, obtendo o melhor desempenho possível satisfazendo suas restrições. Suas técnicas podem ser utilizadas para minimizar ou maximizar alguma variável, por exemplo (BEZERRA, 2017).

Devido à necessidade de se buscar soluções estruturais que façam uso dos materiais de maneira racional, estimulado não apenas por uma construção sustentável, mas também pelo propósito de se obter um produto competitivo, a otimização, aliada a evolução dos métodos computacionais, tem se tornado uma ferramenta primordial para a engenharia (ARORA, 2012).

Não há uma técnica de otimização que possa ser utilizada de maneira eficiente a todos os problemas. O escolhido para um caso particular vai depender da sua função, objetivo, suas restrições e variáveis (EDGAR; HIMMELBLAU; LASDON, 2001).

A seguir são listados os seis passos gerais para solucionar problemas de otimização (EDGAR; HIMMELBLAU; LASDON, 2001):

- a) Analisar o problema e identificar todas as variáveis e características;
- b) Definir qual critério pretende alcançar apresentando a função objetivo em termos das variáveis definidas no passo 1;
- c) Usar expressões matemáticas que relacionem as variáveis de entrada e saída e os parâmetros associados. Incluir restrições de igualdade e desigualdade;
- d) Se a formulação do problema for complexa, pode-se tentar dividi-los em problemas menores ou simplificar suas equações através de hipóteses;
- e) Aplicar uma técnica de otimização que melhor se adeque ao problema;
- f) Verificar as respostas e examinar a sensibilidade dos resultados às mudanças nos parâmetros do problema e nas hipóteses.

A otimização é parte integrante da essência própria da Engenharia, bem como é a capacidade de abrir mão de padrões em busca de encontrar soluções e inovações.

Deste modo, alia eficiência e economia e como consequência obtém-se um projeto ótimo.

2.1.3 A ferramenta *solver*

Dentre as inúmeras técnicas de otimização estrutural que se adequam a otimizar vigas de concreto armado, está a ferramenta *solver* do software Microsoft Excel.

O Microsoft Excel é um software de planilha amplamente conhecido e utilizado na Engenharia que permite criar tabelas, analisar dados, fazer cálculos complexos, entre outros, tendo o *solver* como uma de suas ferramentas.

(...) O Solver é uma ferramenta de análise hipotética, que determina o valor máximo e/ou mínimo de uma fórmula numa célula, denominada célula objetivo. Inicialmente determinam-se as células variáveis e os limites de restrição do problema, que podem estar direta ou indiretamente relacionadas à célula objetivo. O Solver ajusta os valores nas células variáveis, respeitando as restrições impostas, para fornecer o valor otimizado procurado (MUNIZ JUNIOR e OLIVEIRA, 2014, p 53).

Com esta ferramenta, é possível fazer várias simulações dentro da planilha, sobretudo quando há mais de uma variável e restrições de parâmetros para limitar os valores. Ele não acompanha o Excel em sua instalação usual, é preciso habilitá-lo pela instalação em modo completo ou personalizado. Possui três métodos de solução: o LP Simplex, o Gradação Reduzida Generalizada (GRG) e o *Evolutionary*.

O método Simplex é utilizado para problemas lineares, quando a função objetivo e as restrições são funções lineares das variáveis do projeto. É um procedimento que não requer muito esforço matemático para descobrir uma solução para o problema devido sua simplicidade.

O método GRG é utilizado para problemas não lineares, onde a função objetivo ou pelo menos uma das restrições é função não linear das variáveis de projeto. Ao contrário do Simplex, envolve problemas mais complexos.

O método *Evolutionary* é utilizado quando a função objetivo e as restrições são determinados a partir de funções cujos resultados variam de maneira brusca.

Este trabalho, utilizará para o processo de otimização a ferramenta citada do

Microsoft Excel, por meio do método GRG. De acordo com Corrar (2004), este método possui várias estratégias que consistem em: procurar uma solução viável para o problema; melhorar o resultado inicial, produzindo melhorias significativas; ao explorar a obtenção dessas melhorias, tentar aprimorar a solução explorando outras direções; continuar o processo até que o resultado obtido não possa mais ser melhorado significativamente.

2.2 Roteiro de cálculo

O presente trabalho, com procedimentos descritos a seguir, tem como modelo estrutural uma viga retangular bi apoiada de concreto armado submetida à flexão simples e com carregamento uniformemente distribuído.

2.2.1 Hipóteses de cálculo

A base de todo o cálculo é que as seções que inicialmente eram planas permanecem planas após as deformações. Deste modo, a deformação em cada seção é proporcional à sua distância para a linha neutra.

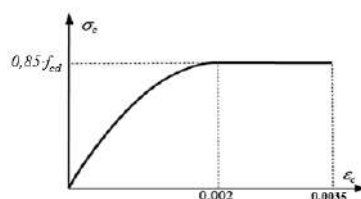
A aderência entre aço e concreto são perfeitos, não havendo deslizamentos. Ou seja, o que o aço deforma, o concreto deforma junto.

É desprezado qualquer resistência à tração no concreto, já que não são consideradas no ELU. O esforço de tração será resistido apenas pelas armaduras.

2.2.2 Diagrama tensão-deformação do Concreto à compressão

A resistência à compressão é uma das principais características do concreto. É empregado o diagrama abaixo, para efeito de dimensionamento.

Figura 1 – Diagrama tensão-deformação idealizado



Fonte: ABNT (2014)

A curva apresentada na Figura 1 é governada por:

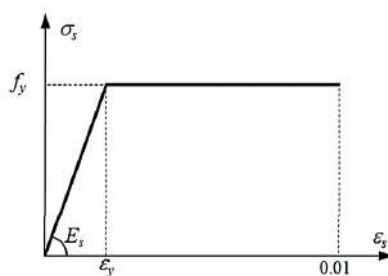
$$\sigma = 0,85 fcd \left[2 \left(\frac{\varepsilon c}{\varepsilon c2} \right) - \left(\frac{\varepsilon c}{\varepsilon c2} \right)^2 \right] \quad (1)$$

Onde $\varepsilon c = 0,002$ é e $\varepsilon c2 = 0,0035$.

2.2.3 Aço para concreto armado

De acordo com a NBR 6118 (2014), no cálculo nos estados-limite é empregado o diagrama abaixo para os aços com ou sem patamar de escoamento.

Figura 2 - Diagrama tensão-deformação para aços de armadura passiva



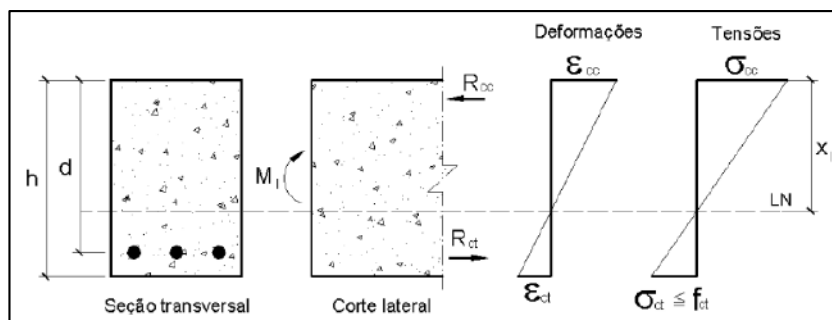
Fonte: ABNT (2014, adaptada)

2.2.4 Estádios de fissuração

Estádios são as fases que uma seção de concreto passa quando submetida a diversos carregamentos. Conforme é citado por Carvalho (2009), a norma define três fases em que a viga poderá se deformar antes da ruptura.

O estágio I é o estado elástico, fase que corresponde ao início do carregamento, onde o concreto consegue resistir às tensões de tração tranquilamente, pois a tensão de tração no concreto não ultrapassa sua resistência característica à tração por serem pequenas. Possui um diagrama linear ao longo da seção transversal do concreto e é nesse estágio que se calcula qual o momento de fissuração.

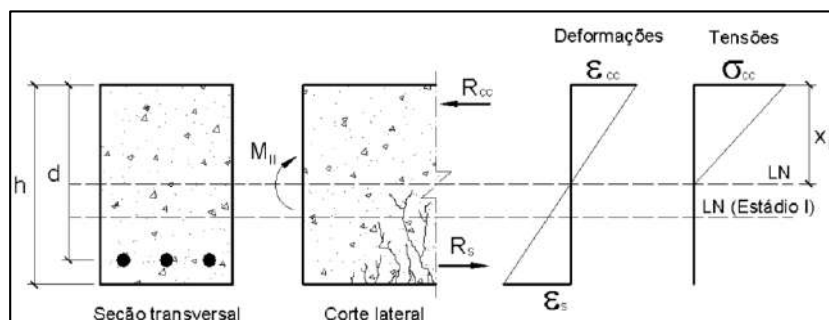
Figura 3 - Estádio I de Fissuração



Fonte: Cilvinet (s.d.)

O estágio II é o estado de fissuração, onde a resistência à tração do concreto é atingida. Ou seja, o concreto não resiste mais à tração apresentando fissuras visíveis neste nível de carregamento. Neste estágio o diagrama continua sendo linear ao longo da seção e serve para verificação da peça em serviço.

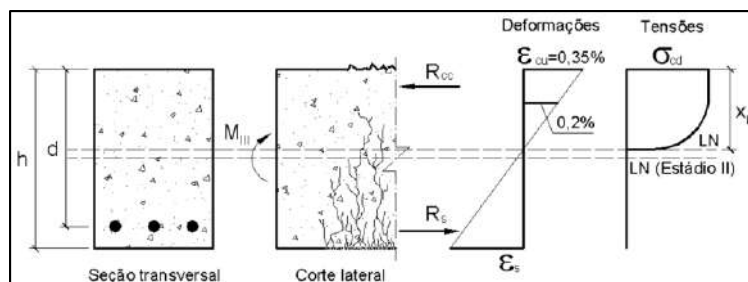
Figura 4 - Estádio II de fissuração



Fonte: Cilvinet (s.d.)

No estágio III a região comprimida encontra-se plastificada e a peça está próxima da ruptura. Admite-se que o diagrama de tensões seja parabólico-retangular, mas para efeito de cálculo a Norma Brasileira permite que se trabalhe com um diagrama retangular equivalente. É nesse estágio que é realizado o dimensionamento, pois é primordial que as estruturas suportem os esforços sem chegar ao colapso.

Figura 5 - Estádio III de fissuração

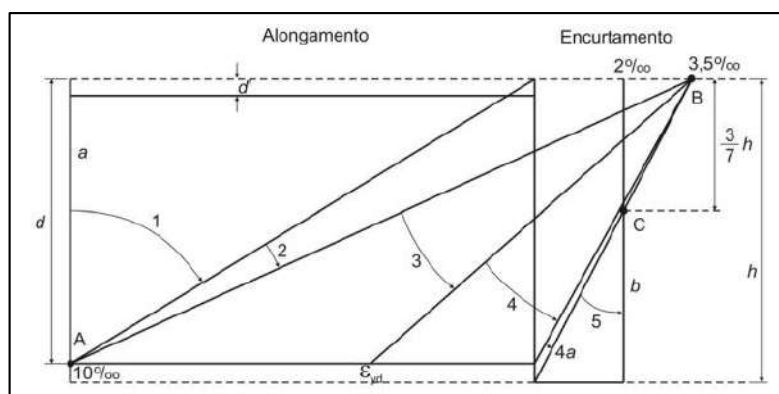


Fonte: Cilvinet (s.d.)

2.2.5 Domínios de deformação na ruptura

Está disposto na NBR 6118 (2014), que o ELU é caracterizado segundo os domínios de deformação. A combinação dos valores da posição da linha neutra, da porcentagem de deformação do aço por alongamento e da porcentagem de deformação do concreto por compressão determinam o domínio ao qual a seção pertence. São 6 os domínios de deformação e representam as diversas formas de ruína.

Figura 6 - Domínios de estado limite último de uma seção transversal



Fonte: ABNT (2014)

- **Domínio 1**

No domínio 1 há uma tração excêntrica não uniforme, o que provoca uma deformação acentuada do aço. Apresenta linha neutra fora da seção e concreto totalmente fissurado.

- **Domínio 2**

No domínio 2 a linha neutra corta a seção, parte da peça é tracionada e a outra comprimida. Aço e concreto resistem aos esforços e nesse domínio o concreto ainda não alcança a ruptura. É o último caso em que a ruína ocorre com deformação plástica excessiva da armadura.

- **Domínio 3**

A linha neutra corta a seção. A ruptura do concreto ocorre simultaneamente com o escoamento do aço. É uma situação para dimensionamento considerada ideal, pois os dois materiais atingem sua capacidade máxima sendo realmente aproveitados. Nesse domínio ocorre o aviso prévio, pois a armadura ao escoar provocará fissuras visíveis na viga antes que o concreto alcance a ruptura por esmagamento.

- **Domínio 4**

A linha neutra corta a seção. Há uma pequena zona de concreto tracionado. A ruptura do concreto é anterior a do escoamento, tornando-a uma ruptura frágil. Como nesse domínio não há aproveitamento do aço acaba não sendo econômico.

- **Domínio 4-a**

A linha neutra corta a seção na região de cobrimento da armadura inferior. A seção resistente é composta por concreto e aço comprimidos. A ruptura é frágil, pois o concreto rompe enquanto a armadura sofre encurtamento.

- **Domínio 5**

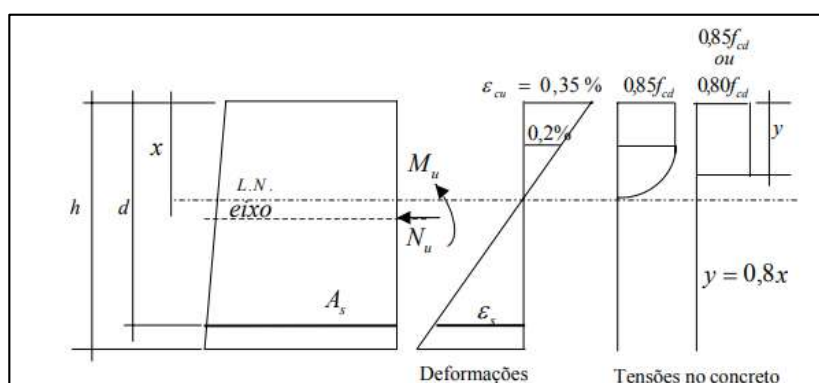
A linha neutra não corta a seção. A seção resistente é composta por concreto e aço comprimidos. É uma ruptura frágil, sem aviso, pois o concreto rompe com o encurtamento da armadura e sem fissuras.

2.2.6 Dimensionamento à flexão simples

O dimensionamento de uma peça à flexão consiste em determinar as dimensões da seção transversal da viga e da área de aço de forma que garanta uma margem preestabelecida de segurança ao estado limite último.

A distribuição de tensões de compressão no concreto é feita pelo diagrama parábola-retângulo abaixo.

Figura 7 – Diagramas de deformação e de tensão na seção transversal da viga

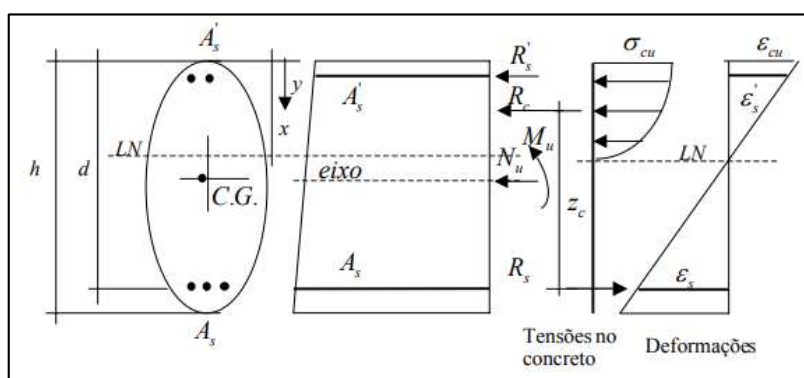


Fonte: Almeida (2002)

Onde:

- $\sigma_{cd} = 0,85 f_{cd}$ no caso em que a largura da seção medida paralelamente à linha neutra não diminui a partir desta para a borda comprimida;
- $\sigma_{cd} = 0,80 f_{cd}$ no caso contrário.

Figura 8 - Diagramas de deformação e de tensão na seção transversal da viga



Fonte: Almeida (2002)

A força atuante no concreto deve ser igual à força atuante na armadura:

$$\sum F = 0 \rightarrow R_c - R_s = 0 \rightarrow R_c = R_s \quad (2)$$

O momento das forças internas em relação a qualquer ponto deve ser igual ao momento externo de cálculo:

$$\sum M = M_d \rightarrow M_d = R_c z \quad (3)$$

Onde: $z = d - 0,4x$

A posição da linha neutra vai determinar em qual o domínio a peça se encontra trabalhando. Pode ser obtida através dos valores de M_d , d , b_w e f_{cd} resolvendo para x :

$$M_d = R_c z \rightarrow M_d = (0,85f_{cd} 0,8x b_w)(d - 0,4x) \quad (4)$$

$$M_d = (0,68xd - 0,272x^2) b_w f_{cd} \quad (5)$$

$$x = d \left(1,25 - 1,9174 \sqrt{0,425 - \frac{M_d}{f_{cd} b_w d^2}} \right) \quad (6)$$

De posse do valor da linha neutra é possível verificar em qual domínio a peça está trabalhando, o qual deverá ser o domínio 2 ou 3, que são os domínios de dimensionamento.

Tabela 1 – Verificação do domínio de deformação

x / d	DOMÍNIO
0 – 0,259	2
0,259 – 0,628	3

Fonte: elaborado pelo autor (2019)

A área de aço longitudinal inferior é determinada por:

$$M_d = R_c z \rightarrow R_c = R_s \rightarrow M_d = R_s z = (A_s f_s) (d - 0,4x) \quad (7)$$

$$A_s = \frac{M_d}{(d - 0,4x)f_s} \quad (8)$$

Admitindo-se que a peça está trabalhando no domínio 2 ou 3, tem-se $\varepsilon_s \geq \varepsilon_{yd}$, resultando em uma tensão de escoamento na armadura ($f_s = f_{yd}$).

A partir do valor encontrado para a área de aço é definido a quantidade de

barras a serem utilizadas.

$$n = \frac{A_s}{A_{s0}} \quad (9)$$

O espaçamento mínimo estabelecido pela NBR 6118 (2014) entre as faces das barras longitudinais, deve ser igual ou superior aos seguintes valores para a direção horizontal:

- 20 mm;
- Diâmetro da barra;
- 1,2 vez a dimensão máxima característica do agregado.

Para a armadura longitudinal superior foram adotadas duas barras de 5mm apenas para auxiliar na montagem dos estribos, pois para os casos previstos neste trabalho não há a necessidade de armadura negativa.

2.2.7 Cálculo da armadura transversal (estribos)

Será considerado o modelo de cálculo I (item 17.4.2.2 da NBR 6118:2014) que admite diagonais de compressão inclinadas de $\theta = 45^\circ$ em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural.

Conforme NBR 6118 (2014) a força cortante resistente de cálculo (V_{Rd2}), relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto deve ser superior à força cortante solicitante de cálculo (V_{Sd}).

$$V_{Sd} \leq V_{Rd2} \quad (10)$$

Onde:

$$V_{Rd2} = 0,27 * \alpha_{v2} * f_{cd} * bw * d \quad (11)$$

$$\alpha_{v2} = 1 - \frac{f_{ck}}{250} \quad (12)$$

Parcela de força cortante (Vc)

$$V_c = 0,6 * f_{ctd} * bw * d \quad (13)$$

Onde:

$$f_{ctd} = 0,15 * f_{ck}^{2/3} \quad (14)$$

Cálculo da armadura (A_{sw})

$$A_{sw} = \frac{V_{sw} * S}{0,9 * f_{yd} * d} \geq A_{sw,min} = S * bw * 0,2 * \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \quad (15)$$

Onde:

$$V_{sw} = V_{sd} - V_c \quad (16)$$

A partir da obtenção da área de aço, escolhe-se o diâmetro da barra. Para o presente trabalho será utilizado o aço CA-60 com barras de 5mm.

Em seguida é determinado o número de barras por metro.

$$n = \frac{A_{sw}}{A_{s\phi}} \quad (17)$$

Com a equação abaixo é calculado o espaçamento, sendo necessário verificar se atende as condições de espaçamento máximo conforme NBR 6118 (2014).

$$S \leq \frac{A_{sw}}{\rho_{sw}} \quad (18)$$

Condições de espaçamento máximo:

- Se $V_{sd} \leq 0,67 * V_{Rd2} \rightarrow S_{m\acute{a}x} = 0,6 * d \leq 300\text{mm}$;
- Se $V_{sd} > 0,67 * V_{Rd2} \rightarrow S_{m\acute{a}x} = 0,3 * d \leq 200\text{mm}$.

2.2.8 Classes de Agressividade Ambiental

De acordo com o item 6.4.2 da Norma NBR 6118 (2014), a agressividade ambiental deve ser classificada conforme tabela abaixo, que está relacionada às ações químicas e físicas que atuam nas estruturas. O presente trabalho dimensiona as vigas com classe de agressividade II ao qual possibilita um cobrimento nominal de 30mm.

Tabela 2 – Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{1), 2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾	Grande
		Industrial ^{1), 2)}	
IV	Muito forte	Industrial ^{1), 3)}	Elevado
		Respingos de maré	

¹⁾ Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

²⁾ Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

³⁾ Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: ABNT (2014)

Tabela 3 – Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ³⁾
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ²⁾	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido ¹⁾	Todos	30	35	45	55

¹⁾ Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.

²⁾ Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas por 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

³⁾ Nas faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: ABNT (2014)

2.2.9 Deformação em Vigas

Flecha imediata

Pode ser calculada admitindo-se comportamento elástico e pode ser obtida através da equação:

$$f_0 = \frac{\alpha c * p * L^4}{(EI)_{eq}} \quad (19)$$

Onde:

- $\alpha_c = \frac{5}{384}$ p/ vigas bi apoiadas;
- p = carga distribuída atuante na viga;
- L = comprimento do vão;
- (EI)_{eq} = rigidez equivalente.

Carga distribuída atuante na viga (p)

$$p = P_p + P_{alv} + P_{laje} + \Psi_2 * q_{acid} \quad (20)$$

Onde:

- P_p = peso próprio da viga;
- P_{alv} = peso da alvenaria;
- P_{laje} = peso da laje;
- q_{acid} = carga acidental;
- Ψ_2 = coeficiente de ponderação.

O peso próprio é calculado através das dimensões dos elementos com o valor do peso específico do material utilizado. Para o peso da alvenaria foi adotado um valor de 4 KN/m. A laje a ser considerada para os devidos cálculos é a do tipo treliçada, armada em uma direção, com comprimento perpendicular à viga fixado em 4m e peso próprio de 1,5 KN/m², respeitando os valores mínimos estabelecidos na norma de ações para o cálculo de estruturas de edificações, a NBR 6120 (2019).

Tabela 4 – Valores dos coeficientes de ponderação

Ações		γ_c		
		Ψ_1	$\Psi_1^{(1)}$	Ψ_2
Cargas acidentais de edifícios	Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ²⁾	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas ³⁾	0,7	0,6	0,4
	Biblioteca, arquivos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3

¹⁾ Para os valores de Ψ_1 relativos às pontes e principalmente aos problemas de fadiga, ver seção 23.
²⁾ Edifícios residenciais.
³⁾ Edifícios comerciais, de escritórios, estações e edifícios públicos.

Rigidez equivalente

Para uma avaliação aproximada da flecha imediata utiliza-se a expressão da rigidez equivalente:

$$(EI)_{eq} = E_{cs} * \left\{ \left(\frac{Mr}{Mk} \right)^3 * I_I + \left[1 - \left(\frac{Mr}{Mk} \right)^3 \right] * I_{II} \right\} \leq E_{cs} * I_I \quad (21)$$

Onde:

- E_{cs} = módulo de elasticidade secante do concreto;
- Mr = momento fletor de fissuração;
- Mk = momento fletor característico;
- I_I = momento de inércia da seção no estágio I;
- I_{II} = momento de inércia da seção no estado II;

Módulo de elasticidade secante do concreto

$$E_{cs} = \alpha_e * \alpha_i * 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (22)$$

Momento de inércia da seção no estágio I

$$I_I = \frac{bw * h^3}{12} \quad (23)$$

Momento de inércia da seção no estágio II

$$I_{II} = \frac{bw * X_{II}^3}{3} + n * A_s * (d - X_{II})^2 \quad (24)$$

$$n = \frac{E_s}{E_{cs}} \quad (25)$$

Onde:

Módulo de elasticidade do aço: $E_s = 210$ GPa.

Linha neutra da seção no estágio II

$$X_{II} = \frac{-B \pm \sqrt{\Delta}}{2 * A} \quad (26)$$

Onde:

- $A = bw$;
- $B = 2 * n * A_s$;
- $C = -2 * n * A_s * d$.

Momento fletor característico

$$M_k = \frac{p * L^2}{m'} \quad (27)$$

Onde:

- $m' = 8$ para viga bi apoiada

Momento fletor de fissuração da seção (M_r)

“Nos estados limites de serviço as estruturas trabalham parcialmente no estágio I e parcialmente no estágio II. A separação entre esses dois comportamentos é definida pelo momento de fissuração.” (item 17.3 da NBR 6118,2014):

$$M_r = \frac{1,5 * f_{ctm} * I_I}{h - X_{II}} \quad (28)$$

Resistência média à tração do concreto

$$f_{ctm} = 0,3 * f_{ck}^{2/3} \quad (29)$$

Flecha total

$$f_t = f_0 * (1 - \alpha_f) \quad (30)$$

Coefficiente de fluência do concreto

$$\alpha_f = \frac{\Delta\varepsilon}{1 + 50 * p'} \quad (31)$$

Onde:

- ε = coeficiente em função do tempo;
- p' = taxa da armadura superior;

Coefficiente função do tempo

Pode ser obtido pelas equações abaixo:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon(t) - \varepsilon(t_0) \quad (32)$$

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} 0,68 * 0,996^t & p/t \leq 70 \text{ meses} \\ 2,0 & p/t > 70 \text{ meses} \end{cases} \quad (33)$$

Tabela 5 – Valores do coeficiente em função do tempo

Tempo (t) meses	0	0,5	1	2	3	4	5	10	20	40	≥ 70
Coefficiente $\xi(t)$	0	0,54	0,68	0,84	0,95	1,04	1,12	1,36	1,64	1,89	2

Fonte: ABNT (2014)

Taxa de armadura superior

$$p' = \frac{As'}{bw * h} \quad (34)$$

Flecha Limite

Será considerado o deslocamento limite de aceitabilidade sensorial que é caracterizado pelo efeito visual que gera uma sensação de insegurança ao usuário e

conforme a NBR 6118 (2014) é expresso por: $L/250$.

Contra flecha

A contra flecha é um deslocamento imposto com o objetivo de prevenir que as flechas das vigas tenham um valor elevado e não satisfaçam os limites definidos. A máxima contra flecha permitida pela NBR 6118 (2014) é $L/350$.

Flecha final

$$p' = \frac{As'}{bw * h} \quad (35)$$

3 METODOLOGIA

Pesquisar é buscar soluções para um problema proposto, que tem como base métodos racionais e sistemáticos. Uma pesquisa pode ser classificada quanto à sua natureza, abordagem, objetivos e procedimentos técnicos (SILVA e MENEZES, 2005).

Baseada na classificação proposta por Silva e Menezes (2005), este trabalho se enquadra dentro dos seguintes aspectos:

- a) Natureza: aplicada, gerando conhecimentos para aplicação prática e destinada a solucionar problemas específicos definidos;
- b) Abordagem: quantitativa, requerendo uso de técnicas estatísticas, traduzindo as informações em números para poder analisá-las;
- c) Objetivo: exploratória, objetivando a familiarização com o problema em estudo de modo a construir hipóteses;
- d) Procedimentos técnicos: experimental e bibliográfico.

O trabalho inicial será realizar uma pesquisa bibliográfica sobre o dimensionamento de vigas de concreto armado e os processos de otimização, apresentando os principais dados acerca dos assuntos pertinentes ao desenvolvimento do estudo.

A análise do dimensionamento otimizado será desenvolvida através de uma planilha de cálculos no Excel onde em suas células serão especificadas as variáveis, as restrições e a função objetivo de maneira que, ao alterar as variáveis o dimensionamento seja feito imediatamente com o auxílio da ferramenta solver. Por fim, serão analisados e discutidos os resultados obtidos.

3.1 Elementos de um Problema de Otimização

Um problema de otimização é aquele onde pretende-se determinar uma melhor solução dentre a gama de soluções viáveis. Primeiramente é preciso entender o problema, verificar os dados, pois sua formulação é baseada em um conjunto de variáveis, restrições e uma função objetivo.

3.1.1 Função Objetivo

É uma função matemática que poderá ser minimizada ou maximizada com o intuito de determinar uma solução ótima para um dado problema, com o melhor desempenho possível.

A função objetivo do presente trabalho será minimizar o custo de vigas de seções retangulares de concreto armado. Logo, o custo final é referente à fôrma, ao aço e ao concreto. Os valores das composições dos materiais são obtidos através da tabela nº 26.1 da Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará (Seinfra). Temos então a equação:

$$C_{total} = C_{fôrma} + C_{aço} + C_{concreto} \quad (36)$$

Onde:

C_{total} : Custo total da viga;

$C_{fôrma}$: Custo da fôrma de madeira;

$C_{aço}$: Custo do aço;

$C_{concreto}$: Custo do concreto.

Custo da fôrma:

$$C_{fôrma} = (2 * h + bw) * L * R\$fôrma \quad (37)$$

Tabela 6 – Tabela de custo da fôrma

Material	Custo do material (R\$/m²)
Forma plana chapa compensada plastificada, esp = 12mm	53,83

Fonte: Seinfra (2018, adaptada)

Custo do aço:

$$C_{aço} = (Kg_{aço} * Massa\ nominal_{aço}) * R\$_{aço/kg} \quad (38)$$

Tabela 7 – Tabela de custos do aço

CA	Bitola Aço (mm)	Custo da armadura (R\$/Kg)
50	6,3 a 10	7,92
50	12,5 a 25	8,69
60	3,4 a 6,4	7,83

Fonte: Seinfra (2018, adaptada)

Tabela 8 – Tabela da massa nominal por metro quadrado das armaduras

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

Fonte: Araújo (2014, adaptada)

Custo do concreto:

$$C_{concreto} = bw * h * L * R\$conc \quad (39)$$

Onde:

- bw = base da viga;
- h = altura da viga;
- L = comprimento do vão;
- R\$conc = custo do concreto por m³.

Tabela 9 – Tabela de custos do concreto

Classe de resistência	Custo do concreto (R\$/m ³)
25	360,74
30	385,52
35	402,19
40	426,89
50	619,07

Fonte: Seinfra (2018, adaptada)

3.1.2 Variáveis

As variáveis do projeto são definidas de acordo com as características que poderão sofrer alterações com o objetivo de realizar as iterações. Dentre as variáveis a serem determinadas estão: largura e altura da seção transversal da viga. E como dados de entrada têm-se a resistência característica do concreto (fck) e o comprimento do vão.

3.1.3 Restrições

As restrições são as condições impostas que o projeto deve atender. Para os valores das variáveis são impostas restrições das quais são feitas iterações visando características construtivas a serem seguidas.

As restrições deste trabalho serão:

- a) A largura da viga não pode ser menor que 12 cm de acordo com a NBR 6118 (2014);
- b) A altura da viga deverá ser maior ou igual a altura útil mínima somada ao cobrimento;
- c) A linha neutra deverá ser menor ou igual a 0,45 vezes sua altura útil;
- d) Será estabelecido um valor máximo para o fck de 50 MPa;
- e) Limitação da flecha máxima da viga em L/250, considerando o modelo fissurado e seguindo as recomendações da NBR 6118 (2014).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos para o dimensionamento otimizado de vigas são apresentados nas tabelas abaixo. A largura da seção transversal permanece a dimensão mínima imposta na restrição para todos os casos analisados. Observa-se que, conforme a resistência característica do concreto à compressão (fck) aumenta, a altura da viga é reduzida e vai gerar um preço ótimo, mas por questões construtivas de praticidade para a obra os resultados são arredondados para múltiplos de 5 e com isso torna mais viável, na maioria dos casos, o uso do concreto com menor resistência.

Foram encontrados 5 resultados ótimos para cada dimensionamento das vigas, que possuem vãos que variam de 3m a 6m.

- Para vigas com vão de 3,0 m:

Tabela 10 – Resultados obtidos na otimização de vigas de 3,0 m

fck (Mpa)	bw ótima (m)	h ótima (m)	h adotada (m)	Flecha total (cm)	R\$ fôrma	R\$ aço	R\$ concreto	Custo ótimo R\$
25	0,12	0,250	0,25	1,18	164,50	54,36	32,47	251,33
30	0,12	0,240	0,25	1,04	164,50	54,15	34,70	253,35
35	0,12	0,240	0,25	0,91	164,50	54,15	36,20	254,85
40	0,12	0,230	0,25	0,78	164,50	54,15	38,42	257,07
50	0,12	0,220	0,25	0,52	164,50	54,68	55,72	274,90

Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Tabela 11 – Resultados obtidos no dimensionamento convencional de vigas de 3,0 m

fck (Mpa)	bw ótima (m)	h (m)	Flecha total (cm)	R\$ fôrma	R\$ aço	R\$ concreto	Custo Total R\$
25	0,12	0,30	0,42	191,03	52,34	38,96	283,23
30	0,12	0,30	0,23	191,03	48,37	41,64	281,04
35	0,12	0,30	0,07	191,03	48,37	43,44	282,84
40	0,12	0,30	-0,07	191,03	51,11	46,10	288,24
50	0,12	0,30	-0,30	191,03	52,83	66,86	310,72

Fonte: elaborado pelo autor (2019)

- Para vigas com vão de 3,5 m:

Tabela 12 - Resultados obtidos na otimização de vigas de 3,5 m

fck (Mpa)	bw ótima (m)	h ótima (m)	h adotada (m)	Flecha total (cm)	R\$ fôrma	R\$ aço	R\$ concreto	Custo ótimo R\$
25	0,12	0,280	0,30	1,16	222,87	73,06	45,45	341,38
30	0,12	0,280	0,30	1,03	222,87	73,06	48,58	344,51
35	0,12	0,270	0,30	0,89	222,87	73,06	50,68	346,61
40	0,12	0,270	0,30	0,74	222,87	76,26	53,79	352,92
50	0,12	0,260	0,30	0,44	222,87	78,26	78,00	379,13

Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Tabela 13 – Resultados obtidos no dimensionamento convencional de vigas de 3,5 m

fck (Mpa)	bw ótima (m)	h (m)	Flecha total (cm)	R\$ fôrma	R\$ aço	R\$ concreto	Custo Total R\$
25	0,12	0,35	0,46	253,82	62,14	53,03	368,99
30	0,12	0,35	0,28	253,82	62,14	56,67	372,62
35	0,12	0,35	0,10	253,82	64,92	59,12	377,86
40	0,12	0,35	-0,06	253,82	68,56	62,75	385,13

50	0,12	0,35	-0,32	253,82	70,83	91,00	415,65
----	------	------	-------	--------	-------	-------	--------

Fonte: elaborado pelo autor (2019)

- Para vigas com vão de 4,0 m:

Tabela 14 - Resultados obtidos na otimização de vigas de 4,0 m

fck (Mpa)	bw ótima (m)	h ótima (m)	h adotada (m)	Flecha total (cm)	R\$ fôrma	R\$ aço	R\$ concreto	Custo ótimo R\$
25	0,12	0,320	0,35	1,18	290,08	83,53	60,60	434,21
30	0,12	0,320	0,35	1,04	290,08	83,53	64,77	438,38
35	0,12	0,310	0,35	0,87	290,08	86,71	67,57	444,36
40	0,12	0,304	0,35	0,71	290,08	90,87	71,72	452,67
50	0,12	0,290	0,30	1,43	254,71	98,03	89,15	441,89

Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Tabela 15 – Resultados obtidos no dimensionamento convencional de vigas de 4,0 m

fck (Mpa)	bw ótima (m)	h (m)	Flecha total (cm)	R\$ fôrma	R\$ aço	R\$ concreto	Custo Total R\$
25	0,12	0,40	0,53	325,46	86,37	69,26	481,09
30	0,12	0,40	0,33	325,46	86,37	74,02	485,85
35	0,12	0,40	0,13	325,46	89,93	77,22	492,61
40	0,12	0,40	-0,05	325,46	94,58	81,96	502,00
50	0,12	0,40	-0,34	325,46	97,48	118,86	541,80

Fonte: elaborado pelo autor (2019)

- Para vigas com vão de 4,5 m:

Tabela 16 - Resultados obtidos na otimização de vigas de 4,5 m

fck (Mpa)	bw ótima (m)	h ótima (m)	h adotada (m)	Flecha total (cm)	R\$ fôrma	R\$ aço	R\$ concreto	Custo ótimo R\$
25	0,12	0,360	0,40	1,23	366,14	106,83	77,92	550,89
30	0,12	0,352	0,40	1,07	366,14	106,83	83,27	556,24
35	0,12	0,345	0,35	1,71	326,34	111,63	76,01	513,98
40	0,12	0,339	0,35	1,58	326,34	116,30	80,68	523,32
50	0,12	0,327	0,35	1,30	326,34	114,81	117,00	558,15

Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Tabela 17 – Resultados obtidos no dimensionamento convencional de vigas de 4,5 m

fck (Mpa)	bw ótima (m)	h (m)	Flecha total (cm)	R\$ fôrma	R\$ aço	R\$ concreto	Custo Total R\$
25	0,12	0,45	0,60	405,94	100,36	87,66	593,96
30	0,12	0,45	0,38	405,94	100,36	93,68	599,98
35	0,12	0,45	0,17	405,94	104,79	97,73	608,46
40	0,12	0,45	-0,02	405,94	110,57	103,73	620,24
50	0,12	0,45	-0,36	405,94	114,19	150,43	670,56

Fonte: elaborado pelo autor (2019)

- Para vigas com vão de 5,0 m:

Tabela 18 - Resultados obtidos na otimização de vigas de 5,0 m

fck (Mpa)	bw ótima (m)	h ótima (m)	h adotada (m)	Flecha total (cm)	R\$ fôrma	R\$ aço	R\$ concreto	Custo ótimo R\$
25	0,12	0,397	0,40	1,96	406,82	143,13	86,58	636,53
30	0,12	0,389	0,40	1,84	406,82	143,13	92,52	642,47
35	0,12	0,382	0,40	1,70	406,82	147,57	96,53	650,92

40	0,12	0,375	0,40	1,55	406,82	153,39	102,45	662,66
50	0,12	0,362	0,40	1,22	406,82	157,02	148,58	712,42

Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Tabela 19 – Resultados obtidos no dimensionamento convencional de vigas de 5,0 m

fck (Mpa)	bw ótima (m)	h (m)	Flecha total (cm)	R\$ fôrma	R\$ aço	R\$ concreto	Custo Total R\$
25	0,12	0,50	0,68	495,26	125,79	108,22	729,27
30	0,12	0,50	0,45	495,26	125,79	115,66	736,71
35	0,12	0,50	0,22	495,26	131,18	120,66	747,10
40	0,12	0,50	0,01	495,26	138,23	128,07	761,56
50	0,12	0,50	-0,36	495,26	142,63	185,72	823,61

Fonte: elaborado pelo autor (2019)

- Para vigas com vão de 5,5 m:

Tabela 20 - Resultados obtidos na otimização de vigas de 5,5 m

fck (Mpa)	bw ótima (m)	h ótima (m)	h adotada (m)	Flecha total (cm)	R\$ fôrma	R\$ aço	R\$ concreto	Custo ótimo R\$
25	0,12	0,434	0,45	1,98	496,15	161,34	107,14	764,63
30	0,12	0,426	0,45	1,84	496,15	161,34	114,50	771,99
35	0,12	0,419	0,45	1,69	496,15	166,75	119,45	782,35
40	0,12	0,411	0,45	1,52	496,15	173,83	126,79	796,77
50	0,12	0,397	0,40	2,15	447,51	172,72	163,43	783,66

Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Tabela 21 – Resultados obtidos no dimensionamento convencional de vigas de 5,5 m

fck (Mpa)	bw ótima (m)	h (m)	Flecha total (cm)	R\$ fôrma	R\$ aço	R\$ concreto	Custo Total R\$
25	0,12	0,55	0,76	593,43	142,27	130,95	866,65
30	0,12	0,55	0,52	593,43	142,27	139,94	875,64
35	0,12	0,55	0,28	593,43	148,72	145,99	888,14
40	0,12	0,55	0,04	593,43	157,15	154,96	905,54
50	0,12	0,55	-0,36	593,43	162,42	224,72	980,57

Fonte: elaborado pelo autor (2019)

- Para vigas com vão de 6,0 m:

Tabela 22 - Resultados obtidos na otimização de vigas de 6,0 m

fck (Mpa)	bw ótima (m)	h ótima (m)	h adotada (m)	Flecha total (cm)	R\$ fôrma	R\$ aço	R\$ concreto	Custo ótimo R\$
25	0,12	0,473	0,50	2,01	594,32	180,27	129,87	904,46
30	0,12	0,465	0,50	1,86	594,32	180,27	138,79	913,38
35	0,12	0,457	0,50	1,69	594,32	186,73	144,79	925,84
40	0,12	0,449	0,45	2,38	541,25	222,98	138,31	902,54
50	0,12	0,434	0,45	2,07	541,25	227,80	200,58	969,64

Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Tabela 23 – Resultados obtidos no dimensionamento convencional de vigas de 6,0 m

fck (Mpa)	bw ótima (m)	h (m)	Flecha total (cm)	R\$ fôrma	R\$ aço	R\$ concreto	Custo Total R\$
25	0,12	0,60	0,84	700,44	188,78	155,84	1.045,06
30	0,12	0,60	0,59	700,44	188,78	166,54	1.055,76
35	0,12	0,60	0,33	700,44	196,38	173,75	1.070,57
40	0,12	0,60	0,09	700,44	206,32	184,42	1.091,18

50	0,12	0,60	-0,35	700,44	212,54	267,44	1.180,42
----	------	------	-------	--------	--------	--------	----------

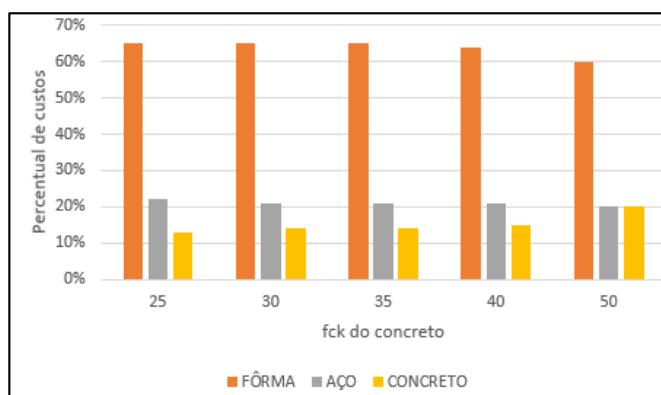
Fonte: elaborado pelo autor (2019)

4.1 Composição de custos após a otimização

O custo total da viga é formado pelo somatório dos preços do aço, fôrma e concreto necessários para sua execução. Segue abaixo a análise dos percentuais desses componentes de acordo com os resultados obtidos na otimização.

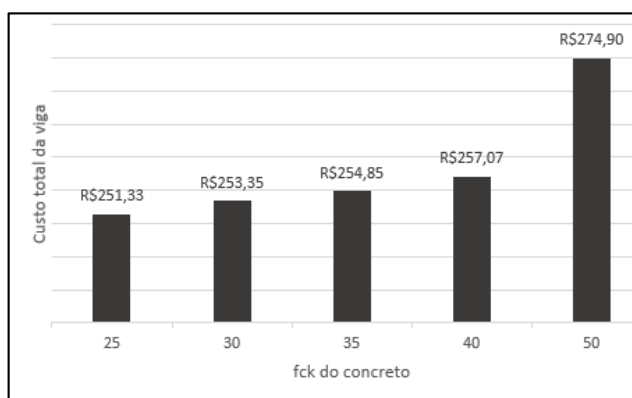
- Para vigas com vão de 3,0 m:

Figura 9 - Gráfico da composição de custos da viga de 3 m após otimização no Solver



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

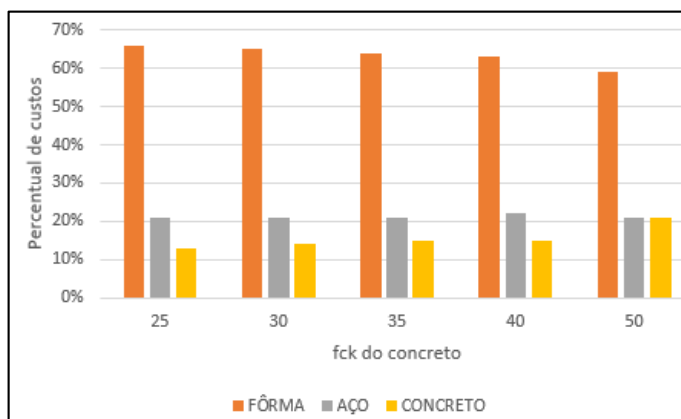
Figura 10 - Gráfico do custo total da viga de 3 m



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

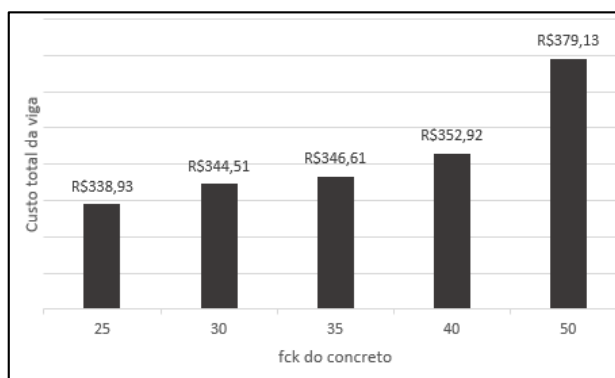
- Para vigas com vão de 3,5 m:

Figura 11 - Gráfico da composição de custos da viga de 3,5 m após otimização no Solver



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

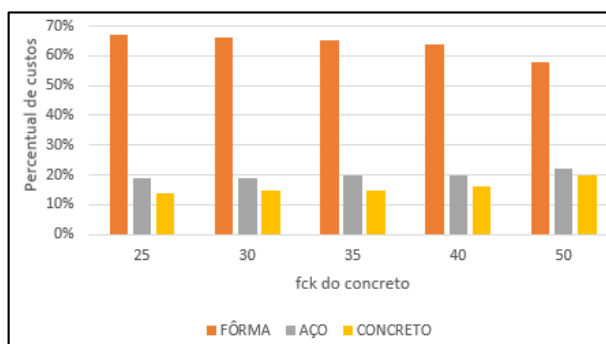
Figura 12 - Gráfico do custo total da viga de 3,5 m



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

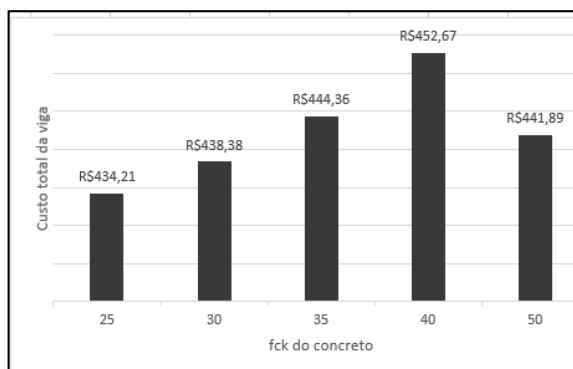
- Para vigas com vão de 4 m:

Figura 13 - Gráfico da composição de custos da viga de 4 m após otimização no Solver



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

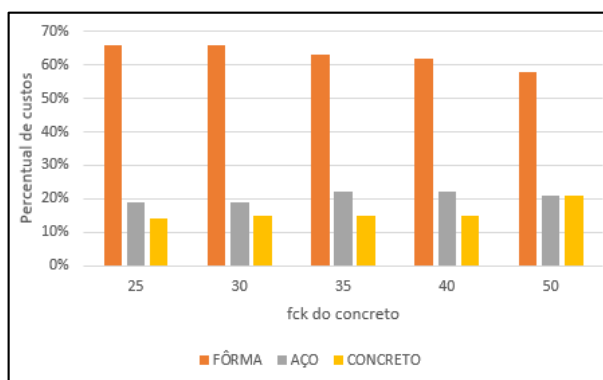
Figura 14 - Gráfico do custo total da viga de 4 m



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

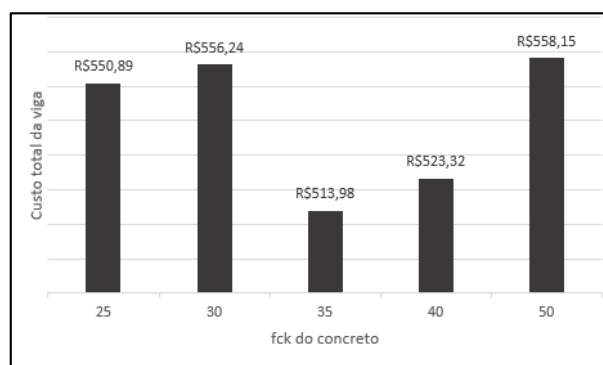
- Para vigas com vão de 4,5 m:

Figura 15 - Gráfico da composição de custos da viga de 4,5 m após otimização no Solver



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

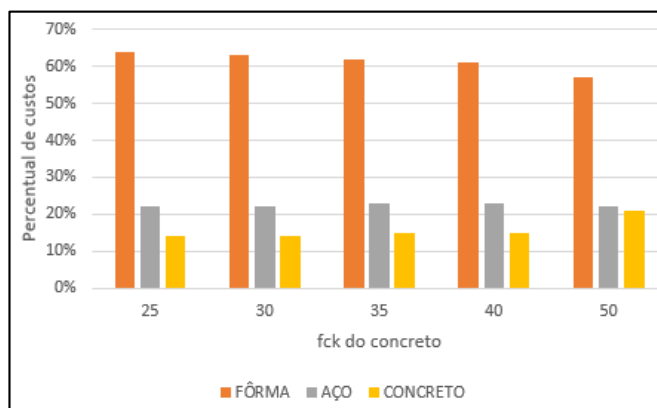
Figura 16 - Gráfico do custo total da viga de 4,5 m



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

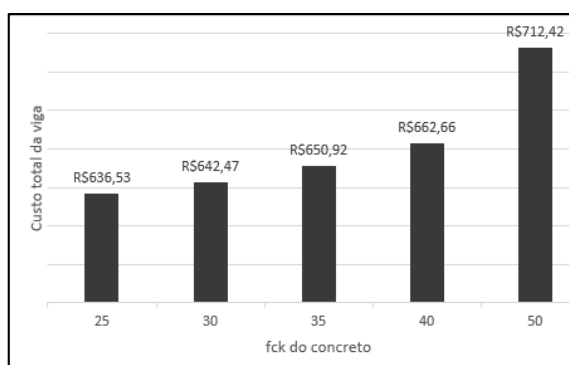
- Para vigas com vão de 5 m:

Figura 17 - Gráfico da composição de custos da viga de 5 m após otimização no Solver



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

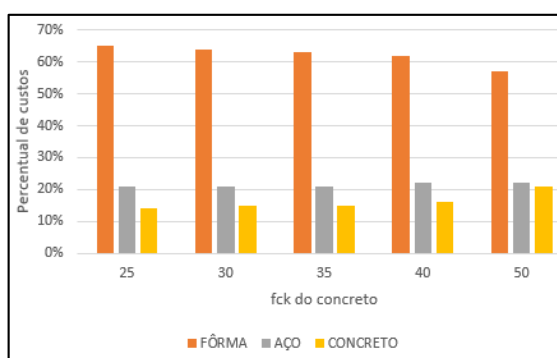
Figura 18 - Gráfico do custo total da viga de 5 m



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

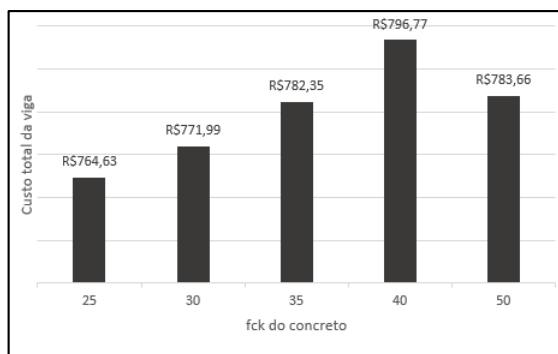
- Para vigas com vão de 5,5 m:

Figura 19 - Gráfico da composição de custos da viga de 5,5 m após otimização no Solver



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

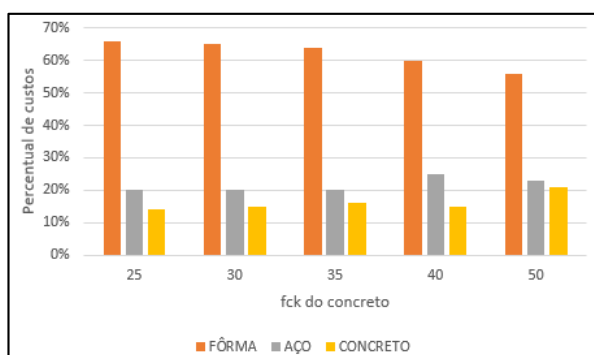
Figura 20 - Gráfico do custo total da viga de 5,5 m



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

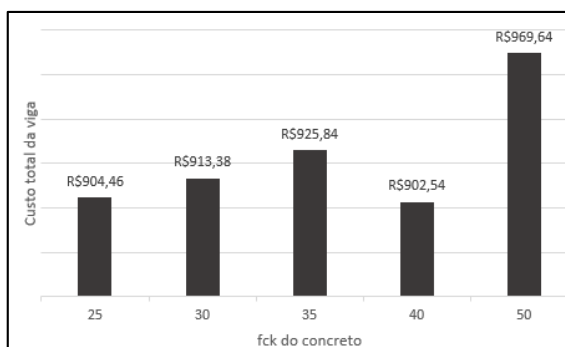
- Para vigas com vão de 6,0 m:

Figura 21 - Gráfico da composição de custos da viga de 6 m após otimização no Solver



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Figura 22 - Gráfico do custo total da viga de 6 m



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

O resultado da composição acima mostra que a fôrma é a parcela de maior contribuição no valor da viga. Conforme citado anteriormente, a medida que se aumenta a resistência do concreto há uma redução em sua geometria. Contudo, com o arredondamento da altura ótima, em sua maioria, ao variar o fck resultarão em alturas semelhantes e não haverá alteração no custo da fôrma. Dessa forma, o diferencial será o preço do concreto, resultando um custo ótimo aquele dimensionado com o concreto de menor resistência, por ser o mais econômico.

4.2 Relação da altura ótima x vão da viga

Em um pré-projeto o dimensionamento para vigas bi apoiadas e sem balanços nas extremidades a altura inicial pode ser obtida dividindo-se o vão por 10, ou seja, 10% do vão. Com base nisso, segue abaixo o cálculo dessa relação:

Tabela 17 – Relação altura ótima x vão da viga

Vão (m)	fck (Mpa)	h ótima (m)	Relação h / L (%)
3,0	25	0,25	8,33
	30	0,25	8,33
	35	0,25	8,33
	40	0,25	8,33
	50	0,25	8,33
3,5	25	0,30	8,57
	30	0,30	8,57
	35	0,30	8,57
	40	0,30	8,57
	50	0,30	8,57
4,0	25	0,35	8,75
	30	0,35	8,75
	35	0,35	8,75
	40	0,35	8,75
	50	0,30	7,50

4,5	25	0,40	8,89
	30	0,40	8,89
	35	0,35	7,78
	40	0,35	7,78
	50	0,35	7,78
5,0	25	0,40	8,00
	30	0,40	8,00
	35	0,40	8,00
	40	0,40	8,00
	50	0,40	8,00
5,5	25	0,45	8,18
	30	0,45	8,18
	35	0,45	8,18
	40	0,45	8,18
	50	0,40	7,27
6,0	25	0,50	8,33
	30	0,50	8,33
	35	0,50	8,33
	40	0,45	7,50
	50	0,45	7,50

Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Percebe-se que é possível obter uma relação custo-benefício sem necessariamente ter que usar a expressão $L/10$. Os resultados mostram valores ótimos em que a relação é menor que 10% e está de acordo com os critérios estabelecidos em norma. E, através do auxílio da ferramenta de otimização do Excel, o Solver, é possível encontrar esse valor ótimo, conforme apresentado nas tabelas anteriores.

5 CONCLUSÃO

Em relação à altura ótima é obtido um valor ideal de acordo com o tamanho do vão e do concreto a ser utilizado, respeitando as demais restrições. Através dos dados obtidos na relação da altura ótima com o tamanho do vão, pode-se perceber que as alturas ótimas correspondem em torno de 7% a 9% do tamanho do vão, a depender da resistência do concreto. Enquanto, em um pré-dimensionamento convencional, é adotado uma altura inicial de 10% do vão e através de várias tentativas ir em busca da melhor solução, o que acaba tornando inviável economicamente.

Os resultados apresentados, com valores correspondentes para uma viga, comprovam a eficiência no método de otimização quando utilizada a ferramenta *Solver* do Microsoft Excel e comparado ao dimensionamento convencional, apresentando uma significativa economia. Logo, em um projeto completo essa diferença de custos terá maior significância.

Com o exposto referente aos elementos que compõem o custo, nota-se que o concreto possui uma menor parcela de contribuição, seguido do aço. Já a fôrma, apresenta a maior contribuição para o custo final da viga. Logo, é de extrema importância a busca de soluções otimizadas a fim de obter uma redução significativa do preço final.

Portanto, o objetivo do presente trabalho foi alcançado e para trabalhos futuros, sugere-se a aplicação desse método de otimização aliado a meios que possibilitem a reutilização das fôrmas, buscando uma padronização das seções nos problemas mais usuais.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, L. C. **Solicitações normais: Cálculo no estado limite último**. Notas de aulas, Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2002.
- ARAÚJO, J. M. **Curso de Concreto Armado**. v. 1, 4.ed, Rio Grande, Dunas, 2014
- ARORA, J. S. **Introduction to optimum design**. 3rd. ed. Waltham: Elsevier, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto**: Procedimento. Rio de Janeiro. 238p. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro. 60p. 2019.
- BEZERRA, M. F. **Otimização multiobjetivo de lajes nervuradas em concreto armado**. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2017.
- BORDIGNON, R. Diretrizes para minimização do custo de pilares de concreto armado. **Revista Técnica**, São Paulo, n. 178, p. 50-53, Janeiro 2012. Disponível em: < <http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/178/diretrizes-para-minimizacao-do-custo-de-pilares-de-concreto-armado-285912-1.aspx> > Acesso em: 19 Abr. 2019
- CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado** 3ª. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2009.
- CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**: Segundo a NBR 6118:2014. 4ª. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2014.
- CHRISTENSEN, P. W.; KLARBRING, A. **A introduction to structural optimization**. 9th. ed. Linköping: Springer, 2009.
- CORRAR, L. J. et al. Pesquisa Operacional para Decisão em Contabilidade e Administração. São paulo: Atlas, 2004.
- EDGAR, T. F.; HIMMELBLAU, D. M.; LASDON, L. S. **Optimization of Chemical Process**. Second edition. ed. New York: McGraw-Hill Chemical Engineering Series, 2001.
- LOPEZ, R. H.; MIGUEL, L. F. F. **Introdução a otimização estrutural**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 7. 2013. Disponível em: < http://ppgec.posgrad.ufsc.br/files/2013/05/Topicos_Pesquisa_UFSC-otimiza%C3%A7%C3%A3o.pdf > Acesso em: 13 Abr. 2019
- MEDRANO, M. S. **Aplicações de programação matemática em análise estrutural**. Dissertação de Mestrado, EPUSP/ USP. São Paulo. 1994.
- MUNIZ JUNIOR, F. H. M.; OLIVEIRA, D. Otimização de vigas de concreto armado

com seção retangular submetidas à flexão normal simples. **Revista Construindo**, Belo Horizonte, v. 6, n. 1, Jan/ Jun 2014. Disponível em: <<http://www.fumec.br/revistas/construindo/article/view/2576/1500>> Acesso em 19 Abr. 2019

SEINFRA - Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará. Disponível em: <<https://sites.seinfra.ce.gov.br/siproce/desonerada/html/tabela-seinfra.html>> Acesso em 12 nov. 2019

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 4^a. ed. Florianópolis: UFSC, 2005.

CIVILNET. **AULAS de concreto**: bases para o cálculo. São Paulo, Disponível em: <<http://civilnet.com.br/Files/Concreto/Aulas%20Concreto%201.pdf>>, Acesso em 10 jun 2019

APÊNDICE

APÊNDICE A – Modelo de planilha para otimização

OTIMIZAÇÃO DE VIGA BIPOIADA DE CONCRETO ARMADO DE SEÇÃO RETANGULAR			
VARIÁVEIS:		RESTRICÕES:	
Largura da Seção Transversal (m):	$b_w = 0,12$ m	$b_w \geq 0,12$	
Altura da Seção Transversal (m):	$h = 0,30$ m	$h \geq 0,22$	
DADOS DE ENTRADA:		$f_{ck} \leq 25000$	
Resistência do Concreto:	$f_{ck} = 25000$ KN/m ²	$f_{ctm} \leq 50000$	
Comprimento do vão:	$L = 3,5$ m	$x \leq 0,122$	
		$f_{final} \leq 0,012$	fim
Outros dados:		Deformação em vigas	
Resistência característica concreto:	$f_{ck} = 25$ Mpa	Mód.elast.sec do conc:	$E_{cs} = 24,15$ Gpa
Cobrimento ϕ / CAA II:	$c = 0,03$ m	Mód.elast Do aço:	$E_s = 210,00$ Gpa
Peso específico do CA:	$\gamma_c = 25$ KN/m ³	Resist.méd à tração conc:	$f_{ctm} = 2,565$ Mpa
Resistência de cálculo do concreto:	$f_{cd} = 17857,143$		$f_{ctm} = 2565$ KN/m ²
Fator de Segurança:	Concreto 1,4		$\alpha_e = 1,0$
Fator de Segurança:	Aço 1,15		$\alpha_f = 0,86 \leq 1$
Carregamento:		Cálculo da LN (x) no Est II	
Peso próprio da viga:	$P_p = 0,90$ KN/m		$A = 0,12$
Peso da alvenaria:	$P_{alv} = 4$ KN/m		$B = 0,0030$
Peso da laje:	$P_{laj} = 3$ KN/m		$C = -0,00079$
Carga acidental:	$Q_{ac} = 0,9$ KN/m		$\Delta = 0,000388495$
Carregamento total:	$P = 8,80$ KN/m		$X(x) = 0,0695$ m
			$n = 8,70$
			$d = 0,261$
Cálculo da Área de aço:		Mom Inercia no estágio I	
Altura útil de vige:	$d = 0,27$ m		$I = 0,00027$ m ⁴
Altura útil mínima da viga:	$d_{min} = 0,19$ m	Mom Inercia no estágio II	
Momento de cálculo atuante:	$M_d = 18,87$ KN.m		$I = 0,00069$ m ⁴
Cálculo da Linha Neutra (x):	$A = 582,86$	Mom Fleção Característ	
	$B = -393,43$		$M_k = 13,48$ KN.m
	$C = 18,865$	M.Fleção de fissuração	
	$\Delta = 11,0803,64$		$M_r = 4,51$ KN.m
	$x = 0,0519$ m	Rigidez equivalente	
	$z = 0,2492$		$ E _{eq} = 1846,74 \leq 6520,5$
	$A_s \leq 0,0001741$ m ²	Flecha imediata	
	$A_s = 1,74$ cm ²		$f_0 = 0,0093$ m
	$A_{s,min} = 0,54$ cm ²	Coefficiente de fluência	
Condição	$A_s \geq A_{s,min}$ Atende!		$\alpha_f = 1,32$
		Coeff. função do tempo	
			$\Delta E = 1,32$
		Taxa de armadura sup.	
			$p' = 0$
		Área de aço	
			$A_s' = 0,00$
		Flecha total	
			$f_{tot} = 0,0216$ m
		Contra flecha	
			$Cont f = 0,01$ m
		Flecha limite	
			$f_{lim} = 0,014$ m
		Flecha final	
			$f_{final} = 0,0116$ m
Verificações:			
α_e	0,80	\leq	1
$ E _{eq}$	1846,74	\leq	6520,5
$A_s \geq A_{s,min}$	1,74	\geq	0,54
$V_{cd} \leq V_{rd2}$	15,4	\leq	140,59
$V_c > V_{sd}$	24,93	$>$	15,4
$e \leq e_{max}$	15	\leq	16,2
$e \leq e_{max}$	16,2	\leq	30 cm
Detalhamento da Armadura Positiva			
ϕ	Área	n ² barras	n
6,3	0,31	5,616151	6
8	0,5	3,482014	4
10	0,8	2,176259	3
12,5	1,25	1,392806	2
20	3,15	0,552701	1
Armadura escolhida +			
ϕ	Área	n ² barras	n
8	0,5	3,482014	4
Armadura negativa			
ϕ	Área	n	C Total
5	0,196	2	3,5
Estribos			
$V_{sd} =$	15,4	KN	
$V_{rd} =$	140,59	KN	
$V_{sd} \leq V_{rd2}$	Ok!		
$f_{ctd} =$	1,2825	Mpa	
$f_{ctd} =$	0,1282	KN/m ²	
$V_c =$	24,93	KN	
$V_c > V_{sd}$	Calcular $A_{s,min}$		
Área de Aço dos estribos		Comprimento Unit (m)	
$A_{sw,min} =$	0,0001026	m ² /m	0,74
$A_{sw,min} =$	1,026	cm ² /m	
$f_{yk} =$	600,00	CA-60	
ϕ	Área	n ² barras	n
5	0,196	5,23	7
1 estribo a cada:		15	cm
Verificação quanto ao espaçamento máximo			
$Trid =$	0,43	KN/m ²	
$Trid =$	0,0475		
$e \leq e_{max} =$	16,2	\leq	30 cm
Custo da Forma			
A forma (m ²) =	2,52		
R\$ forma (m ²) =	88,44		
Custo da forma		R\$222,87	
Custo do Concreto			
Vol conc (m ³) =	0,126		
R\$ conc (m ³) =	360,74		
Custo do Concreto		R\$45,45	
Custo do Aço			
ϕ (mm)	CA	Massa Nominal Kg/m	Total de aço (kg)
8	50	0,395	5,53
5	60	0,154	1,08
5	60	0,154	2,66
Preço do aço		R\$/kg	
Armadura Positiva		7,92	
Armadura Negativa		7,83	
Estribos		7,83	
Preço do Aço			
Armadura Positiva		43,80	
Armadura Negativa		8,44	
Estribos		20,82	
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	
Preço do aço por Kg			
CA-50 (mm)		R\$/Kg	
6,3 a 10		7,92	
12,5 a 25		8,69	
CA-60 (mm)		R\$/Kg	
3,4 a 6,4		7,83	
Resultado Final			
Custo Total		73,06	

Fonte: elaborado pelo autor (2019)

ANEXOS

ANEXO A – Custos da composição da Fôrma

Tabela de Custos - Versão 026.1 - ENC. SOCIAIS 85,20%					
C1399 - FORMA PLANA CHAPA COMPENSADA PLASTIFICADA, ESP.= 12mm UTIL. 5X					
Preço Adotado: 88,4400					Unid: M2
Código	Descrição	Unidade	Coeficiente	Preço	Total
MATERIAIS					
I1916	TABUA DE 1" DE 3A. - L = 30cm	M	1,1700	8,0700	9,4419
I0526	CHAPA COMPENSADO PLASTIFICADO 12MM (1.22 X 2.44M)	M2	0,2600	21,2600	5,5276
I1728	PREGO 18X27 (2 1/2 X 10)	KG	0,2500	11,2600	2,8150
I1691	PONTALETE / BARROTE DE 3"x3"	M	1,2000	16,4400	19,7280
I1846	SARRAFO DE 1"X4"	M	1,5300	4,7400	7,2522
TOTAL MATERIAIS					44,7647
MAO DE OBRA					
I0498	CARPINTEIRO	H	1,3500	17,8300	24,0705
I0041	AJUDANTE DE CARPINTEIRO	H	1,3500	14,5200	19,6020
TOTAL MAO DE OBRA					43,6725
Total Simples					88,44
Encargos					<i>INCLUSOS</i>
BDI					0,00
TOTAL GERAL					88,44

Fonte: Seinfra (2018)

ANEXO B – Custos da composição da Armadura CA-50 Média

Tabela de Custos - Versão 026.1 - ENC. SOCIAIS 85,20%					
C0216 - ARMADURA CA-50A MÉDIA D= 6,3 A 10,0mm					
Preço Adotado: 7,9200					Unid: KG
Código	Descrição	Unidade	Coefficiente	Preço	Total
MATERIAIS					
I0163	AÇO CA-50	KG	1,1500	4,4400	5,1060
I0103	ARAME RECOZIDO N.18 BWG	KG	0,0200	11,5000	0,2300
TOTAL MATERIAIS					5,3360
MAO DE OBRA					
I0040	AJUDANTE DE ARMADOR/FERREIRO	H	0,0800	14,5200	1,1616
I0121	ARMADOR/FERREIRO	H	0,0800	17,8300	1,4264
TOTAL MAO DE OBRA					2,5880
Total Simples					7,92
Encargos					<i>INCLUSOS</i>
BDI					0,00
TOTAL GERAL					7,92

Fonte: Seinfra (2018)

ANEXO C – Custos da composição da Armadura CA-50 Grossa

Tabela de Custos - Versão 026.1 - ENC. SOCIAIS 85,20%					
C0215 - ARMADURA CA-50A GROSSA D= 12,5 A 25,0mm					
Preço Adotado: 8,6900					Unid: KG
Código	Descrição	Unidade	Coefficiente	Preço	Total
MATERIAIS					
I0163	AÇO CA-50	KG	1,1500	4,4400	5,1060
I0103	ARAME RECOZIDO N.18 BWG	KG	0,0300	11,5000	0,3450
TOTAL MATERIAIS					5,4510
MAO DE OBRA					
I0040	AJUDANTE DE ARMADOR/FERREIRO	H	0,1000	14,5200	1,4520
I0121	ARMADOR/FERREIRO	H	0,1000	17,8300	1,7830
TOTAL MAO DE OBRA					3,2350
Total Simples					8,69
Encargos					<i>INCLUSOS</i>
BDI					0,00
TOTAL GERAL					8,69

Fonte: Seinfra (2018)

ANEXO D – Custos da composição da Armadura CA-60 Fina

Tabela de Custos - Versão 026.1 - ENC. SOCIAIS 85,20%					
C0217 - ARMADURA CA-60 FINA D=3,40 A 6,40mm					
Preço Adotado: 7,8300					Unid: KG
Código	Descrição	Unidade	Coefficiente	Preço	Total
MAO DE OBRA					
I0040	AJUDANTE DE ARMADOR/FERREIRO	H	0,0700	14,5200	1,0164
I0121	ARMADOR/FERREIRO	H	0,0700	17,8300	1,2481
TOTAL MAO DE OBRA					2,2645
MATERIAIS					
I0169	AÇO CA-60	KG	1,1500	4,6400	5,3360
I0103	ARAME RECOZIDO N.18 BWG	KG	0,0200	11,5000	0,2300
TOTAL MATERIAIS					5,5660
Total Simples					7,83
Encargos					<i>INCLUSOS</i>
BDI					0,00
TOTAL GERAL					7,83

Fonte: Seinfra (2018)

ANEXO E - Custos da composição do Concreto fck 25 MPa

Tabela de Custos - Versão 026.1 - ENC. SOCIAIS 85,20%					
C0843 - CONCRETO P/VIBR., FCK 25 MPa COM AGREGADO ADQUIRIDO					
Preço Adotado: 360,7400					Unid: M3
Código	Descrição	Unidade	Coefficiente	Preço	Total
MAO DE OBRA					
I2543	SERVENTE	H	6,0000	13,2100	79,2600
TOTAL MAO DE OBRA					79,2600
MATERIAIS					
I0280	BRITA	M3	0,6270	76,7500	48,1222
I0109	AREIA MEDIA	M3	0,8669	51,0000	44,2119
I0805	CIMENTO PORTLAND	KG	349,0000	0,4600	160,5400
I1605	PEDRISCO	M3	0,2090	69,7500	14,5778
TOTAL MATERIAIS					267,4519
EQUIPAMENTOS (CHORARIO)					
I0682	BETONEIRA ELÉTRICA 580L (CHP)	H	0,7140	19,6437	14,0256
TOTAL EQUIPAMENTOS (CHORARIO)					14,0256
Total Simples					360,74
Encargos					INCLUSOS
BDI					0,00
TOTAL GERAL					360,74

Fonte: Seinfra (2018)

ANEXO F - Custos da composição do Concreto fck 30 MPa

Tabela de Custos - Versão 026.1 - ENC. SOCIAIS 85,20%					
C0844 - CONCRETO P/MIBR., FCK 30 MPa COM AGREGADO ADQUIRIDO					
Preço Adotado: 385,5200					Unid: M3
Código	Descrição	Unidade	Coefficiente	Preço	Total
MAO DE OBRA					
I2543	SERVENTE	H	6,0000	13,2100	79,2600
TOTAL MAO DE OBRA					79,2600
MATERIAIS					
I0280	BRITA	M3	0,6270	76,7500	48,1222
I0109	AREIA MEDIA	M3	0,9290	51,0000	47,3790
I0805	CIMENTO PORTLAND	KG	396,0000	0,4600	182,1600
I1605	PEDRISCO	M3	0,2090	69,7500	14,5778
TOTAL MATERIAIS					292,2390
EQUIPAMENTOS (CHORARIO)					
I0682	BETONEIRA ELÉTRICA 580L (CHP)	H	0,7140	19,6437	14,0256
TOTAL EQUIPAMENTOS (CHORARIO)					14,0256
Total Simples					385,52
Encargos					<i>INCLUSOS</i>
BDI					0,00
TOTAL GERAL					385,52

Fonte: Seinfra (2018)

ANEXO G - Custos da composição do Concreto fck 35 MPa

Tabela de Custos - Versão 026.1 - ENC. SOCIAIS 85,20%					
C0845 - CONCRETO P/VIBR., FCK 35 MPa COM AGREGADO ADQUIRIDO					
Preço Adotado: 402,1900					Unid: M3
Código	Descrição	Unidade	Coefficiente	Preço	Total
MAO DE OBRA					
I2543	SERVENTE	H	6,0000	13,2100	79,2600
TOTAL MAO DE OBRA					79,2600
MATERIAIS					
I0280	BRITA	M3	0,6270	76,7500	48,1222
I0109	AREIA MEDIA	M3	0,7867	51,0000	40,1217
I0805	CIMENTO PORTLAND	KG	448,0000	0,4600	206,0800
I1605	PEDRISCO	M3	0,2090	69,7500	14,5778
TOTAL MATERIAIS					308,9017
EQUIPAMENTOS (CHORARIO)					
I0682	BETONEIRA ELÉTRICA 580L (CHP)	H	0,7140	19,6437	14,0256
TOTAL EQUIPAMENTOS (CHORARIO)					14,0256
Total Simples					402,19
Encargos					INCLUSOS
BDI					0,00
TOTAL GERAL					402,19

Fonte: Seinfra (2018)

ANEXO H - Custos da composição do Concreto fck 40 MPa

Tabela de Custos - Versão 026.1 - ENC. SOCIAIS 85,20%					
C0846 - CONCRETO P/VIBR., FCK 40 MPa COM AGREGADO ADQUIRIDO					
Preço Adotado: 426,8900					Unid: M3
Código	Descrição	Unidade	Coefficiente	Preço	Total
MAO DE OBRA					
I2543	SERVENTE	H	6,0000	13,2100	79,2600
TOTAL MAO DE OBRA					79,2600
MATERIAIS					
I0280	BRITA	M3	0,6270	76,7500	48,1222
I0109	AREIA MEDIA	M3	0,7389	51,0000	37,6839
I0805	CIMENTO PORTLAND	KG	507,0000	0,4600	233,2200
I1605	PEDRISCO	M3	0,2090	69,7500	14,5778
TOTAL MATERIAIS					333,6039
EQUIPAMENTOS (CHORARIO)					
I0682	BETONEIRA ELÉTRICA 580L (CHP)	H	0,7140	19,6437	14,0256
TOTAL EQUIPAMENTOS (CHORARIO)					14,0256
Total Simples					426,89
Encargos					<i>INCLUSOS</i>
BDI					0,00
TOTAL GERAL					426,89

Fonte: Seinfra (2018)

ANEXO I - Custos da composição do Concreto fck 50 MPa

Tabela de Custos - Versão 026.1 - ENC. SOCIAIS 85,20%					
C3731 - CONCRETO P/VIBR., FCK 50MPa COM AGREGADO ADQUIRIDO					
Preço Adotado: 619,0700					Unid: M3
Código	Descrição	Unidade	Coefficiente	Preço	Total
MAO DE OBRA					
I2543	SERVENTE	H	6,0000	13,2100	79,2600
TOTAL MAO DE OBRA					79,2600
MATERIAIS					
I0280	BRITA	M3	0,7314	76,7500	56,1371
I0109	AREIA MEDIA	M3	0,4127	51,0000	21,0460
I6803	SÍLICA ATIVA	KG	55,0000	2,7800	152,9000
I6802	SUPERPLASTIFICANTE DENSIFICADOR E RETARDADOR DE PEGA	KG	6,9300	10,6100	73,5273
I6801	ADITIVO PLASTIFICANTE DENSIFICADOR E RETARDADOR DE PEGA	KG	1,6170	5,9700	9,6535
I0805	CIMENTO PORTLAND	KG	462,0000	0,4600	212,5200
TOTAL MATERIAIS					525,7839
EQUIPAMENTOS (CHORARIO)					
I0682	BETONEIRA ELÉTRICA 580L (CHP)	H	0,7140	19,6437	14,0256
TOTAL EQUIPAMENTOS (CHORARIO)					14,0256
Total Simples					619,07
Encargos					<i>INCLUSOS</i>
BDI					0,00
TOTAL GERAL					619,07

Fonte: Seinfra (2018)