INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CAMPUS VITÓRIA

MESTRADO PROFISSIONAL EM TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS

**ÁLVARO LUIZ LAGO DE MENEZES**

**OTIMIZAÇÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO DE SEÇÃO RETANGULAR E ARMADURA SIMPLES**

Vitória

2019

ÁLVARO LUIZ LAGO DE MENEZES

**OTIMIZAÇÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO DE SEÇÃO RETANGULAR E ARMADURA SIMPLES**

Trabalho apresentado durante a disciplina Métodos de Otimização: Matemáticos e Heurísticos do Programa de Pós-graduação em Tecnologias Sustentáveis do Instituto Federal do Espírito Santo.

Área de Concentração: Desenvolvimento de Produtos e Processos Sustentáveis.

Linha de pesquisa: Linha 1 – Otimização de Serviços, Sistemas e Processos.

Professor: Mário Mestria

Vitória

2019

SUMÁRIO

SUMÁRIO 2

1 INTRODUÇÃO 3

2 DESENVOLVIMENTO 3

2.1 FUNÇÃO EXEMPLO 4

2.2 TAREFA 1 5

2.2.1 Tarefa 1 – função a 5

2.2.2 Tarefa 1 – função b 6

2.2.3 Tarefa 1 – função c 7

2.3 TAREFA 2 8

2.3.1 Tarefa 2 – função I 8

2.3.2 Tarefa 2 – função II 9

2.3.3 Tarefa 2 – função III 10

2.3.4 Tarefa 2 – função IV 11

3 CONCLUSÃO 12

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA 13

ANEXO I 14

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material construtivo mais utilizado do mundo, devido a possibilidade de modelagem em diversas formas e tamanhos, por ser resistente à água, pelo seu menor custo e pela sua menor produção de poluentes em relação a outros materiais utilizados na construção civil (Pedroso, 2009).

A Engenharia busca um dimensionamento estrutural correto do concreto armado, tendo em vista a preocupação com a relação custo/benefício e com a utilização sustentável do material. Por se tratar de um processo baseado em experiências, tentativas e erros, o auxílio de métodos computacionais é indicado para obtenção de dimensionamentos com o menor custo possível.

O dimensionamento tradicional do concreto armado é realizado através de iterações onde já se indica uma seção transversal, aproximada por experiências e projetos previamente realizados.

De acordo com as restrições do dimensionamento, uma nova seção transversal é adotada ou não, com a finalidade de atender as restrições ou de diminuir os custos. Por se tratar de um processo de tentativa e erro, o processo torna-se demorado se for feito sem a utilização de métodos computacionais.

Durante o trabalho serão apresentadas a função objetivo de custo e as restrições relativas à otimização de vigas de concreto armado biapoiadas, de seção retangular e armadura simples. Será utilizado o *solver* *fmincon*, presente no *Optimization Toolbox* do Matlab, para otimização do custo da viga, variando os possíveis algoritmos e comparando seus resultados e performance em termos de iterações.

Como a execução das tarefas era repetitiva, foi criada uma função auxiliar que recebe como parâmetros o comprimento L da viga em metros e executa o *solver fmincon* variando os algoritmos. O código da função está disponível no Anexo I.

Para a execução das tarefas, foi utilizado o Matlab R2018b, versão 9.5.0 em ambiente *Windows*.

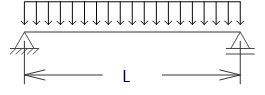
O código e os resultados obtidos nas execuções das tarefas também estão disponíveis no *Github* em https://github.com/alvarollmenezes/ifes-otimizacao-final.

2 conceitos

O concreto armado é a associação entre o concreto simples e a armadura passiva convenientemente colocada, de tal maneira que ambos resistam aos esforços solicitantes (Carvalho e Figueiredo, 2014).

O trabalho busca dimensionar vigas biapoiadas com carregamentos distribuídos e comprimento L, conforme a Figura 1.

Figura 1 – Viga biapoiada com carregamento distribuído



Fonte: Acervo pessoal

Vigas de armadura simples possuem dois tipos de armadura: armadura longitudinal, responsável pela resistência ao momento fletor e armadura transversal, responsável pela resistência ao esforço cortante.

Portanto, na formação do custo, que será utilizado como função objetivo na otimização, deve ser calculado o custo do concreto e do aço das armaduras. Também deve ser levado em conta o custo da fôrma de madeira utilizada na construção da viga.

Para o dimensionamento da seção retangular, com vigas de armadura simples, foram admitidas as hipóteses de acordo com a NBR 6118 (2004). As restrições consideradas nas vigas são: a armadura máxima, a capacidade de resistência à flexão, a capacidade de resistência ao cisalhamento, a flecha limite e normas de segurança à instabilidade da viga.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 FUNÇÃO OBJETIVO

O objetivo do problema é minimizar o custo de construção da viga, os custos do concreto, aço e forma estão descritos abaixo, retirados da tabela SINAPI da Caixa Econômica Federal de 2017, referentes ao estado do Espírito Santo.

Os valores de cada material são calculados abaixo:

* Valor total do concreto:

Onde:

= Valor total do concreto;

= área da seção transversal do concreto;

= Custo do concreto.

* Valor total do aço:

Onde:

= Valor total do aço;

= área da seção longitudinal do aço;

= área da seção transversal do aço;

= Peso específico do aço;

= custo do aço.

* Valor total da forma:

Onde:

= Valor total da forma;

= altura da viga;

= base da viga;

= custo da forma.

Assim, tem-se o custo total:

3.2 FUNÇÕES DE RESTRIÇÃO

As restrições consideradas nas vigas são: a armadura máxima, a capacidade de resistência à flexão, a capacidade de resistência ao cisalhamento, a flecha limite e normas de segurança à instabilidade da viga. Seus cálculos são descritos a seguir.

3.2.1 Capacidade de resistência à flexão

Momento fletor de cálculo: o momento fletor depende do carregamento e dos apoios em uma viga. Os cálculos para cada caso, são encontrados no anexo II. Após calcular o momento fletor, este deve ser multiplicado pelo coeficiente de 1,4.

* Momento fletor de cálculo máximo com armadura simples:

Tendo-se:

* Resistência de cálculo do concreto à compressão :
* = Altura útil da viga

3.2.2 Armadura máxima

Para a armadura máxima, deve-se levar em conta a seguinte expressão (Restrição 3):

Onde, de acordo com ACI, é o índice de armadura para a condição balanceada, dado pela fórmula:

Onde:

= Resistência de compressão do concreto;

= Valor característico da resistência de escoamento do aço;

= Módulo de elasticidade secante do concreto.

Tendo-se:

e , para , definido na seção 10.2.7.3 da norma ACI (1998). é um fator e este depende da resistência de compressão do concreto.

3.2.3 Capacidade de resistência ao cisalhamento

Para determinar a capacidade de resistência ao cisalhamento, devemos levar em conta a força cortante de cálculo máxima resistida por compressão diagonal das bielas de concreto. A força cortante de cálculo não pode ultrapassar a força cortante de cálculo máxima (Restrição 4):

Tendo-se:

* Coeficiente de redução da resistência do concreto fissurado por força cortante:
* Resistência de cálculo do concreto à compressão :
* Esforço cortante de cálculo em kN (Vd):
* Carregamento da viga em kN/m (p):
* Carga do peso próprio da viga em kN/m (gpp):
* Carregamento permanente em kN/m(g):

3.2.4 Verificação da flecha limite

A flecha total não deve ultrapassar a flecha limite, sendo a flecha máxima para limitar o efeito visual desagradável (Restrição 5):

Tendo-se:

* Cálculo da flecha limite em m:
* Flecha total é definida a seguir:
* Cálculo da flecha imediata é escrito como:
* Flecha elástica (): depende do carregamento e dos apoios em uma viga. Entra em vigor ao entrar em carga. Os cálculos para cada caso, são encontrados no Anexo II.
* Momento de inércia da seção bruta para seção retangular (Ic):
* O momento de inércia da sessão (Ie) é calculado de acordo com o Anexo V, na seção flecha imediata.
* Para a flecha diferida (): ocorre do efeito da fluência no concreto), o cálculo também segue o indicado no Anexo V.

3.2.5 Normas de segurança à instabilidade da viga

As normas de segurança estão definidas conforme a NBR 6118 (2004).

A segurança à instabilidade lateral de vigas deve sergarantida através de procedimentos apropriados. Como procedimento aproximado pode-se adotar,para vigas de concreto, com armaduras passivas ou ativas, sujeitas à flambagem lateral, asseguintes condições (NBR 6118, 2004, p. 100).

* Restrição 6:
* Restrição 7:
* Restrição 8:

Sendo que para a topologia da viga utilizada, de acordo com a NBR 6118: .

3.3 EXECUÇÃO DOS TESTES

O *solver fmincon* precisa de um palpite inicial de solução (x0), para isso adota-se uma altura e uma base inicial para a seção transversal da viga, de acordo com a NBR 6118 (2004):

* Para a estimativa da altura (h), em uma viga biapoiada:
* Para a estimativa da base (b):

Foram executados dois testes com comprimentos de viga 5m e 7m, O código executado foi respectivamente:

>> app(5);

>> app(7);

Os resultados foram os seguintes:

4 RESULTADOS

3 CONCLUSÃO

Foi possível perceber uma tendência a convergir mais rapidamente utilizando-se os algoritmos *bfgs* e *dfp,* para o método de escolha de direção de busca. Porém há casos e que o método *steepdesc* se comporta não apenas convergindo mais rapidamente, como trazendo uma solução melhor, como foi o caso da função II da tarefa 2.

REFERÊNCIA

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318-98:** Building code requirements for reinforced concrete, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:** Projetos de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, RJ. 2004.

CARVALHO R. C.; FIGUEIREDO FILHO J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado.** 4 ed. São Carlos: EdUFSCar, 2014.

MAIA, J. P. R. **Otimização estrutural: estudo e aplicações em problemas clássicos de vigas utilizando a ferramenta Solver.**2009. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. 2009.

MUSSO JUNIOR, F. **Estruturas de Concreto.** Vitória, ES. 2012. (Apostila).

PEDROSO, Fábio Luís. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Concreto: material construtivo mais consumido no mundo.** São Paulo, SP. 53, p. 14-19, jan-mar, 2009.

PRAVIA, Z. M. C. **Exemplo de um Projeto Completo de um Edifício de Concreto Armado.** São Paulo, SP. 2001.

ANEXO I

Arquivo executar.m:

function [bfgs, dfp, steep] = executar(func, x0)

options\_bfgs = optimoptions(@fminunc, 'Algorithm', 'quasi-newton',

'hessupdate', 'bfgs', 'Display', 'iter');

options\_dfp = optimoptions(@fminunc, 'Algorithm', 'quasi-newton',

'hessupdate', 'bfgs', 'Display', 'iter');

options\_steep = optimoptions(@fminunc, 'Algorithm', 'quasi-newton',

'hessupdate', 'steepdesc', 'Display', 'iter');

disp('Executando ''fminunc'' com o método ''bfgs''');

[bfgs.x, bfgs.fval, bfgs.exitflag, bfgs.output] = ...

fminunc(func, x0, options\_bfgs);

bfgs

bfgs\_output = bfgs.output

disp('Executando ''fminunc'' com o método ''dfp''');

[dfp.x, dfp.fval, dfp.exitflag, dfp.output] = ...

fminunc(func, x0, options\_dfp);

dfp

dfp\_output = dfp.output

disp('Executando ''fminunc'' com o método ''steepdesc''');

[steep.x, steep.fval, steep.exitflag, steep.output] = ...

fminunc(func, x0, options\_steep);

steep

steep\_output = steep.output

end

Arquivo fexemplo.m:

function f = fexemplo(x)

f = 3\*x(1)^2 + 2\*x(1)\*x(2) + x(2)^2;

end

Arquivo ft1a.m:

function f = ft1a(x)

f = 2 \* (x(1) - 2\*x(2))^2 + 1/2 \* (x(2) - x(1)^2)^2;

end

Arquivo ft1b.m:

function f = ft1b(x)

f = 1/2 \* ((x(1) - 1)^2 + (x(2) - x(1)^2)^2);

end

Arquivo ft1c.m:

function f = ft1c(x)

f = -24\*x(1)\*x(2) + x(1)^2\*x(2) + x(1)\*x(2)^2;

end

Arquivo ft2i.m:

function f = ft2i(x)

f = x(1)^2 + x(2)^2 - 1;

end

Arquivo ft2ii.m:

function f = ft2ii(x)

f = x(1)^4 + x(1)^2 + x(2)^2;

end

Arquivo ft2iii.m:

function f = ft2iii(x)

f = (-13 + x(1) + 5\*x(2)^2 - x(2)^3 - 2\*x(2))^2 + ...

(-29 + x(1) + x(2)^3 + x(2)^2 - 14\*x(2))^2;

end

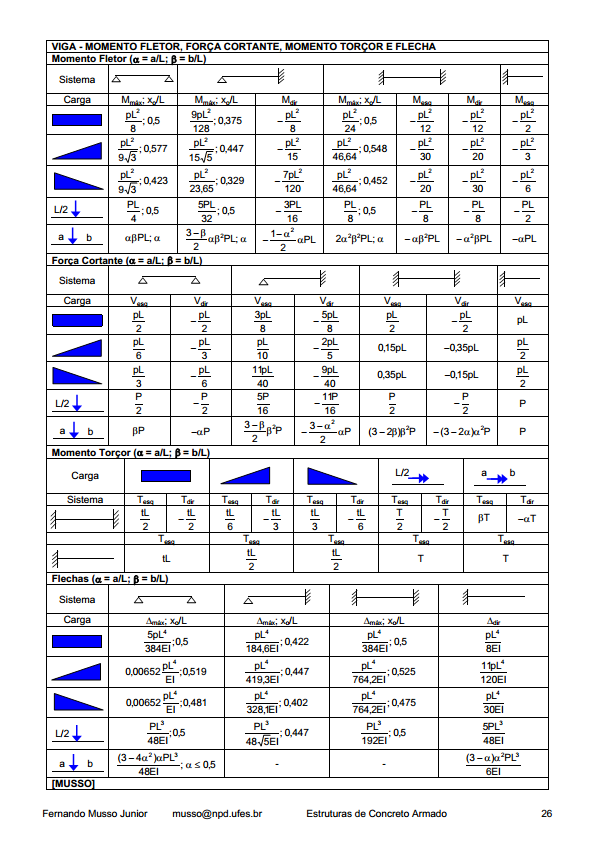
Arquivo ft2iv.m:

function f = ft2iv(x)

f = 100 \* (x(2) - x(1)^2)^2 + (1 - x(1))^2;

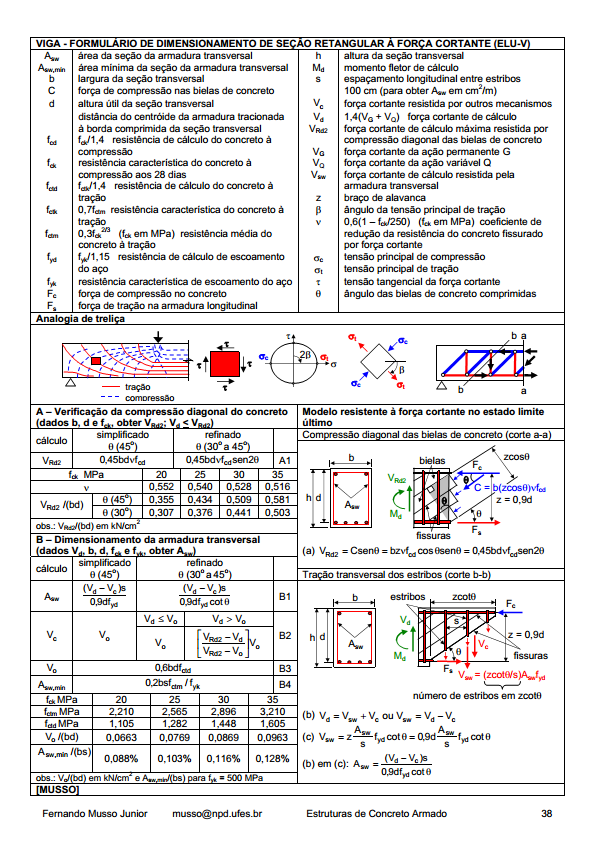
end

ANEXO II



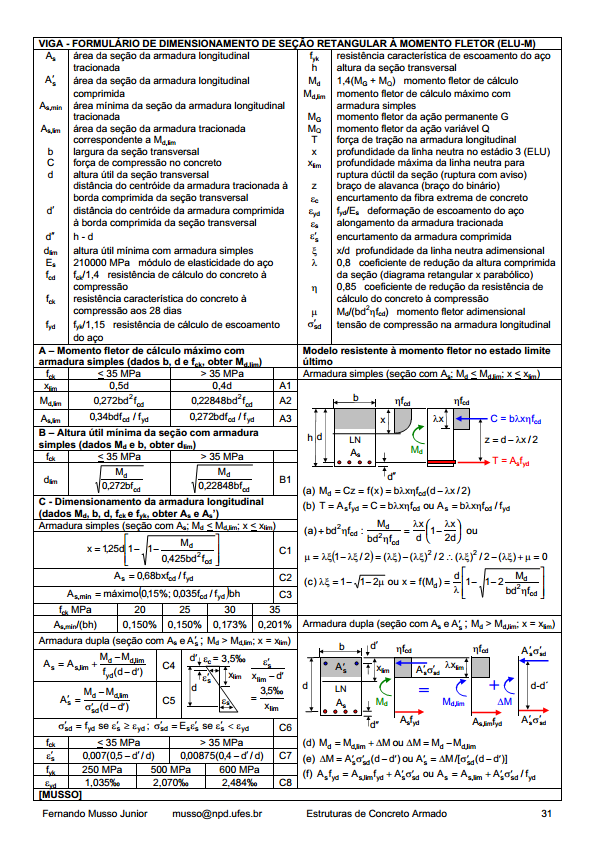
Fonte: Musso Junior (2012)

ANEXO III



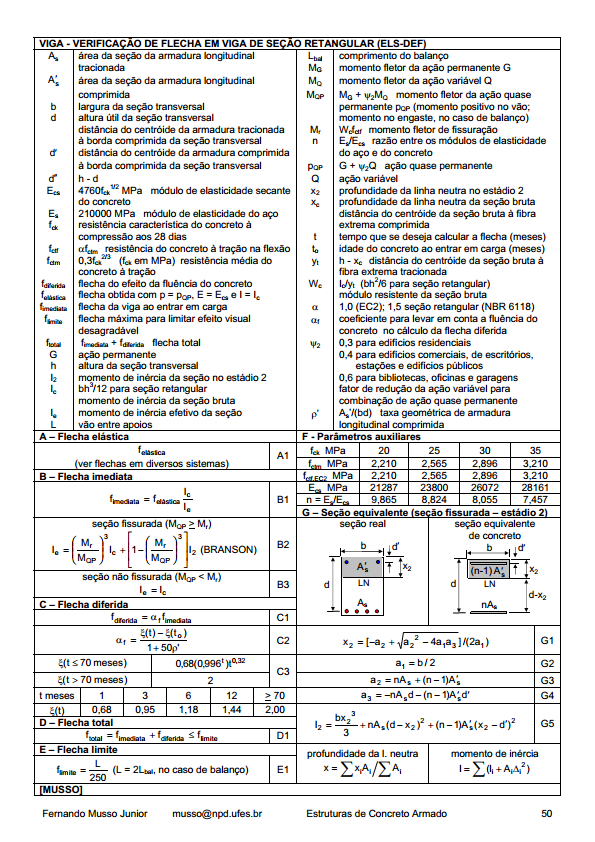
Fonte: Musso Junior (2012)

ANEXO IV



Fonte: Musso Junior (2012)

ANEXO V



Fonte: Musso Junior (2012)