

**DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE VIGAS EM PERFIL MISTO DE
EDIFÍCIOS MULTIANDARES UTILIZANDO TÉCNICAS
EVOLUCIONISTAS**

LARISSA SIQUEIRA DA SILVA

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO –
UENF**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
JULHO – 2020**

DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE VIGAS EM PERFIL MISTO DE EDIFÍCIOS MULTIANDARES UTILIZANDO TÉCNICAS EVOLUCIONISTAS

LARISSA SIQUEIRA DA SILVA

“Trabalho de dissertação apresentado ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil”.

Orientador: Gines Arturo Santos Falcón

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

JULHO – 2020

DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE VIGAS EM PERFIL MISTO DE EDIFÍCIOS MULTIANDARES UTILIZANDO TÉCNICAS EVOLUCIONISTAS

LARISSA SIQUEIRA DA SILVA

"Trabalho de dissertação apresentado ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil".



Gines Arturo Santos Falcon (D. Sc., Engenharia Civil) – LECIV – UENF
Orientador

FRANCISCO DE ASSIS DAS NEVES:34593357420

Assinado de forma digital por
FRANCISCO DE ASSIS DAS
NEVES:34593357420
Data: 2021.10.20 13:30:25 -03'00'

Francisco de Assis das Neves (D. Sc., Engenharia Civil) – PROPEC – UFOP



Sergio Luis González Garcia (D. Sc., Engenharia Civil) – LECIV – UENF



Walnório Graça Ferreira (D. Sc., Engenharia Civil) – PPGEC - UFES

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

S586

Silva, Larissa Siqueira da.

Dimensionamento ótimo de vigas em perfil misto de edifícios multiandares utilizando técnicas evolucionistas / Larissa Siqueira da Silva. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2021.

67 f. : il.

Bibliografia: 60 - 62.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2021.

Orientador: Gines Arturo Santos Falcon.

1. otimização estrutural. 2. vigas mistas. 3. métodos evolucionistas. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 624

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS	viii
RESUMO	x
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo	2
1.2 Motivação e justificativa.....	3
1.3 Revisão bibliográfica	3
1.3.1 Otimização estrutural via técnicas evolucionistas	3
1.3.2 Otimização de vigas em seção mista	6
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTOS DE OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL	14
CAPÍTULO 3 - ESTRUTURAS EM SEÇÕES MISTAS	17
CAPÍTULO 4 – CÁLCULO DOS ESFORÇOS SOLICITANTES E RESISTENTES DA VIGA MISTA.....	21
4.1 Esforços solicitantes.....	21
4.1.1 Modelagem da estrutura.....	22
4.1.2 Inserção dos carregamentos	23
4.1.3 Obtenção dos esforços.....	24
4.2 Esforços resistentes	24
4.2.1 Compacidade da estrutura	25
4.2.2 Determinação da seção homogeneizada	26
4.2.3 Determinação do posicionamento da linha neutra	29
4.2.4 Verificação última na fase construtiva	29
4.2.5 Verificação última da seção mista	30
4.2.6 Verificação à força cortante.....	31
4.2.7 Conectores de cisalhamento	33

4.2.8 Verificação do Estado Limite de Serviço para deformações excessivas	35
CAPÍTULO 5 – MODELAGEM DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO	37
5.1 Função objetivo	39
5.2 Restrições de projeto	39
5.2.1 Compacidade da estrutura	40
5.2.2 Verificação última na fase construtiva	40
5.2.3 Verificação última da seção mista	40
5.2.4 Verificação à força cortante	40
5.2.5 Limite para deformações excessivas	41
CAPÍTULO 6 – ESTRUTURA DE FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA	42
6.1 Módulo de Otimização	42
6.2 Módulo de análise estrutural	43
6.3 Módulo de dimensionamento	44
CAPÍTULO 7 – VALIDAÇÃO DO MODELO	46
7.1 Aplicação 1	46
7.2 Aplicação 2 (KOROUZHEH, ESKANDARI-NADDAF e GHAROUNI-NIK, 2017)	51
7.3 Aplicação 3	55
CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES	59
REFERÊNCIAS	60
ANEXO A – TABELA DE BANCO DE DADOS PARA OS PERFIS DE AÇO LAMINADOS	63
ANEXO B – TABELA DE BANCO DE DADOS PARA AS FÔRMAS STEEL DECK	65
ANEXO C – TABELA DE BANCO DE DADOS PARA OS PINOS STUD BOLT	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sequência lógica de funcionamento do programa principal (Fonte: Autor).	2
Figura 2: Minimização de $f(x)$ ou maximização de sua oposta (RAO, 2009) ...	14
Figura 3: Tipos de vigas mistas aço-concreto. (Fonte: Malite (1990)).....	17
Figura 4: Forças resultantes numa seção qualquer de uma viga mista aço-concreto. (Fonte: Kotinda (2006)).....	18
Figura 5: Distribuição das tensões para uma estrutura mista. (Fonte: Cavalcante (2010)).....	19
Figura 6: Altura da viga x Momento resistente. (Fonte: Vasconcellos (2020))	19
Figura 7: Elemento finito de viga bidimensional. (Fonte: (AUSTRELL, DAHLBLOM, <i>et al.</i> , 2004)).....	22
Figura 8: Principais dimensões do perfil metálico I. (Fonte: ABNT (2008))	26
Figura 9: Seção mista homogeneizada. (Fonte: Autor)	27
Figura :10 Diagrama Tensão x Deformação para as diferentes posições da LNP (Fonte: Vasconcellos (2020))	29
Figura :11 Fator de redução R_p para as possíveis posições de fixação do conector (Fonte: Pfeil (2009)).....	34
Figura 12: Fluxograma do módulo de otimização (Fonte: Autor).....	43
Figura 13: Fluxograma do módulo de análise estrutural (Fonte: Autor).	44
Figura 14: Fluxograma do módulo de dimensionamento (Fonte: Autor).	44
Figura 15: Resultados obtidos coma execução da Aplicação 1. (Fonte: autor)48	
Figura 16: Seção ótima obtida com a execução da Aplicação 1. (Fonte: autor)	49
Figura17: Custo x Geração da solução estudada para a Aplicação 1. (Fonte: Autor)	50
Figura 18: Valores das restrições de projeto para a Aplicação 1. (Fonte: Autor)	50
Figura 19: Comparativo de resultados entre a aplicação 1 e sua referência. (Fonte: Autor)	51
Figura 20: Resultados para a Aplicação 2. (Fonte: Autor).....	52
Figura 21: Seção ótima obtida com a execução da Aplicação 2. (Fonte: autor)	53

Figura 22: Custo x Geração da solução estudada para a Aplicação 2. (Fonte: Autor)	54
Figura 23: Valores das restrições de projeto para a Aplicação 2. (Fonte: Autor)	54
Figura 24: Comparativo de resultados entre a aplicação 2 e sua referência. (Fonte: Autor)	55
Figura 25: Resultados para o exemplo 3. (Fonte: Autor).....	56
Figura 26: Seção ótima obtida com a execução da Aplicação 3. (Fonte: autor)	56
Figura 27: Custo x Geração da solução estudada para a Aplicação 3. (Fonte: Autor)	57
Figura 28: Valores das restrições de projeto para o Exemplo 3. (Fonte: Autor)	58
Figura 29: Comparativo de resultados entre a aplicação 3 e sua referência. (Fonte: Autor)	58

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

a : profundidade da linha neutra

AASHTO → American Association of State Highway and Transportation Officials

A_{aw} : área da alma do perfil de aço

A_{ct} : área efetiva da laje de concreto

A_{sl} : área da armadura longitudinal dentro da largura efetiva da laje de concreto

APM: Adaptive penalized method

b_{ef} : largura efetiva da laje de concreto

b_f : largura das mesas do perfil

d_1 : distância do centro geométrico do perfil de aço até a sua face superior

d_3 : distância do centro geométrico da armadura longitudinal à LNP

d_4 : distância da força de tração, situada no centro geométrico da área tracionada da seção do perfil de aço, à LNP

d_5 : distância da força de compressão, situada no centro geométrico da área comprimida da seção do perfil de aço, à LNP

d_t : altura total do perfil de aço

$d_{m\acute{a}x,ag}$: diâmetro máximo do agregado utilizado no concreto

DIN → Deutsches Institut für Normung

E_s : módulo de elasticidade do aço

E_c : módulo de elasticidade do concreto

f_{ck} : resistência característica do concreto à compressão

F_{ctm} : resistência média à tração do concreto

$f_{ct,ef}$: resistência média à tração efetiva do concreto no instante em que se formam as primeiras fissuras

F_{hd} : força de cisalhamento de cálculo entre o componente de aço e a laje

f_{sd} : resistência de cálculo ao escoamento do aço da armadura

f_y : resistência ao escoamento do aço

GGP: Generalized geometric programming

h_w : distância entre as faces internas das mesas do perfil

h_{pp} : o dobro da altura da parte comprimida da alma do perfil

h_w : altura da alma tomada como a distância entre faces internas das mesas

I_a : momento de inércia da seção do perfil de aço isolado

I_{tr} : momento de inércia da seção mista homogeneizada

LNP → linha neutra plástica

M_{sd} : momento fletor solicitante de cálculo na região de momentos negativos

M_{Rd} : momento fletor resistente de cálculo da seção transversal

NB → Norma brasileira

NBR → Norma brasileira regulamentadora

PSO → Particle swarm optimization

t_c : altura da laje de concreto

T_{ds} : força resistente de tração de cálculo nas barras da armadura longitudinal

t_f : espessura das mesas do perfil

t_w : espessura da alma do perfil

V_{sd} : força cortante solicitante de cálculo

V_{Rd} : força cortante resistente de cálculo

V_{pl} : força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento

VP: variável de projeto

y_c : distância do centro geométrico da parte comprimida do perfil de aço até a face superior desse perfil

y_t : distância do centro geométrico da parte tracionada do perfil de aço até a face inferior desse perfil

y_p : distância da linha neutra da seção plastificada até a face superior do perfil de aço

$\sum Q_{Rd}$: somatório das forças resistentes de cálculo individuais

σ_{cd} : tensão de compressão de cálculo na face superior da laje de concreto

RESUMO

As técnicas de otimização estrutural estão ganhando cada vez mais espaço na construção civil por possibilitar a geração de estruturas mais eficientes e consequentemente mais econômicas. O objetivo deste estudo é desenvolver uma metodologia computacional capaz de realizar o dimensionamento ótimo automatizado de uma viga mista aço-concreto utilizada em edifícios multiandares através de Algoritmos Genéticos. Foi definido um modelo de otimização onde são utilizadas variáveis discretas a fim de obter os resultados expressos em dimensões comerciais; para isto, foi gerado um banco de dados contendo as especificações comerciais dos perfis estruturais, as fôrmas de aço de steel deck e os pinos de cisalhamento. As variáveis de projeto são números identificadores associados aos perfis de aço, formas de steel deck e os conectores de cisalhamento. As restrições de projeto consideradas são os limites normativos da NBR 8800 para as vigas em seção mista. Para implementação computacional dos módulos de análise estrutural e otimização foi utilizada a plataforma do MATLAB™. Foram desenvolvidos códigos computacionais para análise estrutural baseados no programa CALFEM foi utilizado o algoritmo genético disponibilizado no toolbox “Global Optimization” do MATLAB. São apresentadas três aplicações retiradas de casos semelhantes da literatura para fins de validação do modelo implementado.

Palavras-chave: otimização estrutural, vigas mistas, métodos evolucionistas.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

O surgimento de ferramentas computacionais cada vez mais poderosas, principalmente aquelas concebidas para projeto e análise estrutural, possibilita a definição de sistemas estruturais mais eficientes e econômicos. Além disso, tornou possível o dimensionamento mais apurado com uma maior riqueza de detalhes relativos à estrutura estudada, e, por consequência, elevando a capacidade estrutural e a eficiência mecânica dessas estruturas.

Tais softwares proporcionaram também a alteração rápida e simplificada das características do modelo estudado, permitindo que seja possível testar facilmente diversas configurações para ela e assim escolher a que melhor se adeque às suas condições iniciais e às determinações normativas utilizando a menor quantidade possível de material. Ao utilizar este tipo de ferramentas o processo de dimensionamento já passou a ter por si só um aspecto mais otimizado, mesmo sendo feito sem o auxílio de algoritmos específicos para tal.

A associação das competências referentes às áreas de Engenharia, Computação e Matemática permitem o desenvolvimento de ferramentas para otimização estrutural, que possibilita a criação de projetos cada vez mais eficientes, que se adequam satisfatoriamente às recomendações trazidas pelas normas ao menor custo possível.

O presente trabalho propõe a utilização de técnicas de otimização estrutural para dimensionamento de vigas biapoiada em seção mista de comprimento total e carregamentos conhecidos, prevendo as dimensões do perfil de aço adotado bem como as da mesa de concreto existente, além do tipo e número necessário de conectores de cisalhamento. Os perfis de aço considerados pelo programa são perfis I metálicos laminados; as lajes são do tipo mistas com fôrma de aço ‘steel deck’ incorporadas; os conectores de cisalhamento são pinos de aço ‘stud bolt’.

A otimização se dá pela redução dos custos atrelados à confecção da viga mista através da minimização de uma função objetivo que calcula o peso total da estrutura, já que as duas grandezas estão, para este caso, diretamente relacionadas. A minimização da função objetivo está restringida às limitações de projeto prescritas pela NBR 8800 (ABNT, 2008) relativas às vigas executadas em seção mista de aço e concreto, às características apresentadas pelos materiais utilizados e aos elementos comerciais disponíveis no mercado.

O programa possui um módulo principal de otimização que se utiliza de dois outros módulos secundários (análise estrutural e dimensionamento) para realizar o cálculo das iterações até que um dos critérios de parada sejam satisfeitos e a solução ótima seja encontrada. A sequência lógica de funcionamento do programa principal está esquematizada no fluxograma contido na Figura 1.

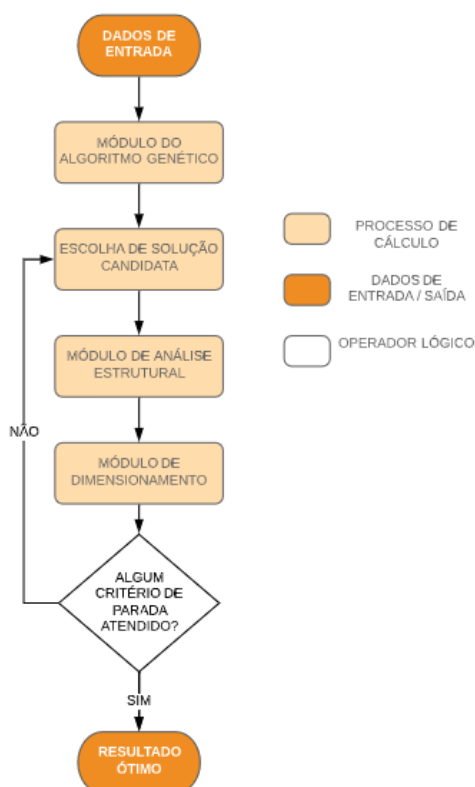


Figura 1: Sequência lógica de funcionamento do programa principal (Fonte: Autor).

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma metodologia computacional capaz de dimensionar de maneira otimizada uma viga biapoiada composta por uma seção mista de aço e concreto submetida à flexão simples. Os dados a serem inseridos pelo usuário são a magnitude dos carregamentos aos quais a estrutura está submetida, assim como o tamanho total do vão a ser vencido pela mesma, distância entre vigas no pavimento, condições de contorno dos dois apoios extremos, e as características físicas do concreto e do aço; as dimensões dos elementos componentes da viga serão parte do problema de otimização e resultarão da análise feita pelo programa. São utilizadas variáveis discretas a fim de

obter um resultado expresso em um perfil estrutural, fôrma steel deck e conectores de cisalhamento reais, além de considerar as características efetivas dos materiais utilizados. Assim, a presente dissertação de mestrado constitui-se basicamente da elaboração de uma metodologia computacional em ambiente MATLAB™ para definição automatizada da configuração ótima de vigas mistas biapoiada atendendo tanto o Estado Limite Último quanto o Estado Limite de Serviço segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008).

1.2 Motivação e justificativa

Por aproveitar da melhor forma possível as características dos dois materiais que as compõem, as vigas em seção mista de aço e concreto se apresentam como uma solução moderna e inteligente elaborada pela indústria da construção civil. Este tipo de estrutura possui uma vasta aplicabilidade, podendo ser utilizada em edifícios, galpões, pontes, dentre outros tipos de edificações.

Após a realização de uma vasta busca na literatura disponível acerca do estudo do dimensionamento otimizado de estruturas mistas, notou-se que o tema começou a ser estudado em maior proporção apenas nos últimos anos, ficando assim comprovada a necessidade de ampliar o espaço de busca da bibliografia a respeito do assunto estudado.

1.3 Revisão bibliográfica

Devido a abrangência do tema em estudo a revisão bibliográfica foi dividida em duas partes: Otimização estrutural via técnicas evolucionistas e Otimização de vigas em seção mista.

1.3.1 Otimização estrutural via técnicas evolucionistas

- Albuquerque, El Debs, & Melo (2010)

Os autores realizaram a otimização de pavimentos de edifícios em concreto pré-moldado minimizando seus custos utilizando algoritmos genéticos. O modelo considerou restrições arquitetônicas, mecânicas e construtivas, levando em

consideração não só o consumo de materiais, mas também fatores ligados à fabricação, transporte e montagem das peças estudadas.

Para a realização da escolha da tipologia e disposição dos elementos constituintes da estrutura, foi utilizada uma ferramenta chamada SATD (sistema de apoio à tomada de decisão). Tal ferramenta se utiliza de diversos parâmetros para a sugestão da configuração da estrutura e de seus elementos e foi desenvolvida por um dos autores em uma publicação anterior do ano de 2007 baseada em uma ampla pesquisa de mercado feita junto aos fabricantes de peças pré-fabricadas em concreto armado. É importante frisar que o SATD, por estudar estruturas do tipo pré-moldadas, leva em consideração a importância da modulação das peças para que estas se enquadrem no projeto arquitetônico adotado, produzindo a menor quantidade de tipologias possível a serem fabricadas.

Foi adotada uma estrutura composta por lajes alveolares apoiadas sobre vigas 'T' invertidas e, sobre este conjunto, a execução de uma capa em concreto moldado no local com 5cm de espessura, que é convencionalmente aplicada neste tipo de sistema estrutural. O sistema otimizado não pôde possuir características geométricas aleatórias pois as peças precisariam se adequar aos moldes dos fabricantes, assim sendo, as variáveis consideradas pelo problema foram do tipo discretas.

Como resultado o programa retorna diversas tipologias estruturais, elencadas em ordem crescente em função de seu custo para que o usuário possa escolher a que mais se adeque às particularidades da edificação a ser executada com o menor custo possível. Foram obtidos resultados muito próximos àqueles apresentados pelo fabricante das peças pré-moldadas tanto com relação à resistência ideal do concreto quanto ao seu custo final de implementação, o que comprovou a eficiência da metodologia implementada na publicação.

- Carvalho (2014)

Este trabalho consistiu no desenvolvimento de um algoritmo de otimização em linguagem C fundamentado no algoritmo de enxame de partículas (PSO). Este algoritmo que foi escolhido por apresentar duas principais vantagens: rápida convergência e o uso de poucos parâmetros de controle. Na modelagem do problema de otimização as restrições de projeto consideraram coeficientes de punição introduzidos através do critério de penalização adaptativa (APM) aplicada à cada

possível solução, sendo esta penalização maior para menores aptidões apresentadas pelas partículas.

Antes de implementar o problema principal do trabalho, os autores desenvolveram um estudo preliminar com o intuito de obter parâmetros consistentes para a realização de um processo de otimização o mais confiável possível. Primeiramente foram realizados testes com 35 problemas independentes de matemática, engenharia mecânica e estrutural a fim de obter fatores de calibração das penalidades adaptativas que seriam aplicadas às partículas durante a execução dos problemas finais de otimização. A comparação dos resultados dos problemas teste foi realizada através de uma ferramenta gráfica chamada perfis de desempenho que facilita a visualização e a contraposição de resultados com uma grande quantidade de dados.

A metodologia desenvolvida pela autora foi aplicada a diversos problemas de otimização clássicos da literatura com a finalidade de comprovar sua eficiência. Foi constatada a rápida convergência dos algoritmos do tipo PSO na solução de problemas de otimização e, em contrapartida, evidenciou-se a sua convergência para mínimos locais, que teve de ser corrigida inserindo um operador a fim de manter a diversidade dos indivíduos aqui chamados de partículas.

- Pierott (2018)

Também utilizando algoritmos genéticos, o autor otimizou vigas contínuas em concreto armado com seção transversal em T, solicitadas à flexão simples e utilizadas em edificações multipavimentos.

Na definição das restrições de projetos, foram considerados tanto o Estado Limite Último quanto o Estado Limite de Serviço de acordo com prescrições da norma NBR 6118. As variáveis de projeto utilizadas foram do tipo discretas e diziam respeito às dimensões da seção transversal, à quantidade de armadura inserida bem como à sua distribuição dentro da seção e as limitações inerentes aos materiais, sendo estas organizadas em bancos de dados com arranjos viáveis expressos em características comerciais reais.

O autor optou pelo uso dos algoritmos genéticos pela sua vasta aplicabilidade nos problemas de engenharia, por ser uma técnica comprovadamente eficiente na otimização estrutural. O programa foi implementado em MATLAB com o uso do toolbox “Global optimization” que permite ao usuário desenvolver problemas de

otimização baseados em diversas técnicas como pesquisa de padrão, algoritmo genético, enxame de partículas, recozimento simulado, multistart e pesquisa global, dentre outras.

Foram desenvolvidas funções secundárias, denominadas de funções teste, que correspondiam aos passos necessários para realizar o dimensionamento e a verificação de vigas em concreto armado; estas funções eram utilizadas por uma função principal que configurava os parâmetros de execução do algoritmo genético e a realização do dimensionamento otimizado da estrutura estudada.

A função objetivo calculou os custos para a execução da viga, levando em consideração a quantidade de fôrma necessária, o custo de concreto de acordo com a resistência à compressão determinada pelo programa e o custo de todas as armações, fossem elas principais ou de composição. O custo da mão-de-obra para a confecção da viga não foi considerado.

Para a realização da validação dos códigos implementados, o autor apresentou dois exemplos práticos, sendo um deles uma viga biapoiada e o outro uma viga contínua com três vãos e sem a presença de balanços. O autor concluiu a boa eficácia do programa desenvolvido para o dimensionamento de vigas de concreto armado e destacou que, embora os métodos clássicos aliados aos programas comerciais disponíveis no mercado sejam a principal metodologia utilizada atualmente com dimensionamento de estruturas, as atividades práticas muito tem a ganhar com a aplicação de técnicas de otimização no dia-a-dia dos escritórios de projeto estrutural. O programa foi considerado como validado por apresentar resultados similares aos encontrados na literatura utilizada como referência.

1.3.2 Otimização de vigas em seção mista

- Dhillon, Fellow, Asce, & Kuo (1991)

Os autores utilizaram a técnica de programação geométrica generalizada (GGP) com igualdade mista e o uso de restrições de projeto de desigualdade com o propósito de obter o projeto ideal de vigas mistas para tabuleiros de pontes rodoviárias. As vigas estudadas foram componentes de um piso de aço e concreto, com ou sem reforço à esforço cortante na alma do perfil.

Como a espessura da laje do tabuleiro foi fixada, para a definição da função objetivo os autores assumiram que o custo está relacionado apenas ao peso da viga de chapa de aço.

O modelo foi fundamentado nas especificações da AASHTO para pontes rodoviárias e se baseou em um algoritmo de programação matemática para a solução do problema. O programa foi implementado em FORTRAN 77 utilizando tanto restrições quanto função objetivo não-lineares para minimizar o peso da estrutura.

Dois tipos de restrições de desigualdade foram utilizados: restrições de comportamento que limitam a força máxima, o deslocamento ou a flambagem, e restrições de projeto ou laterais impostas a variáveis de projeto para colocar limites práticos em algumas dimensões dos elementos. Também foram inseridas variáveis de projeto dependentes que originaram restrições adicionais de igualdade. O artigo apresenta duas aplicações práticas para validação da eficácia do código implementado.

O primeiro exemplo trata-se de uma viga de um pavimento misto biapoiada com vão de 80 pés, o que equivale a aproximadamente 24,38 cm. O programa desempenha-se bem e resulta em uma convergência suave que ocorre em apenas 4 iterações até definir o seu valor mínimo. Para o segundo exemplo foi utilizada a mesma estrutura apenas com a adição de enrijecedores transversais. A solução foi encontrada em apenas seis iterações e encontrou um peso 17% menor que o valor encontrado na primeira solução.

- Câmara Neto (2008)

O autor desenvolveu uma metodologia para calcular o menor custo possível para estruturas compostas por elementos metálicos e mistos de aço e concreto para verificação de condições de temperatura ambiente e de incêndio. Foram estudadas diversas tipologias de perfis laminados associadas a diferentes taxas de armadura e espessura de mesa para proteção contra o fogo para o dimensionamento de pilares e vigas.

As variáveis de projeto contemplaram alguns padrões de perfis metálicos laminados, taxas de armadura e espessuras de materiais de proteção ao fogo, todos de acordo com dimensões disponíveis comercialmente para traduzir os resultados em configurações reais. A resistência da seção foi determinada segundo critérios da NBR 8800 enquanto as condições de exposição ao fogo foram determinadas segundo

recomendações normativas previstas pela parte 1.2 do EuroCódigo 4 e pela NBR14323/1999.

Todos os códigos do programa, tanto para a fase de dimensionamento quanto para o pós-processamento dos dados, foram implementados em FORTRAN e baseados em algoritmos genéticos considerando as características geométricas da seção transversal, os materiais utilizados e o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF). O programa gera como resultados para as vigas o momento fletor resistente, a posição da linha neutra e a evolução da temperatura ao longo do tempo no elemento metálico; para os pilares o programa retorna a relação do esforço normal resistente com o esforço normal solicitante e gráficos mostrando a influência da esbeltez do perfil na resistência à compressão concentrada para cada TRRF. Além disso, o programa retorna a seção otimizada para a tipologia adotada dentre as disponíveis – viga híbrida, viga mista de alma cheia, pilar misto e pilar não misto.

O autor concluiu que as soluções propostas apresentam bons resultados tanto para as vigas quanto para os pilares, obtendo resultados ainda mais otimizados para as peças sob as maiores solicitações (vigas principais e pilares centrais nos andares mais baixos). Quando analisadas as situações de incêndio, os resultados só se mostraram favoráveis para TRRF's abaixo de 90 minutos, demonstrando que o concreto só é capaz de conferir uma boa proteção térmica até determinadas temperaturas; a partir destas, é mais aconselhável o emprego de materiais específicos para resguardar o perfil metálico das altas temperaturas.

- Senouci & Al-Ansari (2009)

Os autores utilizaram uma metodologia baseada em algoritmos genéticos para otimizar o dimensionamento de um piso composto por vigas mistas aço-concreto utilizando especificações de projeto de fator de carga e resistência do AISC (American Institute of Steel Construction).

A seção transversal da estrutura estudada era composta por uma laje de mesa maciça e viga em perfis metálicos soldados e laminados conectados por pinos do tipo stud bolt. A função objetivo utilizada visava minimizar os custos relacionados à confecção da estrutura e todas as variáveis que poderiam impactar nos custos atrelados à viga mista foram consideradas. Estas incluem para a laje de concreto: a resistência à compressão, o peso específico e a espessura; para a seção de aço: a resistência ao escoamento, a área de seção transversal, a altura do perfil, a espessura

da alma, a espessura da mesa, a largura da mesa, o momento de inércia e o módulo de elasticidade; e para os conectores de cisalhamento: o diâmetro e o número de pinos.

Dois exemplos foram retirados do mesmo material utilizado nas especificações de projeto para que o modelo pudesse ser validado. Foi concluído que o modelo desenvolvido se apresentou como sendo bastante robusto para o dimensionamento otimizado dos pisos mistos em questão apresentando reduções de custos substanciais quando comparados àqueles obtidos através do dimensionamento convencional das mesmas estruturas. Os autores comentam sobre a possibilidade do programa desenvolvido por eles ser uma ferramenta prática muito útil para projetistas estruturais, melhorando consideravelmente a relação custo benefício de seus projetos.

- Poitras, Lefrançois & Cormier (2011)

Esta publicação traz um programa ambientado em MATLAB capaz de realizar a otimização de um piso misto de aço e concreto (laje, vigas de borda e vigas internas) através do método do enxame de partículas (PSO) que, segundo os autores, é um tipo de algoritmo mais simples de ser implementado por exigir um menor número de parâmetros que a maioria das outras técnicas heurísticas. Foi utilizada pelos autores como referência para o dimensionamento da estrutura a norma canadense S16.

O objetivo do estudo era a minimização de uma função objetivo que calcula a massa, minimizando consequentemente também os custos dos elementos estruturais. O programa retorna as dimensões e especificações do perfil de aço e da laje de concreto em steel deck, número de vigas interiores e número necessário de conectores de cisalhamento por viga. Foi utilizada uma população de 200 partículas – ou seja, possíveis soluções, a cada iteração após execuções de calibração pois foi o valor que apresentou os resultados mais consistentes.

O programa calcula a adequação de cada possível solução; as restrições são verificadas para cada partícula e uma penalidade é atribuída para cada restrição que não é satisfeita. Cada partícula carrega consigo ao longo do funcionamento do código a informação de sua melhor posição dentro do enxame, chamada de melhor local. Este referido local representa a melhor solução (maior aptidão) obtida até o momento pela partícula. Se a aptidão na posição atual ocupada pela partícula for maior do que a aptidão na melhor posição anterior obtida, então esta nova posição substitui a

anterior e fica alocada na memória. De maneira semelhante o enxame rastreia sua melhor posição coletiva, chamada de melhor local global, que são as posições com as maiores aptidões correspondentes à solução com a menor massa ou custo total.

Foram apresentados três exemplos numéricos para a validação do código implementado; um otimizava um piso em aço e os outros dois um piso misto de aço e concreto. Para todos os casos testados a configuração ideal foi encontrada de forma consistente quando os parâmetros PSO adequados foram utilizados pois a velocidade e a direção da convergência dependem de uma escolha apropriada destes parâmetros. Em todos os casos, todos os componentes escolhidos pelo algoritmo PSO atendiam a todas as restrições de projeto, não tendo sido apresentado nenhum resultado com violação independente dos parâmetros aplicados. Os autores concluíram que o método PSO foi eficaz na busca pela configuração ideal do piso, minimizando seu peso e custos e atendendo aos critérios normativos estipulados.

- Fabeane (2015)

Nesta publicação o autor utilizou a ferramenta *solver* disponibilizada no Excel para a implementação de uma formulação matemática que realizasse a otimização de longarinas mistas aço-concreto biapoiadas para uso em pontes rodoviárias. O código recebia como dados de entrada as características iniciais de projeto de uma determinada ponte (como o vão e a largura do tabuleiro, por exemplo); as variáveis aplicadas foram as dimensões da seção transversal das longarinas, tanto para a laje maciça de concreto quanto para o perfil de aço – e o número de vigas presentes na estrutura que se trata de uma ponte com múltiplas longarinas, sendo elas todas iguais ou se diferenciando entre vigas centrais e vigas de bordo. A norma AASHTO LRF 2012 – Especificações para o dimensionamento de pontes foi utilizada como base para a verificação dos elementos constituintes da estrutura.

Foram levados em consideração os custos do concreto utilizado na laje, das armaduras em aço também pertencentes à laje e do aço componente da viga abaixo dela. O autor ressalta que os custos adotados não dizem respeito apenas à aquisição do material em si, mas também ao transporte, à mão-de-obra para a execução da estrutura como lançamento do concreto, montagem das fôrmas, colocação das armaduras e a montagem da viga de aço e seus componentes de fixação.

A função objetivo determinada para o problema calculou o peso total do conjunto de longarinas componentes da seção transversal da ponte, que foi portanto o parâmetro minimizado pelo problema implementado.

Foi elaborada planilha eletrônica em excel contendo uma rotina de dimensionamento e verificação de longarinas mistas para pontes. A escolha da ferramenta foi motivada pela grande difusão possuída pelo software (sendo este de fácil acesso e manipulação) aliada a sua grande capacidade de realizar cálculos até bastante complexos como é o caso da minimização de funções apresentada pela ferramenta 'solver'. Dentre os métodos de otimização apresentados pela ferramenta, o autor optou por utilizar o método do Gradiente Reduzido Generalizado não linear após a realização de testes; o autor concluiu que era o método que apresentava os resultados mais precisos e a convergência mais rápida para o problema estudado.

Embasados na complexidade envolvida na determinação do número ideal de longarinas da seção transversal da ponte, os autores realizaram um completo estudo paramétrico a fim de desenvolver uma metodologia eficaz para realizar esta definição e também para avaliar o impacto da utilização de longarinas diferentes ou não nas extremidades da seção. O estudo foi realizado para vãos de 24m e 48m e mostra que, para um número de até 3 longarinas o custo é praticamente igual para os tabuleiros com vigas iguais ou diferentes, porém a diferença passa a aumentar cada vez mais a medida que a quantidade de longarinas aumenta. O estudo também mostra que, para ambos os casos, o peso do conjunto aumenta à medida que aumenta o número de longarinas na seção da ponte.

Uma outra análise foi realizada com relação à influência da variação do vão da ponte. Foram estudados os pesos por metro linear dos conjuntos de longarinas para vãos totais variando a cada 6m dentro do intervalo de 24m a 48m atrelados à suas possíveis configurações de seção transversal: uma com três e outra com quatro longarinas escolhidas com base nos resultados apresentados pelo estudo anterior. Como já era esperado, o peso por metro do conjunto aumenta com o alongamento do vão total tanto para a condição de longarinas iguais quanto para a configuração com longarinas de extremidade diferentes. A diferença de custos entre as duas configurações se mantém praticamente constante ao longo do estudo para os tabuleiros com quatro longarinas e, para o tabuleiro com três vigas, começa com a maior diferença de todas até praticamente se anular quando o estudo chega ao vão máximo de 48m.

A pesquisa concluiu que, para pontes com o mesmo vão, o peso dos conjuntos é maior à medida que se aumenta o número de longarinas presentes no tabuleiro, sendo este impacto ainda maior nos custos totais atrelados ao substancial aumento não quantidade de recursos de mão-de-obra necessários para a execução da estrutura. Além disto, fica comprovada boa eficiência da ferramenta solver do excel no estudo de otimização estrutural para estruturas componentes de pontes rodoviárias utilizando vigas metálicas já que o programa apresentou resultados consistentes e boa velocidade de convergência.

- Rodrigues (2018)

A autora estudou o dimensionamento otimizado de vigas em seção mista minimizando seu custo por metro linear criando um código em linguagem C++ baseado no método simplex, uma metodologia matemática de alto desempenho. As vigas mistas em questão eram compostas de uma laje de concreto maciça, perfil em aço laminado e pinos do tipo stud bolt.

Para a realização da análise estrutural da estrutura a ser estudada foram utilizados dois tipos diferentes de elementos finitos: um elemento de barra que foi escolhido para representar tanto a faixa colaborante da laje de concreto quanto o perfil de aço e um elemento de interface que foi empregado para representar o conjunto de conectores de cisalhamento. Para a implementação do problema a ser estudado foi utilizado o software comercial Visual Studio 2015 e para a implementação das formulações computacionais foi escolhido o programa de elementos finitos chamado FEMOOP.

O objetivo do programa é a definição das dimensões do perfil de aço tipo I, simétrico ou não, das dimensões da laje retangular de concreto e sua quantidade de armadura, sendo estas as variáveis contínuas de projeto consideradas no estudo. A função objetivo definida pela autora tem como objetivo determinar o custo das vigas mistas estudadas, função esta que será minimizada no processo de busca da solução ótima do problema.

O método simplex foi escolhido por se mostrar como uma ferramenta extremamente eficiente na resolução de problemas de otimização lineares onde tanto a função objetivo quanto as restrições são também lineares com relação às variáveis de projeto. Durante o processo iterativo, o método simplex gera uma sequência de pontos básicos viáveis até alcançar um que atenda às chamadas condições de

otimalidade de primeira ordem; a partir daí se inicia um novo processo iterativo utilizando este como ponto viável base.

O conjunto dos pontos viáveis encontrados formam um poliedro onde, se o ponto de ótimo for único, ele será um dos vértices deste poliedro. Nos casos de existirem múltiplos pontos ótimos para o problema analisado, qualquer ponto sobre a aresta ou face do poliedro em que o ponto de ótimo se encontra representaria uma solução ótima. É importante salientar que o método simplex necessita que seja fornecido um ponto viável inicial para que a otimização possa ser realizada.

A autora apresentou três exemplos práticos retirados da literatura para realizar a validação do programa criado. O primeiro otimiza uma viga mista com interação parcial, o segundo uma viga mista com interação total e o terceiro um piso composto por duas vigas mistas de extremidade e uma viga central, todas mistas de aço e concreto com interação total. Os resultados se mostraram bastante similares aos obtidos pelos autores de referência, comprovando eficiência satisfatória da formulação implementada e do método escolhido para o problema estudado.

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTOS DE OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

Durante um longo período de tempo o processo de elaboração de um projeto foi tido como uma tarefa repetitiva de tentativa e erro na busca pela melhor solução para o problema em questão; solução essa cuja qualidade esteve estritamente atrelada ao nível de experiência apresentada pela equipe envolvida. Tal fato implicou numa lenta evolução dos mais diversos campos da construção civil (SILVA, 1997).

Com o passar do tempo, a ideia de se obter o projeto mais eficiente possível começou a ser introduzida, e assim, o processo de tentativa e erro na busca pelo projeto mais adequado já não era mais suficientemente conveniente. A partir deste ponto, ferramentas computacionais passaram a ser adotadas no processo de criação de um projeto em diversos campos da engenharia, dentre eles a construção civil (CARVALHO, 2014).

O processo de dimensionamento de uma estrutura utilizando algoritmos para automatizar a busca pela melhor solução viável é uma das principais aplicações da técnica de otimização estrutural. Tal processo consiste em escolher uma característica da estrutura que se deseja maximizar ou minimizar e traduzi-lo numa função chamada de função objetivo que poderá ser limitada por restrições ou não. Como mostrado na Figura 2 a seguir, o ponto x^* é o resultado do problema de otimização que pode ser obtido minimizando a função objetivo $f(x)$ ou maximizando a sua oposta $-f(x)$ (RAO, 2009).

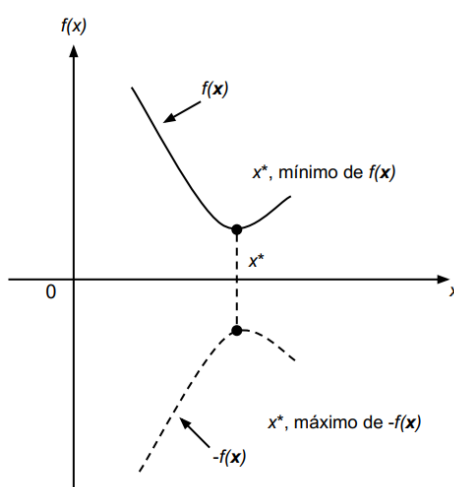


Figura 2: Minimização de $f(x)$ ou maximização de sua oposta (RAO, 2009)

A determinação de uma função objetivo adequada é uma das partes mais importantes da construção do problema de otimização; esta deve sempre ser função das variáveis de projeto definidas e limitada pelas restrições impostas. Na maioria das vezes a função objetivo está relacionada com o volume ou peso dos materiais utilizados, e estando este parâmetro associado diretamente ao custo da estrutura, as duas características acabam sendo otimizadas de forma simultânea (SIMONETI, 2009).

Qualquer que seja o problema que determinado, parâmetros precisam ser estabelecidos para que restrições possam ser atendidas, permitindo assim a formulação de um problema de otimização. Sendo assim, as técnicas de otimização se baseiam em conceitos bastantes gerais, possuindo então uma ampla gama de aplicabilidade nos mais diversos campos (ARORA, 2012).

A otimização aplicada ao dimensionamento de estruturas não deve ser entendida como uma busca pelo melhor resultado absoluto, e sim, a tentativa sistemática de encontrar a melhor solução prática para o problema estudado (NOVAES, 1978).

Os primeiros métodos desenvolvidos para a aplicação em problemas de otimização foram baseados em algoritmos matemáticos que fazem uso de gradientes para a minimização da função objetivo. Uma falha muito comum atrelada à utilização de algoritmos de programação matemática é a sua frequente convergência para pontos mínimos e máximos locais, que não representam a solução ideal a nível global e não refletem o resultado ótimo generalizado do problema. Tais razões tornam a programação matemática um mecanismo fraco para a busca da solução ótima, fazendo com que sua efetividade dependa excessivamente do ponto de partida escolhido (CASTRO, 2001).

Atualmente as técnicas de otimização mais utilizadas são as chamadas metodologias heurísticas, que propõem técnicas probabilísticas baseadas na observação de fenômenos naturais para encontrar a solução ótima do problema abordado. Por não se tratarem de ferramentas deterministas, tais métodos não garantem que o resultado obtido seja exatamente o ponto ótimo global, porém conseguem se aproximar satisfatoriamente desta solução em um curto período de tempo (MEDEIROS e KRIPKA, 2012). Dentre as técnicas heurísticas existentes, as mais utilizadas são os algoritmos genéticos, colônia de formigas,

busca harmônica, colônia de abelhas e enxame de partículas; sendo o primeiro deles o mais popular.

Os algoritmos genéticos são códigos baseados na reprodução genética e no princípio Darwiniano de seleção natural. Seu processo de busca é bastante paralelo, privilegiando aqueles indivíduos com maior probabilidade de reprodução através da avaliação da aptidão das possíveis soluções ao problema. O princípio de funcionamento dos algoritmos genéticos é a criação de cromossomos artificiais que representam cada uma das possíveis soluções que serão sistematicamente combinadas e avaliadas, prevalecendo aqueles que gerarem a maior quantidade de descendentes na criação da geração seguinte (PACHECO, 1999).

A otimização estrutural pode ser dividida em três classes: a otimização dimensional, que procura a melhor combinação para os padrões geométricos da estrutura como formas e tamanhos da seção transversal, tamanho dos vãos presentes na estrutura, podendo também contemplar os materiais que a compõem e suas propriedades; a otimização de topologia, que busca a melhor configuração possível no tocante à organização dos elementos da estrutura; e por fim, a otimização de forma, que elege o melhor formato executável que a estrutura como um todo pode assumir, ou seja, é a determinação do contorno que compreenderá a estrutura em questão (SILVA, FERREIRA e PAVANELLO, 2000).

CAPÍTULO 3 - ESTRUTURAS EM SEÇÕES MISTAS

As primeiras estruturas de caráter misto utilizavam o concreto apenas como material de revestimento, tendo este como único objetivo a proteção dos perfis de aço contra o fogo e a corrosão; muito embora o concreto desempenhasse um certo comportamento estrutural, o mesmo não era considerado nos cálculos (ALVA e MALITE, 2005).

Estruturas constituídas por perfis mistos têm sido muito utilizadas em obras de construção civil no mundo todo. Existem diversos tipos de elementos que podem ser concebidos pela combinação do aço e do concreto; são exemplos as lajes mistas aço-concreto (lajes de concreto com fôrmas de aço incorporadas), os pilares mistos aço-concreto (perfis de aço revestidos ou preenchidos com concreto) e as vigas mistas aço-concreto (vigas de aço com lajes colaborantes de concreto) (KIRCHHOF e MUNAIAR NETO, 2005).

Dá-se o nome de viga mista aço-concreto àqueles elementos constituídos por um perfil de aço associado a uma laje de concreto de tal forma que haja um trabalho conjunto entre os dois componentes para resistir à esforços de flexão (KOTINDA, 2006). É essencial que haja unicidade entre o elemento de concreto e o perfil de aço para que os dois trabalhem de forma monolítica, e tal associação é possível devido à utilização de componentes metálicos soldados à parte superior da viga e embutidos na laje de concreto, ou de perfis completamente envolvidos em concreto (MALITE, 1990). A Figura 3 mostra os tipos mais comuns de vigas mistas utilizadas.

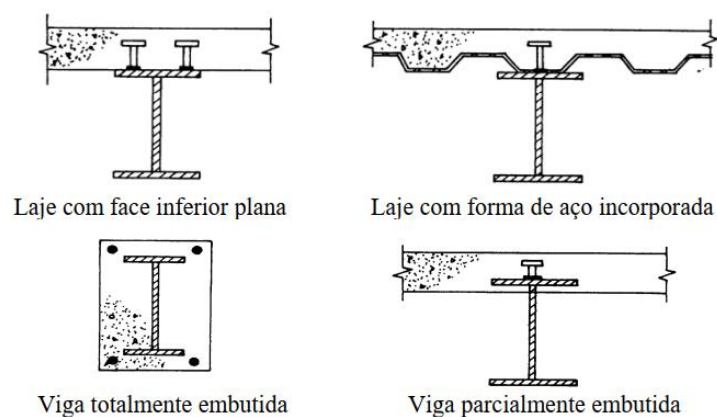


Figura 3: Tipos de vigas mistas aço-concreto. (Fonte: Malite (1990))

Para que as características de cada material sejam exploradas da melhor forma possível, as vigas mistas de aço e concreto são dimensionadas de modo que as tensões normais atuantes ao longo da seção transversal, originárias dos esforços de flexão aos quais a estrutura está submetida, sejam equivalentes a forças estáticas de compressão na laje de concreto (C) e de tração (T) no perfil de aço como mostrado na Figura 4 (KOTINDA, 2006).

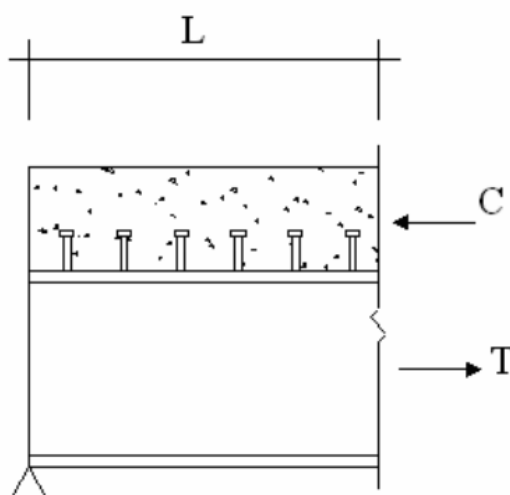


Figura 4: Forças resultantes numa seção qualquer de uma viga mista aço-concreto. (Fonte: Kotinda (2006))

O grau de conexão entre os dois elementos de uma viga mista é fator de extrema importância na distribuição dos esforços internos dentro da estrutura; este grau de interação está relacionado com o deslizamento relativo da laje de concreto em relação ao perfil de aço (CAVALCANTE, 2010).

Quando os elementos estruturais trabalham de forma autônoma (grau de interação nulo) a estrutura é chamada de híbrida e a distribuição de tensões no concreto e no perfil de aço ocorre de maneira independente. A interação é considerada total (estrutura mista com interação completa) quando o deslizamento relativo entre as duas partes da estrutura é aproximadamente nulo e a laje se encontra totalmente solidarizada ao perfil; neste caso a estrutura é considerada completamente monolítica e o conjunto possui apenas uma linha neutra. Quando o deslizamento relativo entre a laje e o perfil existe, sendo este originário apenas da deformação dos conectores de cisalhamento, a interação é

dita parcial e os elementos trabalham em conjunto, tendo a unidade estrutural duas linhas neutras (CAVALCANTE, 2010).

A Figura 5 a seguir mostra os esquemas de esforços resultantes de cada um dos três casos de interação entre a laje de concreto e o perfil de aço: nula (a), total (b) e parcial (c).

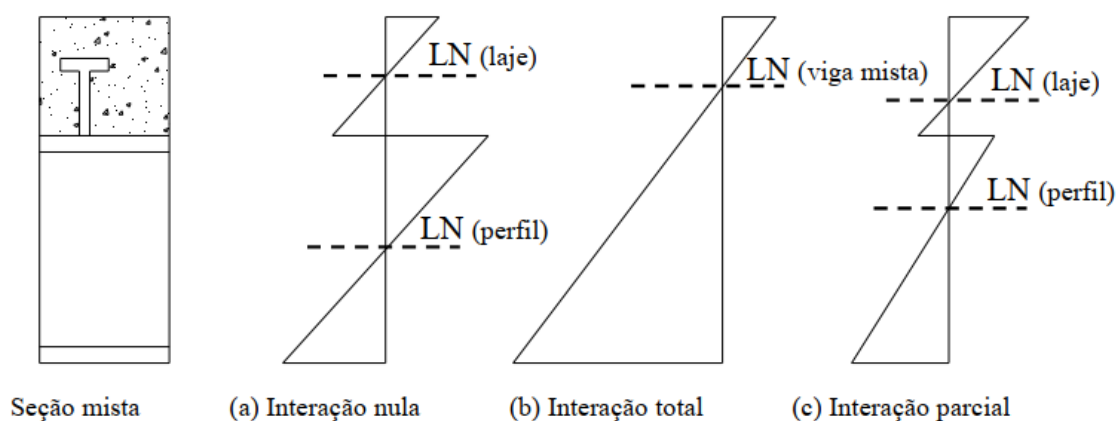


Figura 5: Distribuição das tensões para uma estrutura mista. (Fonte: Cavalcante (2010))

O gráfico apresentado na Figura 6 a seguir mostra a diferença de capacidade resistente entre uma viga híbrida, uma viga mista com interação parcial e uma viga mista com interação completa, todas com as mesmas dimensões, de acordo com a altura do perfil de aço considerado.

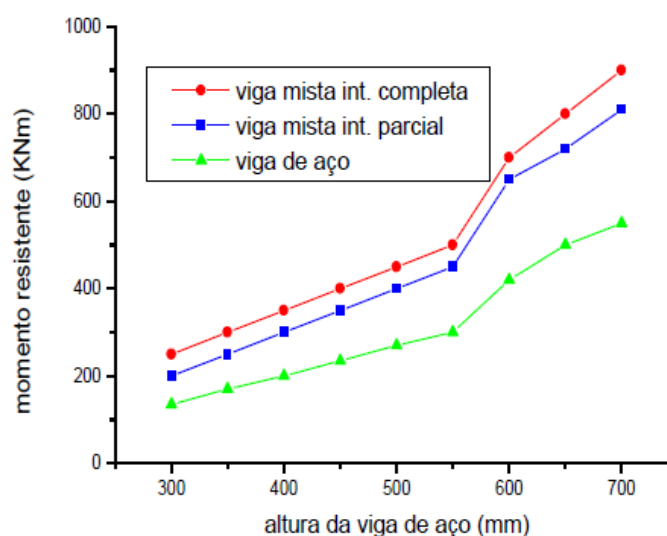


Figura 6: Altura da viga x Momento resistente.

A diferença entre os casos está apenas na quantidade de conectores de cisalhamento adotados; a primeira não possui nenhum, a segunda possui quantidade de conectores tal que permite algum deslizamento entre a laje e a viga de aço e a última possui quantidade de conectores suficiente para que o deslizamento relativo entre as duas partes seja praticamente nulo.

CAPÍTULO 4 – CÁLCULO DOS ESFORÇOS SOLICITANTES E RESISTENTES DA VIGA MISTA

Em 1958 foi lançada a primeira norma brasileira que tratava do uso de elementos de aço compostos por perfis laminados ou soldados à temperatura; tal norma era intitulada como NB-14 e se baseava na norma alemã DIN 4114 (1952). Mesmo sofrendo uma revisão em 1968, a NB-14 ficou ultrapassada com o passar dos anos – principalmente a partir da década de 70, por recomendar o método das tensões admissíveis, que era muito utilizado na época de sua publicação, mas passou a gerar estruturas inadequadas após este período (FAKURY, 2007).

A falta de uma norma atualizada que contemplasse o uso do aço na construção de edificações forçava a utilização de normas estrangeiras, o que impedia a padronização das construções, dificultando a disseminação do material no Brasil. Na segunda metade da década de 80, a publicação da NBR 8800:1986 trouxe consigo um grande progresso, pois substituiu o antigo método das tensões admissíveis pelo método dos estados limites que é utilizado até hoje. Além disso, outro grande avanço trazido por esta norma foi a contemplação de prescrições para o dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto que estavam sendo cada vez mais utilizadas no país (FAKURY, 2007). A NBR 8800 foi revisada pela última vez em 2005 e é a referência atual para o dimensionamento de seções mistas no Brasil.

O dimensionamento aqui adotado está sendo realizado através do cumprimento das recomendações do anexo O (Vigas Mistas de Aço e Concreto) presente na NBR 8800:2008 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.

4.1 Esforços solicitantes

Para análise estrutural das vigas mistas foram empregados códigos computacionais baseados no programa CALFEM®, um programa de código aberto também ambientado em MATLAB™ que se utiliza dos elementos finitos para resolver pelo método da rigidez direta as mais distintas variedades de problemas de mecânica estrutural. O software possui uma série de funções pré-

programadas que são capazes de calcular esforços internos, deslocamentos e distorções de diversos tipos de estruturas que podem ser implementadas de acordo com a necessidade do usuário.

O elemento é representado como uma barra comum com seus respectivos apoios e submetida ao carregamento informado e ao peso próprio da estrutura. O software exige como dados de entrada para o cálculo deste tipo de elemento o módulo elástico da seção, sua área transversal e seu momento de inércia. São discretizadas duas posições de translação (vertical e horizontal) e uma posição de rotação para cada extremidade do elemento conforme mostrado a seguir na Figura 7.

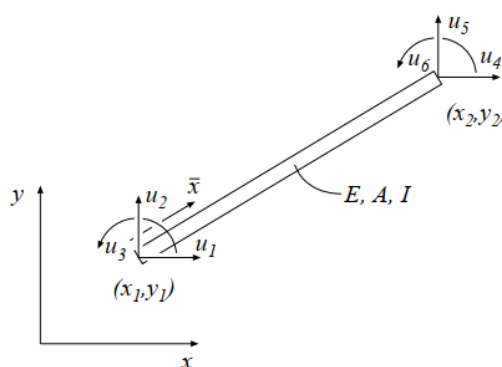


Figura 7: Elemento finito de viga bidimensional. (Fonte: (AUSTRELL, DAHLBLOM, *et al.*, 2004))

Os argumentos de saída que o CALFEM fornece para o elemento finito utilizado são os deslocamentos de cada grau de liberdade e os esforços internos ao longo do elemento; tais esforços internos servirão como dados de entrada para que o módulo de dimensionamento faça as verificações necessárias e encontre as melhores características físicas e geométricas da seção da viga.

4.1.1 Modelagem da estrutura

O CALFEM possui um método bastante simples para o lançamento dos dados geométricos da estrutura. Primeiramente o usuário informa dois vetores contendo as coordenadas verticais e horizontais de cada um dos nós da viga mista. Neste trabalho, por tratar apenas de vigas horizontais biapoiada, é

necessária somente a inserção do comprimento total da viga e o programa monta automaticamente os dois vetores necessários.

O próximo passo é a criação de uma matriz topológica que guarda em cada linha o número indicador do elemento seguido de seus graus de liberdade iniciais e finais nesta ordem: horizontal, vertical e rotação. Este processo também é realizado de forma automatizada pelo programa criado através da função 'topologia' elaborada.

Por fim, para definição das condições de contorno, é informado ao CALFEM um vetor 'bc' que impõe deslocamento nulo aos graus de liberdades fixos. O vetor tem o mesmo número de linhas que a quantidade de graus de liberdade fixos e duas colunas; na primeira está o número correspondente dos graus de liberdade e na segunda o número zero informando a inexistência de movimento naquela direção. O vetor de condições de contorno também é concebido de forma automática pelo programa; é solicitado ao usuário que escolha o tipo de apoio para cada extremidade da viga através da escolha de um código numérico no script de dados de entrada.

4.1.2 Inserção dos carregamentos

Os carregamentos pontuais são declarados através da criação de um vetor 'f' que possui tantas posições quanto graus de liberdade totais na estrutura. Estas posições estão preenchidas com zero para os graus de liberdade sem cargas pontuais e, naqueles carregados, o programa recebe a magnitude da carga correspondente. O sinal negativo é utilizado para representar direções de carregamentos opostas ao sentido convencional dos graus de liberdade, sejam eles de rotação ou translação.

Para o caso do carregamento distribuído, este é declarado ao CALFEM através do vetor 'eq' que porta suas magnitudes nas direções x e y respectivamente, tendo o vetor uma linha para cada elemento que é necessário discretizar.

Todos os valores de carregamento externos, sejam eles pontuais ou distribuídos são informados ao programa pelo usuário no script de dados de entrada.

4.1.3 Obtenção dos esforços

Primeiramente, através da função 'Análise_Estrutural' aqui implementada é calculada a matriz de rigidez de cada elemento, então todas elas são montadas numa matriz 'K' chamada de matriz de rigidez global da estrutura. A função nativa do CALFEM chamada 'solveq', através dos dados de rigidez, carregamentos e condições de contorno, resolve um sistema linear de equações e calcula o deslocamento de cada grau de liberdade da estrutura.

O CALFEM possui uma função predefinida intitulada 'beam2s' que lê as coordenadas dos elementos, as propriedades do material e os deslocamentos dos graus de liberdade fornecidos por 'solveq' e assim encontra os esforços internos na estrutura. O usuário pode definir em quantos pontos da viga quer que os esforços sejam determinados de acordo com a necessidade do problema analisado.

4.2 Esforços resistentes

Na prática, a concepção global de uma estrutura mista para edifícios multiandares é pensada de forma que os elementos de viga sejam todos biapoiados. O lançamento da estrutura é feito considerando vigas principais diretamente ligadas aos pilares por ligações rígidas ou semirrígidas, com vigas secundárias ligadas às primárias e assim sucessivamente conforme necessário. Assim sendo, o presente trabalho concentra-se apenas no estudo das vigas com um único vão, com condições de contorno e carregamentos externos variáveis de acordo com o que for exigido pelo problema a ser estudado.

A viga adotada é composta com um perfil metálico do tipo I – recebendo assim a denominação de viga mista de aço e concreto de alma cheia, e a laje de será do tipo mista com fôrma de aço incorporada, cujo dimensionamento é realizado seguindo as diretrizes do anexo Q também da NBR 8800:2008.

Como a possibilidade de construção não escorada se apresenta como uma das maiores vantagens do uso de estruturas mistas, o dimensionamento do elemento será feito considerando esta situação.

Conforme mostrado no Capítulo 3, a inserção de conectores de cisalhamento confere um enorme ganho de capacidade resistente à viga de aço. Considerando que os custos relativos apenas aos conectores de cisalhamento são muito baixos em comparação com o valor global da estrutura, será prevista uma quantidade tal destes conectores de modo que a viga possa ser considerada mista com interação total, ganhando assim grande capacidade estrutural a um custo relativamente baixo.

Como haverá o espalhamento do steel deck e a soldagem dos conectores de cisalhamento antes da ocorrência das maiores cargas da estrutura, o perfil fica contido pelos painéis de laje, não havendo ocorrência de flambagem lateral com torção nem flambagem local da mesa comprimida (superior). Por este motivo, só será necessária a verificação das seções à flambagem local da alma que é feita através da comparação dos esforços cortantes resistente e solicitante.

4.2.1 Compacidade da estrutura

A compacidade do elemento estrutural depende da relação entre a altura da alma do perfil e a espessura da alma (Figura 8), sendo esta relação limitada por um valor máximo em todos os casos segundo a Equação 4.1 seguinte:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 5,7 \sqrt{\frac{E_s}{f_y}} \quad (4.1)$$

onde,

h_w : distância entre as faces internas das mesas para os perfis soldados e esta mesma distância diminuída dos dois raios de concordância entre a mesa e a alma para os perfis laminados;

t_w : espessura da alma do perfil;

E_s : módulo de elasticidade do material constituinte do perfil;

f_y : resistência ao escoamento do material constituinte do perfil.

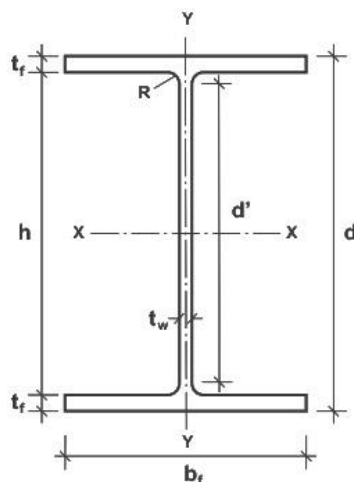


Figura 8: Principais dimensões do perfil metálico I. (Fonte: ABNT (2008))

Para os casos onde a Equação 4.2 assume a seguinte forma:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 3,76 \sqrt{\frac{E_s}{f_y}} \quad (4.2)$$

as vigas são definidas como compactas e podem ser dimensionadas usando as propriedades plásticas da seção mista. Quando tal limite é superado, as vigas deixam de ser compactas e passam a ser dimensionadas considerando as propriedades elásticas da seção mista.

4.2.2 Determinação da seção homogeneizada

As propriedades geométricas da seção mista devem ser obtidas por meio da homogeneização teórica da seção formada pelo componente de aço e pela laje de concreto, definindo então uma seção fictícia que represente os dois materiais de forma unificada (Figura 9).

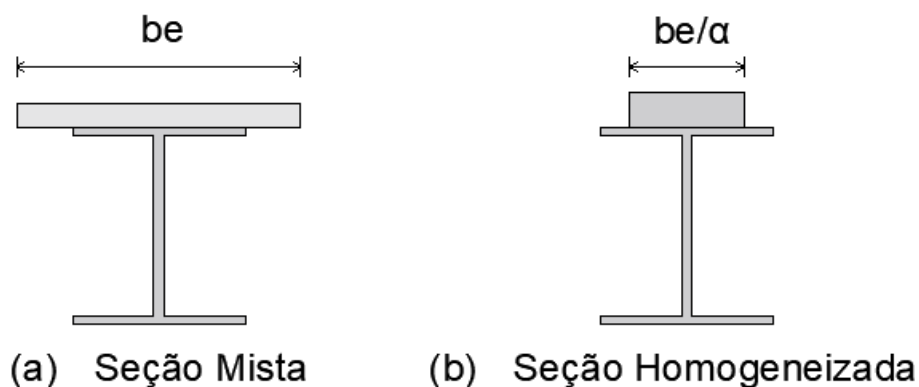


Figura 9: Seção mista homogeneizada. (Fonte: Autor)

É definida então uma largura da laje (b_e) chamada de largura efetiva - que é a porção de concreto que participa ativamente da capacidade estrutural da viga, e que na seção homogeneizada é teoricamente considerada como tendo uma largura menor (b_e/α) em aço.

A determinação das características da seção homogeneizada de uma viga em mista varia dependendo do posicionamento do elemento estrutural. Quando as vigas são intermediárias a laje se estende para os seus dois lados e, quando são de borda, para apenas um deles.

A NBR 8800 trata também das características da seção homogeneizada para vigas em balanço, mas as mesmas não serão tratadas neste trabalho.

4.2.2.1 *Largura efetiva para vigas intermediárias*

A largura efetiva da mesa de concreto, de cada lado da linha de centro da viga, deve ser igual ao menor dos seguintes valores:

- a) 1/8 do vão da viga mista, considerado entre linhas de centro dos apoios;
- b) metade da distância entre a linha de centro da viga analisada e a linha de centro da viga adjacente;

4.2.2.2 *Largura efetiva para vigas de borda*

A largura efetiva da mesa de concreto será igual ao menor dos seguintes valores:

- a) 1/4 do vão somado + b_f ;
- b) $6 t_c + b_f$;
- c) $b_f + 1/2$ da distância entre mesas superiores;

onde,

b_f : largura da mesa do perfil

t_c : altura da laje de concreto acima das nervuras da fôrma de aço incorporada.

4.2.2.3 Fator de homogeneização

É obtido de acordo com a equação 4.3 dividindo o módulo de elasticidade do aço pelo módulo de elasticidade do concreto.

$$\eta = \frac{E}{4760 \sqrt{f_{ck}}} \quad (4.3)$$

4.2.2.4 Momento de inércia da seção homogeneizada

O momento de inércia da seção mista efetiva ou, como chamado na NBR 8800:2008, momento de inércia da seção transformada (I_{tr}) é definido pela Equação 4.4.

$$I_{tr} = \frac{A_c}{\eta} \left(y_{cg} - \frac{t_c}{2} \right)^2 + \frac{b_{ef} h_c^3}{12 \eta} + A_a \left(t_c + h_f + \frac{d}{2} + y_{cg} \right) + I_a \quad (4.4)$$

onde,

A_c : área de concreto acima da nervura da fôrma;

A_a : área do perfil;

y_{cg} : distância do topo da laje ao centro de gravidade da seção mista;

h_f : altura do steel deck.

O novo centro de gravidade da seção mista (transformada) é calculado pela Equação 4.5.

$$y_{cg} = \frac{\frac{t_c}{2} \left(\frac{A_c}{\eta} \right) + \left(t_c + h_f + \frac{d}{2} \right) A_a}{\frac{A_c}{\eta} + A_a} \quad (4.5)$$

onde,

d: altura total do perfil de aço.

4.2.3 Determinação do posicionamento da linha neutra

Como pode ser visto na Figura 10 a seguir, é comumente mais eficaz que a linha neutra plástica (LNP) esteja posicionada fora da laje de concreto pois não haverá nenhuma porção deste material submetido à esforços de tração, sendo a posição exata da interface que separa a laje do perfil o local teórico mais eficiente possível.

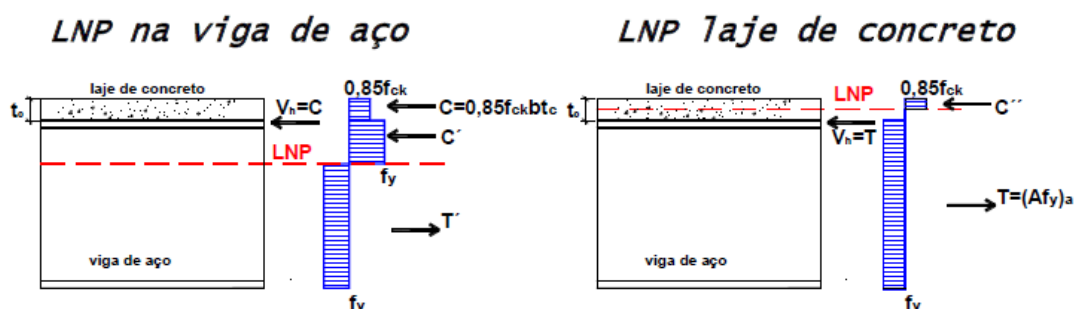


Figura :10 Diagrama Tensão x Deformação para as diferentes posições da LNP (Fonte: Vasconcellos (2020))

De toda forma, o programa poderá escolher combinações de elementos estruturais que possuam quaisquer posições de LPN na seção, desde que respeitadas todas as restrições de projeto, se aproximando assim do resultado mais otimizado possível.

Para determinar a posição da LNP basta determinar as resultantes de tração de cálculo (T_d) e de compressão de cálculo (C_d) e compará-las:

- Se $T_d > C_d$: Linha neutra no perfil
- Se $T_d < C_d$: Linha neutra na laje de concreto

4.2.4 Verificação última na fase construtiva

Quando ainda na fase construtiva, o elemento estrutural de aço precisa resistir sozinho aos esforços solicitantes pois o concreto ainda está fresco e não possui resistência. Neste caso, a verificação é feita como viga de aço isolada considerando como carregamento os pesos próprios do perfil e da laje.

Após já ter sido definido em 4.1 o limite para que a viga seja compacta e considerando que a mesma está contida lateralmente pelos painéis de steel deck, calcula-se o momento resistente da seção de aço isolada para perfis compactos conforme a Equação 4.6 a seguir.

$$M_{1Rd} = \frac{Z_x f_y}{1,10} \quad (4.6)$$

onde,

M_{1Rd} : momento resistente de cálculo da seção de aço isolada;

Z_x : Módulo resistente plástico em torno do eixo x.

O momento resistente de cálculo deve ser igual ou superior ao momento solicitante de cálculo (M_{Sd}) gerado pelo carregamento da fase construtiva. Tal condição está expressa em termos matemáticos na Equação 4.7.

$$M_{1Rd} \geq M_{1Sd} \quad (4.7)$$

4.2.5 Verificação última da seção mista

Como já foi definido anteriormente neste capítulo, a viga em questão é compacta e de interação completa, podendo-se admitir assim plastificação total da seção. Calcula-se a profundidade da Linha Neutra Plástica (a) de modo a se descobrir em que ponto a seção as tensões se anulam. O valor de a pode ser calculado conforme a Equação 4.8 que é a razão entre as resultantes de tração e compressão respectivamente.

$$a = \frac{A f_{yd}}{0,85 f_{cd} b_{ef}} \quad (4.8)$$

onde,

A: área da seção do perfil de aço;

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

b_{ef} : largura efetiva da laje de concreto.

Para obtenção do Momento resistente de cálculo da seção mista basta multiplicar a resultante de tração pelo braço de alavanca y , que é a distância entre as forças T_d e C_d . Obtido o momento resistente, basta compará-lo ao solicitante de cálculo analogamente ao que foi feito na verificação da fase construtiva, porém com o carregamento último final. As Equações 4.9 e 4.10 seguintes mostram respectivamente o cálculo de M_{Rd} e sua comparação com M_{Sd} .

$$M_{2Rd} = A f_{yd} \left(d_1 + h_f + t_c - \frac{a}{2} \right) \quad (4.9)$$

$$M_{2Rd} \geq M_{2Sd} \quad (4.10)$$

onde,

M_{2Rd} : momento resistente de cálculo da seção mista;

d_1 : distância entre CG do perfil e o topo da mesa superior;

h_f : altura do steel deck adotado.

4.2.6 Verificação à força cortante

A força cortante resistente de cálculo de vigas mistas de alma cheia deve ser determinada considerando-se apenas a resistência do perfil de aço. A condição inicial seguinte deve ser respeitada de acordo com os termos da Equação 4.11.

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} \quad (4.11)$$

onde:

V_{Sd} : força cortante solicitante de cálculo;

V_{Rd} : força cortante resistente de cálculo.

A força cortante resistente de cálculo para perfis I é calculada da seguinte forma:

- Para $\lambda \leq \lambda_p$:

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{1,1} \quad (4.12)$$

- Para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$:

$$V_{Rd} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{V_{pl}}{1,1} \quad (4.13)$$

- Para $\lambda > \lambda_r$:

$$V_{Rd} = 1,24 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 \frac{V_{pl}}{1,1} \quad (4.14)$$

Sendo os parâmetros de esbeltez λ , λ_r e λ_p definidos por:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (4.15)$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{5 E_s}{f_y}} \quad (4.16)$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{5 E_s}{f_y}} \quad (4.17)$$

E a força de plastificação da alma por cisalhamento (V_{pl}) por:

$$V_{pl} = 0,6 d t_w f_y \quad (4.18)$$

onde:

h: altura da alma, tomada igual à distância entre as faces internas das mesas nos perfis soldados e igual a esse valor menos os dois raios de concordância entre mesa e alma nos perfis laminados;

t_w : espessura da alma.

4.2.7 Conectores de cisalhamento

São considerados neste trabalho os conectores de cisalhamento do tipo pino stud bolt com cabeça pois são a melhor opção para utilização em combinação com lajes em fôrma de aço incorporada. No Brasil existem apenas duas bitolas comerciais para conectores stud bolt: $\frac{3}{4}$ " (19 mm) e $\frac{7}{8}$ " (22mm). No trabalho está sendo considerado um banco de dados com nove tipos diferentes de pinos stud bolt com diferentes comprimentos e uma das duas bitolas citadas anteriormente.

No programa foi elaborada uma função chama 'Numero_Conectores' que calcula a quantidade necessária de conectores de cisalhamento e determina o número máximo de pinos possíveis de serem soldados na mesa superior do perfil de acordo com os espaçamentos mínimos entre conectores especificados pela NBR 8800 com os seguintes valores:

- 4Φ para distanciamento no sentido transversal ao perfil
- 6Φ para distanciamento no sentido longitudinal ao perfil

4.2.7.1 Fatores de redução da resistência do conectores

A NBR 8800 especifica valores para dois fatores de redução da resistência dos conectores de cisalhamento chamados de R_g e R_p quando utilizados em combinação com lajes de fôrma de aço incorporada.

O primeiro deles considera o efeito do número de conectores soldados em uma mesma nervura da laje e é igual a 1,0, 0,85 e 0,70 para um, dois ou mais conectores, respectivamente; esta é uma decisão executiva e o usuário pode realizar a escolha através da definição de um código solicitado no script de entrada de dados.

Já o segundo fator de redução considera a influência da posição escolhida para o conector dentro da nervura do steel deck; como a fôrma possui um enrijecedor no centro da nervura, é preciso especificar a posição do pino para

assim definir o valor do fator de redução relacionado. Assim como feito anteriormente para R_g , o usuário informa um código no arquivo de entrada de dados a fim de escolher o valor de R_p a ser considerado.

A Figura 11 mostra os valores de R_p para as diferentes posições de fixação do conector em função do sentido da força resultante de compressão.

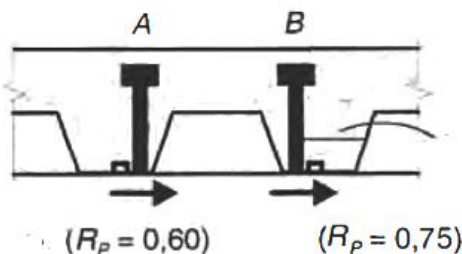


Figura :11 Fator de redução R_p para as possíveis posições de fixação do conector (Fonte: Pfeil (2009))

4.2.7.2 Cálculo da resistência unitária do conector

A resistência de cada pino, chamada de q_{Rd} é determinada pela NBR8800 como sendo o menor entre os dois valores apresentados nas Equações 4.19 e 4.20.

$$q_{Rd} = \frac{A_{cs} \sqrt{f_{ck} E_c}}{4} \quad (4.19)$$

$$q_{Rd} = \frac{R_g R_p A_{cs} f_{ucs}}{2} \quad (4.20)$$

onde:

A_{cs} : área da seção de cada conector;

f_{ck} : resistência à compressão do concreto;

E_c : módulo de elasticidade do concreto;

f_{ucs} : tensão última de ruptura do conector;

R_g : coeficiente para consideração de efeito de grupo;

R_p : coeficiente para consideração da posição do conector.

4.2.7.3 Cálculo no número de conectores de cisalhamento necessário

O cálculo do número de conectores é feito dividindo-se o esforço atuante na interface da viga mista pela resistência unitária do conector adotado. Como esta solicitação é definida de acordo com a posição da linha neutra na seção, a quantidade de conectores é determinada pela Equação 4.21 para LNP localizada no perfil de aço, e pela Equação 4.22 quando LNP estiver posicionada na laje de concreto.

$$n = \frac{0,85 f_{ck} b_{ef} h_c}{q_{Rd}} \quad (4.21)$$

$$n = \frac{A f_y}{q_{Rd}} \quad (4.22)$$

onde:

q_{Rd} : resistência de cálculo de cada conector.

4.2.8 Verificação do Estado Limite de Serviço para deformações excessivas

Devem ser somadas as flechas parciais causadas na fase construtiva (∂_1) e após a cura do concreto (∂_2). A primeira é causada pelo peso próprio da laje somado ao peso próprio do perfil e o momento de inércia utilizado no cálculo é o do perfil de aço isolado; na segunda é considerado tanto o peso próprio dos elementos quanto o carregamento externo ao qual a viga está submetida. Os valores das flechas ∂_n são calculados a partir da Equação 4.23.

$$\partial_n = \frac{5}{384} \frac{q}{E} \frac{L^4}{I} \quad (4.23)$$

Os valores de q , L , E e I são respectivamente o carregamento ao qual a viga está submetida que – para os problemas aqui estudados sempre será uniformemente distribuído sobre a viga, o comprimento da viga e o módulo de elasticidade e momento de inércia da seção – isolada ou transformada, dependendo se está calculando ∂_1 ou ∂_2 . Os limites de flecha máxima para a verificação de deformações excessivas é $L/350$.

CAPÍTULO 5 – MODELAGEM DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

Sendo a solução de um problema de otimização altamente dependente de sua formulação prévia, fica evidente a grande importância desta etapa inicial para o processo de busca do resultado ótimo como um todo. Erros cometidos nesta fase introdutória como a má formulação da função objetivo, a ausência de alguma restrição crítica, a implementação de uma restrição inconsistente, ou até mesmo a quantidade exagerada destas limitações podem conduzir o código do programa a um resultado incoerente ou a divergir e não conseguir encontrar qualquer solução (ARORA, 2012).

Arora (2012) descreve um procedimento composto por cinco etapas que conduzem a uma formulação adequada a praticamente todos os problemas de otimização possíveis:

Etapa 1: Descrição do projeto / problema

Etapa 2: Coleta de dados e informações

Etapa 3: Definição de variáveis de projeto

Etapa 4: Critério de otimização

Etapa 5: Formulação de restrições

O problema de otimização consiste na minimização de uma função objetivo $f(x)$ que representa o custo total da estrutura através da quantificação do volume (peso) de cada material utilizado. Tal minimização estará sujeita a restrições de igualdade e desigualdade. O modelo de otimização está matematicamente representado a seguir.

minimizar:

$$f(x); \quad (5.1)$$

sujeito a:

$$h_i(x) = 0; \quad (5.2)$$

$$g_j(x) \leq 0; \quad (5.3)$$

utilizando as variáveis:

$$x = [x_k], k = 1, \dots, n \quad (5.4)$$

$$x_l = [x_{l,i}], i = 1, \dots, n \quad (5.5)$$

$$x_u = [x_{u,i}], i = 1, \dots, n \quad (5.6)$$

onde:

$f(x)$: função objetivo;

$h_i(x)$: restrições de igualdade;

$g_j(x)$: restrições de desigualdade;

x : vetor que contém as variáveis de projeto;

x_l : vetor que contém os limites inferiores das variáveis de projeto;

x_u : vetor que contém os limites superiores das variáveis de projeto.

O problema tratado por este trabalho faz uso de variáveis discretas contidas em bancos de dados criados, as quais dizem respeito ao perfil de aço e suas especificações comerciais, às dimensões comerciais das fôrmas em aço para lajes, às características do concreto e aos modelos de stud bolts disponíveis no mercado. O carregamento e o comprimento total do elemento estrutural são tratados pelo problema como dados de entrada. As restrições do problema de otimização são todos os limites exigidos pelas normas e considerações práticas já estabelecidas no Capítulo 4 deste trabalho.

Foram desenvolvidos módulos computacionais para as restrições relativas ao dimensionamento da viga em seção mista de aço e concreto; tais módulos foram utilizados pelo programa principal de otimização elaborado. O módulo principal consiste de um algoritmo genético que realiza o processo de otimização em busca da seção ideal.

Todos os códigos computacionais foram desenvolvidos na plataforma computacional MATLAB™ por se tratar de um software que utiliza uma linguagem computacional simples, porém muito eficiente, além de ser um programa com amplo uso no meio acadêmico e industrial. A análise estrutural da viga em questão também é realizada pelo mesmo software evitando desta

maneira a utilização simultânea de uma outra plataforma, conseguindo assim atingir uma eficiência computacional muito elevada.

5.1 Função objetivo

A função objetivo é composta pela soma dos pesos dos elementos constituintes da viga, ou seja, a soma do peso da laje de concreto, do perfil metálico e dos conectores de cisalhamento. Assim sendo, são considerados os pesos específicos dos materiais e a área da seção transversal de cada elemento bem como seu comprimento ou quantidade. A Equação 5.7 calcula o custo total dos materiais necessários para a execução da estrutura estudada.

$$f_x = PP \cdot CA + VL \cdot CC + PSD \cdot CSD + NCN \cdot P_{Con} \cdot CCN \quad (5.7)$$

onde:

$F(x)$: função objetivo;

PP: peso total do perfil de aço;

CA: custo por unidade de peso do aço estrutural;

VL: volume total da laje colaborante de concreto;

CC: custo por unidade de volume do concreto;

PSD: peso total de fôrma steel deck dentro da zona colaborante;

CSD: custo unidade de peso da fôrma;

NCN: número de conectores necessário;

Pcon: peso unitário do conector de cisalhamento;

CCN: custo por unidade de conector;

5.2 Restrições de projeto

As restrições de projeto compreendem as especificações normativas relativas ao dimensionamento de uma viga em seção mista aço-concreto já definidas anteriormente no capítulo 4. A solução ótima obtida deve atender à todas as restrições impostas sem exceção.

5.2.1 Compacidade da estrutura

Seguindo o que já foi explicado em 4.2.1, para que a seção esteja dentro das especificações normativas a compacidade da estrutura deve respeitar o limite máximo traduzido como restrição de projeto segundo a Equação 5.8.

$$g_1 = \frac{h_w}{t_w 5,7 \sqrt{\frac{E_s}{f_y}}} - 1 \quad (5.8)$$

5.2.2 Verificação última na fase construtiva

A Equação 5.9 prevê a limitação do momento solicitante de cálculo na fase construtiva ao momento resistente de cálculo do perfil de aço isolado.

$$g_2 = \frac{M_{1sd} 1,10}{Z_x f_y} - 1 \quad (5.9)$$

5.2.3 Verificação última da seção mista

Também é necessário limitar o momento solicitante de cálculo final (M_{2sd}) ao momento resistente apresentado pela seção mista como previsto pela Equação 5.10.

$$g_3 = \frac{M_{2sd}}{A f_{yd} \left(d_1 + h_f + t_c - \frac{a}{2} \right)} - 1 \quad (5.10)$$

5.2.4 Verificação à força cortante

A Equação 5.11 traduz a restrição imposta ao esforço cortante onde simplesmente o esforço resistente de cálculo da seção deve ser maior ou igual ao solicitante de cálculo.

$$g_4 = \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} - 1 \quad (5.11)$$

5.2.5 Limite para deformações excessivas

Por fim, a seção 4.5 determina um limite máximo ao qual a flecha total apresentada pela estrutura deve obedecer; tal limite está estabelecido pela restrição apresentada na Equação 5.12.

$$g_5 = \frac{(\partial_1 + \partial_2) 350}{L} - 1 \quad (5.12)$$

CAPÍTULO 6 – ESTRUTURA DE FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA

O programa tem sua partida realizada por um script de inicialização – aqui chamado de módulo de otimização, que é o conjunto principal de códigos do programa e aciona todas as funções implementadas a fim de realizar o dimensionamento otimizado.

Os dados de entrada são lidos após o usuário selecionar um código num menu apresentado para escolher o problema estudado. A partir de uma população inicial padrão o programa calcula um primeiro resultado candidato que passa pelos cálculos definidos nos módulos subsequentes – Análise estrutural e dimensionamento. O processo se repete iterativamente até que um dos critérios de parada seja atingido.

6.1 Módulo de Otimização

O módulo de otimização decodifica os dados dos candidatos iniciais à solução; os módulos seguintes são então iniciados para que sejam calculados os esforços internos e resistentes da estrutura considerada. As restrições de projeto entram nesta etapa, e são a garantia de que a solução cogitada não está em desacordo com as considerações normativas já apresentadas no Capítulo 4 desta publicação. É calculada então a função objetivo, que quantifica o custo estimado total relacionado aos materiais necessários para execução da viga candidata.

O processo descrito acima é repetido quantas vezes forem necessárias até que um dos critérios de parada seja satisfeito e o programa interrompa seu funcionamento, mostrando então a solução ótima encontrada.

Segue abaixo um fluxograma que apresenta de forma resumida o funcionamento do módulo de otimização (Figura 12).

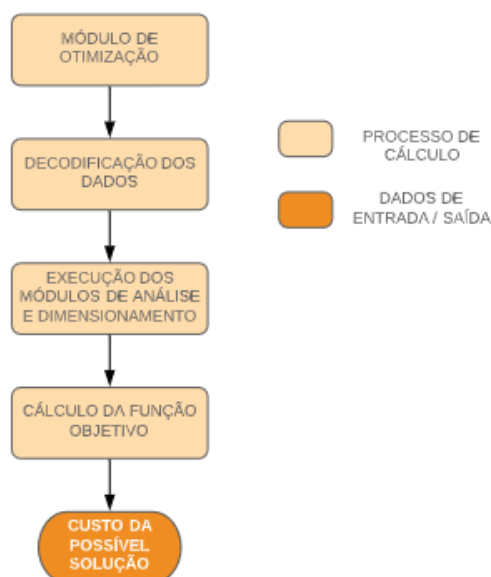


Figura 12: Fluxograma do módulo de otimização (Fonte: Autor).

6.2 Módulo de análise estrutural

O módulo de análise estrutural recebe as propriedades físicas dos elementos componentes da solução candidata e as informações de carregamento externo e peso próprio da viga mista e retorna os esforços solicitantes máximos na estrutura. É importante salientar que são calculados esforços internos para duas situações distintas.

A primeira situação é correspondente à fase construtiva e só leva em consideração o carregamento de peso próprio da estrutura; as características físicas e geométricas consideradas são as da seção de aço isolada pois neste estágio o concreto ainda não contribui com a resistência da peça. No segundo caso o concreto já está atuando na capacidade resistente da seção, logo, as características adotadas são as da seção homogeneizada e o carregamento é a superposição do peso próprio mais cargas externas informadas pelo usuário. A Figura 13 a seguir mostra a sequência lógica de funcionamento do módulo de análise estrutural.

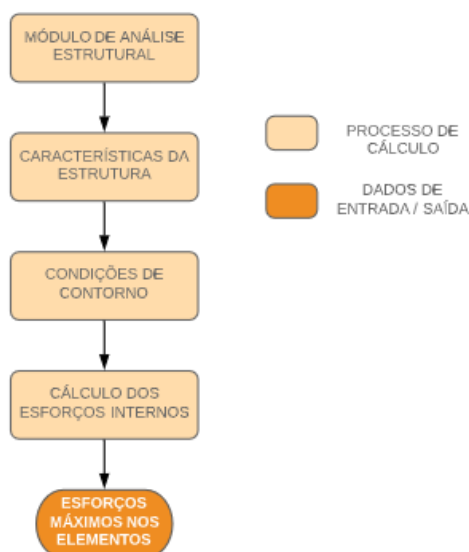


Figura 13: Fluxograma do módulo de análise estrutural (Fonte: Autor).

6.3 Módulo de dimensionamento

O módulo de dimensionamento do programa realiza os cálculos e verificações definidos no capítulo 4 deste trabalho através dos esforços internos obtidos pelo módulo anterior de análise estrutural. Os cálculos realizados por esta parte do programa o vetor de restrições de projeto que retornam ao algoritmo genético.

Assim como nos tópicos anteriores, foi criado um fluxograma mostrando o funcionamento lógico do módulo para facilitar o entendimento, Figura 14.

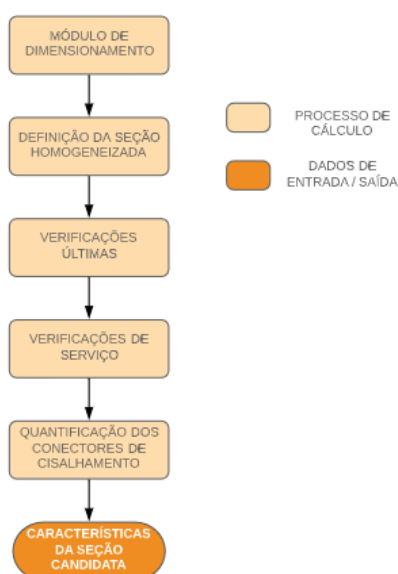


Figura 14: Fluxograma do módulo de dimensionamento (Fonte: Autor).

Esta seção do programa mapeia dentro do banco de dados as informações de entrada – dimensões dos elementos extraídas das tabelas fornecidas, referentes à combinação estudada como possível solução em cada iteração.

O módulo calcula as dimensões teóricas da seção homogeneizada e as utiliza para determinar os esforços resistentes da seção avaliada, a flecha máxima admitida à estrutura e o número necessário de conectores de cisalhamento. Tais informações são os argumentos de saída da função de dimensionamento que serão utilizados no cálculo das restrições de projeto para definição dos limites de busca do algoritmo genético.

CAPÍTULO 7 – VALIDAÇÃO DO MODELO

A fim de validar o programa, foram buscados na literatura três exemplos práticos com características semelhantes ao escolhido para ser estudado neste trabalho. Tendo em vista que não foi encontrada nenhuma publicação que realizasse o dimensionamento otimizado de uma viga vista com as mesmas características aqui adotadas em combinação com técnicas heurísticas de otimização, foram selecionados trabalhos com a maior semelhança possível, diferindo em todos os casos somente no tipo de laje abordada, sendo elas maciças ao invés de lajes com fôrma de aço incorporada.

Nos três casos foram considerados os custos unitários dos elementos considerados em tais referências, com exceção do custo do steel deck já que este elemento não existia nos exemplos de referência. Como a fôrma de aço incorporada confere um aumento na capacidade resistente da seção mista, conclui-se que é importante associar um custo ao steel deck a fim de equiparar os exemplos analisados e fazer uma validação satisfatória. Para cada um dos exemplos foi escolhido um custo para o material da fôrma proporcional ao custo de referência do aço do perfil, usando como base para a extrapolação de dado os mesmos custos unitários e atualizados retirados de bancos de dados de composições de custos brasileiros.

É importante ressaltar que as comparações feitas neste capítulo tem apenas a finalidade de avaliar se os resultados aqui obtidos se mostram relativamente próximos dos apresentados pelas publicações de referência a fim de validar a metodologia implementada. Como os exemplos possuem diferenças significativas entre si, não é possível comparar as eficiências dos programas de forma direta.

7.1 Aplicação 1

Senouci & Al-Ansari (2009) também otimizaram o dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto através da utilização de algoritmos genéticos. O modelo foi elaborado baseado nas especificações do código americano AISC (American Institute of Steel Construction) utilizando perfis metálicos laminados, conectores de cisalhamento do tipo stud bolt e lajes maciças de concreto

armado, sendo este último elemento a principal diferença entre o documento de referência e o modelo proposto por este trabalho.

Para validação da formulação apresentada, os autores propuseram duas vigas a serem estudadas, sendo as duas submetidas a três modelos de otimização distintos. No primeiro, tanto a espessura da laje de concreto quanto a resistência à compressão deste material eram tratados como dados de entrada e não variavam durante o processo de cálculo; na segunda situação, a espessura da laje passou a ser considerada como variável de projeto e a resistência característica do concreto se manteve como dado de entrada; por fim, o terceiro estudo considerou os dois parâmetros como variáveis de projeto a serem otimizadas pelo programa. Por questão de similaridade entre os exemplos estudados, apenas a segunda situação será tomada como base comparativa para o presente estudo.

A Tabela 7.1.1 a seguir reúne os dados de entrada referentes aos dos exemplos executados pelos autores.

Tabela 7.1.1: Dados de entrada para Aplicação 1

Nº do exemplo	Vão total (m)	Espaçamento transversal (m)	Carregamento aplicado (kN/m)	fck (Mpa)	fy (Mpa)	Tipo de construção
1	9	3	13.0	25	345	Escorada
2	12	3	13.5	25	345	Não escorada

Como a viga estudada por esta publicação considera a construção sem utilização de escoramento, apenas a segunda viga da referência será implementada e terá seu resultado comparado.

Os autores consideraram apenas os custos relativos aos materiais necessários par execução da viga, sendo assim, os custos de mão-de-obra foram zerados para equiparar as análises. Os preços unitários do aço estrutural, concreto e conector de cisalhamento foram especificados com os seguintes valores nesta ordem: 1,15 \$/kg, 0,3 \$/kg e 3,30 \$/und; o custo do steel deck adotado foi de \$ 7,96 - proporcional ao custo do aço estrutural adotado, utilizando como base para extrapolação de dados os custos unitários retirados da tabela de composições de custo da Empresa Metropolitana de Obras Públicas do Estado do Rio de Janeiro publicada em abril deste ano. A função objetivo foi

adaptada para receber o custo unitário do concreto em valor monetário por unidade de peso e não de volume como é a forma padrão do código.

O programa realizou 21 iterações até atingir um dos critérios de parada e retornar a solução encontrada, mas a partir da iteração de número 14 a configuração global ótima já havia sido alcançada, sendo as demais tentativas realizadas descartadas por produzirem um custo total mais elevado do que aquele já obtido anteriormente.

Os resultados retornados são exibidos na janela de comandos no MatLab e estão mostrados na Figura 15. As três variáveis de projeto obtidas estão fora dos valores extremos, o que indica que os bancos de dados fornecidos tinham abrangência suficiente para a obtenção de um resultado ótimo bastante preciso. Foi alcançado um custo mínimo de \$2.341,49 através da adoção de um perfil com 410mm de altura e massa linear de 38,8kg/m; a laje ótima é composta por um deck com espessura de 0,95mm e 75mm de profundidade e uma camada de concreto acima das nervuras de 7,5cm de altura; quanto aos conectores de cisalhamento, foram adotados 61 pinos stud bolt de 22mm de diâmetro.

```

##### R E S U L T A D O S #####

Custos_Unitarios_Adotados      S_Und
-----
'Aço (kg)'                      1.15
'Concreto (m³)'                 0.3
'Steel Deck (m²)'              7.96
'Conector (Und)'               3.3

Perfil_Otimo      Laje_Otima      Altura_Total_Laje_m      Conector_Otimo      Numero_de_Conectores
-----
'W 410 x 38,8'    'MF 75'      0.15      'TMB 7/8x157'      61

Custo Ótimo obtido = 2341.49

Elemento_otimo      n_de_ordem
-----
'Perfil (88 disponiveis)'      60
'Steel Deck (48 disponiveis)'  32
'Conector (9 disponiveis)'     7

```

Figura 15: Resultados obtidos com a execução da Aplicação 1. (Fonte: autor)

A Figura 16 traz a representação gráfica da seção transversal adotada pelo programa como sendo a configuração ótima para a viga mista estudada no primeiro exemplo.

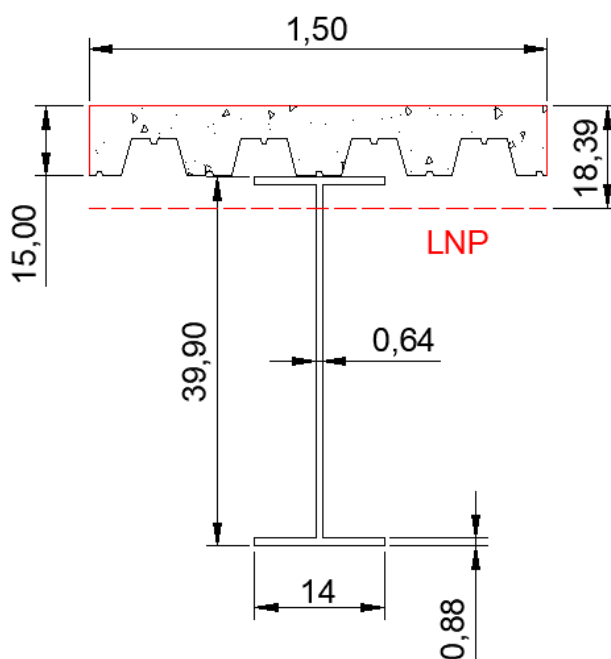


Figura 16: Seção ótima obtida com a execução da Aplicação 1. (Fonte: autor)

A Tabela 7.1.2 mostra um resumo comparativo dos resultados obtidos pela execução do problema executado neste trabalho com aqueles mostrados na referência.

Tabela 7.1.2: Resultados para a Aplicação 1

Programa	tc (mm)	Perfil	Diâmetro dos conectores (mm)	Nº de conectores	Custo da viga (\$)
Referência	160	W610x82.0	22.0	56	3183,00
Autor	130	W410x38.8	22.0	61	2341,49

Foi obtido um custo ótimo \$841,51 menor que o valor de referência devido a uma menor altura de concreto atribuída e a escolha de um perfil de aço 20cm mais baixo. Atribui-se a obtenção de resultados neste trabalho dentro das limitações normativas utilizando elementos menos robustos o uso de lajes do tipo steel deck, pois sua fôrma de aço incorporada é parte integrante do cálculo dos esforços resistentes da estrutura.

Foram gerados dois gráficos para apresentar de forma visual a evolução do programa na busca do resultado ótimo. O primeiro deles (Figura 17) mostra em azul o resultado médio da função objetivo na geração atual e em preto o resultado mínimo obtido ao longo do processo, mostrando que o menor custo foi encontrado já nas primeiras iterações. O segundo (Figura 18) mostra o resultado numérico do cálculo das restrições de projeto; a restrição 6, relativa à flecha

máxima admitida, foi a que mais se aproximou de seu limite, sendo então a verificação do ELS o fator mais determinante para o dimensionamento da viga.

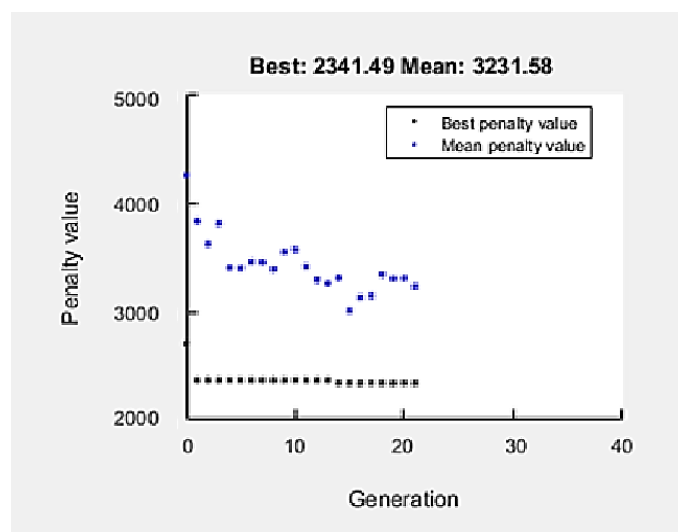


Figura17: Custo x Geração da solução estudada para a Aplicação 1. (Fonte: Autor)

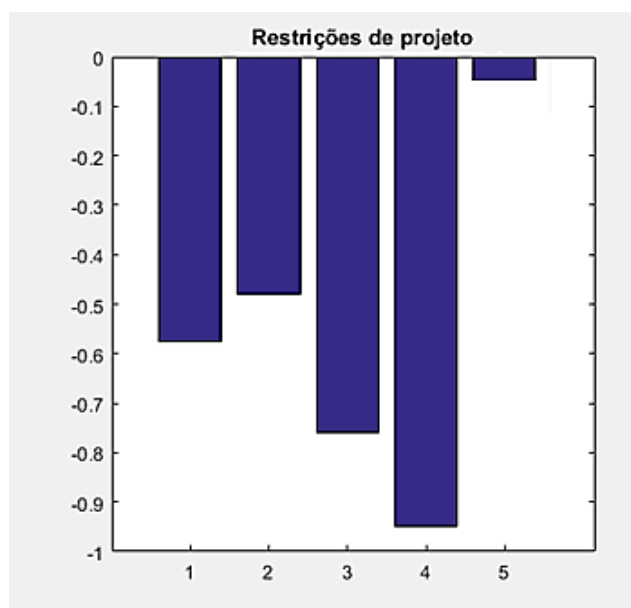


Figura 18: Valores das restrições de projeto para a Aplicação 1. (Fonte: Autor)

A Figura 19 mostra de forma resumida a comparação entre os resultados apresentados pelo programa implementado e os obtidos pelos autores no trabalho utilizado como referência.



Figura 19: Comparativo de resultados entre a aplicação 1 e sua referência. (Fonte: Autor)

7.2 Aplicação 2

Korouzhdeh, Eskandari-Naddaf, & Gharouni-Nik (2017) desenvolveram uma metodologia computacional para realizar o dimensionamento de vigas mistas através do algoritmo de colônia de formigas melhorado (IACO), outra ferramenta heurística de otimização. Foram utilizadas as prescrições normativas do AISC e variáveis discretas contidas em uma tabela única fornecida ao programa.

Os exemplos trazidos pela referência buscam obter o custo ótimo de um piso de 8m de largura composto por justaposições de seções em vigas mistas. A proposta dos autores é que esta área possa ser replicada em qualquer das direções para cobrir uma área. A seção mista é composta por um perfil laminado, uma laje maciça de concreto e conectores de cisalhamento stud bolt.

Os autores fazem uma interessante comparação de seus resultados com referências de trabalhos que utilizam outras técnicas heurísticas de otimização para implementação do mesmo exemplo. Além do algoritmo de colônia de formigas (ACO), são apresentados resultados para a utilização de usca de harmonia padrão (HS), busca de harmonia aprimorada (IHS) e busca de harmonia altamente confiável (HRHS). Os dados de entrada para os exemplos apresentam-se na Tabela 7.2.1..

Tabela 7.2.1: Dados de entrada para Aplicação 2

Vão (m)	f_y (kg/cm ²)	Carregamento (kg/cm ²)	Espaçamento (cm)	Custo do aço (\$/kg)	Custo do concreto (\$/m ³)	Custo do conector (\$/und)	f_{ck} (Mpa)
6	2400	0,05	200	1,00	50,00	0,50	20

O custo adotado pelo steel deck foi estimado da mesma forma feita para o exemplo anterior, usando também a tabela de abril de 2021 da EMOP como referência ficando este com o valor de \$6,92.

A Figura 20 mostra os resultados exibidos na janela de comando após a execução da Aplicação 2.

```

##### R E S U L T A D O S #####

Custos_Unitarios_Adotados      S_Und
-----
'Aço (kg)'                      1
'Concreto (m³)'                 50
'Steel Deck (m²)'               6.92
'Conector (Und)'                0.5

Perfil_Otimo      Laje_Otima      Altura_Total_Laje_m      Conector_Otimo      Numero_de_Conectores
-----
'W 200 x 15,0'    'MF 50'          0.12                      'TMB 7/8x157'      27

Custo Ótimo obtido = 1018.76

Elemento_otimo      n_de_ordem
-----
'Perfil (88 disponíveis)'      7
'Steel Deck (48 disponíveis)'  7
'Conector (9 disponíveis)'     7

```

Figura 20: Resultados para a Aplicação 2. (Fonte: Autor)

A configuração ótima (Figura 21) adotou um perfil de 20cm de altura e massa linear de 15kg/m juntamente com um steel deck de 50mm de profundidade e 0,8mm de espessura e uma camada total de concreto com altura de 7cm acima das nervuras. Foram adotados 27 stud bolts de diâmetro igual a 22mm. Tal configuração gerou um custo mínimo de \$1018,76 para a confecção do piso.

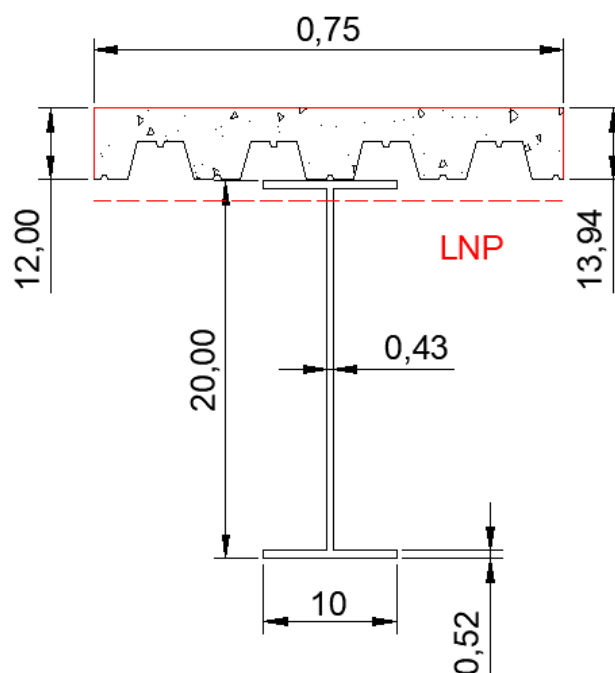


Figura 21: Seção ótima obtida com a execução da Aplicação 2. (Fonte: autor)

O resultado obtido foi comparado com os valores calculados pelos autores e os demais trazidos por eles a partir de outras publicações. A Tabela 7.2.2 a seguir mostra todos os resultados a serem avaliados.

Tabela 7.2.2: Resultados para a Aplicação 2

Técnica de otimização	tc (cm)	Perfil	Área do conector (cm ²)	Custo total (\$)
ACO	8	INP200	1,13	1023,00
HS	11	IPE180	2,84	882,99
IHS	11	IPE180	3,8	897,99
HRHS	11	IPE180	2,84	857,99
IACO	9	IPE160	2,21	689,51
Siqueira	12	W200X15	2,65	1018,76

Como visto o algoritmo desenvolvido obteve um resultado bastante próximo dos demais comparados, ficando com o custo \$329,25 mais elevado do que o resultado do IACO (menor custo), e \$4,24 mais baixo do que o ACO (maior custo).

O programa levou 21 gerações até obter o menor custo global apenas 9 gerações totais até que um dos critérios de parada fosse atingido e a execução do programa fosse encerrada. A evolução dos custos obtidos a cada geração

formada pelo algoritmo está representada de forma gráfica a seguir na Figura 22.

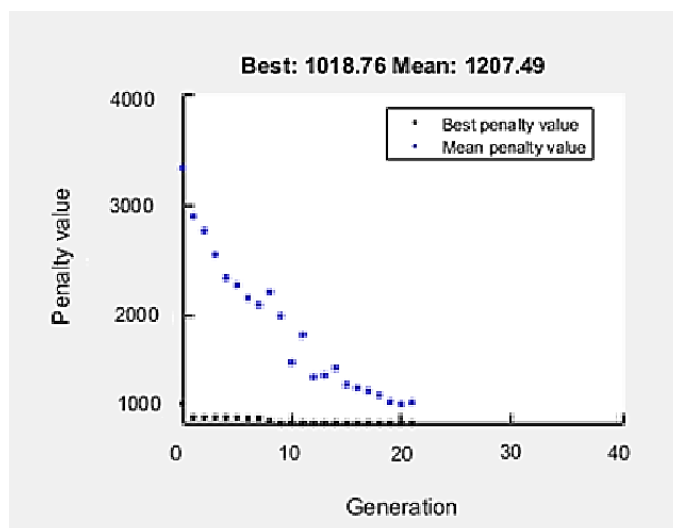


Figura 22: Custo x Geração da solução estudada para a Aplicação 2. (Fonte: Autor)

Novamente a restrição relativa à fecha máxima admissível foi a mais determinante no processo de dimensionamento otimizado sendo seu valor o que mais se aproximou do limite normativo permitido. Os valores de todas as restrições de projeto estão representados no gráfico ilustrado na Figura 23.

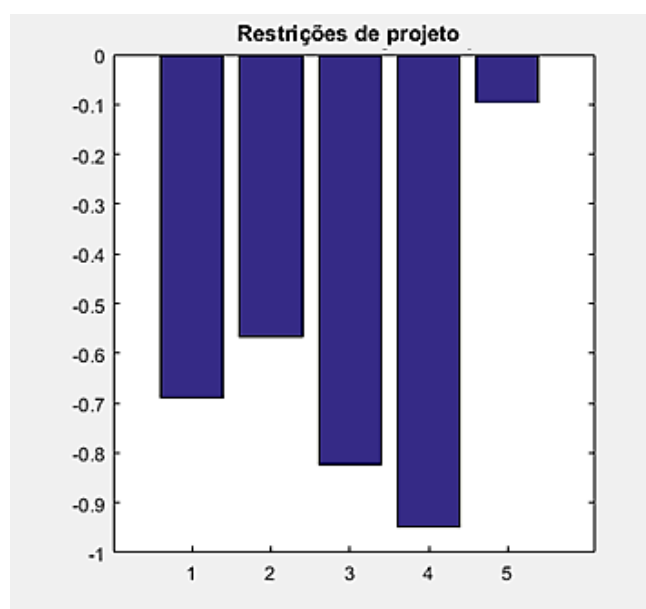


Figura 23: Valores das restrições de projeto para a Aplicação 2. (Fonte: Autor)

Novamente foi elaborado um esquema gráfico (Figura 24) para exibir de forma resumida uma comparação entre os resultados obtidos com a execução do programa para a segunda aplicação e os valores de referência.



Figura 24: Comparativo de resultados entre a aplicação 2 e sua referência. (Fonte: Autor)

7.3 Aplicação 3

O mesmo piso considerado no problema anterior (Aplicação 2) foi estudado, porém considerando um espaçamento maior entre as vigas. Objetiva-se testar a utilização de uma menor quantidade de vigas na mesma área com maior seção transversal na busca pelo menor custo possível. A Tabela mostra ao dados de entrada utilizados na execução deste problema.

Tabela 7.3.1: Dados de entrada para Aplicação 3

Vão (m)	f_y (kg/cm ²)	Carregamento (kg/cm ²)	Espaçamento (cm)	Custo do aço (\$/kg)	Custo do concreto (\$/m ³)	Custo do conector (\$/und)	f_{ck} (Mpa)
6	2400	0,05	400	1,00	50,00	0,50	20

Na Figura 25 estão os resultados apresentados pelo programa na janela de comandos após a execução da Aplicação 3, mesmo piso considerado no problema anterior porém considerando um espaçamento maior entre as vigas. Objetiva-se testar a utilização de uma menor quantidade de vigas na mesma área com maior seção transversal na busca pelo menor custo possível.

O algoritmo obteve um custo mínimo de \$854,34 para o exemplo 3 adotando um perfil de 25cm de altura e massa linear de 17,90kg/m juntamente com um steel deck de 50 mm de profundidade e 0,8 mm de espessura e uma camada total de concreto com altura de 5cm acima das nervuras. Foram adotados 32 stud bolts de diâmetro igual a 22 mm. A seção ótima retornada pelo

programa, bem como suas dimensões, está representada graficamente na Figura 26.

#### R E S U L T A D O S ####				
Custos_Unitarios_Adotados		S_Und		
'Aço (kg)'		1		
'Concreto (m³)'		50		
'Steel Deck (m²)'		6.92		
'Conector (Und)'		0.5		
Perfil_Otimo	Laje_Otima	Altura_Total_Laje_m	Conector_Otimo	Numero_de_Conectores
'W 250 x 17,9'	'MF 50'	0.1	'TMB 7/8x132'	32
Custo Ótimo obtido = 854.344				
Elemento_otimo		n_de_ordem		
'Perfil (88 disponiveis)'		20		
'Steel Deck (48 disponiveis)'		1		
'Conector (9 disponiveis)'		6		

Figura 25: Resultados para o exemplo 3. (Fonte: Autor)

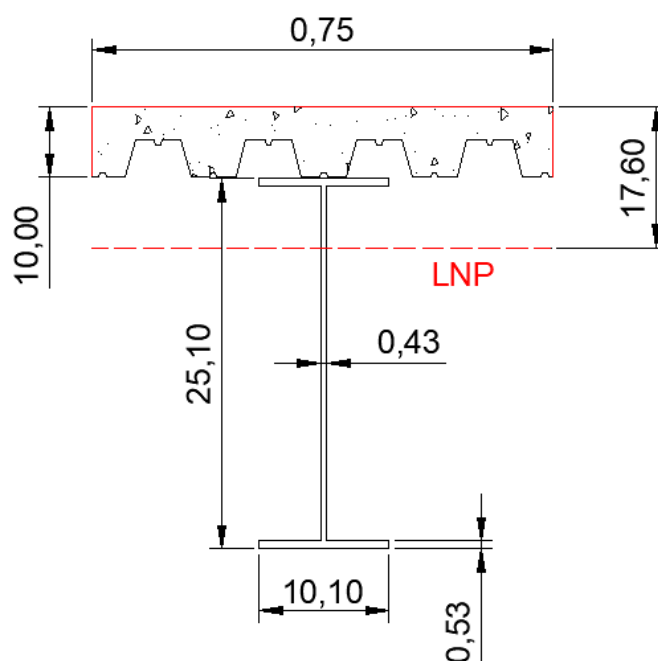


Figura 26: Seção ótima obtida com a execução da Aplicação 3. (Fonte: autor)

Adotando um perfil de aço mais robusto e um maior número de conectores de cisalhamento, o algoritmo genético conseguiu obter um custo ainda menor

para a execução do mesmo piso devido ao menor número de vigas necessárias para a cobertura da área estudada. A Tabela 7.2.3 mostra o mesmo comparativo de custo com as demais técnicas heurísticas de otimização.

Tabela 7.3.2: Resultados para a Aplicação 3

Técnica de otimização	tc (cm)	Perfil	Área do conector (cm ²)	Custo total (\$)
HS	8	INP240	2,84	894,60
IHS	8	INP240	3,8	876,60
HRHS	8	INP240	2,84	876,60
IACO	10	IPE220	2,21	712,098
Siqueira	11	W310X23,8	2,65	854,34

No exemplo número 3 o algoritmo genético deste trabalho obteve o segundo melhor resultado dentre os analisados, tendo um desempenho mais baixo que o algoritmo de colônia de formigas melhorado apenas. O custo obtido pela metodologia desenvolvida neste trabalho foi \$ 142,24 maior que o menor valor e \$40,26 menor que o maior valor dentre os demais custos comparados.

O algoritmo calculou 23 gerações de indivíduos até atingir um dos critérios de parada, sendo a quarta geração a gerar o menor custo global obtido no processo de otimização. A evolução do cálculo da função objetivo está representada pelo gráfico mostrado na Figura 27.

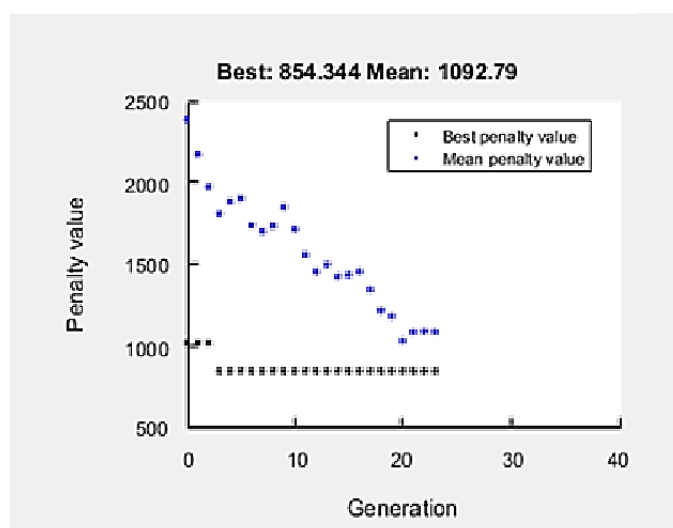


Figura 27: Custo x Geração da solução estudada para a Aplicação 3. (Fonte: Autor)

A Figura 28 mostra em forma de gráfico o valor calculado para todas as restrições de projeto na execução da Aplicação 3.

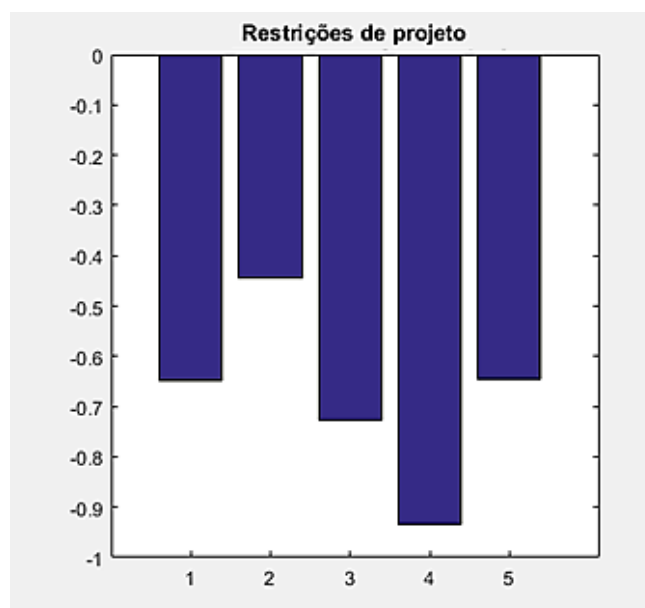


Figura 28: Valores das restrições de projeto para o Exemplo 3. (Fonte: Autor)

O comparativo entre os resultados alcançados com a execução do terceiro exemplo e os valores apresentados na publicação de referência estão mostrados na Figura 29.



Figura 29: Comparativo de resultados entre a aplicação 3 e sua referência. (Fonte: Autor)

CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um modelo baseado em algoritmos genéticos considerado eficiente para o dimensionamento otimizado de vigas mistas utilizando perfis de aço laminados associados à lajes de concreto com fôrmas de aço incorporada e conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça.

As diferenças entre os resultados comparados são ocasionadas em grande parte pelas diferenças existentes entre os bancos de dados fornecidos para as variáveis de projeto e as prescrições normativas adotadas. Nos trabalhos de referência ambos os casos são considerados com padrões Americanos, o que explica parte da diferença entre os custos totais obtidos.

A metodologia aqui apresentada conseguiu obter custos ótimos para a execução dos problemas propostos menores do que a maioria das outras técnicas de referência avaliadas, ficando atrás apenas dos custos obtidos com o método IACO (colônia de formigas melhorado).

Para o exemplo 1 o algoritmo obteve um custo 35,93% maior que o resultado de referência; no segundo exemplo o resultado obtido superou em 99,89% a solução mais barata porém ainda é considerado dentro dos limites de referência pois teve desempenho praticamente igual ao maior dos custos comparados; já no exemplo 3 foi obtido um custo 19,97% menos otimizado e a melhor solução e 4,50% mais otimizado que a solução menos eficiente.

É importante ressaltar que em nenhum dos exemplos implementados o resultado ótimo utilizou os dados extremos na configuração da solução ótima, o que indica coerência na abrangência adotada para os bancos de dados para todos os três elementos componentes da estrutura mista estudada.

O algoritmo genético conseguiu resultados compatíveis com os valores apresentados pelos trabalhos de referência, além de mostrar uma velocidade de convergência que não foi observada em nenhuma das outras ferramentas. Assim sendo, fica comprovada a alta eficiência do GA para a realização do dimensionamento otimizado de estruturas, sobretudo as vigas mistas com as configurações aqui apresentadas.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro. 2008. (Norma técnica).
- ABNT. **NBR 6118**: 2014 Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: [s.n.], 2014.
- ALBUQUERQUE, A. T. D.; EL DEBS, M. K.; MELO, A. M. C. D. OTIMIZAÇÃO DE PAVIMENTOS DE EDIFÍCIOS COM ESTRUTURAS DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS. **Caderno de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 12, n. 54, p. 107-124, 2010. ISSN 1809-5860.
- ALVA, G. M. S.; MALITE, M. Comportamento Estrutural e Dimensionamento de Elementos Mistos Aço-Concreto. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 7, n. 25, p. 51-84, 2005.
- ARORA, J. S. **Introduction to optimum design**. 3^a. ed. Iowa City: [s.n.], 2012.
- AUSTRELL, P.-E. et al. **CALFEM: A finite element toolbox**. Lund University. Lund, p. 285. 2004.
- CÂMARA NETO, J.; LANDESMANN, A.; BATISTA, E. D. M. **Aplicação de Algoritmos Genéticos para Dimensionamento de Vigas-Mistas Aço-Concreto**. São Paulo, p. 128. 2008. (Dissertação de mestrado).
- CARVALHO, D. C. R. **Solução de problemas de otimização com restrições usando estratégias de penalização adaptativa e um algoritmo do tipo PSO**. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, p. 148. 2014. (Dissertação de mestrado).
- CASTRO, R. E. D. **Otimização de Estruturas com Multi-objetivos Via Algoritmos Genéticos de Pareto**. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, p. 224. 2001. (Tese de doutorado).
- CAVALCANTE, O. R. D. O. E. **Estudo de Conectores de cisalhamento do tipo 'V' em viga mista**. Universidade de Brasília. Brasília, p. 216. 2010. (Tese de doutorado).
- CHU, D. N. et al. Evolutionary structural optimization for problems with stiffness constraints. **Finite Elements in Analysis and Design**, p. 239-251, 1996.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **German Language - STEEL STRUCTURES; STABILITY (BUCKLING, OVERTURNING, BULGING)**

METHOD OF CALCULATION, REGULATIONS. Deutsches Institut fur Normung E.V. (DIN). [S.I.]. 1952.

DHILLON, B. S. et al. Optimum design of composite hybrid plate girders. **Journal of Structural Engineering**, v. 117, p. 2088-2098, 1991.

FABEANE, R. **Pontes mistas aço-concreto: Estudo de diretrizes para dimensionamento otimizado.** Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, p. 147. 2015. (Dissertação de mestrado).

FAKURY, R. H. Sobre a revisão da norma brasileira de projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto, a NBR 8800. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 60, n. 2ª, p. 233-239, Abril - Junho 2007.

INDU, K. R.; AIRIN, M. G. Optimization of Tapered Cantilever Beam Using Genetic Algorithm: Interfacing MATLAB and ANSYS. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology.**, Outubro 2015. 10145 - 10150.

KIRCHHOF, L. D.; MUNAIAR NETO, J. UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO SIMPLEMENTE APOIADAS EM TEMPERATURA AMBIENTE E EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 7, n. 25, p. 1-31, 2005.

KLANŠEK, U.; KRAVANJA, S. Cost Optimization of Composite I Beam Floor System. **American Journal of Applied Sciences** , 17 July 2007. 11.

KOROUZHDEH, T.; ESKANDARI-NADDAF, H.; GHAROUNI-NIK, M. An Improved Ant Colony Model for Cost Optimization of Composite Beams. **Applied Artificial Intelligence**, 29 Março 2017. 21.

KOTINDA, T. I. **Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas: ênfase ao estudo da interface laje-viga.** Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, p. 123. 2006. (Dissertação de mestrado).

MALITE, M. **Sobre o calculo de vigas mistas aco-concreto: enfase em edificios.** Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, p. 185. 1990. (Tese de doutorado).

MEDEIROS, G. F. D.; KRIPKA, M. ALGUMAS APLICAÇÕES DE MÉTODOS HEURÍSTICOS NA OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURAS. **CIATEC**, Passo Fundo, v. IV, p. 19-32, 2012.

- NOVAES, A. G. **Métodos de Otimização: Aplicações aos Transportes**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., v. III, 1978.
- PACHECO, M. A. C. Algoritmos genéticos: Princípios e aplicações. **ICA: Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada**, Rio de Janeiro, 1999.
- PFEIL, W. **Estruturas de aço: dimensionamento prático**. 8ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- PIEROTT, R. M. R. **Dimensionamento Ótimo de Vigas Contínuas Utilizadas em Edificações**. Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes, p. 134. 2018. (Dissertação de mestrado).
- POITRAS, G.; LEFRANÇOIS, G.; CORMIER, G. **Optimization of steel floor systems using particle swarm optimization**. Moncton. 2011.
- RAO, S. S. **Engineering Optimization Theory and Practice**. 4ª. ed. Nova Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2009.
- RODRIGUES, T. A. **Dimensionamento Otimizado de Vigas Mistas Aço-Concreto**. Ouro Preto, p. 97. 2018. (Dissertação de mestrado).
- SENOUCI, A. B.; AL-ANSARI, M. S. Cost optimization of composite beams using genetic algorithms. **Advances in Engineering Software**, Doha, p. 1112-1118, 2009.
- SILVA, C. A. D. C. **Otimização estrutural e análise de sensibilidade orientadas por objetos**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, p. 128. 1997. (Dissertação de mestrado).
- SILVA, J. A. B. D.; FERREIRA, J. V.; PAVANELLO, R. ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE ELEMENTOS HIERÁRQUICOS EM OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL EVOLUCIONÁRIA. **Anais do congresso da Academia Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas**, Campinas, 2000. 8.
- SIMONETI, H. L. **Otimização topológica de estruturas bidimensionais**. Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 153. 2009. (Dissertação de mestrado).
- VASCONCELLOS, A. L. **Cálculo de edifícios com estruturas mistas: Notas de aula**. São Paulo. 2020.

ANEXO A – TABELA DE BANCO DE DADOS PARA OS PERFIS DE AÇO LAMINADOS

PERFIS
GERDAU AÇOMINAS

TABELA DE BITOLAS

BITOLA mm x kg/m	MASSA LINEAR kg/m	d mm	bf mm	ESPESURA mm			h mm	d' mm	ÁREA cm²	PERIMETRO u cm	EIXO X-X					EIXO Y-Y					rt cm	It cm⁴	ESBELTEZ			Cw cm⁴	u m²/m	ÁREA REDUZIDA cm²	*CARGA ADM EST (Q.A's.fy)/1,66 tf	*CARGA ADM EST (Q.A's.fy)/2,00 tf	*MOMENTO ADM tf.m	BITOLA mm x kg/m
				tw mm	tf mm	tr mm					lx cm²	Wx cm³	rx cm	Zx cm³	ly cm²	Wy cm³	ry cm	Zy cm³	ABA -1f bf/2t	ABA -2w d'/4			Coef Red. Q ≤ 1,00									
W 150 x 13,0	13,0	148	100	4,3	4,9	138	118	16,6	67	635	85,8	6,18	96,4	82	16,4	2,22	25,50	2,60	1,72	10,20	27,49	1,00	4,181	0,67	6,7				14,00	11,20	2,30	W 150 x 13,0
W 150 x 18,0	18,0	153	102	5,8	7,1	139	119	23,4	69	939	122,8	6,34	139,4	126	24,7	2,32	38,50	2,69	4,34	7,18	20,48	1,00	6,683	0,69	13,3				28,00	22,40	2,80	W 150 x 18,0
W 150 x 22,5 (H)	22,5	152	102	5,8	6,6	139	119	29,0	88	1229	161,7	6,51	179,6	387	50,9	3,65	77,90	4,10	4,75	11,52	20,48	1,00	20,417	0,88	15,7				33,00	26,40	3,80	W 150 x 22,5 (H)
W 150 x 24,0	24,0	160	102	6,6	10,3	139	115	31,5	69	1384	173,0	6,63	197,6	183	35,9	2,41	55,80	2,73	11,08	4,95	17,48	1,00	10,206	0,69	21,0				44,00	35,20	3,60	W 150 x 24,0
W 150 x 29,8 (H)	29,8	157	103	6,6	9,3	138	118	38,5	90	1739	221,5	6,72	247,5	556	72,6	3,80	110,80	4,18	10,95	8,23	17,94	1,00	30,277	0,90	25,2				53,00	42,40	4,70	W 150 x 29,8 (H)
W 150 x 37,1 (H)	37,1	162	104	8,1	11,6	139	119	47,8	91	2244	277,0	6,85	313,5	707	91,8	3,84	140,40	4,22	20,58	6,64	14,67	1,00	39,993	0,91	34,3				57,60	45,60	5,50	W 150 x 37,1 (H)
W 200 x 15,0	15,0	200	100	4,3	5,2	190	170	19,4	77	1305	130,5	8,20	147,9	87	17,4	2,12	27,30	2,55	2,05	9,62	39,44	0,95	8,222	0,77	7,6				16,00	12,80	3,40	W 200 x 15,0
W 200 x 19,3	19,3	203	102	5,8	6,5	190	170	25,1	79	1686	166,1	8,19	190,6	116	22,7	2,14	35,90	2,59	4,02	7,85	29,31	1,00	11,098	0,79	13,3				28,00	22,40	3,90	W 200 x 19,3
W 200 x 22,5	22,5	206	102	6,2	8,0	190	170	29,0	79	2029	197,0	8,37	225,5	142	27,9	2,22	43,90	2,63	6,18	6,38	27,42	1,00	13,868	0,79	17,1				36,00	28,80	4,40	W 200 x 22,5
W 200 x 26,6	26,6	207	133	5,8	8,4	190	170	34,2	92	2611	252,3	8,73	282,3	330	49,6	3,10	76,30	3,54	7,65	7,92	29,34	1,00	32,477	0,92	20,5				43,00	34,40	5,60	W 200 x 26,6
W 200 x 31,3	31,3	210	134	6,4	10,2	190	170	40,3	93	3168	301,7	8,86	338,6	410	61,2	3,19	94,00	3,60	12,59	6,57	26,50	1,00	40,822	0,93	26,7				56,00	44,80	6,30	W 200 x 31,3
W 200 x 35,9 (H)	35,9	201	165	6,2	10,2	181	161	45,7	103	3437	342,0	8,67	379,2	764	92,6	4,09	141,00	4,50	14,51	8,09	25,90	1,00	69,502	1,03	30,5				64,00	51,20	7,10	W 200 x 35,9 (H)
W 200 x 41,7 (H)	41,7	205	166	7,2	11,8	181	161	53,5	104	4114	401,4	8,77	448,6	901	108,5	4,10	165,70	4,53	23,19	7,03	21,86	1,00	83,948	1,04	38,1				80,00	64,00	8,00	W 200 x 41,7 (H)
W 200 x 46,1 (H)	46,1	203	203	7,2	11,0	181	161	58,6	119	4543	447,6	8,81	495,3	1.535	151,2	5,12	229,50	5,58	22,01	9,23	22,36	1,00	141,342	1,19	41,0				86,00	68,80	9,00	W 200 x 46,1 (H)
W 200 x 52,0 (H)	52,0	206	204	7,9	12,6	181	161	66,9	119	5298	514,4	8,90	572,5	1.784	174,9	5,16	265,80	5,61	33,34	8,10	19,85	1,00	166,71	1,19	49,5				104,00	83,20	9,90	W 200 x 52,0 (H)
HP 200 x 53,0 (H)	53,0	204	207	11,3	11,3	181	161	68,1	120	4977	488,0	8,55	551,3	1.671	174	4,96	248,60	5,57	31,93	9,16	14,28	1,00	155,075	1,20	50,5				106,00	84,80	9,40	HP 200 x 53,0 (H)
W 200 x 59,0 (H)	59,0	210	205	9,1	14,2	182	158	76,0	120	6140	584,8	8,99	659,9	2.041	199,1	5,18	303,00	5,64	47,69	7,22	17,32	1,00	195,418	1,20	58,1				122,00	97,60	11,00	W 200 x 59,0 (H)
W 200 x 71,0 (H)	71,0	216	206	10,2	17,4	181	161	91,0	122	7600	709,2	9,17	803,2	2.537	246,3	5,28	374,50	5,70	81,66	5,92	15,80	1,00	249,976	1,22	73,3				154,00	123,20	12,70	W 200 x 71,0 (H)
W 200 x 86,0 (H)	86,0	222	206	13,0	20,6	181	157	110,9	109	9498	855,7	9,26	984,2	3.139	300,4	5,32	458,70	5,77	142,90	5,07	12,06	1,00	317,844	1,23	92,9				195,00	148,80	14,80	W 200 x 86,0 (H)
W 250 x 17,9	17,9	251	101	4,8	5,3	240	220	23,1	88	2291	182,6	9,96	211,0	91	18,1	1,99	28,80	2,48	2,54	9,53	45,92	0,99	13,735	0,88	9,0				19,00	15,20	4,80	W 250 x 17,9
W 250 x 22,3	22,3	254	102	5,8	6,9	240	220	28,9	89	2939	231,4	10,09	267,7	123	24,1	2,06	38,40	2,54	4,77	7,39	37,97	0,96	18,629	0,89	14,8				31,00	24,80	5,50	W 250 x 22,3
W 250 x 25,3	25,3	257	102	6,1	8,4	240	220	32,6	89	3473	270,2	10,31	311,1	149	29,3	2,14	46,40	2,58	7,06	6,07	36,10	0,98	22,955	0,89	19,0				40,00	32,00	6,10	W 250 x 25,3
W 250 x 28,4	28,4	260	102	6,4	10,0	240	220	36,6	90	4046	311,2	10,51	357,3	178	34,8	2,20	54,90	2,62	10,34	5,10	34,38	1,00	27,636	0,90	23,3				49,00	39,20	6,60	W 250 x 28,4
W 250 x 32,7	32,7	258	146	6,1	9,1	240	220	42,1	107	4937	382,7	10,83	428,5	473	64,8	3,35	99,70	3,86	10,44	8,02	36,03	0,98	73,104	1,07	25,7				54,00	43,20	8,40	W 250 x 32,7
W 250 x 38,5	38,5	262	147	6,6	11,2	240	220	49,6	108	6057	462,4	11,05	517,8	594	80,8	3,46	124,10	3,93	17,63	6,56	33,27	1,00	93,242	1,08	33,3				70,00	56,00	9,60	W 250 x 38,5
W 250 x 44,8	44,8	266	148	7,6	13,0	240	220	57,6	109	7158	538,2	11,15	606,3	704	95,1	3,50	146,40	4,36	27,14	5,69	25,90	1,00	112,398	1,09	41,4				87,00	70,80	10,60	W 250 x 44,8
HP 250 x 62,0 (H)	62,0	246	256	10,5	10,7	225	201	79,6	147	8728	709,6	10,47	790,5	2.995	234,0	6,13	357,80	6,89	33,46	11,96	19,10	1,00	117,13	1,47	57,6				121,00	96,80	13,90	HP 250 x 62,0 (H)
W 250 x 73,0 (H)	73,0	253	254	8,6	14,2	225	201	92,7	148	11257	889,9	11,02	983,3	3.880	305,5	6,47	463,10	7,01	56,94	8,94	23,33	1,00	155,29	1,48	71,0				149,00	119,20	16,70	W 250 x 73,0 (H)
W 250 x 80,0 (H)	80,0	256	255	9,4	15,6	225	201	101,9	149	12250	980,5	11,10	1.088,7	4.313	338,3	6,51	513,10	7,04	75,02	8,17	21,36	1,00	162,878	1,49	80,0				168,00	134,40	18,00	W 250 x 80,0 (H)
HP 250 x 85,0 (H)	85,0	254	260	14,4	14,4	225	201	108,5	150	12256	966,9	10,64	1.093,2	4.225	325,0	6,24	499,60	7,00	82,07	9,03	13,97	1,00	160,503	1,50	86,7				182,00	145,60	17,40	HP 250 x 85,0 (H)
W 250 x 89,0 (H)	89,0	260	257	10,7	17,3	225	201	113,9	150	14237	1.095,1	11,18	1.224,4	4.841	378,2	6,52	574,30	7,06	102,81	7,40	18,82	1,00	172,351	1,50	91,9				193,00	154,40	19,60	W 250 x 89,0 (H)
W 250 x 101,0 (H)	101,0	264	256	11,9	19,6	225	201	128,7	151	16352	1.238,8	11,27	1.395,0	5.549	431,8	6,57	656,30	7,10	147,70	6,56	16,87	1,00	182,031	1,51	106,7				224,00	179,20	21,60	W 250 x 101,0 (H)
W 250 x 115,0 (H)	115,0	269	259	13,5	22,1	225	201	146,1	153	18020	1.406,7	11,38	1.597,4	6.245	494,6	6,62	752,70	7,16	212,00	5,86	14,87	1,00	197,5205	1,53	123,8				260,00	208,00	24,00	W 250 x 115,0 (H)
W 310 x 21,0	21,0	303	101	5,1	5,7	292	272	27,2	98	3776	249,2	11,77	291,9	98	19,5	1,90	31,40	2,42	3,27	8,86	53,25	0,84	21,628	0,98	10,5				22,00	17,60	6,60	W 310 x 21,0
W 310 x 23,8	23,8	305	101	5,6	6,7	292																										

W 460 x 60,0	60,0	455	153	8,0	13,3	428	404	76,2	149	25652	1.127,6	18,35	1.292,1	796	104,1	3,23	163,40	3,89	34,60	5,75	50,55	0,88	387,23	1,49	47,6	100,00	80,00	24,40	W 460 x 60,0
W 460 x 68,0	68,0	459	154	9,1	15,4	428	404	87,6	150	29851	1.300,7	18,46	1.495,4	941	122,2	3,28	192,40	3,93	52,29	5,00	44,42	0,92	461,163	1,50	60,0	126,00	100,80	26,50	W 460 x 68,0
W 460 x 74,0	74,0	457	190	9,0	14,5	428	404	94,9	164	33415	1.462,4	18,77	1.657,4	1.661	174,8	4,18	271,30	4,93	52,97	6,55	44,89	0,92	811,417	1,64	65,2	137,00	109,60	29,70	W 460 x 74,0
W 460 x 82,0	82,0	460	191	9,9	16,0	428	404	104,7	164	37157	1.615,5	18,84	1.836,4	1.862	195,0	4,22	303,30	4,96	70,62	5,97	40,81	0,95	915,745	1,64	76,2	160,00	128,00	31,50	W 460 x 82,0
W 460 x 89,0	89,0	463	192	10,5	17,7	428	404	114,1	165	41105	1.775,6	18,98	2.019,4	2.093	218,0	4,28	339,00	5,01	92,49	5,42	38,44	0,96	1035073	1,65	86,2	181,00	144,80	33,60	W 460 x 89,0
W 460 x 97,0	97,0	466	193	11,4	19,0	428	404	123,4	166	44658	1.916,7	19,03	2.187,4	2.283	236,6	4,30	368,80	5,03	115,05	5,08	35,44	1,00	1137180	1,66	99,0	208,00	166,40	34,40	W 460 x 97,0
W 460 x 106,0	106,0	469	194	12,6	20,6	428	404	135,1	167	48978	2.088,6	19,04	2.394,6	2.515	259,3	4,32	405,70	5,05	148,19	4,71	32,05	1,00	1260063	1,67	110,5	232,00	185,60	36,90	W 460 x 106,0
W 530 x 66,0	66,0	525	165	8,9	11,4	502	478	83,6	167	34971	1.332,2	20,46	1.558,0	857	103,9	3,20	166,00	4,02	31,52	7,24	53,73	0,84	562,854	1,67	49,5	104,00	83,20	29,70	W 530 x 66,0
W 530 x 72,0	72,0	524	207	9,0	10,9	502	478	91,6	184	39969	1.525,5	20,89	1.755,9	1.615	156,0	4,20	244,60	5,16	33,41	9,50	53,13	0,86	1060548	1,84	55,2	116,00	92,80	33,70	W 530 x 72,0
W 530 x 74,0	74,0	529	166	9,7	13,6	502	478	95,1	168	40969	1.548,9	20,76	1.804,9	1.041	125,5	3,31	200,10	4,10	47,39	6,10	49,26	0,87	688,558	1,68	61,4	129,00	103,20	32,80	W 530 x 74,0
W 530 x 82,0	82,0	528	209	9,5	13,3	501	477	104,5	185	47569	1.801,8	21,34	2.058,5	2.028	194,1	4,41	302,70	5,31	51,23	7,86	50,25	0,88	1340255	1,85	68,1	143,00	114,40	38,00	W 530 x 82,0
W 530 x 85,0	85,0	535	166	10,3	16,5	502	478	107,7	169	48453	1.811,3	21,21	2.099,8	1.263	152,2	3,42	241,60	4,17	72,93	5,03	46,41	0,90	845,483	1,69	74,3	156,00	124,80	36,80	W 530 x 85,0
W 530 x 92,0	92,0	533	209	10,2	15,6	502	478	117,6	186	55157	2.069,7	21,65	2.359,8	2.379	227,6	4,50	354,70	5,36	75,50	6,70	46,84	0,90	1588565	1,86	81,4	171,00	136,80	41,90	W 530 x 92,0
W 530 x 101,0	101,0	537	210	10,9	17,4	502	470	130,0	186	62198	2.316,5	21,87	2.640,4	2.693	256,5	4,55	400,60	5,40	106,04	6,03	43,14	0,93	1812734	1,86	95,2	200,00	160,00	45,00	W 530 x 101,0
W 530 x 109,0	109,0	539	211	11,6	18,8	501	469	139,7	187	67226	2.494,5	21,94	2.847,0	2.952	279,8	4,60	437,40	5,44	131,38	5,61	40,47	0,95	1991291	1,87	106,2	223,00	178,40	47,00	W 530 x 109,0
W 610 x 101,0	101,0	603	228	10,5	14,9	573	541	130,3	207	77003	2.554,0	24,31	2.922,7	2.951	258,8	4,76	405,00	5,76	81,68	7,65	51,54	0,87	2544966	2,07	87,1	183,00	146,40	52,90	W 610 x 101,0
W 610 x 113,0	113,0	608	228	11,2	17,3	573	541	145,3	208	88196	2.901,2	24,64	3.312,9	3.426	300,5	4,86	469,70	5,82	116,50	6,59	48,34	0,90	2981078	2,08	102,9	216,00	172,80	57,80	W 610 x 113,0
W 610 x 125,0	125,0	612	229	11,9	19,6	573	541	160,1	209	99184	3.241,3	24,89	3.697,3	3.933	343,5	4,96	536,30	5,89	159,50	5,84	45,45	0,91	3441768	2,09	118,6	249,00	199,20	62,40	W 610 x 125,0
W 610 x 140,0	140,0	617	230	13,1	22,2	573	541	179,3	210	112819	3.650,5	25,06	4.173,1	4.515	392,6	5,02	614,00	5,94	225,01	5,18	41,27	0,94	3981687	2,10	140,0	294,00	235,20	67,20	W 610 x 140,0
W 610 x 155,0	155,0	611	324	12,7	19,0	573	541	198,1	247	129583	4.241,7	25,58	4.749,1	10.783	665,6	7,38	1.022,60	8,53	200,77	8,53	42,60	0,94	9436714	2,47	152,4	320,00	256,00	79,10	W 610 x 155,0
W 610 x 174,0	174,0	616	325	14,0	21,6	573	541	222,8	248	147754	4.797,2	25,75	5.383,3	12.374	761,5	7,45	1.171,10	8,58	286,88	7,52	38,63	0,96	10915665	2,48	180,0	378,00	302,40	85,70	W 610 x 174,0

ANEXO B – TABELA DE BANCO DE DADOS PARA AS FÔRMAS STEEL DECK

Modelo	Altura da Laje	Consumo de concreto	Espessura da forma	Área de aço da forma	Vãos Máximos sem Escoramento				Peso Próprio	Peso Forma	Inércia Laje Mista	Carga Sobreposta Máxima																Altura Concreto	Altura Deck							
					mm	mm	mm	mm				kN/m²	kg/m²	10-6mm/4m	kN/m² - vãos mm																					
															Simples	Duplo	Triplo	Balanço	1.800	1.900	2.000	2.100	2.200	2.300	2.400	2.500	2.600			2.650	2.700	2.800	2.900	3.000	3.100	3.200
MF 50	100	0,07500	0,80	997,00	2.050	2.800	2.900	900	1,85	8,39	5,25	9,31	8,14	7,14	6,28	5,54	4,89	4,32	3,82	3,38	3,18	2,99	2,63	2,32	2,03	1,78	1,54	50,00	50							
MF 50	100	0,07500	0,95	1193,00	2.550	3.150	3.250	1.100	1,86	9,97	5,61	11,68	10,24	9,01	7,96	7,04	6,25	5,55	4,94	4,40	4,15	3,92	3,49	3,10	2,75	2,44	2,16	50,00	50							
MF 50	100	0,07500	1,25	1587,00	3.200	3.800	3.800	1.450	1,89	13,11	6,26	16,43	14,45	12,76	11,31	10,06	8,97	8,02	7,18	6,44	6,10	5,78	5,19	4,67	4,20	3,77	3,38	50,00	50							
MF 50	110	0,08500	0,80	997,00	1.800	2.700	2.800	900	2,08	8,39	6,89	10,56	9,23	8,10	7,13	6,29	5,55	4,91	4,34	3,84	3,61	3,39	3,00	2,64	2,32	2,02	1,76	60,00	50							
MF 50	110	0,08500	0,95	1193,00	2.400	3.050	3.150	1.050	2,10	9,97	7,35	13,25	11,62	10,23	9,03	8,00	7,10	6,31	5,61	5,00	4,72	4,45	3,96	3,53	3,13	2,78	2,46	60,00	50							
MF 50	110	0,08500	1,25	1587,00	3.050	3.650	3.650	1.400	2,13	13,11	8,19	18,64	16,39	14,48	12,84	11,42	10,18	9,10	8,15	7,31	6,93	6,57	5,90	5,31	4,77	4,29	3,85	60,00	50							
MF 50	120	0,09500	0,80	997,00	1.650	2.600	2.700	850	2,32	8,39	8,85	11,81	10,33	9,06	7,98	7,03	6,21	5,50	4,86	4,30	4,05	3,80	3,36	2,96	2,60	2,27	1,98	70,00	50							
MF 50	120	0,09500	0,95	1193,00	2.250	2.900	3.000	1.050	2,33	9,97	9,43	14,82	13,00	11,44	10,10	8,95	7,94	7,06	6,28	5,60	5,28	4,99	4,44	3,95	3,51	3,12	2,76	70,00	50							
MF 50	120	0,09500	1,25	1587,00	2.950	3.550	3.550	1.350	2,36	13,11	10,49	20,00	18,34	16,20	14,36	12,78	11,40	10,19	9,13	8,19	7,76	7,36	6,61	5,95	5,35	4,81	4,32	70,00	50							
MF 50	130	0,10500	0,80	997,00	1.490	2.500	2.600	850	2,55	8,39	11,16	13,06	11,42	10,02	8,82	7,78	6,88	6,08	5,38	4,76	4,48	4,21	3,72	3,28	2,88	2,52	2,19	80,00	50							
MF 50	130	0,10500	0,95	1193,00	2.050	2.800	2.900	1.000	2,57	9,97	11,87	16,39	14,37	12,65	11,18	9,90	8,79	7,81	6,96	6,20	5,85	5,52	4,92	4,38	3,89	3,46	3,06	80,00	50							
MF 50	130	0,10500	1,25	1587,00	2.800	3.400	3.400	1.350	2,60	13,11	13,19	20,00	20,00	17,91	15,89	14,13	12,61	11,28	10,10	9,06	8,59	8,14	7,32	6,59	5,92	5,33	4,79	80,00	50							
MF 50	140	0,11500	0,80	997,00	1.350	2.450	2.500	800	2,79	8,39	13,85	14,31	12,52	10,99	9,67	8,53	7,54	6,67	5,90	5,23	4,91	4,62	4,08	3,60	3,16	2,77	2,41	90,00	50							
MF 50	140	0,11500	0,95	1193,00	1.850	2.750	2.800	1.000	2,80	9,97	14,72	17,96	15,75	13,87	12,25	10,85	9,63	8,57	7,63	6,80	6,42	6,06	5,40	4,81	4,27	3,79	3,36	90,00	50							
MF 50	140	0,11500	1,25	1587,00	2.700	3.300	3.300	1.300	2,83	13,11	16,32	20,00	20,00	19,63	17,41	15,49	13,82	12,36	11,08	9,94	9,42	8,93	8,03	7,23	6,50	5,85	5,26	90,00	50							
MF 50	150	0,12500	0,80	997,00	1.250	2.300	2.450	800	3,02	8,39	16,93	15,57	13,61	11,95	10,52	9,28	8,20	7,26	6,42	5,69	5,35	5,03	4,44	3,92	3,44	3,02	2,63	100,00	50							
MF 50	150	0,12500	0,95	1193,00	1.700	2.650	2.750	950	3,04	9,97	17,98	19,53	17,13	15,08	13,33	11,80	10,48	9,32	8,30	7,40	6,98	6,59	5,88	5,23	4,65	4,13	3,66	100,00	50							
MF 50	150	0,12500	1,25	1587,00	2.600	3.200	3.250	1.250	3,07	13,11	19,90	20,00	20,00	20,00	18,94	16,85	15,04	13,45	12,05	10,82	10,25	9,72	8,74	7,86	7,08	6,37	5,72	100,00	50							
MF 50	160	0,13500	0,80	997,00	1.150	2.200	2.300	800	3,26	8,39	20,45	16,82	14,71	12,91	11,37	10,03	8,87	7,84	6,95	6,15	5,78	5,44	4,81	4,24	3,73	3,26	2,84	110,00	50							
MF 50	160	0,13500	0,95	1193,00	1.600	2.550	2.650	950	3,27	9,97	21,69	20,00	18,51	16,30	14,40	12,76	11,33	10,07	8,97	8,00	7,55	7,13	6,35	5,66	5,04	4,47	3,96	110,00	50							
MF 50	160	0,13500	1,25	1587,00	2.550	3.100	3.150	1.250	3,30	13,11	23,97	20,00	20,00	20,00	20,00	18,21	16,25	14,53	13,03	11,69	11,08	10,51	9,45	8,50	7,65	6,89	6,19	110,00	50							
MF 50	170	0,14500	0,80	997,00	1.050	2.050	2.150	750	3,49	8,39	24,43	18,07	15,81	13,88	12,22	10,78	9,53	8,43	7,47	6,61	6,22	5,85	5,17	4,56	4,01	3,51	3,06	120,00	50							
MF 50	170	0,14500	0,95	1193,00	1.500	2.500	2.600	900	3,51	9,97	25,87	20,00	19,89	17,51	15,47	13,71	12,17	10,83	9,64	8,60	8,12	7,66	6,83	6,09	5,42	4,81	4,26	120,00	50							
MF 50	170	0,14500	1,25	1587,00	2.450	3.050	3.050	1.200	3,54	13,11	28,55	20,00	20,00	20,00	20,00	19,57	17,46	15,62	14,00	12,57	11,91	11,29	10,16	9,14	8,23	7,41	6,66	120,00	50							
MF 75	130	0,09250	0,80	1112,00	2.350	3.200	3.300	1.150	2,27	8,39	10,66	11,87	10,56	9,42	8,43	7,56	6,79	6,11	5,51	4,96	4,47	4,03	3,45	2,94	2,37	1,77	1,29	55,00	75							
MF 75	130	0,09250	0,95	1332,00	3.000	3.650	3.750	1.350	2,28	9,97	11,34	14,19	12,69	11,38	10,25	9,25	8,36	7,58	6,88	6,25	5,69	5,18	4,51	3,92	3,26	2,56	2,00	55,00	75							
MF 75	130	0,09250	1,25	1771,00	3.650	4.300	4.400	1.650	2,32	13,11	12,74	18,83	16,94	15,31	13,88	12,62	11,50	10,51	9,63	8,84	8,13	7,48	6,63	5,88	5,03	4,15	3,42	55,00	75							
MF 75	140	0,10250	0,80	1112,00	2.200	3.100	3.200	1.150	2,50	8,39	13,17	13,16	11,71	10,45	9,35	8,39	7,54	6,78	6,11	5,51	4,97	4,48	3,83	3,27	2,63	1,98	1,44	65,00	75							
MF 75	140	0,10250	0,95	1332,00	2.850	3.500	3.600	1.350	2,52	9,97	13,99	15,74	14,07	12,63	11,37	10,26	9,28	8,41	7,64	6,94	6,32	5,76	5,01	4,36	3,62	2,85	2,23	65,00	75							
MF 75	140	0,10250	1,25	1771,00	3.500	4.150	4.250	1.600	2,55	13,11	15,68	20,00	18,79	16,98	15,39	14,00	12,76	11,67	10,69	9,81	9,02	8,31	7,36	6,53	5,59	4,61	3,81	65,00	75							
MF 75	150	0,11250	0,80	1112,00	2.000	3.000	3.100	1.100	2,74	8,39	16,06	14,46	12,86	11,48	10,28	9,22	8,28	7,45	6,72	6,06	5,46	4,93	4,22	3,60	2,90	2,18	1,59	75,00	75							
MF 75	150	0,11250	0,95	1332,00	2.650	3.400	3.500	1.300	2,75	9,97	17,04	17,28	15,45	13,87	12,49	11,27	10,20	9,24	8,39	7,63	6,95	6,33	5,51	4,80	3,98	3,14	2,45	75,00	75							
MF 75	150	0,11250	1,25	1771,00	3.400	4.000	4.100	1.550	2,79	13,11	19,05	20,00	20,00	18,65	16,91	15,38	14,02	12,82	11,75	10,78	9,91	9,13	8,09	7,18	6,15	5,07	4,19	75,00	75							
MF 75	160	0,12250	0,80	1112,00	1.850	2.900	3.000	1.100	2,97	8,39	19,35	15,75	14,02	12,51	11,20	10,04	9,03	8,12	7,32	6,60	5,95	5,37	4,60	3,93	3,17	2,38	1,73	85,00	75							
MF 75	160	0,12250	0,95	1332,00	2.500	3.300	3.400	1.250	2,99	9,97	20,51	18,83	16,84	15,11	13,61	12,28	11,11	10,07	9,15	8,32	7,57	6,90	6,01	5,23	4,35	3,43	2,68	85,00	75							
MF 75	160	0,12250	1,25	1771,00	3.250	3.900	4.000	1.500	3,02	13,11	22,90	20,00	20,00	20,00	18,42	16,76	15,28	13,97	12,80	11,75	10,81	9,95	8,82	7,83	6,71	5,54	4,58	85,00	75							
MF 75	170	0,13250	0,80	1112,00	1.700	2.800	2.900	1.050	3,21	8,39	23,07	17,04	15,17	13,54	12,12	10,87	9,77	8,80	7,93	7,15	6,45	5,82	4,98	4,26	3,43	2,58	1,88	95,00	75							
MF 75	170	0,																																		

MF	180	0,14250	0,80	1112,00	1.550	2.750	2.850	1.050	3,44	8,39	27,25	18,34	16,32	14,57	13,04	11,70	10,52	9,47	8,53	7,69	6,94	6,26	5,37	4,59	3,70	2,78	2,03	105,00	75
MF	180	0,14250	0,95	1332,00	2.200	3.100	3.200	1.200	3,46	9,97	28,84	20,00	19,61	17,60	15,84	14,30	12,94	11,74	10,66	9,69	8,83	8,04	7,00	6,10	5,07	4,01	3,14	105,00	75
MF	180	0,14250	1,25	1771,00	3.050	3.700	3.800	1.450	3,50	13,11	32,10	20,00	20,00	20,00	20,00	19,51	17,80	16,28	14,92	13,70	12,60	11,60	10,28	9,14	7,83	6,47	5,35	105,00	75
MF	190	0,15250	0,80	1112,00	1.450	2.650	2.750	1.000	3,68	8,39	31,92	19,63	17,47	15,60	13,96	12,53	11,26	10,14	9,14	8,24	7,44	6,71	5,75	4,91	3,96	2,98	2,18	115,00	75
MF	190	0,15250	0,95	1332,00	2.100	3.050	3.150	1.200	3,70	9,97	33,75	20,00	20,00	18,84	16,96	15,32	13,86	12,57	11,41	10,38	9,45	8,62	7,50	6,54	5,44	4,30	3,36	115,00	75
MF	190	0,15250	1,25	1771,00	3.000	3.600	3.700	1.400	3,73	13,11	37,52	20,00	20,00	20,00	20,00	19,06	17,43	15,97	14,67	13,49	12,43	11,02	9,79	8,39	6,93	5,73	115,00	75	
MF	200	0,16250	0,80	1112,00	1.400	2.600	2.650	1.000	3,91	8,39	37,10	20,00	18,62	16,63	14,88	13,35	12,00	10,81	9,74	8,79	7,93	7,16	6,13	5,24	4,23	3,19	2,33	125,00	75
MF	200	0,16250	0,95	1332,00	1.950	2.950	3.050	1.150	3,93	9,97	39,19	20,00	20,00	20,00	18,08	16,33	14,78	13,40	12,17	11,07	10,08	9,19	8,00	6,97	5,80	4,59	3,59	125,00	75
MF	200	0,16250	1,25	1771,00	2.900	3.500	3.650	1.400	3,97	13,11	43,51	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	18,58	17,03	15,64	14,38	13,25	11,75	10,44	8,94	7,39	6,12	125,00	75

ANEXO C – TABELA DE BANCO DE DADOS PARA OS PINOS STUD BOLT

PINOS STUD BOLT CISER			
Referencia	Bitola	Comprimento	Peso
TDS 3/4x80	0,01905	0,08000	0,730666667
TDS 3/4x105	0,01905	0,10500	0,933666667
TDS 3/4x110	0,01905	0,11000	0,987166667
TDS 3/4x120	0,01905	0,12000	1,052266667
TDS 3/4x135	0,01905	0,13500	1,158266667
TMB 7/8x132	0,022225	0,13200	1,525933333
TMB 7/8x157	0,022225	0,15700	1,780266667
TMB AC 7/8x182	0,022225	0,18200	2,042666667
TMB AC 7/8x208	0,022225	0,20800	2,8902