

Universidade de Passo Fundo
Faculdade de Engenharia e Arquitetura
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e
Ambiental

Andréia Fátima Tormen

OTIMIZAÇÃO DE VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO
COM PERFIS “I” SOLDADOS

Passo Fundo

2019

Andréia Fátima Tormen

OTIMIZAÇÃO DE VIGAS MISTAS
AÇO-CONCRETO COM PERFIS “I” SOLDADOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, sob orientação do Prof. Dr. Moacir Kripka.

Passo Fundo

2019

Andréia Fátima Tormen

OTIMIZAÇÃO DE VIGAS MISTAS
AÇO-CONCRETO COM PERFIS “I” SOLDADOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, sob orientação do Prof. Dr. Moacir Kripka.

Data da aprovação: 26/02/2019

Membros componentes da Banca Examinadora:

Doutor Moacir Kripka

Orientador

Doutor Afonso Celso de Castro Lemonge

Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF

Doutor Zacarias Martin Chamberlain Pravia

Universidade de Passo Fundo – UPF

Doutor Fernando Busato Ramires

Universidade de Passo Fundo – UPF

Passo Fundo

2019

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus por sempre guiar meu caminho e me oportunizar a vencer mais esse desafio, me possibilitando condições físicas e intelectuais para a conclusão deste trabalho.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais, Aderci e Marcelino, por todo apoio, ensinamentos e amor incondicional, vocês são meus exemplos de vida.

Agradeço ao meu noivo Eduardo, pelo auxílio e compreensão nos momentos difíceis e nos momentos de pressão. Obrigado pelas nossas conversas e planos traçados em conjunto, regados por carinho, consideração e aprendizado mútuo, pela ajuda e suporte constantes e por ter sido meu principal alicerce durante todo o período de estudos.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado fornecida, bem como, à Universidade de Passo Fundo, por todo o suporte.

Agradeço ao meu orientador, Dr. Moacir Kripka, por sua paciência, presteza e confiança, que foi de significativa importância para a conclusão desta dissertação, além de toda ajuda prestada em meu início de carreira docente.

Agradeço aos professores da área de estruturas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade de Passo Fundo, agora também amigos, professor Dr. Zacarias Martin Chamberlain Pravia e professor Dr. Fernando Busato Ramires, pelos auxílios prestados na orientação deste trabalho, bem como pelos valiosos conhecimentos repassados durante o período de mestrado.

Agradeço aos demais professores, colegas de mestrado e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade de Passo Fundo pela convivência, amizade e profissionalismo.

Por fim, agradeço a todos os meus amigos e pessoas próximas, que de alguma forma contribuíram e torceram para que eu vencesse mais essa etapa em minha vida, meu sincero agradecimento.

RESUMO

No dimensionamento otimizado de estruturas, a busca principal é redução de custos ao mesmo tempo que sejam atendidos os requisitos e especificações de segurança das normas pré-estabelecidas. Os métodos de otimização de estruturas se inserem nesse contexto a fim de agilizar e permitir a obtenção de soluções possíveis e satisfatórias, as quais podem proporcionar estruturas mais econômicas. Contudo, além do ganho econômico, o uso dessas técnicas em um projeto estrutural permite considerar os fatores referentes aos impactos ambientais gerados nesse processo, bem como nos processos posteriores ao projeto e a concepção estrutural. Nesse sentido, este trabalho propôs um modelo matemático para a otimização de vigas mistas aço-concreto visando a minimização do custo monetário e do impacto ambiental, utilizando o método de otimização Busca Harmônica, o qual consiste numa meta-heurística desenvolvida em analogia ao processo de obtenção da melhor harmonia musical. O modelo foi baseado em melhoramentos na estrutura do método de otimização Busca Harmônica (Harmony Search), propostos por Medeiros e Kripka (2017). Foram consideradas como variáveis discretas, as dimensões dos perfis de aço e a espessura da laje colaborante do conjunto viga mista aço-concreto. As análises seguiram as recomendações das normativas brasileiras para estruturas de aço e mistas aço-concreto (ABNT NBR 8800/2008) e para perfis I de aço soldados (ABNT NBR 5884/2013). O modelo proposto foi implementado na linguagem de programação Fortran. Para comprovação da eficácia e aplicabilidade do modelo proposto, bem como do método de Busca Harmônica, foram realizadas uma série de análises com diferentes configurações de vigas mistas aço-concreto, a fim de fornecer diretrizes que tornem o uso desses sistemas mais racionalizado. De maneira geral, o método de otimização Busca Harmônica mostrou-se eficiente na busca pelas soluções otimizadas, assim como importantes considerações sobre a otimização dos custos monetários e ambientais de vigas mistas aço-concreto foram obtidas a partir dos exemplos desenvolvidos.

Palavras-chave: Otimização, Vigas Mistas Aço-Concreto, Busca Harmônica.

ABSTRACT

Optimized design of structures requires reduction of cost and also the fulfillment of technical specifications of security. Structural optimization methods has been inserted in this context in order to make faster and allow the obtainment of possible and satisfactory solutions, which can provide more economical structures. However, besides the economic gain, the use of these optimization techniques in a structural project allows to consider the factors related to the environmental impacts from process, as well as in the post-project and structural design processes. In this sense, this work proposed a mathematical model for the optimization of steel-concrete composite beams in order to minimize the monetary cost with materials and environmental impact, using the Harmony Search optimization method, which is a metaheuristic method based in analogy to the process of obtaining the best musical harmony. The model has been based on improvements in the structure of the Harmony Search optimization method, proposed by Medeiros and Kripka (2017). The discrete variables were the dimensions of the steel sections and the thickness of the cooperating slab of the steel-concrete composite beam. The analyzes followed the recommendations of Brazilian standards for steel composite structures (ABNT NBR 8800/2008) and for welded steel I profiles (ABNT NBR 5884/2013). The proposed model has been implemented in the Fortran programming language. In order to prove the effectiveness and applicability of the proposed model, as well as the Harmony Search method, a series of analyzes has been carried out with different configurations of steel-concrete composite beam, aiming to provide guidelines that make the use of these systems more rationalized. In general, the Harmony Search optimization method was efficient in the search for optimized solutions, as well as important considerations on the optimization of the monetary costs with materials and environmental costs of steel-concrete composite beams were obtained from the examples developed.

Keywords: Optimization, Composite Beams, Harmony Search.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Otimização e Improvisação.	25
Figura 2: Fluxograma básico do método da Busca Harmônica.	28
Figura 3: Comportamento mecânico das vigas à flexão: (a) Sem conectores de cisalhamento e (b) Com conectores de cisalhamento.	30
Figura 4: Tipos de conector: (a) Pino com cabeça (<i>stud bolt</i>) e (b) Perfil U laminado ou formado a frio.	30
Figura 5: Largura efetiva b da laje de concreto.	32
Figura 6: Determinação da largura efetiva de uma viga de extremidade e de uma viga interna, b_{ext} e b_{int} , respectivamente.	33
Figura 7: Flambagens locais de vigas com perfis I fletidos: (a) Flambagem local a mesa comprimida (FLM) e (b) Flambagem local da alma (FLA).	39
Figura 8: Tensões de cisalhamento.	42
Figura 9: Distribuição de Tensões em Vigas Mistas sob Momento Positivo e Interação Completa.	50
Figura 10: Distribuição de Tensões em Vigas Mistas sob Momento Positivo e Interação Parcial.	52
Figura 11: Posições da LNE: (a) LNE no perfil de aço e (b) LNE na laje de concreto.	55
Figura 12: Flecha das vigas mistas não escoradas.	58
Figura 13: Variáveis de projeto referentes à geometria dos elementos.	65
Figura 14: Dimensões propostas para a seção de referência.	71
Figura 15: (a) Seção de referência e seção otimizada considerando (b) variáveis contínuas e (c) variáveis discretas.	74
Figura 16: Solução otimizada monetária (a) e solução otimizada ambiental (b).	83
Figura 17: Comparativo entre o consumo de aço para vigas mistas aço-concreto e vigas de aço.	84
Figura 18: Comparativo entre o custo das vigas mistas aço-concreto e das vigas de aço.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Custos unitários dos materiais utilizados no estudo.	73
Tabela 2: Comparativo entre variáveis discretas e variáveis contínuas considerando vão de 17,5 metros.	74
Tabela 3: Dimensões e custos das seções transversais otimizadas.	76
Tabela 4: Comparativo da esbeltez e relação ótima dos elementos mistos.....	77
Tabela 5: Verificação do ELS relacionado ao deslocamento limite.	78
Tabela 6: Comparativo entre o consumo de aço (kg/m linear) em função do vão para os diferentes graus de interação.	79
Tabela 7: Comparativo de custos (R\$/m) em função do vão para os diferentes graus de interação.	80
Tabela 8: Relação número de conectores <i>versus</i> custo.	81
Tabela 9: Custos unitários dos materiais utilizados no estudo.	82
Tabela 10: Custos totais das soluções otimizadas.	82
Tabela 11: Percentuais de redução no consumo de aço e no custo por metro linear das vigas mistas <i>versus</i> vigas de aço.....	86
Tabela 12: Resultados obtidos para o momento fletor resistente das seções de aço e mista. ...	87

LISTA DE SÍMBOLO

Letras romanas maiúsculas:

A_{cs} = área da seção transversal do fuste do conector

A_a (A_g) = área do perfil de aço

A_w = área efetiva de cisalhamento (área da parte da seção transversal responsável por suportar a força cortante)

C_{ad} = força resistente de cálculo da região comprimida do perfil de aço

C_{cd} = força resistente de cálculo da região comprimida da laje de concreto

C_b = fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme

C_w = constante de empenamento da seção transversal

E_a = módulo de elasticidade do aço

E_c = módulo de elasticidade do concreto

F_{hd} = esforço horizontal de cálculo

FLA= flambagem local da alma

FLM= flambagem local da mesa comprimida

FLT= flambagem lateral com torção

I_a = momento de inércia do perfil de aço em relação ao eixo x-x

I_{ef} = momento de inércia efetivo da seção homogeneizada

I_t = momento de inércia a torção

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

I_x = momento de inércia da seção transversal dos perfis em relação ao eixo X-X

I_y = momento de inércia da seção transversal dos perfis em relação ao eixo Y-Y

J = constante de torção da seção transversal

L_b = distância entre duas seções contidas à flambagem lateral com torção (comprimento destravado)

L_e = vão da viga

LN = linha neutra

LNE = linha neutra elástica

LNP = linha neutra plástica ou linha neutra da seção plastificada

$M_{ac,Sd}$ = momento fletor solicitante antes da cura do concreto

M_{cr} = momento crítico

$M_{dc,Sd}$ = momento fletor solicitante após a cura do concreto

M_{pl} = momento de plastificação da seção transversal

M_r = momento fletor correspondente ao início de escoamento, incluindo ou não o efeito de tensão residual

M_{Rd} = momento fletor resistente de cálculo

$M_{Rd,aço}$ = momento fletor resistente de cálculo antes da cura

$M_{Rd,mista}$ = momento fletor resistente de cálculo após a cura

M_{Sd} = momento fletor solicitante de cálculo

Q_{Rd} = força resistente de cálculo de um conector

R_g = coeficiente para consideração do efeito de atuação de grupos de conectores

R_p = coeficiente para consideração da posição do conector

T_{ad} = força resistente de cálculo da região tracionada do perfil de aço

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

V_{Rd} = força cortante resistente de cálculo

V_{Sd} = força cortante solicitante de cálculo

$W_{a,i} (W_{x,t})$ = módulo de resistência elástico inferior do perfil de aço que está a tração

$W_{a,s} (W_{x,c})$ = módulo de resistência elástico superior do perfil de aço que está a compressão

$W_{tr,i}$ = módulo resistente elástico em relação a face inferior da seção mista homogeneizada

$W_{tr,s}$ = módulo resistente elástico em relação a face superior da seção mista homogeneizada

W_x = módulo de resistência elástico em relação ao eixo x

W_y = módulo de resistência elástico em relação ao eixo y

Z_x = módulo de resistência plástico em relação ao eixo x

Z_y = módulo de resistência plástico em relação ao eixo y

Letras romanas minúsculas:

a = espessura comprimida da laje de concreto

b = b_{ef} = largura efetiva da laje de concreto

b_{ext} = largura efetiva de uma viga de extremidade ou externa

b_{int} = largura efetiva de uma viga interna

b_{fi} = largura da mesa inferior

b_{fs} = largura da mesa superior

b_{tr} = largura transformada da área de concreto é convertida em área de aço equivalente

d = altura de seção

d_1 = distância da extremidade da mesa superior até o centro de gravidade da seção transversal

d_2 = distância da mesa inferior até o centro de gravidade da seção transversal

d_3 = distância da extremidade da mesa superior à linha neutra da seção plastificada

d_{cs} = diâmetro do conector

e_1 = distância entre a linha de centro da viga analisada e linha de centro da viga adjacente

e_2 = distância da linha de centro da viga à borda de uma laje em balanço

f_{ck} = resistência característica do concreto

f_{cd} = resistência de cálculo do concreto

f_{ucs} = resistência à ruptura do aço do conector

f_y = limite de escoamento do aço, valor nominal especificado

f_{yd} = resistência de cálculo do aço

h_c = duas vezes a distância do centro geométrico da seção transversal à face interna da mesa comprimida

h_f = espessura da pré-laje pré-moldada de concreto ou a altura das nervuras da laje com fôrma de aço incorporada

h_p = duas vezes a distância da linha neutra plástica da seção transversal à face interna da mesa comprimida

h_t = altura total da laje, incluindo a fôrma e o concreto

h_w = distância entre as faces internas das mesas dos perfis "I"

k_c = coeficiente de flambagem da placa (mesa)

k_v = coeficiente de flambagem da alma por cisalhamento

n = número de conectores

q_{ac} = carga atuante antes da cura

q_{dc} = carga atuante depois da cura

q_k = carga com seu valor característico

r_x = raio de giração da seção transversal dos perfis em relação ao eixo X-X

r_y = raio de giração da seção transversal dos perfis em relação ao eixo Y-Y

r_T = raio de giração, em relação ao eixo Y-Y, da seção transversal formada pela mesa comprimida, mais 1/3 da área comprimida da alma

t_c = espessura da laje de concreto

t_{fi} = espessura da mesa inferior

t_{fs} = espessura da mesa superior

t_w = espessura da alma

x_{lim} = flecha limite admissível

x_{total} = flecha limite atuante no elemento

$y_{a,i}$ = centro de gravidade da seção

y_c = distância do centro geométrico da parte comprimida do perfil de aço até a sua face superior

y_p = posição da LNP do perfil de aço medida a partir do topo do perfil de aço

y_t = distância do centro geométrico da parte tracionada do perfil de aço até sua face inferior

$y_{tr,i}$ = posição da LNE medida em relação à face inferior do perfil

Letras gregas:

α = fator que determina o grau de interação entre o perfil de aço e a laje de concreto

α_E = relação entre a tensão do concreto e a tensão no aço

$\alpha_{mín}$ = grau de interação mínimo para consideração de viga mista

α_y = coeficiente para flambagem de acordo com o tipo de seção em relação ao eixo y

β_1 = coeficiente para FLT de seções submetidas à flexão

β_2 = coeficiente para FLT de seções submetidas à flexão

β_3 = coeficiente para FLT de seções submetidas à flexão

γ_{a1} = coeficiente de ponderação de resistência do aço para o escoamento

γ_c = coeficiente de ponderação de resistência do concreto

γ_{cs} = coeficiente de ponderação da resistência do conector

γ_g = coeficiente de ponderação das ações permanentes

γ_q = coeficiente de ponderação das ações variáveis

δ_{lim} = deslocamento limite ou flecha

$\delta_{m\acute{a}x}$ = deslocamento ou flecha máxima

$\delta_{p,pa}$ = flecha do perfil de aço isolado causada pelas aoes permanentes que atuam antes da cura do concreto

$\delta_{p,ld}$ = flecha da seção mista causada pelas aoes permanentes que atuam após a cura do concreto

$\delta_{v,cd}$ = flecha causada pelas aoes variáveis de curta duração

$\delta_{v,ld}$ = flecha causada pelas aoes variáveis de longa duração

$\delta_{p,te}$ = eventual flecha provocada por alguma ação no perfil de aço isolado e que, depois da cura de concreto,  eliminada

δ_c = contra-flecha da viga

λ = ndice de esbeltez

λ_p = ndice de esbeltez correspondente  plastificação

λ_r = ndice de esbeltez correspondente ao início do escoamento, com ou sem tensão residual

σ_c = tensão normal de compressão da laje de concreto

σ_r = tensão residual

τ = tensão de cisalhamento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 JUSTIFICATIVA	18
3 OBJETIVOS.....	19
3.1 Objetivo Geral.....	19
3.2 Objetivos Específicos	19
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
4.1 Otimização	20
4.2 Método de Busca Harmônica.....	24
4.3 Vigas mistas aço-concreto	29
4.3.1 Largura efetiva da laje de concreto	31
4.3.2 Dimensionamento à flexão das vigas de aço tipo I soldadas	34
4.3.2.1 Verificação ao estado-limite último relacionado ao momento fletor ...	35
4.3.2.2 Verificação ao estado limite último relacionado à força cortante.....	42
4.3.2.3 Verificação ao estado-limite de serviço relacionado a flecha.....	45
4.3.3 Dimensionamento à flexão das vigas mistas.....	46
4.3.3.1 Verificação ao estado limite último relacionado ao momento fletor ...	46
4.3.3.2 Verificação ao estado-limite último relacionado ao esforço cortante ...	57
4.3.3.3 Verificação ao estado-limite de serviço relacionado a flecha.....	57
4.4 Estudos relacionados a Otimização de Vigas Mistas Aço-Concreto	59
5 FORMULAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO	63
5.1 Considerações Iniciais	63
5.2 Variáveis do problema.....	64
5.3 Função objetivo.....	65
5.4 Restrições do problema	66
6 APLICAÇÕES NUMÉRICAS	70
6.1 Introdução	70
6.2 Otimização de Custos Monetários	70
6.2.1 Caso I.....	73
6.2.2 Caso II.....	76
6.2.3 Caso III	79
6.3 Otimização de Custos Ambientais	81
6.4 Otimização de Custos Viga de Aço <i>versus</i> Viga Mista Aço-Concreto.....	83
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
7.1 Conclusão	89
7.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92
APÊNDICE A - Fluxograma do processo de verificação de vigas mistas aço-concreto.....	101

1 INTRODUÇÃO

O processo tradicional de dimensionamento das estruturas é fundamentado em analisar diversas soluções, bem como a viabilidade de sua execução e assim, escolher a melhor opção de projeto. A melhor opção é a que dispõe de um sistema projetado que desempenhe satisfatoriamente as funções de serviço, seja eficiente, seguro, funcional e, principalmente, apresente uma boa relação custo-benefício, o que traz maior competitividade aos escritórios de cálculo frente à concorrência do mercado, além de promover o aumento da sustentabilidade dos projetos.

Além do enfoque técnico e econômico, as questões ambientais têm sido fortemente defendidas nos últimos anos, visto que é necessário avaliar os impactos ambientais gerados na obtenção e execução dos elementos necessários à construção de uma determinada obra civil.

Fabeane et al. (2017) comentam que os sistemas mistos apresentam vantagens diretas sobre os sistemas convencionais em concreto armado ou protendido, principalmente devido a facilidade do aço poder ser reciclado sem perder suas propriedades o que, conseqüentemente, acarreta em uma grande diminuição no volume de desperdícios na obras que fazem uso de sistemas mistos. Além disso, pode-se destacar também a leveza e a alta resistência dos elementos de aço, ocasionando um consumo menor de materiais e a possibilidade da obtenção de elementos de suporte com dimensões menores, portanto resultando em economia.

Com o objetivo de minimizar o consumo de recursos naturais e econômicos no desenvolvimento de projetos estruturais tem-se utilizado nos últimos tempos técnicas de otimização que, quando aplicadas de maneira correta, resultam em ganhos consideráveis sobre ambos os enfoques. Assim, a otimização estrutural acaba por estar intimamente ligada à sustentabilidade ambiental, a qual pode ser promovida pelo consumo controlado dos materiais e racionalização dos recursos naturais disponíveis, como fora estudado por Payá-Zaforteza et al. (2009), Yepes et al. (2012), Camp e Huq (2013), Camp e Assadollahi (2013), Park et al. (2013), Medeiros e Kripka (2014), Yeo e Potra (2015), Yepes et al. (2015), Fabeane et al. (2017).

Somado ao viés econômico e ambiental, tem-se observado elevada procura por propriedades superiores dos materiais. Nesse segmento, os materiais compósitos, também

chamados de mistos, têm sido largamente utilizados e estão a substituir os materiais tradicionais nas mais diversas finalidades, sobretudo nas indústrias de transportes aeronáutica, automobilística, ferroviária e naval (REDDY, 2004). Esses apresentam vantagens únicas, como rigidez elevada, satisfatória relação resistência/peso, resistência à corrosão, resistência à fadiga, economia na proteção contra o incêndio e maior flexibilidade de ajuste das suas propriedades se comparados aos materiais estruturais convencionais (PELLETIER e VEL, 2006).

Um dos sistemas estruturais mais utilizados atualmente na construção de edificações, o qual apresenta grande potencial para tais ganhos, é o sistema misto aço-concreto. Esse alia as principais características de ambos os materiais, como a resistência à tração do aço com a resistência à compressão do concreto. Além de outros fatores positivos como a boa estabilidade em função da elevada massa de concreto e um menor custo econômico, decorrente do acelerado processo de industrialização, o qual está diretamente relacionado a fabricação padronizada dos elementos; da agilidade na montagem, em especial para as formas metálicas, visto que não há necessidade da cura total do concreto para execução, bem como, das vantagens no cronograma de montagem (FABEANE et al., 2017).

Contudo, devido aos sistemas mistos serem constituídos por diferentes materiais, esses apresentam um maior número de variáveis, o que torna mais difícil a determinação de valores ótimos das mesmas para obtenção do melhor desempenho da estrutura. Com isso, Reis et al. (2011) afirmam que as técnicas de otimização proporcionam uma manipulação e ajuste mais refinado das demandas de projeto para tais variáveis e parâmetros do dimensionamento estrutural.

A escolha da melhor opção de projeto tem dependido fortemente da intuição, experiência e habilidade do engenheiro. No entanto, levando em conta as variáveis e incertezas relacionadas ao dimensionamento estrutural, seja quanto a grande variabilidade nos carregamentos, a capacidade resistente e a rigidez da estrutura, dificilmente a melhor solução de projeto é encontrada sem que seja feito um estudo detalhado da influência das variáveis no aprimoramento e refino do projeto (DOLTSINIS e KANG, 2004).

Para Payá-Zaforteza et al. (2009), eliminar as variabilidades de projeto é uma tarefa difícil, porém, essas podem ser reduzidas por meio de modelos numéricos e ferramentas computacionais. Tais modelos permitem considerar a variabilidade dos parâmetros estruturais

e a sua importância no desempenho de todo o sistema, objetivando uma avaliação mais confiável e realista da capacidade última da estrutura.

O sucesso do projeto estrutural depende da validade e da adequação dos modelos utilizados no dimensionamento e na análise do comportamento dos elementos, bem como, na sensibilidade dos parâmetros considerados. Nesse sentido, as técnicas de otimização de estruturas aliadas à programação computacional permitem, de uma maneira sistemática, por meio de um processo iterativo, buscar a melhor solução possível para algum problema, ou pelo menos um valor muito próximo a essa, num amplo espaço de soluções (CARBONELL; YEPES; GONZÁLEZ-VIDOSA, 2011).

Tais técnicas se baseiam numa função objetivo, por meio da qual se pretende encontrar a solução ótima ou muito boa, que pode ser referente ao custo, ao peso, a área da seção transversal ou a qualquer outro parâmetro desejado, tendo como base critérios e restrições de projeto definidos num modelo matemático. Tais critérios e métodos de busca visam sempre atender aos requisitos normativos para um projeto estrutural seguro, funcional e mais racional possível, com menos consumo de materiais e recursos, conseqüentemente menor custo monetário.

As meta-heurísticas têm sido amplamente aplicadas para resolver vários tipos de problemas de otimização, uma vez que permitem encontrar soluções satisfatórias em quantidades razoáveis de tempo e têm superado várias deficiências dos métodos matemáticos convencionais (TOLLO e ROLI, 2008). Essas são algoritmos aproximados que combinam regras e aleatoriedades que imitam os fenômenos naturais, tais como enxames de partículas, comportamento animal, processo evolutivo biológico, bem como, sistemas biológicos, físicos e/ou químicos.

Molina-Moreno et al. (2017) comentam que os algoritmos meta-heurísticos são métodos de solução que coordenam procedimentos de busca locais com estratégias de mais alto nível, de modo a criar um processo capaz de escapar de mínimos locais e realizar uma busca robusta no espaço de soluções de um problema. Vários algoritmos de pesquisa heurística pertencem à essa categoria, incluindo o método de Busca Harmônica (*Harmony Search*), o qual foi desenvolvido em analogia ao processo de obtenção da melhor harmonia musical (GEEM et al, 2001).

2 JUSTIFICATIVA

A busca pela melhor combinação de materiais e posicionamento dos elementos estruturais de forma que o projeto se adapte às condições da edificação, visando o menor custo praticável, é uma atividade que requer experiência e capacidade do projetista em propor boas soluções (PAYÁ-ZAFORTEZA et al., 2010). Tais projetos, além de cumprirem com quesitos de segurança, funcionalidade e durabilidade, ainda devem resultar no menor custo ambiental possível.

A limitação de tempo, restrições e grande número de variáveis de projeto, fazem com que as alternativas escolhidas muitas vezes não aproveitem da melhor forma o capital disponível, acarretando um maior consumo de recursos físicos, econômicos e naturais e consequentemente um maior dano ambiental. A fim de manter uma linha de projeto com a qual se obtenha ganhos de tempo e controle de recursos naturais e financeiros, as técnicas de otimização auxiliam nesse processo, uma vez que servem como ferramenta de auxílio na busca de soluções de projeto mais racionais e econômicas, descartando o processo de tentativa e erro, reduzindo o tempo gasto na elaboração do projeto. Tais técnicas fazem uso de formulações matemáticas para avaliação das variáveis e restrições incluídas no projeto, de forma a se conseguir um projeto otimizado.

No campo da otimização de vigas mistas aço-concreto, em diversos estudos, foram propostas diferentes técnicas de otimização para minimização ou maximização de funções objetivos. Esse trabalho visa encontrar soluções que satisfaçam às restrições estabelecidas, bem como, otimize uma função, a qual visa a minimização de custos monetários e de impactos ambientais gerados pela utilização de vigas mistas aço-concreto.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho foi por meio da técnica heurística de otimização Busca Harmônica, minimizar os custos monetário e ambiental de vigas mistas aço-concreto para edifícios.

3.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos teve-se:

- a) Propor uma formulação matemática para a minimização do custo monetário e do impacto ambiental de vigas mistas aço-concreto, considerando como variáveis de projeto as dimensões dos perfis de aço e da laje de concreto;
- b) Implementar computacionalmente a formulação matemática proposta através do método heurístico de otimização Busca Harmônica;
- c) Comprovar a aplicabilidade do método da Busca Harmônica na otimização de vigas mistas aço-concreto, bem como da formulação matemática proposta, de forma a comparar o custo final das vigas mistas otimizadas com projetos elaborados por técnicas convencionais ou otimizados por outros métodos;
- d) Confrontar os resultados obtidos por meio da otimização dos custos monetários com os custos ambientais, a fim de fornecer subsídios para a redução dos impactos ambientais decorrentes do uso de estruturas tipo vigas mistas aço-concreto em edificações.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Otimização

Vanderplaats (1984) define otimização como a busca da melhor solução para uma operação, enquanto certas restrições são satisfeitas. Na engenharia, a otimização é uma ferramenta de projeto que permite obter soluções que maximizem ou minimizem um objetivo, que pode ser a diminuição de custos de fabricação ou custos de operação, o melhoramento da performance dos componentes e sistemas criados, ou mesmo um melhor aproveitamento ou racionalização dos recursos disponíveis. De uma forma geral, o problema de otimização pode ser definido como um processo de determinação do mínimo ou do máximo de alguma função, denominada função objetivo, a partir da qual se busca uma solução ótima, por onde inicialmente se determinam as variáveis de projeto e parâmetros constantes que definem o problema físico, de forma a satisfazer as restrições a que estão sujeitas essas variáveis. O conjunto, espaço ou região que engloba as soluções possíveis ou viáveis do problema a ser otimizado, delimitado pelas restrições impostas, é denominado espaço de busca. A função objetivo de um dado problema de otimização é uma função das variáveis de projeto, as quais são sintetizadas para chegar num valor para o objetivo do processo. Essa é resultado da modelagem do problema, a qual se pretende minimizar ou maximizar, consistindo em um critério para julgar se uma configuração de projeto é melhor que a outra. A função objetivo pode ser classificada como multidimensional, quando se pretende otimizar mais de uma variável, ou unidimensional, quando está relacionada à uma única variável.

As variáveis são definidas como os parâmetros que definem o sistema, se alterando durante o processo de otimização. Essas podem estar relacionadas com materiais, topologia, configuração, seção transversal, armação, etc. e são classificadas em função dos valores que podem assumir, podendo ser contínuas (podem assumir qualquer valor dentro de um intervalo especificado), discretas (valores possíveis de serem assumidos são previamente especificados e incluem variáveis reais, inteiras e binárias) e discretas vinculadas (são tais que um determinado valor assumido especifica um conjunto de propriedades). A adequação de um projeto requer também a satisfação de um conjunto de requisitos especificados, os quais são

chamados de restrições de projeto. São funções de igualdade, desigualdade ou ambas (mistas) que descrevem e determinam os limites impostos ao sistema analisado, devendo estar contidos os valores das soluções num espaço limitado pelas restrições. Podem ser restrições laterais, que limitam os valores das variáveis de projeto e restrições de comportamento, as quais definem as condições limites desejáveis, como por exemplo, quanto a tensões ou deslocamentos máximos aceitáveis. Dentre todos os conjuntos de soluções possíveis, a solução que possui o melhor valor para a função objetivo em estudo é definida como solução ótima. Essa pode ser local quando o valor ótimo (valor da função-objetivo no ponto ótimo, sendo esse definido como ponto pertencente ao espaço de busca ou extremos da função-objetivo) é localizado, global quando o valor ótimo é global na região viável, restringida quando atende a todas as restrições impostas e não restringida quando deixa de atender a pelo menos uma das restrições.

Um problema de otimização pode, de forma geral, ser assim descrito:

Minimizar ou maximizar:

$$f(x_i), \text{ sendo } i = 1, n \quad (1)$$

Sujeito a:

$$g_j(x_i) \leq 0, \text{ sendo } j = 1, m \quad (2)$$

$$h_k(x_i) = 0, \text{ sendo } k = 1, l \quad (3)$$

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad (4)$$

Em que f designa a função objetivo (Equação 1), a qual se deseja maximizar ou minimizar e $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ o vetor de variáveis, também chamado de incógnita ou parâmetros.

As demais funções são funções de restrição correspondentes à restrições de desigualdade (Equação 2), restrições de igualdade (Equação 3) e restrições laterais (Equação 4), com limites inferiores e superiores do espaço de busca viável, indicados pelos sobrescritos l e u , respectivamente. Essas funções podem ser resolvidas analiticamente ou numericamente,

podendo ser lineares ou não lineares e apresentar as variáveis de projeto de forma explícita ou implícita. Na engenharia de estruturas, a otimização estrutural pode ser entendida como um processo que proporciona uma melhor configuração da estrutura, sendo aplicada a uma ampla gama de problemas na tentativa de encontrar um dimensionamento ótimo em desempenho e forma; melhor layout e posicionamento dos elementos; melhores conjuntos de material, topologia, geometria e/ou dimensões transversais para diferentes sistemas estruturais, redução de custos existentes (peso, transporte, montagem, tempo de construção, custos relacionados à ruína e eficiência da estrutura) (SUJI et al., 2008). A estratégia adotada na busca da solução ótima é o que caracteriza os diferentes métodos de otimização existentes. De acordo com a natureza e/ou com as restrições do problema, os métodos de otimização podem ser classificados em programação linear ou não linear. A programação linear (PL) tem como objetivo encontrar a solução ótima em problemas onde a função-objetivo e todas as restrições são representadas por funções (equações ou inequações) lineares das variáveis de projeto. Enquanto que a programação não linear (PNL) trata dos problemas onde a função-objetivo ou alguma(s) das restrições do problema são funções não lineares das variáveis envolvidas.

Saramago e Steffen (2008) trazem a questão de que à medida que o número de funções e de variáveis aumentam, a determinação do conjunto de soluções ótimas também é dificultada. Com isso, tem-se a necessidade de técnicas que refinem o processo de otimização, dado que esse é amplamente requerido para resolver problemas de engenharia. Os motivos pelas aplicações limitadas das técnicas de otimização a problemas estruturais reais estão relacionados à complexidade inerente do modelo gerado (LAGAROS et al., 2006), os quais tendem a ter diversos mínimos locais e geralmente são descritos por funções não-lineares e descontínuas, gerando um espaço de soluções de múltiplos pontos de ótimo. Problemas pelos quais a resolução por métodos programação matemática tem-se mostrado pouco eficiente.

Os métodos de programação matemática ou também chamados métodos clássicos possuem algumas limitações, como a dificuldade de trabalhar com variáveis discretas e funções não diferenciáveis e de identificar soluções globais ótimas, uma vez que tais métodos são dependentes do ponto de partida ou estimativa inicial. Tais métodos apresentam funcionamento determinístico (métodos determinísticos), isto é, seguem sempre o mesmo processo para obtenção da solução ótima e fornecem o mesmo resultado para um dado parâmetro de entrada. O que é um ponto negativo, visto que, o método empregado pode não

encontrar o valor ótimo global, ficando restringido a uma solução local, ou seja, a melhor solução encontrada dentro de uma certa vizinhança. Em geral, são baseados no cálculo de soluções ótimas seguindo técnicas iterativas de programação matemática, a partir de derivadas de primeira ordem ou parcial de segunda ordem (HERNANDEZ e FONTAN, 2002).

Em função das restrições desses métodos, tem crescido de forma considerável a implementação dos métodos de otimização não determinísticos, conhecidos como métodos meta-heurísticos. Esses são fundamentados em algoritmos estocásticos ou probabilísticos, os quais se baseiam na probabilidade de eventos e refinamento dos possíveis conjuntos de solução e avaliam diretamente a função objetivo, não dependendo de derivadas, dessa forma também denominados de métodos de ordem zero.

Em função do caráter probabilístico, os algoritmos heurísticos possuem aleatoriedade em sua formulação, tal qual faz com que os resultados apresentem variações a cada execução do mesmo. Contudo, essas variações contribuem para dar condições ao algoritmo de explorar o domínio, escapando de mínimos locais e encontrando o ótimo global ou uma boa solução próximo a ele. Os mesmos não garantem a obtenção da melhor solução, mas fornecem boas aproximações destas. Consistem em algoritmos simples, contudo que demandam um grande número de avaliações do valor da função objetivo e das restrições, uma vez que as iterações são regidas por decisões aleatórias, exigindo considerável esforço computacional (MARTÍNEZ et al., 2010; KRIPKA et al., 2015).

Em problemas combinatórios, inúmeras soluções são geradas, sendo a enumeração de todas essas soluções crescente em função do número de objetivos do problema, além de ser uma prática extremamente trabalhosa e desnecessária. Nesses casos, os métodos meta-heurísticos são de fácil implementação e garantem maior flexibilidade, seu uso combinado aos conceitos de otimização são excelentes alternativas para obtenção de boas soluções, uma vez que não há a necessidade de enumerar todas as possíveis soluções.

O prefixo “meta” tem a importância de descrever que uma heurística que está subordinada a outra, forma um outro “nível heurístico”. Isto é, a meta-heurística consiste em uma estrutura mais genérica baseada em princípios ou conceitos que é sobreposta a uma heurística específica, a qual é definida e modelada especificamente para cada problema.

Da mesma forma que no processo dos métodos heurísticos convencionais, as meta-heurísticas visam encontrar uma boa ou ótima solução, abrangendo somente uma parte do

espaço de soluções, com a diferença de que essas são genéricas e mais abrangentes, permitindo com que as soluções encontradas apresentem melhor qualidade, além de serem capazes de fugir de um ótimo local.

Os métodos heurísticos, cujo desenvolvimento está ligado à evolução dos procedimentos de inteligência artificial, fundamentam seu processo de busca através de analogias com fenômenos naturais, culturais, sociais, biológicos ou leis da física que especificam os processos de pesquisa (VOß, 2001). Tais métodos têm sido bem sucedidos em áreas diferentes da engenharia estrutural (YEPES e MEDINA, 2006; GEEM e SIM, 2010) e incluem um grande número de algoritmos tais como métodos do recozimento simulado (*Simulated Annealing*), algoritmos genéticos, algoritmos de formiga e abelha, busca harmônica e otimização de enxames de partículas (JONES, 2003). Apesar dos diversos métodos existentes, os algoritmos genéticos e de recozimento simulado ainda são os mais populares e, portanto, têm maior aplicabilidade (DEGERTEKIN, 2007; SUJI et al., 2008). Na sequência é apresentado o método de Busca Harmônica, utilizado neste estudo.

4.2 Método de Busca Harmônica

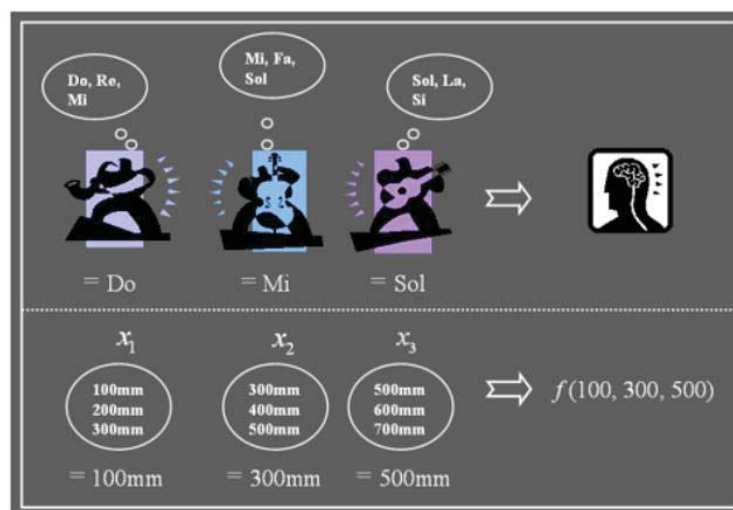
Um método de busca que vem sendo muito empregado nos últimos anos é o algoritmo heurístico de Busca Harmônica, do inglês *Harmony Search* (HS). Este método de otimização foi desenvolvido por Z. W. Geem (GEEM et al., 2001). O algoritmo HS possui a característica de identificar regiões de alto desempenho dentro do espaço de busca em um tempo razoável, sendo aplicado nas mais diversas áreas, em problemas de otimização como em projeto estrutural (LEE e GEEM, 2004; SAKA, 2007), projeto de ancoragem de plataformas marítimas flutuantes (RYU et al., 2007), despacho econômico de carga (VASEBI et al., 2007), projeto de redes de dutos (GEEM, 2006), operação de represas (GEEM, 2007), trocadores de calor, telecomunicações, roteirização de veículos, (GEEM et al., 2002; GEEM, et al., 2005; MANJARRES, et al., 2013; OMRAN e MAHDAVI, 2008; COBOS et al., 2011; PAN et al., 2010; WANG e YAN, 2013; XIANG et al., 2014). A Busca Harmônica é uma heurística de otimização inspirada no processo de improvisação ou desempenho musical onde os músicos procuram atingir um melhor estado de harmonia, ou a harmonia perfeita. Na música, esta

harmonia perfeita é considerada análoga a achar a solução ótima de um problema de otimização e refere-se a um dado padrão de qualidade de áudio.

Em analogia ao processo de improvisação musical e o problema de otimização, assim como durante a improvisação do jazz, na improvisação musical, cada músico toca um som referente ao seu instrumento, gerando um vetor de harmonia. A capacidade de improvisação dos músicos para a obtenção de novas harmonias leva em conta a frequência, o timbre e a amplitude do instrumento de cada um deles. A partir dessa analogia, Geem (2010) exemplificou através de um trio de jazz composto por um saxofonista, um contrabaixista e um violonista, cada instrumento de forma a compor uma variável de decisão do problema. Onde as notas tocadas nos instrumentos representam o intervalo de valores de cada variável; as combinações das notas representam as possíveis soluções e o ato de apreciação dos ouvintes representa a função de avaliação, ou função objetivo do problema (Figura 1).

/

Figura 1: Otimização e Improvisação.



Fonte: Geem (2010).

O algoritmo HS inclui uma quantidade de operadores de otimização (Geem et al., 2001), tais como a memória harmônica (*Harmony Memory -HM*), o tamanho da memória harmônica (*Harmony Memory Size - HMS*), a taxa de consideração de memória harmônica (*Harmony Memory Consideration Rate - HMCR*), a taxa de ajuste dos valores ou do som (*Pitch Adjustment Rate - PAR*), número máximo de improvisações (*Number of Improvisations*

– NI) e a largura de banda (*BandWidth* – BW). Primeiramente, no algoritmo é proposto um conjunto inicial de soluções, que representam as sugestões iniciais dos músicos. Para se obter o valor da função objetivo, a qual é denominada estimação estética, se avalia o conjunto formado pelos sons (valor numéricos) de cada instrumento (variável). Um novo vetor é gerado pela seleção aleatória de componentes de diferentes vetores da memória harmônica, sendo os vetores factíveis, isto é, se encontram no espaço factível, armazenados na memória harmônica (HM). O tamanho da memória harmônica determina o número de vetores que podem ser armazenados. Se todos os sons produzirem uma boa solução, essa experiência é armazenada em cada memória de variável e a possibilidade de produzir uma boa solução é aumentada na próxima iteração. As piores soluções (piores harmonias) vão sendo descartadas ao longo do procedimento, sendo substituídas por outras de melhor qualidade a cada ensaio ou iteração, de acordo com o ranqueamento das soluções. Esse procedimento é repetido até que uma harmonia perfeita é encontrada, ajustando taxa de consideração da memória harmônica e a taxa de ajuste do som e da largura de banda continuamente. Quando um músico toca música ou improvisa um som, esse pode tocar um tom de sua memória, tocar um som próximo a um som de sua memória ou tocar um som ajustando aleatoriamente a taxa de afinação e tocando notas novas (MAHDAVI et al., 2007; OMRAN e MAHDAVI, 2008). Similarmente, quando cada variável de decisão escolhe um valor no algoritmo HS ou na criação de um novo vetor de solução, segue uma das três regras: escolher qualquer valor da memória HS (definido como considerações de memória), escolher um valor próximo a um valor da memória HS (definido como ajustes de som), e/ou escolher um valor completamente aleatório da possível extensão de valores (definido como aleatoriedade).

As cinco etapas básicas no procedimento da Busca Harmônica são descritos na sequência (GEEM et al., 2001; LEE e GEEM, 2005):

Etapa 1 - Inicialização do problema e parâmetros do algoritmo: consiste na definição da função objetivo, do conjunto de restrições e dos parâmetros do algoritmo, sendo os quatro principais parâmetros, o tamanho da memória harmônica, a taxa de consideração ou escolha de um valor da memória, a taxa de ajuste dos valores e número máximo de improvisos ou iterações.

Etapa 2 - Inicialização da memória harmônica: consiste na definição da primeira memória harmônica, ou seja, do conjunto inicial de soluções, o que faz analogia ao conjunto

de notas que os músicos já têm em mente antes da execução da música. Essa memória harmônica (HM) é representada através de uma matriz, sendo que cada linha corresponde a um vetor solução. A matriz (Equação 5) apresenta número de linhas igual ao HMS e número de colunas igual o número de variáveis do problema (N) e pode ser preenchida com geração aleatória de vetores de solução, dentre um determinado intervalo inferior e superior, ou serem inicialmente sugeridas, ordenados pelos valores da função objetivo $f(x)$.

$$HM = \begin{bmatrix} x_1^1 & \cdots & x_N^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^{HMS} & \cdots & x_N^{HMS} \end{bmatrix} \quad (5)$$

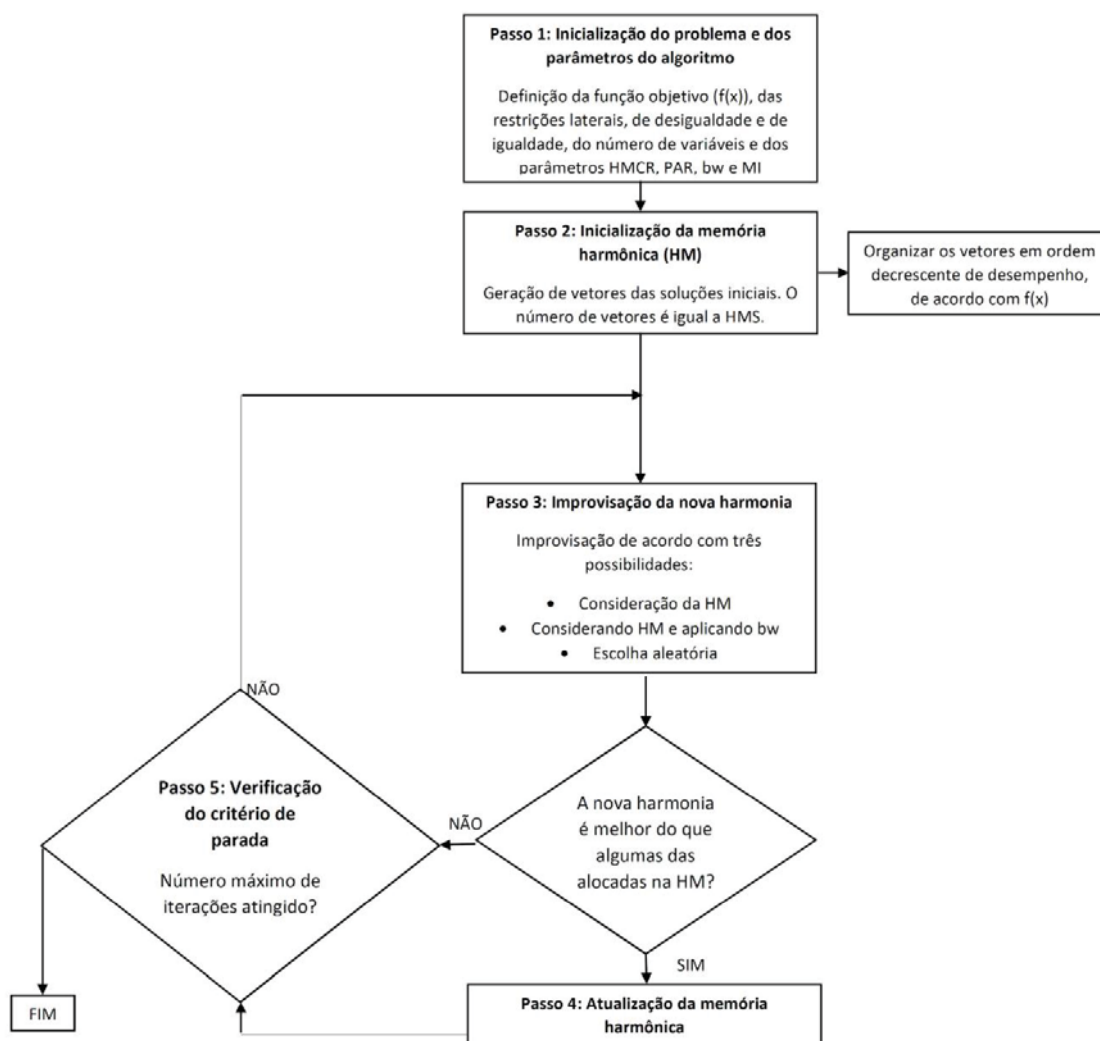
Etapa 3 - Improviso de uma nova harmonia a partir da HM: primeiramente estima-se uma solução inicial, a qual permite a geração de uma nova harmonia. De forma análoga ao processo musical, a criação de uma nova harmonia (vetor solução) é denominada improvisação. Um novo vetor de harmonia $x_l = (x_1^1, x_2^1, x_3^1, \dots, x_N^1)$ é gerado com base em três regras para escolher um valor para cada decisão de variável: consideração de memória, ajuste de passo e seleção aleatória, sendo que nesse processo utiliza-se os parâmetros HMCR e PAR definidos na etapa 1.

Etapa 4 - Atualização da Memória Harmônica: nessa etapa, a cada nova harmonia improvisada, é verificado se a nova harmonia é melhor que a pior harmonia na memória harmônica (HM) em termos do valor da função objetivo. Se confirmada esta condição a nova harmonia está incluída na HM e a pior harmonia existente é excluída da HM, ou seja, é substituída.

Etapa 5 - Verificação do critério de parada: ao final de cada processo de iteração, verifica-se se a melhor harmonia satisfaz o critério de parada, que geralmente é definido pelo número máximo de improvisos (MI). Os cálculos são encerrados quando o término do critério é satisfeito. Caso não seja, o algoritmo repete o terceiro e quarto passos até atingir o critério de parada, e assim sucessivamente.

Na Figura 2 apresenta-se um fluxograma básico do método da Busca Harmônica.

Figura 2: Fluxograma básico do método da Busca Harmônica.



Fonte: Medeiros (2012).

O estudo utiliza alguns melhoramentos na estrutura do método de otimização Busca Harmônica, por meio da inclusão dos parâmetros PAR e b_w variáveis, conforme recomendações de Mahadavi et al. (2007), da reinicialização da memória harmônica, quando todos os valores convergem para uma única solução durante a busca, bem como incluiu um critério de parada adicional, referente ao número máximo de iterações, propostos por Medeiros e Kripka (2017).

4.3 Vigas mistas aço-concreto

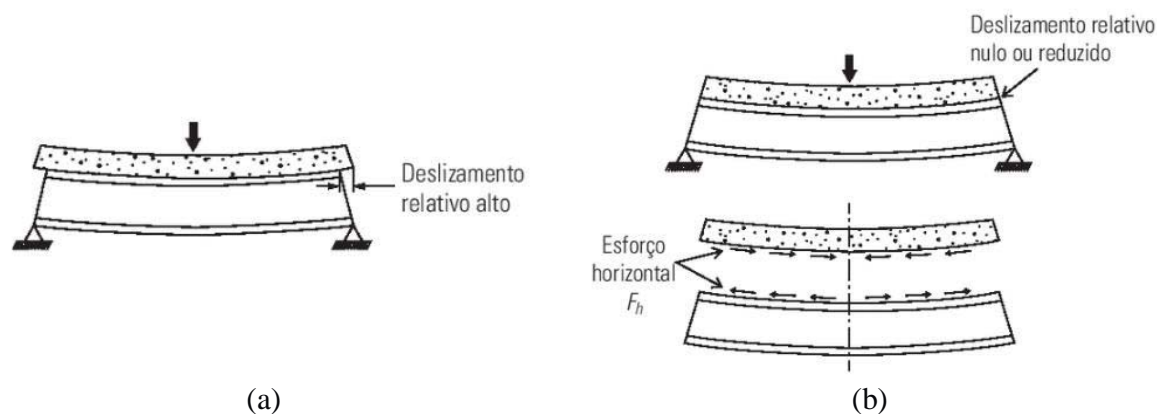
As estruturas mistas ou compostas são uma das formas mais econômicas de construção, as quais tem apresentado uso crescente devido aos aprimoramentos tecnológicos, à economia e rapidez de execução. Os sistemas que combinam aço-concreto foram concebidos nas premissas de que cada sistema construtivo oferece uma vantagem própria que quando utilizada em conjunto resulta em um sistema eficiente (GUPTA e SHARMA, 2015). Nesse caso, tem-se a combinação da resistência à tração do aço e da resistência à compressão do concreto.

As vigas mistas, são sistemas mistos aço-concreto que envolvem o trabalho conjunto de perfis de aço de seção “T”, tubulares, seções caixão ou treliças e laje de concreto, cuja interação pode ser feita por meios mecânicos (conectores, mossas, ressalto), por atrito ou por aderência (MARCONCIN et al., 2010). O comportamento adequado do elemento misto é garantido pela interação entre ambos os materiais.

Caso não exista uma interação na interface aço-concreto, ocorre um deslizamento relativo (Figura 3a) uma vez que a laje de concreto e as vigas de aço trabalham isoladamente à flexão (FAKURY et al., 2016). Nessa condição, cada elemento suporta sua parcela de carga de forma individual. Bem como, a partir da deformação dos mesmos, cada superfície na interface fica sujeita a diferentes tensões, sendo a face superior da viga encurtada devido às forças de compressão e na face inferior, a seção mista é alongada pelas forças de tração.

Com isso, o uso de conectores para resistir ao fluxo de cisalhamento entre o sistema laje-viga, proporcionam na superfície de contato entre os dois materiais, o desenvolvimento de um esforço horizontal F_h , que garante que ambos os elementos funcionem em conjunto para resistir ao cisalhamento devido a flexão. Uma vez que, esses absorvem os esforços cisalhantes e impedem substancialmente o deslizamento relativo entre a viga de aço e a laje de concreto, assim formando um sistema misto eficiente e com expressivo aumento da inércia (Figura 3b). Nessas condições tem-se interação completa aço e concreto e assume-se que as seções planas permanecem planas e há existência de uma única linha neutra.

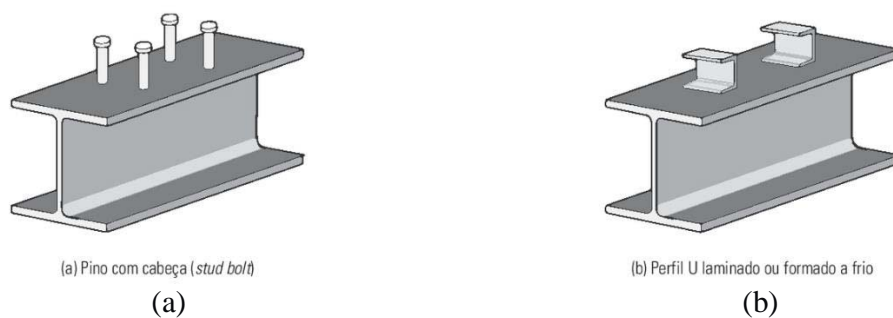
Figura 3: Comportamento mecânico das vigas à flexão: (a) Sem conectores de cisalhamento e (b) Com conectores de cisalhamento.



Fonte: Fakury et al. (2016).

Os conectores de cisalhamento podem ser rígidos ou flexíveis, classificação que está associada com a relação entre a força no conector e o deslizamento relativo entre o aço-concreto. Existem diversos tipos de conectores, contudo, os mais usuais são os do tipo pino com cabeça (*stud bolt*) e perfil U laminados ou formados a frio (Figura 4).

Figura 4: Tipos de conector: (a) Pino com cabeça (*stud bolt*) e (b) Perfil U laminado ou formado a frio.



Fonte: Fakury et al. (2016).

Enquanto que, quando a conexão aço-concreto não tem capacidade de absorver todo fluxo cisalhante, ocorre um escorregamento na interface entre os dois elementos, havendo uma interação parcial dos mesmos. Isto faz com que o diagrama de deformações apresente uma descontinuidade, devido ao afastamento entre as linhas neutras da seção de aço e do concreto.

A combinação entre diferentes tipos de vigas e lajes tem como principal característica a sua aparência devido ao embutimento de parte da viga de aço no concreto, originando duas situações, as vigas totalmente ou parcialmente revestidas. As vigas mistas parcialmente revestidas com concreto (VMCC) apresentam vantagens como elevada capacidade de carga devido a participação do concreto armado, pré-fabricação sem uso de fôrmas e uso das mesmas ligações usualmente utilizadas em estruturas de aço. Enquanto que as vigas mistas de aço e concreto de alma cheia (VMAC) não apresentam vazios na alma. No entanto, consomem mais material sendo uma solução mais pesada, mas que permite aproveitar melhor os espaços disponíveis pela sua solução atrativa, o que a torna de frequente utilização.

Os métodos construtivos para as vigas mistas podem ser classificados em:

- Construção não escorada: enquanto o concreto ainda não alcançou a cura, a viga de aço se encarrega de suportar todo o carregamento da fase de construção, juntamente com o peso próprio dos materiais, concreto fresco, sobrecarga construtiva, equipamentos e operários. Ou seja, a viga de aço simples deve suportar todas as solicitações nessa fase, sem escoramentos, portanto, tendo a necessidade de serem dimensionadas para a condição anterior à cura do concreto da laje.

- Construção escorada: essa situação ocorre durante a execução da obra e leva em conta as ações causadas pela execução e moldagem do concreto. Nesse caso, as vigas são projetadas para resistir aos esforços de projeto após a retirada do escoramento, posterior a cura do concreto da laje, a partir do qual é obtida a resistência esperada, o que permite que toda seção possa funcionar como uma só. Isto é, com o concreto curado, o elemento misto aço-concreto já está consolidado e resistindo às ações permanentes e acidentais.

Nessa opção de projeto, o custo do perfil de aço é reduzido, uma vez que o mesmo é projetado para atuar unicamente como viga mista, com maior capacidade resistente. Com isso, tem-se o custo adicional do escoramento, que pode variar em função do tipo de laje adotada (formas de madeira ou de aço), impactando no prazo de execução.

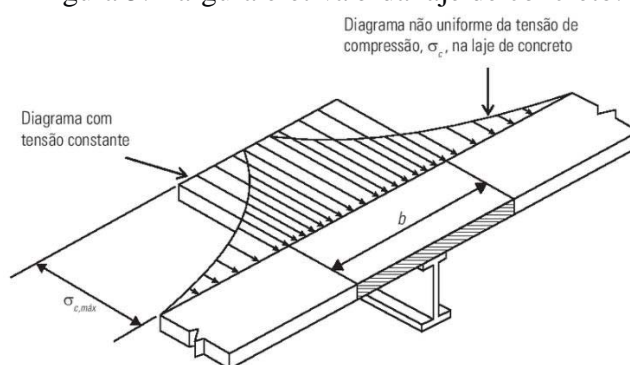
4.3.1 Largura efetiva da laje de concreto

A tensão normal de compressão da laje de concreto é máxima sobre a mesa superior do perfil ($\sigma_{c, \text{máx}}$) e decresce de forma não-linear a medida que se afasta dessa mesa (Figura 5),

quando a laje trabalha em conjunto com o perfil de aço. Para fins práticos e de cálculo, adota-se que esse diagrama de tensão não uniforme é substituído por um diagrama de tensão constante, sendo este igual a $\sigma_{c, \text{máx}}$ em uma largura efetiva da laje b , de forma que a força resultante de compressão dada pelo produto $\sigma_{c, \text{máx}} \cdot b$ seja igual à força resultante decorrente do diagrama de tensões não uniforme (FAKURY et al., 2016).

Denomina-se largura efetiva da laje de concreto (b e b_{ef}), a faixa da laje, a qual trabalha conjuntamente com a viga de aço.

Figura 5: Largura efetiva b da laje de concreto.



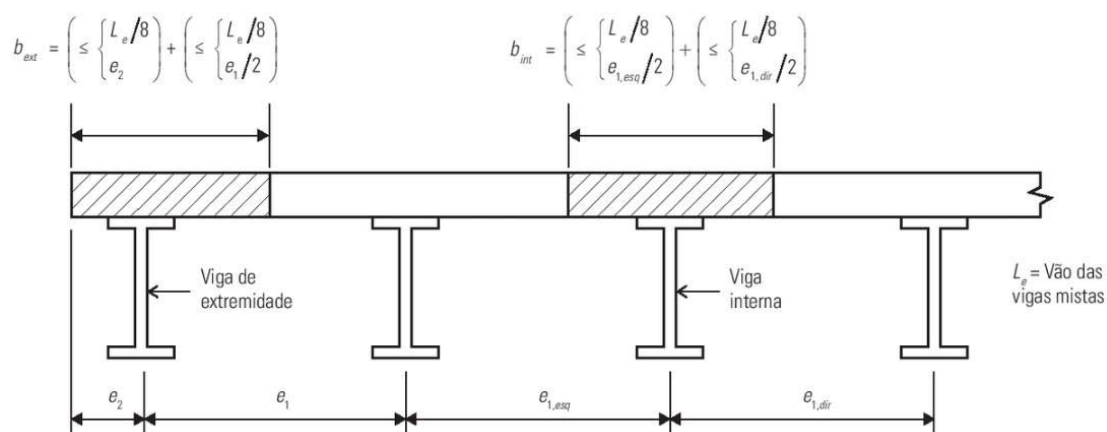
Fonte: Fakury et al. (2016).

A norma ABNT NBR 8800 (2008) apresenta o cálculo da largura efetiva da mesa de concreto, de cada lado do centro da viga, como dividida em duas situações: para vigas mistas biapoiadas e contínuas.

No caso de vigas mistas biapoiadas, a qual foi admitida nesse estudo, para cada lado da linha de centro da viga o valor da largura efetiva deve ser menor ou igual aos seguintes valores (Figura 6):

- 1/8 do vão da viga mista considerado entre a linha de centro dos apoios ($L_e/8$);
- Metade da distância entre a linha de centro da viga analisada e linha de centro da viga adjacente ($e_1/2$);
- Distância da linha de centro da viga à borda de uma laje em balanço (e_2).

Figura 6: Determinação da largura efetiva de uma viga de extremidade e de uma viga interna, b_{ext} e b_{int} , respectivamente.



Fonte: Fakury et al. (2016).

Segundo Fakury et al. (2016), o momento fletor resistente das vigas mistas com laje com fôrma de aço incorporada, de forma simplificada, é determinado considerando apenas o concreto situado acima do topo das nervuras (acima da altura h_F), estando as nervuras paralelas ou perpendiculares ao perfil de aço. Já nas lajes com pré-laje de concreto pré-moldada, de modo similar, apenas se considera o concreto situado acima da face superior da pré-laje, também com altura h_F . Para qualquer tipo de laje, a largura da laje a ser considerada é conhecida como largura efetiva b .

No dimensionamento das vigas mistas, o valor do módulo de elasticidade do aço estrutural, E_a , é igual a 200.000 MPa. Enquanto que a resistência ao escoamento do aço é dada por:

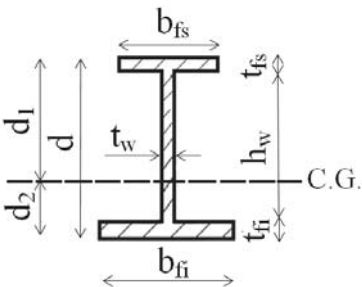
$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{a1}} \quad (6)$$

Em que γ_{a1} é o coeficiente de ponderação de resistência do aço para escoamento, igual a 1,10.

4.3.2 Dimensionamento à flexão das vigas de aço tipo I soldadas

As propriedades geométricas dos perfis tipo I monossimétricos (caso geral) devem ser determinadas conforme orientação do Anexo B da NBR 5884 (ABNT, 2013), como apresentado no Quadro 1.

Quadro 1: Propriedades geométricas para perfis tipo I monossimétricos.


<p>Momento de inércia da seção transversal dos perfis em relação ao eixo X-X</p> $I_x = \frac{(b_{fs}t_{fs}^3) + (b_{fi}t_{fi}^3) + (t_w h_w^3)}{12} + b_{fs}t_{fs} \left(d_1 - \frac{t_{fs}}{2} \right)^2 + b_{fi}t_{fi} \left(d_2 - \frac{t_{fi}}{2} \right)^2 + t_w h \left(\frac{h}{2} + t_{fs} - d_1 \right)^2$
<p>Momento de inércia da seção transversal dos perfis em relação ao eixo Y-Y</p> $I_y = \frac{(t_{fs} + t_{fi})b_f^3 + (ht_w^3)}{12}$
<p>Módulo de resistência elástico superior do perfil de aço que está a compressão</p> $W_{xs} = W_{a,s} = W_{x,c} = \frac{I_x}{d_1}$
<p>Módulo de resistência elástico inferior do perfil de aço que está a tração</p> $W_{xi} = W_{a,i} = W_{x,t} = \frac{I_x}{d_2}$
<p>Raio de giração da seção transversal dos perfis em relação ao eixo X-X</p> $r_x = \left(\frac{I_x}{A} \right)^{\frac{1}{2}}$
<p>Raio de giração da seção transversal dos perfis em relação ao eixo Y-Y</p> $r_y = \left(\frac{I_y}{A} \right)^{\frac{1}{2}}$
<p>Módulo de resistência plástico da seção transversal dos perfis em relação ao eixo X-X</p> $Z_x = b_{fs}t_{fs} \left(d_3 - \frac{t_{fs}}{2} \right) + t_w \frac{(d_3 - t_{fs})^2}{2} + b_{fi}t_{fi} \left(d - d_3 - \frac{t_{fi}}{2} \right) + t_w \frac{(d - d_3 - t_{fi})^2}{2}$
<p>Módulo de resistência plástico da seção transversal dos perfis em relação ao eixo Y-Y</p>

$Z_y = [t_{fs}b_{fs}^2 + t_{fi}b_{fi}^2 + t_w^2h]$
Módulo de resistência elástico da seção transversal dos perfis em relação ao eixo Y-Y $W_y = \frac{2I_y}{b_f}$
Raio de giração, em relação ao eixo Y-Y, da seção transversal formada pela mesa comprimida, mais 1/3 da área comprimida da alma $r_T = \left\{ \frac{(t_{fs}b_{fs}^3) + \frac{(d_1 - t_{fs})}{3}t_w^3}{12 \left[t_{fs}b_{fs} + t_w \frac{(d_1 - t_{fs})}{3} \right]} \right\}^{\frac{1}{2}}$
Momento de inércia à torção da seção transversal dos perfis $I_t = \frac{b_{fs}t_{fs}^3 + \left(d - \frac{t_{fs}}{2} - \frac{t_{fi}}{2}\right)t_w^3 + b_{fi}t_{fi}^3}{3}$
Constante de empenamento $C_w = \frac{\left(d - \frac{t_{fs}}{2} - \frac{t_{fi}}{2}\right)b_f^3t_{fs}t_{fi}}{12(t_{fs} + t_{fi})}$

Para fins de dimensionamento de vigas de aço, devem ser verificados os estados-limites últimos relacionados ao momento fletor e à força cortante. Sob ocorrência do momento fletor, o colapso pode ocorrer por flambagem lateral com torção (FLT) da viga ou por flambagem local da alma (FLA) e da mesa (FLM).

Um fluxograma mostrando as etapas de cálculo necessárias para o dimensionamento estrutural de uma viga mista aço-concreto é apresentado no APÊNDICE A. As etapas de cálculo apresentadas no fluxograma correspondem a verificação quanto ao momento fletor e esforço cortante da viga mista antes da cura do concreto e a verificação quanto ao momento fletor da viga mista após a cura do concreto.

4.3.2.1 Verificação ao estado-limite último relacionado ao momento fletor

O momento fletor resistente de cálculo para os estados-limites últimos flambagem lateral com torção (FLT), flambagem local da mesa comprimida (FLM) e flambagem local da alma (FLA) são obtidos a partir das formulações do item 5.4 da NBR 8800 (ABNT, 2008).

São apresentadas, na sequência, as formulações para vigas de perfis I soldados, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia.

Considerando o estado-limite flambagem lateral com torção da viga de aço, o colapso por plastificação total da seção transversal (formação da rótula plástica), não ocorre se o parâmetro de esbeltez, λ , for bastante reduzido, isto é, se λ for inferior ou igual a λ_p (parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação). Tal condição é expressa por:

$$\lambda \leq \lambda_p$$

Sendo λ igual a:

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} \quad (7)$$

Considerando

$$r_y = \sqrt{\frac{I_{Ty}}{A_T}} \quad (8)$$

$$I_{Ty} = \frac{h_c t_w^3 + t_{fs} b_w s^3}{12} \quad (9)$$

$$A_T = h_c t_w + b_{fs} t_{fs} \quad (10)$$

E λ_p igual a:

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (11)$$

Em que: L_b : distância entre duas seções contidas à flambagem lateral com torção (comprimento destravado);

r_y : raio de giração da seção em relação ao eixo principal de inércia perpendicular ao eixo de flexão.

Nesse caso a viga possui seção compacta e o momento fletor resistente de cálculo, M_{Rd} , é igual a razão do momento de plastificação, M_{pl} , pelo coeficiente de ponderação de resistência do aço para escoamento, γ_{al} , igual a 1,10. Sendo M_{pl} , o momento de plastificação da seção transversal, igual ao produto do módulo de resistência plástico em relação ao eixo x (Z_x) pela resistência ao escoamento do aço (f_y).

A flambagem lateral com torção ocorrerá em regime elastoplástico, isto é, uma parte da seção escoada e outra ainda elástica, se:

$$\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$$

Sendo para perfis duplamente simétricos

$$\lambda_r = \frac{1,38\sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}} \quad (12)$$

Em que:

λ_r : parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento;

I_y : momento de inércia da seção em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma;

J : constante de torção da seção transversal;

C_w : constante do empenamento da seção transversal.

E para perfis monossimétricos igual a:

$$\lambda_r = \frac{1,38\sqrt{I_y J}}{r_{yc} J \beta_1} \sqrt{\beta_2 + \sqrt{\beta_2^2 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}} \quad (13)$$

Em que:

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r) W_c}{EJ} \quad (14)$$

$$\beta_2 = 5,2 \beta_1 \beta_3 + 1 \quad (15)$$

$$\beta_3 = 0,45 \left(d - \frac{t_{fs} + t_{fi}}{2} \right) \left(\frac{\alpha_y - 1}{\alpha_y + 1} \right) \quad (16)$$

$$\alpha_y = \frac{I_{yc}}{I_{yt}} \quad (17)$$

$$C_w = \frac{\left(d - \frac{t_{fs} + t_{fi}}{2} \right)^2}{12} \left(\frac{t_{fi} b_{fi}^3 t_{fs} b_{fs}^3}{t_{fi} b_{fi}^3 + t_{fs} b_{fs}^3} \right) \quad (18)$$

Essa situação resulta em uma seção de aço semcompacta e o valor do momento fletor resistente de cálculo, M_{Rd} , é dado simplificadaamente por uma reta de transição, unindo os pontos (λ_r, M_r) e (λ_p, M_{pl}) , multiplicada pelo fator C_b , ou seja:

$$M_{Rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \quad (19)$$

Em que C_b é um fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme, o qual leva em conta a influência da variação do momento fletor ao longo do comprimento destravado (L_b) e é calculado conforme a NBR 8800 (ABNT, 2008), item 5.4.2.

Por fim, a flambagem se dará em regime elástico, caracterizando uma seção esbelta, se o momento crítico elástico, M_{cr} , for inferior ao momento correspondente ao início do escoamento, M_r , considerando as tensões residuais. Assim, tem-se que para perfis duplamente simétricos:

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w} \right)} \quad (20)$$

$$M_r = W_x (f_y - \sigma_r) \quad (21)$$

Em que σ_r é máxima tensão residual na mesa e W_x , o módulo de resistência elástico do perfil em relação ao eixo x.

E para perfis monossimétricos:

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \left[\beta_3 + \sqrt{\beta_3^2 + \frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w} \right)} \right] \quad (22)$$

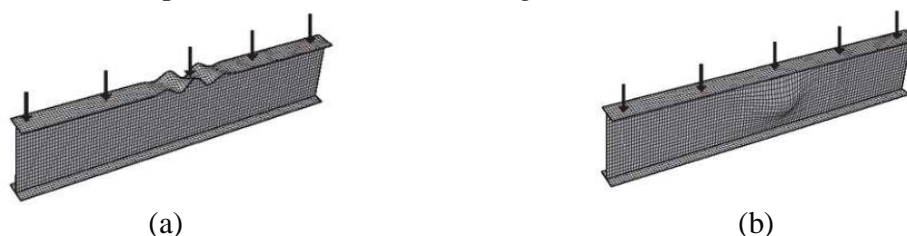
Com o valor do momento fletor resistente de cálculo, M_{Rd} , igual a:

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_r}{\gamma_{a1}} \quad (23)$$

A flambagem local dos elementos componentes do perfil submetidos a tensões de compressão caracteriza um outro estado limite último decorrente da ação do momento fletor.

Em um perfil I, é necessário verificar a possibilidade da flambagem local da mesa comprimida (FLM) e a flambagem local da alma (FLA). A Figura 7 ilustra esses modos de flambagem.

Figura 7: Flambagens locais de vigas com perfis I fletidos: (a) Flambagem local a mesa comprimida (FLM) e (b) Flambagem local da alma (FLA).



Fonte: Fakury et al. (2016).

O momento fletor resistente nominal para estado limite de flambagem local das barras sujeitas à flexão, bem como sujeitas à compressão, também depende fundamentalmente do parâmetro esbeltez, λ , dos elementos constituintes da seção transversal, definidos pela seguinte equação:

$$\lambda = \frac{b}{t} \quad (24)$$

Em que b é a largura e t é a espessura desses elementos.

Para a mesa comprimida de perfis I fletidos em relação ao eixo x, se λ não for superior à λ_p , não ocorre flambagem local da mesa (FLM), sendo λ_p definido pela Equação 25.

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (25)$$

O momento fletor resistente de cálculo é igual ao de plastificação da seção transversal.

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (26)$$

Se λ estiver entre λ_p e λ_r ($\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$), a flambagem pode ocorrer em regime elastoplástico e o momento fletor resistente de cálculo é dado de forma simplificada, por uma reta de transição unindo os pontos (λ_r, M_r) e (λ_p, M_{pl}) , ou seja,

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \quad (27)$$

Sendo o momento fletor correspondente ao início do escoamento, M_r , determinado pela seguinte equação:

$$M_r = W_x(f_y - \sigma_r) \leq f_y W_t \quad (28)$$

E a equação de λ_r para perfis soldados igual a:

$$\lambda_r = 0,95 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)/k_c}} \quad (29)$$

Sendo k_c definido como um coeficiente de flambagem da placa (mesa), o qual para perfis laminados, depende basicamente das condições de contorno estabelecidas (engastamento elástico, rótula ou engaste ideal). Enquanto que para perfis I soldados adota-se uma fórmula empírica para sua consideração, conforme a equação 30.

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{\frac{h}{t_w}}} \quad \text{sendo } 0,350 < k_c < 0,763 \quad (30)$$

E por fim, se λ superar λ_r , pode ocorrer flambagem local em regime elástico. Contudo, esses casos são pouco comuns na prática, mesmo para perfis soldados, a viga é determinada como de alma esbelta e deve ser dimensionada por meio de outro procedimento. Nesses casos, o momento fletor resistente de cálculo é o de flambagem elástica (M_{cr}), dado por:

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \quad (31)$$

Sendo o momento fletor de flambagem elástica para perfis soldados igual a:

$$M_{cr} = \frac{0,90 E k_c}{\lambda^2} W_x \quad (32)$$

O valor do momento fletor resistente de cálculo para flambagem local da alma (FLA) também é obtido em função do parâmetro de esbeltez. Para a alma de um perfil I, também

fletido em relação ao eixo x, o parâmetro de esbeltez, λ , é dado pela relação entre a altura da parte plana (h) e a espessura (t_w) da alma. Se esse parâmetro não for maior que λ_p , sendo λ_p para perfis duplamente simétricos, igual a:

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (33)$$

e λ_p para perfis com apenas um eixo de simetria igual a:

$$\lambda_p = \frac{\frac{h_c}{h_p} \sqrt{\frac{E}{f_y}}}{\left(0,54 \frac{M_{pl}}{M_r} - 0,09\right)^2} \leq \lambda_r \quad (34)$$

Não ocorre flambagem local da alma e o momento fletor resistente de cálculo corresponde ao de plastificação da seção transversal.

Se λ superar λ_p e for igual ou inferior a λ_r , a flambagem poderá ocorrer em regime elastoplástico, e o momento fletor resistente de cálculo pode ser obtido pela equação 27. Contudo, na determinação de M_r , as tensões residuais não são consideradas por terem valores reduzidos na alma. Assim, tem-se:

$$M_r = W_x f_y \quad (35)$$

Ainda, se λ superar λ_r , com:

$$\lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (36)$$

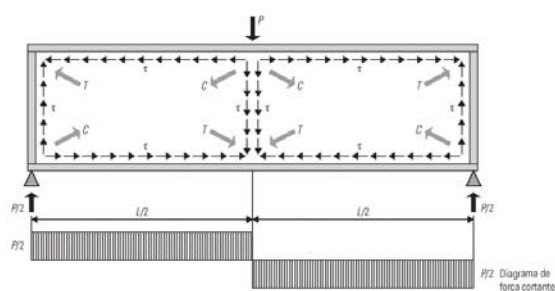
Tem-se flambagem em regime elástico e a seção é esbelta. Assim, o momento fletor resistente de cálculo é o de flambagem elástica (M_{cr}), o qual deve seguir determinações contidas no Anexo H, da NBR 8800 (ABNT, 2008).

O dimensionamento para o momento fletor resistente para estado limite último (ELU) se dá pelo menor valor dentre três considerações: flambagem lateral com torção (FLT), flambagem local da mesa (FLM) e flambagem local da alma (FLA).

4.3.2.2 Verificação ao estado limite último relacionado à força cortante

A alma é o elemento que mais suporta os efeitos da força cortante, onde as tensões de cisalhamento (τ) promovem compressão (C) e tração (T) nas direções principais dos semivãos da viga (FAKURY et al., 2016), como mostra a Figura 8.

Figura 8: Tensões de cisalhamento.



Fonte: Fakury et al. (2016).

Os autores explicam que a compressão em uma das direções principais pode levar a ocorrência da ondulação da alma, nos dois comprimentos $L/2$, determinando assim um estado limite último relacionado à força cortante, conhecido como flambagem por cisalhamento. Na ocorrência desse fenômeno, a alma não exerce as suas funções de forma adequada, o que define uma situação de colapso estrutural.

Para esses casos, uma alternativa é o uso de enrijecedores transversais espaçados regularmente na alma, os quais a tornam mais rígida pela sua subdivisão em painéis de menor comprimento, o que promove o aumento da capacidade resistente da mesma quanto à flambagem por cisalhamento.

Para seções I, H e U, fletidas em relação ao eixo de maior inércia, as equações para a força cortante atuante são apresentadas a seguir. Essas tomaram como base o item 5.4 da NBR 8800 (ABNT, 2008). A partir dos parâmetros de esbeltez λ , λ_p e λ_r , chega-se a equação para determinação da força cortante resistente de cálculo, V_{Rd} , para cada tipo de seção do perfil de aço, como segue.

A determinação do parâmetro de esbeltez da alma, λ , é definida por:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (37)$$

Em que, λ , representa a relação entre a altura desse elemento, h , e a espessura, t_w .

O valor máximo do parâmetro de esbeltez, para que não ocorra flambagem por cisalhamento, λ_p , denominado como parâmetro de esbeltez limite para seções compactas, é definido pela equação 38:

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (38)$$

Sendo k_v um coeficiente de flambagem da alma por cisalhamento, o qual depende da relação entre a distância entre as linhas de centro de dois enrijecedores transversais adjacentes, a , e a altura da alma, h , 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 a mesa e a alma nos perfis laminados, determinado conforme definições abaixo.

$$k_v = \begin{cases} 5,0 & \text{para almas sem enrijecedores transversais, para } \frac{a}{h} > 3 \text{ ou para } \frac{a}{h} > \left[\frac{260}{h/t_w} \right]^2 \\ 5 + \frac{5}{(a/h)^2} & \text{para todos os outros casos} \end{cases} \quad (39)$$

O parâmetro de esbeltez limite para seções semicompactas, λ_r , é definido por:

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (40)$$

Desta forma, se λ for inferior ou igual a λ_p , o colapso ocorre por escoamento por cisalhamento da alma, sob uma força cortante de plastificação igual a V_{pl} . Assim, tem-se que:

$$\lambda \leq \lambda_p \text{ (Seção compacta)}$$

Sendo o valor da força cortante resistente de cálculo expresso por:

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (41)$$

Com γ_{a1} novamente admitido com valor de 1,10.

A força cortante de plastificação da alma é admitida como igual à força que causa o escoamento da área efetiva de cisalhamento, isto é:

$$V_{pl} = 0,60A_w f_y \quad (42)$$

Sendo A_w , a área efetiva de cisalhamento, definida como a área da parte da seção transversal responsável por suportar a força cortante, no caso, a área da alma, mas com altura considerada igual à da seção transversal, que deve ser tomada igual a:

$$A_w = dt_w \quad (43)$$

Em que d é a altura total da seção transversal e t_w a espessura da alma.

Se a seguinte condição for satisfeita, tem-se a ocorrência de flambagem por cisalhamento em regime elastoplástico.

$$\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \text{ (Seção semcompacta)}$$

Sendo a força cortante resistente de cálculo definida por:

$$V_{Rd} = \frac{\lambda_p V_{pl}}{\lambda \gamma_{a1}} \quad (44)$$

Assim, se λ superar λ_r , ocorre flambagem por cisalhamento em regime elástico.

$$\lambda > \lambda_r \text{ (Seção esbelta)}$$

O valor da força cortante resistente de cálculo para seções esbeltas é definido por:

$$V_{Rd} = \frac{1,24 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda}\right)^2 V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (45)$$

Por fim, verifica-se a seguinte condição satisfeita:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd}$$

Sendo V_{Sd} a força cortante solicitante de cálculo, obtida por meio da combinação de ações adequada.

4.3.2.3 Verificação ao estado-limite de serviço relacionado a flecha

A verificação ao estado limite de serviço (ELS) relacionado ao deslocamento limite ou flecha (δ_{lim}) segue a determinação da NBR 8800 (ABNT, 2008), a qual determina no Anexo C, Tabela C.1, que para vigas de piso, este não deve ser superior a $L/350$, considerando que caso haja paredes de alvenaria sobre ou sob uma viga, solidarizadas com essa viga, o deslocamento vertical também não deve exceder a 15 mm. Assim, deve ser atendida a seguinte condição:

$$\delta_{lim} \geq \delta_{m\acute{a}x}$$

Sendo que o deslocamento máximo ($\delta_{m\acute{a}x}$) para vigas biapoiadas é determinado por:

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{5ql^4}{384EI} \quad (46)$$

Em que q é a carga atuante, l é o vão da viga, E , o módulo de elasticidade do material e I , o momento de inércia da seção transversal.

4.3.3 Dimensionamento à flexão das vigas mistas

4.3.3.1 Verificação ao estado limite último relacionado ao momento fletor

Nas vigas mistas, em função da mesa superior do perfil de aço estar continuamente unida à laje pelos conectores de cisalhamento, não ocorre flambagem lateral com torção (FLT). Ainda, mesmo a mesa superior estando comprimida, sua flambagem local (FLM) não caracteriza um estado limite último (ELU), devido ao principal elemento de resistência às tensões de compressão ser a laje de concreto. Sendo assim, em elementos de viga mista, o ELU decorrente do momento fletor está relacionado somente à flambagem local da alma (FLA) do perfil de aço (FAKURY et al., 2016).

Segundo determinações normativas, as vigas mistas de alma cheia biapoiadas devem apresentar relação entre a espessura e a altura da alma (h/t_w) inferior ou igual a $3,76\sqrt{E/f_y}$, para que a flambagem local não ocorra, sendo que o colapso da viga mista ocorre por plastificação total da seção transversal (formação da rótula plástica), onde atua o momento fletor plástico. Em que h é a altura da alma (igual a distância entre 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 é a espessura da alma, e E e f_y são o módulo de elasticidade e a resistência ao escoamento do aço, respectivamente.

De outra forma, se no perfil de aço,

$$3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{h}{t_w} \leq 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (47)$$

As vigas são semicompactas e pode ocorrer flambagem local da alma em regime elastoplástico. Nesse caso, para que a flambagem não ocorra, a viga não pode alcançar o regime elástico, isto é, deve trabalhar dentro do regime elastoplástico. Dessa forma, é considerado como estado-limite último o início do escoamento por tração da face inferior do perfil de aço ou o esmagamento da face superior da laje de concreto por compressão.

Ainda, se h/t_w for maior que $5,70\sqrt{E/f_y}$, as vigas são esbeltas e devem ser dimensionadas fazendo uso das propriedades elásticas da seção (ABNT NBR 8800, 2018).

O momento fletor resistente é também dependente do grau de interação entre o perfil de aço e a laje de concreto, dado pelo fator α , definido por:

$$\alpha = \frac{nQ_{Rd}}{F_{hd}} \quad (48)$$

Em que:

n : é o número de conectores;

Q_{Rd} : é a força resistente de cálculo de um conector;

F_{hd} : é o esforço horizontal de cálculo.

Sendo a determinação do número de conectores dada por:

$$n = \frac{L_e - (2L_{esp.borda})}{L_{esp.CS}} \quad (49)$$

e força resistente de cálculo de um conector é determinada por:

$$Q_{Rd} \leq \begin{cases} \frac{R_g R_p A_{cs} f_{ucs}}{\gamma_{cs}} \\ \frac{1}{2} \frac{A_{cs} \sqrt{f_{ck} E}}{\gamma_{cs}} \end{cases} \quad (50)$$

Em que o primeiro valor refere-se a ruptura do conector por tração, e o segundo, a ruína do concreto por esmagamento ou fendilhamento. Nessa expressão, R_g é um coeficiente de ajuste para a consideração do efeito de atuação de grupos e conectores, R_p é um coeficiente para consideração da posição do conector, A_{cs} é a área da seção transversal do fuste do conector, f_{ucs} é a resistência à ruptura do aço do conector, γ_{cs} é o coeficiente de ponderação da resistência do conector, igual a 1,25 e E_c é o módulo de elasticidade do concreto.

O esforço horizontal de cálculo, considerado entre a seção de momento máximo (onde não existe deslizamento relativo entre o perfil de aço e a laje de concreto) e cada seção adjacente de momento nulo (onde o deslizamento relativo é máximo) é dado por:

$$F_{hd} \leq \begin{cases} 0,85f_{cd}bt_c \\ A_a f_{yd} \end{cases} \quad (51)$$

Em que b é a largura efetiva, t_c a altura da laje de concreto e A_a a área do perfil de aço. A capacidade de transmissão da laje de concreto corresponde à força que causa seu colapso por compressão ($0,85f_{cd}bt_c$) e a do perfil de aço, à força que causa seu escoamento por tração ($A_a f_{yd}$) (FAKURY et al., 2016).

Para que haja interação completa entre a laje-viga, o número de conectores, n , de cada lado da seção de momento fletor solicitante máximo deve ser suficiente para resistir ao esforço horizontal de cálculo, dado pela equação 51. A não resistência a esse esforço proporciona uma interação parcial ou até mesmo inexistente entre o elemento laje-viga. O tipo de interação existente é determinado pelo fator α (Equação 48). Assim, se:

- $\alpha \geq 1,0$, a viga mista possui interação completa, adotando-se $\alpha = 1,0$;
- $\alpha_{\min} \leq \alpha < 1,0$, a viga mista possui interação parcial;
- $\alpha < \alpha_{\min}$, considera-se interação nula e a viga não pode ser dimensionada como viga mista, e sim como viga de aço.

Nas condições apresentadas, α_{\min} representa o grau de interação mínimo para que a viga ainda possa ser considerada como mista. A seguir segue as determinações para sua obtenção.

- Para perfil de aço que possuir mesas de áreas igual e a viga mista apresenta vão, L_e , menor ou igual a 25 m, o α_{\min} é dado por:

$$\alpha_{\min} \geq \begin{cases} 1 - \frac{E}{578f_y} (0,75 - 0,03L_e) \\ 0,40 \end{cases} \quad (52)$$

- Para o perfil de aço que possuir mesas de áreas diferentes, com a área da mesa inferior igual a três vezes a área da mesa superior, e a viga mista tem vão L_e , menor ou igual a 20 m, o α_{\min} é determinado por:

$$\alpha_{\min} \geq \begin{cases} 1 - \frac{E}{578f_y}(0,30 - 0,015L_e) \\ 0,40 \end{cases} \quad (53)$$

- Para o perfil de aço que possuir mesas de áreas diferentes com a razão entre as áreas das mesas inferior e superior entre 1 e 3, e a viga mista tem vão, L_e , menor ou igual a 20 m, deve-se realizar a interpolação linear entre os resultados das equações 52 e 53.
- Nos demais casos, adota-se α_{\min} igual a 1,0.

a) Vigas mistas com $\frac{h}{t_w} \leq 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ e interação total ($\alpha \geq 1,0$)

O momento fletor resistente de cálculo deve ser obtido considerando a seção mista totalmente plastificada. Para interação completa, a máxima força de plastificação de cálculo que pode atuar na laje de concreto, C_{cd} , é de:

$$C_{cd} = 0,85f_{cd}b_{ef}a \quad (54)$$

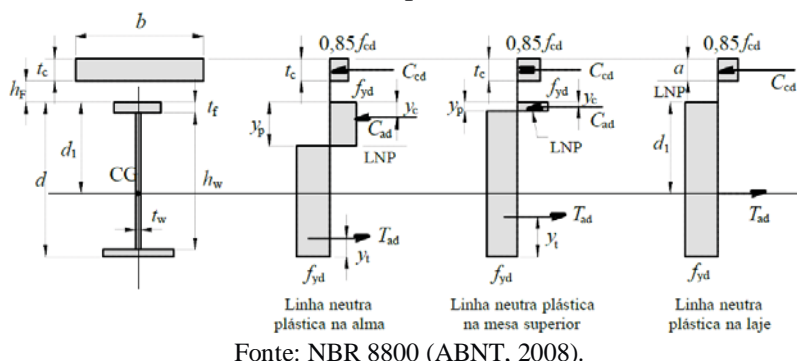
Em que a , é a espessura comprimida da laje de concreto.

E a força resistente de cálculo do perfil de aço totalmente tracionado, T_{ad} , é igual a:

$$T_{ad} = A_a f_{yd} \quad (55)$$

A seguir é apresentada a distribuição de tensões para o caso de vigas mistas nesse limite, considerando interação total (Figura 9).

Figura 9: Distribuição de Tensões em Vigas Mistas sob Momento Positivo e Interação Completa.



Em que se $0,85f_{cd} b_{ef} a$ for igual a $A_a f_{yd}$, tem-se uma situação ideal, uma vez que a linha neutra plástica (LNP) se situa entre o concreto, que trabalha totalmente à compressão e o aço, que trabalha totalmente à tração.

Se $0,85f_{cd} b_{ef} a > A_a f_{yd}$, a LNP passa pela laje de concreto, uma vez que parte da laje não pode trabalhar para que o equilíbrio entre as forças finais de tração e compressão seja estabelecido. Nessa situação, as forças resistentes de cálculo da laje comprimida, C_{cd} , e do aço tracionado T_{ad} , são determinadas pelas equações 54 e 55, respectivamente.

Pelas igualdades resultantes, C_{cd} e T_{ad} , pode-se obter a espessura comprimida da laje:

$$a = \frac{T_{ad}}{0,85f_{cd}b} \quad (56)$$

Assim, o momento fletor resistente de cálculo é admitido como:

$$M_{Rd} = T_{ad} \left(d_1 + h_F + t_c - \frac{a}{2} \right) \quad (57)$$

E por fim, se $0,85f_{cd} b_{ef} a < A_a f_{yd}$, a LNP passa pela alma ou pela mesa do perfil de aço, pelo fato de parte do perfil estar comprimido para haver o equilíbrio das forças finais de tração e compressão.

A força resistente de cálculo da laje de concreto, totalmente comprimida, C_{cd} , é:

$$C_{cd} = 0,85f_{cd} b_{ef} t_c \quad (58)$$

A força resistente de cálculo da região comprimida do perfil de aço é dada por:

$$C_{ad} = \frac{1}{2}(A_a f_{yd} - C_{cd}) \quad (59)$$

Do equilíbrio das forças resultantes, obtém-se a força resistente de cálculo da região tracionada do perfil de aço, igual a:

$$T_{ad} = C_{cd} + C_{ad} \quad (60)$$

Se $C_{ad} \leq A_{fs} f_{yd}$, a LNP passa pela mesa superior do perfil de aço, sendo a sua posição medida a partir do topo do perfil, como segue:

$$y_p = \frac{C_{ad}}{A_{fs} f_{yd}} t_{fs} \quad (61)$$

Em que A_{fs} é a área da mesa superior e t_{fs} é a espessura da mesa superior do perfil de aço.

Se $C_{ad} > A_{fs} f_{yd}$, a LNP passa pela alma do perfil de aço, a sua posição, sempre medida a partir do topo desse perfil, é dada por:

$$y_p = t_{fs} + h_w \left(\frac{C_{ad} - A_{fs} f_{yd}}{(h_w t_w) f_{yd}} \right) \quad (62)$$

Em que h_w é a distância entre faces internas das mesas do perfil de aço, A_{fs} é a área da mesa superior e t_w é a espessura da alma desse perfil.

Por fim, o momento fletor resistente de cálculo é dado por:

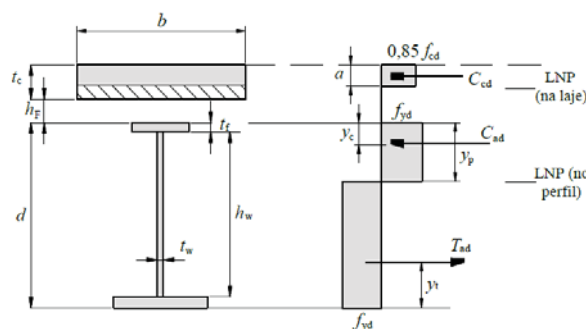
$$M_{Rd} = C_{ad}(d - y_t - y_c) + C_{cd} \left(\frac{t_c}{2} + h_F + d - y_t \right) \quad (63)$$

Sendo d , a altura total do perfil de aço, y_t , a distância do centro geométrico da parte tracionada do perfil de aço até sua face inferior e y_c , a distância do centro geométrico da parte comprimida do perfil de aço até a sua face superior, com h_F igual a zero se a laje for maciça.

b) Vigas mistas com $\frac{h}{t_w} \leq 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ e interação parcial ($\alpha_{\min} \leq \alpha < 1,0$)

Ainda para interação parcial (Figura 10), existem duas linhas neutras plásticas, uma que passa no perfil de aço (mesa superior ou alma) e outra pela laje de concreto. Considerando que é desprezível a contribuição do concreto tracionado, o qual está situado abaixo da LNP na laje, tem-se a resultante das forças internas longitudinais.

Figura 10: Distribuição de Tensões em Vigas Mistas sob Momento Positivo e Interação Parcial.



Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

A força de compressão na espessura comprimida da laje de concreto, a , por equilíbrio, iguala-se a máxima força horizontal transmitida pelos n conectores de cisalhamento utilizados entre a seção do momento máximo e as seções de momento nulo. Assim:

$$C_{cd} = nQ_{Rd} = F_{hd} \quad (64)$$

Do equilíbrio das forças, obtêm-se as forças resistentes de cálculo das regiões comprimida e tracionada do perfil de aço, fornecidas respectivamente pelas equações 59 e 60.

A espessura comprimida da laje pode ser determinada por:

$$a = \frac{C_{cd}}{0,85f_{cd}b} \quad (65)$$

Caso $C_{ad} \leq A_{fs} f_{yd}$, a LNP do perfil de aço passa pela mesa superior, e sua posição, y_p , medida a partir do topo do perfil é obtida pela equação 61.

Se $C_{ad} > A_{fs} f_{yd}$ a LNP do perfil de aço passa pela alma, e sua posição, y_p medida a partir do topo do perfil, é obtida pela equação 62.

E por fim, o momento fletor resistente de cálculo é igual a:

$$M_{Rd} = C_{ad}(d - y_t - y_c) + C_{cd} \left(t_c - \frac{a}{2} + h_F + d - y_t \right) \quad (66)$$

Com h_F igual a zero se a laje for maciça.

- c) Vigas mistas com $3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{h}{t_w} \leq 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ e interação completa ($\alpha \geq 1,0$)

Esse limite caracteriza a possibilidade de haver flambagem local da alma do perfil em regime elastoplástico. Dessa forma, as tensões devem ser limitadas de forma que o regime elástico não seja ultrapassado.

Assim, para interação completa, a tensão de tração solicitante de cálculo na face inferior do perfil de aço, $\sigma_{a,Sd}$, não pode ser superior a f_{yd} , e a tensão de compressão solicitante de cálculo na face superior da laje de concreto, $\sigma_{c,Sd}$, não pode ser maior que f_{cd} .

Em função das deformações variarem linearmente ao longo da altura da seção transversal, e devido as tensões serem proporcionais às deformações, na interface aço-concreto a tensão do concreto é α_E vezes menor que a tensão no aço.

$$\alpha_E = \frac{E}{E_c} \quad (67)$$

Em que E e E_c é o modulo de elasticidade do aço e do concreto, respectivamente.

O momento fletor resistente de cálculo pode ser obtido com base nas máximas tensões resistentes de cálculo, sendo dado por:

$$M_{Rd} \leq \begin{cases} W_{tr,i} f_{yd} \\ \alpha_E W_{tr,s} f_{cd} \end{cases} \quad (68)$$

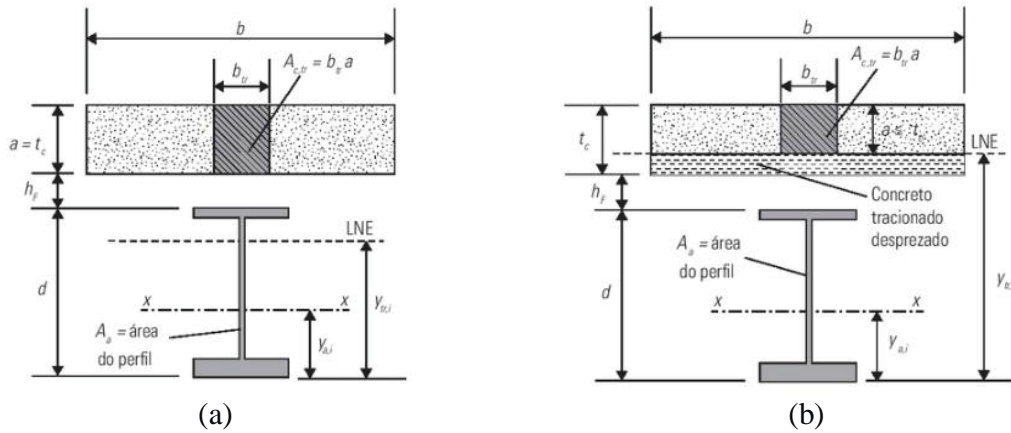
Em que $W_{tr,i}$ e $W_{tr,s}$ são módulos resistentes elásticos em relação às faces inferior e superior da seção mista homogeneizada (seção em quem o concreto é transformado em aço equivalente), respectivamente, e α_E corrige o valor do momento resistente calculado que é obtido com base na tensão resistente do concreto (na seção homogeneizada, o momento resistente deve ser determinado tomando-se o aço como material de referência) (FAKURY et al., 2016).

Para se chegar aos módulos resistentes elásticos da seção mista homogeneizada, a área de concreto é convertida em área de aço equivalente por meio de uma redução da sua largura efetiva b para uma largura transformada b_{tr} , como segue:

$$b_{tr} = \frac{b}{\alpha_E} \quad (69)$$

Da mesma forma que nas situações apresentadas anteriormente, pode-se ter a situação em que a linha neutra elástica (LNE) passa pelo perfil de aço ou pela laje de concreto. Primeiramente, é determinada a posição da LNE em relação à face inferior do perfil, $y_{tr,i}$, e, em seguida, calcula-se a altura comprimida da laje de concreto, a , o momento de inércia, I_{tr} , e os módulos resistentes elásticos inferior e superior da seção homogeneizada, $W_{tr,i}$ e $W_{tr,s}$, respectivamente. Para LNE passando pela laje de concreto, a sua parte tracionada é desprezada. Nesse caso, o valor de $y_{tr,i}$ é alterado e o resultado fornecido é simplificado. Abaixo é apresentado o cálculo dos módulos resistentes elásticos da seção homogeneizada, para ambos os casos da posição da LNE (Figura 11).

Figura 11: Posições da LNE: (a) LNE no perfil de aço e (b) LNE na laje de concreto.



Fonte: Fakury et al. (2016).

Sendo a posição da LNE obtida por:

$$y_{tr,i} = \frac{A_a y_{a,j} + b_{tr} t_c \left(d + h_F + \frac{t_c}{2} \right)}{A_a + b_{tr} t_c} \quad (70)$$

A altura comprimida do concreto da laje dada por:

$$a = d + h_F + t_c - y_{tr,i} \leq t_c \quad (71)$$

O momento de inércia igual a:

$$I_{tr} = I_a + A_a (y_{tr,i} - y_{a,i})^2 + \frac{b_{tr} a^3}{12} + A_{c,tr} \left(d + h_F + t_c - \frac{a}{2} - y_{tr,i} \right)^2 \quad (72)$$

Em que I_a é o momento de inércia do perfil de aço em relação ao eixo x-x.

O módulo de resistência elástico inferior e superior são obtidos pelas equações 73 e 74, respectivamente.

$$W_{tr,i} = \frac{I_{tr}}{y_{tr,i}} \quad (73)$$

$$W_{tr,s} = \frac{I_{tr}}{d + h_F + t_c - y_{tr,i}} \quad (74)$$

d) Vigas mistas com $3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{h}{t_w} \leq 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ e interação parcial ($\alpha_{mín} \leq \alpha < 1,0$)

Caso a relação h/t_w do perfil de aço superar $3,76 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$, mas não $5,70 \sqrt{\frac{E_a}{f_y}}$, para interação parcial, o cálculo do momento fletor resistente de cálculo pode ser obtido, substituindo na equação 68, o módulo $W_{tr,i}$, por um módulo efetivo $W_{ef,i}$. Assim, o módulo efetivo, $W_{ef,i}$ pode ser expresso por:

$$W_{ef,i} = W_{a,i} + \sqrt{\alpha}(W_{tr,i} - W_{a,i}) \quad (75)$$

Sendo $W_{a,i}$ o módulo de resistência elástico inferior do perfil de aço.

e) Vigas mistas com $\frac{h}{t_w} > 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Quando a relação entre a altura da alma e sua espessura supera o limite estabelecido para que ainda haja comportamento elastoplástico, o perfil da viga de aço é considerado esbelto. Segundo De Carli e Pravia (2016), os fenômenos de instabilidades locais são o maior problema no dimensionamento de vigas mistas esbeltas, os quais são ocasionadas pela grande altura da alma e pelo elevado vão. Dessa forma, para um dimensionamento adequado do sistema misto, na verificação da flambagem na alma é considerada a inserção de enrijecedores transversais e longitudinais, e, para a flambagem lateral com torção, são criadas restrições laterais ao longo do vão. Por isso, esse tipo de perfil não foi abordado nesse estudo.

Por fim, o dimensionamento de uma viga mista aço-concreto deve atender a seguinte condição:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd}$$

Em que M_{Sd} é o momento fletor solicitante de cálculo, obtido com uma combinação de ações apropriadas e M_{Rd} é o momento fletor resistente de cálculo, igual ao momento de

plastificação, ou ao momento que dá início ao escoamento do perfil de aço ou esmagamento do concreto. O que é definido em função da relação h/t_w do perfil.

4.3.3.2 Verificação ao estado-limite último relacionado ao esforço cortante

No dimensionamento de vigas mistas à força cortante resistente de cálculo, a seguinte condição deve ser satisfeita:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd}$$

Em que V_{Sd} é a força cortante solicitante de cálculo, a qual é obtida com a combinação última de ações apropriada, e V_{Rd} é a força cortante resistente de cálculo. A força resistente é obtida de forma simplificada, desprezando-se a participação da laje de concreto, isto é, observando apenas a do perfil de aço.

4.3.3.3 Verificação ao estado-limite de serviço relacionado a flecha

Nesse estudo, foram utilizadas vigas mistas em sistemas de pisos. Os limites para o deslocamento são preconizados pela NBR 8800 (ABNT, 2008). Assim, na verificação do deslocamento máximo, esse não deve ser superior a $L/350$, considerando que caso haja paredes de alvenaria sobre ou sob uma viga, solidarizadas com essa viga, o deslocamento vertical também não deve exceder a 15 mm.

Nas vigas não escoradas, adotadas nesse estudo, a determinação da flecha máxima (Figura 12) é dada pela seguinte expressão (FAKURY et al., 2016):

$$\delta_{m\acute{a}x} = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 \quad (76)$$

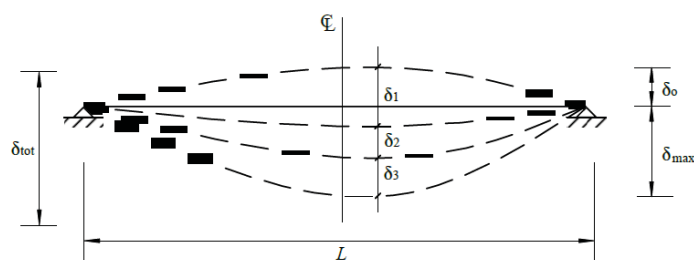
Em que:

δ_1 : deslocamento devido às ações permanentes, sem efeitos de longa duração;

δ_2 : deslocamento devido aos efeitos de longa duração das ações permanentes;

δ_3 : deslocamento devido às ações variáveis, incluindo, se houver, os efeitos de longa duração devidos aos valores quase permanentes dessas ações.

Figura 12: Flecha das vigas mistas não escoradas.



Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

No cálculo da flecha do perfil de aço δ_1 , utiliza-se o momento de inércia apenas do perfil, I_a , e, para o cálculo da flecha da viga mista, o momento de inércia efetivo da seção homogeneizada, I_{ef} , é expresso por:

$$I_{ef} = I_a + \sqrt{\alpha}(I_{tr} - I_a) \quad (77)$$

Em que α é o grau de interação e I_{tr} é o momento de inércia da seção homogeneizada. Sendo que esse depende da largura transformada da laje, b_{tr} , que é função da razão modular, α_E . Para o cálculo das flechas causadas pelas ações permanentes que atuam após a cura do concreto, todas normalmente de longa duração, δ_2 , e pelas ações variáveis de longa duração, δ_3 , esse valor α_E deve ser, de forma simplificada, multiplicado por 3, a fim de considerar os efeitos de fluência e retração do concreto.

A soma da flecha do perfil de aço, isolado sujeito à carga permanente nominal aplicada antes da cura, com a flecha da viga mista, aplicada após a cura, não deve exceder $L/350$, sendo L o vão da viga.

4.4 Estudos relacionados a Otimização de Vigas Migas Aço-Concreto

Um dos primeiros estudos acerca da otimização de vigas mistas foi desenvolvido por Adeli e Kim (2001), os quais projetaram pisos compostos pelo método dos algoritmos genéticos, calculando o custo total em função da quantidade de concreto, viga de aço e conectores de cisalhamento.

Kravanja e Silih (2001) otimizaram vigas mistas tipo I por meio de uma programação matemática não linear com variáveis inteiras (*Multi-parametric mixed-integer non-linear programming –MINLP*). Os melhores custos para fabricação das vigas compostas incluindo material, soldagem, corte da chapa, pintura e proteção anti-corrosão, bem como as dimensões ideais para as seções das vigas I, incluindo as distâncias entre as seções, as espessuras da mesa e alma das vigas e a espessura da laje foram obtidas.

Mais tarde, os mesmos autores continuaram realizando estudos referentes a otimização de vigas mistas, contudo, efetuando uma comparação de custos entre soluções otimizadas de vigas mistas soldadas e treliças mistas. Com o objetivo de descobrir os vãos e cargas, além de resistência, tensão e deflexão em que cada uma das diferentes estruturas seria mais vantajosa, essas foram submetidas a diferentes carregamentos e vãos e analisadas por meio de um método de otimização estrutural também baseado em uma programação matemática não linear. A comparação dos custos de ambas as estruturas mostrou que vigas mistas tipo I são economicamente mais viáveis quando se tem carregamentos maiores. As treliças mistas apresentaram a vantagem de promover menor peso à estrutura, dessa forma, um maior número de apoios pode reduzir significativamente sua altura, de forma a não influenciar consideravelmente nos custos e peso total da estrutura (KRAVANJA e SILIH, 2003).

Klansek e Kravanja (2006a e 2006b), desenvolveram estudos referentes a otimização de custos de diferentes sistemas de pisos mistos com auxílio de programação matemática. Tais sistemas eram constituídos por vigas mistas tipo I, treliças mistas produzidas a partir de seções U laminadas e treliças mistas produzidas com perfis formados à frio, de seção tubular. Os mesmos observaram que em situações com maiores custos com a mão de obra, o emprego de soluções com vigas mistas são menos viáveis, enquanto que treliças mistas formadas com seções laminadas são mais atraentes economicamente. Já as treliças mistas de perfis formados

à frio podem ser melhor empregadas em casos de baixo carregamento, menores custos com aço e maiores custos de mão de obra.

Câmara Neto et al. (2008) apresentaram uma proposta de otimização de vigas mistas submetidas a condições de temperatura ambiente e incêndio, por meio de modelos de otimização baseados em algoritmos genéticos. Permitiu-se concluir que tais modelos numéricos de otimização foram facilmente incorporados à prática de dimensionamento de estruturas metálicas, por meio do qual foi possível encontrar seções que satisfizessem, ao mesmo tempo, um menor custo para ambas as condições de segurança: temperatura ambiente e incêndio.

Senouci e Al-ansari (2009) também utilizaram algoritmos genéticos para minimizar os custos de vigas mistas aço-concreto. A formulação do modelo incluía as variáveis de custo do concreto, viga de aço e conectores de cisalhamento. Dois exemplos de dimensionamento foram retirados da literatura a fim de validar o modelo proposto. Os resultados obtidos mostram que o modelo é capaz de alcançar substancial redução de custos e como esperado, o tamanho e o número de parafusos conectores e o tamanho da seção de aço aumenta à medida que os vãos e as cargas atuantes das vigas são maiores, de modo a satisfazer o equilíbrio de força e momento.

Silva et al. (2010), mostraram um processo para a determinação das dimensões do perfil de aço do tipo I de forma que a área da seção transversal de aço fosse mínima e as restrições de projeto satisfeitas. As dimensões do perfil I do aço foram otimizadas utilizando o método Simplex que aproxima o problema de busca do ponto ótimo em cada passo em um problema linear. O algoritmo Simplex proporcionou resultados satisfatórios para o exemplo de viga mista em questão.

Luo et al. (2011) propuseram um projeto de vigas aço-concreto coladas a partir de um modelo de otimização formulado matematicamente e baseado em critérios de confiabilidade (*Reliability Based Design Optimization- RBDO*), o qual consistiu em incorporar na análise critérios probabilísticos e não probabilísticos, considerando as incertezas das variáveis existentes na avaliação da estrutura, bem como, realizando a implementação do modelo pelo método dos elementos finitos. A abordagem baseada em critérios de confiabilidade pode levar a uma solução mais confiável do que se comparada a uma abordagem determinista para análise de incertezas, no caso de vigas mistas coladas, simplesmente apoiadas.

Zheng et al. (2011) realizaram um dimensionamento otimizado de vigas mistas aço-concreto considerando o efeito de aderência, por meio de um algoritmo de otimização matemático com auxílio do MATLAB, o qual se mostrou eficiente e adequada para casos de interação completa entre vigas de aço-concreto simplesmente apoiadas que estão sob a ação de carregamento uniforme.

Rosça et al. (2012) desenvolveram um modelo de algoritmo para a otimização de custos de um sistema de piso de vigas mistas tipo I, o qual consiste num sistema de laje de concreto armado de profundidade constante e de vigas tipo I de aço soldado não simétrico. A otimização foi realizada pela abordagem de programação matemática não linear (NLP), com implementação no Microsoft Solver do Excel®, com isso foram obtidos reduções significativas nos custos totais.

Alankar e Chaudhary (2012) propuseram um problema de otimização de custos de vigas mistas, onde implementou-se uma programação baseada em algoritmos genéticos no código MATLAB e utilizou-se redes neurais artificiais para a análise dos parâmetros na análise estrutural de vigas mistas. O modelo proposto mostrou-se satisfatório, uma vez que computacionalmente o algoritmo escolhido é eficiente para a resolução de tais tipos de problemas complexos de otimização.

Yangjun e Li (2012) utilizaram heurísticas para otimizar um projeto de vigas de aço-concreto conectadas por adesivos em vez de conectores metálicos. Foram analisados o módulo elástico de adesivo, a espessura da camada adesiva, a força de ligação e a área de ligação, os quais influenciam no comportamento mecânico das estruturas mistas. O desempenho e a carga máxima suportada da viga mista colada foram aumentados 1,48 vezes em comparação com a viga mista inicialmente projetada com conectores de cisalhamento.

Munck et al. (2015) demonstraram como a minimização de custo e peso pode ser abordada por uma metodologia de otimização multi-objetivo para o caso de vigas mistas híbridas. Uma metodologia original combinando um algoritmo genético de classificação não dominado (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm -NSGA-II*) e um meta-modelo são usados para encontrar as soluções ótimas. Os algoritmos de otimização permitiram ter uma visão acerca da influência de diferentes parâmetros como os vãos e classe do concreto sobre o

peso e o custo das vigas e o domínio de certas restrições de projeto em âmbitos do dimensionamento estrutural.

Eskandari e Korouzhdeh (2016) buscaram soluções ótimas para a otimização de custos de vigas mistas aço-concreto, considerando a deformação plástica, sendo a formulação do código MATLAB aplicada para análise de sensibilidade dos parâmetros analisados (resistência à compressão do concreto, dimensões da viga de aço, espessura da laje de concreto, espaçamento entre as vigas de aço e os conectores de cisalhamento). Concluiu-se que o fator de segurança é mais influenciado pelo comprimento da viga, tamanho dos perfis e custo total do que pelos parâmetros de projeto.

Fabeane et al. (2017) apresentaram diretrizes para o uso racionalizado do sistema misto aço-concreto para pontes, por meio de um problema de otimização formulado com vistas a minimizar o custo, por metro da estrutura de pontes mistas, a partir da redução do peso dos conjuntos de longarinas de aço. A verificação dos elementos da ponte foi efetuada segundo as diretrizes da norma AASHTO (2012).

Korouzhdeh et al. (2017) têm desenvolvido estudos referentes a aplicação e avaliação de um método melhorado de busca de colônias de formigas para a otimização de custos de vigas mistas. Para validar o modelo proposto, foram comparados dois dimensionamentos usuais de vigas mistas com resultados otimizados pelo método original de colônias de formigas e outros algoritmos meta-heurísticos. O método da colônia de formigas melhorado permitiu obter melhores soluções, bem como, apresentou maior velocidade de convergência do que outros algoritmos estudados.

Kravanja et al. (2017) apresentaram estudos referentes a otimização de diferentes sistemas de pisos mistos, constituídos por vigas mistas tipo I, com base em uma programação matemática não linear com variáveis inteiras. As estruturas de pisos mistos analisadas, com base na resistência plástica, são mais baratas e viáveis que quando considerada resistência elástica, isso para todos os tipos de seções de aço, cargas e vãos. As estruturas mistas com seções de aço soldado em regime elástico são 15% mais caras, em média, do que as estruturas em regime plástico.

5 FORMULAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

5.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo está apresentada a formulação do problema de otimização de uma viga mista aço-concreto tipo I, submetida à flexão, a fim de obter um conjunto misto aço-concreto de menor custo, que atenda, ao mesmo tempo aos critérios de funcionalidade e segurança.

Foram abordadas vigas mistas de aço e concreto biapoiadas, nas quais o componente de aço é um perfil I de alma cheia, com a laje situada sobre a face superior desse perfil I. Em situações como vigas mistas contínuas e semicontínuas, em que o componente de aço é uma treliça ou que a laje não se situa sobre o perfil de aço, são casos menos frequentes na prática, o que justifica a escolha por vigas biapoiadas. Além disso, o emprego de vigas mistas biapoiadas, para o caso de edifícios usuais, permite obter um perfil de aço mais leve e com altura de seção transversal menor se comparado a vigas de aço convencionais.

Os tipos de conectores utilizados para ligação mecânica são do tipo Pino com cabeça (*stud bolt*). Ainda, foi considerada construção não escorada.

A formulação visando à otimização de vigas mistas aço-concreto, seguiu as determinações e requisitos normativos da norma de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios (ABNT NBR 8800, 2008), quanto às restrições para os diferentes estados-limites existentes. Bem como, as recomendações normativas da NBR 5884 (ABNT, 2013) referentes às relações entre as dimensões da seção transversal para perfis soldados tipo Viga (série VS).

A formulação do problema de otimização partiu da consideração dos parâmetros de entrada, os quais são definidos previamente e assumem valores fixos durante o processo de otimização. Basicamente, esses são referentes às características e custos dos materiais definidos em projeto e os esforços atuantes no elemento estrutural, apresentados por:

L_b : distância entre duas seções contidas à flambagem lateral com torção (comprimento destravado);

L_e : vão da viga;

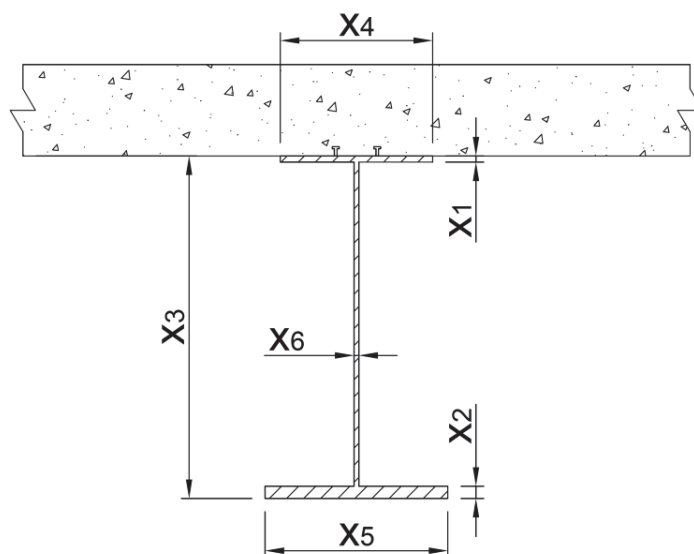
E_a : módulo de elasticidade do aço;
 E_c : módulo de elasticidade do concreto;
 e_1 : distância entre a linha de centro da viga analisada e linha de centro da viga adjacente;
 f_{ck} : resistência característica do concreto;
 f_{ucs} : resistência à ruptura do aço do conector;
 f_y : limite de escoamento do aço;
 q_{ac} : carga atuante antes da cura;
 q_{dc} : carga atuante depois da cura;
 C_c : custo referente ao volume de concreto;
 C_s : custo referente à massa de aço.

5.2 Variáveis do problema

As variáveis do problema (x_i) são os valores que se alteram durante o processo de otimização. Essas assumem valores que representam as dimensões da seção transversal do perfil de aço, totalizando seis diferentes variáveis para o problema de otimização, as quais podem ser mantidas como fixas em qualquer momento do processo. As variáveis do problema podem ser vistas na Figura 13.

x_1 : representa a espessura da mesa superior (t_{fs});
 x_2 : representa a espessura da mesa inferior (t_{fi});
 x_3 : representa a altura do perfil alma (d);
 x_4 : representa a largura da mesa superior (b_{fs});
 x_5 : representa a largura da mesa inferior (b_{fi});
 x_6 : representa a espessura da alma (t_w);

Figura 13: Variáveis de projeto referentes à geometria dos elementos.



Fonte: elaborado pela autora.

5.3 Função objetivo

A função objetivo tratada nesse estudo foi referente ao custo total por metro linear de viga mista. Esse custo pode estar relacionado tanto ao valor monetário dos materiais quanto ao impacto ambiental dos mesmos. Tal função pode ser descrita pela equação:

Minimizar:

$$f(x) = P_s C_s + V_c C_c \quad (78)$$

Onde a primeira parcela da função representa o custo do aço empregado, em que P_s relaciona-se com a quantidade de material, em massa, considerando a massa específica do aço adotada como 7850 kg/m^3 , enquanto que C_s , é o custo unitário do material por unidade de massa (R\$/kg). A segunda parcela representa o custo do concreto, onde C_c está relacionada ao custo unitário do concreto por unidade de volume (R\$/ m^3), dado em função da resistência característica do concreto adotada (f_{ck}) e V_c , corresponde ao volume de concreto empregado (m^3).

Os quantitativos dos materiais, P_s e V_c , necessitam ser calculados por meio das variáveis do problema, descritas no item anterior. Dessa forma, pode-se descrever a formulação final do processo de otimização $f(x)$ como:

$$f(x) = [x_1x_4 + x_2x_5 + (x_3 - x_2 - x_1)x_6]C_s + (t_c b_{ef})C_c \quad (79)$$

5.4 Restrições do problema

As restrições impostas ao problema referem-se aos requisitos mínimos e máximos previstos por norma de desempenho vigente, de modo que as soluções obtidas sejam aplicáveis na prática. Basicamente, as restrições existentes nesse problema são referentes a critérios de resistência e restrições construtivas e de fabricação.

As restrições de desigualdade do problema são apresentadas na forma normalizada, como segue:

$$g_1 = 1 - \frac{V_{Rd}}{V_{Sd}} \leq 0 \quad (80)$$

$$g_2 = 1 - \frac{M_{Rd}}{M_{Sd}} \leq 0 \quad (81)$$

$$g_3 = 1 - \frac{\delta_{adm}}{\delta_{máx}} \leq 0 \quad (82)$$

$$g_4 = 1 - \frac{d}{1,5b_{fi}} = 1 - \frac{x_3}{1,5x_5} \leq 0 \quad (83)$$

$$g_5 = 1 - \frac{t_f}{t_w} \leq 0 \quad (84)$$

$$g_6 = 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} - \frac{h_c}{t_w} = 1 - 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \frac{x_6}{h_c} \leq 0 \quad (85)$$

$$g_7 = 1 - \frac{\alpha_{min}}{0,40} \leq 0 \quad (86)$$

$$g_8 = 1 - \frac{1}{\sigma} \leq 0 \quad (87)$$

$$g_9 = 1 - \frac{\alpha_y}{1/9} \leq 0 \quad (88)$$

$$g_{10} = 1 - \frac{9}{\alpha_y} \leq 0 \quad (89)$$

Referente aos critérios de resistência, as principais restrições impostas ao problema de otimização dizem respeito aos esforços solicitantes e a capacidade resistente da seção, de modo que os momentos e esforços cortantes solicitantes, apresentem valores inferiores ou iguais aos momentos e esforços cortantes resistentes, bem como, que a flecha máxima ($\delta_{máx}$) seja inferior ou igual a flecha admissível (δ_{lim}), conforme apresentado nas Equações 80, 81 e 82, respectivamente. Como restrições de fabricação referentes às recomendações da NBR 5884 (ABNT, 2013) para perfis soldados padronizados da série VS, tem-se a Equação 83, que limita a razão da altura do perfil (d) sobre a largura da mesa inferior (b_{fi}), em maior que 1,5 e a Equação 84 que define que a espessura da alma deve ser menor ou igual as espessuras das mesas. A restrição 6 (Equação 85) limita que o estado-limite último não contemple configurações de seção transversal que se enquadrem em vigas de alma esbelta. A restrição 7 (Equação 86) define que o grau de interação mínimo ($\alpha_{mín}$) entre os elementos (laje de concreto e perfil de aço), para que a viga possa ser dimensionada como elemento misto, não deve ser inferior a 0,40, o que significa 40% de interação. Enquanto que o grau de interação máximo, α , não pode ser superior a 1, uma vez que esse valor já indica interação total entre os elementos (Equação 87). As restrições apresentadas nas Equações 88 e 89, respectivamente, definem que para o eixo de menor inércia, sujeito a compressão, o valor da inércia da seção, α_y , deve ser maior que 1/9 e menor que 9, a fim de garantir a redução do comportamento do elemento quanto a flambagem lateral com torção (FLT).

Caso alguma restrição não seja atendida, a função objetivo é penalizada. Tal procedimento é realizado adicionando à função objetivo $f(x)$, uma função de penalidade $P(x)$, sendo $F(x)$ a função penalizada (Equação 90). Dessa forma, o problema com restrições foi transformado em um problema sem restrições por meio da adição de uma função de penalização. A função de penalidade $P(x)$ foi calculada pela Equação 91, onde $g(x)$ corresponde ao valor de cada uma das m restrições não atendidas e r diz respeito ao fator de penalização, adotado como igual a 10^3 .

$$F(x) = f(x) + P(x) \quad (90)$$

$$P(x) = \sum_{i=1}^m r \cdot g_i(x) \quad (91)$$

Ainda, devem ser atendidas, as restrições laterais do problema. Essas fazem referência ao intervalo em que algumas variáveis do problema devem obrigatoriamente estar contidas.

De acordo com o que as siderúrgicas brasileiras oferecem em relação aos tipos de materiais, espessuras e dimensões para chapas planas aplicadas na fabricação de perfis “I” de aço soldados, foi elaborada uma relação com os tipos de materiais disponíveis no mercado brasileiro, conforme apresentado abaixo:

- As espessuras das chapas são produzidas de maneira padronizada com espessuras que variam de 4,75 mm a 50 mm. Somente algumas medidas intermediárias a esses valores são possíveis de serem atribuídas, uma vez que tem-se limitações nas espessuras produzidas comercialmente pelas siderúrgicas;
- As dimensões das chapas também se constituem em restrições a serem consideradas. Em função das limitações no processo produtivo de solda, tem-se algumas restrições de fabricação de perfis I soldados, sendo estas as dimensões mínimas (limites inferiores) para a largura da mesa bf igual como sendo igual a 100 mm e 150 mm para a altura (d) da seção do perfil e adotando-se como limites superiores para a largura da mesa bf e altura do perfil d , igual a 2000 mm, em razão da largura de chapas padronizadas pelas usinas;
- As espessuras da mesa tf e da alma tw se enquadram no intervalo de validade das variáveis em razão das limitações do processo de fabricação, assim, a espessura mínima para a mesa e a espessura mínima para a alma, é de 4,75 mm, portanto, são esses os limites inferiores. Para os limites superiores, adotou-se a espessura de 50 mm para a mesa e para a alma, sendo consideradas algumas espessuras intermediárias. Outras espessuras são possíveis de serem atribuídas somente por encomenda, uma vez que não fazem parte do padrão de fornecimento das siderúrgicas.

Dessa forma, as variáveis podem assumir valores dos conjuntos expostos:

$$x_1, x_2 \in [4.75; 6.35; 8.0; 9.5; 12.5; 16.0; 19.0; 22.4; 25.0; 28.5; 31.5; 37.5; 44.5; 50.0], \text{ em mm} \quad (92)$$

$$x_3 \in [150; \dots; 2000], \text{ em mm} \quad (93)$$

$$x_4, x_5 \in [100; \dots; 2000], \text{ em mm} \quad (94)$$

$x_6 \in [4.75; 6.35; 8.0; 9.5; 12.5; 16.0; 19.0; 22.4; 25.0; 28.5; 31.5; 37.5; 44.5; 50.0]$, em mm (95)

Quanto ao limite de espessura para lajes maciças, essas seguiram determinação da NBR 6118 (ABNT, 2014), a qual determina que para lajes de piso não em balanço, deve ser respeitada a espessura mínima de 8 cm. No entanto, espessuras de laje menores que 12 cm não são utilizadas em vigas mistas.

6 APLICAÇÕES NUMÉRICAS

6.1 Introdução

Com a finalidade de obtenção de seções otimizadas de vigas mistas aço-concreto, as buscas foram realizadas por meio do desenvolvimento de uma rotina de otimização, bem como de verificação da capacidade resistente de seções, segundo os requisitos normativos (ABNT NBR 8800, 2008), através de um algoritmo de programação, baseado em linguagem Fortran 90. Tal rotina foi validada com a planilha desenvolvida por Sousa Jr. (2008), vinculada ao Centro Brasileiro de Construção em Aço, a qual também foi desenvolvida em MS Excel®.

Inicialmente, para validação da formulação proposta, bem como, do método de otimização utilizado, foram desenvolvidas aplicações numéricas referentes à otimização dos custos monetários (item 6.2).

Na sequência (item 6.3) é apresentado um comparativo entre a otimização de custos monetários e custos ambientais das seções de vigas mistas aço-concreto, tomando-se como base valores retirados da literatura, de pontuação ambiental para cada insumo utilizado.

Por fim (item 6.4), é exposto um comparativo entre custos de uma viga de aço e uma viga mista aço-concreto, ambas otimizadas, a fim de analisar os potenciais resistentes de ambas as estruturas e os custos das mesmas.

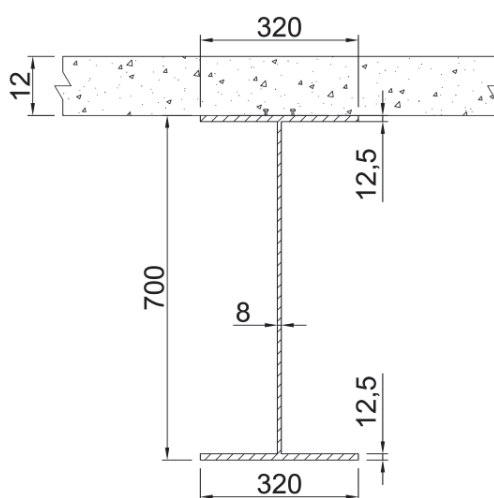
As análises foram efetuadas em um computador com sistema operacional Windows 10®, 64 bits, com memória de 8 GB e processador Intel® Core i7-5500U CPU.

6.2 Otimização de Custos Monetários

Este exemplo trata-se de uma configuração de viga mista, a qual foi pré-dimensionada para o vão de 17,5 metros e faz referência a uma viga secundária, pertencente ao piso de um depósito de edifício comercial. A geometria da viga mista é constituída por um perfil de aço soldado da série VS 700x115 e uma laje maciça de concreto, de 12 cm de espessura, construção não escorada e interação variando para as diferentes análises, não sendo considerada a existência de fôrma de aço incorporada. As dimensões da seção transversal em

questão são apresentadas na Figura 14, sendo o perfil de aço expresso em mm e a espessura da laje de concreto em cm.

Figura 14: Dimensões propostas para a seção de referência.



Fonte: elaborado pela autora.

As características e propriedades dos materiais que foram empregados no modelo de viga mista em análise são relacionadas abaixo:

- Vão da viga (L_e): 17,50 m, sem travamento lateral;
- Distância entre a linha de centro da viga analisada e da linha de centro da viga adjacente (e_1): 2,50 m;
- Resistência característica do concreto (f_{ck}) de 25 Mpa, módulo de elasticidade do concreto (E_c) igual a 2415 kN/cm² e consideração de agregado graúdo de gnaisse;
- Tipo de aço adotado: Aço ASTM A-572 Gr. 50, com módulo de elasticidade, E , igual a 20000 kN/cm²;
- Massa específica aço: 7850 kg/m³;
- Resistência à tração do aço do conector (f_{ucs}): 41,5 kN/cm²;
- Diâmetro nominal do conector (d_{cs}): 19 mm;
- Área da seção transversal do fuste do conector (A_{cs}): 2,84 cm²;
- Grupo de conectores: 1;

- Fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme (C_b): 1,136;
- Coeficiente de ajuste para a consideração do efeito de atuação de grupos e conectores (R_g): 1,0;
- Coeficiente para consideração da posição do conector (R_p): 1,0;
- Coeficiente de flambagem da alma por cisalhamento (k_v): 5,0;
- Não considerou-se fôrma de aço incorporada.

Como ações permanentes, antes e após a cura do concreto, com seus valores característicos, foram adotadas, os pesos próprios da laje de concreto e da viga de aço, o qual incluiu uma carga de 0,5 kN/m² referente ao peso dos conectores e outros constituintes do perfil de aço.

Os pesos próprios foram calculados levando em conta a seção de aço e de concreto obtidas a cada iteração, sendo os esforços determinados automaticamente na avaliação pelo programa. O peso próprio da seção de aço foi determinado pelo produto do peso específico do aço ($\gamma_{aço} = 78,5$ kN/m³) e da área de aço da seção (m²). Da mesma forma para o peso específico da laje de concreto, em que o peso específico do concreto (γ_{conc}) igual a 25 kN/m³, foi multiplicado pela espessura da laje de concreto (t_c em m) e pela distância entre a linha de centro da viga analisada e linha de centro da viga adjacente (e_1 em m).

Como ações variáveis foram consideradas uma sobrecarga de construção de 1,0 kN/m² (antes da cura do concreto) e uma ação variável total de 1,5 kN/m² (após a cura do concreto) referente ao uso e ocupação, conforme prescrições da NBR 6120 (ABNT, 2000).

Os valores dos coeficientes de ponderação das ações utilizados no exemplo foram baseados no item 4.7.6.2.2 da NBR 8800 (ABNT, 2008). Sendo que para combinações durante a construção, antes da cura do concreto, o coeficiente de ponderação de ações adotado para o peso próprio do perfil de aço e conectores foi igual a $\gamma_g = 1,15$, para o peso próprio da laje de concreto, $\gamma_g = 1,25$, e para a ação variável, $\gamma_q = 1,30$. Enquanto que para a combinação de utilização, ou normais, após a cura do concreto, o coeficiente de ponderação das ações para o peso próprio do perfil de aço e conectores foi igual a $\gamma_g = 1,25$, para o peso próprio da laje de concreto, $\gamma_g = 1,35$, e para a ação variável, $\gamma_q = 1,50$.

Para os custos unitários dos materiais, os preços de insumos e custos das composições adotadas são de origem do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção

Civil, referente ao mês de novembro de 2018 (SINAPI, 2018), os quais também são apresentados na Tabela 1. O valor unitário do custo do aço C_s , teve como referência a chapa de aço grossa ASTM A572 Grau 50, de 350 MPa. E o custo unitário do concreto, C_c , em R\$/m³, considerou incluso para proteção contra a fissuração, tela de aço Soldada Nervurada CA-60, de 10 x 10 cm de espaçamento da malha, 4,2 mm de diâmetro do fio e 1 m de largura.

Tabela 1: Custos unitários dos materiais utilizados no estudo.

Cs (R\$/kg)	Cc (R\$/m³)
345 MPa	25 MPa
6,80	365,00

Fonte: elaborado pela autora.

Para maior precisão dos resultados, a rotina de otimização e verificação da seção transversal, implementada em linguagem Fortran 90, foi executada 10 vezes para cada análise. Como a melhor solução otimizada, foi selecionada a configuração de viga mista aço-concreto que apresentar o menor custo monetário dentre as 10 soluções obtidas.

6.2.1 Caso I

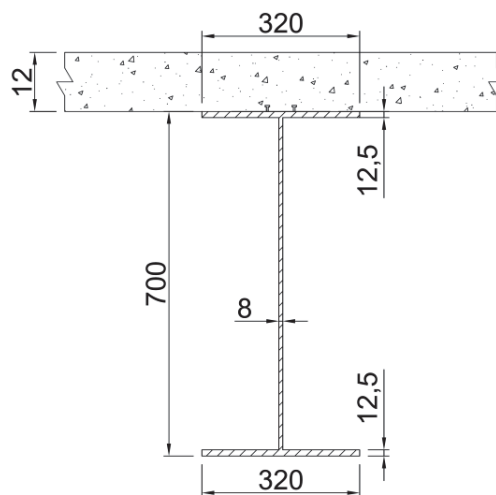
Tomando como base a configuração de viga mista utilizada como seção de referência, para fins de análise da influência dos valores obtidos para cada variável, foram consideradas na otimização, em primeiro momento, variáveis contínuas, e em segundo momento, variáveis discretas. As variáveis discretas assumem valores múltiplos de milímetro para o perfil de aço, considerando seus limites inferior e superior, os quais foram definidos unicamente em função dos padrões de chapas de aço comercializadas, conforme apresentado no item 5 desse trabalho. Da série de testes foram escolhidas as seções transversais que obtiveram o melhor custo para ambos os casos, conforme indicado na Tabela 2 e na Figura 15. Foi considerada interação parcial de 40% para as análises.

Tabela 2: Comparativo entre variáveis discretas e variáveis contínuas considerando vão de 17,5 metros.

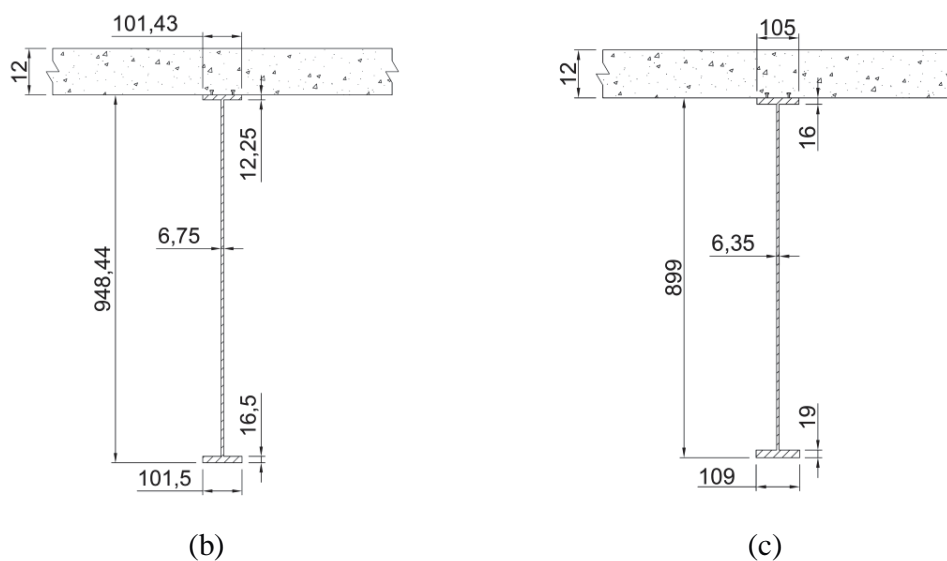
	d (mm)	t_w (mm)	b_{fs} (mm)	t_{fs} (mm)	b_{fi} (mm)	t_{fi} (mm)	Seção de aço (cm ²)	R\$/m
Seção de referência	700	8	320	12,5	320	12,5	105,19	726,24
Seção Otimizada (Variáveis contínuas)	948,44	6,75	101,43	12,25	101,5	16,50	71,63	498,08
Seção Otimizada (Variáveis discretas)	899	6,35	105	16	109	19	72,51	504,04

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 15: (a) Seção de referência e seção otimizada considerando (b) variáveis contínuas e (c) variáveis discretas.



(a)



Fonte: elaborado pela autora.

Os consumos de aço dos perfis sofreram uma redução de 31,90% e 31,06% considerando variáveis contínuas e discretas, respectivamente, se comparado o consumo de aço do perfil de referência. Enquanto que os custos da seção mista foram reduzidos em aproximadamente 31,42% para a seção otimizada considerando variáveis contínuas e 30,59% para a seção otimizada considerando variáveis discretas, o que representa uma diferença pequena e insignificante tomando como referência a consideração das duas naturezas de variáveis.

Dessa forma, sob o aspecto construtivo, com relação à viabilidade de produção das seções, não é vantajoso adotar variáveis contínuas para a otimização, uma vez que com variáveis discretas, o conjunto solução adotado para as espessuras das chapas, correspondem às dimensões comercialmente vendidas, dessa forma, os perfis de aço otimizados seriam facilmente confeccionados. Em razão desse aspecto construtivo, foi considerada nas demais análises desse estudo, a adoção de variáveis discretas.

Para o caso em questão, recai-se em um problema combinatório, em que se tem $1,14 \times 10^{10}$ soluções, considerando os limites para cada variável. Diante disso, tem-se grande dificuldade para descobrir a melhor ou uma boa solução para o problema sem o auxílio de algum método para a obtenção da mesma, o que ressalta a eficiência dos métodos de

otimização para obtenção de boas soluções quando se tem incontáveis possibilidades para a resolução do problema.

6.2.2 Caso II

Na sequência, são apresentados comparativos das soluções otimizadas para os diferentes vãos adotados. Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos para as dimensões do perfil de aço, expressos em mm e para a espessura da laje maciça de concreto (cm) para as seções transversais otimizadas, bem como, os custos das mesmas em função da variação nos vãos, considerando a mínima interação entre os elementos aço-concreto (40%).

Tabela 3: Dimensões e custos das seções transversais otimizadas.

Vão	d (mm)	t_w (mm)	b_{fs} (mm)	t_{fs} (mm)	b_{fi} (mm)	t_{fi} (mm)	R\$/m
5	272	4,75	100	4,75	100	4,75	122,74
7,5	449	4,75	100	4,75	100	4,75	170,37
10	633	4,75	100	4,75	101	4,75	220,01
12,5	742	6,35	100	6,35	102	6,35	326,63
15	881	6,35	103	8	106	8	393,40
17,5	899	6,35	105	16	109	19	504,04

Fonte: elaborado pela autora.

Observa-se que a esbeltez da alma se apresentou sem folga desde a seção de partida até o vão de 10 metros, uma vez que o algoritmo de otimização adotou o valor mínimo especificado para as espessuras de chapas comerciais. Tal fato pode ser explicado pela seção de referência adotada apresentar esbeltez da alma maior que o necessário para as solicitações impostas, dessa forma o algoritmo alterou as dimensões da seção otimizada a partir da seção de partida, fixando inicialmente a esbeltez da alma igual ao seu limite inferior, equivalente a 4,75 mm. Essa lógica foi mantida durante as iterações já que existe uma tendência do algoritmo de otimização em reduzir a espessura da alma e aumentar a sua altura para se ter um acréscimo na inércia da seção e conseqüentemente maior resistência.

Com o aumento do vão efetivo, a alma pode assumir uma tendência de ficar mais esbelta, em função da necessidade de maior inércia para resistir a maiores solicitações de flexão. Entretanto, perfis com almas esbeltas muitas vezes requerem detalhes construtivos e elementos adicionais, tais como enrijecedores, de modo a controlar a instabilidade local da alma, o que acaba agregando valor ao custo final.

Dessa forma, a possibilidade de uso de almas com maior espessura, como foi o caso das soluções obtidas para o vão igual e superior a 12,5 m, dispensam a colocação de enrijecedores e outros artifícios, o que apesar do maior consumo de aço, promove ganhos de produtividade e economia de custos com a mão de obra. Ainda, para que haja redução da altura do perfil ou redução da espessura da alma, tais diminuições podem ser compensadas pelo aumento da área das mesas, como é o caso das configurações geradas para o vão de 12,5 m e superiores a esse.

Para comparar a esbeltez dos elementos mistos de aço-concreto, optou-se em utilizar o parâmetro L/h , sendo h , a altura total do perfil, nesse trabalho chamado de d . Tal relação é apresentada na Tabela 4. Ainda, na Tabela 4 é apresentado resultado da relação d/b_f , referente a restrição 4, definida conforme prescrição da NBR 8800 (ABNT, 2008).

Tabela 4: Comparativo da esbeltez e relação ótima dos elementos mistos.

Vão (m)	d (mm)	L/d	d/b _f
5	272	18,38	2,72
7,5	449	16,70	4,49
10	633	15,79	6,27
12,5	742	16,85	7,27
15	881	17,03	8,31
17,5	899	19,46	8,25

Fonte: elaborado pela autora.

Se tratando de vigas mistas aço-concreto, em específico do perfil de aço, a eficiência com relação a existência à flexão, está no aumento da altura da seção que promove o aumento da inércia. A solução para perfis I é afastar as mesas, no entanto, é necessário manter uma

relação largura x espessura da alma a fim de evitar problemas de instabilidade (flambagem local da alma).

Valores usuais para o pré-dimensionamento de uso de vigas de aço para pisos situam-se entre as relações de Vão/20 a Vão/25 (PRAVIA et al., 2013). Nota-se que as soluções otimizadas resultaram em uma relação média de Vão/17,37.

Quanto à relação ótima para perfis I soldados sujeitos a esforço de flexão, d/b_{fi} , apresentada na NBR 5884 (ABNT, 2013), de forma geral, pode-se afirmar que seções que apresentaram relações inferiores ou próximas a 1,5, tem mesas com larguras e espessuras consideradas grandes. Contudo, com relações d/b_{fi} superiores a 4,0, as mesas apresentaram-se reduzidas em proporção à alma, que tem espessura maior, com isso, há um aumento da área de aço da seção transversal e conseqüentemente há aumento no custo final. Para os casos em que se tem almas não tão espessas, atenta-se ao cuidado com os efeitos localizados na alma (flambagem local da alma).

Na Tabela 5 é apresentado o estado limite de serviço (ELS) relacionado ao deslocamento limite ou flecha obtido para as seções otimizadas em função da variação dos vãos da peça. A flecha limite (δ) e a flecha admissível (δ_{adm}) são expressas em centímetros e os vãos em metros. Também é apresentada uma relação $\Delta\delta$, que expressa em porcentagem a diferença entre o flecha limite e a flecha admissível.

Tabela 5: Verificação do ELS relacionado ao deslocamento limite.

Vão	δ_{adm}	δ	$\Delta\delta$ (%)
5	1,43	1,43	0
7,5	2,14	2,14	0
10	2,86	2,85	-0,35
12,5	3,57	3,57	0
15	4,29	4,28	-0,23
17,5	5,00	5,00	0

Fonte: elaborado pela autora.

A restrição da flecha acabou sendo o fator limitante do processo de otimização para a verificação dos elementos estruturais, o que pode ser percebido, pelas soluções otimizadas terem apresentado muito baixa relação $\Delta\delta$, o que indica um dimensionamento muito próximo ao máximo permitido para o ELS.

6.2.3 Caso III

A fim de analisar a influência do grau de interação aço-concreto, foram realizadas análises considerando interação total e parcial do elemento em análise a partir da variação nos vãos, sempre visando atender os estados limites últimos e de utilização. A exemplo da análise anterior, não foi considerado o custo dos conectores de cisalhamento nem a mão de obra para instalação desses componentes. Nessa última análise, além do atendimento aos requisitos da norma, buscou-se fazer um comparativo das relações entre o vão *versus* consumo das vigas obtidas, relação custo de aço *versus* vão, em função dos diferentes graus de interação adotados, bem como um comparativo do número de conectores *versus* custo.

Na Tabela 6 e Tabela 7 são mostrados os resultados obtidos para os diferentes vãos comparados com as interações adotadas entre os elementos aço-concreto, em termos de consumo de aço e custo das soluções otimizadas, respectivamente. As interações entre os elementos aço-concreto variaram da interação mínima necessária (40%) até a máxima permitida (100%).

Tabela 6: Comparativo entre o consumo de aço (kg/m linear) em função do vão para os diferentes graus de interação.

Vão (m)	Grau de interação aço- concreto						
	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
5	17,25	17,25	17,25	17,25	17,25	17,25	17,25
7,5	23,85	23,88	23,88	23,88	23,88	23,88	23,88
10	30,74	30,74	30,78	30,78	30,78	30,78	30,78
12,5	46,42	49,81	43,71	43,89	44,53	43,96	43,96
15	56,24	56,37	61,05	56,43	56,49	56,59	56,56
17,5	72,51	72,7	72,71	72,85	72,85	72,85	72,9

Fonte: elaborado pela autora.

A partir dos resultados apresentados, é visível a pouca influência do grau de interação na geração dos perfis de aço de vigas mistas não escoradas por parte do algoritmo de otimização. Para os vãos de até 10 m tem-se o mesmo consumo de aço para as seções transversais com interação de 40% a 100%, o que pode ser explicado pelos menores vãos e consequentemente pelas condições de carregamento que levaram a seção otimizada apresentar as mínimas dimensões definidas para as variáveis. Nesse caso em questão, a redução no grau de interação promoveu economia de recursos necessários para a mão de obra e instalação de mais conectores de cisalhamento.

Tabela 7: Comparativo de custos (R\$/m) em função do vão para os diferentes graus de interação.

Vão (m)	Grau de interação aço- concreto						
	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
5	122,74	122,74	122,74	122,74	122,74	122,74	122,74
7,5	170,36	170,61	170,61	170,61	170,61	170,61	170,61
10	220,01	220	220,26	220,26	220,26	220,26	220,26
12,5	326,62	308,87	308,2	309,38	313,72	309,89	309,89
15	393,4	394,26	426,06	394,68	395,11	395,77	395,54
17,5	504,04	505,3	505,38	506,32	506,32	506,32	506,66

Fonte: elaborado pela autora.

Como pode ser observado, as variações nos custos são bem pequenas, o que indica que independente da configuração transversal gerada pelo algoritmo de otimização, chegou-se a consumos de aço das seções muito próximas mesmo com as variações nos graus de interação. Tal similaridade pode ser consequência das condições de carregamento, tipo de construção, vãos e tipo de laje de concreto adotados.

Na Tabela 8 é apresentada uma análise considerando a influência do número de conectores de cisalhamento no custo final da viga mista, adotando um vão de 17,50 m e partindo do número mínimo de conectores necessários para atender aos requisitos de resistência para o caso em questão, sendo esse igual a 28 conectores. Não foi considerada a mão de obra para instalação dos conectores nem o custo unitário dos mesmos.

Tabela 8: Relação número de conectores *versus* custo.

Número de conectores	Custo (R\$/m)
24	504,18
26	503,15
28	504,04
30	502,81
32	504,33
34	504,62

Fonte: elaborado pela autora.

Considerando apenas o número de conectores e interação parcial, utilizada em situações de edificações convencionais, verificou-se que a influência dos mesmos quanto a quantidade não causa variação no custo final da seção transversal, uma vez que como pode-se perceber, a partir da simulação com 40% de interação entre os elementos aço e concreto, o custo adicional aumentando o número de conectores não passa de R\$ 2,00. Para uma análise mais conclusiva, deveria ser considerado o custo de mão de obra e do equipamento utilizado para a instalação dos conectores.

6.3 Otimização de Custos Ambientais

Na sequência é apresentada uma análise do algoritmo de otimização utilizado, discorrendo-se os custos ambientais para os insumos das vigas mistas aço-concreto, os quais foram obtidos a partir da literatura e servirão como base para a simulação e análise dos resultados. Como custo utilizado, cita-se o dióxido de carbono emitido (CO₂), o qual segundo diversos autores é o parâmetro que avalia com maior representatividade os insumos de materiais utilizados na construção de uma edificação, sendo esse um dos mais utilizados para o levantamento e análises em estudos de minimização de impactos ambientais (PAYÁ-ZAFORTEZA et al., 2009; YEPES et al., 2012).

No caso em questão, verifica-se qual o respectivo custo ambiental da solução proposta no item anterior, considerando um vão de viga de 17,50 metros. Foi empregado o custo ambiental nesse exemplo baseado na emissão de CO₂, sendo essa quantificada em kg. O custo ambiental unitário, bem como o custo monetário utilizado para os materiais são apresentados na Tabela 9. Os custos em termos de kg de CO₂ emitidos por m³ de concreto foram retirados

do trabalho de García-Segura e Yepes (2016), referentes à base de dados do Instituto de Tecnologia de Construção da Catalunha, enquanto que a quantidade de kg de CO₂ emitida por kg de aço foi extraída do trabalho de Gilbert et al. (2017), referente a base de dados da Associação Mundial de Aço. Os custos monetários são referentes ao mês de novembro de 2018, sendo os mesmos retirados do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI, 2018).

Tabela 9: Custos unitários dos materiais utilizados no estudo.

Material	Custo Monetário (R\$)	Custos Ambientais CO₂ (kg)
Concreto 25 Mpa (m ³)	365,00	321,92
Aço (kg)	6,80	1,116

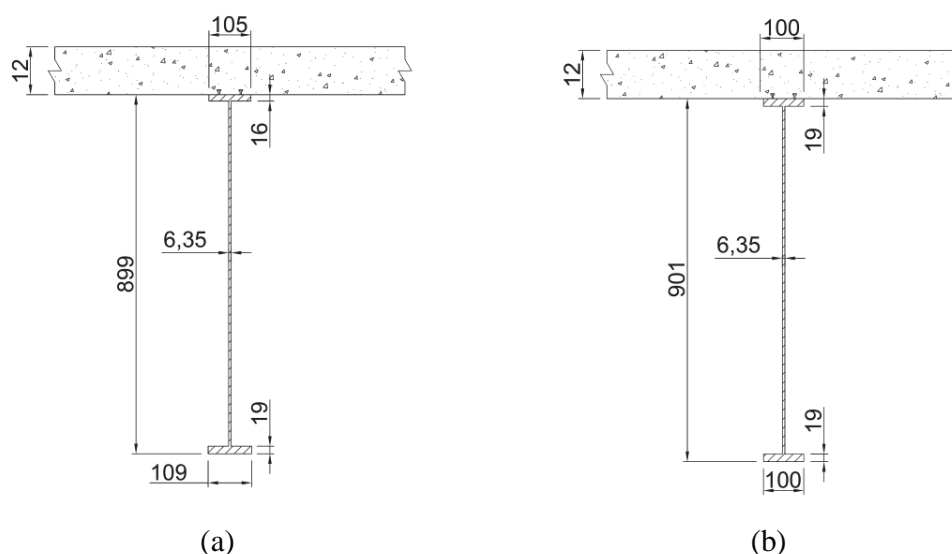
Os resultados obtidos para esse caso são apresentados na Tabela 10, sendo a seção de aço do perfil expressa em cm² e os custos dos materiais expressos em R\$/m linear de viga (custo monetário) e em kg de emissão de CO₂ (custo ambiental) para a ambas as soluções obtidas. Na Figura 16 são apresentadas as seções otimizadas obtidas para cada natureza de custo avaliada, sendo que na Figura 16(a) é apresentada a seção de mínimo custo monetário e na Figura 16(b), a seção de menor custo ambiental. As dimensões do perfil de aço são apresentadas em mm e a espessura da laje de concreto, em cm.

Tabela 10: Custos totais das soluções otimizadas.

	Custo Total
Solução Monetária (R\$/m)	504,04
Solução Ambiental (kg/CO₂)	90,96

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 16: Solução otimizada monetária (a) e solução otimizada ambiental (b).



Fonte: elaborado pela autora.

O resultado advindo da otimização ambiental foi muito semelhante ao obtido pela solução monetária, apresentando pequenas diferenças nas dimensões da seção transversal, mas com consumo de aço e concreto muito próximos. A obtenção de configurações semelhantes como apresentado na Figura 19a e Figura 19b é uma tendência que já fora indicada nos trabalhos de Payá-Zaforteza et al. (2009), Yepes et al. (2012) e Medeiros e Kripka (2014).

Considerando a solução otimizada monetária, pode-se inferir que com um pequeno acréscimo no custo (0,45%) é obtida a melhor solução possível sob o ponto de vista ambiental. Com isso, é possível dizer que as estruturas otimizadas considerando o custo monetário, em função da racionalização do consumo de materiais, conseqüentemente estão diretamente relacionadas à redução do impacto ambiental.

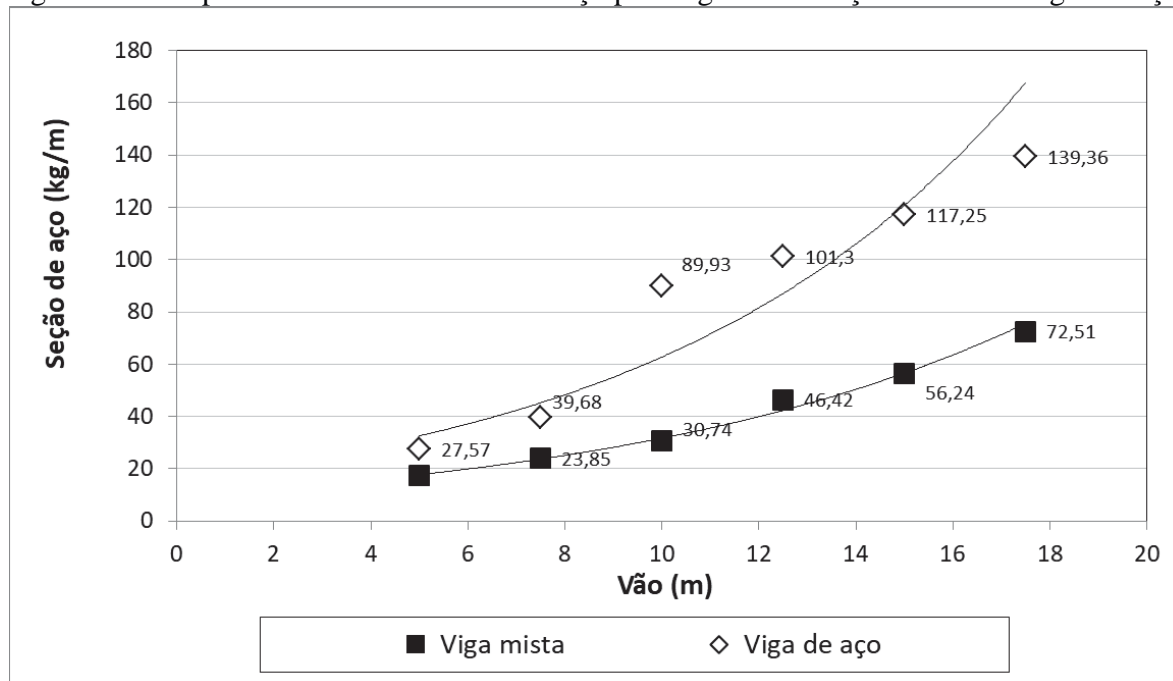
6.4 Otimização de Custos Viga de Aço versus Viga Mista Aço-Concreto

Neste item são apresentados comparativos do consumo de aço, da capacidade resistente quanto ao momento fletor e do custo final, obtidos a partir da otimização de vigas mistas aço-concreto e de vigas de aço, no que se refere ao dimensionamento à flexão. Para os comparativos, foram utilizados os resultados otimizados referentes às vigas mistas

apresentados no item 6.2 deste trabalho. As seções transversais das vigas de aço e vigas mistas também foram verificadas em conformidade com normativas brasileiras NBR 8800 (ABNT, 2008) e NBR 5884 (ABNT, 2013). As análises comparativas consideraram interação de 40% entre os elementos aço-concreto das vigas mistas e comprimento destravado igual a zero para as vigas de aço.

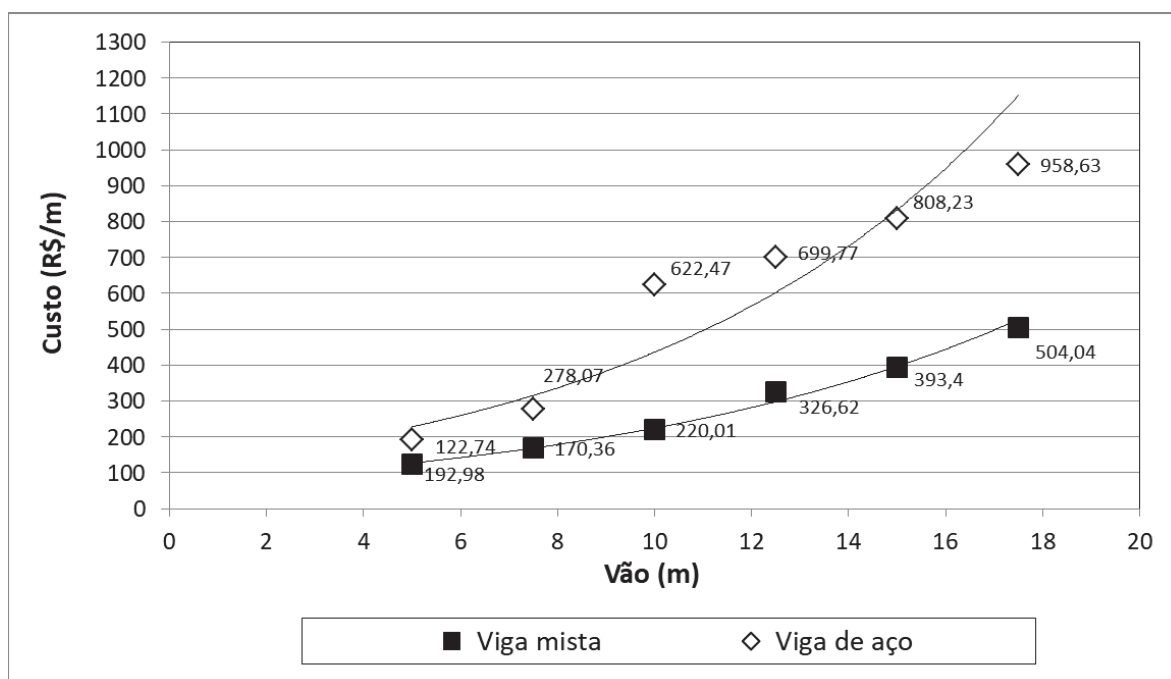
Os valores obtidos para o consumo de aço das seções, em kg/m, bem como para o custo final por metro linear de viga (R\$/m), para os elementos de aço e elementos mistos aço-concreto, considerando variação nos vãos, são apresentados na Figura 17 e Figura 18, respectivamente. No custo do perfil de aço por metro linear, foi acrescido o valor da laje de concreto de 12 cm de espessura.

Figura 17: Comparativo entre o consumo de aço para vigas mistas aço-concreto e vigas de aço.



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 18: Comparativo entre o custo das vigas mistas aço-concreto e das vigas de aço.



Fonte: elaborado pela autora.

A Figura 17 demonstra a diferença de redução no consumo de aço e no custo final da seção por metro linear quando se escolhe adotar o comportamento misto para vigas de sistemas de pisos de edificações. É notório que, à medida que o vão livre é aumentado, há a necessidade de perfis com maior inércia, isto é, mais resistentes para controlar o efeito dos deslocamentos, o que justifica as diferenças mais significativas do consumo de aço entre os elementos para os vãos maiores.

A tipologia construtiva adotada para as vigas mistas desse estudo, construções não escoradas, resultam em maiores valores de deslocamento durante a fase de construção, em que o perfil de aço isolado tem que suportar sozinho as cargas permanentes. Para esse tipo de tipologia construtiva, tais deslocamentos durante a construção (δ_I), na maioria dos casos, são os determinantes no dimensionamento e verificação desses elementos.

Dessa forma, como apresentado no item 6.2 (Tabela 5), o ELS foi o fator determinante na verificação das vigas mistas, uma vez que este limitou os deslocamentos verticais aos valores aceitáveis por norma (ABNT NBR 8800, 2008) e gerou seções transversais com folgas entre os momentos fletores solicitantes e resistentes sob a ação das cargas de utilização.

Da mesma forma, para o perfil de aço isolado, em função da necessidade de perfis com maior inércia para controlar a ação dos graus de instabilidade da peça, o algoritmo de otimização gerou soluções para os diferentes vãos, as quais também foram limitadas a deslocamentos verticais com valores muito próximos ou iguais aos valores aceitáveis por norma (ABNT NBR 8800, 2008), indicando novamente que o ELS conduziu o dimensionamento.

Caso a viga mista tivesse sido dimensionada considerando somente o ELU na flexão, isto é, desativando a restrição da flecha, se teria maior diferença entre o consumo de aço para os elementos de aço e mistos, uma vez que não teria folga tão considerável entre os momentos solicitantes e resistentes.

Um resumo das diferenças percentuais de consumo de aço e custo por metro linear das vigas mistas *versus* vigas de aço é apresentado na Tabela 11.

Tabela 11: Percentuais de redução no consumo de aço e no custo por metro linear das vigas mistas *versus* vigas de aço.

Vão (m)	Redução no consumo de aço das seções (%)	Redução no custo das seções (%)
5	37,43	36,40
7,5	39,89	38,73
10	65,82	64,65
12,5	54,17	53,32
15	52,03	51,32
17,5	47,97	47,42

Fonte: elaborado pela autora.

Como pode-se perceber, a redução no consumo de aço das seções em kg por metro linear de viga chegou a 65,82% para o vão de 10 metros, isto é, mais da metade do consumo foi reduzido. Da mesma forma para o custo por metro linear para a seção de viga mista considerando vão de 10 metros, que chegou a 64,65% de redução se comparada a seção de viga de aço isolada, o que demonstra que a opção pelo sistema misto para vigas de piso se mostrou mais vantajosa, uma vez que devido à redução no consumo de aço para vigas mistas,

o custo final também foi reduzido, como apresentado na Figura 22. Com isso, pode-se concluir que para tal configuração de viga mista, o vão ideal está em torno de 10 metros.

Na Tabela 12 são apresentados os resultados obtidos para o dimensionamento das vigas de aço e das vigas mistas aço-concreto, referente ao momento fletor resistente, expresso em kN.m.

Tabela 12: Resultados obtidos para o momento fletor resistente das seções de aço e mista.

Vão (m)	Momento resistente	Momento resistente	Aumento de resistência
	Viga de aço (kN.m)	Viga mista aço-concreto (kN.m)	Viga de aço- Viga mista (%)
5	52,36	123,01	134,93
7,5	118,85	181,70	52,88
10	219,17	295,69	34,91
12,5	344,28	491,23	42,68
15	501,7	694,36	29,43
17,5	692,33	1033,43	49,27

Fonte: elaborado pela autora.

Como pode-se perceber, o aumento de resistência é uma das vantagens do uso de vigas mistas. Comparando o momento fletor resistente dos dois elementos, percebe-se que a viga mista se apresenta mais eficiente, uma vez que, da resultante das cargas atuantes na estrutura, obtém-se momentos fletores resistentes significativamente maiores para a viga mista aço-concreto em relação as vigas de aço, chegando a um acréscimo de 134,93% no momento fletor resistente para o vão menor de 5 metros.

Devido à associação da laje de concreto ao perfil de aço, mesmo que essa esteja com espessura mínima, a contribuição da laje já permite reduzir o consumo de aço e consequentemente o custo final da viga mista por metro linear, bem como melhorar a capacidade resistente do elemento misto, uma vez que a viga mista resiste a um momento fletor relativamente maior, visto que a laje de concreto serve como travamento lateral, impedindo que a estrutura sofra flambagem lateral por torção, sendo essa uma vantagem

quando comparada à viga isolada de aço, que não apresenta travamento, a não ser que esse seja inserido a parte.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 Conclusão

Esse trabalho propôs a minimização do custo monetário e ambiental das seções de vigas mistas aço-concreto, submetidas à flexão, por meio do processo heurístico de otimização conhecido como Busca Harmônica (*Harmony Search*). A norma brasileira ABNT NBR 8800/2008 foi empregada na verificação da capacidade resistente das seções. Além disso, as considerações da norma de perfis soldados NBR 5884 (ABNT, 2013) também foram avaliadas.

Para isso, foi desenvolvida uma formulação para o problema de otimização, a qual foi implementada em um algoritmo em linguagem Fortran 90. Para a validação da formulação proposta, bem como da utilização do método da Busca Harmônica como método de otimização, foi desenvolvida uma série de aplicações numéricas.

O primeiro item desse trabalho visou à otimização dos custos monetários das seções mistas de aço-concreto, a partir dos quais foi obtida uma série de conclusões.

No primeiro caso desse item, o custo das soluções otimizadas no caso de se trabalhar com variáveis discretas e não contínuas, não sofreu incremento significativo. Dessa forma, com relação à viabilidade de produção das peças, não é vantajoso adotar variáveis contínuas para a otimização, uma vez que, com variáveis discretas, o conjunto solução adotado para as espessuras das chapas, correspondem as dimensões comercialmente vendidas, dessa forma, os perfis de aço otimizados seriam facilmente confeccionados.

No segundo caso de estudo, foram analisadas as relações e influências das dimensões da seção transversal variando os vãos das peças. De forma geral, foi uma tendência do algoritmo de otimização gerar soluções em que a espessura da alma é reduzida e a altura aumentada, enquanto que as mesas são mais espessas e com maior largura, a fim de garantir um acréscimo na inércia da seção e conseqüentemente melhor capacidade resistente, do mesmo modo que se atinja economia de material.

No caso três do item de otimização de custos monetários, foram realizadas análises referentes à influência do grau de interação e do número de conectores no dimensionamento

de vigas mistas aço-concreto. Permitiu-se concluir de forma geral, que o custo monetário foi pouco influenciado pelo grau de interação entre os elementos aço-concreto. Para condições usuais de edificações de uso comercial, reduzir o grau de interação pode ser uma vantagem, uma vez que se evita custos com material e mão de obra especializada para a instalação dos conectores de cisalhamento. Ainda, a influência do número de conectores não causou variação significativa no custo final da seção transversal, no entanto, destaca-se que não foi contabilizado no custo final, a mão de obra para instalação e o custo unitário dos conectores de cisalhamento.

No segundo item foi realizada a otimização dos custos ambientais para a mesma seção de referência utilizada na otimização de custos monetários, tomando-se como referência valores de pontuação ambiental para cada insumo empregado nas vigas mistas aço-concreto, retirados da literatura estrangeira. O resultado advindo da otimização monetária foi muito semelhante ao obtido pela solução ambiental, tendência que já fora indicada na literatura, podendo-se concluir que a otimização de custos monetários, em função da racionalização do consumo de materiais, está diretamente relacionada com a redução de custos ambientais.

E por fim, foi realizado um comparativo entre as soluções otimizadas de vigas mistas aço-concreto e vigas de aço. A contribuição da laje nas vigas mistas aço-concreto proporciona melhores resultados quanto à capacidade resistente e menor custo final, se comparadas às vigas de aço isoladas. A vantagem das vigas mistas se encontra no travamento proporcionado pela laje de concreto, que torna possível a menor consideração das instabilidades que podem vir a causar redução da resistência da peça, o que gera ganhos econômicos pela adoção de perfis de aço menores. Como foi adotada construção não escorada para as vigas mistas aço-concreto, os deslocamentos máximos foram os limitantes para o dimensionamento dos elementos mistos.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Ao final dessa dissertação, como sugestões para trabalhos futuros, recomendam-se os seguintes temas:

a) Avaliar os parâmetros do método de otimização com o intuito de melhorar o desempenho da implementação e buscar soluções mais eficientes;

b) Ampliar a aplicação do método de otimização para outros tipos de seções de vigas mistas, com uso de outros tipos de lajes;

c) Obter valores de custos ambientais mais adequados à realidade local, por meio da utilização das ferramentas computacionais disponíveis para Análise do Ciclo de Vida (ACV), bem como com a utilização de bancos de dados com informações nacionais sobre os insumos aço-concreto utilizados nas vigas mistas;

d) Desenvolver a otimização dos custos monetários e ambientais para vigas mistas aplicadas à pontes;

e) Dimensionar e analisar as vigas mistas de aço e concreto com alma esbelta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADELI, H.; KIM, H. Cost optimization of composite floors using neural dynamics model. **Communications in Numerical Methods in Engineering**, v. 17, n. 11, p. 771–787, 2001.

ALANKAR, K.; CHAUDHARY, S. Cost Optimization of Composite Beams using Genetic Algorithm and Artificial Neural Network. IN: Internacional Conference on Computer Technology and Science, 2012, Singapore. **Anais do 47 Internacional Conference on Computer Technology and Science (ICCTS) IPCSIT**, Singapore, p. 24-28, 2012.

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa operacional para cursos de engenharia**. Editora Campus, Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5884**: Perfil I estrutural de aço soldado por arco elétrico - Requisitos gerais. Rio de Janeiro: 2013.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: 2008.

CÂMARA NETO, J.; LANDESMANN, A.; BATISTA, E. M. Otimização de vigas mistas aço-concreto para condições de temperatura ambiente e incêndio. IN: XXIX Iberian Latin American Congress on computational Methods in Engineering, 2008, Maceió. **Anais do XXIX Iberian Latin American Congress on computational Methods in Engineering**. Maceió, AL, 2008.

CAMP, C.V.; HUQ, F. CO₂ and cost optimization of reinforced concrete frames using a big bang-big crunch algorithm. **Engineering Structures**, v. 48, p. 363–372, 2013.

CAMP, C.V.; ASSADOLLAHI, A. CO₂ and cost optimization of reinforced concrete footings using a hybrid big bang-big crunch algorithm. **Structural Multidisciplinary Optimization**, v. 48, n. 2, p. 411–426, 2013.

CARBONELL, A., YEPES, V.; GONZÁLEZ-VIDOSA, F. Búsqueda exhaustiva por entornos aplicada al diseño económico de bóvedas de hormigón armado. **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería**, v. 27, n. 3, p. 227-235, 2011.

COBOS, C.; ESTUPIÑÁN, D.; PÉREZ, J. GHS+ LEM: Global-best Harmony Search using learnable evolution models. **Applied Mathematics and Computation**, v. 218, p. 2558-2578, 2011.

DEB, K. **Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms**. John Wiley & Sons, Ltd, 2001.

DE CARLI, A.; PRAVIA, Z. M. C. Dimensionamento de vigas mistas esbeltas. In: 7ª ed. CONSTRUMETAL- Congresso Latino-Americano da Construção Metálica, 2016, São Paulo. **Anais do VII Congresso Latino-Americano da Construção Metálica**, São Paulo, SP, 2016.

DEGERTEKIN, S.O. A comparison of simulated annealing and genetic algorithm for optimum design of nonlinear steel space frames. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v.34, n.4, p.347–359, 2007.

DOLTSINIS, I.; KANG, Z. Robust design of structures using optimization methods. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 193, n. 23–26, p. 2221-2237, jun. 2004.

DREHMER, G. A. **Otimização de estruturas metálicas formadas por perfis “I” soldados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2005. 86 p.

DUCKSTEIN, L. **Multiobjective optimization in structural design: the model choice problem**. In: Atrek A, et al. editors. *New directions in optimal design*. John Wiley; 1984.

EHRGOTT, M.; GANDIBLEUX, X. **A survey and annotated bibliography of multicriteria combinatorial optimization**. Willey, Forthcoming, 2000.

ESCHENAUER, H.; KOSKI, J.; OSYCKAL, A., editors. **Multicriteria design optimization. Procedures and applications**. Springer-Verlag; 1990.

ESKANDARI, H.; KOROUZHDEH, T. Cost optimization and sensitivity analysis of composite beam. **Civil Engineering Journal**, v. 2, n. 2, p. 52-62, 2016.

FABEANE, R.; KRIPKA, M.; PRAVIA, Z. M. C. Composite bridges: Study of parameters of optimized design. **International Journal of Bridge Engineering**, v. 5, p. 1-20, 2017.

FAKURY, R.H.; SILVA, A. L. R. de C. e; CALDAS, R. B. **Dimensionamento básico de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 496 p., 2016.

FONSECA, C. M.; FLEMING, P. J. An overview of evolutionary algorithms in multiobjective optimization. **Evolutionary Computation**, v. 3, n. 1, p. 1–16, 1995.

FRANGOPOL, D.M.; KLISINSKI, M. Computational experience with vector optimization techniques for structural systems. In: Lecture notes in engineering, reliability and optimization of structural systems. **Anais do Proc. 3rd IFIP WG7.5 Conference**, Berkeley, California, USA, 26–28 March 1990. Eds. A. DerKiureghian, P. Thoft-Christensen, p. 99–111, 1990.

FU, G.; FRANGOPOL, D.M. Reliability-based vector optimization of structural systems. **Journal of Structural Engineering, ASCE**, v. 116, n.8, p.2143–61, 1990.

GARCÍA-SEGURA, T.; YEPES, V. Multiobjective optimization of post-tensioned concrete box-girder road bridges considering cost, CO₂ emissions, and safety. **Engineering Structures**, v. 125, p. 325–336. 2016.

GEEM, Z.W. Optimal Cost Design of Water Distribution Networks using Harmony Search. **Engineering Optimization**, v. 38, n. 3, 259–280, 2006.

GEEM, Z.W. **Optimal Scheduling of Multiple Dam System Using Harmony Search Algorithm**. Lecture Notes in Computer Science, v. 4507, p. 316–323, 2007.

GEEM, Z. W. “State-of-the-art in the structure of harmony search algorithm”: Recent Advances In Harmony Search Algorithm. **Studies in Computational Intelligence**, v. 270. p. 1–10. 2010.

GEEM, Z. W.; KIM, J. H.; LOGANATHAN, G. V. “A new heuristic optimization algorithm: harmony search”. **Simulation**, v. 76, n. 2, p. 60–68. 2001.

GEEM, Z.; KIM, J.; LOGANATHAN, G. Harmony search optimization: application to pipe network design. **International journal of modelling & simulation**, v. 22, p. 125-133, 2002.

GEEM, Z. W.; LEE, K. S.; PARK, Y. Application of harmony search to vehicle routing. **American Journal of Applied Sciences**, v. 2, p. 1552-1557, 2005.

GEEM, Z. W.; SIM, K. Parameter-setting-free harmony search algorithm. **Applied Mathematics and Computation**, v. 217, n.8, p. 3881–3889, 2010.

GILBERT, P.; WILSON, P.; WALSH, C.; HODGSON, P. The role of material efficiency to reduce CO₂ emissions during ship manufacture: A life cycle approach. **Marine Policy**, v. 75, p. 227–237, 2017.

GUPTA, T.; SHARMA, R.K. Steel concrete composite structures: state of art. **International Journal of Latest Research in Science and Technology**, v.4, n. 2, p. 149-153, mar./apr., 2015.

HERNANDEZ, S. A general sensitivity analysis for unconstrained and constrained Pareto minima in multiobjective optimization. In: 36th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference, 1995, New Orleans. **Anais do 36th**

AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference, New Orleans, USA, 1995.

HERNANDEZ, S.; FONTAN, A. **Practical Applications of Design Optimization**. WIT Press, Southampton, 2002.

HORN, J. **Handbook of Evolutionary Computation**, v. 1. Oxford University Press, Oxford, England, 1997.

JONES, M.T. **Artificial Intelligence Application Programming**. Charles River Media: Hingham (Massachusetts), 2003.

KLANSEK, U.; KRAVANJA, S. Cost estimation, optimization and competitiveness of different composite floor systems—Part 1: Self-manufacturing cost estimation of composite and steel structures. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 62, n. 5, p. 434–448, 2006a.

KLANSEK, U.; KRAVANJA, S. Cost estimation, optimization and competitiveness of different composite floor systems—Part 2: Optimization based competitiveness between the composite I beams, channel-section and hollow-section trusses. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 62, n.5, p. 449–462, 2006b.

KOROZHDEH, T.; ESKANDARI-NADDAF, H.; GHAROUNI-NIK, M. An improved ant colony model for cost optimization of composite beams. **Applied Artificial Intelligence**, v. 31, n.1, p. 44–63, 2017.

KOSKI, J. **Multicriterion optimization in structural design**. In: Atrek E, Gallagher RH, Ragsdell KM, Zienkiewicz OC, editors. *New directions in optimum structural design*. John Wiley; 1984.

KRAVANJA, S.; SILIH, S. The MINLP optimisation of composite I-beams. In: De Wilde WP, Blain WR, Brebbia CA, editors. *Computer Aided Optimum Design of Structures VII, Seventh International Conference on Computer Aided Optimum Design of Structures, OPTI 2001*, Bologna, 2001. Southampton: WIT Press; p. 401–407, 2001.

KRAVANJA, S.; SILIH, S. Optimization based comparison between composite I beams and composite trusses. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 59, p. 609–625, 2003.

KRAVANJA, S.; ZULA, T.; KLANSEK, U. Multi-parametric MINLP optimization study of a composite I beam floor system. **Engineering Structures**, v. 130 p. 316–335, 2017.

KRIPKA, M.; MEDEIROS, G. F.; LEMONGE, A. C. C. Use of optimization for automatic grouping of beam cross-section dimensions in reinforced concrete building structures. **Engineering Structures**, v. 99, p. 311–318, 2015.

LAGAROS, N.D.; FRAGIADAKIS, M.; PAPADRAKAKIS, M.; TSOMPANAKIS, Y. Structural optimization: a tool for evaluating seismic design procedures. **Engineering Structures**, v. 28, n.12, p. 1623–1633, 2006.

LEE, K.S.; GEEM, Z. W. A new structural optimization method based on the Harmony search algorithm. **Computers & Structures**, v.82, p.781–798, 2004.

LEE, K.S.; GEEM, Z. W. A new metaheuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 194, p.3902–3933, 2005.

LUOA, Y.; LI A.; KANG, Z. Reliability-based design optimization of adhesive bonded steel–concrete composite beams with probabilistic and non-probabilistic uncertainties. **Engineering Structures**, v. 33, p. 2110–2119, 2011.

MARCONCIN, L.R.; MACHADO, R.D.; MARINO, M.A. Numerical modeling of steel–concrete composite beams. **Ibracon Structures and Materials Journal**, v.3, n.4, p.449-476, 2010.

MAHDAVI, M.; FESANGHARY, M.; DAMANGIR, E. An improved harmony search algorithm for solving optimization problems. **Applied Mathematics and Computation**, v. 188, n. 2, p.1567–1579, 2007.

MANJARRES, D.; LANDA-TORRES, I.; GIL-LOPEZ, S.; DEL SER, J.; BILBAO, M. N.; SALCEDO-SANZ, S.; GEEM, Z. W. A survey on applications of the harmony search algorithm. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, 26, p. 1818-1831, 2013.

MARLER, R. T.; ARORA, J. S. Survey of Multiobjective Optimization Methods for Engineering. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 26, p. 369–395. 2004.

MARTÍNEZ, F.J.; GONZÁLEZ-VIDOSA, F.; HOSPITALER, A.; YEPES, V. Heuristic optimization of RC bridge piers with rectangular hollow sections. **Computers and Structures**, v. 88, p. 375–386, 2010.

MEDEIROS, G. F. **Método da busca harmônica aplicado na otimização de seções de pilares retangulares em concreto armado considerando custos econômicos e ambientais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2012. 124 p.

MEDEIROS, G. F. de; KRIPKA, M.. Optimization of reinforced concrete columns according to different environmental impact assessment parameters. **Engineering Structures**, v. 59, p. 185-194, 2014.

MEDEIROS, G. F.; KRIPKA, M. Modified harmony search and its application to cost minimization of RC columns. **Advances in Computational Design**, v. 2, n. 1, p.1-13, 2017.

MESSAC, A.; PUEMI-SUKAM, C.; MELACHRINOUDIS, E. Aggregate objective functions and pareto frontiers: Required relationships and practical implications. **Optimization and Engineering**, v.1, n. 2, p.171-188, 2000.

MIETTINEN, K. **Nonlinear Multiobjective Optimization**. Boston: Kluwer, 1999.

MOLINA-MORENO, F.; GARCÍA-SEGURA, T.; MARTÍ, J. V.; YEPES, V. Optimization of buttressed earth-retaining walls using hybrid harmony search algorithms. **Engineering Structures**, v. 134, p. 205-216, 2017.

MUNCK, M. DE; SVEN DE SUTTER, S. DE; VERBRUGGEN, S.; TYSMANS, T.; COELHO, R. F. Multi-objective weight and cost optimization of hybrid composite-concrete beams. **Composite Structures**, v. 134, p. 369–377, 2015.

NGUYEN, A. T.; REITER, S.; RIGO, P. A Review on Simulation-Based Optimization Methods Applied to Building Performance Analysis. **Applied Energy**, Oxford, v. 113, p. 1043-1058, 2014.

ODU, G. O.; CHARLES-OWABA, O. E. Review of Multi-criteria Optimization Methods - Theory and Applications. **IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)**, v.3, n. 10, p. 01-14, 2013.

OMRAN, M. G.; MAHDAVI, M. Global-best harmony search. **Applied Mathematics and Computation**, v. 198, p. 643-656, 2008.

PAN, Q. K.; SUGANTHAN, P. N.; TASGETIREN, M. F.; LIANG, J. J. A self-adaptive global best harmony search algorithm for continuous optimization problems. **Applied Mathematics and Computation**, v.216, p. 830-848, 2010.

PARK, H.S.; KWON, B.; SHIN, Y.; KIM, Y.; HONG, T.; CHOI, S.W. Cost and CO2 emission optimization of steel reinforced concrete columns in high-rise buildings. **Energies**, v. 6, n. 11, p. 5609–5624, 2013.

PAYÁ-ZAFORTEZA, I, YEPES V.; HOSPITALER. A; GONZÁLEZ-VIDOSA F. CO₂ - Optimization of Reinforced Concrete Frames by Simulated Annealing. **Engineering Structures**, v. 31, n.7, p. 1501-1508, 2009.

PAYÁ-ZAFORTEZA, I., YEPES V.; GONZÁLEZ-VIDOSA F.; HOSPITALER. A. On the Weibull cost estimation of building frames designed by Simulated Annealing. **Meccanica**, v. 45, p. 693-704, 2010.

PELLETIER, J. L.; VEL, S. S. Multi-objective optimization of fiber reinforced composite laminates for strength, stiffness and minimal mass. **Computers & Structures**, v. 84, n. 20-30, p. 2065-2080, 2006.

PRAVIA, Z. M. C.; FICANHA, R.; FABEANE, R. **Projeto e cálculo de estruturas de aço**. Editora Campus, 256p., 2013.

REDDY, J. N. **Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis**, 2ª ed., Boca Raton, USA: CRC Press, 2004.

REIS, A. dos; ALBUQUERQUE, É. L.; TORSANI, F. L.; PALERMO JR., L.; SOLLERO, P. Computation of moments and stresses in laminated composite plates by the boundary element method. **Engineering Analysis with Boundary Elements**, v. 35, p. 105-113, 2011.

ROSÇA, V. E.; AXINTE, E.; TELEMANN, E.C. Practical optimization of composite steel and concrete girders. Buletinul Institutului Politehnic din Iasi, **Sectia Constructii. Arhitectura**, Tomul LVII, fasc. 1, p. 85-98, 2012.

RYU, S.; DUGGAL, A.S.; HEYL, C.N.; GEEM, Z.W. Mooring Cost Optimization via Harmony Search. Proceedings of the 26th ASME International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2007. **Anais do 26th ASME International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, (OMAE 2007), June 2007, San Diego, CA, USA, 2007.

SANTORO, J. F.; KRIPKA, M. Determinação das emissões de dióxido de carbono das matérias primas do concreto produzido na região norte do Rio Grande do Sul. **Ambiente Construído (Online)**, v. 16, p. 35-49, 2016.

SARAMAGO, S. P.; STEFFEN, JR. Introdução às técnicas de otimização em engenharia. **Horizonte científico**, v.2, n.2, 2008.

SAKA, M.P. Optimum Geometry Design of Geodesic Domes Using Harmony Search Algorithm. **Advances in Structural Engineering**, v. 10, n. 6, p. 595–606, 2007.

SENOUCI, A. B.; AL-ANSARI, M. S. Cost optimization of composite beams using genetic algorithms. **Advances in Engineering Software**, v. 40, p. 1112–1118, 2009.

SILVA, A. R.; SOUSA JUNIOR, J. B. M.; NEVES, F. de A. das. Otimização do perfil I de aço de vigas mistas aço concreto com interação parcial. In: MECOM-CILAMCE 2010 IX Congreso Argentino de Mecánica Computacional -Congreso Ibero Latino Americano de Métodos Computacionales em Engenharia, 2010, Buenos Aires. **Anais do XXIX Mecánica Computacional**. Buenos Aires: AMCA - Asociación Argentina de Mecánica Computacional, p.7609 – 7625, 2010.

SINAPI- Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil. **Relatório de Insumos e Composições - ABR/18 – com desoneração**. Disponível em: <http://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_660>. Acesso em: 3. Jun.2018.

STADLER, W. **Preference optimality and applications of pareto optimality, multicriteria decision making**. CISM courses and lectures. In: Leitmann G, Marzollo, editors, n. 211, Springer-Verlag, 1975.

SOUSA JUNIOR, J. B. M. Planilha de cálculo de Viga Mista. **Centro Brasileiro de Construção em Aço**, Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, v.1, ago. 2008.

SUJI, D.; NATESAN, S.C.; MURUGESAN, R.; PRABHUD, R.S. Optimal design of fibrous concrete beams through simulated annealing. **Asian Journal of Civil Engineering (Build Hous)**, v. 9, n. 2, p. 193–213, 2008.

TOLLO, G. di; ROLI, A. Metaheuristics for the Portfolio Selection Problem. **International Journal of Operations Research**, v. 5, n. 1, p. 13-35, 2008.

VANDERPLAATS, G. **Numerical optimization technique for engineering design - with applications**. McGraw-Hill Book Company, New York, 1984.

VASEBI, A.; FESANGHARY, M. AND BATHAEAA, S.M.T. Combined Heat and Power Economic Dispatch by Harmony Search Algorithm. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 29, n.10, p. 713–719, 2007.

VELDHUIZEN, D. A. V.; LAMONT, G. B. Multiobjective evolutionary algorithms: analyzing the state-of-the-art. **Evolutionary Computation**, v. 8, n. 2, p. 125 147, 2000.

VOß, S. Meta-heuristics: The state of art. **Lecture Notes in Computer Science**, 2148, p. 1–23, 2001.

WANG, X.; YAN, X. Global best harmony search algorithm with control parameters co-evolution based on PSO and its application to constrained optimal problems. **Applied Mathematics and Computation**, v. 219, p. 10059-10072, 2013.

YANGJUN, L.; LI, A. Design optimization of bonded steel-concrete composite beams. **World Journal of Engineering**, v.9, n.1, p. 23-30, 2012.

XIANG, W.-L.; AN, M.-Q.; LI, Y.-Z.; HE, R.-C.; ZHANG, J.-F. An improved global best harmony search algorithm for faster optimization. **Expert Systems with Applications**, v. 41, p. 5788-5803, 2014.

YEO, D.; POTRA, F.A. Sustainable design of reinforced concrete structures through CO2 emission optimization. **Journal of Structural Engineering**, v. 141, n.3, p. 1–7, 2015.

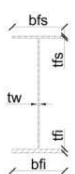
YEPES, V.; MEDINA, J.R. Economic heuristic optimization for the heterogeneous fleet VRPHESTW. **Journal of Transportation Engineering**, ASCE, v. 132, n. 4, p. 303-311, 2006.

YEPES, V.; GONZÁLEZ-VIDOSA F; ALCALÁ, J.; VILLALBA, P. CO₂-Optimization Design of Reinforced Concrete Retaining Walls Based on a VNS-Threshold Acceptance Strategy. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 26, n. 3, p. 378–386, 2012.

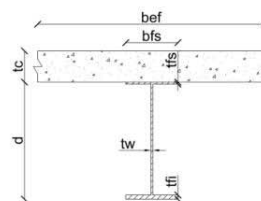
YEPES, V.; MARTÍ, J.V.; GARCÍA-SEGURA, T. Cost and CO₂ emission optimization of precast–prestressed concrete U-beam road bridges by a hybrid glowworm swarm algorithm. **Automation in Construction**, v. 49, p. 123–134, 2015.

ZHENG, S.; LOU, H.; LI, L.; LI, Z.; WANG, W. Optimization design of steel-concrete composite beams considering bond-slip effect. **Advanced Materials Research**, vols. 243-249, p 379-382, 2011.

APÊNDICE A - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE VERIFICAÇÃO DE VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO



Dimensões da seção de aço



Dimensões viga mista

PROPRIEDADES DO CONCRETO

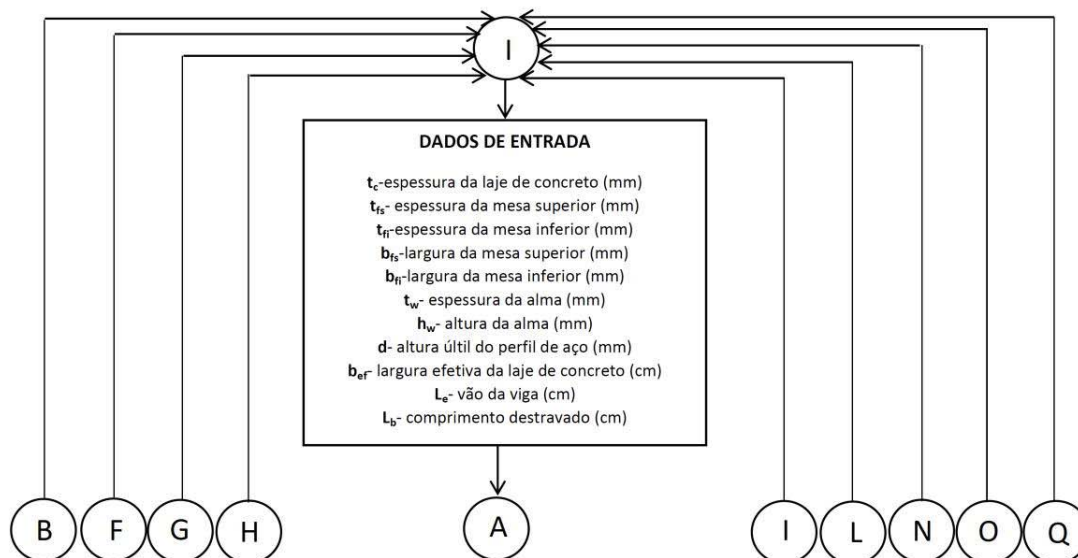
f_{ck} - resistência característica do concreto (kN/cm²)
 E_c -módulo de elasticidade do concreto (kN/cm²)

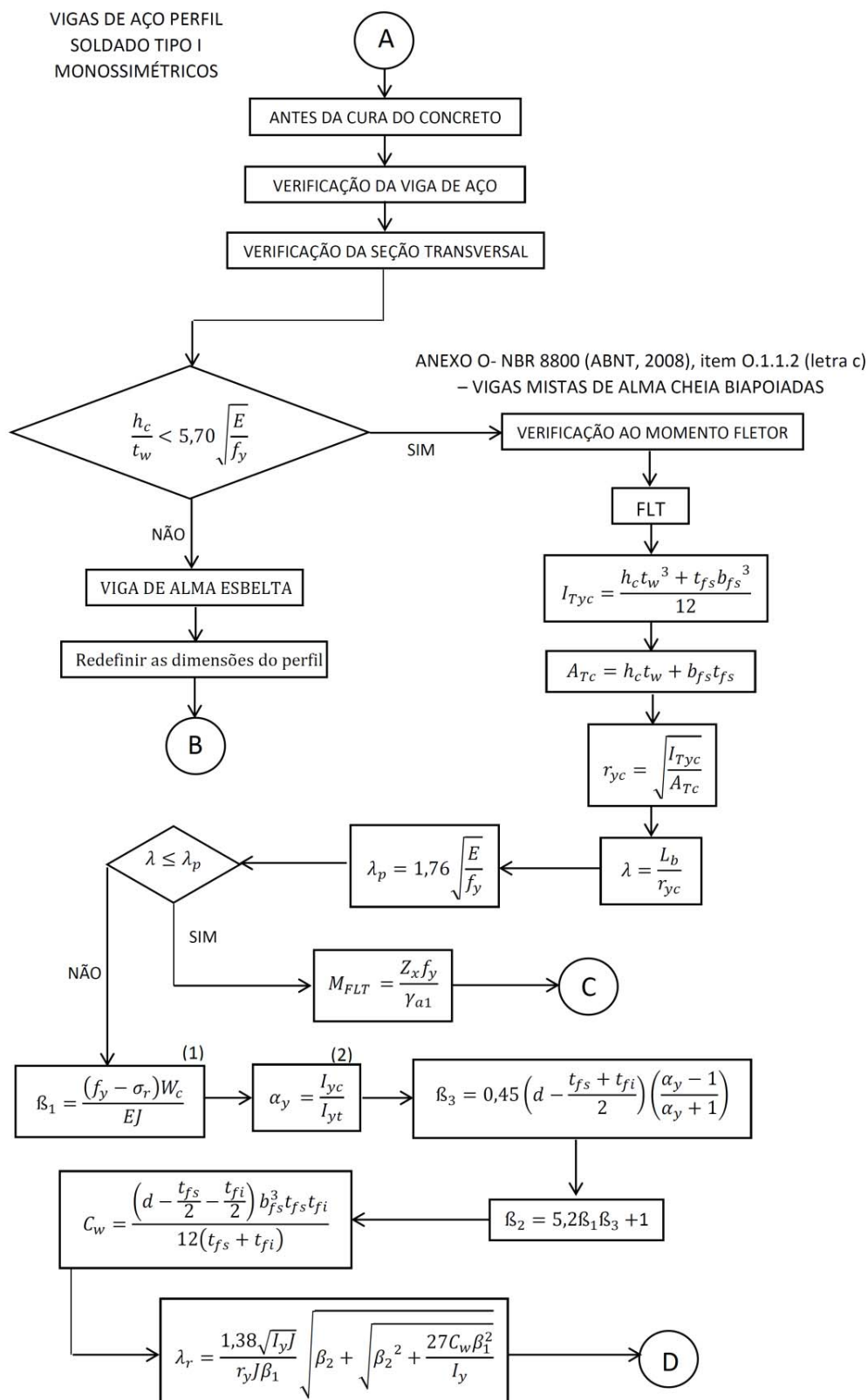
PROPRIEDADES DO AÇO

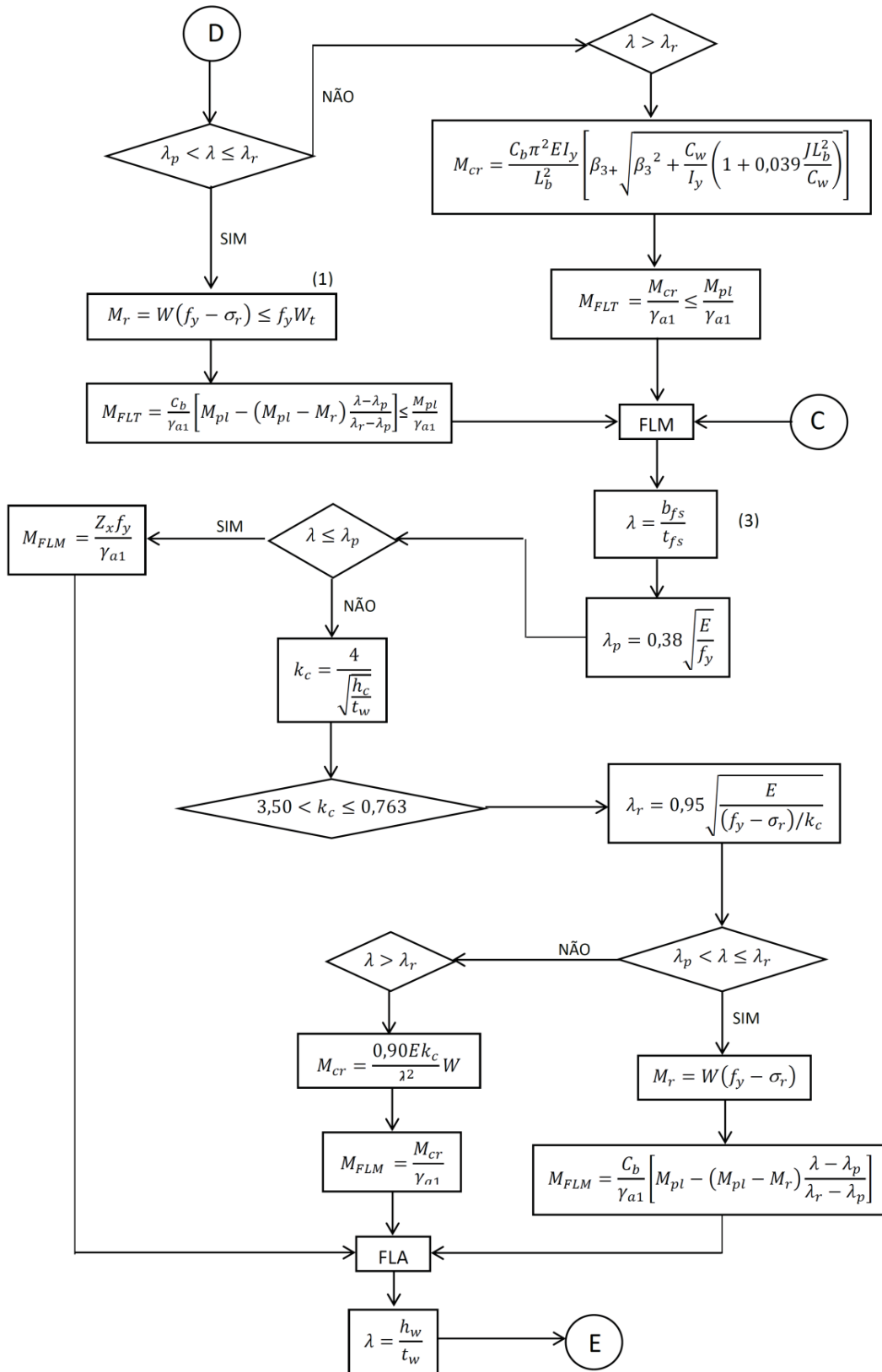
f_y -tensão de escoamento do aço (kN/cm²)
 E_s -módulo de elasticidade do aço (kN/cm²)
 A_{cs} - área da seção transversal do fuste do conector (cm²)
 f_{ucs} - limite de resistência à tração do aço do conector (kN/cm²)
 d_{cs} - diâmetro nominal do conector (cm)

COEFICIENTES DE PONDERAÇÃO

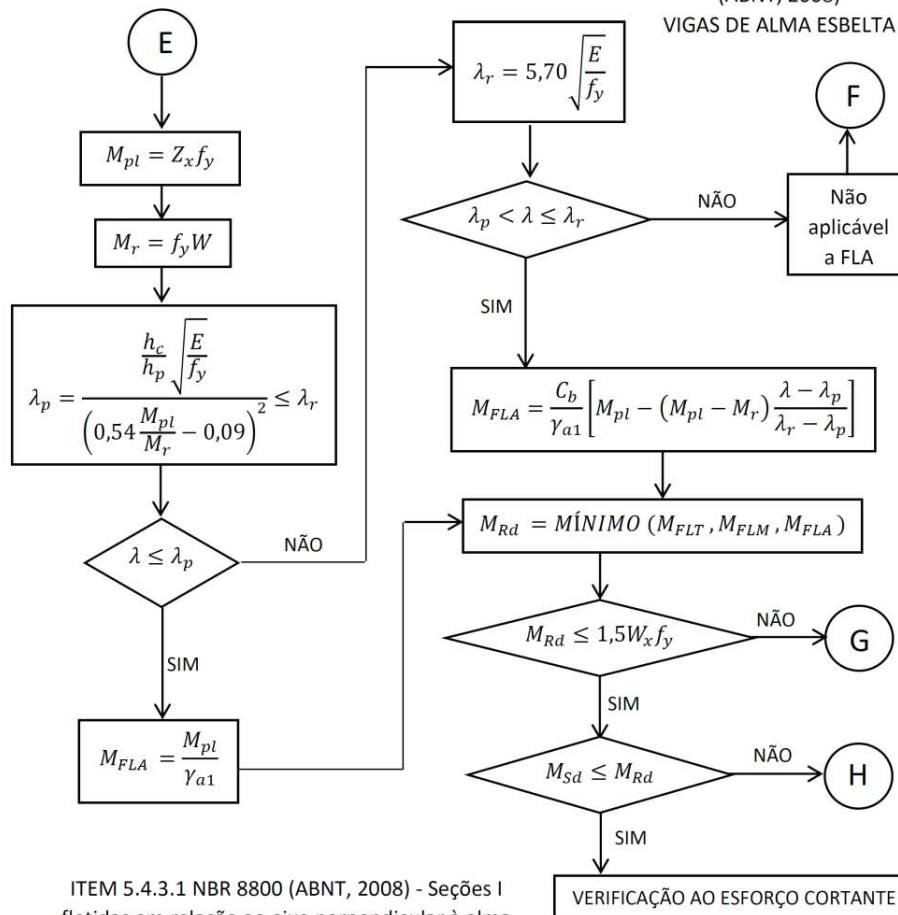
γ_c - coeficiente de minoração da resistência à compressão do concreto
 γ_{s1} - coeficiente de ponderação de resistência do aço para escoamento
 γ_{cs} - coeficiente para consideração da posição do conector
 C_b - fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme
 R_g - coeficiente de ajuste para a consideração do efeito de atuação de grupos e conectores
 R_p - coeficiente para consideração da posição do conector
 γ_g - coeficiente de ponderação das ações permanentes
 γ_q - coeficiente de ponderação das ações variáveis
 k_v - coeficiente de flambagem da alma por cisalhamento



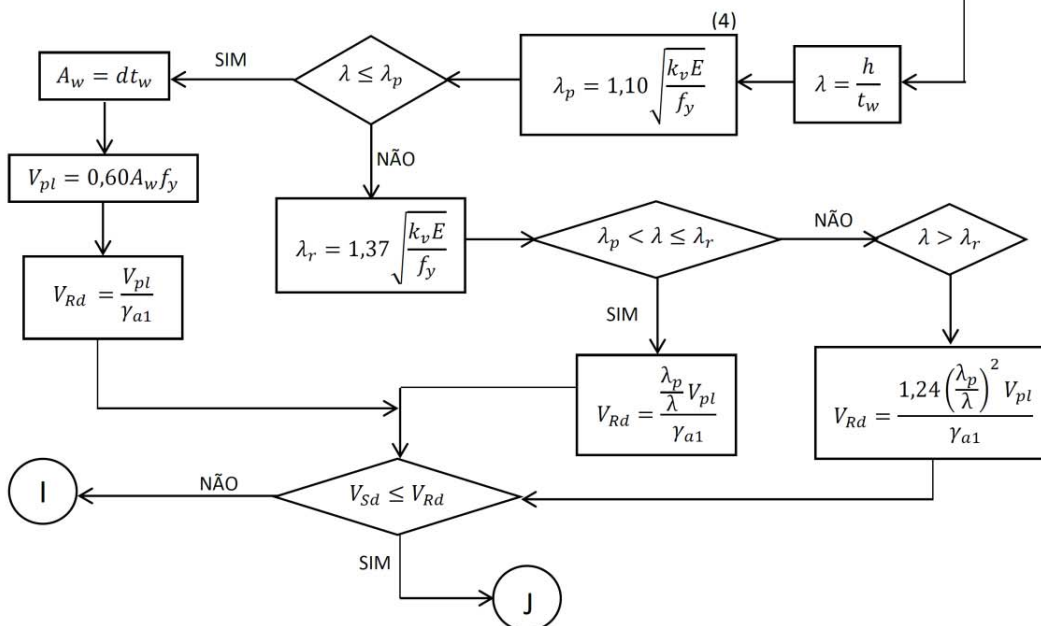


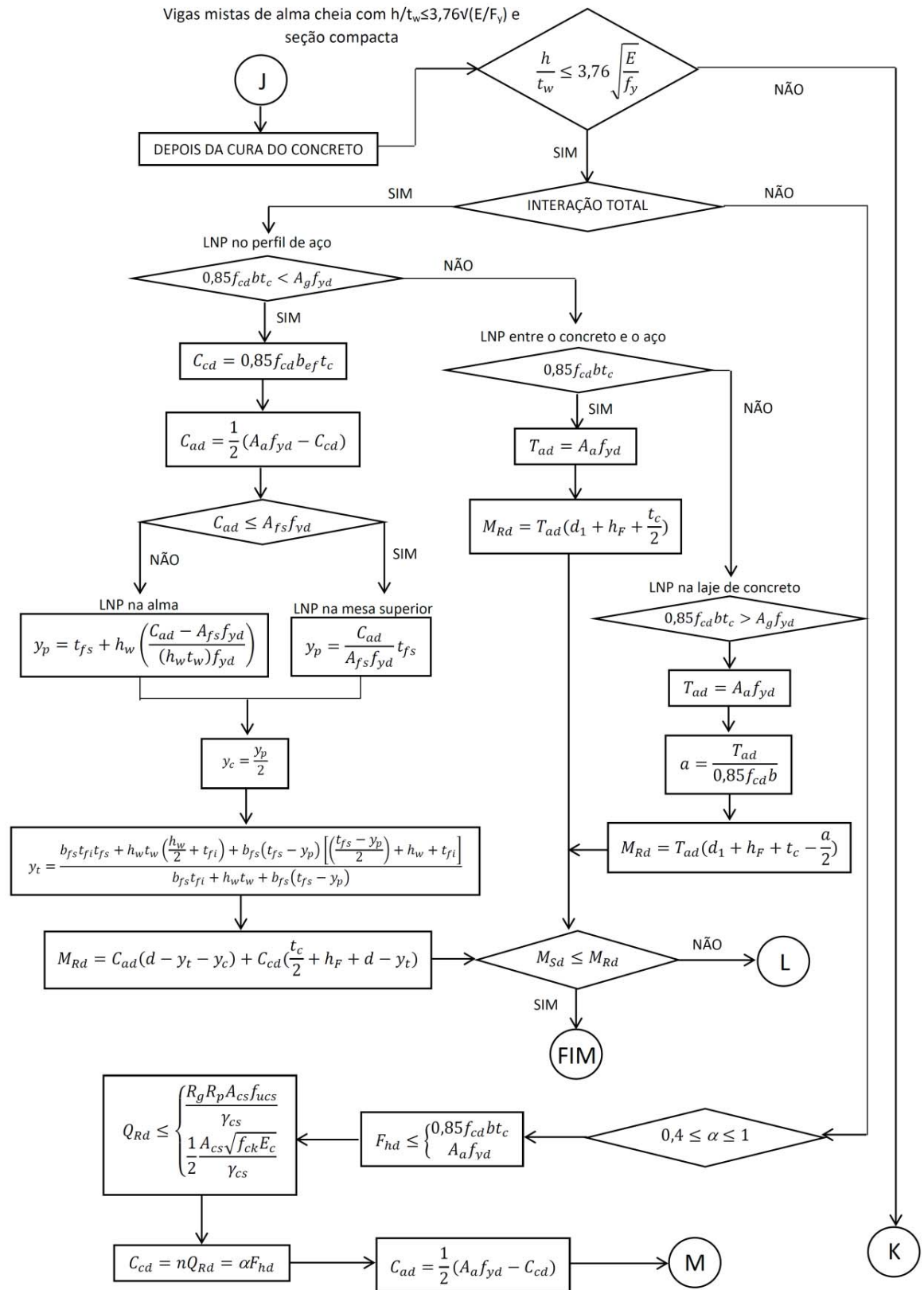


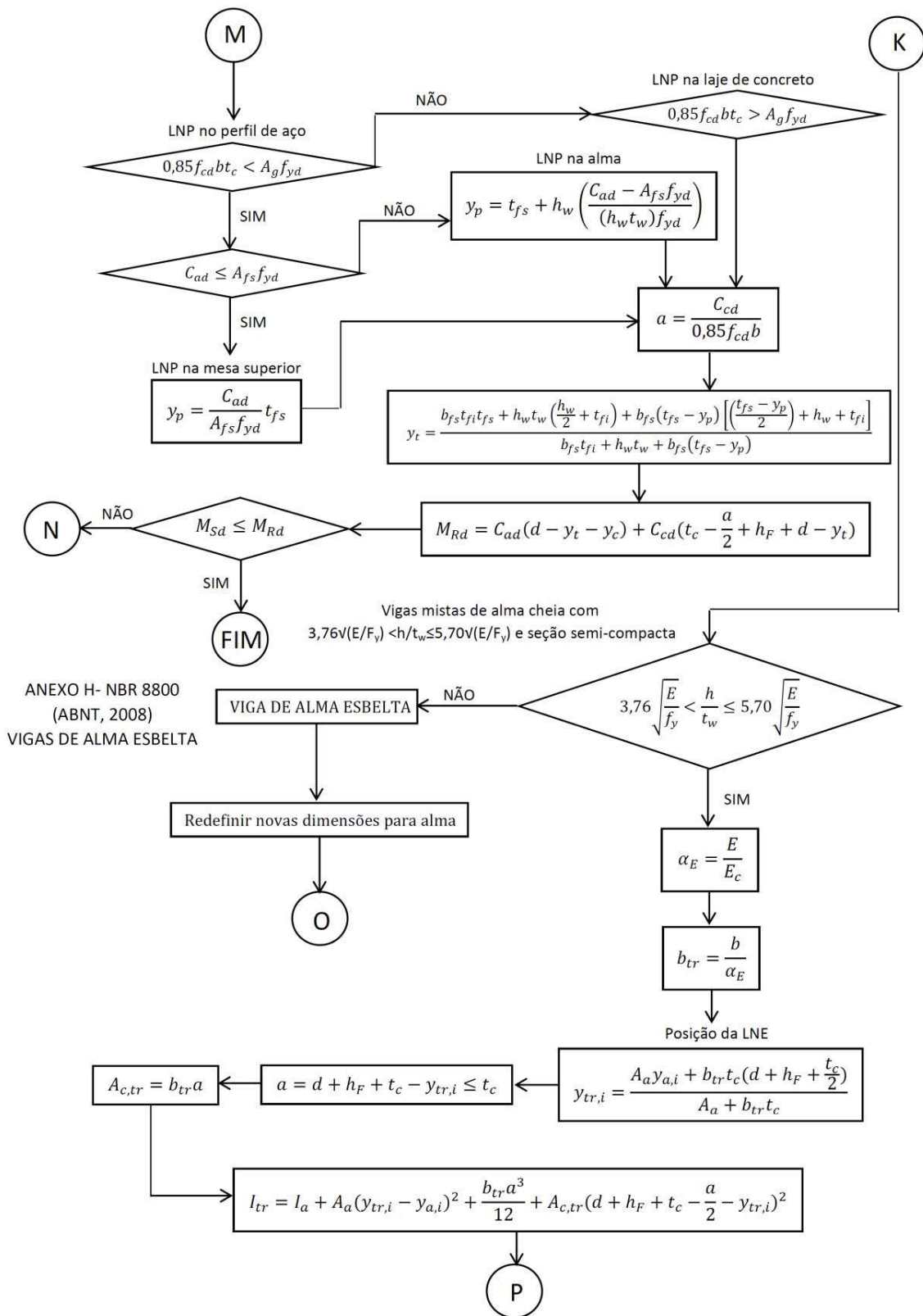
ANEXO H- NBR 8800
(ABNT, 2008)
VIGAS DE ALMA ESBELTA

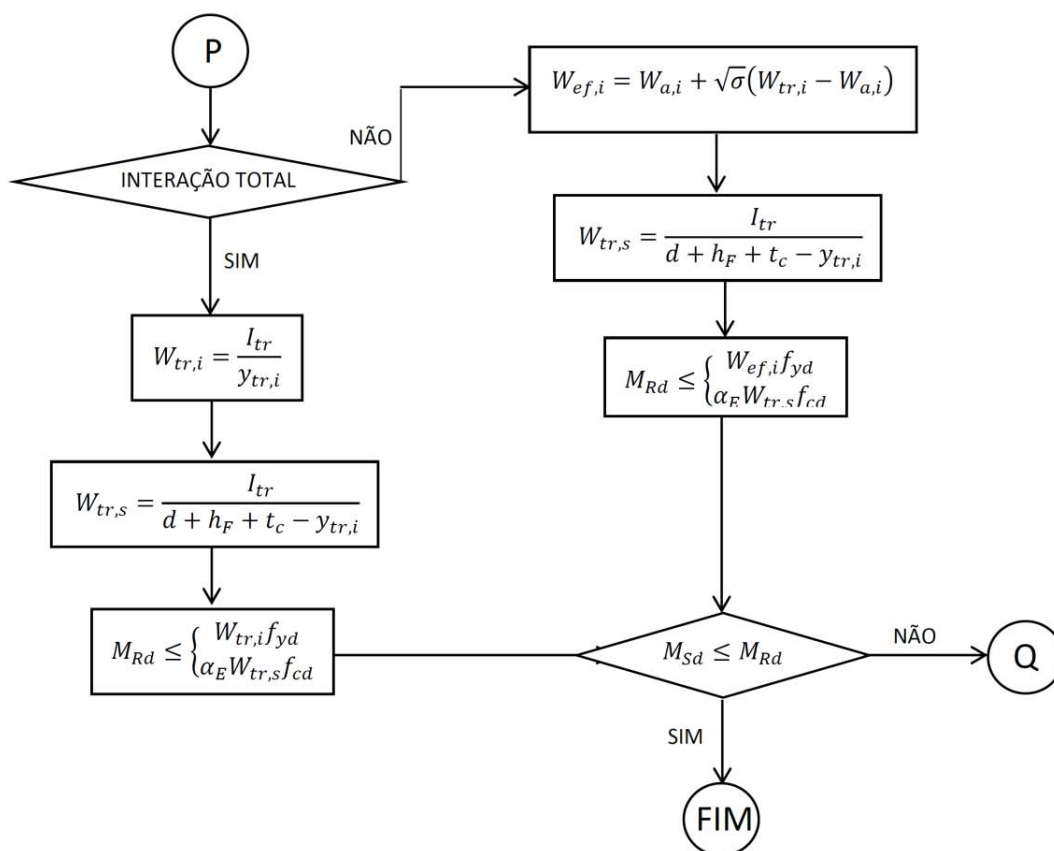


ITEM 5.4.3.1 NBR 8800 (ABNT, 2008) - Seções I fletidas em relação ao eixo perpendicular à alma







**NOTAS**

- (1) A tensão residual das mesas, σ_r , deve ser igual a 30% da resistência ao escoamento do aço.
- (2) Sendo $1/9 \leq \alpha_y < 9$.
- (3) No caso de seções I e H com um eixo de simetria, b/t refere-se à mesa comprimida (para mesas de seções I e H, b é a metade da largura total).
- (4) O coeficiente de flambagem da alma por cisalhamento (k_v), para almas sem enrijecedores transversais é igual a 5,0.