



DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO.

Tatiana A. Rodrigues

Amilton R. da Silva

tati10rodr@gmail.com

amilton@em.ufop.br

Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto

Campus Universitário s/n, Morro do Cruzeiro, 35400-000, Ouro Preto, MG, Brasil

Abstract. *Nesse trabalho, é utilizado um elemento de barra em conjunto com um elemento de interface para análise não linear de vigas mistas aço-concreto com interação parcial. O objetivo é montar um algoritmo que utilize essas ferramentas de análise para dimensionar vigas mistas aço-concreto buscando um projeto otimizado em termos de gastos dos materiais. Este algoritmo de otimização definirá um perfil de aço, as dimensões da seção transversal retangular da laje de concreto e a quantidade e diâmetro das barras de reforço da laje de concreto, de forma que, a quantidade desses materiais sejam as mínimas necessárias para resistirem aos esforços solicitantes e garantirem a segurança estrutural, considerando os estados limites último e de serviço. As restrições de projeto são aquelas definidas em normas, assim como restrições laterais referentes às dimensões limites das peças e do tamanho do passo do algoritmo de otimização não linear. A função objetivo é definida como sendo o custo por metro linear da viga mista, obtida a partir do custo de cada material. No processo de otimização é utilizado o método iterativo de programação linear sequencial, onde o problema não linear de definição das variáveis de projeto é aproximado por uma sequência de problemas lineares, que tem seu ponto ótimo definido a cada passo com a utilização do método Simplex.*

Keywords: *Otimização, Dimensionamento, Vigas mistas, Método Simplex, Análise não linear*

1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios para os engenheiros estruturais é realizar projetos eficientes e econômicos sem que comprometam a integridade da estrutura. Nos últimos anos, com a crescente competitividade existente no mercado, tem-se incentivado ainda mais a elaboração de projetos que buscam a redução de consumo de material utilizado na construção, reduzindo os custos dos empreendimentos. Assim, pretende-se encontrar a melhor combinação que torne o elemento estrutural mais econômico possível, mas com a certeza que os princípios de segurança, com respeito aos estados limites último e de serviço e as imposições de normas técnicas serão atendidos.

Com o uso progressivo de ferramentas computacionais e o aumento da utilização da mecânica computacional para a resolução de problemas de análise estrutural, os processos de otimização têm se tornado uma importante ferramenta à disposição da engenharia estrutural. Essas facilidades computacionais existentes atualmente, podem auxiliar os engenheiros estruturais a elaborarem projetos com mais qualidade e competitividade, uma vez que a segurança estrutural, associado à economia, será alcançada com maior precisão.

Um problema de otimização consiste em extremizar a função objetivo, ou seja, determinar um conjunto de variáveis e parâmetros das quais essa função é dependente, de modo a encontrar seu valor máximo ou mínimo, sujeita a algumas restrições, que a partir de um processo sistemático de busca, pode-se encontrar os melhores dimensionamentos e resultados e a melhor solução entre as inúmeras possíveis.

As seções mistas aço-concreto estão cada vez mais sendo utilizadas nas obras de engenharia civil, tanto no cenário mundial quanto no Brasil. Em edifícios de múltiplos pavimentos é comum associar as vigas de aço à laje de concreto por meio de conectores. Nesses casos, o trabalho em conjunto do perfil de aço e da laje de concreto aumenta consideravelmente o desempenho do elemento estrutural misto devido ao aproveitamento das vantagens de cada material. De acordo com Queiroz et. al. (2001), o comportamento misto é desenvolvido quando dois elementos estruturais são ligados de tal forma a se deformarem como um único elemento. Os conectores de cisalhamento, ligam esses dois elementos permitindo uma transferência de esforço cortante da laje para a viga e da viga para a laje e também impedem a separação vertical dos componentes.

Diversos elementos para análise numérica não linear de vigas mistas aço-concreto com interação parcial tem sido desenvolvidos. Kotinda (2006) apresentou modelos numéricos tridimensionais de vigas mistas que permitiu simular satisfatoriamente o seu comportamento estrutural, principalmente no que se refere à interface entre viga de aço e laje de concreto. Moreno (2010) desenvolveu formulações numéricas para análise de elementos mistos utilizando elementos finitos de barra, considerando as não linearidades física e geométrica.

Neste estudo, é utilizado um elemento de barra em conjunto com um elemento de interface para análise não linear de vigas mistas aço-concreto com interação parcial apresentado por Silva (2006, 2010). O objetivo é montar um algoritmo que utilize essas ferramentas de análise para dimensionar vigas mistas aço-concreto buscando um projeto otimizado em termos de gastos dos materiais.

De acordo com Coutinho (2006), os primeiros estudos relacionados à otimização estrutural originaram-se com Maxwell (1872), onde tinha como objetivo buscar o menor volume para

estruturas uniaxiais submetidas a carregamentos e Michell (1904) deu continuidade à pesquisa de Maxwell, no qual buscava o critério de máxima rigidez com mínimo material para configuração estrutural de treliça.

Com o passar do tempo, houve um considerável avanço nesta área e o número de estudos no campo da otimização tem-se tornado cada vez mais aplicável na engenharia estrutural. Senouci *et al.* (2009) apresentaram um modelo de algoritmo genético para a otimização de custos de vigas mistas. Para este fim, o presente modelo foi formulado em duas etapas principais: a primeira é determinar as principais variáveis que afetam na decisão do desenho das vigas mistas e a segunda é formular a otimização do custo total deste tipo de viga. Neto *et al.* (2008) retrataram uma metodologia numérica-computacional para otimização do custo de vigas metálicas e mistas (aço-concreto) para verificação de condições em temperatura ambiente e incêndio.

Já no trabalho de Silva *et al.* (2010) foi apresentado um processo para a determinação das dimensões do perfil de aço do tipo I de vigas mistas, de forma que a área da seção transversal de aço fosse mínima e as restrições de projeto, definidas por normas, fossem satisfeitas. Silva *et al.* (2011) apresentaram a otimização de vigas mistas aço-concreto com interação parcial através do método Simplex. As variáveis de projetos foram consideradas sob duas abordagens. Na primeira, só os parâmetros que definem a seção transversal do perfil I do aço variam e na segunda abordagem, além desses parâmetros, consideram-se também aqueles que definem a seção do concreto.

2 METODOLOGIA

A metodologia da pesquisa baseia-se na criação de um algoritmo de otimização para o dimensionamento de vigas mistas aço-concreto através da utilização do software comercial Visual Studio 2015, utilizando-se das formulações implementadas dentro do programa de elemento finitos FEMOOP (Finite Element Method Object Oriented Program). Determinado os vãos, apoios, carregamentos para verificação última e serviço para a viga analisada, um algoritmo de otimização é utilizado para definir um perfil de aço, as dimensões da seção transversal retangular da laje de concreto e a quantidade e diâmetro das barras de reforço da laje de concreto, de forma que, a quantidade desses materiais sejam as mínimas necessárias para resistirem aos esforços solicitantes e garantirem a segurança estrutural, considerando os estados limites último e de serviço e atendendo a todas as restrições de projeto.

2.1 Otimização

A otimização estrutural tem por objetivo a busca dos melhores valores de certas variáveis que levem a projetos ótimos, ao passo que todas as restrições impostas sejam satisfeitas (Cheng, 1992). Nessa pesquisa, o projeto ótimo será o dimensionamento de vigas mistas compostas por uma laje de concreto interligada a um perfil de aço tipo I por meio de conectores de cisalhamento sujeita a flexão. Para esse fim, será utilizado o método da programação linear sequencial em conjunto ao método Simplex.

Na programação sequencial linear é usado a expansão em série de Taylor truncada no termo de primeira ordem para que as funções objetivos e restrições sejam transformadas de problema não linear em uma sequência de problemas lineares. Conhecido um ponto que atenda as

restrições do problema, é definido um novo ponto na direção do ponto de ótimo determinando a direção de busca como sendo o ponto que minimiza um problema linear restrito, utilizando o método Simplex. Para isso, incluíram-se restrições referentes ao tamanho do passo para garantir que essas aproximações não sejam insatisfatórias.

Para utilizar os métodos de otimização e ter sucesso em seus resultados, deve-se definir de maneira bem clara a função objetivo, as variáveis de projeto e as restrições do problema em questão. Esses itens serão definidos para o problema proposto nesse trabalho, a seguir.

2.2 Função objetivo

É a função que se deseja determinar o seu mínimo ou o seu máximo. Na maioria dos problemas práticos essa função está relacionada com o custo total do produto. Nesse trabalho o objetivo é determinar o custo mínimo de vigas mistas aço-concreto, sendo assim, deve-se determinar o mínimo da função objetivo dada pela Eq. (1), onde: b largura da laje de concreto, h altura da laje de concreto, C_c custo do concreto, b_{fi} largura da mesa inferior, t_{fi} espessura da mesa inferior, b_{fs} largura da mesa superior, t_{fs} espessura da mesa superior, b_w largura da alma, t_w espessura da alma, C_a custo do aço do perfil, A_{s1} e A_{s2} áreas de armadura de reforço da laje de concreto superior e inferior e por fim C_b custo do aço das barras de reforço da laje de concreto.

$$f(x) = (b \cdot h) C_c + (b_{fi} \cdot t_{fi} + b_{fs} \cdot t_{fs} + b_w \cdot t_w) C_a + (A_{s1} \cdot A_{s2}) C_b \quad (1)$$

2.3 Variáveis de projeto

As variáveis de projeto são aquelas que sofrem alterações durante todo o processo de otimização e estas podem ser de dois distintos tipos: as variáveis discretas e as variáveis contínuas. As variáveis discretas podem assumir apenas valores inteiros, ou seja, índices que são associados a descrição do problema, como, por exemplo, a quantidade de barras de armadura necessárias no reforço da laje de concreto. As variáveis contínuas, podem assumir um valor real qualquer dentro de um determinado intervalo, como, por exemplo, o diâmetro de uma armadura pode ser considerado um valor real qualquer maior que zero.

Neste trabalho, no processo de otimização as variáveis de projeto são contínuas sendo elas os parâmetros que definem a seção transversal da viga de aço de perfil I, a seção retangular de concreto e a área das barras de reforço da laje de concreto, como são mostradas na Fig. 1.

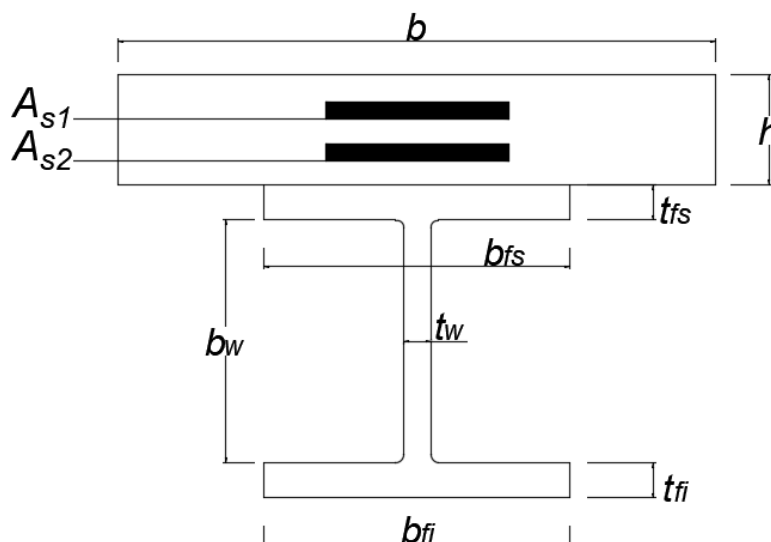


Figura 1 - Variáveis de projeto do problema

No método Simplex, as variáveis são consideradas contínuas e o ponto de ótimo provavelmente definirá um perfil de aço com dimensões não comerciais, assim como dimensões da laje de concreto não usuais. Para evitar isso, foi implementado um algoritmo que, após a definição do ponto de ótimo, fixa o valor de uma variável conforme uma lista disponível e mais próximo do valor obtido pelo método Simplex. Logo após, essa variável é eliminada do problema e este é reanalisado, definindo novos valores para as outras variáveis, e assim sucessivamente até que todas as variáveis de projetos sejam definidas conforme seus valores comerciais e usuais.

2.4 Restrições de projeto

De acordo com Sias (2014), para a completa definição do problema devem-se determinar as restrições na qual o problema possui, definindo assim os limites nos quais o algoritmo desenvolvido irá trabalhar para achar o ponto de ótimo. As restrições é um conjunto de requisitos especificados e condições que devem ser satisfeitas para que o projeto seja aceitável. Pode-se dizer também que são funções de igualdade ou desigualdade das variáveis de projeto que descrevem situações de projeto que devem ser atendidas.

Definidas as propriedades dos materiais de acordo com especificações técnicas (ABNT NBR6118, 2014, ABNT NBR8800, 2008) deve-se determinar a carga limite última e de serviço que a viga mista suporta. Esses dois valores são comparados com parâmetros de entrada do usuário e definem duas restrições de projeto. Nesse trabalho serão utilizados apenas perfis compactos, dessa forma, a esbeltez da mesa e alma do perfil I será limitada através das restrições referentes a flambagem local da mesa e flambagem local da alma. Outras restrições que devem ser consideradas são referentes às restrições laterais, as quais são os limites inferiores e superiores das dimensões da laje de concreto, do perfil I de aço e das áreas das áreas de armadura de reforço da laje de concreto. Devido o uso do método da programação linear sequencial que utiliza aproximações lineares das funções objetivo e restrições, deve ser considerada uma restrição lateral para o tamanho do passo.

2.5 Ponto de partida

No método de programação sequencial, seja quadrática ou linear, deve ser fornecido ao algoritmo de análise um ponto de partida que atenda a todas as restrições de projeto. Nesse trabalho o usuário deve fornecer uma seção que satisfaça as exigências das dimensões limites da laje de concreto, perfil de aço e área de armadura da laje de concreto. Caso os valores inseridos não satisfaçam as exigências de esbeltez das mesas e alma e as exigências referentes ao carregamento último e de serviço, a seção é alterada pelo algoritmo e tem suas dimensões aumentadas em um processo iterativo até que todas as restrições sejam satisfeitas. Esta seção alterada pelo algoritmo e que atende a todas as exigências mencionadas torna-se um ponto de partida para o procedimento de otimização.

3 FORMULAÇÕES NUMÉRICAS

Como mencionado na introdução, é utilizado nesse trabalho, um elemento de barra em conjunto com um elemento de interface para análise não linear de vigas mistas aço-concreto com interação parcial. O elemento de barra simula a laje de concreto e a viga de aço, já o elemento de interface tem a função de conectar os elementos de barra e simular a conexão deformável na interface de contato entre a laje de concreto e o perfil de aço. Aspectos das formulações desses elementos são descritas nos parágrafos seguintes.

A discretização do contínuo através da utilização do método dos elementos finitos nos métodos numéricos possibilita, através de formulações variacionais ou utilizando o princípio dos trabalhos virtuais, a definição de uma formulação fraca para o problema analisado. Com a aproximação de funções de interpolação dos deslocamentos nodais dos elementos pode-se obter uma solução aproximada para o problema analisado, através da formulação fraca. A convergência do método numérico deve ser garantida de tal forma que com o aumento da discretização do contínuo, a solução da formulação se aproxima cada vez mais da solução real do problema.

O elemento de barra utilizado tem dois nós e três graus de liberdade por nó. Na sua formulação é considerada a teoria de vigas de Euler-Bernoulli sendo, portanto, adotadas funções de forma polinomiais de grau 3 para deslocamentos transversais e rotações e grau 1 para deslocamentos axiais. No cálculo das rigidezes a flexão e axial do elemento é usado um processo analítico que transforma as integrais de área em integrais de contorno (Silva, 2010).

Os deslocamentos nodais relativos, horizontal e vertical, do elemento de interface implementado, são interpolados por funções de forma polinomiais lineares e cúbicas, respectivamente. Essas funções de forma, em conjunto com dois elementos de viga com funções de interpolação de mesma ordem, garantem a boa funcionalidade do elemento quando utilizado em um método de elementos finitos (Silva, 2006).

Os deslocamentos relativos horizontal e vertical do elemento de interface permitem tanto a separação vertical quanto o deslizamento na interface de contato entre os materiais da viga mista. Para a consideração de interação total em relação as duas direções, deve ser considerada uma alta taxa de variação (rigidez) para as curvas força por unidade de comprimento versus deslocamento relativo, horizontal ou vertical, na interface. Como neste trabalho considera-se que não há separação vertical da interface de contato entre os materiais, então será sempre

considerada uma alta taxa de variação para a curva que caracteriza a relação força por unidade de comprimento versus deslocamento relativo vertical (Silva, 2006).

Em Silva (2006, 2010) pode-se encontrar todas as particularidades e informações necessárias para o entendimento da formulação usada, bem como equação dos deslocamentos relativos do elemento de interface, a formulação do problema de equilíbrio e o modelo de elementos finitos em deslocamentos. O autor utilizou como base para implementação computacional dos elementos o programa FEMOOP.

4 VALIDAÇÃO DO MODELO

Dall'Asta e Zona (2004) analisaram a capacidade de carga da viga mista com interação parcial mostrada na Fig. 2. Os autores utilizaram em sua análise numérica um elemento finito de barra com dez graus de liberdade capaz de simular a não linearidade física dos materiais. As relações constitutivas dos materiais usadas por Dall'Asta e Zona (2004) são apresentadas na Fig. 3.

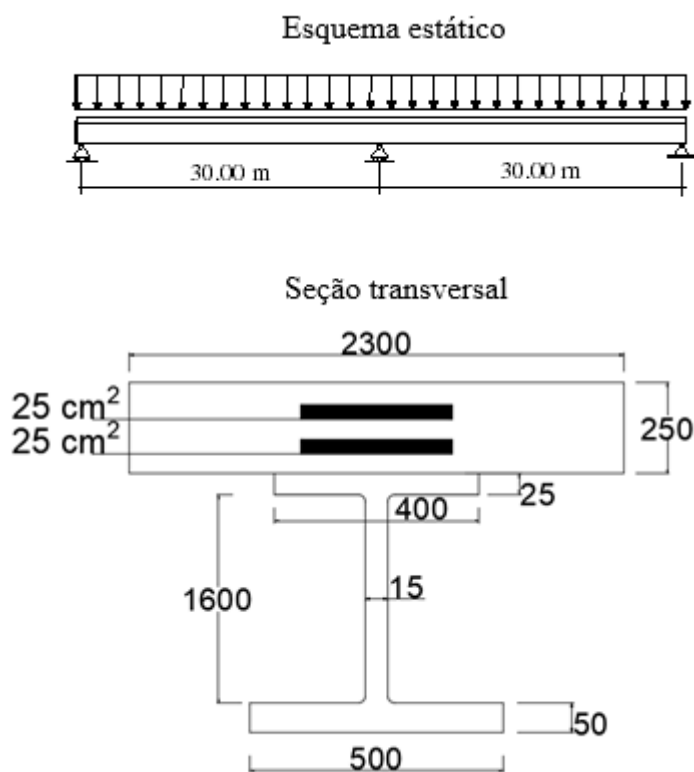


Figura 2 - Viga mista com interação parcial (adaptada de Dall'Asta e Zona, 2004)

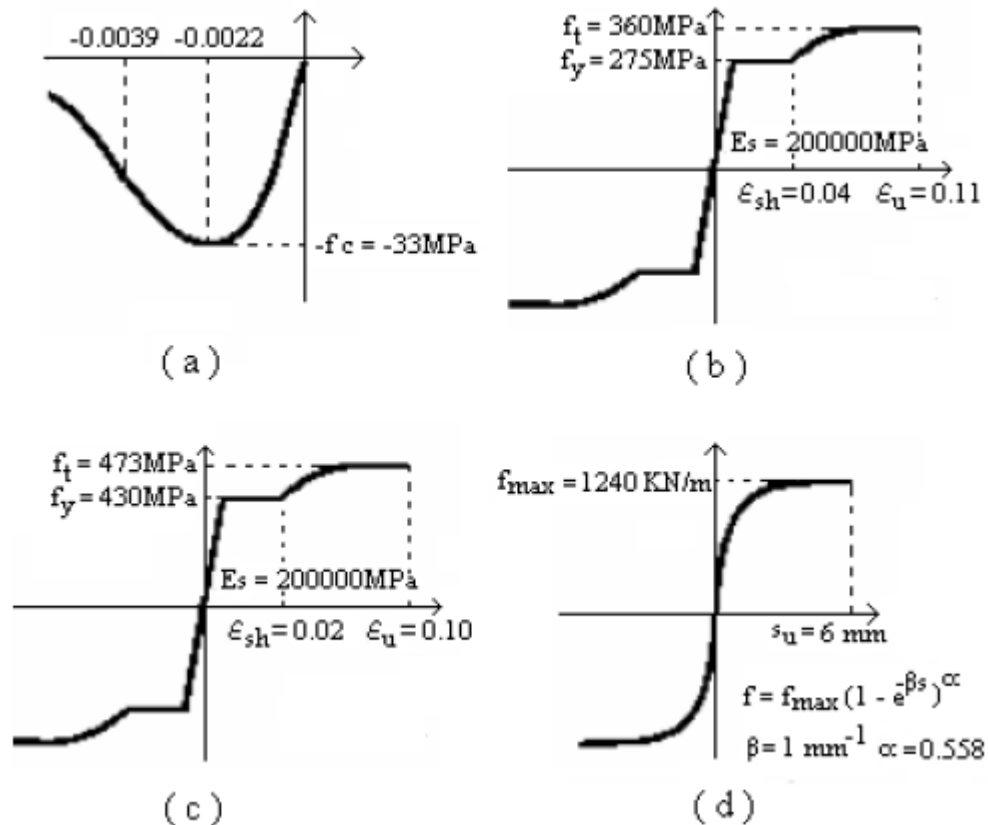


Figura 3 - Leis constitutivas: concreto (a), aço (b), barras de reforço (c) e conexão da interface (d) (Dall'Asta e Zona, 2004)

O exemplo da Fig. 2 foi analisado também por Souza e Silva (2007). Os resultados numéricos obtidos por Dall'Asta e Zona (2004) e Souza e Silva (2007) são mostrados na Fig. 4, onde são apresentadas as curvas que relacionam o carregamento aplicado ao deslocamento vertical do meio dos vãos da viga.

Da Fig. 4 observa-se que o carregamento uniformemente distribuído máximo suportado pela viga mista analisada é de $237,4\text{ kN/m}$. Esse valor será utilizado como carregamento solicitante em uma viga mista contínua com as mesmas configurações da viga mostrada na Fig. 2 para a qual será definida uma seção inicial qualquer e o algoritmo de otimização fornecerá uma seção com laje de concreto armado igual a seção de Dall'Asta e Zona (2004) e um perfil I de aço menor ou igual.

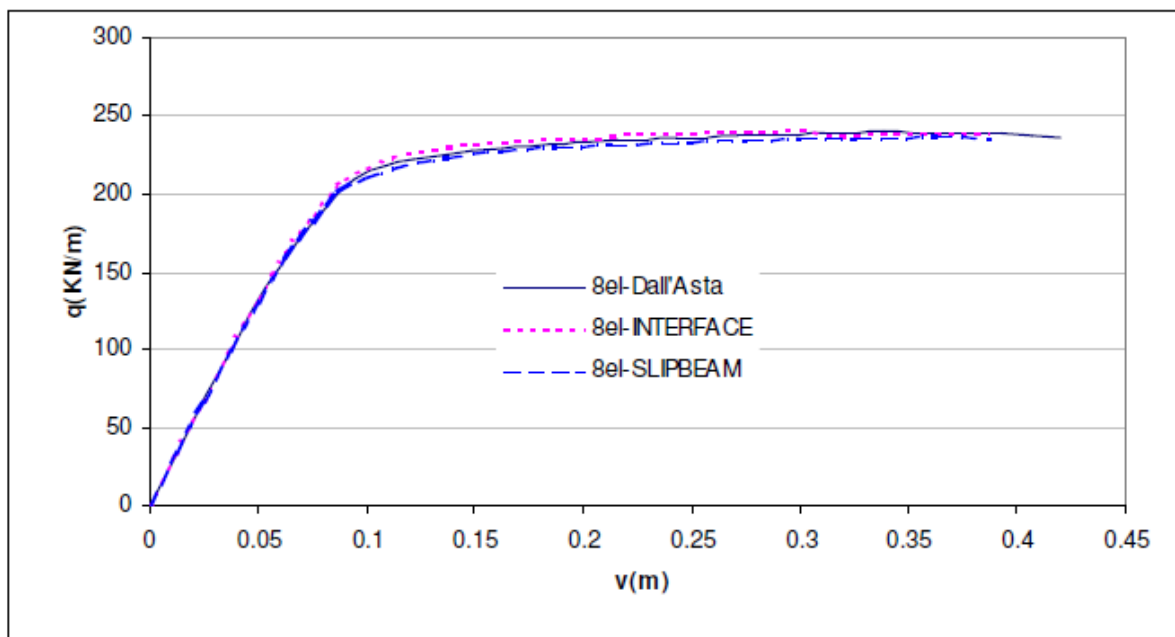


Figura 4 - Curva carga-deslocamento para um ponto no meio dos vãos da viga mista

Para a verificação das restrições de projeto referentes ao carregamento limite último e ao carregamento de serviço da viga mista, são feitas análises numéricas onde são utilizados os elementos finitos de barra implementados em Silva (2006, 2010), como já mencionado na seção 3 desse trabalho. Nessas análises é considerada a não linearidade física representada pelas curvas tensão-deformação dos materiais e a curva força cortante versus deslizamento da conexão deformável, como são mostradas na Fig. 5. É utilizada uma discretização da viga mista da Fig. 2 em 8 elementos de viga para simular a viga de concreto, 8 elementos de viga para simular a viga de aço e 8 elementos de interface que ligam os elementos de viga e simulam a conexão deformável.

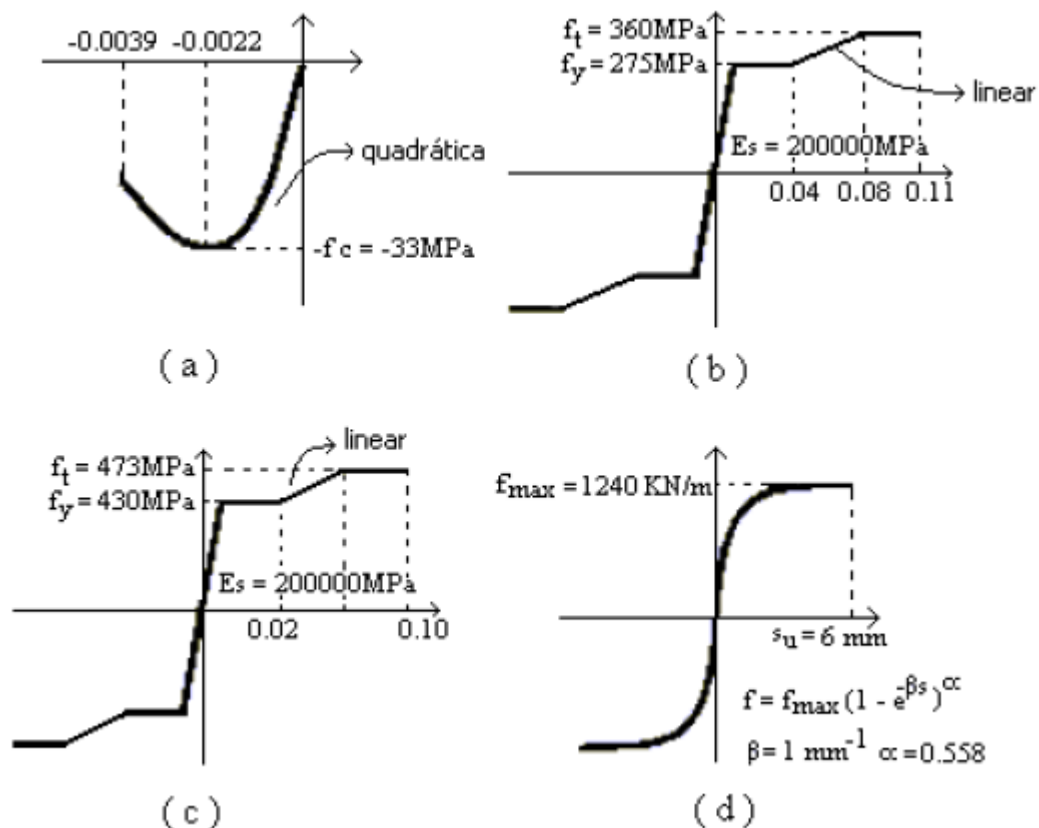


Figura 5 - Leis constitutivas: concreto (a), aço (b), barras de reforço (c) e conexão da interface (d) (Souza e Silva, 2007)

Como já detalhado anteriormente, o algoritmo de otimização considera que as dimensões da laje de concreto e a quantidade de armadura são variáveis de projeto. Como nesse exemplo quer verificar a redução que se consegue obter no perfil de aço da seção de Dall'Asta e Zona (2004) será forçado que essas variáveis apresentem valores finais iguais aos apresentados na seção da Fig. 2. Para isso, será definido um custo baixo para o concreto e armadura e um custo alto para o aço, em conjunto com valores limites das dimensões da seção de concreto e da armadura iguais às dimensões da seção da Fig. 2. Dessa forma, o algoritmo em busca de um custo mínimo para a viga mista tende a aumentar a seção de concreto e armadura para poder reduzir o perfil de aço, sendo barrado pelas dimensões limites (restrições laterais) definidas.

A seção inicial fornecida pelo usuário é mostrada na Fig. 6. Como esta seção não atende as exigências como citado em 2.5 deste trabalho, o algoritmo alterou as dimensões da seção, sendo esta, o ponto de partida do método de otimização, como mostra a Fig. 7.

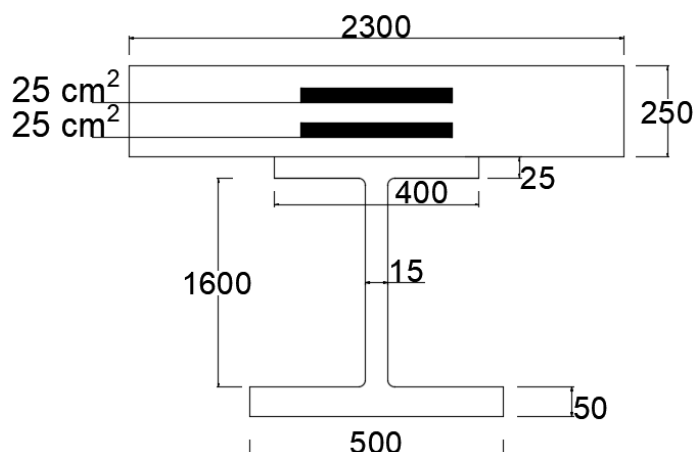


Figura 6 - Seção definida pelo usuário

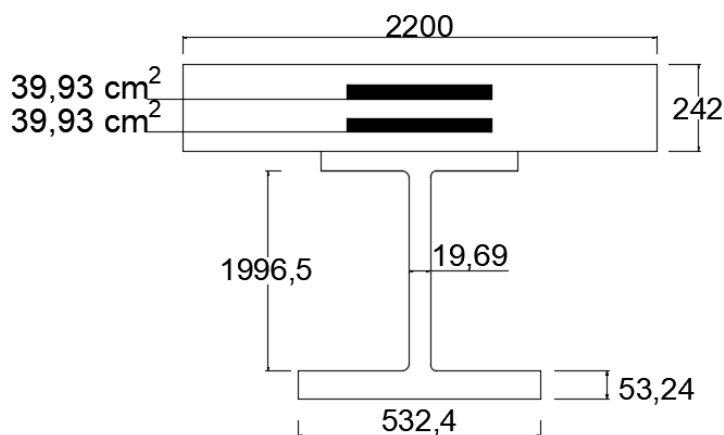


Figura 7 - Seção de partida definida pelo algoritmo

A Tabela 1 a seguir apresenta os valores limites definidos pelo usuário para as variáveis de projeto. Como já mencionado, esses valores servirão como barreira para as variáveis de projeto, lembrando que os custos foram fornecidos forçando as variáveis referentes a seção de concreto e armadura convergirem para seus valores limites superiores.

Tabela 1. Valores limites para as variáveis de projeto

Variáveis	$b(m)$	$h(cm)$	$b_f(cm)$	$t_f(mm)$	$b_w(cm)$	$t_w(mm)$	$A_{s1}(cm^2)$	$A_{s2}(cm^2)$
Limite inferior	0,5	7,0	5,0	2,0	20,0	2,0	5,0	5,0
Limite superior	2,3	25,0	100,0	100,0	200,0	100,0	25,0	25,0

Como já exposto na seção 2.3 deste trabalho, as variáveis de projeto durante o processo de otimização são consideradas variáveis contínuas. Após a definição da seção otimizada é iniciado um processo de eliminação das variáveis uma a uma atribuindo um valor discreto maior ou igual ao valor obtido do processo de otimização e retirando essa variável da lista de variáveis de projeto. Esse processo é repetido até que sejam atribuídos valores discretos a todas as variáveis de projeto. Na atribuição desses valores discretos são usados os parâmetros de variação fornecido pelo usuário. Nesse exemplo foram considerados os parâmetros de variação de 1,0 cm para as dimensões b_f e b_w e de 1,0 mm para as dimensões de t_f e t_w . Dessa forma, a largura da mesa será um valor discreto com precisão de cm entre o limite inferior e superior dados na Tabela 1, ou seja, um valor discreto da lista entre 5 cm e 100 cm, variando de 1 em 1 cm.

Nesse exemplo, o algoritmo implementado nessa pesquisa irá fornecer uma seção de concreto armado com dimensões e armaduras iguais à seção de Dall'Asta e Zona (2004) mostrada na Fig. 2. Para o perfil de aço, será fornecido o menor perfil com dimensões das espessuras em mm e das larguras em cm que atenda a todas as restrições de projeto. Para a restrição referente ao carregamento último foi considerado o carregamento uniformemente distribuído ao longo de toda a viga de 237,4kN/m, que é o carregamento limite obtido por Dall'Asta e Zona (2004) para a seção da viga mista em análise. Para o carregamento de serviço foi considerado o valor de 120kN/m uniformemente distribuído ao longo de toda a viga. Geralmente a combinação de serviço das ações geram um carregamento aproximadamente igual a metade do carregamento obtido através de uma combinação última das ações.

4.1 Perfil I simétrico

A resposta obtida desse exemplo, considerando perfil I simétrico é mostrada na Fig. 8. Dessa figura, observa-se que a seção de concreto armado e área total de armadura correspondem a seção de Dall'Asta e Zona (2004) e o perfil I simétrico apresenta área total de 556,8 cm², enquanto que o perfil de Dall'Asta e Zona apresenta área de 590 cm². Dessa forma, percebe-se que o algoritmo de otimização partiu de uma seção qualquer dada na Fig. 7, com área de 960 cm² e convergiu para um perfil de área 42% menor que a seção de partida e 5,6% menor que a seção de Dall'Asta e Zona.

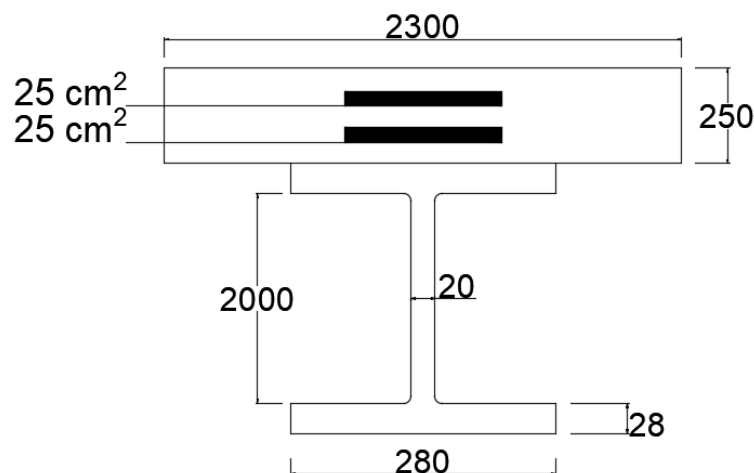


Figura 8 - Seção otimizada obtida pelo algoritmo

Na Fig. 9 a seguir são ilustradas as variações das restrições referentes aos carregamentos últimos e de serviço, esbeltez da mesa e alma, em relação ao número de iterações. Neste gráfico, ELU faz referência a restrição referente ao carregamento último, ELS faz referência a restrição ao carregamento de serviço, EM e EA fazem referência, respectivamente, a restrição de esbeltez da mesa e alma. Observa-se dessa figura que a seção de partida apresenta uma folga de 75%, 81%, 28%, e 0%, respectivamente, em relação à verificação quanto ao carregamento último, carregamento de serviço, esbeltez da mesa e esbeltez da alma.

Percebe-se da Fig. 9 que a verificação quanto ao estado limite último é determinante comparada ao estado limite de serviço, já que a seção otimizada apresenta uma folga de 64% em relação ao estado limite de serviço e não apresenta folga para a verificação ao estado limite último. Observa-se também que a esbeltez da alma apresenta sem folga desde a seção de partida. Isso ocorre devido ao fato da seção fornecida pelo usuário (Fig. 6) apresentar esbeltez da alma maior que o limite permitido, dessa forma o algoritmo alterou as dimensões da seção dada pelo usuário para definir a seção de partida fixando esbeltez da alma igual ao seu limite. Esse valor foi mantido 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.

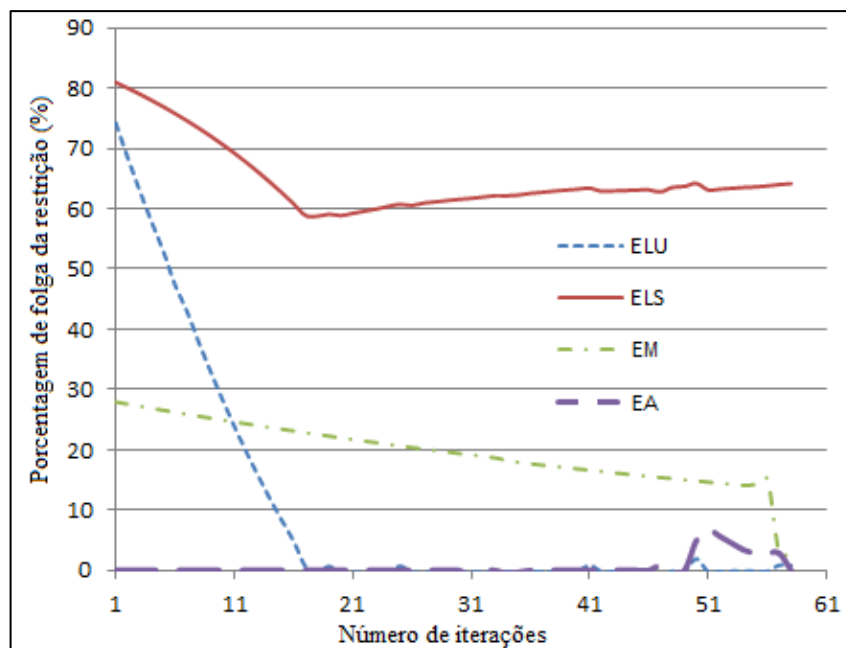


Figura 9 - Variação das restrições no processo iterativo de otimização

4.2 Perfil I não simétrico

Nas análises feitas até aqui nesse exemplo foi considerado perfil I duplamente simétrico. Nesse caso o perfil I é definido por quatro variáveis. Outra possibilidade de análise desenvolvida nesse trabalho é a consideração do perfil I não simétrico em relação ao eixo perpendicular a alma. Nesse caso o perfil I é definido por seis variáveis. A seguir as mesmas análises feitas para o perfil I duplamente simétrico são feitas para o caso não simétrico.

A resposta para a seção otimizada considerando perfil I não simétrico é mostrada na Fig. 10. Dessa figura observa-se que a seção de concreto armado é igual a seção de Dall'Asta e Zona (2004) e o perfil I não simétrico apresenta área total de 521,8 cm². Da mesma forma que a seção simétrica, o algoritmo de otimização partiu da seção dada na Fig. 7 e convergiu para um perfil de área 45,6% menor que a seção de partida e 11,6% menor que a seção de Dall'Asta e Zona. A resposta considerando o perfil não simétrico (redução de 11,6% do perfil de Dall'Asta e Zona) foi um pouco melhor que a resposta considerando o perfil simétrico (redução de 5,6% do perfil de Dall'Asta e Zona). Isso se deve principalmente ao momento resistente positivo, para o qual a mesa superior do perfil I contribui pouco, dessa forma um perfil mais otimizado em termo do momento resistente positivo deve ter mesa inferior maior que a mesa superior.

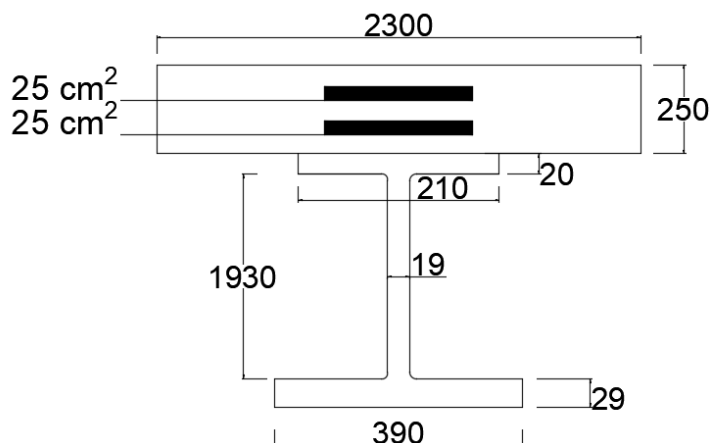


Figura 10 - Seção mista não simétrica otimizada

A Fig.11 é análoga a Fig. 9 (análise considerando perfil simétrico). A única diferença é a legenda no gráfico da Fig. 11 onde EM foi trocado por EMI que faz referência a restrição de esbeltez da mesa inferior. Devido a mesa superior está conectada a laje de concreto despreza-se a possibilidade de flambagem da mesa superior. As mesmas considerações feitas para análise simétrica referentes ao gráfico da Fig. 9 são válidas para o gráfico da Fig. 11.

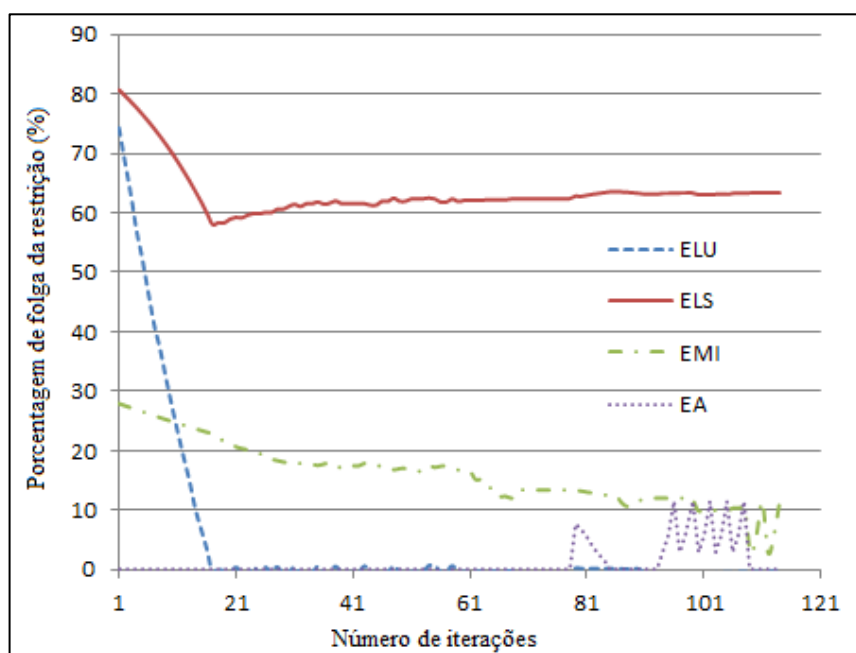


Figura 11 - Variação das restrições para seção não simétrica no processo iterativo de otimização

Na Fig. 12 é apresentada a variação da área do perfil de aço da seção mista com as iterações do método de programação sequencial linear implementado nesse trabalho. Comparando o gráfico da Fig. 12 com os gráficos da Fig. 9 e 11, observa-se uma redução mais acentuada na área de aço do perfil associada a uma redução da folga referente à restrição do carregamento

último. Após isso, a redução da área é pequena e a restrição referente ao carregamento último mantém-se ativa.

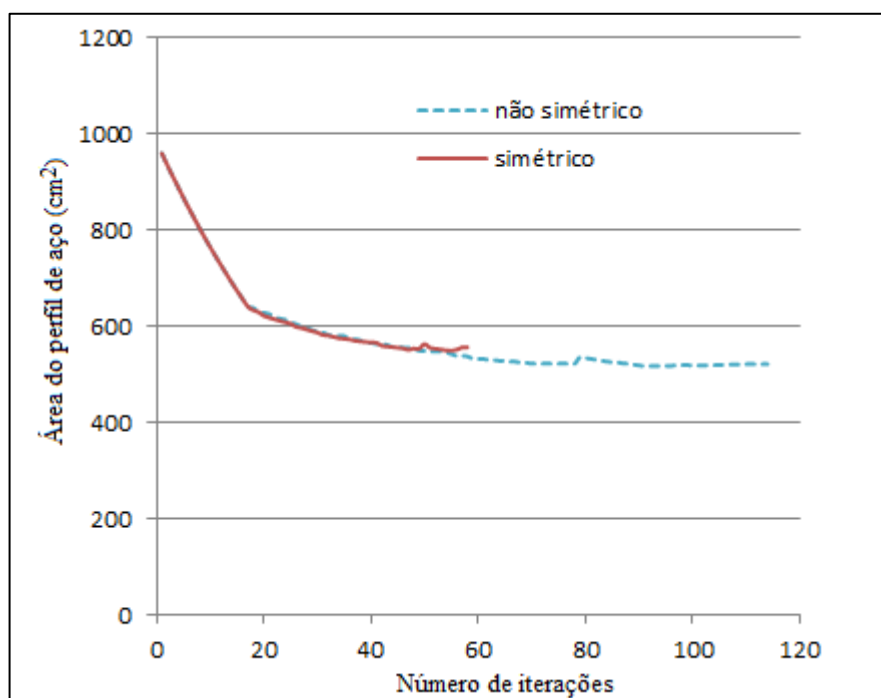


Figura 12 - Variação da área de aço na seção mista durante o processo de otimização

5 CONCLUSÃO

Esse trabalho consiste na implementação de um algoritmo para definir as dimensões da seção transversal de uma viga mista aço-concreto minimizando uma função objetivo relacionada ao custo dos materiais. Na validação do algoritmo implementado foi analisada uma viga mista continua com determinada seção transversal para a qual um carregamento último foi definido segundo análise numérica desenvolvida por outros autores. Na análise usando o algoritmo implementado nesse trabalho, fixou-se o carregamento solicitante na viga igual ao carregamento último obtido pelos autores, e partiu-se de uma seção inicial qualquer convergindo para uma seção apresentando um perfil com área menor, tanto na análise de perfil simétrico, quanto na análise de perfil não simétrico. Observou-se também que a resposta considerando o perfil não simétrico apresentou melhor resultado do que a resposta considerando o perfil simétrico, isso porque a mesa superior do perfil I contribui pouco quanto se trata de momento resistente positivo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UFOP, CAPES e FAPEMIG, pelo apoio técnico e financeiro na realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), 2008. *NBR 8800: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), 2014. *NBR 6118: projeto de estruturas de concreto - procedimento*. Rio de Janeiro.
- CHENG, G. D., 1992. *Introdution to Structural Optimization: Theory, Methods and Solution*. Lecture Notes, Dalian University of Technology.
- COUTINHO, K. D., 2006. *Método de otimização topológica em estruturas tridimensionais*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal.
- DALL'ASTA, A., ZONA, A., 2004. Comparasion and validation of displacement and mixed elements for the non-linear analisys of continuous composite beams. *Computer & Structures*, vol. 82, p. 2117-2130.
- KOTINDA, T. I., 2006. *Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas: ênfase ao estudo da interface laje-viga*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.
- MORENO, J. C. A., 2016. *Análise numérica de vigas mistas aço-concreto pelo método dos elementos finitos: modelos para os efeitos de longa duração e protensão interna*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- NETO, J. C., 2008. *Otimização do custo de elementos metálicos e mistos aço-concreto sob temperatura ambiente e incêndio*. Dissertação (Mestrado). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.
- QUEIROZ, G., PIMENTA, R. J., DA MATA, L. A. C., 2001. *Elementos das Estruturas Mistas Aço-Concreto*. Ed. O Lutador, Belo Horizonte.
- SENOUCI, A. B., AL-ANSARI, M. S., 2009. Cost optimization of composite beams using genetic algorithms. *Advances in Engineering Software*.
- SIAS, F. M., 2014. *Dimensionamento Ótimo de Pilares de Concreto Armado*. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo. Espírito Santo.
- SILVA, A. R., 2006. *Análise numérica de vigas mistas com interação parcial*. Dissertação (Mestrado). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto.
- SILVA, A. R., 2010. *Análise numérica de elementos estruturais com interação parcial*. Tese (Doutorado). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto.
- SILVA, A. R., SOUZA Jr., J. B. M. e NEVES, F. A., 2010. Otimização do perfil I de aço de vigas mistas de aço-concreto com interação parcial. *CILAMCE*.
- SILVA, A. R., SOUZA Jr., J. B. M. e NEVES, F. A., 2011. Optimization of steel-concrete composite beams with partial interaction by sequential linear programming. *CILAMCE*.
- SOUZA, J. B. M., SILVA, A. R., 2007. Nonlinear analysis of partially connected composite beams using interface elements. *Finite Elements in Analysis and Design*, v. 43, p. 954-964.