



OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE VIGAS COM ABERTURAS NA ALMA

Karina Mota Rocha

karinamota.kmr@gmail.com

Rodrigo Bird Burgos

rburgos@eng.uerj.br

André Tenchini da Silva

tenchini@eng.uerj.br

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

R. São Francisco Xavier, 524, 20550-900, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

Anderson Pereira

anderson@puc-rio.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

R. Marquês de São Vicente, 225, 22430-060, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

Resumo. O uso eficiente de materiais é atualmente um tema de extrema relevância, o que tem levado engenheiros e pesquisadores à busca por estruturas ótimas. Tais soluções possuem melhor desempenho, sendo capazes de gerar economia de material com menores impactos ambientais e custos, sendo também mais leves devido ao seu volume reduzido. Menos sensíveis a deformações e mais resistentes, as vigas perfuradas (casteladas) são também mais leves do que perfis I com a alma cheia. Entretanto, quando submetidas a carregamentos, tais vigas sofrem com a ocorrência de altas concentrações de tensões, o que pode indicar que estas estruturas são suscetíveis a falhas localizadas. Desta forma, torna-se perceptível que estes furos não apresentam uma topologia ótima, o que naturalmente permite que essa remoção de material possa ser analisada do ponto de vista da otimização topológica. Este trabalho tem como primeiro objetivo encontrar uma nova topologia para as aberturas na alma de vigas perfuradas através do módulo de otimização do programa ABAQUS. Em um segundo momento, é feita uma análise comparativa dos resultados obtidos do ponto de vista estrutural (tensões e deslocamentos), a fim de avaliar o comportamento das vigas celulares e otimizadas, com o mesmo volume, tendo apenas como diferença entre si a distribuição e o formato dos furos ao longo da alma.

Palavras-chave: Otimização estrutural, Vigas perfuradas, Modelagem computacional

CILAMCE 2017

Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering
P.O. Faria, R.H. Lopez, L.F.F. Miguel, W.J.S. Gomes, M. Noronha (Editores), ABMEC, Florianópolis, SC,
Brazil, November 5-8, 2017.

INTRODUÇÃO

O uso eficiente de materiais é importante em diversos contextos e nas mais diversas áreas de estudos, o que ocorre inclusive na Engenharia Civil. Por esse motivo, a busca por estruturas ótimas tem se expandido rapidamente ao longo do tempo.

Otimizar uma estrutura significa maximizar o emprego de uma quantidade fixa de recursos para satisfazer um determinado objetivo (KINGMAN et al., 2014), ou seja, encontrar a melhor maneira de distribuir uma determinada quantidade de material, dentro de um domínio de projeto, durante a concepção de um projeto estrutural.

O aumento na procura por estruturas eficientes e que gerem economia de material pode ser atribuído aos ganhos de desempenho proporcionados por este tipo de estrutura. Sendo assim, estas estruturas geram economia de material, gerando consequentemente impactos ambientais menores, possuem custos mais baixos devido à redução de materiais necessários e, além disso, são mais leves devido ao seu volume reduzido quando comparadas a estruturas não otimizadas, possibilitando assim o uso de fundações menos robustas.

Pode-se dividir a otimização estrutural em três abordagens distintas: a otimização de forma, de tamanho e topológica, sendo a otimização estrutural topológica a mais geral destas.

No caso das vigas casteladas, com o desdobramento da viga I, tem-se um aumento da altura da seção e consequentemente um aumento da resistência a flexão. Desta forma, estas são indicadas para vãos livres de maiores dimensões (Figura 1). Isso ocorre devido à majoração da altura da seção sem que haja acréscimo no peso do perfil, gerando então um aumento do momento de inércia no plano principal de flexão, que, por sua vez, resulta em uma maior resistência da seção ao momento fletor.

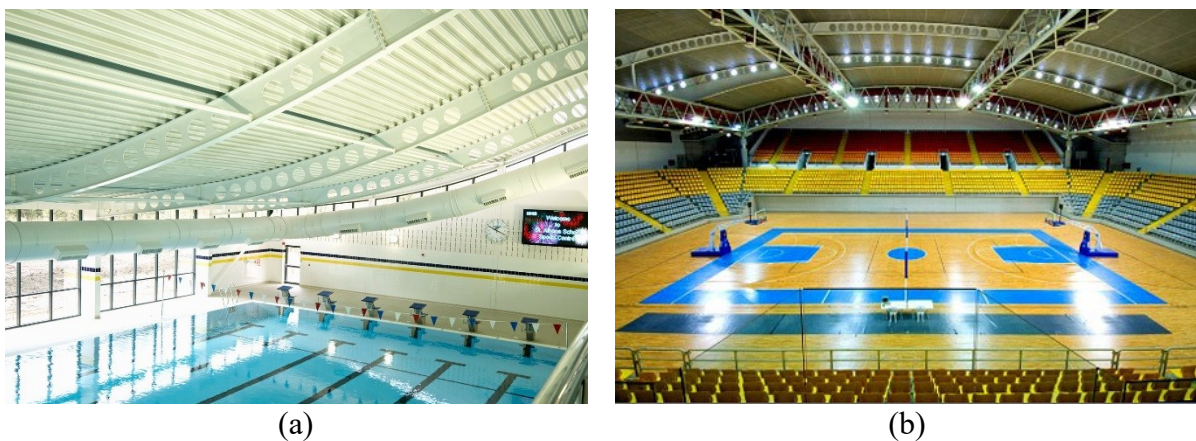


Figura 1 – Exemplos da utilização de vigas casteladas em estruturas (a) Centro de esportes, St Albans – Reino Unido; (b) Spyros Kyprianou Athletic Center – Grécia.

Além disso, frequentemente limitações de altura são impostas a edificações de vários pavimentos por diversos motivos, como regulamentos de zoneamento urbano, aspectos econômicos e considerações estéticas (RODRIGUES, 2007). Desta forma, com a utilização de vigas com alma perfurada, a passagem de dutos e serviços é possível, sem que para isso seja necessário um incremento do pé-direito destas edificações.

Segundo publicação do SCI (The Steel Construction Institute) de 2011 (LAWSON e HICKS, 2011), existem três métodos de fabricação de vigas com aberturas na alma.

No primeiro deles uma seção laminada a quente é cortada longitudinalmente ao longo da alma; as seções “T” resultantes são reposicionadas e soldadas para formar uma série de aberturas regulares em uma seção de maior inércia (LAWSON e HICKS, 2011). O esquema de corte e soldagem destas vigas é mostrado na Figura 2.

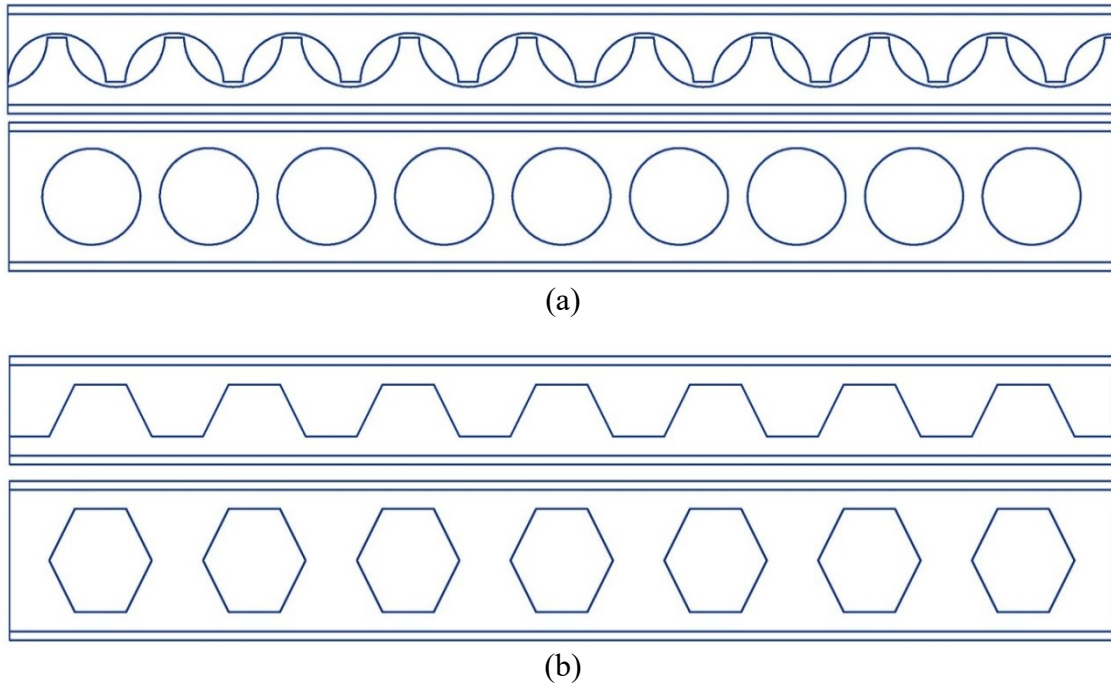


Figura 2 – Exemplos do processo de formação das vigas casteladas. (a) Viga Celular; (b) Viga com aberturas hexagonais. Fonte: Rocha, 2017

Outro método de fabricação de vigas perfuradas consiste no corte de aberturas individuais na alma de uma seção simétrica laminada a quente. Este método é utilizado para vigas com aberturas isoladas (**Erro! Autoreferência de indicador não válida.**).



Figura 3 – Vigas com aberturas irregulares na alma.

O terceiro método consiste em uma seção formada por três chapas que são soldadas para formar uma seção em “I”. Neste caso, a seção pode ser assimétrica (por exemplo, com mesas de tamanhos diferentes). As aberturas podem ser cortadas na alma da viga antes ou depois de formar a seção em “I” (Figura 4). Este método é usado tanto para aberturas isoladas quanto para aberturas regularmente espaçadas.

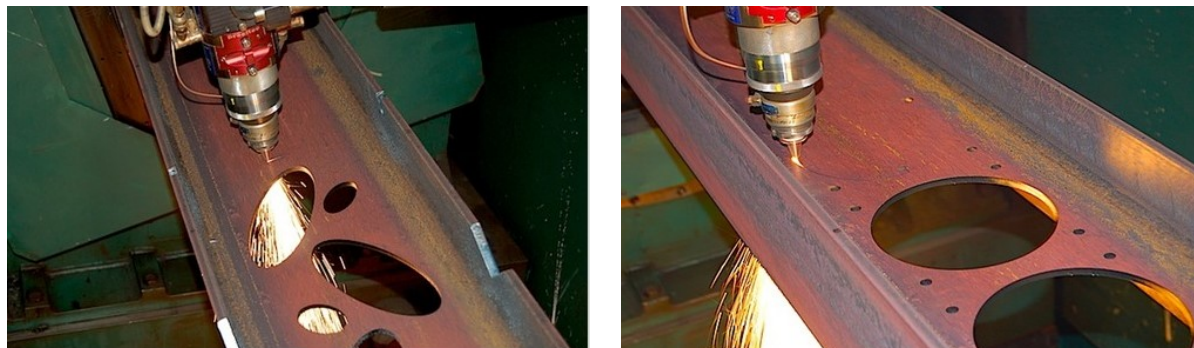


Figura 4 – Viga com perfurações feitas após a sua soldagem

Sendo assim, a partir da utilização destes métodos para a fabricação de vigas com aberturas, um novo formato pode ser dado aos furos destas vigas, visando não só o seu processo de fabricação, como atualmente é feito, mas também o aumento da sua rigidez e uma melhor distribuição de tensões em seu interior.

As vigas casteladas têm como principal característica o incremento da resistência do perfil original, com o aumento da sua altura, sem alteração de peso. Entretanto, quando submetidas a carregamentos, as vigas casteladas, com furos circulares, chamadas de vigas celulares, sofrem com a ocorrência de regiões com concentrações de tensões (Figura 5), ao mesmo tempo em que outras regiões da viga estão sujeitas a baixas tensões indicando a existência de material subutilizado. Desta forma, torna-se perceptível que estes furos não apresentam uma topologia ótima.

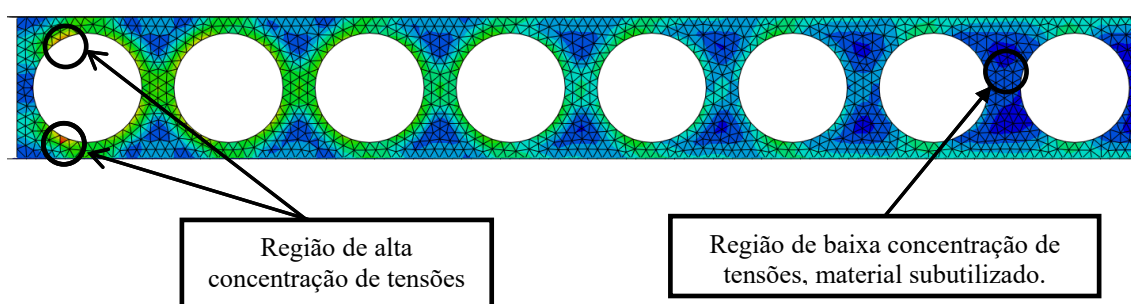


Figura 5 – Viga celular submetida à flexão. Fonte: Adaptado de Rocha, 2017

Sendo assim, fica claro como o formato das aberturas da alma destas vigas foi motivado apenas pelo processo de fabricação. Todavia, com o surgimento das técnicas de fabricação baseadas na utilização de máquinas de corte a laser/plasma é possível obter novas opções para o formato das aberturas da alma destas vigas.

Logo, essa remoção de material criando aberturas nas almas das vigas metálicas pode ser analisada do ponto de vista da otimização topológica, buscando então um novo formato para essas aberturas.

1 OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE VIGAS NO ABAQUS®

Neste trabalho, o processo de otimização das vigas é realizado através do módulo de otimização do programa ABAQUS® (2014) utilizando o método SIMP (BENDSØE, 1989) de interpolação de material (Solid Isotropic Material with Penalization). Para a realização do processo de otimização, uma viga de seção “I”, sem furos na alma, foi modelada. O fluxograma apresentado na Figura 6 mostra o processo utilizado para a realização da otimização. Neste estudo foi utilizado o perfil 305 x 165 UB 40 com 5000 milímetros de comprimento (Rocha, 2017).

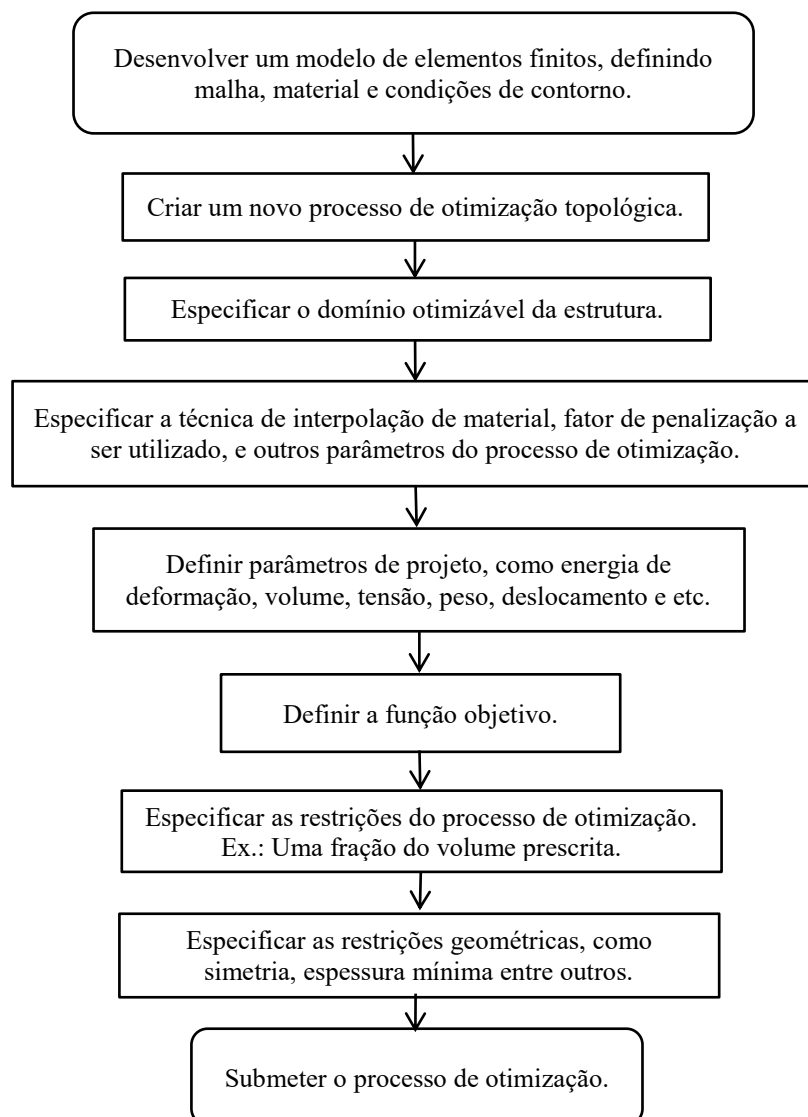


Figura 6 – Fluxograma do processo de otimização no programa ABAQUS. Fonte: Rocha, 2017

Após desenhar a topologia inicial da estrutura, definir carregamento e condições de contorno, a viga foi então submetida a uma análise linear elástica. Após isso, foi então criado um novo processo de otimização topológica e especificado o domínio otimizável da estrutura.

Apenas a alma da viga foi otimizada (Figura 7). As duas extremidades da alma da viga não foram inseridas no domínio de projeto a ser otimizado, a fim de facilitar o processo de aplicação das condições de contorno da viga em um projeto real (chapas de ligação, por exemplo).

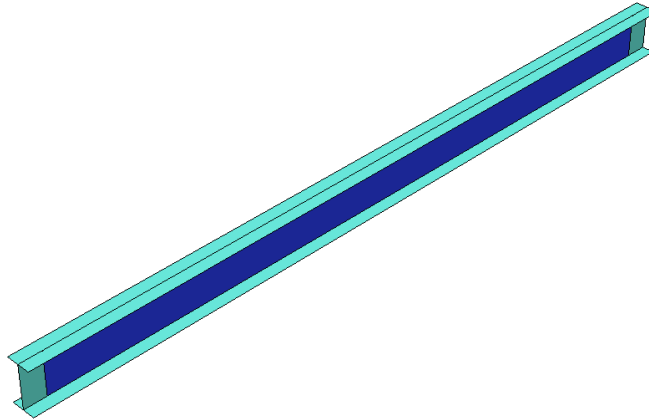


Figura 7 – Domínio otimizável da estrutura.

Em todas as vigas deste estudo foi utilizado o método SIMP de interpolação de material com fator de penalização $p = 4$. A função objetivo utilizada foi a minimização da energia de deformação e o parâmetro utilizado como restrição foi a fração e volume.

A fração de volume utilizada como volume alvo durante o processo de otimização foi igual a 0,75 para as vigas biengastadas e 0,80 para as vigas biapoçadas, por questões de convergência. Estas frações de volume correspondem, aproximadamente, a porcentagem de volume da viga celular de referência em relação a uma viga de mesma seção transversal e alma cheia (Figura 8).

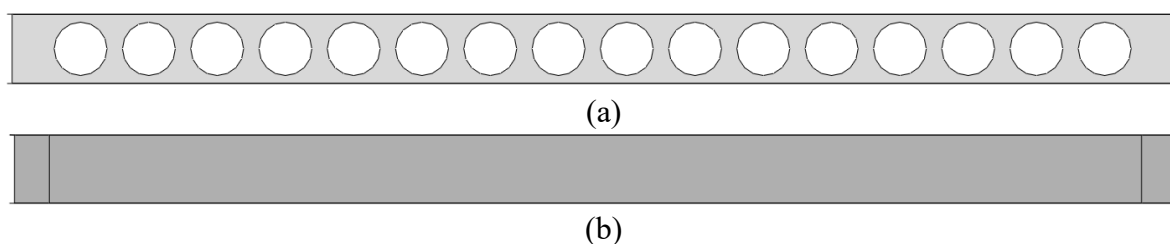


Figura 8 – (a) Viga celular de referência; (b) Viga de alma cheia a ser otimizada.

As restrições geométricas aplicadas ao processo de otimização, foram um controle de espessura mínima, a fim de que a viga otimizada não possua elementos estruturais excessivamente pequenos e com pouco material na sua alma. Tal providência foi tomada com base nos diversos modos de falha que podem ocorrer em vigas perfuradas, gerados pela ocorrência de barras muito finas na alma destas vigas.

Vigas com aberturas na alma possuem um comportamento estrutural diferente das vigas de alma cheia, resultado direto da maneira diferente pela qual o cisalhamento é transferido através dos recessos dos furos da alma. A presença dos furos não só altera a importância relativa de modos possíveis de falha, como também introduz a possibilidade de novos modos. São exemplos de possíveis modos de falha que ocorrem exclusivamente em vigas com aberturas na alma: a formação do mecanismo *Vierendeel*, a flambagem dos montantes da alma devido ao cortante e, nos casos em que a viga é soldada (vigas casteladas), a ruptura da solda da alma (KERDAL e NETHERCOTT, 1984).

Sendo assim, foi inserida durante o processo de otimização uma restrição de dimensão mínima de material para alma da viga igual a 100 milímetros. A Figura 9, a seguir, mostra os resultados obtidos após o processo de otimização.

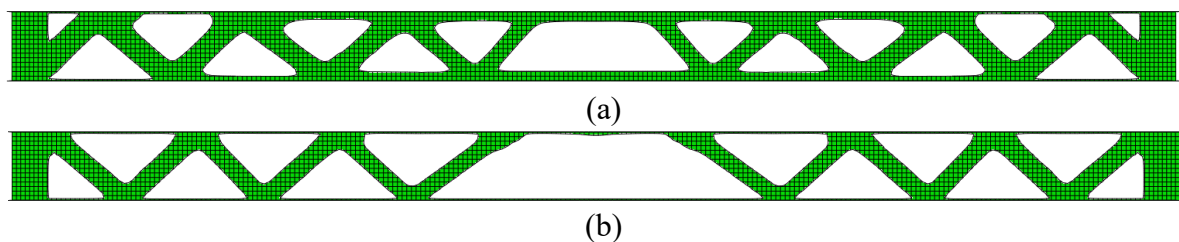


Figura 9 – Vigas obtidas após o processo de otimização (a) Viga otimizada para a condição de contorno biapoada; (b) Viga otimizada para a condição de contorno biengastada.

Além disto, foi imposta a simetria entre as partes superior e inferior das vigas como restrição durante o processo de otimização, pois, desta forma, a aplicação de vigas otimizadas se torna mais simples e menos suscetível a erros durante o processo de montagem das estruturas no campo.

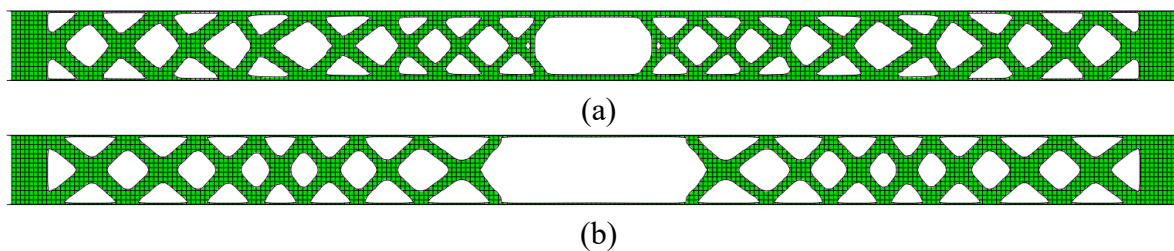


Figura 10 – Vigas obtidas após o processo de otimização (a) Viga otimizada para a condição de contorno biapoada com restrição de simetria; (b) Viga otimizada para a condição de contorno biengastada com restrição de simetria.

2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DAS VIGAS

Após o processo de otimização, as vigas foram submetidas a diversas análises que serão apresentadas neste item; seus resultados foram então comparados com os resultados obtidos para as análises realizadas nas mesmas condições para uma viga celular de volume correspondente submetida às mesmas condições de contorno e carregamento.

Todas as vigas e enrijecedores utilizados neste estudo possuem as mesmas propriedades, sendo estas, módulo de Young igual a 210 GPa e coeficiente de Poisson igual a 0,3.

2.1 Propriedades físicas e geométricas da viga de referência

Para comparação com as vigas otimizadas, foi utilizada uma viga celular, cujo volume era igual a 21.721.612 mm³, utilizado como volume alvo durante o processo de otimização. Além disso, o comprimento da viga modelada é de 5.000 milímetros e as perfurações da viga de referência foram feitas através de cortes em formato circular de raio igual a 113,775 mm. A distância utilizada entre furos adjacentes da viga celular igual a 294 mm e distância entre o início da viga e centro da primeira perfuração igual a 295 mm, conforme mostrado na Figura 11.

Tal viga, apresentada na Figura 11, possui uma distância maior entre o primeiro furo e o início da viga do que a distância entre furos adjacentes. Assim, como foi feito durante o processo de otimização, onde as duas extremidades da alma da viga não foram inseridas no domínio otimizável, estas extremidades também foram poupadas no processo de fabricação das vigas casteladas, a fim de facilitar o processo de aplicação das condições de contorno da viga em um projeto real com a utilização de chapas de ligação, por exemplo.

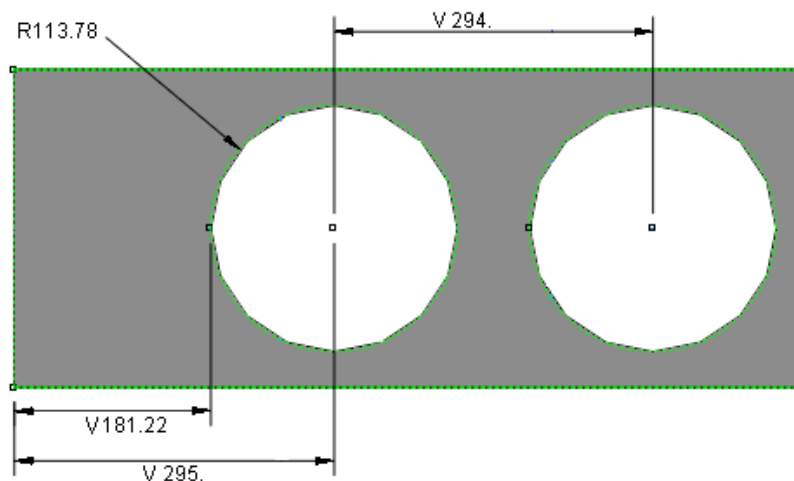


Figura 11 – Geometria da viga celular de referência.

Foram utilizados elementos de casca na modelagem da viga, discretizada em uma malha de 13694 elementos finitos de casca triangulares de primeira ordem do tipo S3 com tamanho de aproximadamente 20 mm, disponível na biblioteca da ABAQUS.

2.2 Propriedades das vigas obtidas através do processo de otimização.

As vigas obtidas através do processo de otimização analisadas, possuem volume e número de elementos finitos diferentes para cada uma das vigas. Desta forma, na Tabela 1 a seguir, são apresentados o volume, peso, volume percentual comparado a uma viga de mesma seção, entretanto com alma cheia e número de elementos finitos utilizados na discretização da malha de cada viga. Além disso, todas as vigas otimizadas possuem o mesmo comprimento de 5.000 milímetros.

2.3 Análises das vigas com condição de contorno biapoçada

Com o objetivo de avaliar o desempenho estrutural das topologias obtidas durante o processo de otimização, as vigas foram submetidas a uma análise linear elástica sob a condição de contorno biapoçada com uma carga distribuída equivalente a 100 kN (121,21 kN/m²) aplicada ao longo da mesa superior da viga. As figuras apresentadas a seguir, mostram os resultados obtidos. Apenas metade das vigas foi plotada, tendo em vista que todas são simétricas. A mesma grade de distribuição de tensões foi utilizada para a plotagem de todas as vigas.

Viga	Volume (mm ³)	Volume (%)	Peso da viga (Kg)	Nº de elementos
Celular	21721612	84,76%	170,51	13694
Otimizada para a condição de contorno biapoçada (VBA)	21690582	84,64%	170,27	13040
Otimizada para a condição de contorno biapoçada com restrição de simetria (VBAS)	21790630	85,03%	171,06	13620
Otimizada para a condição de contorno biengastada (VBE)	21274656	83,02%	167,01	12622
Otimizada para a condição de contorno biengastada com restrição de simetria (VBES)	21196954	82,72%	166,40	13084

Tabela 1 – Comparação de volume, peso e número de elementos finitos utilizados na discretização da malha de cada uma das vigas.

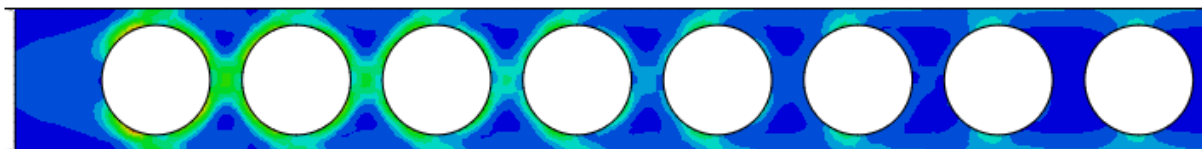


Figura 12 – Resultados obtidos para a distribuição da tensão de von Mises para a viga celular biapoçada submetida à análise linear elástica - Tensão máxima: 314,8 MPa.

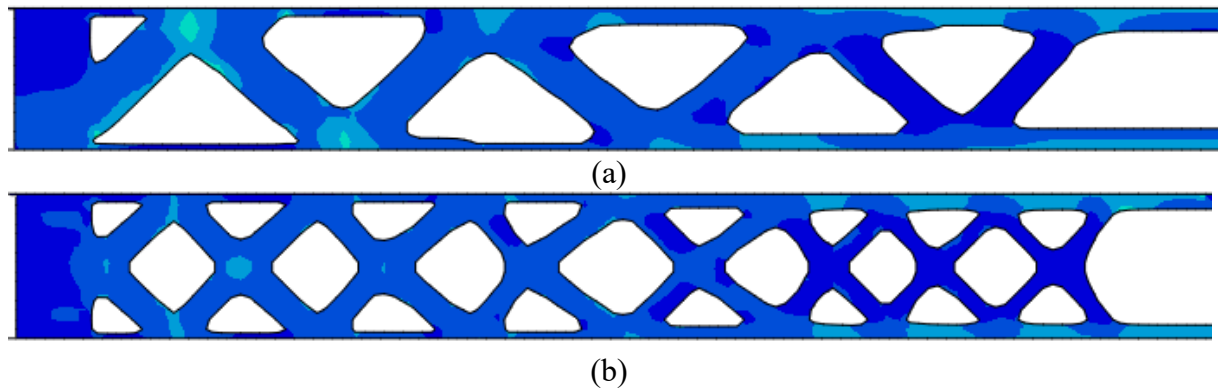


Figura 13 – Resultados obtidos para a distribuição da tensão de von Mises para as vigas otimizadas biapoiadas submetidas a análise linear elástica (a) Viga otimizada para a condição de contorno biapoiada – Tensão máxima: 174,6 MPa; (b) Viga otimizada para a condição de contorno biapoiada com restrição de simetria – Tensão máxima: 150,7 MPa.

A partir das análises, foi possível observar as vigas otimizadas para a condição de contorno biapoiada apresentaram um melhor desempenho estrutural, com menores concentrações de tensões e menores deslocamentos no meio do vão, quando comparadas à viga celular, assim como esperado. A Tabela 2 apresenta um resumo dos resultados obtidos para a análise linear elástica das vigas biapoiadas com uma carga distribuída de 100kN.

Viga	Máxima Tensão de von Mises (MPa)	Deslocamento máximo no meio do vão (mm)
Celular	314,8	12,96
Otimizada para a condição de contorno biapoiada (VBA)	174,6	11,12
Otimizada para a condição de contorno biapoiada com restrição de simetria (VBAS)	150,7	10,96
Otimizada para a condição de contorno biengastada (VBE)	314,2	12,39
Otimizada para a condição de contorno biengastada com restrição de simetria (VBES)	685,4	16,14

Tabela 2 – Resultados obtidos para as análises das vigas

Diversos modos de falha de vigas perfuradas podem estar associados à instabilidade destas. São exemplos de modos de falhas associados à instabilidade: a flambagem do pilar da

alma devido à compressão ou ao cisalhamento e a flambagem lateral com torção. Tais mecanismos de falha podem ser ainda mais preocupantes nas vigas otimizadas, devido à existência de barras muito finas na alma destas vigas, geradas durante o processo de otimização topológica, tendo em vista que a instabilidade das vigas não foi considerada no processo de otimização.

Sendo assim, as vigas foram então submetidas a uma análise de autovalores e autovetores com o intuito de avaliar a carga e o modo de flambagem de cada uma das vigas. Os resultados são apresentados nas figuras a seguir.

Através desta, fica claro como a viga celular possui a maior carga crítica quando comparada às outras vigas. Tanto a viga celular quanto as vigas otimizadas para a condição de contorno biapoiada apresentaram modos de flambagem globais, flambagem lateral com torção e para cargas críticas bastante superiores a carga proposta inicialmente de 100kN. Desta forma, seguindo com o objetivo de avaliar o desempenho estrutural das topologias obtidas após o processo de otimização, todas as vigas foram então submetidas a uma análise não linear completa (análise incremental, incluindo as não linearidades física e geométrica), sob a condição de contorno biapoiada com uma carga distribuída aplicada ao longo da mesa de compressão da viga.

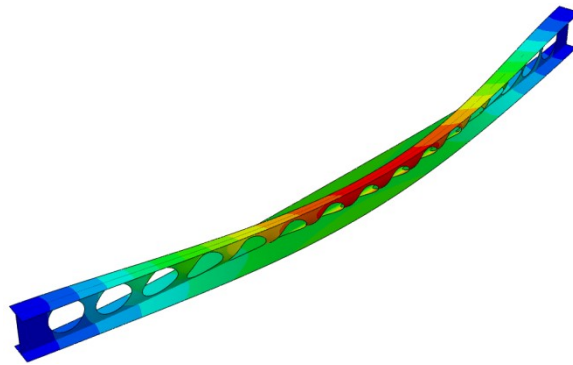


Figura 14 – Carga crítica e modo de falha para a viga celular submetida à condição de contorno biapoiada
- Carga crítica: 412,587 kN.

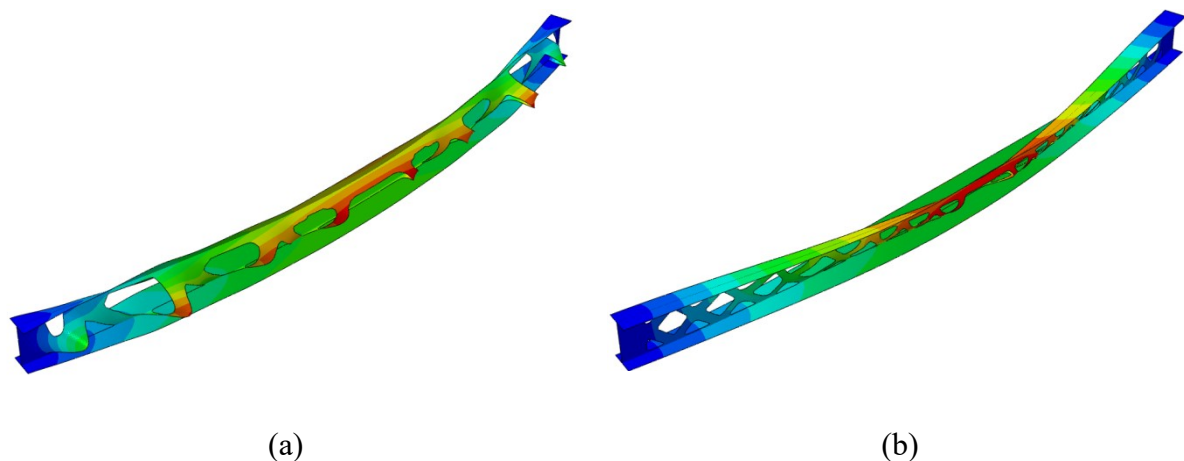


Figura 15 – Cargas críticas e modos de falha para as vigas otimizadas submetidas à condição de contorno biapoçada (a) Viga otimizada para a condição de contorno biapoçada – Carga crítica: 306,686 kN; (b) Viga otimizada para a condição de contorno biapoçada com restrição de simetria – Carga crítica: 367,168 kN.

Desta forma, é possível perceber que as vigas otimizadas para a condição de contorno biapoçada (VBA e VBAS), de fato tem um grande ganho de resistência quando comparadas à viga celular. Na Tabela 3, apresentada a seguir é possível ver o aumento da carga última gerado pelo processo de otimização, no caso das vigas otimizadas para a condição de contorno biapoçada.

Todavia, é possível ver que a viga para a qual, durante o processo de otimização foi inserida uma restrição de simetria (VBAS) apresenta um desempenho ligeiramente inferior, apesar de possuir um volume ligeiramente maior, quando comparada à viga otimizada sem qualquer restrição de simetria (VBA), o que já era esperado, tendo que vista que a inserção de uma restrição geométrica durante o processo de otimização diminui o domínio de busca por uma topologia ótima.

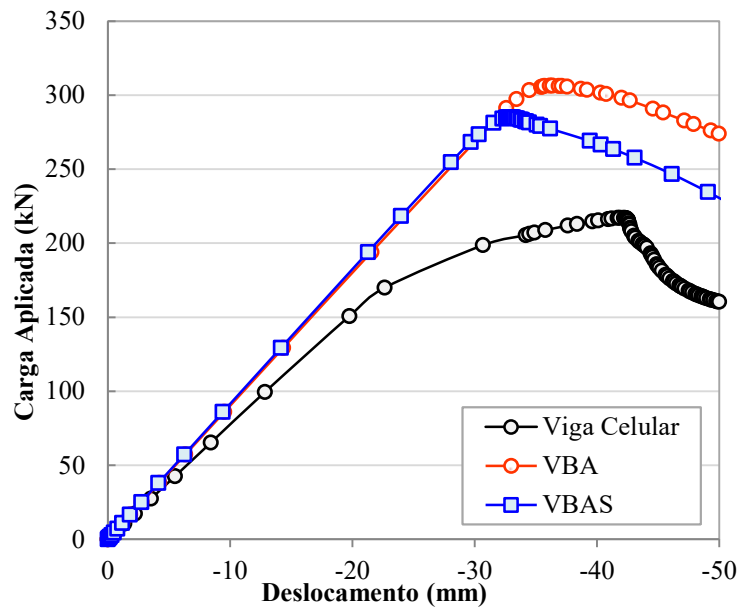


Gráfico 1 – Carga versus deslocamento para as vigas submetidas à condição de contorno biapoada.
Legenda: VBA - Viga otimizada para a condição de contorno biapoada; VBAS - Viga otimizada para a condição de contorno biapoada com restrição de simetria;

Viga	Peso da viga (Kg)	Variação de peso em relação à viga celular	Carga última	Variação da resistência em relação à viga celular
Otimizada para a condição de contorno biapoada (VBA)	170,27	-0,143%	306,448	41,15%
Otimizada para a condição de contorno biapoada com restrição de simetria (VBAS)	171,05	0,318%	284,958	31,25%

Tabela 3 – Comparação entre os pesos e cargas últimas das vigas.

2.4 Análise das vigas submetidas à condição de contorno biengastada.

Como citado em tópicos anteriores, durante o processo de otimização, a viga foi submetida a duas condições de contorno, sendo uma delas a biengastada. Desta forma, com o objetivo de avaliar o desempenho estrutural das topologias obtidas durante este processo, todas as vigas foram submetidas a uma análise linear elástica sob a condição de contorno biengastada com uma carga distribuída de 100kN aplicada ao longo da mesa superior da viga. Os resultados obtidos para a distribuição da tensão de von Mises são apresentados, nas Figura 16 e Figura 17, a seguir.

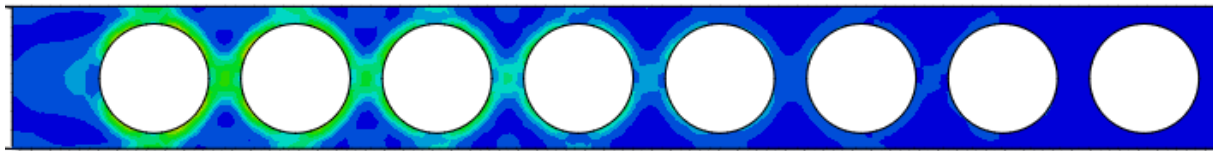


Figura 16 – Resultados obtidos para a distribuição da tensão de von Mises para a viga celular biengastada submetida a análise linear elástica - Tensão máxima: 282,8 MPa.

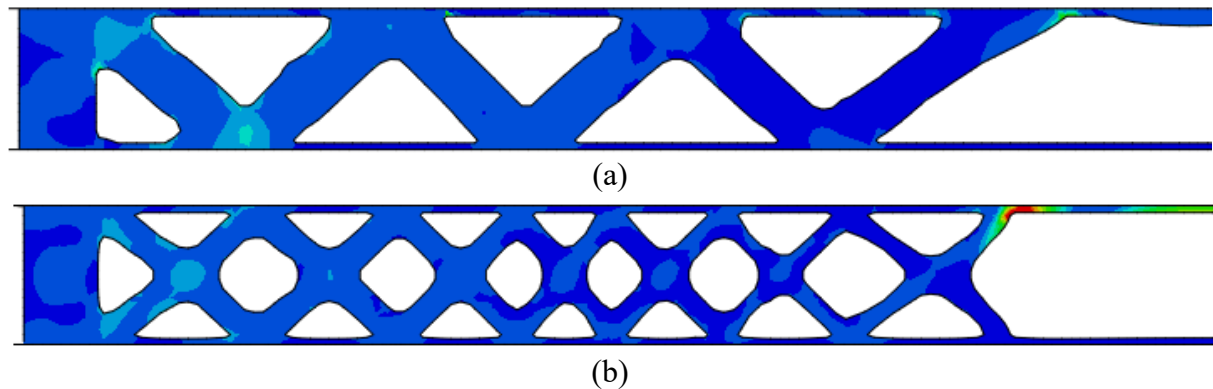


Figura 17 – Resultados obtidos para a distribuição da tensão de von Mises para as vigas otimizadas submetidas a condição de contorno biengastada (a) Viga otimizada para a condição de contorno biengastada – Tensão máxima: 246.2 MPa; (b) Viga otimizada para a condição de contorno biengastada com restrição de simetria – Tensão máxima: 405,2 MPa.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados obtidos para a máxima tensão de von Mises das vigas e também seus respectivos deslocamentos máximos no meio do vão.

Viga	Máxima Tensão de von Mises (MPa)	Deslocamento máximo no meio do vão (mm)
Celular	282,8	5,28
Otimizada para a condição de contorno biengastada (VBE)	232,6	4,23
Otimizada para a condição de contorno biengastada com restrição de simetria (VBES)	405,2	8,04

Tabela 4 – Resultados obtidos para a máxima tensão de von Mises e deslocamentos máximos no meio do vão para as vigas submetidas a condição de contorno biengastada.

Desta forma, é possível perceber que novamente as vigas otimizadas tiveram um melhor desempenho, quando comparadas a viga celular. O pior desempenho apresentado pela viga otimizada para a condição de contorno biengastada com restrição de simetria é

possivelmente acarretado justamente pela restrição inserida durante o processo de otimização, que impede a procura por uma topologia ótima dentro de um domínio mais amplo de soluções para a condição de contorno aplicada.

Ainda com o objetivo de avaliar o desempenho estrutural de todas as vigas estas foram submetidas a uma análise de autovalores e autovetores, para avaliar a carga crítica e o modo de flambagem de cada uma das vigas.

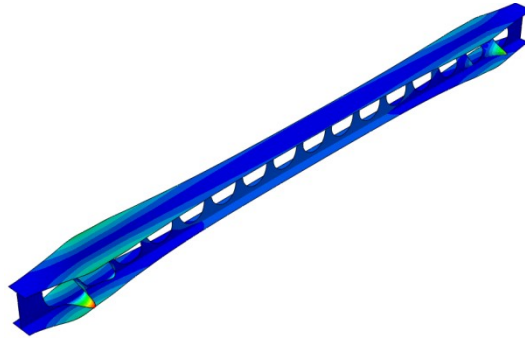


Figura 18 – Carga crítica e modo de falha para a viga celular submetida à condição de contorno biengastada – Carga crítica: 520,0 kN.

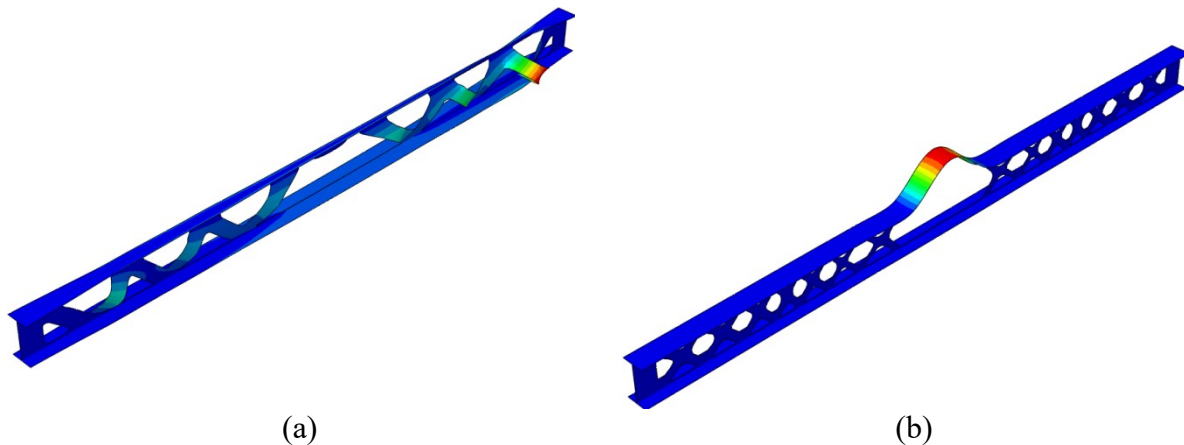


Figura 19 – Cargas críticas e modos de falha para as vigas otimizadas submetidas à condição de contorno biengastada Viga otimizada para a condição de contorno biengastada – Carga crítica: 303,029 kN; (b) Viga otimizada para a condição de contorno biengastada com restrição de simetria – Carga crítica: 423,405 kN.

Seguindo com o objetivo de avaliar o desempenho estrutural das topologias obtidas após o processo de otimização, todas as vigas foram então submetidas a uma análise não linear completa com condição de contorno biengastada. Os resultados obtidos são apresentados no Gráfico 2.

Desta forma, é possível perceber que a viga celular apresenta o pior desempenho, seguida pelas vigas otimizadas para a condição de contorno biengastada (VBE e VBES) Além disso, também é possível perceber que a inserção de uma restrição geométrica de simetria durante o

processo de otimização para a viga biengastada gerou uma topologia (VBES) com uma resistência ainda maior do que a viga otimizada sem qualquer restrição de simetria (VBE).

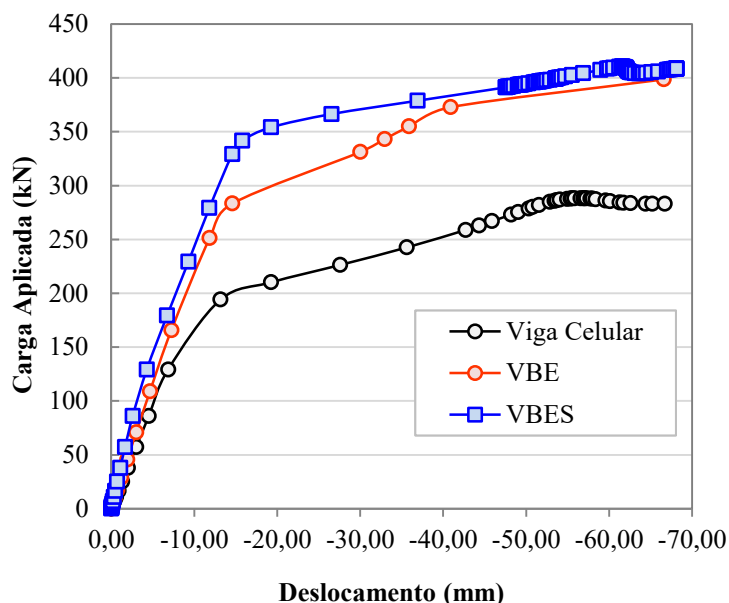


Gráfico 2 – Carga versus deslocamento para as vigas submetidas à condição de contorno biengastada.
Legenda: VBE - viga otimizada para a condição de contorno biengastada; VBES - viga otimizada para a condição de contorno biengastada com restrição de simetria.

3 CONCLUSÕES

Foram apresentados neste trabalho os resultados obtidos para a otimização topológica de vigas perfuradas, obtidas através do método SIMP de otimização, realizado no software ABAQUS. As vigas obtidas através do processo de otimização foram então submetidas à análise linear elástica, de autovalores e autovetores e não linear completa.

Através do estudo realizado foi possível verificar como a otimização topológica pode gerar resultados bastante satisfatórios para as vigas perfuradas; a comparação com a viga celular realizada neste estudo mostrou que, apesar de terem pesos muito próximos, as vigas otimizadas se mostraram mais rígida e apresentaram menores concentrações de tensões. Foram realizadas diversas análises com o objetivo de demonstrar a eficiência das estruturas obtidas. Somente na análise de autovalores e autovetores (cargas e modos críticos), as vigas otimizadas apresentaram resultados ligeiramente inferiores à viga de referência, mas deve-se levar em conta que não foram utilizadas restrições nos parâmetros de instabilidade durante o processo de otimização.

Algumas possíveis sugestões para a continuidade desse estudo são listadas a seguir:

- Extensão da análise utilizada como base no processo de otimização para consideração de não linearidades do material ou geométricas;
- Desenvolvimento de análises que levem em consideração as tensões residuais.
- Considerar restrições de frequências naturais de vibração e cargas críticas;

- Desenvolvimento de um modelo capaz de simular as condições de contorno utilizadas na aplicação destas vigas, como a modelagem das chapas de ligação.

REFERÊNCIAS

ABAQUS 6.14, 2014. Dassault Systèmes.

Bendsøe, M. P., 1989. Optimal shape design as a material distribution problem. *Struct. Optim.* Vol. 1, pp. 193-202.

Kerdal, D. & Nethercott, D. A., 1984. Failure Modes for Castellated Beams. *J. Construct. Steel Research*, vol. 4, pp. 295-315.

Kingman, J. J., Tsavdaridis, K. D. & Toropov, J. J., 2014. Applications of topology optimisation in structural engineering. *Civil Engineering for Sustainability and Resilience International Conference*, April 2014, Amman, Jordan.

Lawson, R. M. & Hicks, S. J., 2011. Design of Composite Beams with Large Web Openings. *SCI PUBLICATION*. Publication Number: SCI P355 ISBN 978-1-85942-197-0, Published by: Silwood Park, Ascot, Berkshire.

ROCHA, K. M., 2017. *Otimização topológica de vigas com aberturas na alma*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Rodrigues, F., 2007. *Comportamento estrutural de vigas de aço com abertura na alma*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.