

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA: UMA APLICAÇÃO EM VIGAS DE PERFIL I COM FUROS NA ALMA

LAÍS DE BRITO VILAROUÇO PEDROSA

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado em Mecânica Computacional

Orientador: Prof. Dr. Marco Paulo Lages Parente

OUTUBRO, 2022

OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA: UMA APLICAÇÃO EM VIGAS DE PERFIL I COM FUROS NA ALMA

LAÍS DE BRITO VILAROUÇO PEDROSA

Mestrado em Mecânica Computacional

OUTUBRO, 2022

À minha família

Tenho-vos dito isso para que em mim tenhais paz; no mundo tereis aflições, mas tende bom ânimo, eu venci o mundo.

João 16:33

AGRADECIMENTOS

A Deus, aquele que em todos os momentos esteve presente, me ajudando e dando forças para realizar os meus sonhos.

A minha família, pelo amor e apoio que me deram ao longo da minha vida e principalmente nesses últimos anos.

A minha mãe, Cláudia, a qual é minha influência, minha inspiração. Queria te agradecer mãe, por tudo que a senhora fez e faz por mim. Obrigada por ser mãe e pai ao mesmo tempo, obrigada por segurar a minha mão nos momentos que mais precisei, obrigada por ser meu porto seguro. Sem você também nada disso seria possível.

A minha irmã Thaís, que nos momentos mais complicados me traz calma e segurança. Ela pode não saber, mas é o meu porto seguro.

Ao meu padrasto Fuad, que me acolheu em sua vida com muito carinho. Te agradeço por ser tão incrível comigo, me ajudando, dando forças e apoio. Você tem um lugar muito especial em minha vida.

A minha tia Rute e ao meu cunhado João Felipe, por trazerem suavidade a minha vida e me apoiarem ao longo desses anos.

Aos meus amigos de uma vida inteira, por me ajudarem e me apoiarem nessa longa caminhada, onde a distância de um país para o outro não diminui nosso amor e companheirismo. Sou grata por ter vocês na minha vida.

Aos grandes amigos que fiz em Portugal, em especial, a Alana, Antonio, Camilo, Douglas, Jonas, Larissa, Marcos, Thayla e Vinícius, vocês agora são minha família. Obrigada por todo o apoio, carinho, companheirismo, risadas, almoços, jantares, sem vocês nada disso seria possível.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marco Parente, que me acolheu nesse mestrado. Obrigada pelas ideias sugeridas e por toda ajuda e apoio demonstrados nessa caminhada.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

RESUMO

Nos dias atuais, se, por um lado, a construção civil exige maior qualidade de seus serviços, por outro, reivindica a redução no uso de materiais, mantendo a eficiência. Limitações de altura são constantemente impostas às edificações de diversos pavimentos, como, por exemplo, do ponto de vista econômico, zoneamento urbano, ponderações estéticas, etc. Um pé-direito alto é primordial para comunicação e caminho de tubulações e dutos de serviços. Assim, para que não seja necessário um aumento nas alturas entre os pavimentos da edificação, utilizam-se vigas de aço com alma vazada, tornando, então, possível a passagem.

Vigas de aço vazadas são menos sensíveis à deformação e mais resistentes à flexão, fornecendo também uma boa capacidade de resistência aos esforços cortantes. Todavia, dependendo do tipo de carregamento ao qual serão submetidas, alguns tipos de vigas vazada podem sofrer com a ocorrência de altos gradientes de tensão, levando estas vigas a estarem sucessíveis a falhas. Destarte, a dissertação ora apresentada tem por objetivo encontrar uma nova geometria para as aberturas da alma das vigas de aço através do processo de otimização do programa ABAQUS, além de avaliar e descrever o seu comportamento estrutural na alma. Visando encontrar uma geometria ótima, os carregamentos externos submetidos ao sistema foram calculados e as condições de contorno foram estabelecidas, para, então, discretizar os componentes e efetuar a análise estrutural pelo Método de Elementos Finitos (MEF), utilizando o *software* ABAQUS. Os resultados obtidos apresentaram um bom comportamento estrutural das vigas otimizadas quando relacionadas as vigas celulares de referência, no que se diz respeito a sua resistência. Por fim, depois da análise dos resultados foi proposto um modelo aproximado para a viga otimizada que obteve o melhor resultado, modelo esse que após análise, também obteve um melhor comportamento quando comparado as vigas de referência.

PALAVRAS-CHAVE Vigas vazadas, Método dos Elementos Finitos, Modelagem Computacional, Otimização Topológica, ABAQUS.

ABSTRACT

Nowadays, civil construction increasingly demands an increment in the quality of its services as well as a reduction in the use of materials while maintaining its efficiency. Height limitations are constantly imposed on buildings with different floors, for example, from an economic point of view, urban zoning, aesthetic considerations, etc. A high ceiling is essential for the communication and path of pipes and service ducts, so that it is not necessary to increase the heights between the floors of the building, therefore, steel beams with a hollow core are used, making the passage possible.

Hollow steel beams are less sensitive to deformation and more resistant to bending, also providing good resistance to shear forces. However, depending on the type of loading to which they will be subjected, some types of hollow beams may suffer from the occurrence of high stress gradients, leading these beams to be prone to failure. Thus, the present dissertation aims to find a new geometry for the web openings of steel beams through the optimization process of the ABAQUS program, in addition to evaluating and describing their structural behavior in the web. In order to find an optimal geometry, the external loads submitted to the system were calculated and the boundary conditions were established, to then discretize the components and perform the structural analysis by the Finite Element Method (FEM), using the ABAQUS software. The results obtained showed a good structural behavior of the optimized beams when related to the cellular reference beams, regarding their strength. Finally, after analyzing the results, an approximate model was proposed for the optimized beam that obtained the best result, a model that, after analysis, also obtained a better behavior when compared to the reference beams.

KEYWORDS: Hollow beams, Finite Element Method, Computational Modelling, Topological Optimization.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. VIGAS DE AÇO COM ABERTURA NA ALMA	1
1.1.1. CLASSIFICAÇÃO DAS VIGAS DE AÇO COM ABERTURA NA ALMA	2
1.2.1. OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL TOPOLÓGICA	6
1.2. OBJETIVOS	6
1.3. METODOLOGIA	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1. INTRODUÇÃO	9
2.1.1. ABERTURA LOCALIZADA NA ALMA DE UMA VIGA	9
2.2. VIGAS CELULARES E VIGAS CASTELADAS	18
2.2.1. MODOS DE COLAPSO DE VIGAS COM ABERTURAS NA ALMA	20
2.2.1.1. Formação de um mecanismo <i>Vierendeel</i>	21
2.2.1.2. Formação de um mecanismo por flexão ou de rótula plástica	21
2.2.1.3. Ruptura das soldas entre as aberturas	21
2.2.1.4. Encurvadura lateral por torção	22
2.2.1.5. Encurvadura do montante da alma devido á compressão	23
2.2.1.6. Encurvadura do montante da alma devido ao cisalhamento	23
3. OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL TOPOLÓGICA	25
3.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	25
3.1.1. CONCEITOS DE OTIMIZAÇÃO	26
3.1.2. TIPOS DE OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL	28
3.2. OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA	29
3.2.2. PRINCIPAIS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA	32
3.2.3. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)	34
3.3. SOFTWARE ABAQUS ALIADO A FERRAMENTA DE OTIMIZAÇÃO DO TOSCA STRUCTURE	36
4. OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DAS VIGAS NO SOFTWARE ABAQUS	39

4.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	39
4.1.1. DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE ELEMENTOS FINITOS	40
4.1.2. OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DA VIGA.....	41
4.1.3. ANÁLISE ESTRUTURAL I: VALIDAÇÃO E ANÁLISE DO MODELO ORIGINAL	41
4.1.3.1. Pré-processamento para a análise estrutural I	42
4.1.3.2. Domínio otimizável da estrutura	44
4.1.3.3. Método SIMP: técnica de interpolação de materiais	44
4.1.3.4. Escolha do fator de penalização	46
4.1.3.5. Determinação dos parâmetros de projeto	47
4.1.4. RESTRIÇÃO GEOMÉTRICA	47
4.2. PROCESSO DA OTIMIZAÇÃO	47
4.2.1. VIGA CELULAR UTILIZADA COMO REFERÊNCIA	48
4.2.2. PROPRIEDADES DAS VIGAS ATRAVÉS DO PROCESSO E OTIMIZAÇÃO.....	48
4.2.3. ANÁLISE DAS VIGAS (CELULAR E OTIMIZADA) PARA A CONDIÇÃO DE CONTORNO BIAPOIADA	49
4.2.4. ANÁLISE DAS VIGAS (CELULAR E OTIMIZADA) PARA A CONDIÇÃO DE CONTORNO BIENGASTADA	51
4.2.5. ANÁLISE FINAL DAS VIGAS APÓS O PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO COM BASE NAS TENSÕES MÁXIMAS E DESLOCAMENTOS	53
4.3. ANÁLISE DAS VIGAS SUBMETIDAS AO MODO DE FALHA POR ENCURVADURA	54
5. CRIAÇÃO DE UM MODELO GEOMÉTRICO APROXIMADO	61
5.1. PROCESSO DE CRIAÇÃO	61
5.2. RESULTADOS DAS VIGAS COM TOPOLOGIA APROXIMADA PARA AS CONDIÇÕES DE CONTORNO BIAPOIADA E BIENGASTADA	62
5.3. ANÁLISE DA TENSÃO VON MISES, DESLOCAMENTO MÁXIMO E ANÁLISE DE ENCURVADURA DO MODELO APROXIMADO	64
6. CONCLUSÃO	65
7. REFRÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1 – Interação das vigas com as tubulações de serviço	2
Fig. 1.1 – Vigas com aberturas regulares	3
Fig.1.2 – Vigas casteladas com aberturas hexagonais	4
Fig.1.3 – Vigas celulares com aberturas circulares	4
Fig.1.4 – Geometrias dos furos	5
Fig.2 – Mecanismo de <i>Vierendeel</i> ao redor de uma abertura circular	10
Fig.2.1 – Enrijecedores na alma de uma viga perfil I	12
Fig.2.2 – Condições para aberturas circulares	13
Fig.2.3 – Geometrias das aberturas pela Eurocode 3	14
Fig.2.4 – Posição e dimensões de uma abertura.....	14
Fig.2.5 – Múltiplas aberturas poligonais na alma.....	15
Fig.2.6 – Múltiplas aberturas circulares na alma.....	15
Fig.2.7 – Dimensões de várias aberturas na alma.....	16
Fig.2.8 – Fabricação das vigas casteladas	17
Fig.2.9 – Procedimento de corte automatizado na produção das vigas celulares	18
Fig.2.10 – Fabricação das vigas casteladas com aberturas hexagonais	20
Fig.2.11 – Formação do mecanismo de <i>Vierendeel</i>	21
Fig.2.12 – Ruturas das soldas entre aberturas	22
Fig.2.13 – Encurvadura lateral por torção em viga perfil I	22
Fig.2.14 – Encurvadura do montante da alma devido à compressão.....	23
Fig.2.15 – Encurvadura do montante da alma devido ao cisalhamento	24
Fig.3 – Otimização estrutural (a) domínio inicial e (b) domínio final	26
Fig.3.1 – Tipos de otimizações estruturais (a) otimização paramétrica (b) otimização de forma (c) otimização topológica.....	29
Fig.3.2 – Comparação entre um projeto sem otimização e com otimização	30
Fig.3.3 – Procedimento por otimização topológica	31
Fig.3.4 – (a) Domínio natural sem furo (b) domínio perturbado com furo.....	34
Fig.3.5 – Malha de elementos finitos nos domínios Ω e nos subdomínios Ω_e	35
Fig.3.6 – Modelo de discretização e refino da malha.....	35
Fig.3.7 – Fluxograma para a otimização topológica	37
Fig.4 – Fluxograma do processo de otimização	39

Fig.4.1 – Secção transversal da viga	40
Fig.4.2 – secção transversal dos três perfis de viga	40
Fig.4.3 – Condições de contorno e carregamento utilizados no processo de otimização	41
Fig.4.4 – Exemplo da discretização da viga.....	42
Fig.4.5 – Discretização (malha) tipo S4R.....	43
Fig.4.6 – Condições de contorno (a) biapoiada e (b) biengastada	43
Fig.4.7 – Domínio otimizável da estrutura.....	44
Fig.4.8 – Topologias para as vigas biengastadas obtidas após o processo de otimização através do método SIMP para o fator penalidade $p = 4$	46
Fig.4.9 – Topologias para as vigas biapoiadas obtidas após o processo de otimização através do método SIMP para o fator penalidade $p = 4$	47
Fig.4.10 – Geometria das aberturas da viga de referência.....	48
Fig.4.11 – Distribuição da tensão de von Mises para a viga celular W310x21 com condição de contorno biapoiada	49
Fig.4.12 – Distribuição da tensão de von Mises para a viga celular W310x28,3 com condição de contorno biapoiada	49
Fig.4.13 – Distribuição da tensão de von Mises para a viga celular W310x52 com condição de contorno biapoiada	50
Fig.4.14 – Distribuição da tensão de von Mises para a viga W310x21 otimizada com a condição de contorno biapoiada.....	50
Fig.4.15 – Distribuição da tensão de von Mises para a viga W310x28,3 otimizada com a condição de contorno biapoiada	50
Fig.4.16 – Distribuição da tensão de von Mises para a viga W310x52 otimizada com a condição de contorno biapoiada	50
Fig.4.17 – Distribuição da tensão de von Mises para a viga celular W310x21 com condição de contorno biengastada	51
Fig.4.18 – Distribuição da tensão de von Mises para a viga celular W310x28,3 com condição de contorno biengastada	52
Fig.4.19 – Distribuição da tensão de von Mises para a viga celular W310x52 com condição de contorno biengastada	52
Fig.4.20 – Distribuição da tensão de von Mises para a viga W310x21 otimizada com a condição de contorno biengastada	52
Fig.4.21 – Distribuição da tensão de von Mises para a viga W310x28,3 otimizada com a condição de contorno biengastada	52
Fig.4.22 – Distribuição da tensão de von Mises para a viga W310x52 otimizada com a condição de contorno biengastada	53
Fig.4.23 – W310x21 Otimizada – condição de contorno biapoiada	54

Fig.4.24 – W310x21 Otimizada – condição de contorno biengastada.....	54
Fig.4.25 – W310x28,3 Otimizada – condição de contorno biapoiada.....	55
Fig.4.26 – W310x28,3 Otimizada – condição de contorno biengastada.....	55
Fig.4.27 – W310x52 Otimizada – condição de contorno biapoiada.....	55
Fig.4.28 – W310x52 Otimizada – condição de contorno biengastada.....	56
Fig.4.29 – W310x21 Celular – condição de contorno biapoiada	56
Fig.4.30 – W310x21 Celular – condição de contorno biengastada	57
Fig.4.31 – W310x28,3 Celular – condição de contorno biapoiada	57
Fig.4.32 – W310x28,3 Celular – condição de contorno biengastada	57
Fig.4.33 – W310x52 Celular – condição de contorno biapoiada	58
Fig.4.34 – W310x52 Celular – condição de contorno biengastada	58
Fig.5 – Modelo aproximado da viga otimizada	61
Fig.5.1 – Distribuição da tensão de von Mises para o modelo aproximado com a condição de contorno biapoiada	62
Fig.5.2 – Distribuição da tensão de von Mises para o modelo aproximado com a condição de contorno biengastada	63
Fig.5.3 – Deslocamento máximo para o modelo aproximado com a condição de contorno biapoiada.....	63
Fig.5.4 – Deslocamento máximo para o modelo aproximado com a condição de contorno biengastada.....	63
Fig.5.5 – Modo de encurvadura da viga de modelo aproximado com condição e contorno biapoiada.....	63
Fig.5.6 – Modo de encurvadura da viga de modelo aproximado com condição e contorno biengastada.....	64

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedade geométricas dos perfis originais	40
Tabela 2 – Discretização dos três perfis de viga selecionados	41
Tabela 3 – Volume das vigas de referência	48
Tabela 4 – Comparação do volume, peso e elementos finitos usados na discretização das malhas das vigas	49
Tabela 5 – Resumo das tensões máxima das vigas celulares e otimizadas	51
Tabela 6 – Resumo das tensões máxima das vigas celulares e otimizadas	53
Tabela 7 – Carga crítica e modos de encurvadura para as vigas de referência	58
Tabela 8 – Carga crítica e modos de encurvadura para as vigas otimizadas	59
Tabela 9 – Larguras das barras das vigas otimizadas.....	61
Tabela 10 – Descrição do volume e números de elementos finitos do modelo de viga aproximado	62
Tabela 11 – Comparação dos resultados obtidos entre as vigas celular, otimizada e o modelo de topologia aproximado	64

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

3D - Tridimensional

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AESO - Additive Evolutionary Structural Optimization

CAD – Computer Aided Design

CAE – Computer Aided Engineering

E - Módulo de Elasticidade [MPa]

EN – Norma Europeia

ESO - Evolutionary Structural Optimization

EUROCODE – European Committee for Standardisation

FEM – Finite Element Method

kN - KiloNewton

mm - milímetro

MPa - Megapascal

MEF - Métodos dos elementos finitos

NBR – Norma Brasileira

OE – Otimização estrutural

OT – Otimização topológica

SIMP – Simple Isotropic Material with Penalization

SCI - The Steel Construction Institute

TSA - Topological Sensitivity Analysis

USA – United States of America

1

INTRODUÇÃO

1.1. VIGAS DE AÇO COM ABERTURA NA ALMA

O desempenho dos componentes horizontais das construções está fundamentalmente correlacionado com a rigidez e resistência à flexão. Assim, na hora de criar soluções para melhoria das vigas de aço visando modificar a geometria das secções transversais tendo como foco a maximizar da inércia. Além disso, como o aço é um material de alto valor agregado, as preocupações económicas estão presentes. Por este motivo, é usual adotarem-se vigas de aço com perfis de secção I, onde a maior parte da área da secção transversal se concentra nas mesas, ou vigas treliçadas.

A busca pela otimização e utilização racional dos recursos nas construções em estruturas de aço, muitas vezes traz como solução o uso de vigas com aberturas em sua alma para a passagem de tubulações e ductos de serviços, garantindo, desse modo, um melhor aproveitamento do espaço, visto que os sistemas de instalações e as vigas permanecem no mesmo nível, além de proporcionar um ganho económico.

Uma técnica frequentemente utilizada para reduzir altura de pavimentos é a execução de aberturas na alma das vigas para a passagem de tubulações de serviços (Fig.1). Essas aberturas nas almas do perfil podem representar um aumento de até 75% (setenta e cinco) em relação à altura original da viga. Contudo, se essas aberturas na alma das vigas de aço não possuírem uma geometria, forma e tamanho adequados, é possível que ocasionem problemas na capacidade da estrutura, pois, muitas vezes, a existência de aberturas pode diminuir a resistência e a rigidez das vigas. Por essa razão, a sugestão é o uso de aberturas circulares e retangulares, podendo ou não ter reforços. Com a finalidade de minimizar os efeitos de concentrações de tensões, tratando-se de aberturas retangulares, é feito um arredondamento nos cantos das referidas aberturas.

Sendo assim, neste capítulo, serão abordados os diferentes tipos de vigas e suas geometrias, como também os cuidados referentes à posição e ao tamanho das aberturas.



Figura 1 – Interações das vigas com as tubulações de serviço [78]

1.1.1. CLASSIFICAÇÃO DAS VIGAS DE AÇO COM ABERTURA NA ALMA

- QUANTO À RESISTÊNCIA MECÂNICA

Refere-se à forma com que as vigas resistem aos esforços atuantes, podendo ser classificadas como vigas de aço ou mistas (betão e aço).

- QUANTO À REGULARIDADE DOS FUROS AO LONGO DA VIGA

Nesta classificação, as vigas de aço ou mistas podem ser formadas de furos com ou sem regularidade. Nos furos sem regularidade, as aberturas são feitas sem que se obedeça a um espaçamento prefixado. Já nos furos com regularidade, as aberturas são feitas obedecendo a um espaçamento fixo entre os furos, isto é, existe uma simetria (Fig.1.1).



Figura 1.1 - Vigas com aberturas regulares [39]

- QUANTO AO PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Segundo Lawson e Hicks [39] em publicação do The Steel Construction Institute – SCI, existem três processos de fabricação de vigas com aberturas na alma.

O primeiro processo é utilizado para vigas com aberturas isoladas. São aberturas individuais, cortadas alma de uma secção laminada a quente. A secção de aço apresenta uma forma simétrica.

O segundo processo afirma que uma secção fabricada é constituída por três placas que são soldadas juntas para formar uma secção I, podendo a mesma ser assimétrica. As aberturas são cortadas na alma antes ou depois da formação da secção I. Esse método pode ser utilizado tanto para aberturas isoladas quanto para aberturas regularmente espaçadas.

Por fim, o terceiro processo evidencia que uma secção laminada a quente é cortada em um perfil ao longo da alma, e suas secções em T resultantes são reposicionadas e soldadas novamente para formar uma série de aberturas regulares em uma secção mais profunda. Este método tem como conhecidas as vigas casteladas (Fig.1.2) e as vigas celulares (Fig.1.3). Este processo é apropriado somente para aberturas com espaçamento regular.



Figura 1.2 - Vigas casteladas com aberturas hexagonais [79]

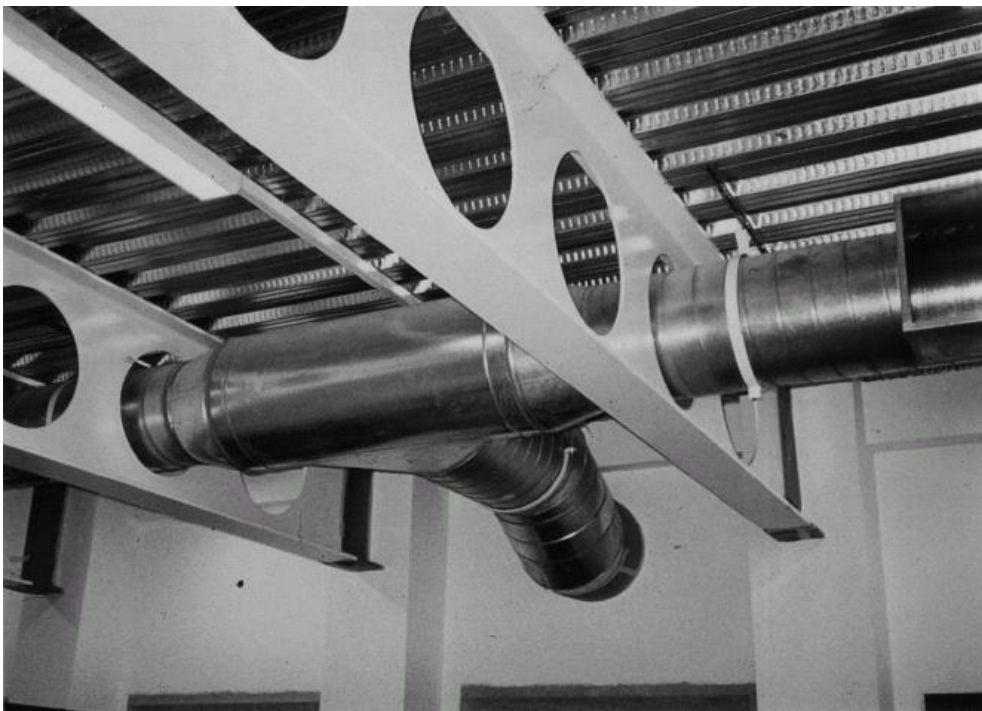


Figura 1.3 - Vigas celulares com aberturas circulares [19]

- QUANTO À GEOMETRIA DO FURO

Os furos nas vigas de aço podem apresentar variadas geometrias (Fig.1.4), dependendo do processo de fabricação, tal como da finalidade para os quais foram feitos. A geometria com a qual é projetada a viga de aço é fundamental para a determinação dos esforços atuantes nas aberturas na alma. As formas mais comuns entre as aberturas são: furos circulares, furos hexagonais, furos retangulares e furos semicirculares. Uma junção das formas citadas é possível, entretanto, se faz necessário um estudo de viabilidade quanto ao custo de fabricação, do mecanismo de resistência e de rutura.

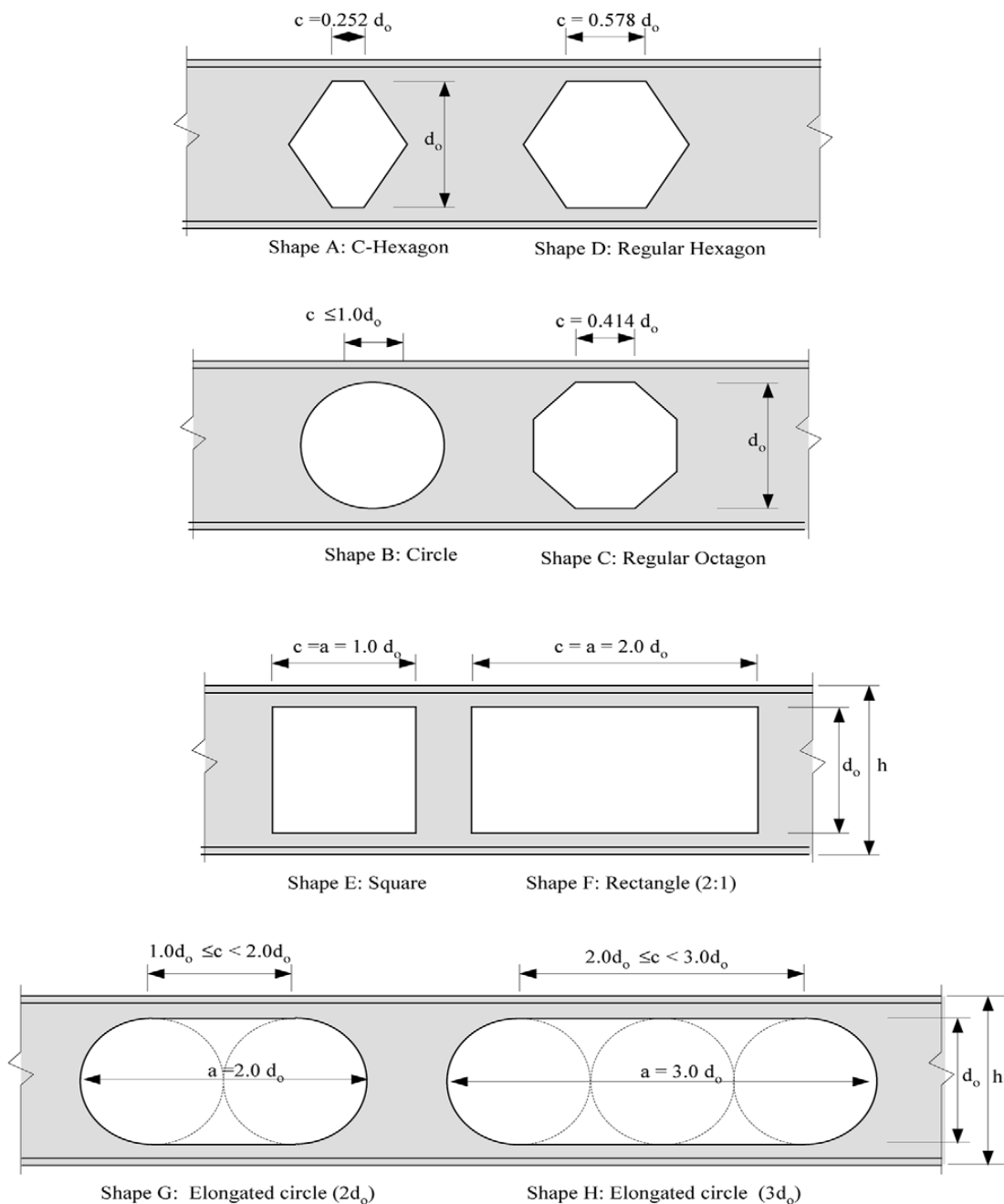


Figura 1.4 - Geometrias dos furos [18]

- QUANTO À LOCALIZAÇÃO DO FURO EM RELAÇÃO À ALTURA DA ALMA DO PERFIL

Por algum motivo de projeto, o centroide do furo de uma viga de aço pode estar localizado ou não na metade da altura da alma do perfil. Caso o centroide do furo esteja centrado na alma do perfil, a viga é dita de furo concêntrico. Caso contrário, a viga é dita de furo excêntrico.

1.2.1. OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL TOPOLÓGICA

Com o avanço tecnológico e as exigências do mercado, o uso eficiente de materiais se tornou um dos aspectos de maior relevância no ramo da Engenharia. A busca pela melhor qualidade, pela diminuição dos custos, aumento de produtividade e por estruturas ótimas tem crescido exponencialmente com o passar dos anos. O aumento da procura por esse tipo de estrutura pode estar relacionado ao fato de que estruturas otimizadas possuem, em geral, um melhor desempenho, levando, por conseguinte, a uma economia de material, além de custos menores em virtude da redução de materiais. A partir disso, estudos foram realizados na construção de modelos matemáticos, dando origem a ferramentas para que a busca por essa estrutura ótima se torne um objetivo possível de ser alcançado. Por derradeiro, a otimização estrutural foi uma das ferramentas criadas.

A otimização estrutural pode ser dividida em três enfoques: a otimização de forma, de tamanho e a topológica. Cumpre destacar que a otimização estrutural topológica é a mais utilizada, pois, como sabido, a mencionada otimização estrutural é capaz de produzir informações sobre o número, localização e formas das aberturas [16].

Otimização topológica é um procedimento numérico/computacional utilizado para identificar a distribuição mais adequada de material de uma estrutura, dentro de um espaço determinado de projeto, onde será submetido a um conjunto de cargas e restrições, que serão as condições de contorno, que poderão satisfazer o mesmo.

Sendo assim, este trabalho busca encontrar, por meio da otimização topológica do programa ABAQUS, uma viga com nova topologia para as aberturas da alma.

1.2. OBJETIVOS

Essa dissertação tem como objetivo principal obter uma nova geometria para as aberturas na alma da viga de perfil I, com o auxílio do processo de otimização topológica do *software* ABAQUS.

Serão avaliados os resultados das tensões máximas de *von mises* e deslocamentos obtidos através das simulações tanto para as vigas celulares como para as vigas otimizadas. Também serão analisados os modos de encurvadura como também os resultados de suas respectivas cargas críticas.

1.3. METODOLOGIA

Com a finalidade de alcançar os objetivos deste trabalho, o mesmo foi respaldado em uma análise bibliográfica especializada sobre vigas com aberturas na alma, como também sobre o processo de otimização topológica utilizando o *software* ABAQUS. Tendo como fonte artigos científicos, monografias, teses de mestrado, sites provedores de dados que foram publicados nos últimos anos sobre o presente tema.

Com todo o conhecimento adquirido, pretende-se com esse trabalho agregar saberes de forma a garantir uma análise mais próxima da realidade possível para a nova geometria dos furos da viga.

Este trabalho está organizado em 6 capítulos, como segue:

O capítulo 1, contendo uma introdução abordado a motivação deste estudo, bem como seus objetivos principais. Contendo também uma breve apresentação acerca das vigas com aberturas na alma e uma breve explicação da otimização estrutural topológica.

O capítulo 2, trazendo uma revisão bibliográfica sobre os tipos de viga com abertura na alma, e os modos de falha das vigas perfuradas.

O capítulo 3, descreve o que é a otimização estrutural, exemplificando os tipos existentes e tendo como foco principal, apresentar todo o processo que constitui a otimização topológica.

O capítulo 4, aprofundamento sobre a otimização topológica, apresentando os resultados obtidos pelas análises das simulações efetuadas nas vigas celulares e otimizadas, bem como, as análises de tensões e encurvadura de todas as vigas celulares e otimizadas.

O capítulo 5, contendo a apresentação de uma nova geometria para os furos na alma da viga, baseado no modelo otimizado que apresentou o melhor desempenho estrutural ao longo das análises.

E por fim o capítulo 6, trazendo as considerações finais, conclusões e as recomendações para a continuação desse estudo.

2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo, serão apresentados trabalhos de diversos autores que estudaram o comportamento estrutural de vigas de aço com aberturas de diferentes formas em sua alma.

O estudo tem como base trabalhos acadêmicos que discorrem sobre o aludido tema, levando, também, em consideração a norma brasileira NBR 8800:2008 e a norma europeia Eurocode 3.

2.1.1. ABERTURA LOCALIZADA NA ALMA DE UMA VIGA

Em 1983, Redwood [50] publicou um estudo no qual foram realizados estudos de dimensionamento, bem como uma revisão de estudos de inúmeros autores até a mencionada data. No referido trabalho, cita que Bower, em 1966, considerou os esforços através de toda a viga, e não apenas nas extremidades da abertura, o que o levou a concluir que com aberturas até 50% (cinquenta por cento) da altura total da viga é possível realizar uma análise elástica. O autor ressalta que alguns anos mais depois, Bower constatou que o esforço transversal tem uma influência expressiva em relação ao aumento da altura da abertura na alma. O esforço transversal tem uma influência expressiva no que diz respeito ao aumento da altura da abertura na alma, num estudo que serviu de base para a criação dos diagramas de interação momento-esforço transversal.

Em 2001, Chung et. al. [18] realizaram uma análise analítica e numérica das capacidades de cargas para vigas de aço com aberturas circulares na alma e foram considerados alguns pontos, como, por exemplo, melhorias na avaliação das capacidades de carga obtidas por meio do modelo de elementos finitos, com a incorporação da formação de dobradiças plásticas no lado do momento baixo e no lado do momento alto das seções perfuradas, de acordo com a modificação na redistribuição de cargas mediante a abertura da alma em grande deformação e a avaliação das resistências aperfeiçoada nas capacidades de momento das seções em T sob forças axiais e de cisalhamento coexistentes. Ademais, foi verificado que a presença da abertura na alma da viga apresenta três modos de falhas na seção perfurada, quais sejam, falha por cisalhamento, devido à redução da resistência ao cortante; falha por flexão, em virtude da capacidade reduzida do momento; e, por último, falha pelo mecanismo *Vierendeel* (Fig.2), em decorrência da formação de quatro rótulas plásticas na seção T acima e abaixo da abertura, definida pela transferência de força de cisalhamento lateral ao longo da abertura. A capacidade ao momento nas seções T acima e abaixo das aberturas sob momentos locais é relativamente difícil de ser avaliada na presença da força axial e cortante coexistentes, devido à ação da flexão global. Além do que, é necessário fazer uso do cálculo plástico para incorporar a formação das quatro rótulas plásticas nas seções T para um melhor entendimento acerca da capacidade de carga das vigas.

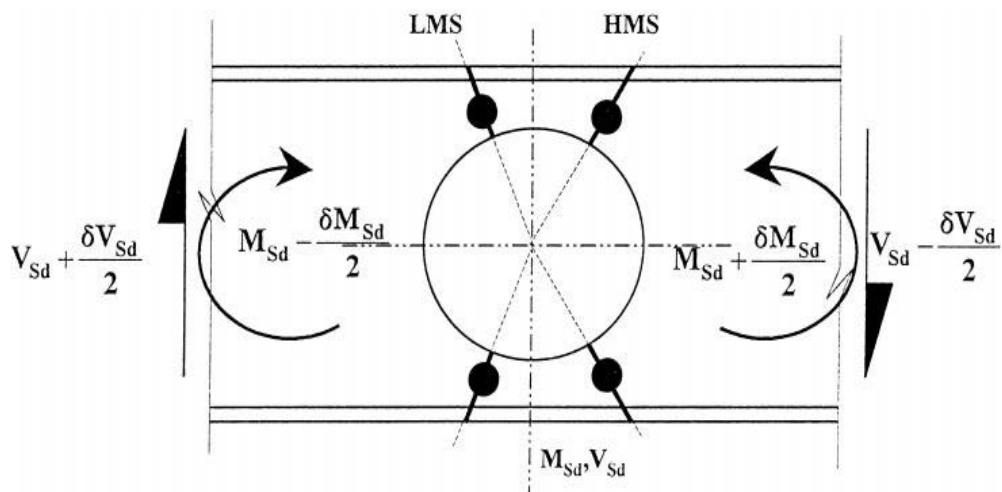


Figura 2 - Mecanismo de *Vierendeel* ao redor de uma abertura circular [18]

Sendo que:

- $M_{s,d}$ - Momento global;
- $V_{s,d}$ - Força de corte global;
- As siglas LMS e HMS são respetivamente os lados de maior e menor momento;

Warren [76], teve como objetivo de investigação compilar um conjunto de resultados para testes experimentais em vigas celulares, de modo que fosse possível encontrar um método preciso e prático para serem extraídos destes as cargas, os modos de rutura e as deflexões. Para tanto, ele utilizou quatro tipos diferentes de métodos computacionais.

Em 2007, Rodrigues [52] desenvolveu um estudo sobre o comportamento estrutural de vigas de aço com aberturas na alma, cujo objetivo era a elaboração de métodos capazes de avaliar o desempenho estrutural de vigas de aço simplesmente apoiadas com aberturas de diferentes tamanhos e formas, em diversificadas localizações ao longo das vigas, com finalidade de gerar informações para um dimensionamento prático de vigas de aço com furo na alma.

Rodrigues [52], apresentou ainda, em seu trabalho, o estudo dos parâmetros que influenciam diretamente a capacidade de resistência das vigas com divergentes tipos de aberturas, tais como: tipo de furo, localização do furo ao longo do vão, altura do furo em relação à altura do perfil, esbeltez da alma, localização da carga solicitante ao longo do vão, entre outros. Expôs também, em seu trabalho, os diferentes mecanismos de rutura para vigas com aberturas na alma e em seguida as causas que conduziram o colapso das mesmas. Para finalizar, realizou um estudo da eficiência de enrijecedores longitudinais nos locais dos furos existentes na alma das vigas de aço.

Destarte, Rodrigues [52] concluiu que o método dos elementos finitos revelou ser bastante útil e preciso na avaliação do comportamento estrutural de vigas de aço, bem como na distribuição de tensões, modelos de deslocamento, deformada e carga de rutura, para as vigas constituídas por perfis laminados. Verificou que para um colapso brusco da viga sem um patamar de escoamento definido, a rutura se deu

por meio da formação do mecanismo de *Vierendeel*. Em contrapartida, quanto às curvas que apresentam um patamar de escoamento bem definido, sem colapso brusco, podem ocorrer dois tipos de rutura: rutura por flexão e rutura pela formação do mecanismo de *Vierendeel* com quatro rótulas plásticas.

Como previsto, Rodrigues [52] constatou que as vigas com furo retangular apresentam resistência 30% (trinta por cento) menor quando levadas em consideração as vigas com furos quadrados ou circulares. Pode-se concluir de forma geral o mecanismo de rutura para esses três tipos de aberturas. Para as vigas com furo retangular que possuíam metade da altura da viga, apresentam o mecanismo de *Vierendeel* independente do ponto de aplicação. Já as vigas com furos quadrado, apresentam um modo de rutura misto, sendo composto pela formação do mecanismo de *Vierendeel* com flexão no ponto de aplicação de carga concentrada. Por fim, as vigas com furo circular se inclinam a apresentar rutura por flexão, mas podem exibir também um modo de rutura misto quando a abertura da alma da viga de aço estiver localizada nas proximidades do ponto de aplicação da carga concentrada.

Quando o fator estudado por Rodrigues [52] foi o vão, foi possível concluir que o aumento do mesmo reduziu a importância do mecanismo de *Vierendeel*, dando lugar aos modos de rutura misto e por flexão. Entretanto, para as vigas com furo de altura igual a 75% (setenta e cinco) da altura do perfil, independente do comprimento do vão, geometria e localidade do furo, o mecanismo de *Vierendeel* continua sendo o modo de rutura que predomina.

Rodrigues [52], atestou que a eficiência estrutural das vigas com aberturas de geometria circular é cerca de cinco vezes maior quando comparadas às vigas com aberturas retangulares, e duas vezes maior que as vigas com aberturas quadradas. Foi também possível concluir que a utilização de cantos arredondados nas aberturas é bastante eficaz para distribuição de esforços nas almas das vigas de aço, na medida em que diminui o efeito da concentração de tensões. Portanto, sugere-se o uso de enrijecedores (Fig.2.1) longitudinais no local da abertura, sendo possível, com a utilização dos referidos enrijecedores, aumentar a carga de rutura para as vigas com furo de altura igual a 75% (sessenta e cinco) da altura da viga de aço, em mais de três vezes para vigas com abertura retangular e em duas vezes para vigas com aberturas quadradas. No caso de aberturas circulares, constatou-se que o uso do enrijecedores elevam a carga de rutura em 20% (vinte). A presença de enrijecedores longitudinais proporcionou uma melhor distribuição de tensões no entorno das aberturas, contribuindo, assim, para um aumento da resistência das vigas.



Figura 2.1 - Enrijecedores na alma de uma viga perfil I [80]

A ABNT (NBR 8800:2008) [7], traz em seu anexo I, o normativo acerca das aberturas em alma de vigas:

- No dimensionamento de vigas de aço e de vigas mistas, devem ser levados em conta os efeitos das aberturas na alma dos perfis.
- Ainda no dimensionamento, devem ser verificados os estados-limites últimos e de serviço aplicáveis, considerando a influência das aberturas nas almas das vigas e os possíveis reforços dessas aberturas.
- Admite-se a execução de aberturas concêntrica e excêntricas sem reforços nas almas desde que:
 - Que as aberturas sejam circulares (Fig.2.2), uma vez que é recomendado evitar furos quadrados e retangulares, pois esta geometria de abertura gera picos de tensões de cisalhamento na alma;
 - Seja respeitado o limite de esbeltez h/t_w da alma estipulado na norma para alma de $3,76 \left(\frac{E}{f_y}\right)^{0,5}$;
 - Também seja respeitado o limite $b/2t$ estipulado na norma para mesa comprimida de $0,38 \left(\frac{E}{f_y}\right)^{0,5}$;

- Tenha um carregamento atuante uniformemente distribuído, pois carregamentos concentrados geram picos de tensões cisalhantes;
- Que a abertura esteja situada dentro do terço médio da altura e nos dois quartos centrais da viga;
- A distância entres os centros de duas aberturas adjacentes seja de no mínimo 2,5 vezes o diâmetro.
- A força cortante solicitante de cálculo nos apoios seja no máximo igual a 50% (cinquenta) de força resistente de cálculo da viga. Portanto, a sua solicitante deve ser metade da resistência;

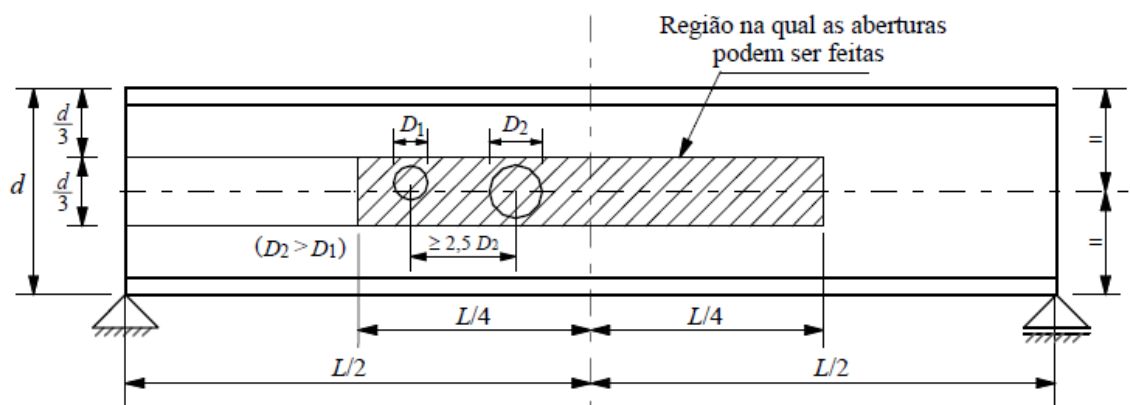


Figura 2.2 - Condições para aberturas circulares [7]

Sendo:

- D_1 - Diâmetro externo de secção circular;
- D_2 - Diâmetro externo de secção circular;
- d - Altura total da secção transversal;
- L - Comprimento da viga;

A Eurocode 3 no anexo N [25], dispõe de informações sobre a utilização de vigas com aberturas na alma. Esta norma aplica-se a perfis laminados e soldados. Algumas informações serão apresentadas a seguir:

- perfis I com abertura isolada na alma;
- Secções em I com múltiplas aberturas na alma;
- Para aberturas de alma isoladas, abrange aberturas concêntricas ou excêntricas em relação ao eixo da alma, de forma retangular ou circular, com ou sem armadura;
- Para múltiplas aberturas na alma, abrange aberturas espaçadas em intervalos regulares e localizadas concetricamente em relação ao eixo da alma, formadas pela expansão de perfis I laminados ou por aberturas nas almas de perfis I soldados. Inclui aberturas de forma poligonal ou circulares ou que tenham extremidades circulares e lados retos.

• **Geometria**

Este anexo inclui as seguintes formas de aberturas que podem ser visto na figura (Fig. 2.3) a seguir:

- a) abertura retangular definida por sua altura h_0 e sua largura a_0 ;
- b) abertura circular definida pelo seu diâmetro d_0 ou pelo seu raio r_0 ;
- c) abertura hexagonal definida por sua altura h_0 , sua largura a_0 e sua altura mínima b_0 ;
- d) abertura circular estendida definida por sua altura h_0 e seu raio de extremidade r ;
- e) abertura octogonal definida por sua altura h_0 , sua largura a_0 e sua largura mínima b_0 , e a altura da placa espaçadora h_p .

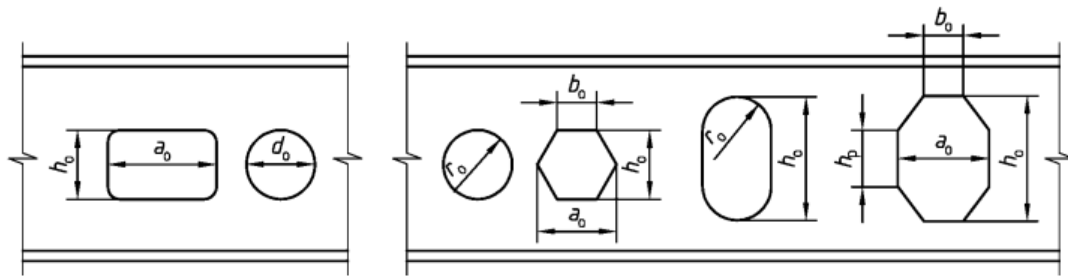


Figura 2.3 - Geometrias das aberturas pela Eurocode 3 [25]

• **Vigas com aberturas isoladas na alma**

- Todas as almas com $d_w/t_w > 69\epsilon$ devem ser equipadas com reforços de alma transversais nos apoios.
- As dimensões de uma abertura isolada na alma, figura (Fig. 2.4), devem satisfazer os limites a seguir:
 - $h_0 \leq 0,75 d_w$ para uma abertura poligonal ou $0,80 d_w$ para uma abertura circular;
 - $d_1 \geq 0,10 d_w$
 - $d_2 \geq 0,10 d_w$
 - $a_0 \leq 3 h_0$
 - $r_c \geq 2 t_w$ mais $r_c \geq 15 \text{ mm}$.
- A excentricidade e_0 de uma abertura não deve exceder $0,125 d_w$ em direção ao banzo de compressão.

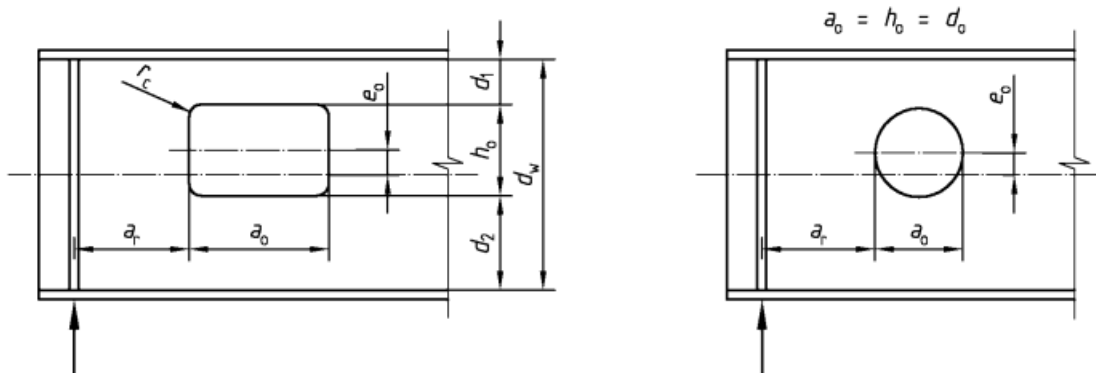


Figura 2.4 - Posição e dimensões de uma abertura [25]

- **Vigas com várias aberturas na alma**

- Em vigas com múltiplas aberturas na alma, as aberturas na alma devem ser espaçadas uniformemente ao longo do comprimento da viga e dispostas simetricamente ao longo da altura da secção transversal.
- A geometria das vigas com múltiplas aberturas poligonais ou múltiplas circulares na alma deve ser conforme as Figuras 2.5 e 2.6 respetivamente.

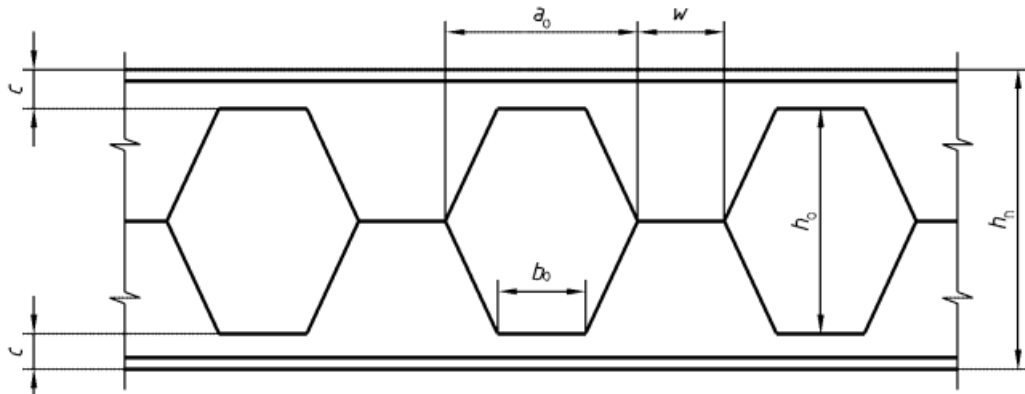


Figura 2.5 - Múltiplas aberturas poligonais na alma [25]

$$p = 2 (w + s)$$

$$h_n = 2 (h - c)$$

$$a_0 = (w + 2 s)$$

$$h_m = 2 (h - c) + h_p$$

$$b_0 = w$$

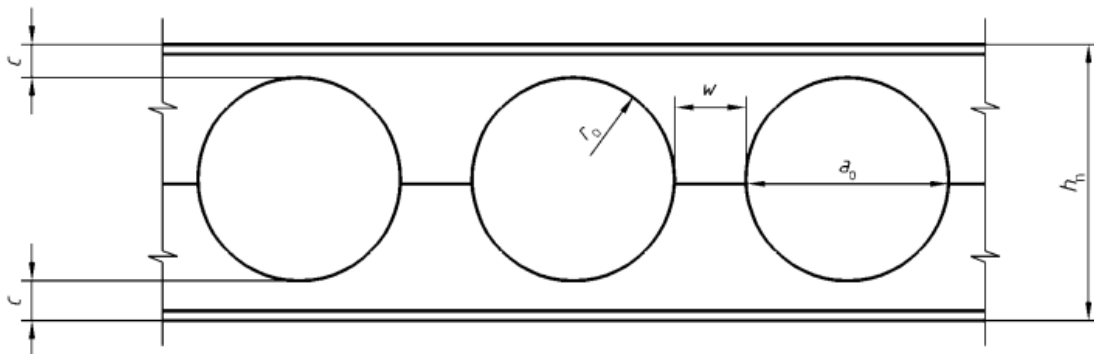


Figura 2.6 – Múltiplas aberturas circulares na alma [25]

$$h_n = 2 (r_0 + c)$$

$$p = w + 2 r_0$$

$$a_0 = 2 r_0$$

As dimensões das múltiplas aberturas na alma, ver Figura (Fig. 2.7), devem satisfazer os seguintes limites:

$h_0 \leq 0,75 d_w$ para uma abertura poligonal ou $0,80 d_w$ para uma abertura circular.

$d_1 \geq 0,10 d_w$

$d_2 = d_1$

$a_0 \leq h_0$

$b_0 = w$

$0,25 a_0 \leq w \leq 0,50 a_0$

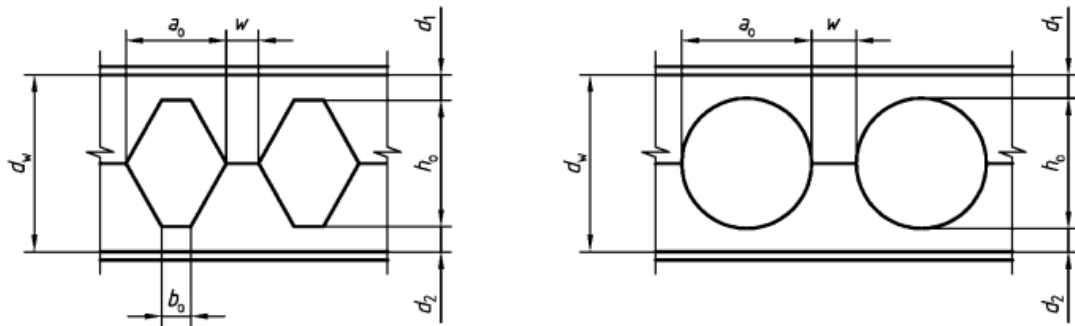


Figura 2.7 - Dimensões de várias aberturas na alma [25]

Lawson e Hicks [39], com a publicação do SCI (*The Steel Construction Institute*), expuseram novos métodos para a fabricação (Fig.2.8) de vigas com aberturas em sua alma. Possibilitando, então, a fabricação de vigas com os mais diversos tipos de furos na alma, proporcionando a partir do estudo da otimização topológica, que os modelos elaborados possam ser capazes de serem confeccionados.

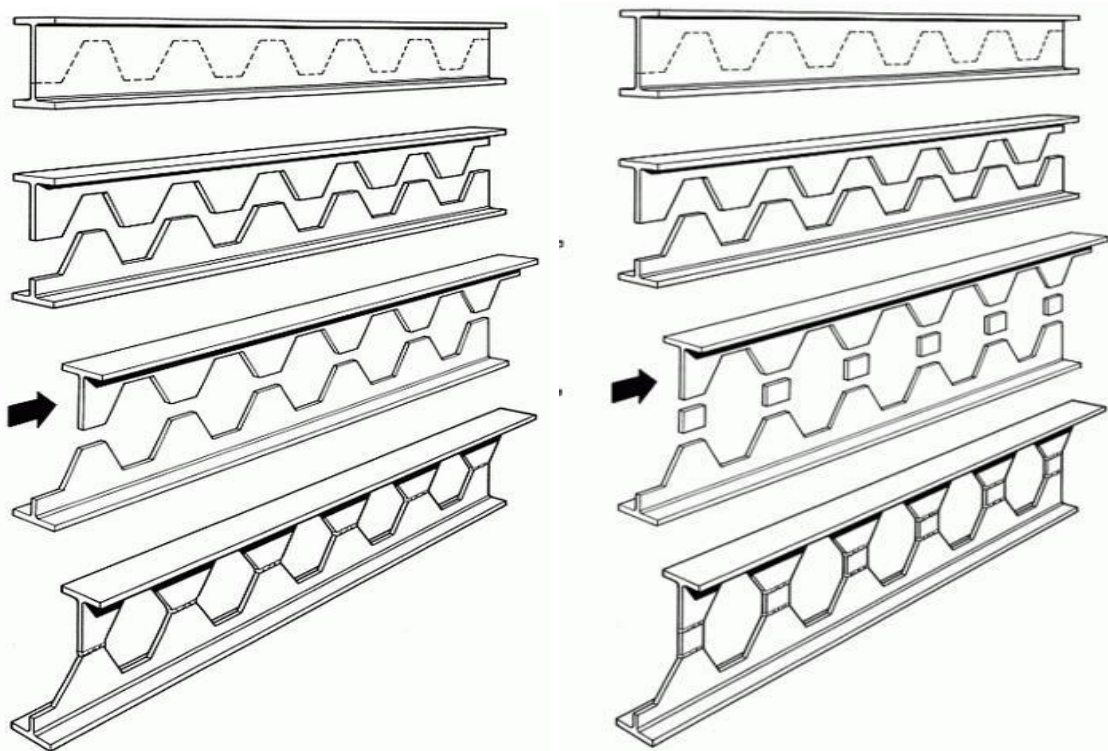


Figura 2.8 - Fabricação das vigas casteladas [81]

Silveira [59], trouxe como objetivo principal do seu trabalho a avaliação do comportamento estrutural de vigas de aço com aberturas hexagonais e circulares em sua alma. Para tal fim, por intermédio do programa ABAQUS, realizou uma análise numérica e um estudo analítico com ênfase nos modos de colapso com formação de rótulas plásticas.

Tsavidaridis e D’Mello [68], por meio do estudo de elementos finitos foi realizado uma análise experimental e analítica acerca do comportamento de vigas de aço com diferentes padrões e formas geométricas com abertura de alma estreitamente espaçadas, a fim de investigar a capacidade de cargas e os modos de rutura das secções perfuradas. O comportamento elástico-plástico do material de elementos finitos foi considerado para, então, sugerir uma fórmula empírica que dê previsão da força cortante dos montantes da alma.

Uma análise não linear de vigas celulares sujeitada a modos combinados de encurvadura por Ellobody [23] foi realizada. Além disso, foi elaborado um modelo de elementos finitos para realizar um estudo paramétrico com intuito de investigar os efeitos da mudança nas geometrias da secção transversal, comprimento da viga, resistência do aço e esbeltez não dimensional na resistência e no comportamento de encurvadura das vigas celulares de aço. Os resultados obtidos do estudo paramétrico foram comparados com aqueles previstos a partir de padrões australianos para vigas de aço sob encurvadura lateral com torção, mostrando que as especificações previstas são geralmente conservadoras para as vigas celulares falhando por encurvadura lateral com torção, e não conservadoras para modos combinados de encurvadura distorcional e encurvadura do montante da alma.

Com resultados obtidos de simulações numéricas, Veríssimo et. al. [71], ajustou um modelo semi-empírico com modelos de elementos finitos, com a capacidade de estimar a flecha de uma viga com uma ou várias aberturas na alma de maneira simplificada. Foi utilizado o programa ABAQUS para as

informações referentes ao modelo numérico. Concluiu que a equação obtida mostrou uma boa correlação com os resultados dos experimentos numéricos, sendo útil para o cálculo prático de flechas em vigas com aberturas na alma.

Rocha [51], realizou um estudo da viabilidade de novas topologias para as aberturas da alma de vigas perfuradas, por meio do módulo de otimização do programa ABAQUS. Fazendo um comparativo do ponto de vista estrutural dos resultados da análise linear elástica, não linear completa e de carga crítica para as vigas, celulares e otimizadas, ambas com o mesmo volume, tendo apenas como divergência entre si a distribuição e o formato das aberturas ao longo da alma da viga. Tal processo foi adotado para condições de contorno biapoada e biengastada, com e sem o uso de enrijecedores.

2.2. VIGAS CASTELADAS E VIGAS CELULARES

Quando as vigas possuem aberturas sequenciais em uma forma circular, essas vigas são denominadas vigas celulares. Quando sua forma é a hexagonal, formam as chamadas vigas casteladas.

A fabricação das vigas celulares é realizada geralmente a partir de um perfil I laminado, no qual são efetuados dois cortes longitudinais (Fig.2.9), sendo cada corte composto por módulos contínuos, formados por uma semicircunferência, seguida de um pequeno segmento reto. Mais adiante, as duas metades são defasadas e soldadas entre si pelos segmentos retos. A utilização de perfis celulares proporciona estruturas mais leves, com vãos maiores, além de viabilizar significativa redução da altura total do pavimento.



Figura 2.9 - Procedimento de corte automatizado na produção das vigas celulares [40]

Cimadevilla [14], apresentou um estudo analítico, sugerindo equações para resistência das vigas casteladas e algumas das suas propriedades como inércia e área equivalentes. Ademais, é abordado em seu trabalho um estudo teórico sobre os aspectos de cálculo para esforços resistentes e para o cálculo de deformações.

Zirakian e Showkati [77], realizaram um dos primeiros estudos a respeito da encurvadura lateral com distorção em vigas casteladas. Nesse estudo foram efetuados testes experimentais em vigas de aço casteladas, constituídas por diferentes perfis, com o propósito de investigar a encurvadura distorcional destas vigas. Além de estudar o comportamento, foram verificadas as cargas críticas que as vigas suportam.

Com relação à flexibilidade de geometria, as vigas celulares levam vantagem em comparação às vigas casteladas, pois, devido ao processo de fabricação em corte duplo, várias combinações para a proporção entre a distância entre eixos e tamanhos das aberturas podem ser executadas, atendendo a critérios arquitetônicos e de dimensionamento mais econômicos e precisos. [3].

Ainda sobre o estudo de Abreu [3], foi destacado pelo próprio Autor que a vantagem dos perfis celulares em relação aos perfis de alma cheia é que as vigas celulares pesam 35% (trinta e cinco) a 50% (cinquenta) menos do que vigas em perfis laminados equivalentes, sob as mesmas condições de vão e carregamento.

Silveira [59] produziu uma análise numérica não linear para avaliar o comportamento de vigas alveolares de aço com aberturas hexagonais (conhecidas como vigas casteladas) e com aberturas circulares (conhecidas como vigas celulares), com ênfase nos modos de colapso por formação de rótulas plásticas. Ainda de acordo com Silveira [59], os resultados da análise numérica possibilitaram identificar situações para as quais foi possível modificar algumas expressões de cálculo ou propor novas expressões para a verificação do desempenho estrutural de vigas casteladas e celulares.

Veríssimo [70] realiza um estudo analítico-numérico generalizado cujo objetivo consiste em reavaliar o comportamento de vigas alveolares com diferentes geometrias, incluindo as obtidas a partir dos perfis I laminados, propondo um procedimento para dimensionamento dessas vigas.

As vigas casteladas são soldadas eletricamente (Fig.2.10), e o desenvolvimento dessas vigas de aço está ligado à evolução do processo de solda elétrica na construção de aço, na década de 1920. Um dos primeiros empreendimentos a utilizar vigas de aço casteladas foi realizado na década de 1930, pela fábrica Skoda, em Pilsner, na República Tcheca, a fim de servir como vigas de telhado para vãos de 12 metros em uma fábrica em Doudlevec. [19]



Figura 2.10 - Fabricação das vigas casteladas com aberturas hexagonais [82]

No final da década de 1970, foram introduzidas tecnologias, como máquinas de corte, que permitiram a automatização total do processo de fabricação das vigas casteladas de aço. A utilização de computadores no meio de produção permitiu, com qualidade e rapidez, tornar a operação de corte ainda mais otimizada. [19].

2.2.1. MODOS DE COLAPSO DE VIGAS COM ABERTURA NA ALMA

As vigas com aberturas na alma podem apresentar modos de colapsos semelhantes às das vigas de alma cheia, entretanto, essas aberturas possibilitam o surgimento de novos modos de falha, devido ao aumento da esbeltez na distribuição de tensões, e nos deslocamentos devido à mudança periódica da secção transversal. [59].

Os modos de colapso conhecidos até o momento para as vigas com aberturas na alma são os seguintes:

- Formação de um mecanismo *Vierendeel*;
- Formação de um mecanismo de flexão ou formação de rótula plástica;
- Rutura das soldas entre as aberturas;
- Encurvadura lateral por torção;
- Encurvadura do montante da alma devido à compressão;
- Encurvadura do montante da alma devido ao cisalhamento;

2.2.1.1. Formação de um mecanismo *Vierendeel*

O mecanismo de *Vierendeel* ocorre em pontos da viga onde existe a presença de altos esforços de cisalhamento. A presença desse mecanismo é caracterizada pela formação de rótulas plásticas (Fig.2.11), nos quatro cantos da abertura, em virtude da transferência do esforço cisalhante lateral ao longo do contorno das aberturas da alma da viga.

Esse fenômeno está inclinado a ocorrer nas vigas de pequenos vãos com pequenas alturas das seções T, inferior e superior, e grande comprimento de solda entre duas aberturas. O colapso acontecerá na abertura em que o máximo esforço cortante estiver atuando. No caso de aberturas com o mesmo esforço cortante, esse colapso acontecerá na abertura em que atuar o maior momento. Sendo assim, quanto maior for a abertura e os esforços cisalhantes, menor a predominância deste tipo de falha.

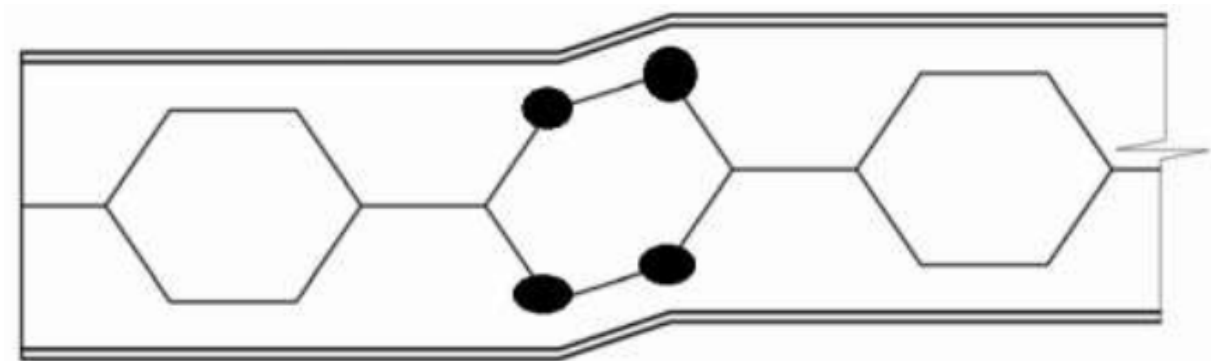


Figura 2.11 - Formação do mecanismo de *Vierendeel* [9]

2.2.1.2. Formação de um mecanismo por flexão ou de rótula plástica

Esse modo de colapso é decorrente da ação do momento fletor que faz com que as seções T acima e abaixo dos furos da alma sofram um escoamento por tração e/ou compressão, visto que o binário de forças longitudinais produz momentos locais ao entorno da abertura na alma da viga, formando então as rótulas plásticas. O momento resistente é igual ao momento de plastificação no centro da abertura. [3]

2.2.1.3. Rutura das soldas entre as aberturas

O modo de rutura entre as aberturas (Fig.2.12) acontecerá quando o esforço horizontal de cisalhamento nesse local exceder a força resistente da solda entre as aberturas. Esse modo de colapso se sujeita ao comprimento entre as aberturas, existindo uma maior probabilidade de colapso quanto menor for o comprimento entre as aberturas.

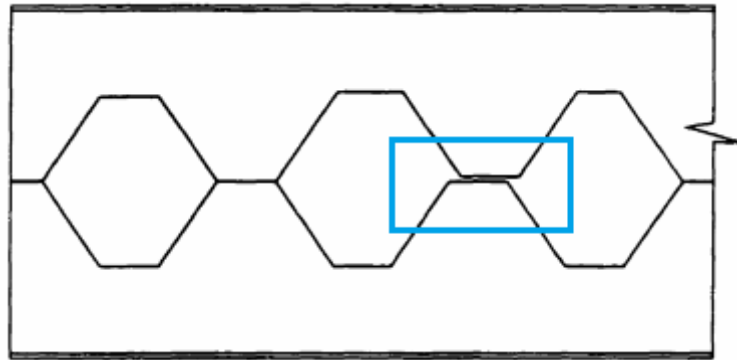


Figura 2.12 - Ruturas das soldas entre aberturas [66]

2.2.1.4. Encurvadura lateral por torção

A Encurvadura lateral por torção (Fig. 2.13) é descrita por um deslocamento lateral e um giro da secção transversal em torno do eixo da viga. Segundo Kerdal e Nethercot [32], as vigas com aberturas na alma e as vigas de alma cheia possuem compartimentos similares quanto à encurvadura lateral, todavia, as propriedades geométricas das vigas com aberturas devem ser tomadas no centro dos furos.



Figura 2.13 - Encurvadura lateral por torção em viga perfil I [46]

2.2.1.5. Encurvadura do montante da alma devido à compressão

O modo de colapso devido à encurvadura por compressão (Fig.2.14) do montante da alma acontece essencialmente pela presença de cargas concentradas ou reações de apoios aplicadas exatamente no montante da alma. Neste modo de falha, o montante da alma sofre um deslocamento para fora do plano da viga, não acompanhado por torção, como na encurvadura por cisalhamento. Logo, este modo de falha é semelhante à encurvadura por flexão de barras axialmente comprimidas.



Figura 2.14 - Encurvadura do montante da alma devido à compressão [9]

2.2.1.6. Encurvadura do montante da alma devido ao cisalhamento

Silveira [59], afirma que a encurvadura por cisalhamento (Fig.2.15) ocorre quando a força cortante é significativa diante do montante. A força de cisalhamento F que surge ao longo da junta soldada da alma da viga produz um momento equilibrado pela metade da força cortante atuante na abertura. Portanto, irão aparecer, no trecho AB, esforços de tração; e no trecho CD, esforços de compressão. Esses esforços podem provocar a encurvadura do montante da alma em decorrência do esforço cortante.

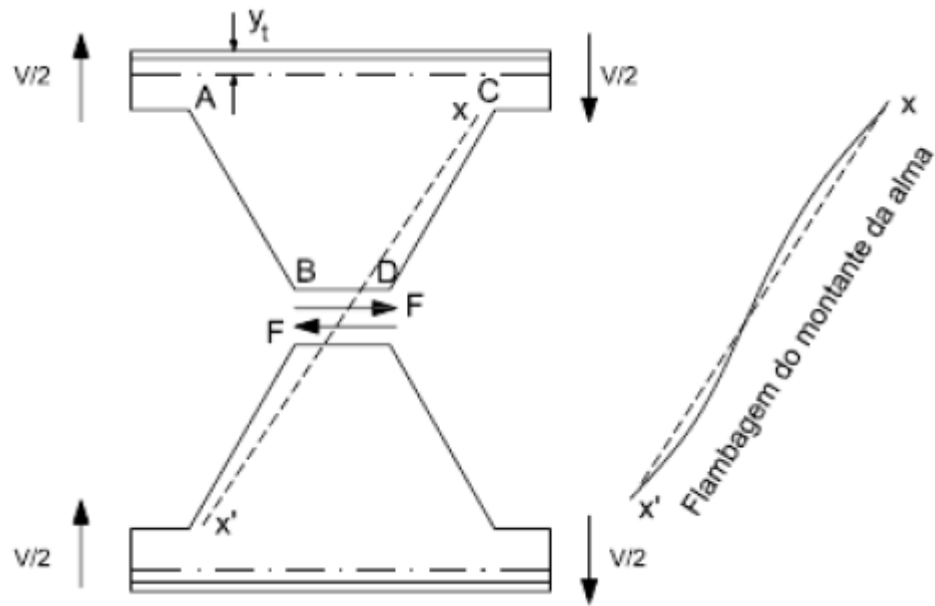


Figura 2.15 - Encurvadura no montante da alma devido ao cisalhamento [32]

3

OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL TOPOLÓGICA

3.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Na atual engenharia, como anteriormente delineado, exige-se, cada vez mais, o aumento da qualidade de seus serviços, como também a redução no uso de materiais mantendo sua eficiência. Com isso, as técnicas de otimização estrutural estão sendo cada vez mais aplicadas para resolver diversos tipos de problemas de otimização. Essa procura por uma solução ótima de um problema estrutural pode ser feita por meio de um algoritmo de otimização, que deve ser trabalhado em harmonia com um método de análise do sistema, com o objetivo de identificar se a solução é viável. A aplicação da otimização na análise estrutural ocorreu pela necessidade da diminuição de peso e redução de custo no projeto de novas estruturas, mantendo o desempenho, sem prejuízo da qualidade e integridade. A otimização aplicada no projeto de peças mecânicas consiste na utilização de métodos computacionais para se obter as dimensões, forma ou topologia ótimas das peças. (Silva, [58]; Arora, [6]; Olinquevicz, [44]; Gonçalves, [29]).

No ramo da mecânica, uma estrutura é uma montagem de materiais que tem como propósito sustentar cargas. A otimização estrutural (OE) faz com que essa montagem sustente as cargas da melhor forma possível. A primeira ideia que surge ao tratar de otimizar uma estrutura mecânica é a de uma estrutura mais leve possível. Outra boa forma de otimização é a de atingir a maior rigidez do sistema. Sendo assim, tanto maximizações como minimizações são consideradas otimizações, desde que haja restrições quantitativas. (Somacal *apud* Christensen; Klarbring, [62]). Segundo Rao [49], otimização consiste em obter a melhor solução sob certas circunstâncias. Em vista disso, ao se lidar com esse tipo de problema, sempre se buscará a maximização de um benefício ou mesmo a minimização de um dano, sujeito ou não a algum tipo de restrição. Para uma solução praticável, as restrições devem ser satisfeitas.

Em meados dos anos 60 (sessenta), os estudos sobre otimização de layout progrediram e conseguiram determinar tanto a localização dos membros estruturais como a disposição e secção transversal ótima, Zhou e Rozvany [53].

Já na década de 80 (oitenta), com a utilização do MEF (Método dos Elementos Finitos), diversas publicações foram realizadas, podendo ser citados Cheng e Olhoff [17], Khon e Strang [36] que analisaram a natureza do problema correspondente à maximização da rigidez de placas delgadas, levando em conta a espessura como sendo a variável de projeto, e chegaram à conclusão de que para esse problema de otimização existem várias soluções ótimas locais.

A otimização topológica foi proposta por Martin P. Bendsoe e Noboro Kikuchi no ano de 1988 [12], com a publicação do artigo “Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method”

Os primeiros passos da otimização estrutural compuseram-se de métodos analíticos. Esses métodos, no entanto, não eram muito eficientes, visto que apenas uma classe bastante limitada de problemas podia ser resolvida. Esses primeiros métodos foram introduzidos já no final do século XIX, com a precursora pesquisa de Coutinho, [16] que buscava o menor volume para estruturas uniaxiais submetidas a carregamentos.

A otimização topológica consiste em um método computacional que torna possível projetar a topologia ótima de estruturas de acordo, por exemplo, com o critério de custo (máxima rigidez, menor peso). Para cada projeto, a escolha da topologia ótima influencia diretamente no custo e na segurança que será empregada no processo [13].

Segundo Costa Jr. [15], a finalidade da otimização estrutural é determinar quais partes do corpo devem ter massa ou não. Esse conceito é ilustrado na (Fig.3), onde é considerado um item antes e depois da otimização. O corpo de domínio (Ω) está sob um carregamento externo (Γ_t) e seu peso (b), e está com uma região de deslocamento restringido (Γ_u). Essa restrição pode ser por exemplo uma restrição de volume ou até restrições laterais nas variáveis de projeto.

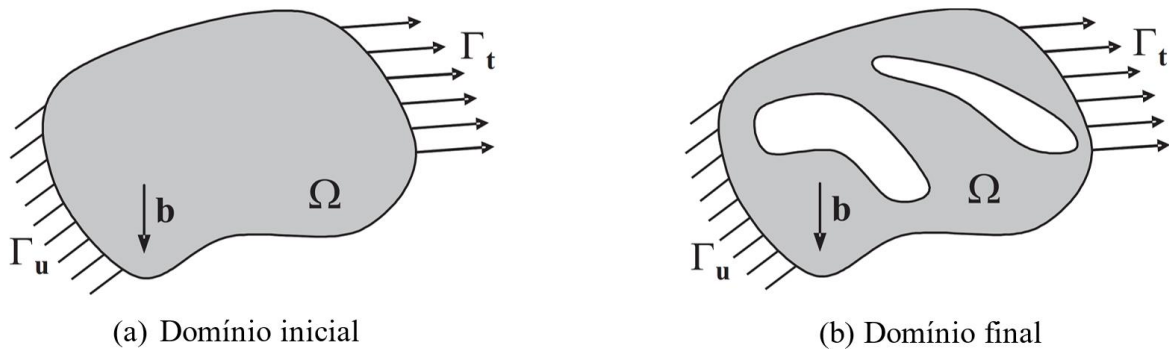


Figura 3 - Otimização estrutural (a) domínio inicial e (b) domínio final [15]

Na otimização estrutural em junção com a integração das técnicas de otimização e os programas CAE, é possível, ainda, simular várias configurações e escolher aquela que se converte em produtos mais económicos, mais seguros, mais eficientes e mais funcionais, tudo isso com maior precisão e em um intervalo de tempo significativamente reduzido [30].

A Otimização topológica já é bem propagada na atualidade e vem sendo empregada em diversos *softwares* comerciais que tornam todo o estudo mais rápido e eficiente, resultando numa fabricação da possível estrutura com uma maior precisão e qualidade. Entre os modelos atuais, segundo Simonetti [60], a otimização topológica (OT) pode ser classificada da seguinte forma: a otimização topológica a partir de um meio discreto e a otimização topológica a partir de um meio contínuo.

3.1.1. CONCEITOS DE OTIMIZAÇÃO

Sob o ponto de vista matemático, a otimização é constituída por um conjunto de funções que além de expressar restrições, determinam objetivos de funções. As funções são constituídas por variáveis, que podem ser divididas em dois grupos, podendo ser, contínuas ou discretas, onde as discretas assumem valores estabelecidos dentro de um conjunto finito de possibilidades, enquanto as contínuas podem assumir qualquer valor dentro de uma faixa previamente determinada. A escolha das variáveis está

diretamente relacionada com a eficiência do processo de otimização, pois no caso de um número de variáveis muito elevado, o problema poderá ter sua solução numérica inviabilizada [3].

Para problemas de otimização estrutural tem-se diversas variáveis de projeto, podendo caracterizar por exemplo, as dimensões do componente, propriedades mecânicas ou físicas do material, e até outros aspetos qualitativos envolvidos no problema. Em problemas de otimização estrutural, tem-se diversas possibilidades de escolhas da variável de projeto, a exemplo: espessura da placa, momento de inércia, dimensões do elemento, entre outros. A função objetivo tem o intuito de definir a característica que se pretende alcançar ou melhorar no projeto [26].

Tem-se um problema sem restrição, quando as variáveis do projeto puderem assumir qualquer valor no processo de otimização. Caso as variáveis assumam valores predefinidos, ou devam ficar entre uma faixa de valores, tem-se um problema com restrição [16].

As restrições podem ser divididas em dois tipos: restrições de igualdade e de desigualdade. Como exemplo para as restrições de igualdade, os deslocamentos do componente devem atingir um valor máximo predefinido, já um exemplo para as restrições de desigualdade, a tensão máxima do componente oriunda de carregamentos externos não poderá ultrapassar a tensão de escoamento do material [26].

- VARIÁVEIS DE PROJETO

Como esclarecido por Gonçalves [29], as variáveis de projeto são os parâmetros do problema, que podem ser alterados de maneira a obter uma configuração ótima do sistema. De forma geral, em processos de otimização podem ser tratadas diferentes tipos de variáveis de projeto, sendo agrupadas em variáveis discretas e variáveis contínuas [29]. Se os resultados encontrados não satisfizerem todas as restrições impostas, o projeto é dito como não admissível. Mas, se o sistema cumpre corretamente todas as funções para o qual foi projetado, esse é dito como viável.

Para descrever os conceitos e métodos de otimização estrutural, se faz necessário uma formulação geral de um modelo matemático padrão com o objetivo de encontrar um vetor $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, e esse pode ser definido nas Equações (1), (1.1) e (1.2) baseado em Arora [5]. Esse modelo matemático é definido como a minimização de uma função objetivo, enquanto esse, satisfaz todas as restrições de igualdade e desigualdade.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} \\ & \text{Sujeito a} \end{aligned} \tag{1}$$

$$f(\vec{x}) := f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Sujeito a p restrições de igualdade:

$$h_j(\vec{x}) = h_j(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0; \quad j=1, 2, \dots, p \tag{1.1}$$

Sujeita a m restrições de desigualdade:

$$g_i(\vec{x}) = g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0; \quad i=1, 2, \dots, m \tag{1.2}$$

Onde f é a função objetivo a qual se pretende minimizar, sujeita, no caso as p -restrições de igualdade hi , as m -restrições de desigualdade, gj com o domínio determinado pelo vetor x^{\rightarrow} , que é a variável de projeto. As variáveis de projeto formam os critérios de relevância para a avaliação e otimização do sistema. Para isso, é conveniente uso da notação vetorial na qual cada variável é independente uma da outra, como mostrado na Equação 2. Em que x^{\rightarrow} é um vetor geral de dimensão n . [5]

$$x^{\rightarrow} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

- FUNÇÃO OBJETIVO

Para que o ótimo seja alcançado, existem vários projetos viáveis, estipulando-se, então, um critério numérico que combine um dado conjunto de variáveis de projeto. Esse critério é denominado função objetivo, sendo uma etapa importante na formulação do problema de otimização [74].

- RESTRIÇÕES DE PROJETO

Para que um determinado projeto seja possível e viável, faz-se necessário impor limites aos valores das variáveis. Esses limites são chamados de restrições de projeto. Essas restrições fazem com que os valores tenham resultados dentro de um padrão adequado. Em um projeto de estrutura, as restrições são os casos mais simples, impõem-se limites superiores e inferiores para os valores admissíveis da geometria de elementos estruturais, custos e resistências de materiais. Em casos mais complexos, estão as restrições tecnológicas, que limitam valores para tensões, flexibilidades e rigidezes. As restrições podem ser de desigualdade ou igualdade. As restrições de igualdade que estão sempre presentes em problemas de otimização estrutural são as equações de equilíbrio e as restrições de volume. As restrições restantes normalmente aparecem na forma de desigualdades. Sant'anna, [54]; Vitorio Jr. [74].

3.1.2. TIPOS DE OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

Existem três possíveis análises (Fig.3.1) em um problema de otimização estrutural: otimização paramétrica, otimização de forma e, por fim, otimização topológica.

- OTIMIZAÇÃO PARAMÉTRICA

Neste caso de otimização, inicia-se com uma configuração predefinida e a partir disso são obtidos os valores ótimos das dimensões. Nesse modelo, uma vez escolhida a geometria, ela não será alterada no processo de otimização. A estrutura apresenta a topologia e a forma fixas, não ocorrem modificações nas mesmas. Na otimização paramétrica, é alterado diretamente as variáveis do projeto, podendo ser a espessura ótima de uma peça, diâmetros, propriedades do material, entre outros.

- OTIMIZAÇÃO DE FORMA

Neste tipo de otimização, as curvas de contorno internos e externos podem ser modificadas a fim de se encontrar a forma ótima. Vale ressaltar que nessa otimização é permitido alterar a posição dos furos, entretanto, não são inseridos novos furos e sua estrutura apresenta a topologia fixa.

- OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

A otimização topológica, que é o foco deste estudo, traz como objetivo determinar a melhor forma de distribuir o material dentro de um domínio fixo, bem definido e que não se altera durante o processo, mas que para alcançar o ótimo, é feita uma distribuição de material/massa no domínio. Onde a variável de projeto dessa otimização é a densidade da massa e, agora, além de reduzir as dimensões e alterar os contornos da estrutura, é possível remover material, criando-se furos. O resultado tanto pode gerar geometrias convencionais como geometrias não convencionais. Ainda, apresenta a vantagem de não ser preciso alterar a malha em elementos finitos durante a otimização.

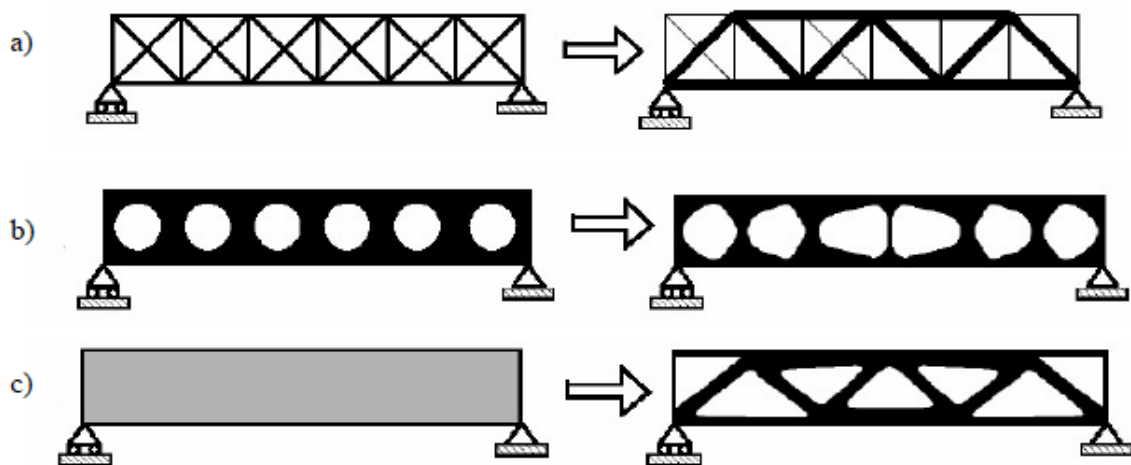


Figura 3.1 - Tipos de otimização estruturais (a) otimização paramétrica (b) otimização de forma (c) otimização topológica [44]

3.2. OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

Como foco principal deste trabalho, a otimização topológica tem muito a acrescentar aos projetos de engenharia. Nessa abordagem, procura-se encontrar uma solução/estrutura ótima com o melhor desempenho e também com a melhor distribuição de material para a estrutura em questão, por meio da variação da sua topologia e do contorno da mesma, satisfazendo as restrições impostas. Era de costume, ao se elaborar um projeto, que seu procedimento fosse projetar, fabricar e aplicar, sem, no entanto, considerar se esta seria a melhor opção. Com a introdução da otimização topológica, esse processo pode ser formulado como um problema de otimização, no qual o desempenho é otimizado enquanto alguns requisitos são satisfatórios. Essa nova abordagem permite que o processo seja mais eficiente, pois, antes,

contava-se com a experiência de quem estava projetando ou com informações obtidas em outras análises já realizadas. Lado outro, no método de projeto otimizado, o uso é baseado em conceitos de otimização que determinam os critérios de convergência, tornando, assim, o modelo mais efetivo. Na (Fig.3.2), é mostrada a diferença da metodologia de um projeto sem otimização e com otimização.

Para Rao [49], otimização visa alcançar a melhor solução sob determinadas circunstâncias. Dessa forma, ao lidar com esse tipo de problema, buscar-se-á, a todo o momento, a maximização de um benefício ou mesmo a minimização de uma avaria, sujeito ou não a algum tipo de restrição.

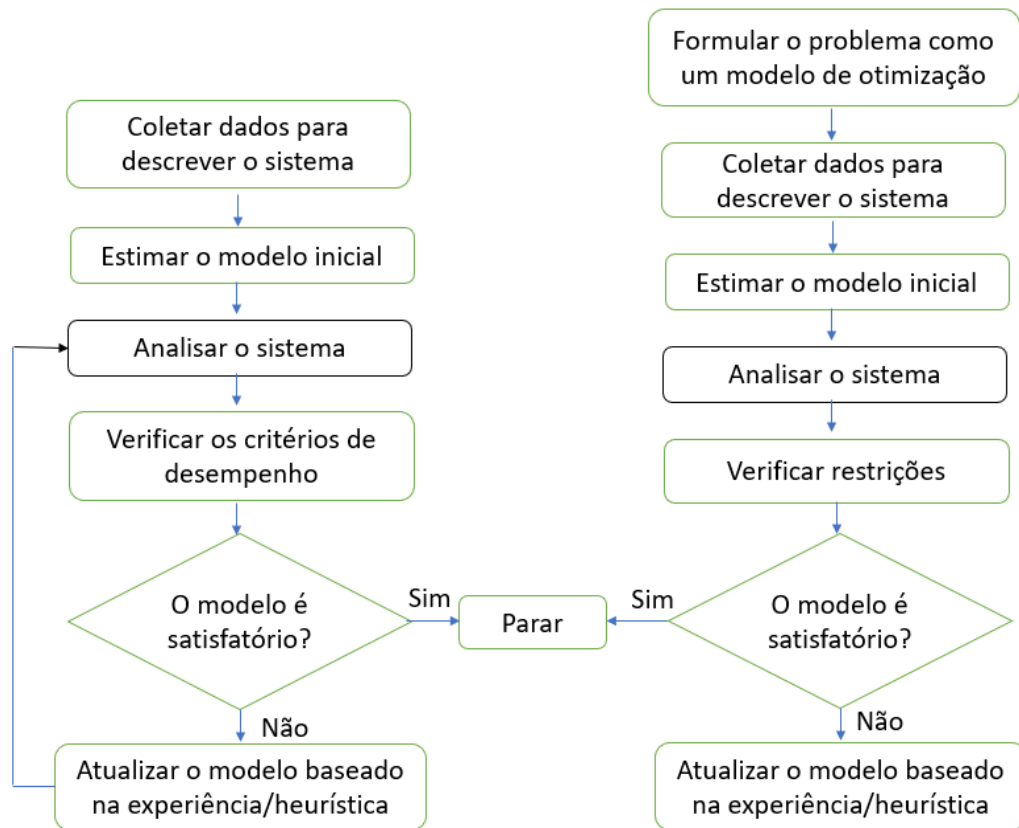


Figura 3.2 - Comparação entre um projeto sem otimização e com otimização.

A solução ótima encontrada ao se utilizar o método da otimização topológica é composta por algumas fases. Esse processo tem início na definição do domínio da estrutura, na medida em que são impostas algumas limitações. Nesse passo, como é fornecido um resultado primário, é importante estipular o menor número de restrições/limitações ao modelo, uma vez que quanto mais restrições na análise, menor será a qualidade da solução obtida. Em seguida, utiliza-se o método de elementos finitos (MEF), para a discretização da estrutura. Nessa altura, ocorre a distribuição de material no domínio com o propósito de maximizar ou minimizar a função objetivo especificada. Aplicando-se alguns recursos do CAD e de processamento de imagens, é realizada a interpretação dos resultados obtidos na otimização, momento em que são verificados e validados as tensões e os deslocamentos do modelamento obtido. Em conclusão, é feita a fabricação da estrutura de acordo com o processo mais adequado para a mesma. O procedimento descrito está esboçado na imagem (Fig.3.3). (Somacal *apud* Silva, [62].

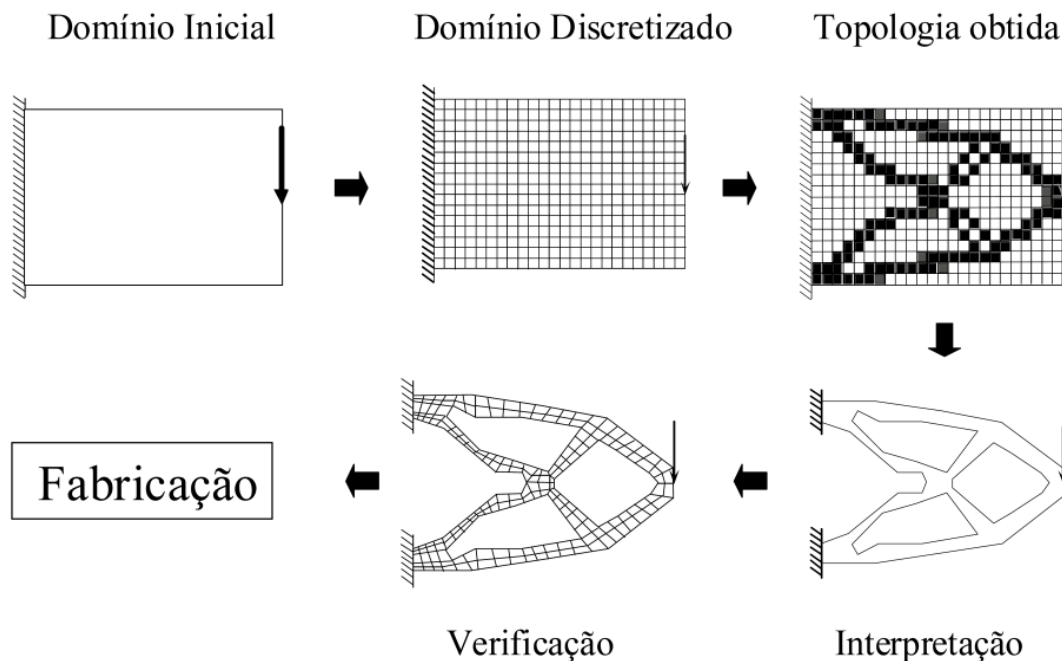


Figura 3.3 - Procedimento por otimização topológica [62]

A base para achar uma solução ótima na otimização topológica, fica a cargo da variação do domínio, que nada mais é do que a topologia da estrutura. E no que se diz respeito a essas estruturas contínuas, (Eschenauer e Olhoff, [24]) ressaltam que dois grandes métodos de abordagem são empregados, a abordagem micro (baseada no material) e a abordagem macro (baseada na geometria).

De acordo com Stump [42] e sua ampla revisão acerca dos estudos de otimização topológica, que pode ser também conhecida como Otimização de Layout ou Otimização de Forma Generalizada. Esse layout ou topologia da estrutura é determinado não somente por sua forma delimitada pelo contorno externo, mas, também, pela sua forma interna, furos e conectividade existentes em seu domínio.

Ainda de acordo com Stump [64], a abordagem micro é baseada na presença de uma microestrutura porosa, que define as interações do material em função da sua geometria e da densidade volumétrica de uma célula unitária característica do material, que por sua vez, é distribuída no espaço do domínio fixo [63]. Em seguida, o domínio fixo estendido é discretizado por uma malha de elementos finitos que não se modifica ao longo do processo de otimização e permite calcular as respostas mecânicas. A otimização consiste em determinar quais pontos da estrutura devem possuir ou não material. Deste modo, a distribuição das densidades é parametrizada de forma que cada ponto do domínio fixo estendido possa variar entre 0 - 1, respectivamente, para ausência de material e presença de material. Os algoritmos baseados nesta técnica buscam a melhor forma de distribuir o material, minimizando ou maximizando a função custo. Já na abordagem macro, a topologia da estrutura é modificada mediante a inserção de vazios no domínio. (Simonetti *apud* Rozvany, [61]).

3.2.2. PRINCIPAIS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

Ao longo dos anos, métodos de criação de material por otimização topológica foram elaborados com o intuito de obter soluções viáveis e práticas com distribuição limpa de material (0 – 1). Nesta oportunidade, serão detalhados os principais métodos utilizados. Estes englobam os métodos da microestrutura-base (métodos de homogeneização e método de densidade variável SIMP) e os métodos de otimização estrutural evolucionária: ESO. E outro método também bastante conhecido, o TSA, denominada derivada topológica.

- SIMP (SIMPLE ISOTROPIC MATERIAL WITH PENALIZATION)

A abordagem SIMP é baseada no conceito de microestruturas e técnicas de homogeneização. Nesta abordagem, a presença ou não de material é estudada por meio do uso de um modelo de material artificial, que pode aplicar comportamento intermediário entre sólidos e vazio. Assim, o processo de otimização pela técnica SIMP é definido pela Equação 3.

$$E(x) = \rho^n(x)E_0(x) \quad \rho \in [0,1] \text{ e } x \in \Omega \quad (3)$$

Onde:

$E(x)$ = Tensor construtivo do material;

E = Propriedade de um ponto arbitrário no espaço de projeto;

E_0 = Material sólido;

$\rho(x)$ = Função paramétrica;

Ω = Domínio de referência;

n = coeficiente de penalização;

Com “n” sendo um número denominado coeficiente de penalização, cujo valor deve ser maior que 1(um) para penalizar o aparecimento de densidades intermediárias. Esta ideia foi, inicialmente, proposta por Bendsoe [12] baseada no conceito de microestruturas e de homogeneização.

O método *Simple Isotropic Material with Penalization* (SIMP), proposto por Bendsoe, é usado na abordagem micro para encontrar a melhor distribuição de material, de forma a minimizar ou maximizar a função objetivo. Já na abordagem macro, a estrutura é alterada por intermédio da inserção de furos no domínio [69].

O método SIMP propõe que a microestrutura é desconhecida (por isso o artificial/fictício), mas sua rigidez é conhecida, Perini [47]. O método da homogeneização leva a um problema de otimização muito caro computacionalmente, visto que, dependendo da geometria da célula unitária, vários parâmetros devem ser otimizados. O uso de microestruturas artificiais, além de garantir a existência da mistura entre os dois materiais isotrópicos de base, conduz, facilmente, a projetos mais simples, Sant'Anna [54].

Quando adotado um critério de tensão para o modelo SIMP, o mesmo deve ser simples tal como a relação entre densidade e rigidez. As isotropias das propriedades de rigidez devem ser expandidas para o modelo de tensão. A restrição de tensão aplicada no modelo SIMP são as tensões internas que foram instaladas.

- ESO (Evolutionary Structural Optimization)

Na categoria dos métodos que consideram malhas variáveis durante o processo de otimização, evidencia-se o método evolutivo ESO (Evolutionary Structural Optimization). Xie e Steven [75] foram os pioneiros a apresentar um estudo sobre esse método, que é baseado simplesmente no conceito de remoção progressiva de material ineficaz, que não tem relevância para a estrutura, sabendo que o material que restou tende a se comportar como uma estrutura de melhor performance.

Vários problemas de otimização estrutural foram resolvidos usando o método ESO, como, por exemplo, questões de minimizar peso tornando a estrutura mais eficiente, usando critérios de tensão, maximizar ou minimizar frequências naturais, e minimizar o peso mantendo limites de rigidez e deslocamentos [60].

Como desvantagem, o método ESO traz apenas a possibilidade de remoção de elementos e não permitindo a restauração dos mesmos durante a iteração. Para ajustar e reparar esses problemas, Querin et. al. [48] apresentou uma melhoria no leiaute da estrutura, onde sai do mínimo necessário para resistir às cargas aplicadas, ignorando a magnitude de tensão efetiva. O material é então acrescentado nas regiões de alta concentração de tensão, de modo a amenizar o seu efeito. Este procedimento encaminha a um leiaute final ótimo e é conhecido como o ESO aditivo ou AESO, do (Additive Evolutionary Structural Optimization). Uma abordagem mais atualizada do método AESO foi posteriormente desenvolvida por Kim et. al. [35]. Outro método proposto para minimizar essas desvantagens foi denominado de SESO, que indica a Suavização do ESO, ou Smoothing ESO. A retirada de material é feita de forma menos agressiva, mais discreta, onde não se elimina o material, entretanto, diminui sua influência de maneira a reduzir seus parâmetros de rigidez.

- TSA (Topological Sensitivity Analysis)

No que concerne à otimização topológica, outro método que podemos citar é o TSA (Topological Sensitivity Analysis), nomeada Derivada Topológica, que gera para cada ponto do domínio (Fig.3.4) de definição do problema, a sensibilidade de uma dada função custo quando um pequeno furo é criado [40]. Contudo, quando algum buraco é feito, não é mais possível estabelecer uma equivalência topológica entre os domínios. Devido a esta dificuldade matemática, a Derivada Topológica pode se tornar restritiva [47]. O Método TSA fornece a sensibilidade de uma determinada função custo quando o domínio é modificado pela introdução de uma um furo infinitesimal. É visto que a sensibilidade é calculada impondo-se a condição de contorno de Neumann homogênea na fronteira do furo criado.

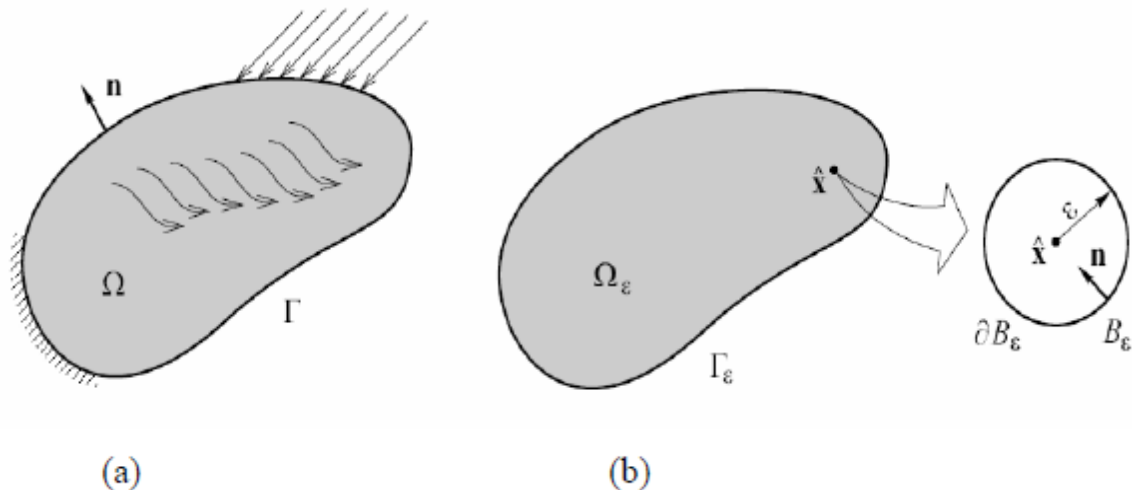


Figura 3.4 - (a) domínio natural sem furo (b) domínio perturbado com furo [43]

3.2.3. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma análise matemática que consiste na fragmentação de um meio contínuo em pequenos elementos, sem que haja alteração das propriedades do meio original. Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos, oportunidade na qual será possível a obtenção dos resultados desejados. Atualmente, o MEF encontra aplicação em praticamente todas as áreas de Engenharia, como na análise de tensões e deformações, transferência de calor, mecânica dos fluidos e geologia, eletromagnetismo, entre outros. Conforme dito por Alves Filho, [4], os métodos analíticos clássicos são restritos a alguns casos que possuam geometrias, carregamentos e condições de apoio simples. Por conta disso, o MEF é um caminho bem comum a ser seguido para exemplos de estruturas mais complexas, possuindo um caráter mais generalizado e com procedimentos aproximados, independente de forma e condições de carregamento de estrutura.

Sob o ponto de vista de Shigley, Budynas e Nisbett [63], os elementos mais usuais para execuções em MEF, são: elemento linear, elemento de superfície e elemento sólido.

Sob o ponto de vista de Azevedo [8], para a solução de problemas de análise de estruturas por meio do MEF, deve-se levar em consideração alguns aspectos como, por exemplo: a definição da geometria, o tipo de material, o carregamento e as aplicações das condições de contorno. Ademais, antes de iniciar a análise, é necessário estabelecer se a análise será estática ou dinâmica, linear ou não linear, o uso de algoritmo implícito ou explícito, entre outros.

Somacal *apud* Fish e Belytschko [62] traz a análise de que o método de elementos finitos é uma abordagem numérica que pode ser usada para encontrar uma solução aproximada dos cálculos realizados em qualquer que seja a estrutura. Do ponto de vista da engenharia, o MEF é um método para solucionar problemas como análise de tensões, transferência de calor e fluxo de fluidos por intermédio de cálculos computacionais realizados por *softwares*.

Segundo Teixeira-Dias [65] o Método dos Elementos Finitos (MEF) é utilizado para a modelação de um problema genérico que envolve os meios contínuos, mediante análise de partes discretizadas, para os quais seja possível conhecer ou obter uma descrição matemática do seu comportamento. Em seguida, o domínio do problema é dividido em subdomínios/elementos para facilitar, ou até mesmo tornar possível/viável, a análise e resolução do problema.

O conceito principal do MEF (Método dos Elementos Finitos) consiste em subdividir o domínio Ω do problema em subdomínios Ω_e (denominados elementos) de dimensões finitas, tais como na (Fig.3.5), em que a junção de todos os subdomínios seja aproximadamente igual ao domínio original. A seguir, sobre cada subdomínio, faz-se uma aproximação local, isto é, para cada elemento se tem uma solução aproximada, descrita, em geral, por uma base polinomial. A solução global é obtida pela junção de todas as soluções locais, levando em consideração o cuidado para garantir a continuidade nas fronteiras entre os elementos [29].

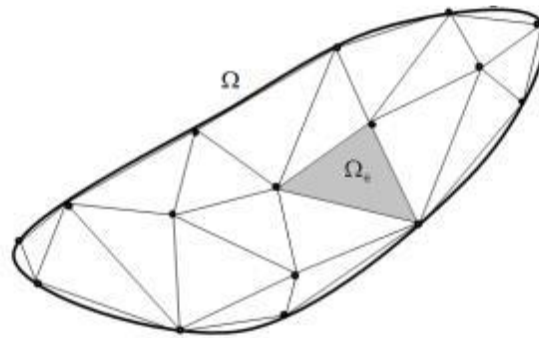


Figura 3.5 - Malha de elementos finitos nos domínios Ω e nos subdomínios Ω_e [29]

A discretização da geometria é uma etapa fundamental do método dos elementos finitos (MEF), baseia-se na divisão de um sistema equivalente de elementos finitos, em que se é escolhido o tipo de elemento que melhor irá representar o comportamento físico da estrutura. Os elementos devem ser pequenos o suficiente para representar as variações por conta das mudanças na geometria, e grandes o bastante para reduzir o tempo computacional. Essa discretização (Fig.3.6) que foi feita é denominada de “malha” [44].

Segundo Silva [56] o MEF é uma metodologia de aproximação numérica usada para gerar as soluções de equações diferenciais através de integração. Esse método é aplicado pela divisão de um sistema ou domínio em partes discretas menores, os subdomínios, de forma a serem denominados simplesmente de “elementos”.

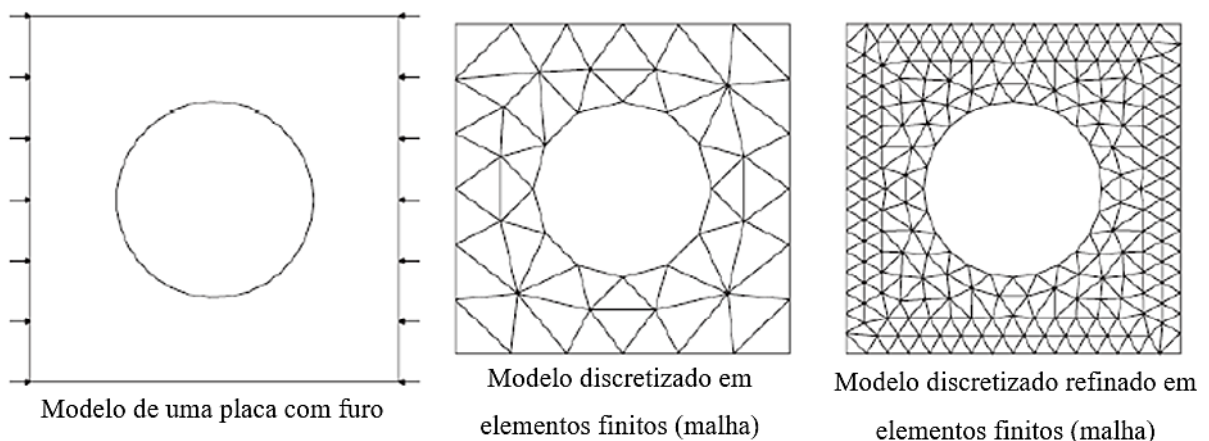


Figura 3.6 - Modelo de discretização e refinamento da malha [69]

3.3. SOFTWARE ABAQUS ALIADO A FERRAMENTA DE OTIMIZAÇÃO DO TOSCA STRUCTURE

Neste trabalho, o processo de otimização das vigas é realizado por meio do módulo de otimização do programa ABAQUS, realizado o levantamento dos carregamentos e condições de contorno da aplicação da viga, bem como a discretização para a análise estrutural por intermédio do Método de Elementos Finitos (MEF). Ademais, foram aplicadas técnicas de otimização estrutural topológica e dimensional no componente, usando o *software* Tosca Structure, até que a busca de um resultado ótimo ou viável seja encontrado.

Para realização dessa otimização, o procedimento inicialmente realizado foi a otimização topológica, e os passos para realizar esta primeira etapa estão representados na (Fig. 3.7).

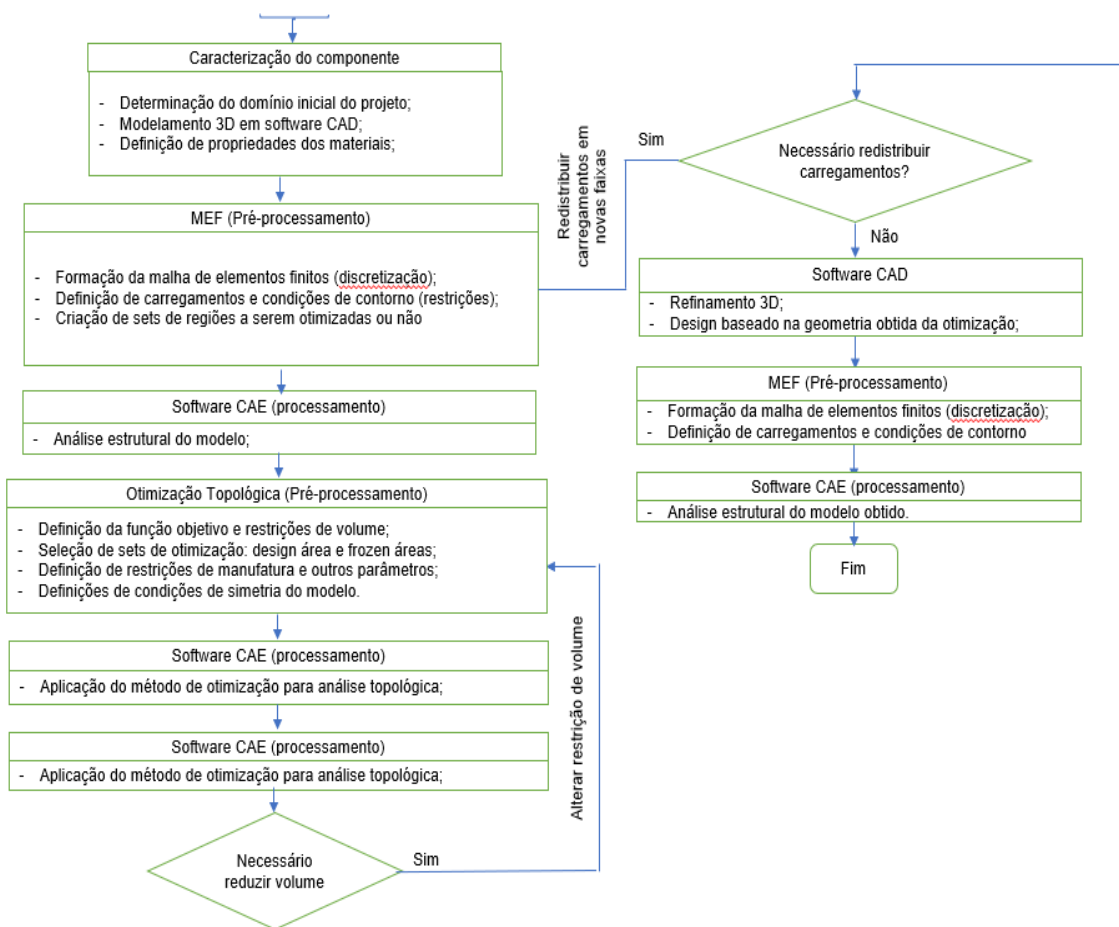


Figura 3.7 - Fluxograma para a otimização topológica..

As atividades indicadas no fluxograma ocorreram conforme a sequência das etapas definidas a seguir:

- a) O primeiro passo foi caracterizar o sistema atual, definindo propriedades dos materiais utilizados, avaliar os tipos de carregamentos, estabelecer as condições de contorno e obter os fatores normativos. As mesmas características foram utilizadas para o domínio inicial do projeto;
- b) Em seguida, fez-se a análise do sistema atual por meio do MEF pelo *software* Abaqus. No pré-processamento, realizou-se a discretização do modelo. Os contactos e as restrições de movimento foram definidos e os carregamentos atribuídos ao sistema. Após o processamento, foram identificadas as regiões críticas para o refino de malha, visando à convergência da análise;
- c) Após validado o sistema atual, iniciou-se o processo iterativo de otimização topológica mediante o *software* ABAQUS com o auxílio da ferramenta de otimização do Tosca Structure, com base nas análises de MEF. Na etapa de pré-processamento, foi estabelecido o domínio inicial do projeto e a função objetivo. Também é nesse momento que as restrições do projeto foram definidas, a exemplo de volume e simetria;
- d) Depois do processamento, fez-se a interpretação dos resultados da otimização, oportunidade na qual se verificou a distribuição de material do novo domínio e se suas tensões estavam dentro do admissível. Também foi verificado se a redução de volume estava dentro do esperado. Em caso de resposta negativa, são redefinidas as restrições de volume e uma nova iteração é realizada; e se positiva, segue-se para a próxima etapa;
- e) Após o processamento, as tensões e deslocamentos foram avaliados para garantir que as condições normativas estivessem sendo atendidas. Se validados, é realizada a comparação de massa entre o domínio inicial e o domínio final do projeto; caso contrário, o processo é retomado da etapa de modelamento em *software* CAD.

4

OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DAS VIGAS NO SOFTWARE ABAQUS

4.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Neste capítulo será apresentada a metodologia e os dados utilizados para o processo de otimização das vigas estudadas através do módulo de otimização do programa ABAQUS.

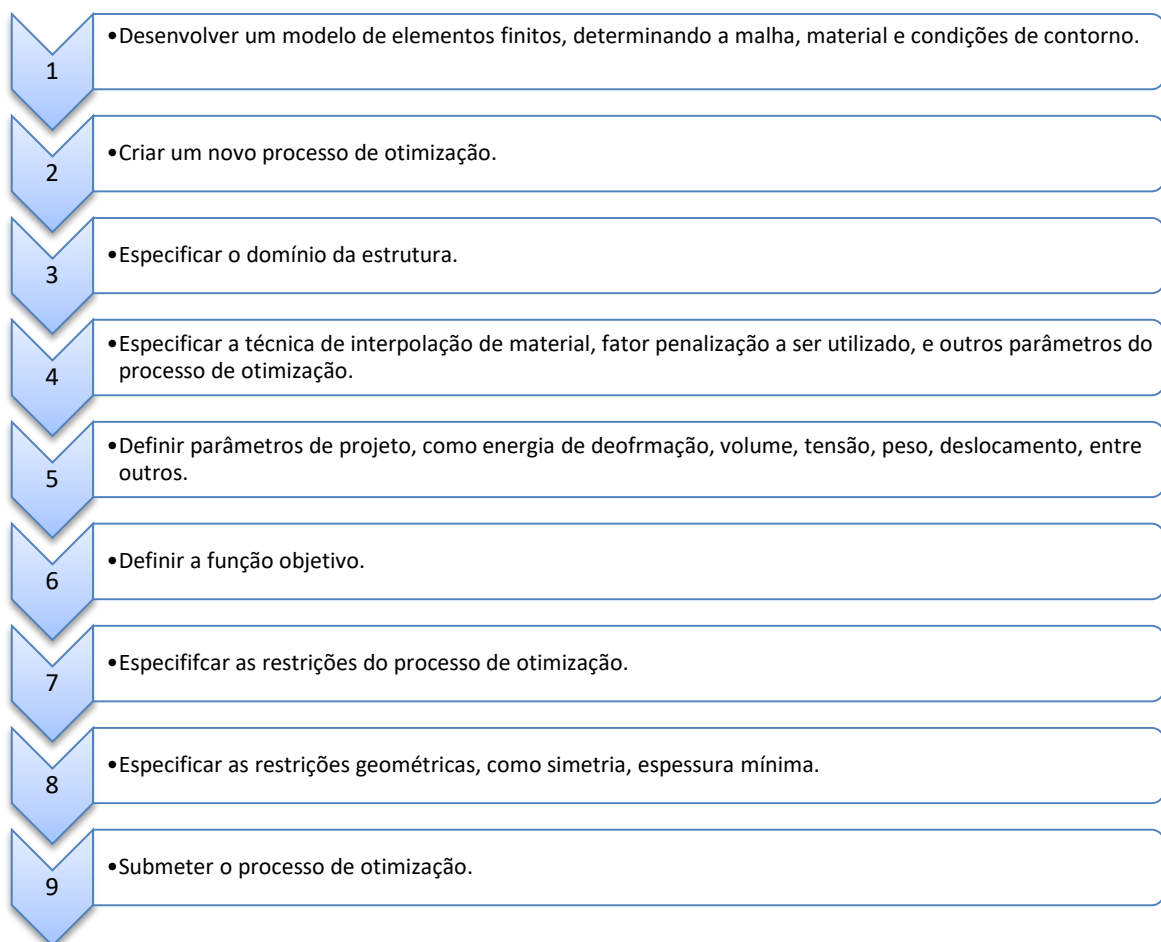


Figura 4 - Fluxograma do processo de otimização.

4.1.1. DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

O componente selecionado para o estudo, originalmente é uma estrutura de uma viga de seção “I” (Fig.4.1), (Fig.4.2), sem furo na alma. Os perfis analisados foram selecionados do catálogo da GERDAU Açominas [28], pegando também como referência o estudo realizado por Vieira, 2015 [73] acerca dessa série de perfis W310. Sendo assim, os perfis estudados são: (W 310 x 21), (W 310 x 28,3) e o perfil (W 310 x 52). Tendo 5000 milímetros de comprimento, e as propriedades geométricas dos perfis originais são apresentadas na Tabela 1.

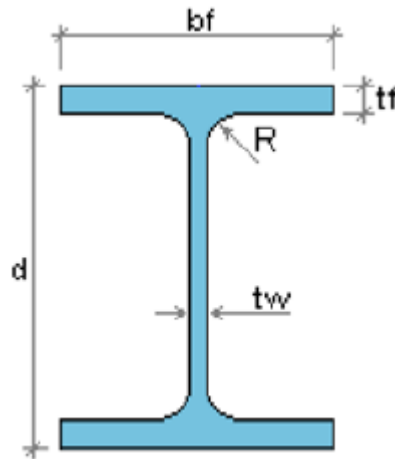


Figura 4.1 - Seção transversal da viga.

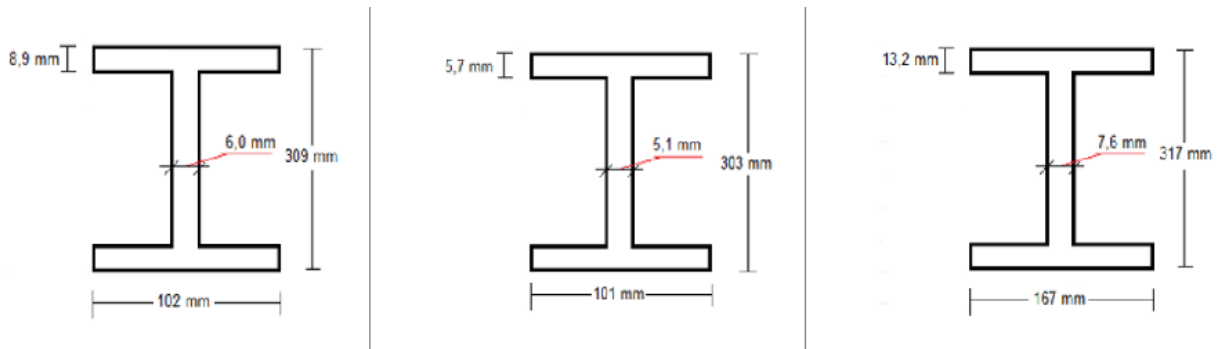


Figura 4.2 - Seção transversal dos três perfis de viga.

Tabela 1 - Propriedades geométricas dos perfis originais.

Designação	d (mm)	bf (mm)	tf (mm)	tw (mm)	h (mm)	d' (mm)
W310X21	303	101	5,7	5,1	292	272
W310X28,3	309	102	8,9	6	291	271
W310X52	317	167	13,2	7,6	291	271

As propriedades do aço das vigas utilizadas foram o módulo de Young igual a 210000 Mpa e coeficiente de Poisson igual a 0,3. Foram utilizados elementos de casca na modelagem da viga. A malha apresenta

elementos retangulares de 4 (quatro) nós com integração reduzida do tipo S4R e aproximadamente 20mm de tamanho. Na Tabela 2, será:

Tabela 2 – Discretização dos três perfis de viga selecionados.

Designação	Elementos finitos
W310X21	6777
W310X28,3	6777
W310X52	7781

Apresentado a totalização de nós para a malha de cada uma das três vigas estudadas. As vigas foram submetidas a uma carga distribuída equivalente a 100 kN e duas diferentes condições de contorno: biapoíadas e biengastadas. (Fig.4.3).

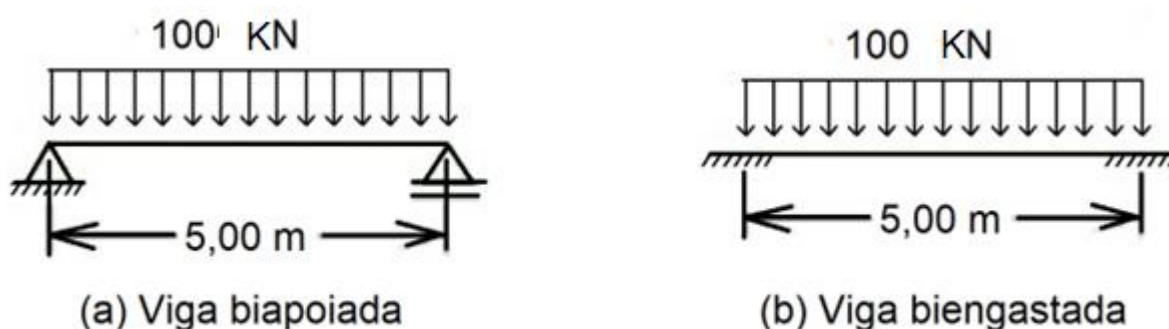


Figura 4.3 - Condições de contorno e carregamento utilizados no processo de otimização.

4.1.2. OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DA VIGA

A proposta deste estudo visou a obtenção de uma estrutura de uma viga otimizada com abertura na alma, ou seja, a busca por uma geometria ótima que seja capaz de resistir e se manter íntegra, atendendo aos requisitos de sua aplicação. Além disso, o intuito deste estudo foi a obtenção de uma estrutura com o volume reduzido, em comparação com o modelo original, e tendo a energia de deformação mínima como a função objetivo.

Inicialmente, o modelamento tridimensional da estrutura foi realizado usando o software CAE ABAQUS. A análise estrutural pelo método de elementos finitos do componente, foi também realizada utilizando o software CAE ABAQUS, juntamente com a ferramenta de otimização do Tosca Structure.

4.1.3. ANÁLISE ESTRUTURAL I: VALIDAÇÃO E ANÁLISE DO MODELO ORIGINAL

O objetivo desta etapa do trabalho foi fazer uma análise inicial de tensões e deslocamentos da estrutura, sob a sua forma original, utilizando o MEF. Para isso, foi considerado o critério de falha de von Mises, já que este critério determina se as tensões encontradas na análise estrutural forem iguais ou maiores que o limite de escoamento do material, o elemento estrutural passa a sofrer deformação plástica. O

intuito desta análise inicial foi avaliar o comportamento da estrutura original, bem como servir de base para realizar um comparativo com o posterior modelo otimizado.

4.1.3.1. Pré-processamento para a análise estrutural I

Para atividade da análise estrutural foi utilizado o software ABAQUS, onde inicialmente foi realizado o pré-processamento da análise. As Figuras (Fig.4.4 e Fig.4.5), mostra a discretização (malha) da estrutura, utilizou-se elementos do tipo tridimensional *shell*. A malha apresenta elementos retangulares do tipo S4R, totalizando 6777 elementos para o perfil W310x21 os mesmos 6777 para o perfil W310x28,3 e 7781 elementos para o perfil W310x52

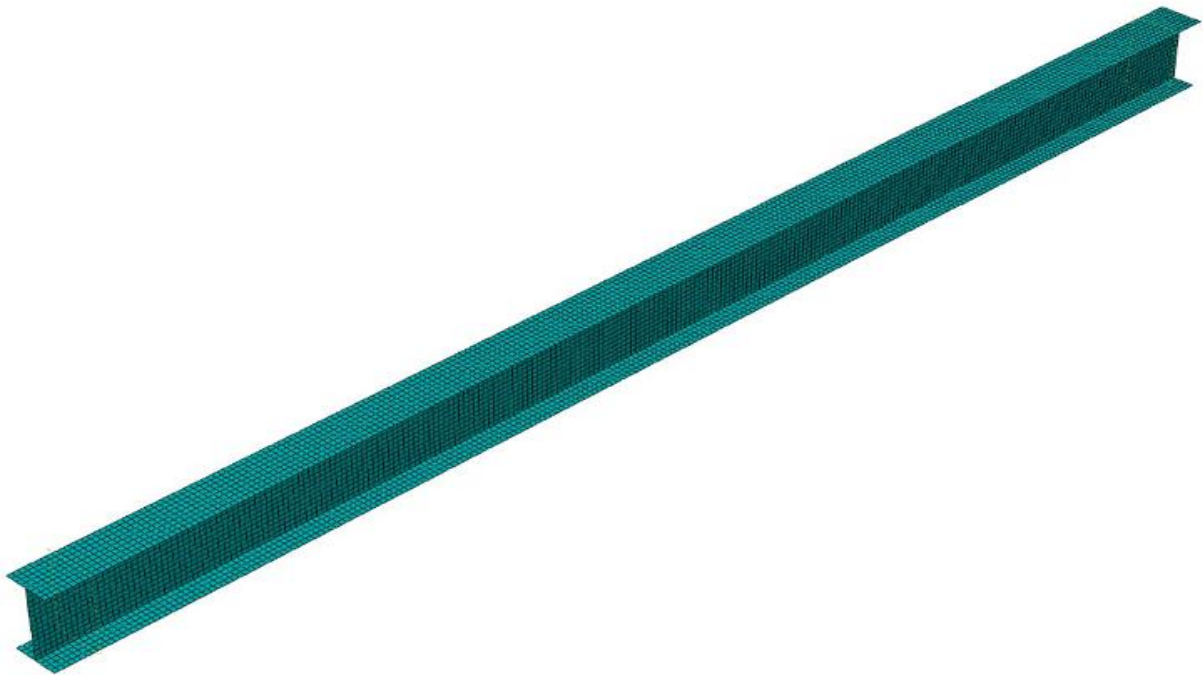


Figura 4.4 – Exemplo da discretização da viga.

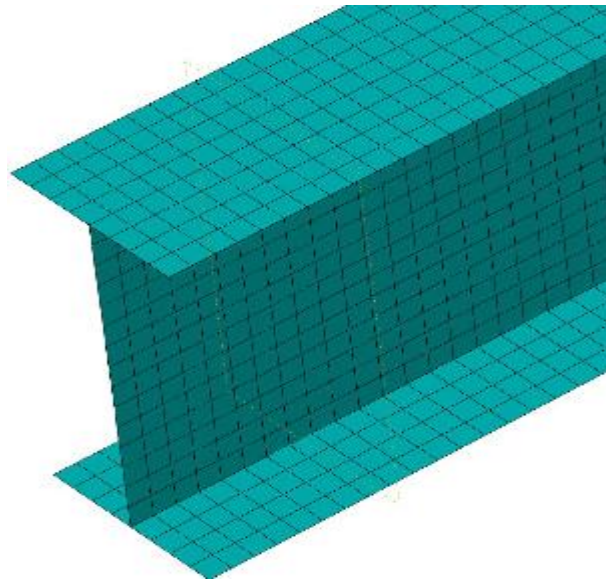
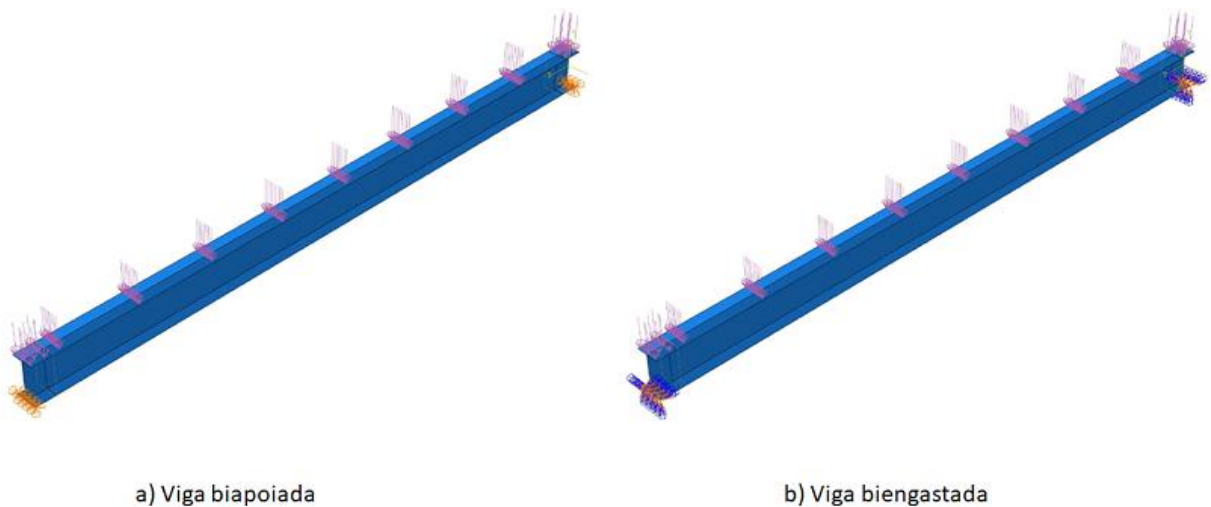


Figura 4.5 - Discretização (malha) tipo S4R.

Também dentro da etapa de pré-processamento foram aplicadas as condições de contorno referentes a estrutura. Neste caso foram aplicadas duas condições de contorno, biapoiada e biengastada. O carregamento do tipo uniformemente distribuído foi aplicado sobre a viga na forma de uma carga de pressão, que é a forma com a qual o ABAQUS permite simular esse tipo de carregamento. Para demarcar a área sujeita à pressão, foi realizada uma partição na superfície da mesa superior da viga, criando uma faixa que coincida com a espessura da alma. Esse procedimento evita a aplicação de cargas em regiões da mesa que não possuem apoio, descartando o problema da flexão das abas da mesa superior. A Figura (Fig.4.6), mostra tanto o carregamento aplicado quanto, as restrições, ou seja, os pontos de apoio da estrutura (condições de contorno).



a) Viga biapoiada

b) Viga biengastada

Figura 4.6 - Condições de contorno (a) biapoiada e (b) biengastada.

4.1.3.2. Domínio otimizável da estrutura

Antes de iniciar a otimização se faz necessário estabelecer quais serão as áreas a serem otimizadas. Foi estabelecido que as duas extremidades da viga, onde ficam as condições de contorno não seriam inseridas no domínio de projeto a ser otimizado, a fim de facilitar o processo de aplicação da mesma em um projeto real e levando em consideração a funcionalidade dos componentes. Por conta disso, foi inserido uma restrição de 150mm em cada extremidade da viga. Sendo assim, essas restrições na alma da viga serão preservadas e só a parte demarcada como visto na figura (Fig.4.7), foi selecionada para o processo de otimização. As áreas onde foram aplicadas as condições de contorno e o carregamento da viga, foram definidas como *frozen áreas*, ou seja, serão preservados no processo de otimização.

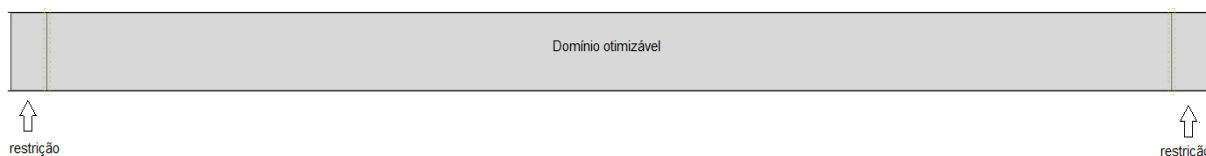


Figura 4.7 - Domínio otimizável da estrutura.

4.1.3.3. Método SIMP: técnica de interpolação de materiais

O processo da otimização topológica no software ABAQUS é feito através de um procedimento, tendo como ponto de partida uma dada distribuição de material inicial, com a otimização topológica é gerada uma nova forma a partir da classificação das densidades relativas dos elementos no domínio de projeto. Os elementos com grandes densidades relativas são mantidos, ao mesmo tempo que aqueles elementos cujas densidades relativas se tornaram suficientemente pequenas são assumidos como vazios, deste modo, uma nova forma é obtida.

A otimização topológica de estruturas é um problema intrinsecamente discreto. No entanto, a utilização de algoritmos discretos de otimização torna este processo extremamente caro em termos computacionais. Essa situação ocorre em consequência ao grande número de elementos utilizados para discretizar o modelo [51].

Dito isto, para que se torne possível resolver este tipo de problema sem a utilização de algoritmos discretos de otimização, se faz necessário remover esta natureza discreta do problema. E uma das possíveis maneiras de realizar esta tarefa é através de uma introdução de uma função de densidade, que é uma variável de projeto contínua [12].

No caso do ABAQUS, o método SIMP é um dos possíveis métodos que pode ser utilizado para o desenvolvimento da otimização topológica. Desta maneira, para aplicar técnicas de otimização baseadas em gradiente, o problema discreto é modificado para contínuo, e as variáveis de projeto, densidades relativas, são assumidas como contínuas. Por fim, os elementos com densidades intermediárias são então penalizados para que seja obtida uma solução final.

De forma geral, a otimização topológica demanda a definição da distribuição espacial ótima do material em questão, para determinadas condições de carregamento e contorno (Rocha *apud* Bendsoe [51]). Dessa maneira, cada ponto do espaço é, portanto, um ponto material ou um vazio. À vista disso, o problema de otimização é função de uma variável discreta.

Quando se é trabalhado com uma estrutura modelada em elementos finitos, cada elemento dessa estrutura pode ser considerado um vazio potencial ou um membro estrutural. Sendo assim, no caso de uma estrutura a ser otimizada, sua topologia não é fixa de início.

Portanto, após a seleção do domínio de projeto e suas condições de carregamento e de contorno, é realizada a sua discretização através de uma malha de elementos finitos, onde então é inserida uma função de densidade artificial, apresentada a seguir na Equação 4.

$$\mu(x) \because x \in \Omega \because 0 \leq \mu \leq 1 \quad (4)$$

onde:

$\mu(x)$ é a densidade artificial do elemento x ; e
 Ω é o domínio de projeto.

No entanto, sabe-se que nenhum material dispõe naturalmente de um valor de densidade intermediária. A mesma é adquirida tornando-se a relação entre um dado parâmetro da estrutura usado com restrição durante o processo de otimização, como exemplo, a rigidez, e a densidade do elemento conforme mostrada na Equação 5.

$$\mu = s \quad (5)$$

onde:

s é o parâmetro da estrutura.

A densidade do elemento é normalizada dividindo-se a densidade real ($\bar{\mu}$) pela densidade máxima (μ_0), resultando na Equação 6 a seguir:

$$\bar{\mu} = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (6)$$

Da mesma maneira a rigidez é igual a rigidez real do elemento dividida pela maior rigidez encontrada em um elemento da estrutura. Entretanto, as soluções que forem baseadas apenas na relação apontada na Equação 7 corresponderiam basicamente de elementos com densidades intermediárias, ou então porosos. Por tanto, para que isso não ocorra, as densidades intermediárias são então penalizadas.

A partir disso, se torna possível obter um material artificial, onde os valores intermediários de densidades são penalizados através de um processo iterativo, fazendo com que eles tenham pouca ou nenhuma rigidez associada à estrutura que foi otimizada. À vista disso, o tensor do material se torna:

$$E_{ijkl}(x) = [\mu(x)]^p E_{ijkl}, \text{Vol} = \int_n \mu(x) dx \quad (7)$$

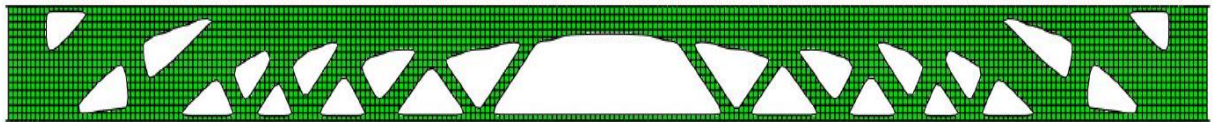
onde:

- $E_{ijkl}(x)$ é o tensor constitutivo do material;
- $\mu(x)$ é a densidade artificial do elemento x ;
- p é o fator de penalização ($p \geq 1$);
- E_{ijkl} é o tensor de rigidez constante para o material.

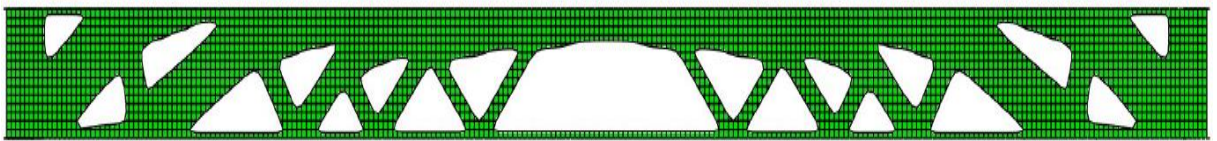
4.1.3.4. Escolha do fator de penalização

Em seguida ao processo de otimização com possíveis fatores de penalização, foram realizados teste e ficou observado que os fatores penalizantes $p = 1$ e $p = 2$ são pequenos e com isso produzem muitos elementos com densidades intermediárias. Foi percebido que a partir do fator de penalidade $p = 3$ as estruturas apresentam topologias próximas. Sendo assim, o fator penalidade escolhido para este estudo foi o fator de penalidade $p = 4$, que será usado como base para todas as demais análises. As vigas modeladas foram então submetidas ao procedimento de otimização, utilizando o método SIMP de interpolação de material. Os resultados alcançados utilizando estes fatores são apresentados nas Figuras (Fig. 4.8) e (Fig.4.9).

a) viga W310x21



b) viga W310x28,3



c) viga W310x52

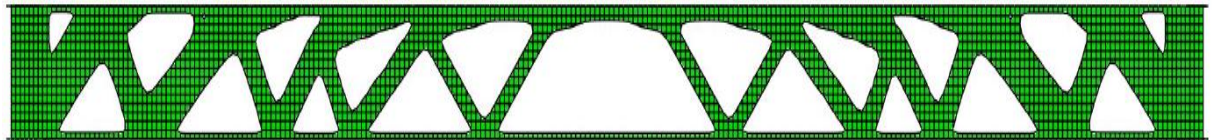
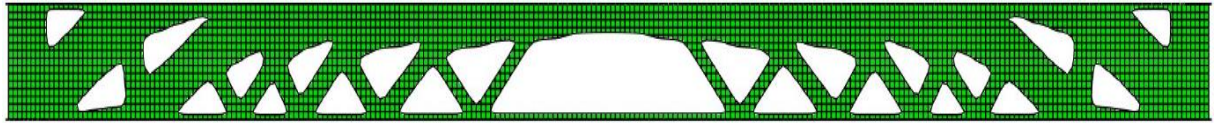
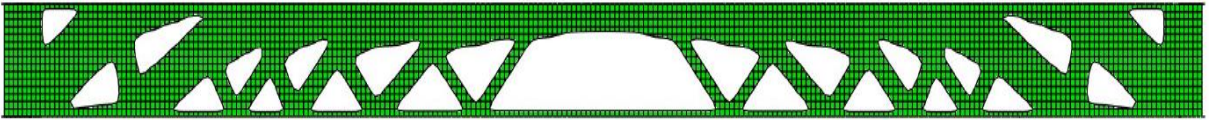


Figura 4.8 - Topologias para as vigas biengastadas obtidas após o processo de otimização através do método SIMP para o fator de penalidade $p = 4$.

a) viga W310x21



b) viga W310x28,3



c) viga W310x52



Figura 4.9 - Topologias para as vigas biapoiadas obtidas após o processo de otimização através do método SIMP para o fator de penalidade $p = 4$.

4.1.3.5. Determinação dos parâmetros de projeto

Para este estudo foram usados como parâmetros de projeto a energia de deformação e o volume da estrutura. Sendo a minimização da energia de deformação a função objetivo utilizada e o volume utilizado como restrição.

Deste modo, o processo de otimização decorreu usando a fração de volume de 0,80 para as vigas biapoiadas e também 0,80 para as vigas biengastadas. Tais volumes foram escolhidos levando-se em consideração fração de volume de uma viga celular (viga com abertura na alma) utilizada como referência aqui, em relação a uma viga de mesma seção transversal de alma cheia. Cujo dimensionamento das vigas pode ser visto na Figura (Fig.4.2).

4.1.4. RESTRIÇÃO GEOMÉTRICA

Foi imposto a viga uma restrição de simetria em seu eixo y, antes do processo de otimização. Tal restrição ajudará no processo da otimização fazendo com que os furos sejam mais simétricos e mais eficiente no uso de um futuro projeto.

4.2. PROCESSO DA OTIMIZAÇÃO

Logo após o procedimento de otimização, as vigas foram submetidas a algumas análises que serão abordadas nesse capítulo. Em seguida seus resultados foram então comparados com os resultados obtidos para as análises realizadas nas mesmas condições para uma viga do tipo celular de volume correspondente e com as mesmas condições de carregamento e condições de contorno.

Todas as vigas usadas nesse estudo contam com as mesmas propriedades mecânicas, sendo estas: módulo de Young igual a 210000 MPa e coeficiente de Poisson igual a 0,3. Caso necessário, foi estabelecido uma tensão de escoamento igual a 355 MPa.

4.2.1. VIGA CELULAR UTILIZADA COMO REFERÊNCIA

Para comparação com as vigas otimizadas, foi utilizada uma viga celular, cuja secção transversal é a mesma apresentada na Figura (Fig.4.2). Foram calculados os volumes das três vigas de referência que podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3 - Volume das vigas de referência.

Vigas	Volume (mm ³)
W310x21	14955955
W310x28,3	15025612
W310xx52	21525612

O comprimento da viga modelada é de 5.000 milímetros e as aberturas da viga de referência foram feitas através de cortes em formato circular de raio igual a 113,78 mm, gerando assim 16 furos ao longo da viga. A distância utilizada entre furos adjacentes da viga celular igual a 294 mm e a distância entre o início da viga e centro da primeira perfuração igual a 295 mm, conforme mostrado na Figura (Fig.4.10).

Tal viga, apresentada na Figura (Fig.4.10), teve como referência de dados o estudo realizado por (Rocha, [51]). A geometria da estrutura 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 só a alma da viga foi inserida no domínio otimizável.

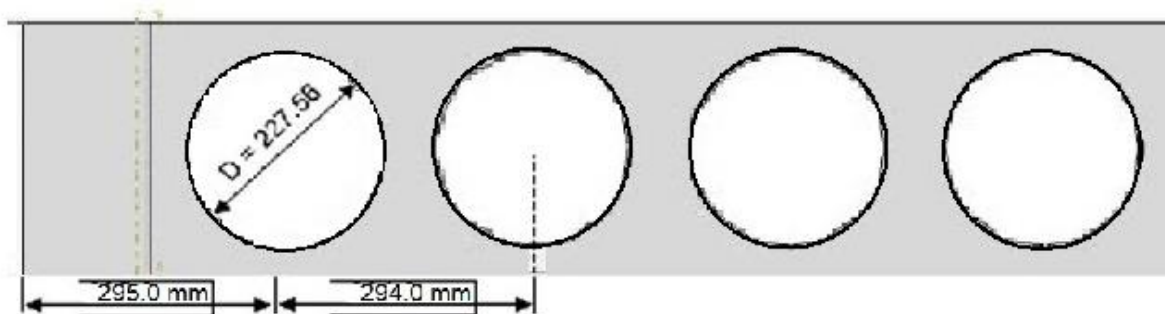


Figura 4.10 - Geometria das aberturas da viga de referência.

Utilizou-se elementos do tipo tridimensional *shell*, na modelagem das vigas, que foram discretizadas em malhas do tipo S3 de elementos de cascas triangulares e aproximadamente 20mm de tamanho. Totalizando 10396 elementos para o perfil W310x21, 10332 para o perfil W310x28,3 e 12340 elementos para o perfil W310x52.

4.2.2. PROPRIEDADES DAS VIGAS ATRAVÉS DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO

As vigas obtidas através do processo de otimização, cuja secção transversal, assim como a da viga

celular, é a mesma apresentada na Figura (Fig.4.2) analisadas, possuem volume e número de elementos finitos diferentes para cada uma das vigas. Desta forma, na Tabela 4 abaixo, são apresentados o volume, peso, comparado a uma viga de mesma secção, 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.

Tabela 4 - comparação do volume, peso e elementos finitos usados na discretização das malhas das vigas.

Viga	Volume (mm ³)	Peso (kg)	Nº de Elementos
W310x21 celular para condições de contorno biengastada/bi apoiada	14955955	117,40	10396
W310x28,3 celular para condições de contorno biengastada/bi apoiada	15025612	117,95	10332
W310x52 celular para condições de contorno biengastada/bi apoiada	21525612	168,98	12340
W310x21 otimizada para condições de contorno biengastada/bi apoiada	11961020	93,89	6777
W310x28,3 otimizada para condições de contorno biengastada/bi apoiada	12066346	94,72	6777
W310x52 otimizada para condições de contorno biengastada/bi apoiada	14913964	117,07	7781

4.2.3. ANÁLISES DAS VIGAS (CELULAR E OTIMIZADA) PARA A CONDIÇÃO DE CONTORNO BIAPOIADA

Tendo como finalidade avaliar o desempenho estrutural das topologias alcançadas no decorrer do processo de otimização, todas as vigas foram submetidas a uma análise linear elástica com a condição de contorno bi apoiada tendo uma carga distribuída equivalente a 100 kN que foi aplicada ao longo da mesa superior da viga. A figura (4.11) até a figura (4.16) apresentadas a seguir, mostram os resultados obtidos.

Tensão máxima: 632,3 MPa

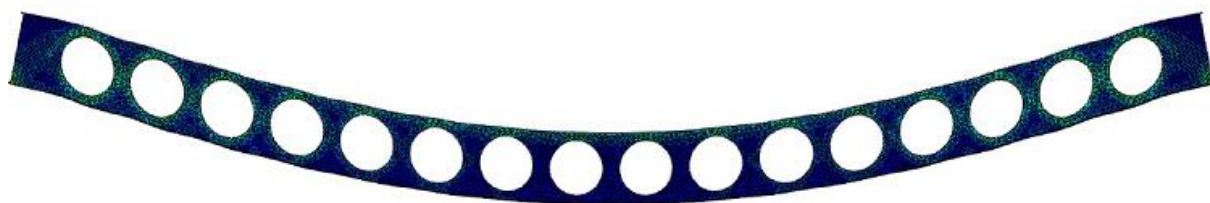


Figura 4.11 - Distribuição da tensão de von Mises para a viga celular W310x21 com condição de contorno bi apoiada.

Tensão máxima: 649,2 MPa

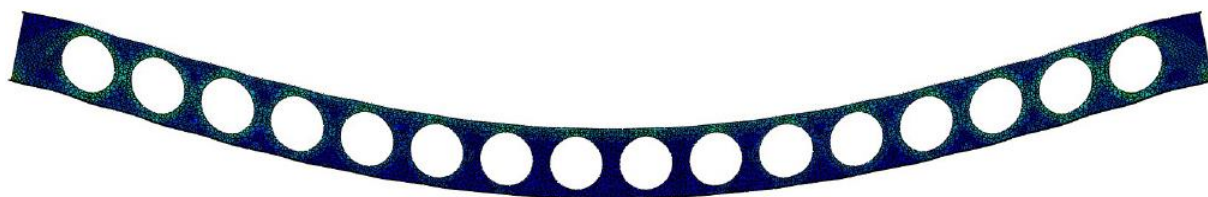


Figura 4.12 - Distribuição da tensão de von Mises para a viga celular W310x28,3 com condição de contorno bi apoiada.

Tensão máxima: 1017,0 MPa

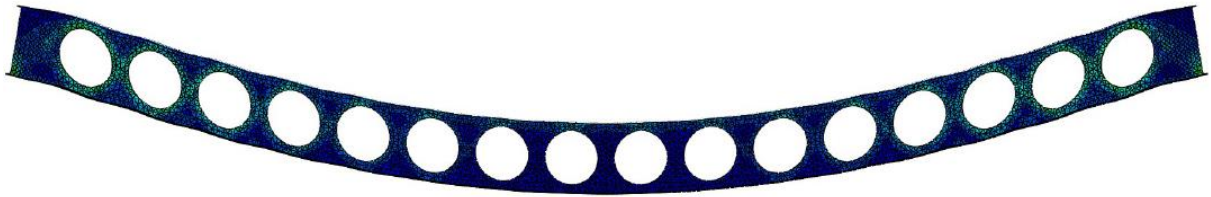


Figura 4.13 - Distribuição da tensão de von Mises para a viga celular W310x52 com condição de contorno biapoada.

Tensão máxima: 526,8 MPa.

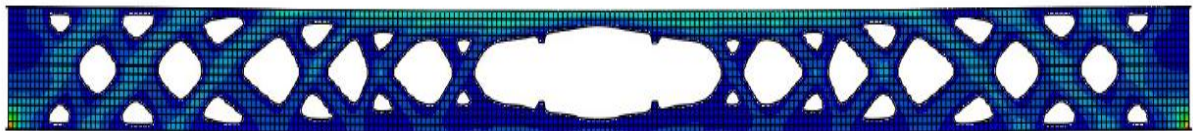


Figura 4.14 - Distribuição da tensão de von Mises para a viga W310x21 otimizada com a condição de contorno biapoada.

Tensão máxima: 532,1 MPa.

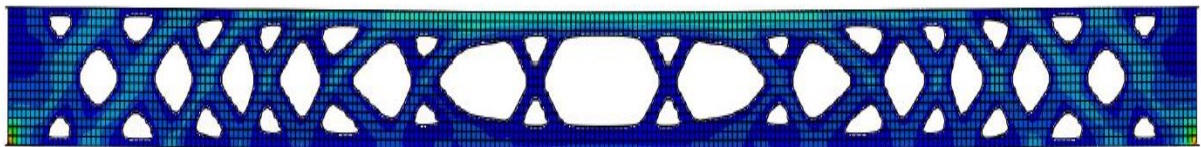


Figura 4.15 - Distribuição da tensão de von Mises para a viga W310x28,3 com a condição de contorno biapoada.

Tensão máxima: 845,9 MPa.

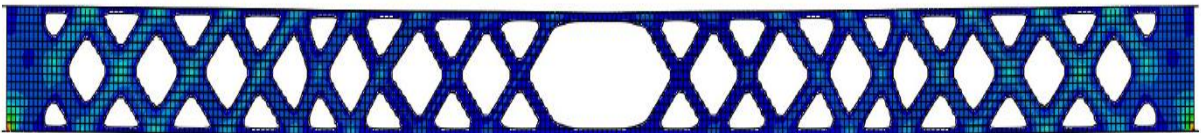


Figura 4.16 - Distribuição da tensão de von Mises para a viga W310x52 com a condição de contorno biapoada.

Analisando os resultados das simulações nas vigas com a condição de contorno biapoada, foi possível observar que as vigas otimizadas apresentaram em sua totalidade um melhor desempenho estrutural, com menores concentrações de tensões e menores deslocamentos, quando comparadas à viga celular de referência. Foi observado também que a viga otimizada de perfil W310x21 para a condição de contorno biapoada Figura (Fig.4.16) gerou um melhor comportamento estrutural e apresentou uma tensão máxima com o menor valor entre as vigas otimizadas. Juntamente foi analisado o deslocamento máximo

das vigas, e foi visto que o melhor resultado também foi do perfil W310x21 da viga otimizada para a condição de contorno biapoada.

A Tabela 5 apresenta um resumo dos resultados obtidos para a análise linear elástica das vigas biapoadas com uma carga de pressão uniformemente distribuída de 100 kN. Levando em consideração os resultados, é possível afirmar que o desempenho das vigas otimizadas para a condição de contorno biapoada é superior ao desempenho apresentado nas três vigas celulares também com a condição de contorno biapoada. Principalmente a viga W310x21 otimizada que apresenta tensões máximas cerca de 20,02% menor do que apresentada pela viga celular de mesma dimensão.

Tabela 5 - Resumo das tensões máxima das vigas celulares e otimizadas.

Viga	Máxima tensão de von Mises (MPa)	Deslocamento máximo no meio do vão (mm)
W310x21 celular condição de contorno biapoada	639,3	12,54
W310x28,3 celular condição de contorno biapoada	649,2	12,71
W310x52 celular condição de contorno biapoada	1017,0	15,55
W310x21 otimizada condição de contorno biapoada	526,8	11,16
W310x28,3 otimizada condição de contorno biapoada	532,1	11,34
W310x52 otimizada condição de contorno biapoada	845,9	16,31

4.2.4. ANÁLISES DAS VIGAS (CELULAR E OTIMIZADA) PARA A CONDIÇÃO DE CONTORNO BIENGASTADA

Tendo como finalidade avaliar o desempenho estrutural das topologias alcançadas no decorrer do processo de otimização, todas as vigas foram submetidas a uma análise linear elástica com a condição de contorno biengastada tendo uma carga distribuída equivalente a 100 kN que foi aplicada ao longo da mesa superior da viga. A figura (4.17) até a figura (4.22), apresentadas a seguir, mostram os resultados obtidos.

Tensão máxima: 459,0 MPa

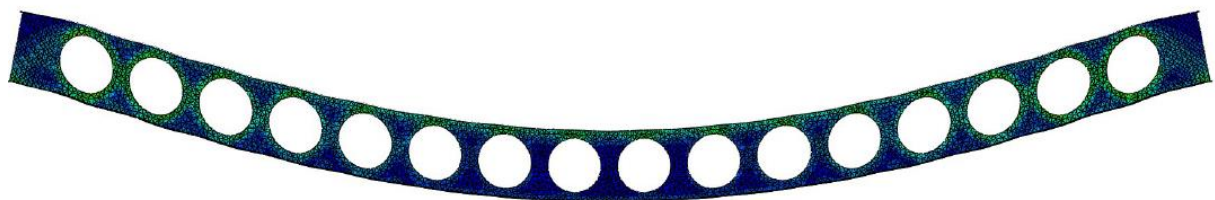


Figura 4.17 - Distribuição da tensão de von Mises para a viga celular W310x21 com condição de contorno biengastada.

Tensão máxima: 404,7 MPa



Figura 4.18 - Distribuição da tensão de von Mises para a viga celular W310x28,3 com condição de contorno biengastada.

Tensão máxima: 624,8 MPa



Figura 4.19 - Distribuição da tensão de von Mises para a viga celular W310x52 com condição de contorno biengastada.

Tensão máxima: 484,2 MPa.

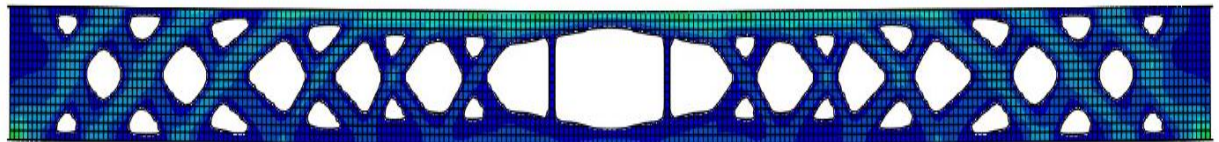


Figura 4.20 - Distribuição da tensão de von Mises para a viga W310x21 otimizada com a condição de contorno biengastada.

Tensão máxima: 239,3 MPa.

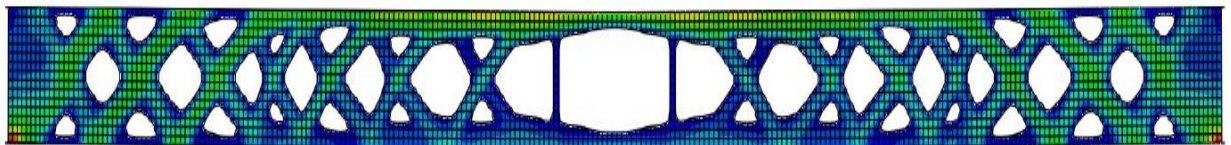


Figura 4.21 - Distribuição da tensão de von Mises para a viga W310x28,3 com a condição de contorno biengastada.

Tensão máxima: 613,3 MPa.



Figura 4.22 - Distribuição da tensão de von Mises para a viga W310x52 com a condição de contorno biengastada.

Analisando os resultados das simulações nas vigas com a condição de contorno biengastada, foi possível observar que as vigas otimizadas apresentaram em sua totalidade um melhor desempenho estrutural, com menores concentrações de tensões e menores deslocamentos, quando comparadas à viga celular de referência. Foi observado também que a viga otimizada de perfil W310x28,3 para a condição de contorno biengastada (Fig.4.22) gerou um melhor comportamento estrutural quando observados suas concentrações de tensões e deslocamentos máximo. Pelas análises foi visto também que a viga W310x28,3 otimizada (Fig.4.21) apresentando tensões máximas cerca de 40% menor do que apresentada pela viga celular de referência com as mesmas dimensões.

A Tabela 6 apresenta um resumo dos resultados obtidos para a análise linear elástica das vigas biengastadas com uma carga de pressão uniformemente distribuída de 100 kN. Levando em consideração os resultados, é possível afirmar que o desempenho das vigas otimizadas para a condição de contorno biengastada é superior ao desempenho apresentado nas três vigas celulares também com a condição de contorno biengastada. Principalmente a viga W310x28,3 otimizada que manteve sua integridade, reduzindo de forma considerável sua tensão máxima.

Tabela 6 - Resumo das tensões máxima das vigas celulares e otimizadas.

Viga	Máxima tensão de von Mises (MPa)	Deslocamento máximo no meio do vão (mm)
W310x21 celular condição de contorno biengastada	459,0	12,37
W310x28,3 celular condição de contorno biengastada	404,7	12,53
W310x52 celular condição de contorno biengastada	624,8	15,34
W310x21 otimizada condição de contorno biengastada	484,2	11,00
W310x28,3 otimizada condição de contorno biengastada	239,3	11,22
W310x52 otimizada condição de contorno biengastada	613,3	15,81

4.2.5. ANÁLISE FINAL DAS VIGAS APÓS O PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO COM BASE NAS TENSÕES MÁXIMAS E DESLOCAMENTOS.

Após todas as simulações foi visto que as vigas otimizadas, em sua totalidade, asseguraram uma melhoria tanto nas tensões máximas como nos deslocamentos, quando comparadas as suas respectivas vigas de referência. Foi possível observar que as vigas otimizadas para a condição de contorno biengastada, apresentaram um melhor desempenho estrutural, com menores concentrações de tensões e menores deslocamentos.

4.3. ANÁLISE DAS VIGAS SUBMETIDAS AO MODO DE FALHA POR ENCURVADURA

Portanto, como visto nos capítulos anteriores deste estudo, alguns modos de falhas podem ocorrer em vigas que foram elaboradas com aberturas em sua alma. A falha por encurvadura na viga pode ser um desses modos de falhas, isso ocorre devido a uma possível instabilidade devida as aberturas realizadas na alma da viga.

Sendo assim, foram feitas simulações que permitem avaliar alguns modos de encurvadura e suas respectivas cargas críticas. Para isso, se fez preciso a utilização do software ABAQUS, onde está disponível um algoritmo para tal fim, chamado de “perturbação linear” do tipo *buckle*. Com essa ferramenta é possível obter os autovalores e autovetores correspondentes para a estrutura que está sendo analisada. Sendo os autovalores responsáveis por representar o fator de carga para o qual ocorre a instabilidade, e os autovetores correspondem aos modos de encurvadura.

As vigas em questão foram então submetidas a uma análise de encurvadura linear com o objetivo de avaliar a carga e o modo de encurvadura para cada viga, e seus resultados podem ser vistos nas figuras (4.23) até a figura (4.34) a seguir. As simulações foram feitas com os mesmos dados das simulações anteriores. Nas Tabelas 7 e 8, serão expostos e analisados os resultados encontrados para cada viga.

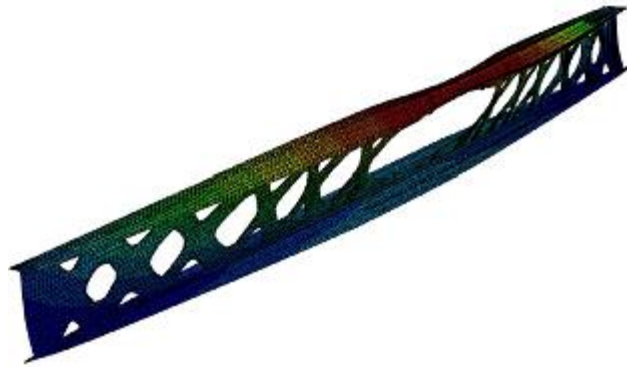


Figura 4.23 - W310x21 Otimizada - condição de contorno biapoiaada.

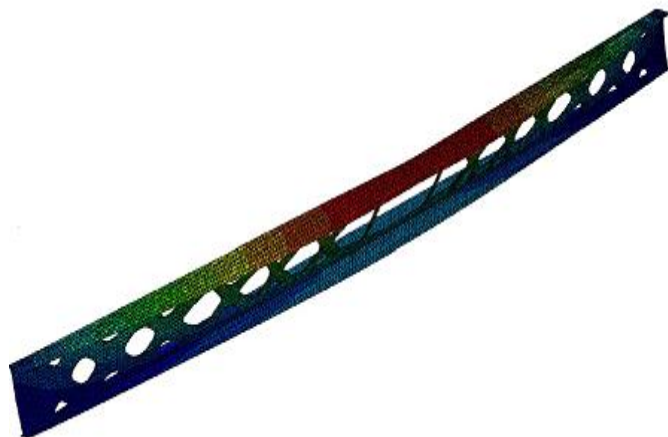


Figura 4.24 - W310x21 Otimizada - condição de contorno biengastada.

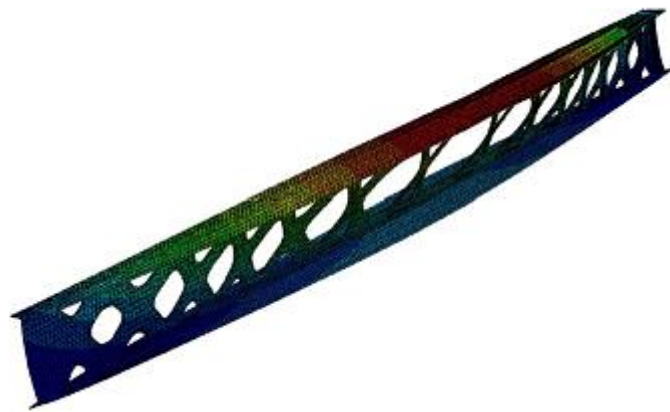


Figura 4.25 - W310x28,3 Otimizada - condição de contorno biapoiada.



Figura 4.26 - W310x28,3 Otimizada - condição de contorno biengastada.

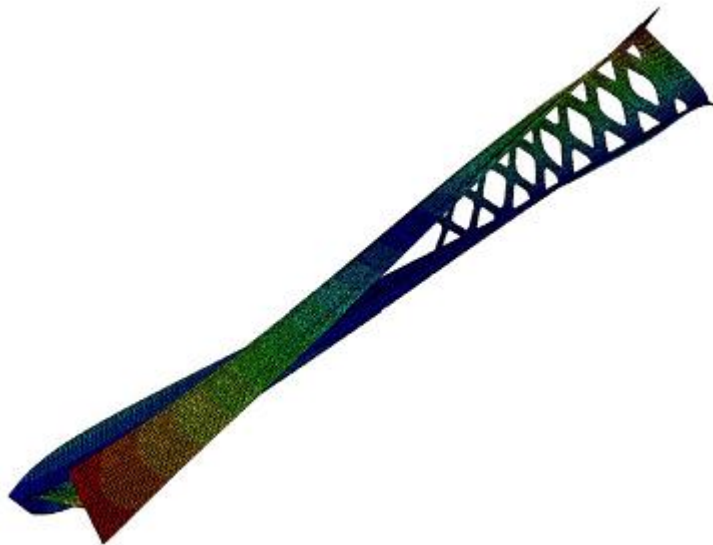


Figura 4.27 - W310x52 Otimizada - condição de contorno biapoiada.

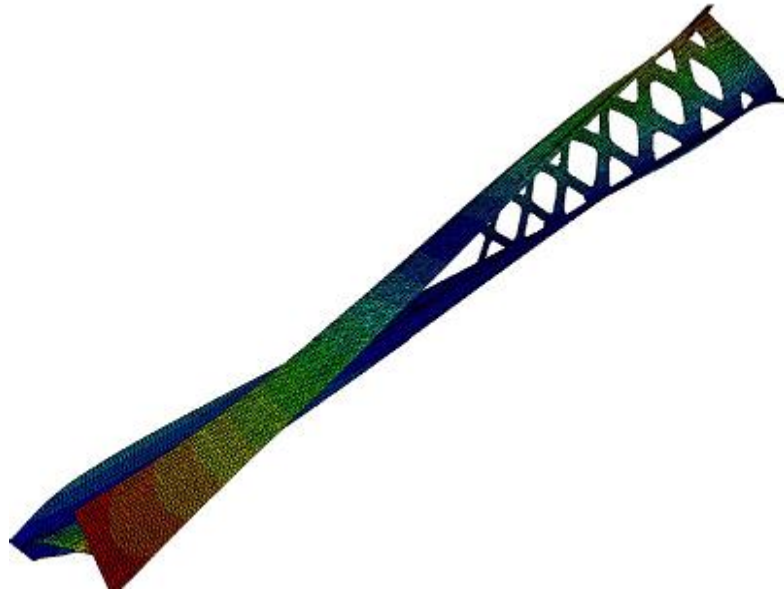


Figura 4.28 - W310x52 Otimizada - Condição de contorno biengastada.

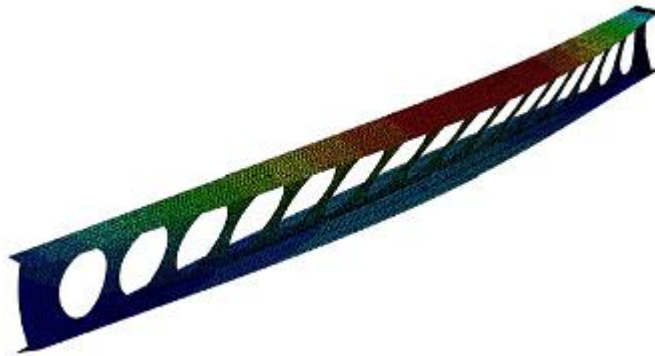


Figura 4.29 - W310x21 Celular - condição de contorno biapoiada.

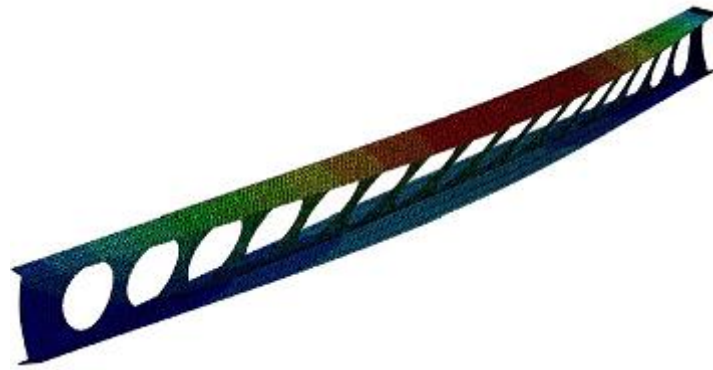


Figura 4.30 - W310x21 Celular - condição de contorno biengastada.

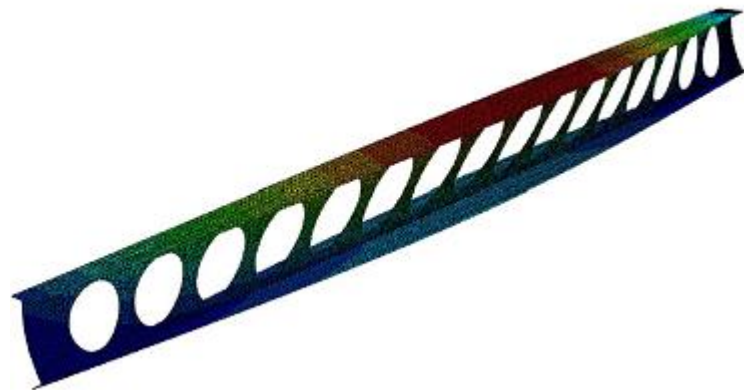


Figura 4.31 - W310x28,3 Celular - condição de contorno biapoiada.

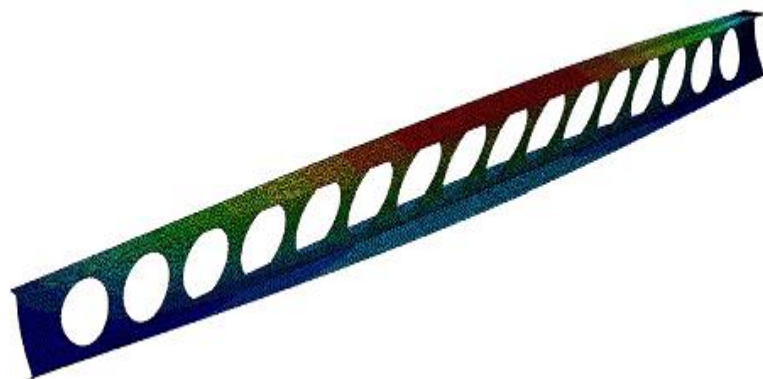


Figura 4.32 - W310x28,3 Celular - condição de contorno biengastada.

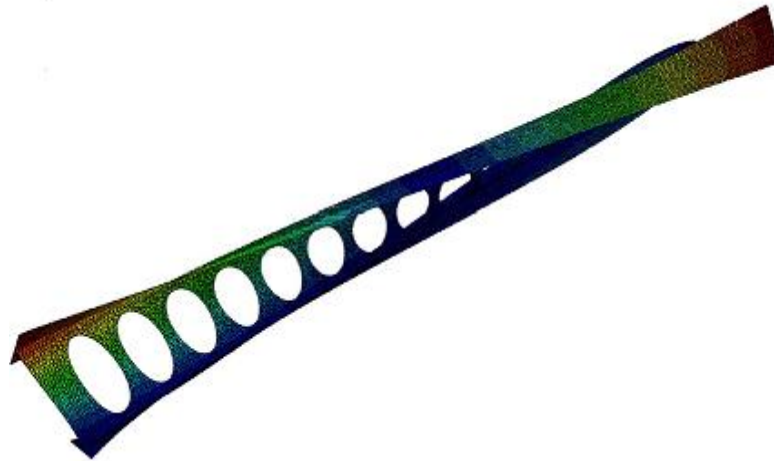


Figura 4.33 - W310x52 Celular - condição de contorno biapoçada.

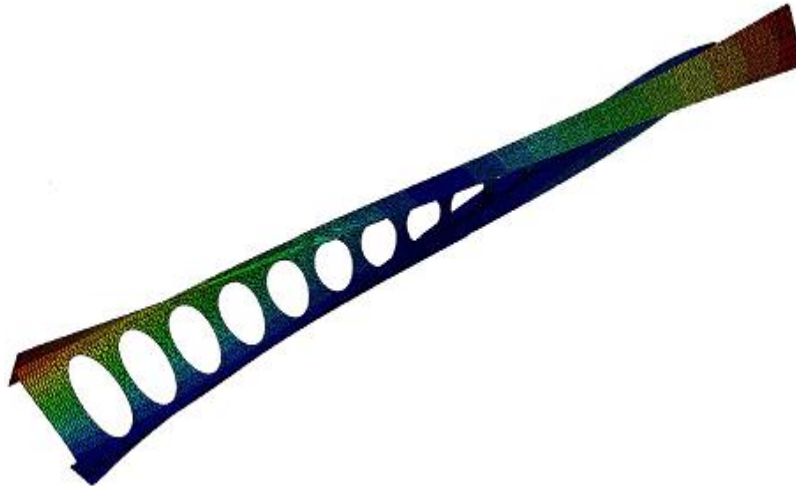


Figura 4.34 - W310x52 Celular - condição de contorno biengastada.

Tabela 7 - carga crítica e modos de encurvadura para as vigas de referência.

Viga	Carga Crítica (kN)	Modo de Encurvadura
Celular perfil W310x21 condição de contorno biapoçada	102,408	Lateral com torção (FLT)
Celular perfil W310x21 condição de contorno biengastada	104,933	Lateral com torção (FLT)
Celular perfil W310x28,3 condição de contorno biapoçada	104,307	Lateral com torção (FLT)
Celular perfil W310x28,3 condição de contorno biengastada	106,895	Lateral com torção (FLT)
Celular perfil W310x52 condição de contorno biapoçada	203,866	Torção
Celular perfil W310x52 condição de contorno biengastada	221,639	Torção

Tabela 8 - carga crítica e modos de encurvadura para as vigas otimizadas.

Viga	Carga Crítica (kN)	Modo de Encurvadura
Otimizada perfil W310x21 condição de contorno biapoiada	54,751	Lateral com torção (FLT)
Otimizada perfil W310x21 condição de contorno biengastada	59,645	Lateral com torção (FLT)
Otimizada perfil W310x28,3 condição de contorno biapoiada	59,77	Lateral com torção (FLT)
Otimizada perfil W310x28,3 condição de contorno biengastada	60,934	Lateral com torção (FLT)
Otimizada perfil W310x52 condição de contorno biapoiada	107,287	Torção
Otimizada perfil W310x52 condição de contorno biengastada	122,66	Torção

A partir dos resultados encontrados, pode ser visto que para todas as simulações, as vigas celulares de referência apresentam um maior valor de carga crítica se comparado as vigas otimizadas. Além disso, foi possível perceber que a viga otimizada de perfil W310x21 para a condição de contorno biengastada foi a que apresentou uma maior rigidez (menor deslocamento) e tensões mais baixas. Quando avaliado os resultados para as simulações de encurvadura, foi percebido que as vigas otimizadas apresentaram cargas críticas muito pequenas, tanto para a condição de contorno biapoiada quanto para a condição de contorno biengastada. A viga otimizada de perfil W310x21 para a condição de contorno biapoiada, foi a que melhor respondeu ao teste de encurvadura, apresentando a menor carga crítica.

Além do mais, tanto as vigas celulares em sua totalidade quanto as vigas otimizadas de perfil W310x52 apresentaram cargas críticas superiores a carga inicialmente proposta de 100 kN.

5

CRIAÇÃO DE UM MODELO TOPOLÓGICO APROXIMADO

5.1. PROCESSO DE CRIAÇÃO

Esse capítulo tem como objetivo trazer as vigas otimizadas encontradas nesse estudo para um processo mais real de produção e utilização. Para isso, foi escolhido uma topologia otimizada para a viga de perfil W310x21, onde foi aproximada para uma topologia que será apresentada a seguir.

Com o intuito de gerar uma topologia aproximada para a viga, a largura de todas as barras que formam a viga otimizada escolhida foi medida. O software ABAQUS possui um comando chamado “Distance” que através dele é possível medir a largura de todas as barras da viga. As larguras encontradas podem ser vistas na Tabela 9. De acordo com a tabela, foi feita uma média e foi escolhido usar uma espessura de 65mm para as barras da viga. A viga permaneceu com os 16 furos em sua alma.

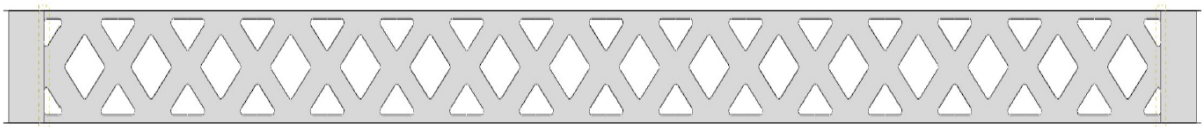


Figura 5 - Modelo aproximado da viga otimizada.

Tabela 9 - Larguras das barras das vigas otimizadas.

Larguras (mm)		
Superior	Inferior	
80	77	
73	59	
65	51	
52	48	
48	45	
49	44	
57	49	
64	53	
79	70	
79	70	
		Média das larguras (mm) 65

5.2. RESULTADOS DAS VIGAS COM TOPOLOGIA APROXIMADA PARA AS CONDIÇÕES DE CONTORNO BIAPOIADA E BIENGASTADA.

Depois de realizada todas as otimizações e análises dos resultados no capítulo anterior, se torna possível a criação de um modelo de topologia aproximada para a viga que apresentou o melhor desempenho estrutural.

Nesta etapa, o dimensionamento da viga utilizada foi a do perfil W310X21, com as mesmas características apresentadas nas análises anteriores. A partir disso, foi então desenvolvido o modelo de elementos finitos das vigas com uma topologia aproximada, onde as mesmas foram submetidas à análise linear elástica de tensão e deslocamento, como também a uma análise de encurvadura, tendo como o principal objetivo avaliar o desempenho estrutural de cada uma das vigas.

Quanto as propriedades do aço submetidas para a análise destas vigas foram as mesmas utilizadas para todas as análises feitas anteriormente, sendo estas, módulo de Young igual a 210000 MPa, Coeficiente de Poisson igual a 0,3 e tensão de escoamento igual a 355 MPa.

A Tabela 10 apresentada a seguir, mostra os dados do volume de cada viga obtida, além do número de elementos finitos utilizados na discretização. As duas vigas analisadas (uma com a condição de contorno biapojada e a outra com a condição de contorno biengastada) foram discretizadas com uma malha de elementos finitos triangulares do tipo S3, de aproximadamente 20mm.

Tabela 10 - Descrição do volume, peso e números de elementos finitos do modelo de viga aproximado.

Viga	Volume (mm ³)	Peso (kg)	Nº de Elementos
Modelo aproximado condição contorno biapoada	: 12006671	94,25	16222
Modelo aproximado condição contorno biengastada	: 12006671	94,25	16222

O primeiro passo para a obtenção dos resultados, foi submeter as vigas a uma análise linear elástica, com o intuito de analisar os resultados de suas concentrações de tensão e deslocamentos máximos. A carga utilizada na simulação foi a mesma utilizada nas simulações anteriores. Uma carga de 100 kN foi distribuída uniformemente na mesa superior da viga.

As figuras (Fig. 5.1 e 5.2) a seguir, mostram os resultados obtidos para as tensões von Mises das vigas.

Tensão máxima: 355 MPa.



Figura 5.1 - Distribuição da tensão de von Mises para o modelo aproximado com a condição de contorno biapojada.

Tensão máxima: 355 MPa.



Figura 5.2 - Distribuição da tensão de von Mises para o modelo aproximado com a condição de contorno biengastada.

As figuras (Fig. 5.3 e 5.4) mostram os resultados obtidos para os deslocamentos máximo para os modelos com as condições de contorno biapoçada e biengastada respectivamente.

Deslocamento máximo: 10,12 mm.



Figura 5.3 - Deslocamento máximo para o modelo aproximado com a condição de contorno biapoçada.

Deslocamento máximo: 9,864 mm.



Figura 5.4 - Deslocamento máximo para o modelo aproximado com a condição de contorno biengastada.

Em seguida, foi realizado um procedimento no qual as vigas foram submetidas à análise de encurvadura, tornando, assim, possível avaliar os modos de encurvadura e as cargas críticas. Esses resultados são apresentados nas figuras (Fig. 5.5 e 5.6).

Carga crítica: 105,520 kN



Figura 5.5 - Modo de encurvadura da viga de modelo aproximado com condição de contorno biapoçada.

Carga crítica: 108,120 kN



Figura 5.6 - Modo de encurvadura da viga de modelo aproximado com condição de contorno biengastada.

5.3. ANÁLISE DA TENSÃO VON MISES, DESLOCAMENTO MÁXIMO E ANÁLISE DE ENCURVADURA DO MODELO APROXIMADO

Com os dados dos resultados das análises estruturais, foi possível criar a Tabela 11 onde pode ser comparado os valores de: tensão máxima de von Mises (MPa); deslocamento (mm); Carga crítica (kN) e o volume (mm³) das vigas celular, otimizada e do modelo com a topologia aproximada.

Tabela 11 - Comparação dos resultados obtidos entre as vigas celular, otimizada e o modelo de topologia aproximado.

Viga	Volume (mm ³)	Nº de elementos finitos	Tensão de von Mises (MPa)	Deslocamento máximo (mm)	Carga Crítica (kN)
Celular W310x21 condição de contorno biapoada	14955955	10396	639,3	12,54	102,408
Celular W310x21 condição de contorno biengastada	14955955	10396	459	12,37	104,933
Otimizada perfil W310x21 condição de contorno biapoada	11961020	6777	526,8	11,16	54,751
Otimizada perfil W310x21 condição de contorno biengastada	11961020	6777	484,2	11,00	59,645
Modelo aproximado condição de contorno biapoada	12006671	16222	355	10,12	105,520
Modelo aproximado condição de contorno biengastada	12006671	16222	355	9,864	108,120

Assim, é possível observar como a variação de volume entre a viga celular e a viga otimizada para ambas as condições de contorno teve uma redução considerável, o que também ocorre quando esta é comparada à viga do modelo aproximado, tendo uma redução de volume em torno de 20,02% e 19,71% respectivamente. O número de elementos utilizados para discretizar a malha de todas as vigas ocorre uma variação, pois para as vigas celular e otimizada foi utilizado uma malha do tipo S4R e já no modelo aproximado se fez uso de uma malha do tipo S3. Pode-se também concluir, através da simulação de encurvadura, que a viga de modelo topológico aproximado, teve uma encurvadura lateral com torção, para as duas condições de contorno.

Mediante aos resultados apresentados na Tabela 11, fica visível que a viga com a topologia aproximada é superior ao desempenho da viga que foi otimizada. E quando a viga de topologia aproximada, é comparada a viga celular de referência, apresenta também um desempenho superior, visto que, apresenta menores concentrações de tensão e sua rigidez se mostrou superior apresentando valores de deslocamento menores.

6

CONCLUSÃO

No decorrer deste trabalho, foi realizado um projeto de vigas com aberturas na alma onde se fez uso de ferramentas de otimização estrutural. Para que esse objetivo fosse alcançado, um processo de otimização topológica foi realizado, visando obter uma configuração com menor massa e maximizando a rigidez dos componentes. Foram então, apresentados os resultados obtidos para a otimização topológica das vigas com furos na alma, realizados com o auxílio de ferramentas computacionais como o software ABAQUS.

Quando avaliado as simulações da análise linear, para as vigas celular e otimizada com condição de contorno biapoiada, foi possível observar que as vigas otimizadas apresentaram em sua totalidade um melhor desempenho estrutural, com menores concentrações de tensões e menores deslocamentos, quando comparadas à viga celular de referência. Foi observado também que a viga otimizada de perfil W310x21 para a condição de contorno biapoiada gerou um melhor comportamento estrutural e apresentou uma tensão máxima com o menor valor entre as vigas otimizadas. Juntamente foi analisado o deslocamento máximo das vigas, e foi visto que o melhor resultado também foi do perfil W310x21 da viga otimizada para a condição de contorno biapoiada. Levando em consideração os resultados, é possível afirmar que o desempenho das vigas otimizadas para a condição de contorno biapoiada é superior ao desempenho apresentado nas três vigas celulares também com a condição de contorno biapoiada. Já no caso da análise da encurvadura linear, as vigas celulares de referência também para a condição de contorno biapoiada, apresentam um maior valor de carga crítica se comparado as vigas otimizadas. Quando avaliado os resultados para as simulações de encurvadura, foi percebido que as viga otimizadas apresentaram cargas críticas muito pequenas. A viga otimizada de perfil W310x21 para a condição de contorno biapoiada, foi a que melhor respondeu ao teste de encurvadura, apresentando a menor carga crítica.

No caso das vigas com a condição de contorno biengastada, foi possível observar que as vigas otimizadas apresentaram em sua totalidade um melhor desempenho estrutural, com menores concentrações de tensões e menores deslocamentos, quando comparadas à viga celular de referência. Foi observado, também, que a viga otimizada de perfil W310x28,3 para a condição de contorno biengastada gerou um melhor comportamento estrutural quando observados suas concentrações de tensões e deslocamentos máximo. Pelas análises foi visto, também, que a viga W310x28,3 otimizada apresentando tensões máximas cerca de 40% menor do que apresentada pela viga celular de referência com as mesmas dimensões. Levando em consideração os resultados, é possível afirmar que o desempenho das vigas otimizadas para a condição de contorno biengastada é superior ao desempenho apresentado nas três vigas celulares, também, com a condição de contorno biengastada. Principalmente a viga W310x28,3 otimizada que manteve sua integridade, reduzindo de forma considerável sua tensão máxima. Já no caso da análise da encurvadura linear, as vigas celulares de referência também para a condição de contorno biapoiada, apresentam um maior valor de carga crítica se comparado as vigas

otimizadas. Quando avaliado os resultados para as simulações de encurvadura, foi percebido que as vigas otimizadas apresentaram também uma redução nos valores de carga crítica.

Já a viga de modelo topológico aproximado, que foi criada a partir da viga otimizada de perfil W310x21, apresentou resultados superiores aos obtidos para a viga celular de referência quando avaliados sua concentração de tensões e a sua rigidez se mostrou superior apresentando valores de deslocamento menores.

Originalmente, o perfil W310x21 de uma viga celular possuía um peso de 117,40 kg e uma tensão máxima de 632,3 MPa, além disso seu deslocamento máximo apresentava um valor de 12,54mm. Após a realização da otimização topológica, o perfil W310x21 otimizado, apresentou um peso de 93,89 kg, uma tensão máxima de 484,2 MPa, e um deslocamento máximo de 11mm. Assim, o sistema otimizado apresentou uma redução de aproximadamente 20% de massa, uma redução de 23% na tensão máxima e uma redução de 12% no deslocamento máximo. Dessa forma, é apropriado afirmar que os objetivos desse trabalho foram atingidos, pois foi obtida uma nova geometria otimizada que atende aos requisitos normativos e que possua uma massa menor em relação ao sistema original.

A partir do estudo realizado, foi possível constatar como a otimização topológica pode produzir resultados bastante satisfatórios para vigas com furos na alma. A comparação com a viga celular de referência neste estudo mostrou que, apesar de ter pesos muito semelhantes, a viga otimizada se mostrou mais rígida e exibiu menores concentrações de tensões.

Além do mais, foi possível alcançar o objetivo de obter uma viga com a topologia aproximada à da viga obtida pelo processo de otimização topológica. Com uma topologia viável de ser fabricada e ainda assim mantendo bons resultados em termos de concentrações de tensões e rigidez, quando comparados aos resultados obtidos para a viga celular de referência. Trazendo os resultados obtidos nas simulações para o modelo aproximado, temos uma redução de aproximadamente 19% de massa, uma redução de 43% na tensão máxima e uma redução de 21% no deslocamento máximo.

7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABAQUS Inc S. ABAQUS Analysis user's manual. 6.14th ed, 2014
- [2] ABAQUS Inc S. ABAQUS Theoric guide. 6.14th ed, 2014
- [3] Abreu, L. M. P. (2011). *Determinação do momento fletor resistente à flambagem lateral com torção de vigas de aço celulares*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- [4] Alves Filho, A. (2012). *Elementos Finitos: a base da tecnologia CAE*. 5ed. São Paulo: Érica.
- [5] Arora, J. S. (2004). *Introduction to Optimum Design*. 2ed. USA: Elsevier Academic Press. ISBN 0-12-064155-0
- [6] Arora, J. S. (2012). *Introduction to Optimum Design*. 3ed. Amsterdam: Elsevier Academic Press. ISBN 978-0-12-381375-6
- [7] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8800:2008. *Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*. Rio de Janeiro.
- [8] Azevedo, A. F. M. (2003). *Método dos Elemento Finitos*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal. 1ed.
- [9] Badke Neto, A. (2015). *Estudo de Metodologias para o Dimensionamento de Vigas de Aço e Vigas Mistas de Aço e Concreto com Perfis Celulares*. Dissertação de Pós-Graduação, Universidade Federal do Espírito Santo.
- [10] Badke-Neto, A.; Calenzani, A. F. G. e Ferreira, W. G. (2015). *Estudo de metodologias para o dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto com perfil celular*. Revista Ibracon de estruturas e materiais. 8(6), 827-859.
- [11] Bellon, F. G. (2021). *Análise da Capacidade de Plastificação de Vigas Casteladas de Aço Sujeitas a Flexão Simples*. Dissertação de Pós-Graduação, Universidade Federal de Viçosa.
- [12] Bendsøe, M. P. (1989). *Optimal shape design as a material distribution problem Structural optimization*, 1(4), 193-202.
- [13] Cedrim, M. B. M. (2019). *Aplicação do Método das Bielas para o Dimensionamento de Consolos Curtos com Suporte da Otimização Topológica*. Dissertação de Pós-Graduação, Universidade Federal de Alagoas.
- [14] Cimadevila, F. J. E.; Gutiérrez, E. M.; Rodríguez, J. A. V. (2000). *Vigas alveoladas*. Madri: A Coruña: Biblioteca Técnica Universitária, Vol. 3.
- [15] Costa Jr, J. C. A. (2003). *Otimização Topológica com Refinos H-adaptativos*. Dissertação de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina.

- [16] Coutinho, K.D. (2006). *Método de Otimização Topológica em Estruturas Tridimensionais*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- [17] Cheng, T. K.; Olhoff, N. (1982). *Regularized Formulation for Optimal Design of Axisymmetric Plates*. International Journal of Solids Structures, 18(2), 153-169.
- [18] Chung, K. F., Liu, T. C. H., & Ko, A. C. H. (2001). *Investigation on Vierendeel mechanism in steel beams with circular web openings*. Journal of Constructional Steel Research, 57(5), 467-490.
- [19] Chung, K. F., & Lawson, R. M. (2001). *Simplified design of composite beams with large web openings to Eurocode 4*. Journal of Constructional Steel Research, 57(2), 135-164.
- [20] Chung, K. F., Ko, C. H., & Wang, A. J. (2005). *Design of steel and composite beams with web openings-Verification using finite element method*. Steel and Composite Structures, 5(2-3), 203-233.
- [21] Dias, B. V., de Andrade, S. A. L., & de Lima, L. R. O. (2017). *Modelagem por elementos finitos de vigas de aço casteladas e vigas casteladas expandidas*. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro PUC-Rio.
- [22] Eller, E. (2015). *Análise de Desempenho Estrutural de Vigas Celulares*. Dissertação de Graduação, Faculdade de Ciências Gerenciais de Manhuaçu.
- [23] Ellobody, E. (2012). *Nonlinear analysis of cellular steel beams under combined buckling modes*. Thin-Walled Structures 52. Elsevier, 66–79.
- [24] Eschenauer, H. A.; Olhoff, N. (2001). *Topology optimization of continuum structures*. Applied Mechanics Review, 54(4), 331-390.
- [25] ENV 1993-1-3. (1998). *Eurocode 3: Design of steel structures: Part 1.1. Genetal rules and rules for buildings, 1992, and Amendment A2 of Eurocode 3: Annex N “Openings in webs”*. British Standards Institution.
- [26] Fonseca, M., (2007) *Otimização Estrutural Treliçadas Planas e Espaciais sob Carregamentos Estáticos e Dinâmicos, Usando Algoritmos Genéticos e Redes Neurais*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto.
- [27] Gerdau Açominas. (2022). *Tabela de Comparações entre Perfis*.
- [28] Gerdau Açominas. (2022). *Catálogo de Produtos*.
- [29] Gonçalves, J. D. C. L. (2018). *Otimização estrutural topológica com refino de malha adaptativo isotrópico*. Dissertação de Doutorado, Universidade Federal do Paraná.
- [30] Grünaauer, B. V. (2022). *Strong in Steel*. Disponível em: (<http://www.grunbauer.nl/eng/wat.htm>.)
- [31] Herzer, R. (2012). *Otimização Topológica em Estruturas Bidimensionais*. Dissertação de Graduação, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo.
- [32] Kerdal, D. and Nethercott, D. A. (1984). *Failure Modes for Castellated Beams*. J. Construct. Steel Research 4, 295-315.
- [33] Kingman, J. J.; Tsavdaridis, K. D. and Toropov, J. J. (2015). *Applications of Topology Optimization in Structural Engineering: High-Rise Buildings and Steel Components*. Jordan Journal of Civil Engineering, 9(3).
- [34] Kingman, J. J.; Tsavdaridis, K. D. and Toropov, J. J. (2015) *Applications of topology optimisation in structural engineering*. In: Jordan Journal of Science and Technology. Civil Engineering for Sustainability and Resilience International Conference, 24 – 27, Amman, Jordan.

- [35] Kim, H.; Querin, O. M.; Steven, G. P.; Xie, Y. M. (2002). *Determination of an optimal topology with a predefined number of cavities*. AIAA Journal, 40(4), 739-744.
- [36] Kohn, R. V.; Strang, G. (1986). *Optimal-design and relaxation of variational problems*. Communications on pure and applied mathematics, 39(1), 112-137.
- [37] Labanowski, A. J. (2004). *Análise comparativa de métodos de otimização topológica em elasticidade 2D e 3D*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [38] Lawson, R. M., Lim, J., Hicks, S. J., & Simms, W. I. (2006). Design of composite asymmetric cellular beams and beams with large web openings. *Journal of constructional steel research*, 62(6), 614-629.
- [39] 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. SL5 7QN UK.
- [40] Lubke, G. P. (2017). *Dimensionamento Otimizado de vigas Alveolares de Aço*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo.
- [41] Morishita, G. S. D. L. (2015). *Otimização Topológica de Mecanismo de Quatro Barras*. Dissertação de Graduação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- [42] Nascimento, H. L. D. S. (2019). *Métodos de Otimização Topológica em Estruturas Contínuas Bidimensionais*. Dissertação de Graduação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- [43] Novotny, A.A., Feijóo, R.A. & Taroco, E. (2005). *Análise de Sensibilidade Contínua*. LNCC-MCT, Petrópolis, Brasil.
- [44] Olinquevicz, D. F. (2015). *Otimização Topológica de Estruturas Contínuas de Polipropileno com Restrições de Tensão Baseadas em Critérios de Escoamento*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- [45] Oliveira Neto, J. A. D. (2011). *Otimização Topológica de Estruturas Termoelásticas Tridimensionais*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- [46] Pavan, R. C., Torrescasana, C. E. N., & Malagutti, M. B. (2015). “*Comparação Teórica e Experimental da Resistência à Flexão de Perfis Metálicos Laminados e Formados a Frio*”. REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil, 10(2), 72-80. Goiânia.
- [47] Perini, G. (2013). *Estudo de Caso: Aplicação de Otimização Topológica no Desenvolvimento do Projeto de um Cubo de Roda*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Caxias do Sul.
- [48] Querin, O. M.; Steven, G.P.; Xie, Y. M. (2000). *Evolutionary structural optimisation using the additive algorithm*. Finite Elements in Analysis and Design, 34(3-4), 291-308.
- [49] Rao III, S. S. (2009). *Nonlinear programming iii: Constrained optimization techniques*. Engineering optimization: theory and practice. 4ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 422-428.
- [50] Redwood, R. G. (1983). *Design of I-Beams with Web Performances – Beams and Beams Columns Stability and Strength, chapter 4*. Applied Science Publishers, 95-133.
- [51] Rocha, K. M. (2017). *Otimização Topológica de Vigas Metálicas com Aberturas na Alma*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

- [52] Rodrigues, F. (2007). *Comportamento Estrutural de Vigas de Aço com Abertura na Alma*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
- [53] Rozvany, G. I., Zhou, M., & Birker, T. (1992). *Generalized shape optimization without homogenization*. *Structural optimization*, 4(3), 250-252.
- [54] Sant'Anna, H. M. (2002). *Otimização Topológica de Estruturas Bidimensionais Contínuas Submetidas a Restrições de Flexibilidade e Tensão*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [55] Sato, H. T. (2014). *Dimensionamento de regiões D através o Método os Elementos Finitos e do Método de Bielas e Tirantes Aliado à Otimização Topológica*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- [56] Silva, E. C. N. (2003). *Otimização aplicada ao projeto de sistemas mecânicos*. Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica da USP.
- [57] Silva, E. D. (2012). *Uma formulação de Otimização Topológica com Restrição de Tensão Suavizada*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [58] Silva, V. A. (2019). *Análise Numérica da Resistência de Vigas de Aço Submetidas a Aberturas não Projetadas na Seção da Alma em Elementos Estruturais*. Dissertação de Graduação, UniEvangelica.
- [59] Silveira, E. G. D. (2011). *Avaliação do Comportamento de Vigas Alveolares de Aço com Ênfase nos Modos de Colapso por Plastificação*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo.
- [60] Simonetti, H. L. (2009). *Otimização Topológica de Estruturas Bidimensionais*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal e Ouro Preto.
- [61] Simonetti, H. (2016). *Otimização Topológica de Estruturas Elásticas 2D via MEC Baseada em uma Nova Abordagem Evolucionária*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal e Ouro Preto.
- [62] Somacal, P. B. (2018). *Otimização Estrutural do Sistema Coluna e Braço Principal de um Guindaste Articulado*. Dissertação de Graduação, Universidade de Caxias do Sul.
- [63] Shigley, J. E., Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2011). *Elementos de máquinas de Shigley*. AMGH Editora Ltda, 8ª ed, São Paulo, Brasil.
- [64] Stump, F.V. (2006). *Otimização Topológica Aplicada ao Projeto de Estruturas Tradicionais e Estruturas com Gradação Funcional sujeitas a Restrição de Tensão*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil.
- [65] Teixeira-Dias, F. et al. (2009). *Método dos Elementos Finitos: Técnicas de Simulação Numérica em Engenharia*. Lisboa: ETEP - ETEP - Edições Técnicas e Profissionais. ISBN: 978-972-8480-25-7
- [66] Teixeira, F. B. (2017). *Análise Numérica de Perfis Alveolares de Aço*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- [67] Tsavdaridis, K. D. (2015). *Applications of topology optimization in structural engineering: High-rise buildings and steel components*. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 9(3), 335-357.
- [68] Tsavdaridis, K. D., & D'Mello, C. (2011). *Web buckling Study of the Behaviour and Strength of Perfprated Steel Beams with Diferrent Novel Web Opening Shapes*. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(10), 1605-1620.

- [69] Vendramin, R. (2016). *Otimização Estrutural de Chassi de um Veículo Guiado Automaticamente*. Dissertação de Graduação, Universidade de Caxias do Sul.
- [70] Veríssimo, G (1996). *Análise e Comportamento de Vigas de Aço e Vigas Mistas com Abertura na Alma*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- [71] Veríssimo, G. S. et al. (2012). *Dimensionamento de Vigas Alveolares de Aço*. In: Congresso Latino-americano da Construção Metálica 5, São Paulo. Disponível em: (<http://www.abcem.org.br/construmetal>).
- [72] Vieira, H. C. (2014). *Análise Numérica da Flambagem do Montante de Alma Devido ao Cisalhamento em Vigas de Aço Celulares*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- [73] Vieira, W. B. (2015). *Estudo Numérico – Experimental da Flambagem do Montante de Alma em Vigas Casteladas de Aço*. Dissertação de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa.
- [74] Vitorio Júnior, P. (2014). *Análise Level Set da Otimização Topológica de Estruturas Planas Utilizando o Método dos Elementos de Contorno*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos.
- [75] Xie, Y. M.; Steven, G. P. (1997). *Evolutionary Structural Optimization*. Springer-Verlag, Berlin.
- [76] Warren, J. (2001). *Ultimate Load and Deflection Behaviour of Cellular Beams*. Dissertação de Mestrado, University of Natal.
- [77] Zirkalian, T., & Showkati, H. (2006). *Distortional buckling of castellated beams*. Journal of Constructional Steel Research, 62(9), 863-871.

SITES ELETRÔNICOS

- [78] <https://www.kloecknermetalsuk.com/en/westok/westok.html>. Acessado em: 05/2022.
- [79] <https://www.tektonsce.com/single-post/2017/12/24/Vigas-casteladas-alma-ligera-monterrey>. Acessado em: 05/2022.
- [80] https://www.linkedin.com/posts/daniel-ferraz_quando-vigas-de-a%C3%A7o-precisam-de-nervuras-activity-6363481651409874944-jrid/. Acessado em: 05/2022.
- [81] www.grunbauer.nl. Acessado em: 05/2022.
- [82] https://fotos.habitissimo.com.mx/foto/fabricacion-de-vigas-expandidas-o-casteladas_380704. Acessado em: 05/2022.