



ESTUDO SOBRE O COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE VIGAS CELULARES E CASTELADAS

Alfonso Pappalardo Jr. – alfonso@mackenzie.br

Fabio Raia – raia@mackenzie.br

Henrique Dinis – dinis@mackenzie.br

Universidade Presbiteriana Mackenzie, Escola de Engenharia

Rua da Consolação, 896 – Prédio 6

01302-907 – São Paulo/SP

Resumo: *Este trabalho apresenta o estudo numérico sobre o comportamento à flexão de vigas tipo I com grandes aberturas hexagonais ou circulares executadas em concreto armado ou em aço. Estas vigas são consideradas como uma solução muito competitiva quando se leva em conta a necessidade de vencer grandes vãos com pequenas sobrecargas ou suportar o tráfego de veículos de carga com pequeno risco de ocorrência de vibrações excessivas. Neste sentido, pode-se avaliar o desempenho estrutural destes tipos de vigas por meio de um modelo matemático paramétrico, utilizando-se o programa de elementos finitos ANSYS. Tal estudo permite a verificação rigorosa das deflexões de vigas com grandes aberturas na alma em situações de serviço, a compreensão sobre o posicionamento e o direcionamento das armaduras numa peça de concreto armado complexa e a otimização da espessura da chapa da alma em vigas metálicas. São discutidos os fenômenos da flambagem localizada e das frequências naturais de vibração.*

Palavras-chave: *Modelos paramétricos, Método dos elementos finitos, Vigas casteladas, Vigas celulares, Otimização estrutural.*

1. INTRODUÇÃO

A utilização de sistemas computacionais para a elaboração de projetos de arquitetura e engenharia é uma prática indispensável para o profissional que atua neste setor. Os cursos de arquitetura e engenharia, com currículos atualizados de acordo com as exigências do mercado, oferecem uma sequência de disciplinas que visam à formação profissional daqueles que pretendem atuar neste segmento. Neste sentido, são oferecidos cursos dedicados ao uso de programas comerciais que são quesitos indispensáveis para a atuação profissional plena. A falta deste conhecimento implica na má formação do acadêmico, levando a limitações na sua atuação profissional.

Realização:



Organização:





Os sistemas computacionais são escolhidos com base nos critérios de aceitação pelos profissionais do mercado, pela confiabilidade dos resultados, pelos recursos gráficos e algoritmos avançados, pela interoperabilidade com outros programas multidisciplinares e pelo suporte das novas técnicas de dimensionamento atendendo as normas vigentes. Tais sistemas computacionais são muito competentes como ferramentas de ensino e aprendizagem para os cursos de arquitetura e engenharia. Os debates de alto nível promovidos pela integração das Tecnologias de Informação e Computação (TIC), Modelagem de Informações da Construção (BIM) e de Projeto Assistido por Sistemas Computacionais (CAE) entre educador e educando destes cursos, permitem desenvolver uma visão integrada com todos os subsistemas envolvidos na construção. Outrora, seria inimaginável a verificação, em tempo real, da influência do comportamento estrutural no desempenho funcional ou na vida útil de uma construção. A utilização de ferramentas computacionais paramétricas permite a tomada de decisão de engenharia visando o máximo desempenho em termos de custo, quantidade e eficiência. Pode-se otimizar as dimensões dos elementos construtivos trabalhando no limite das normas de segurança e de desempenho. Por exemplo, a redução da espessura das lajes de um pavimento de concreto assegurada por modelos matemáticos complexos de lajes contínuas baseados na Teoria das Placas. Ressalta-se que no caso hipotético de um pavimento de 600 m² cada centímetro reduzido na espessura das lajes leva a uma economia de um caminhão de concreto por pavimento executado.

2. OBJETIVO

Apresentar as vantagens no uso de sistemas computacionais de última geração para a análise de desempenho de uma construção. Mostrar que a utilização destes sistemas computacionais de uso acadêmico nas aulas práticas de laboratório, para os cursos de arquitetura e engenharia, permitem aproximar o acadêmico do exercício profissional oferecendo-lhe uma formação moderna, diferenciada e abrangente que leva a sua distinção no mercado atual de projetos. O projeto de norma brasileira para Pontes de Aço, em elaboração para Associação Brasileira de Normas Técnicas, deverá apresentar estudos sobre o desempenho estrutural de vigas metálicas casteladas e celulares no sentido de apresentar subsídios técnicos para o dimensionamento e verificação envolvendo estes elementos estruturais. O acadêmico acostumado em lidar com novas tecnologias estará preparado para atender os quesitos exigidos pelas futuras normas que serão escritas de modo atender os critérios de sustentabilidade da construção civil.

3. VIGAS CASTELADAS E CELULARES

Este trabalho apresenta um estudo numérico sobre o comportamento à flexão de vigas tipo I com grandes aberturas hexagonais (casteladas) ou circulares (celulares). Podem ser executadas em concreto armado ou em aço. As vigas casteladas e celulares de aço são obtidas a partir do desmembramento de um perfil (laminado ou soldado) com máquina de corte laser e posterior soldagem entre as partes. As distâncias entre os centros dos círculos, que no caso das vigas casteladas circunscrevem o hexágono regular, são inerentes ao processo de fabricação. Estas distâncias são definidas a partir de estudos de otimização visando o máximo aproveitamento dos materiais. Os padrões de corte e de soldagem para a execução de vigas casteladas e celulares são mostrados, respectivamente, nas figuras 1 e 2. Detalhes sobre as vantagens técnicas oferecidas pelos sistemas estruturais compostos por vigas casteladas e celulares são apresentados em NAKAMURA (2012) e TAMAKI (2010).

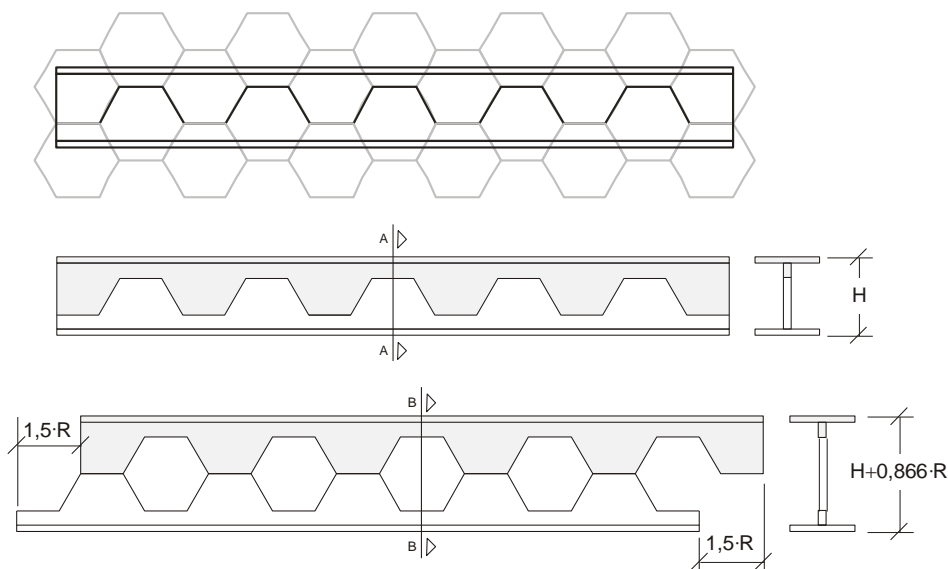


Figura 1 Processo de otimização e fabricação de vigas casteladas

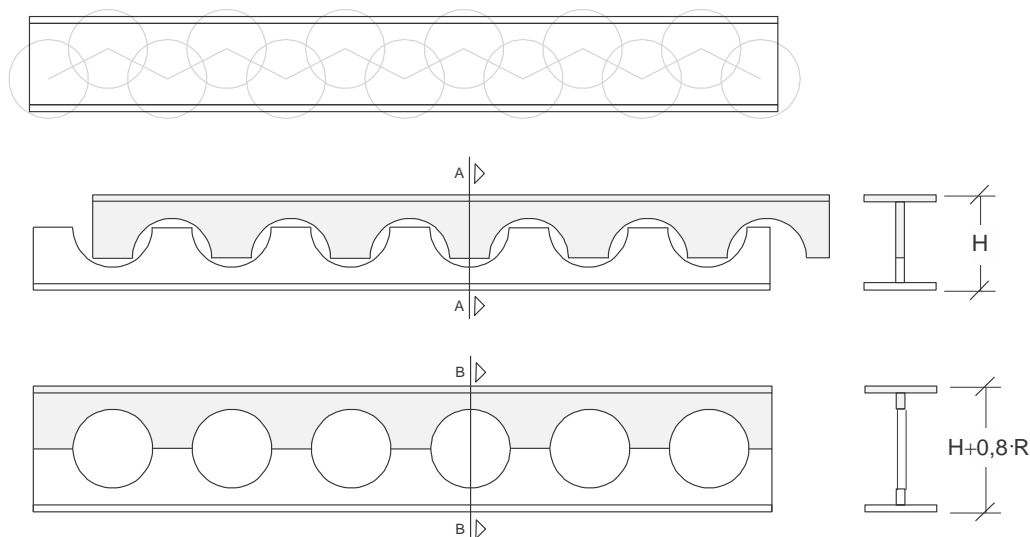


Figura 2 Processo de otimização e de fabricação de vigas celulares

Observa-se mediante a análise das figuras 1 e 2, que o desmembramento do perfil para a produção de vigas casteladas não leva à perda de material, devido ao padrão de corte otimizado. O aumento da altura do perfil, mostrado nas figuras 1 e 2, que leva a um ganho em termos de desempenho estrutural devido ao aumento do momento de inércia à flexão do perfil. Ressalta-se que tal procedimento não leva ao aumento de peso e, conseqüentemente, no custo do elemento estrutural. Tais medidas estão de acordo com as políticas de sustentabilidade na construção civil com redução do desperdício de materiais e dos custos relacionados à destinação de resíduos de construção. Os detalhes de corte para a conformação das vigas casteladas e celulares são mostrados na Figura 3.



Figura 3 Processo de corte a laser para a fabricação de vigas casteladas e celulares
Fonte: ESTRADA, 2006.

Por outro lado, as vigas casteladas ou celulares de concreto armado são obtidas por meio da execução das fôrmas em chapas de madeira ou de aço, colocação das armaduras de aço, lançamento do concreto, cura e desfôrma. As aberturas realizadas na alma não comprometem a rigidez das vigas casteladas e celulares. Estas vigas são utilizadas quando se deseja vencer grandes vãos com sobrecargas pequenas, como é o caso de coberturas e de passarelas (figura 4), ou suportar carregamentos dinâmicos de baixa frequência apresentando baixos níveis de vibração como, por exemplo, as pontes rodoviárias e ferroviárias (figura 13), pórticos de arquibancadas, edifícios industriais.

4. MODELAGEM PARAMÉTRICA

A parametrização de projetos corresponde à engrenagem principal da Tecnologia da Modelagem de Informações da Construção (BIM), que permite integrar todos os subsistemas da construção em um único modelo 3-D, aliado a um completo banco de dados que abrange todas as informações da construção (quantitativo, custo, fornecedor, vida útil, desempenho).

As vigas casteladas e celulares apresentam grande vantagem em relação às vigas de alma cheia por diversos aspectos. Do ponto de vista de execução, na montagem de elementos construtivos pode-se esbarrar em interferências com outros subsistemas. As vigas casteladas e celulares, devido às grandes aberturas na alma, permitem a passagem livre de outros sistemas, como mecânico (pressurização, ventilação, circulação, aquecimento, ar condicionado), hidráulico (água fria, quente, pluviais, incêndio) e elétrico (iluminação, segurança).

O estabelecimento das relações entre o comportamento à flexão de vigas com grandes aberturas na alma e de vigas de alma cheia é feito por meio de um modelo matemático, utilizando-se a linguagem paramétrica do programa de elementos finitos ANSYS. Tal estudo permite a verificação rigorosa das tensões e deflexões de vigas com grandes aberturas na alma em situações de serviço, a compreensão sobre o posicionamento e direcionamento das armaduras numa peça de concreto armado e, também, a otimização da espessura da chapa da alma em vigas metálicas.

Três tipos de análise são considerados: estática, flambagem e modal. A análise estática considera que os carregamentos sejam constantes ao longo do tempo e, assim, são obtidos os deslocamentos e as tensões em todos os pontos do modelo. A análise de flambagem permite a obtenção do fator de amplificação das ações de modo que seja atingida a instabilidade do elemento estrutural. São revelados os fatores de carga e os modos de flambagem da peça.



E, finalmente, a análise modal é um tipo de análise dinâmica que permite a obtenção das frequências naturais e dos modos de vibração do elemento em estudo, quantidades necessárias para a verificação do estado de vibrações excessivas (ABNT, 2003).

4.1. Vigas celulares

As vigas celulares com grandes aberturas (Figura 4) são utilizadas em diversas aplicações práticas e surgem como uma solução competitiva para os arcos treliçados. Para este estudo foi elaborada a Macro CELULAR, escrita na Linguagem Paramétrica do Programa ANSYS – APDL, que requerer do usuário a definição do tipo de análise (estática, flambagem ou modal) e os parâmetros geométricos da viga celular, mostrados na Figura 5.



Figura 4 Vigas celulares de uma passarela sobre a Rodovia Anhanguera
Fonte: Acervo pessoal.

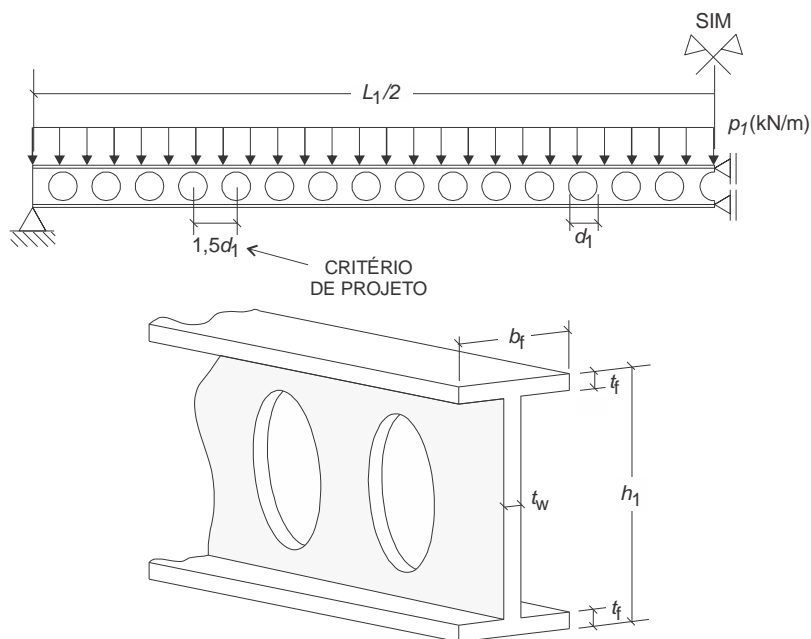


Figura 5 Dados de entrada da Macro CELULAR



Considerando-se os parâmetros de projeto da passarela, apresentada na Figura 4, para os dados de entrada da Macro CELULAR: $b_f= 800$ mm, $t_f= 200$ mm, $t_w= 200$ mm, $h_1= 2800$ mm, $d_1=1600$ mm, $L_1= 52800$ mm e $p_1= 6,75$ N/mm chega-se, automaticamente, ao modelo de elementos finitos e seus resultados, dependendo do tipo de análise escolhida. O concreto especificado é de classe C35, com módulo de elasticidade $E=28000$ MPa, limite de resistência à tração 3,2 MPa e limite de resistência à compressão 35 MPa (ABNT, 2003).

Os deslocamentos verticais obtidos por meio da análise estática elástica-linear leva à flecha no meio do vão igual a 25 mm (Figura 6) que está muito aquém do deslocamento limite $L_1/250= 211$ mm imposto pela norma ABNT (2003). Por outro lado, as tensões principais máxima e mínima valem, respectivamente, 3,40 MPa (Figura 7) e $-3,44$ MPa (Figura 8) que ocorrem no meio do vão. A interpretação da figura 7 aponta que foi atingido o limite de resistência à tração, indicando a presença de fissuras para o concreto utilizado que obriga a colocação da armadura de aço ao longo do caminho das trajetórias de tração, como se pode observar na figura 9.

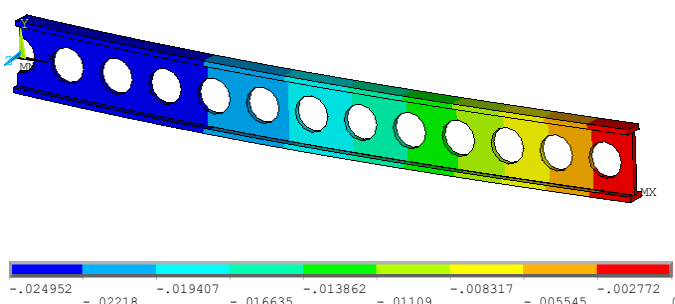


Figura 6 Deslocamentos verticais da viga celular (metros)

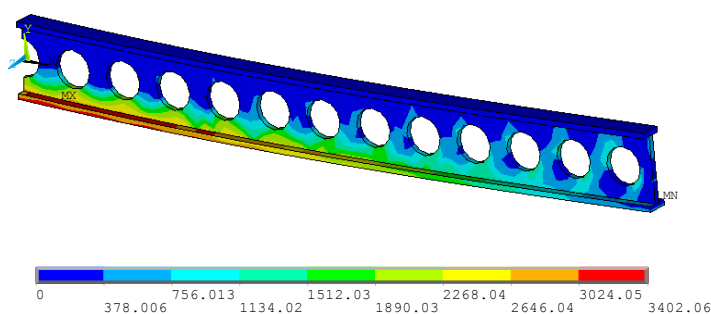


Figura 7 Tensões principais máximas σ_1 (kPa)

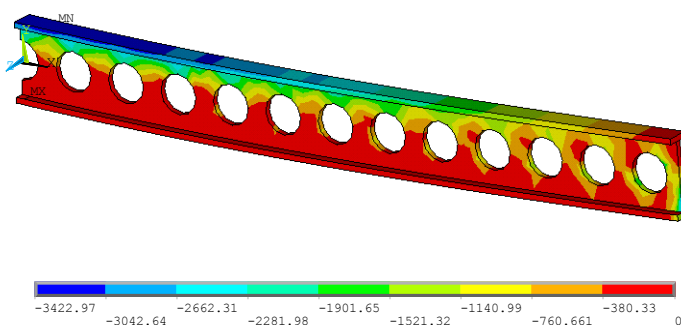


Figura 8 Tensões principais mínimas σ_3 (kPa)

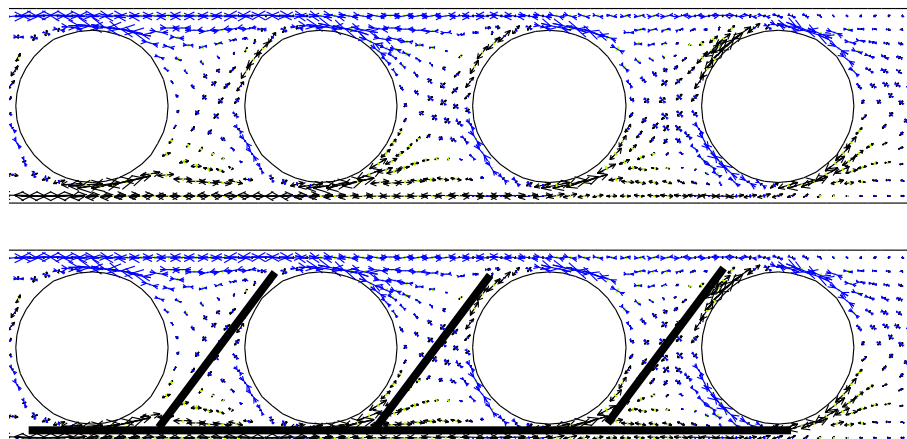
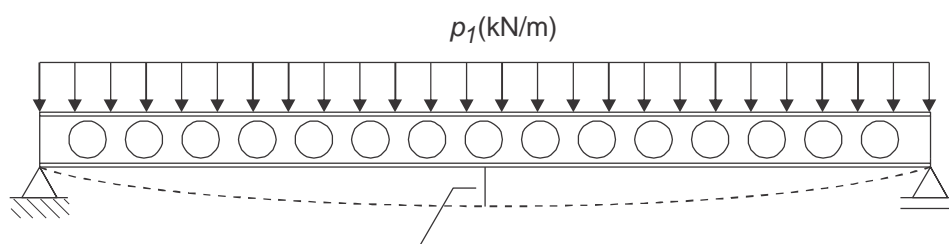


Figura 9 Trajetórias das principais máximas (preto) e mínimas (azul) e armaduras necessárias para evitar fissuração excessiva

Foram considerados dois fatores de desempenho em termos de momento de inércia à flexão. O fator FACT1 (figura 11) leva em conta o ganho de inércia obtido a partir da relação entre o momento de inércia da viga celular e o momento de inércia da viga original. O momento de inércia da viga celular é calculado a partir do deslocamento vertical no meio do vão obtido pelo processamento por elementos finitos, por meio da fórmula recorrente dada na Figura 10. O momento de inércia da viga original é obtido pelas fórmulas analíticas da geometria das massas. Já fator FACT2 (figura 11) leva em conta a depreciação da inércia obtida a partir da relação entre o momento de inércia da viga celular e o momento de inércia da viga equivalente de alma cheia. O momento de inércia da viga equivalente, com mesma altura da viga celular associada, é obtido pelas fórmulas analíticas da geometria das massas.



$$\Delta = \frac{5 p_1 \cdot L_1^4}{384 E \cdot I_c} \rightarrow I_c = \frac{5 p_1 \cdot L_1^4}{384 E \cdot \Delta}$$

Figura 10 Deslocamentos teóricos no meio do vão de uma viga simplesmente apoiada com carregamento uniformemente distribuído

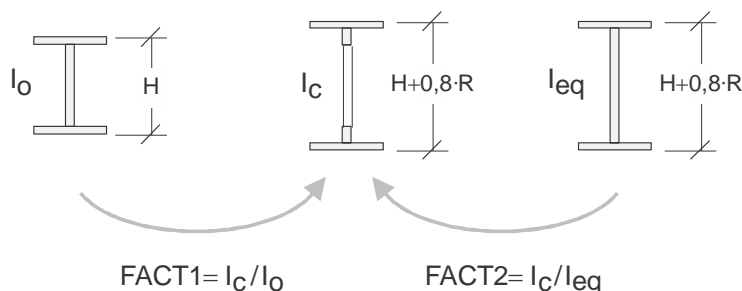


Figura 11 Fatores de inércia para viga celular

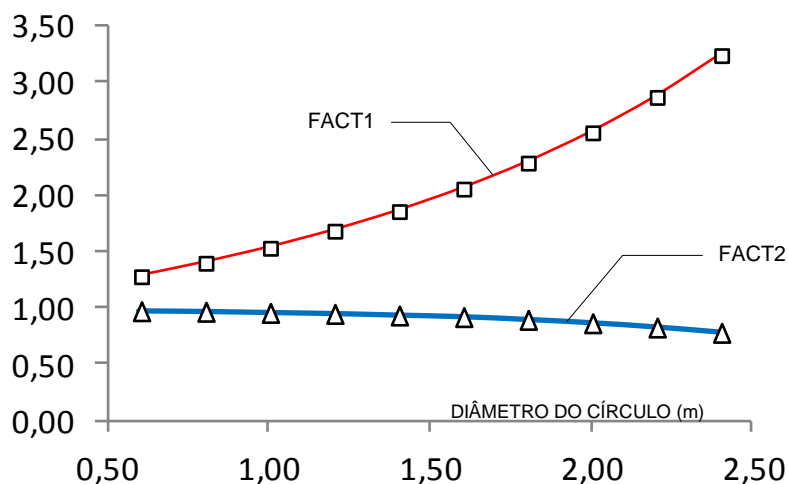


Figura 12 Estudo comparativo entre a viga original, a viga celular e a viga de alma cheia com altura equivalente

Por meio da análise da Figura 12, pode-se concluir que a taxa ganho do momento de inércia em relação à viga original (FACT1) suplanta a taxa de depreciação do momento de inércia em relação à viga de mesma altura de alma cheia (FACT2). Assim, pode-se observar que quanto maior o diâmetro da abertura circular maior será o ganho de momento de inércia e, com isso, menores serão os deslocamentos e maior a frequência natural da viga, sendo assim, menos suscetível à ocorrência de vibrações excessivas.

Submetendo os mesmos parâmetros de projeto para uma análise modal, observa-se que a primeira frequência de vibração para a viga original (alma cheia e altura reduzida) vale 4,50 Hz e para a viga celular, 6,19 Hz. Caso seja construída uma viga de arribancada com estas características, a viga original não passaria para o Cenário 3 da Norma Internacional ISE (2008), que prescreve que acima de 6 Hz o conforto quanto às vibrações excessivas está garantido. No entanto, a viga celular não apresentaria problemas de vibração diante de um público jovem, com muita energia, correspondente a este cenário de carregamento. Tal fato pode ser explicado pelo fato que a frequência natural de uma estrutura é diretamente proporcional à rigidez e inversamente, a massa. No desmembramento da viga original em viga celular ocorreu o aumento do momento de inércia da peça, sem agregar-lhe peso, levando a um aumento da frequência natural do elemento estrutural.

4.2. Vigas casteladas

As vigas casteladas com grandes aberturas hexagonais (Figura 13) são uma solução competitiva em relação aos arcos treliçados e às vigas celulares. Foi elaborada a Macro CASTELADA, escrita na Linguagem Paramétrica do Programa ANSYS – APDL, que simula o processo de corte otimizado da viga original, indicado na Figura 3, isento de perdas de material. Os dados de entrada exigidos pela Macro CASTELADA são tipo de análise (estática, flambagem ou modal) e os parâmetros geométricos da viga indicados na Figura 14.

Observa-se que as tensões principais e os deslocamentos devidos à flexão das vigas casteladas, obtidos por meio de uma análise estática elástica-linear, são muito semelhantes daqueles verificados nas vigas celulares (Figuras 15 a 17). A Figura 18 mostra a flambagem lateral da viga, obtida por meio da análise de flambagem, que indica um alto coeficiente de segurança à flambagem igual a 7,84. Este valor aponta a impossibilidade de ocorrência deste



fenômeno para as cargas de serviço aplicadas ao longo da vida útil da estrutura. Deste modo, pode-se obter a menor espessura da parede deste elemento estrutural de modo a atender um coeficiente de segurança à flambagem prescrito pelas normas.



Figura 13 Vigas casteladas para sustentação de uma laje de ponte e de um pavimento ambos em concreto armado Fonte: www.cbca-acobrasil.org.br

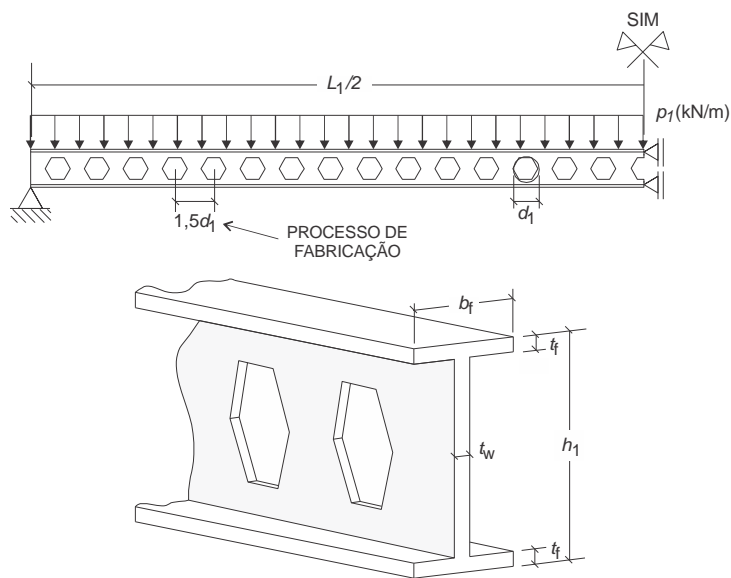


Figura 14 Dados de entrada da Macro CASTELADA

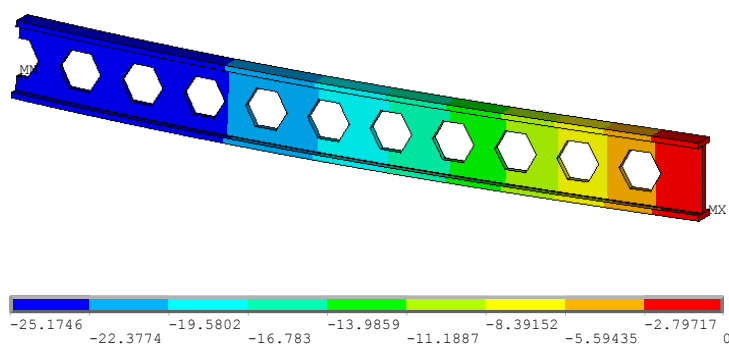


Figura 15 Deslocamentos verticais da viga celular (milímetros)

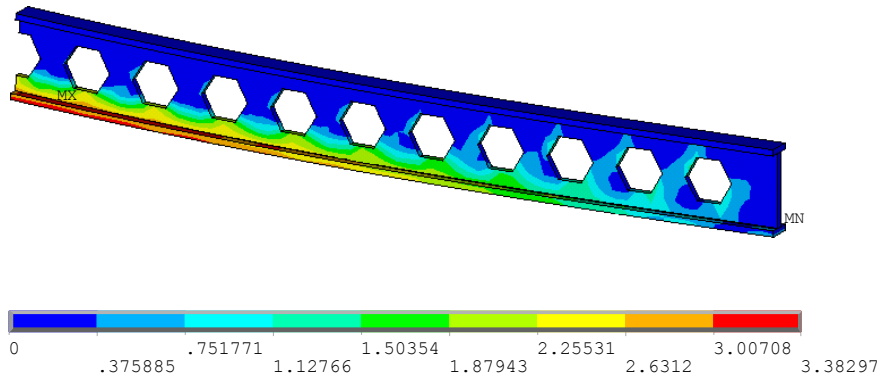


Figura 16 Tensões principais máximas σ_1 (MPa)

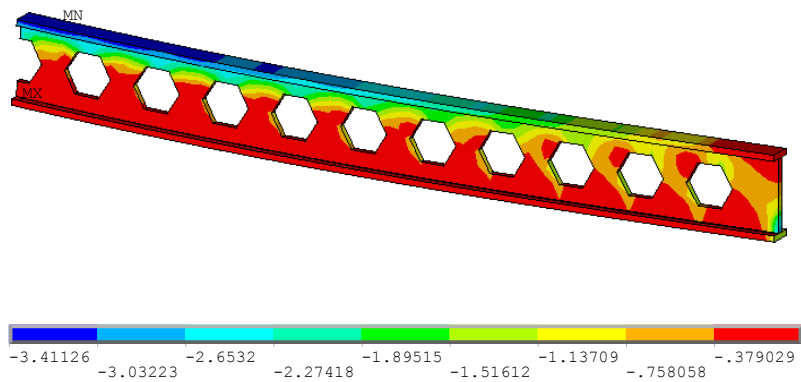


Figura 17 Tensões principais mínimas σ_3 (MPa)

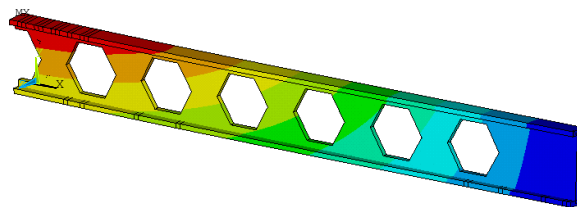


Figura 18 Modo de flambagem lateral da viga castelada

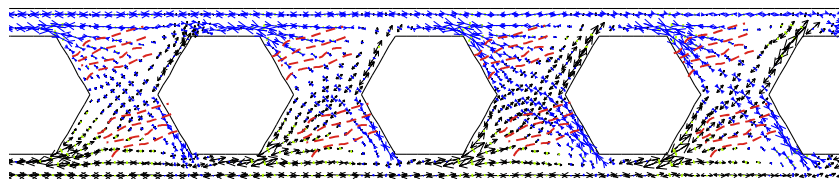


Figura 19 Trajetórias das principais tração (preto) e compressão (azul) e enrugamento da chapa (vermelho) devido à instabilidade da alma



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um estudo análogo pode ser feito com vigas casteladas de aço em que, devido à esbeltez das chapas que compõe o perfil castelado, ter-se-á problemas de flambagem localizada de alma. Pode-se avaliar a capacidade portante das vigas por meio de uma análise de instabilidade. Este tipo de análise permitirá estimar a reserva de segurança em relação ao fenômeno da flambagem e se tomar uma decisão quanto à forma mais econômica e tecnicamente viável para evitar este sinistro. Gama (2011) apresenta um estudo numérico-experimental sobre a instabilidade lateral de vigas casteladas utilizando-se a formulação por elementos finitos.

Vale lembrar, que os tipos de análise apresentados neste estudo somente poderiam ser realizados por meio de um programa de elementos finitos. As macros desenvolvidas eliminam a dificuldade de modelagem dos problemas mostrados permitindo ao acadêmico despendar o tempo na tomada de decisões de engenharia, rebuscando as soluções mais viáveis técnica e economicamente.

Pode-se integrar os programas de elementos finitos à cadeia de programas baseados na Tecnologia da Modelagem de Informações da Construção (BIM) envolvendo todos os subsistemas da construção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2003**. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ESTRADA, H.; JIMENEZ, J. J.; AGUÍNIGA, F. **Cost Analysis in the Design of Open-Web Castelled Beams**. Building Integration Solutions. Proceedings. 2006 Architectural Engineering National Conference, ASCE. Conf. Proc.: 10.1061/40798(190)53.
- GAMA, F. O. M. **Avaliação numérica de estabilidade lateral de Vigas Casteladas**. 2011. 184f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia, Rio de Janeiro, 2011.
- INSTITUTION OF STRUCTURAL ENGINEERS. **Dynamic performance requirements for permanent grandstands subject to crown load**: recommendations for management, design and assessment. London: ISE, dec. 2008.
- NAKAMURA, J. Interfaces metálicas. **Revista TÉCNNE**, São Paulo, v. 1, n.179, p. 26-30, fev. 2012.
- TAMAKI, Luciana. Vigas casteladas e celulares. **Revista TÉCNNE**, São Paulo, v. 1, n.164, p. 36-37, nov. 2010.



STUDY OF THE STRUCTURAL BEHAVIOUR OF CELLULAR AND CASTELLATED BEAMS

Abstract: *This paper presents a numerical study on the flexural behavior of I-beams with large hexagonal or circular openings made in concrete or steel. These beams are considered to be a very competitive solution when one takes into account the need to overcome large spans with small overloads or support the traffic load vehicles with little risk of excessive vibration. In this sense, one can evaluate the performance of these types of structural beams by means of a parametric mathematical model, using the finite element code ANSYS. This study allows for the rigorous verification of the deflections of beams with large openings in the web in service loads, an understanding of the position and direction of the reinforcement in a structural element of concrete and optimizing the thickness of the plate girders. We also discuss the phenomena of localized buckling and natural frequencies of vibration.*

Key-words: *Parametric models, Finite Element Method, Castellated Beams, Cellular Beams, Structural Optimization.*