

XXIV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 11 a 15/09/2017 – Rio Grande - RS

MODELAGEM COMPUTACIONAL E MÉTODO DESIGN CONSTRUTAL APLICADOS À OTIMIZAÇÃO GEOMÉTRICA DE PLACAS FINAS DE AÇO COM ENRIJECEDORES SUBMETIDAS A CARREGAMENTO TRANSVERSAL

Marcelo Langhinrichs Cunha¹ – marcelolamcunha@hotmail.com

João Pedro Teixeira Peixoto de Queiroz¹ – jopetpq@gmail.com

Grégori da Silva Troina¹ – gregori.troina@gmail.com

Luiz Alberto Oliveira Rocha² – luizor@unisinis.br

Elizaldo Domingues dos Santos¹ – elizaldosantos@furg.br

Liércio André Isoldi¹ – liercioisoldi@furg.br

¹ Universidade Federal do Rio Grande – FURG – Rio Grande, RS, Brasil

² Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS – São Leopoldo, RS, Brasil

RESUMO: O presente trabalho apresenta a aplicação da modelagem computacional e do método Design Construtal em um estudo de otimização geométrica de placas enrijecidas submetidas a carregamentos transversais. Para isso, construiu-se diferentes configurações geométricas de placas enrijecidas através da aplicação do Design Construtal e avaliou-se o resultado de deflexão no centro das mesmas, visando encontrar, com uma técnica de Busca Exaustiva, a configuração ótima que minimiza os deslocamentos no centro da estrutura. Dessa forma, uma placa sem enrijecedores medindo 2,00 m x 1,00 m x 0,02 m foi utilizada como referência, a partir daí transformou-se dessa placa uma razão Φ , constante e igual a 0,5, em reforços longitudinais e transversais. Os parâmetros geométricos considerados como graus de liberdade foram o número de enrijecedores longitudinais e transversais, assim como h_e/t_e , razão entre a altura e espessura dos enrijecedores utilizados. Para a realização da modelagem computacional utilizou-se o ANSYS Mechanical APDL®, um software próprio para a solução de problemas estruturais, baseado no Método dos Elementos Finitos. Ao final, observou-se grande influência dos parâmetros geométricos da placa enrijecida no comportamento mecânico dessas estruturas, de forma que a geometria ótima encontrada apresentou resultado de deflexão 8158% melhor que aquele apresentado pela placa de referência.

Palavras-Chave: Deflexão, Modelos Computacionais, Placas com Enrijecedores.

ABSTRACT: The present work presents an application of the computational modeling and the Design Constructal method in the geometrical optimization of stiffened plates subjected to transverse loadings. For that, it was elaborated a set of different geometrical configurations through the Design Constructal method and it was analyzed the deflections on the center of the plates in order to obtain, through Exhaustive Search technic, the optimal geometry that minimizes the strain in the structure's center. A non-stiffened plate measuring 2.00m x 1.00m x 0.02m was used as standard, then a constant volume ratio Φ , equals to 0.5, was taken from the standard plate and transformed into lengthwise and widthwise stiffeners. The geometrical parameters considered as degrees of freedom were: the number of widthwise and lengthwise stiffeners, and h_e/t_e , which is determined by the ratio between the stiffener's height and thickness. In order to elaborate the computational model, it was used ANSYS Mechanical APDL®, a software suitable for solving structural problems, which is based on the finite elements method. It was noticed a substantial influence of the parameters under analyses regarding the studied structural element's mechanical behavior, where the optimal geometry has shown a result 8158% better compared to the one shown by the standard plate.

Keywords: Deflection, Computational Models, Stiffened Plates.

INTRODUÇÃO

Placas enrijecidas são amplamente utilizadas em diversas estruturas mecânicas como em pontes, cascos de navio, veículos automotores, plataformas de petróleo, aeronaves, entre outros, principalmente, por possuírem uma ótima relação resistência/peso (Shanmugan *et al.*, 1998).

Nos últimos anos, diversas pesquisas foram desenvolvidas com o objetivo de analisar o comportamento mecânico de placas reforçadas com enrijecedores quando submetidas a carregamentos transversais. Yousif *et al.* (2008) apresentaram a relação entre a altura de um enrijecedor longitudinal e a resistência mecânica de um conjunto de placas sob pressão distribuída e engastadas em suas quatro extremidades. O método dos elementos de contorno foi usado por Tanaka & Bercin (1998) para analisar os efeitos de enrijecedores com diversas seções transversais em placas sob flexão. Por sua vez, o trabalho de Deb & Booton (1988) apresenta e discute as vantagens de dois modelos de elementos finitos, baseados na teoria de Mindlin, para placas enrijecidas sob carregamento transversal distribuído. Em Sapountzakis & Katsikadelis (2000), foram estudadas placas reforçadas com vigas tendo em vista obter o valor dos esforços de cisalhamento na região da conexão entre placa e reforços. Através do método da equação análoga, analisou-se placas retangulares simplesmente apoiadas com apenas um enrijecedor longitudinal de diferentes alturas. Por fim, Silva (2010), através do software ANSYS, estudou numericamente lajes nervuradas considerando-as um sistema placa-viga. Dentre os casos analisados estavam os mesmos apresentados por Sapountzakis & Katsikadelis (2000).

Uma vez que não existem soluções analíticas que efetivamente descrevam o comportamento exato de placas finas enrijecidas submetidas a carregamentos transversais, modelos computacionais são importantes ferramentas para a análise desses elementos estruturais. No presente estudo utilizou-se o software ANSYS *Mechanical* APDL®, o qual baseia-se no Método dos Elementos Finitos (MEF), para construir os modelos computacionais e gerar os resultados de deflexão no centro das diferentes configurações geométricas de placas enrijecidas, obtidas através da aplicação do método Design Construtal. Os diferentes arranjos geométricos de placas são obtidos pela variação da quantidade de enrijecedores longitudinais (N_{el}) e transversais (N_{et}), assim como a utilização de diferentes relações entre altura do enrijecedor e sua espessura (h_e/t_e). Os resultados obtidos pelas simulações numéricas são analisados e, por meio de uma Busca Exaustiva, obtém-se recomendações de parâmetros geométricos que conduzem à otimização da estrutura do ponto de vista da deflexão transversal.

METODOLOGIA

Estudo de placas

Placas finas são definidas como elementos estruturais os quais possuem dimensão transversal, denominada espessura, consideravelmente menor que suas dimensões planares, denominadas largura e espessura (Timoshenko & Woinowsky-Krieger, 1976). Enrijecedores são vigas de reforço que podem ser unidas à placa em ambos os sentidos: longitudinal e transversal. Através da utilização de enrijecedores em placas finas de aço, obtém-se como principal vantagem uma redução dos deslocamentos e deformações das mesmas. Isso ocorre devido ao aumento no momento de inércia provocado pelo uso de enrijecedores, evitando-se, dessa forma, a necessidade de aumentar a espessura da placa.

Estruturas de placas com enrijecedores podem ser analisadas através de três diferentes perspectivas: modelo de placa ortotrópica, grelhas e sistema de placa-vigas (Salomon, 2000). Na abordagem de placas enrijecidas como uma sistema placa-viga, é possível que se obtenham resultados mais próximos do comportamento real da placa quando comparados às duas outras possíveis abordagens. Uma desvantagem desse método é a difícil obtenção de equações para uma solução analítica. No entanto, com o avanço da tecnologia computacional aplicada à engenharia, muitos estudos têm sido desenvolvidos, a exemplo de Silva (2010), utilizando métodos numéricos para a solução de problemas de engenharia através de softwares de simulação computacional.

Modelagem computacional

O presente trabalho emprega modelos computacionais baseados no método dos elementos finitos para a análise dos problemas a serem estudados. Quatro etapas básicas compõem a análise por elementos finitos: criação da geometria, geração da malha, aplicação das condições de contorno e carregamento e, por fim, solução do problema (Zienkiewicz, 1971).

Ao analisar-se, através de elementos finitos, estruturas mecânicas no regime linear elástico, a solução do problema é obtida através da aplicação do princípio dos trabalhos virtuais. No que tange estruturas estáticas, os efeitos das forças de amortecimento e inércia são desprezados quando pretende-se quantificar a magnitude dos deslocamentos e esforços internos em qualquer parte do sistema, os quais podem ser obtidos através da solução de um sistema de equações algébricas mostrados na Eq. (1) (Marinho, 2002):

$$[K] \cdot \{u\} = \{F\} \quad (1)$$

onde, $[K]$ é a matriz de rigidez global da estrutura, $\{u\}$ é o vetor de deslocamentos nodais desconhecidos e $\{F\}$ é o vetor de carga externa. A matriz de rigidez do global da estrutura $[K]$ é obtida através das relações deformação-deslocamento e tensão-deformação da estrutura, a partir da discretização do modelo e das propriedades do material.

Atualmente, muitos softwares utilizam o método dos elementos finitos para a análise de diversos problemas de engenharia, como, por exemplo, o pacote de programas da ANSYS Inc., o qual possui aplicações que vão desde a análise de estruturas estáticas até de escoamentos. Por ser adequado para análise de problemas estruturais, o software ANSYS Mechanical APDL foi utilizado nesse trabalho para a criação dos modelos computacionais a serem empregados nas análises.

O elemento finito utilizado na construção e modelagem do problema físico foi o SHELL281, o qual possui 8 nós, cada nó com 6 graus de liberdade cada (translação e rotação nas direções de x , y e z). Dentre as suas capacidades está a análise de grandes deslocamentos, grandes deformações e plasticidade. Esse elemento é apropriado para modelar estruturas finas, podendo ser planas ou curvas. Duas importantes simplificações são feitas para esse tipo de elemento: a tensão na direção normal ao plano do elemento varia linearmente ao longo da espessura e a tensão de cisalhamento transversal é constante ao longo da espessura (Ansys, 2009).

Verificação do modelo computacional

Para a verificação do modelo computacional, considerou-se uma placa com apenas um enrijecedor disposto no sentido longitudinal submetida a uma carga, uniformemente distribuída, de 10 kN/m^2 , sendo que seus bordos se encontram simplesmente apoiados, conforme Fig. (1). O coeficiente de Poisson e o módulo de elasticidade empregados são 0,154 e 30 GPa, respectivamente. Dois diferentes valores de altura de enrijecedor foram analisados, $h_e = 1,25 \text{ m}$ e $h_e = 2,00 \text{ m}$, ambos previamente estudados por Silva (2010).

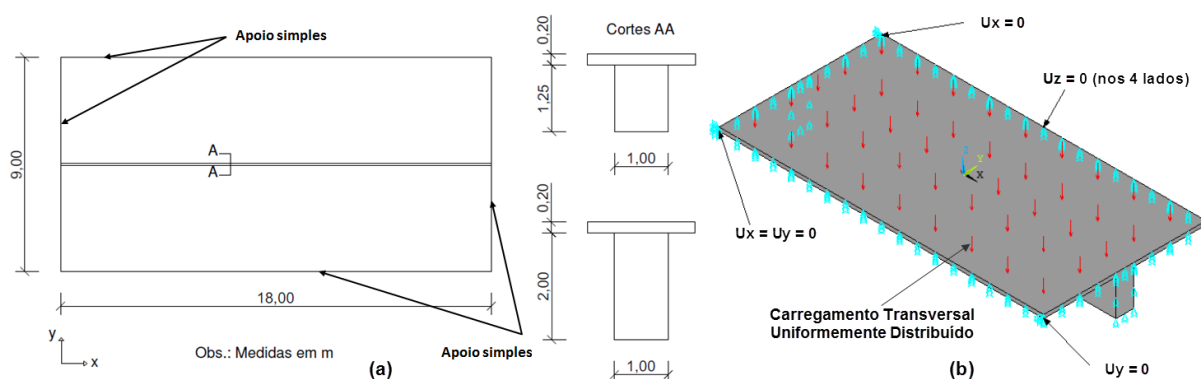


Figura 1. Placa retangular com um enrijecedor central: (a) modelo físico e (b) condições de contorno e carregamento.

A Figura 2 mostra uma comparação entre os resultados numéricos para o deslocamento transversal no centro da placa e aqueles obtidos por Silva (2010), tal qual uma análise de convergência de malha para $h_e = 1,25 \text{ m}$ e $h_e = 2,00 \text{ m}$.

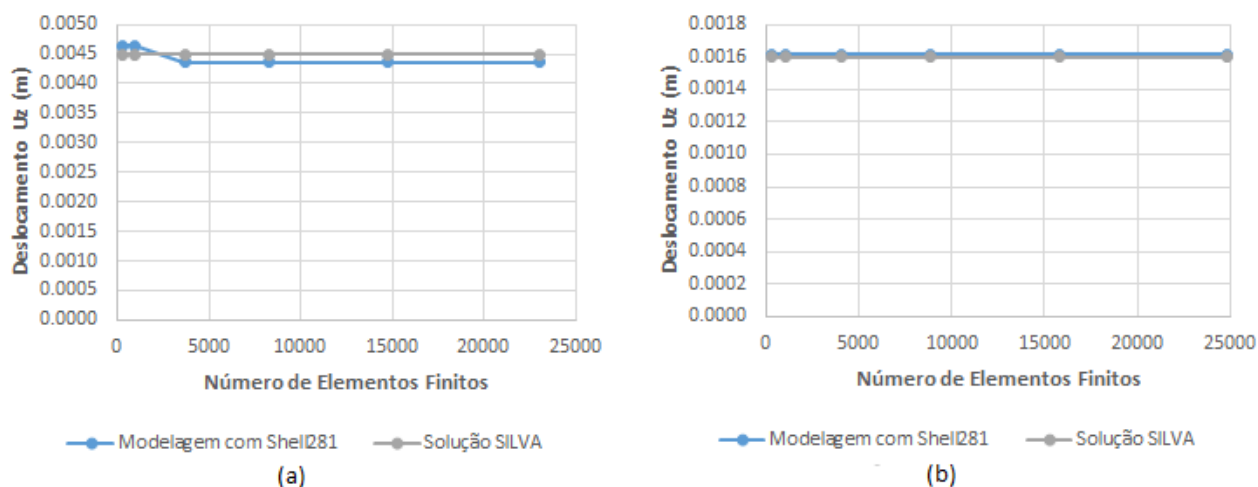


Figura 2. Resultados numéricos e análise de convergência de malha para: (a) $h_e = 1,25 \text{ m}$ e (b) $h_e = 2,00 \text{ m}$.

Pode-se observar, através da Fig. (2), uma boa concordância entre os resultados numéricos obtidos pelo modelo deste trabalho com os resultados apresentados por Silva (2010). Portanto, através dos dados apresentados na Fig. (2), pode-se dizer que o modelo computacional para o elemento SHELL281 foi devidamente verificado.

Método Design Construtal

O método Design Construtal é baseado na Lei Construtal, que afirma que para um sistema de fluxo de tamanho finito sobreviver no tempo, sua configuração deve evoluir de modo que essa propicie um caminho mais fácil para as correntes que fluem (Bejan, 1997). Portanto, esse princípio pode ser tanto utilizado para prever a configuração de sistemas naturais como bacias hidrográficas, pulmões e trincas em sólidos, quanto para produzir novos arranjos geométricos para células de energia, equipamentos eletrônicos, entre outros, inclusive em problemas de engenharia de estruturas (Bejan & Lorente, 2006).

Segundo Bejan (2000), o Design Construtal é um método que permite a obtenção de uma geometria que possibilita a melhor performance de sistemas quando submetidos a alguma espécie de fluxo. Para tal, o fluxo deve ser maleável e a geometria deve ser deduzida visando maximizar o desempenho global. Além disso, deve-se submeter a geometria a restrições globais e a variações de determinados graus de liberdade.

No presente trabalho, tem-se como objetivo a otimização do comportamento mecânico de placas com enrijecedores através da alteração de parâmetros geométricos, mas sem alteração do volume total de material empregado. Para tanto, define-se (ϕ) como sendo a fração de volume da placa de referência não enrijecida que será transformada em enrijecedores. A Eq. (2) demonstra tal relação numericamente:

$$\phi = \frac{V_e}{V_r} = \frac{N_{el}(ah_e t_e) + N_{et}[(b - N_{el}t_e)h_e t_e]}{abt} \quad (2)$$

onde, V_e é o volume da placa que foi transformado em reforços, V_r é o volume da placa não enrijecida utilizada como referência, N_{el} e N_{et} são, respectivamente, o número de enrijecedores longitudinais e transversais, h_e representa a altura e t_e representa a espessura dos enrijecedores. Por fim, a , b e t são as medidas de largura, comprimento e espessura da placa não enrijecida, nesta ordem. Tendo em vista que a largura e o comprimento da placa são, via de regra, dados de projeto, a fração de volume a ser convertida em enrijecedores será deduzida integralmente da espessura da placa de referência. Desta forma, todas as geometrias analisadas possuem a mesma quantidade de material, possibilitando uma avaliação comparativa acerca do desempenho estrutural dessas placas.

Visando determinar a geometria ótima, investigou-se a influência da variação do grau de liberdade h_e/t_e . Além disso, analisou-se 25 combinações de enrijecedores longitudinais e transversais, variando os seguintes graus de liberdade: $N_{el} = 2, 3, 4, 5, 6$ e $N_{et} = 2, 3, 4, 5, 6$. Logo, foram analisadas as placas P(2,2), P(2,3), P(2,4), P(2,5), P(2,6), P(3,2), P(3,3), P(3,4), P(3,5), P(3,6), P(4,2), P(4,3), P(4,4), P(4,5), P(4,6), P(5,2), P(5,3), P(5,4), P(5,5), P(5,6), P(6,2), P(6,3), P(6,4), P(6,5) e P(6,6), obedecendo o formato P(N_{el} , N_{et}). Foram adotados valores comerciais de espessura de chapas de aço para serem as espessuras utilizadas nos enrijecedores, portanto, a relação h_e/t_e deriva de valores de t_e previamente estabelecidos. Para a altura h_e , além de ser determinada através da Eq. (2), foram impostas duas restrições geométricas: não pode ser maior que 0,3 m, a fim de evitar uma desproporção exagerada entre a altura do enrijecedor e as dimensões laterais da placa; e a relação h_e/t_e deve ser maior que 1, para evitar que a espessura do enrijecedor seja maior que sua altura, o que descaracterizaria o reforço que, via de regra, possui sempre altura maior que a sua espessura.

Adotou-se para esta análise uma placa de referência com espessura, largura e comprimento de, respectivamente, 0,02 m, 1,00 m e 2,00 m. A relação entre volume de material transformado em reforços e volume da placa de referência adotada é de $\phi = 0,5$, ao passo que o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson do material em que a placa é fabricada são, respectivamente, iguais a 200 GPa e 0,3. A placa está simplesmente apoiada em suas quatro bordas (incluindo as bordas dos enrijecedores) e submetida a um carregamento uniformemente distribuído de 10kPa.

Teste de independência de malha

Com a finalidade de obter o número mínimo necessário de elementos finitos quadriláteros a serem utilizados na modelagem das placas estudadas, realizou-se um teste de independência de malha na placa de maior complexidade geométrica dentre as analisadas nesse trabalho, ou seja, a placa P(6,6) com $t_e = 0,08$ m e $h_e/t_e = 17,64$. Foram realizadas cinco simulações com diferentes tamanhos de elementos e, consequentemente, diferentes refinamentos de malha, para obtenção dos resultados de deflexão transversal no centro da placa. A malha definida como independente foi a malha M3, que possui um resultado com diferença de 0,05% em relação à malha seguinte. A Fig. (3) apresenta o gráfico que corresponde ao teste de independência de malha realizado, enquanto a Fig. (4) mostra a discretização do domínio computacional com a malha M3, que foi determinada como malha independente e possui 2016 elementos finitos.

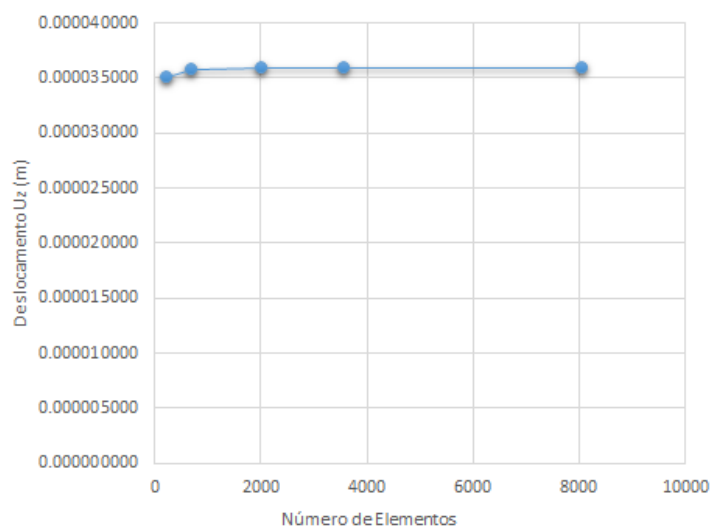


Figura 3. Teste de independência de malha para a placa P(6,6) com $t_e = 0,08$ m e $h_e/t_e = 17,64$.

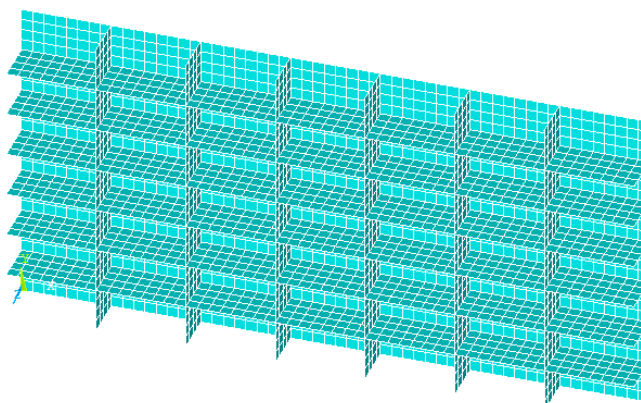


Figura 4. Discretização do domínio computacional para a placa P(6,6) com $t_e = 0,08$ m (Malha M3).

A Tabela 1 apresenta os resultados para as cinco malhas utilizadas no teste de independência, evidenciando a convergência entre os valores obtidos para a deflexão no centro da placa e destacando a malha M3 definida como malha independente (em vermelho). Logo, todas as placas analisadas nesse trabalho foram modeladas com a malha M3, de tamanho de elemento igual a 0,05 m.

Tabela 1. Teste de independência de malha para P(6,6) com $t_e = 0,08$ m.

Malha	Tamanho do Elemento (m)	Nº de Elementos Finitos	Deslocamento U_z (m)	Diferença relativa entre malhas (%)
M1	0.2000	224	0.000034984	2.29
M2	0.1000	714	0.000035784	0.13
M3	0.0500	2016	0.000035832	0.05
M4	0.0375	3584	0.000035850	0.03
M5	0.0250	8064	0.000035862	-----

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilizou-se como referência o deslocamento no centro da placa não enrijecida, cujo valor é $U_{ZR} = 0,69759$ mm, para realizar uma avaliação da melhoria proporcionada devido às mudanças realizadas na configuração geométrica das placas simuladas.

A Figura 5 mostra a variação do deslocamento no ponto central das placas (U_z), em milímetros, devido à variação na relação do grau de liberdade h_e/t_e , usando como referência a quantidade de enrijecedores longitudinais da placa (N_{el}).

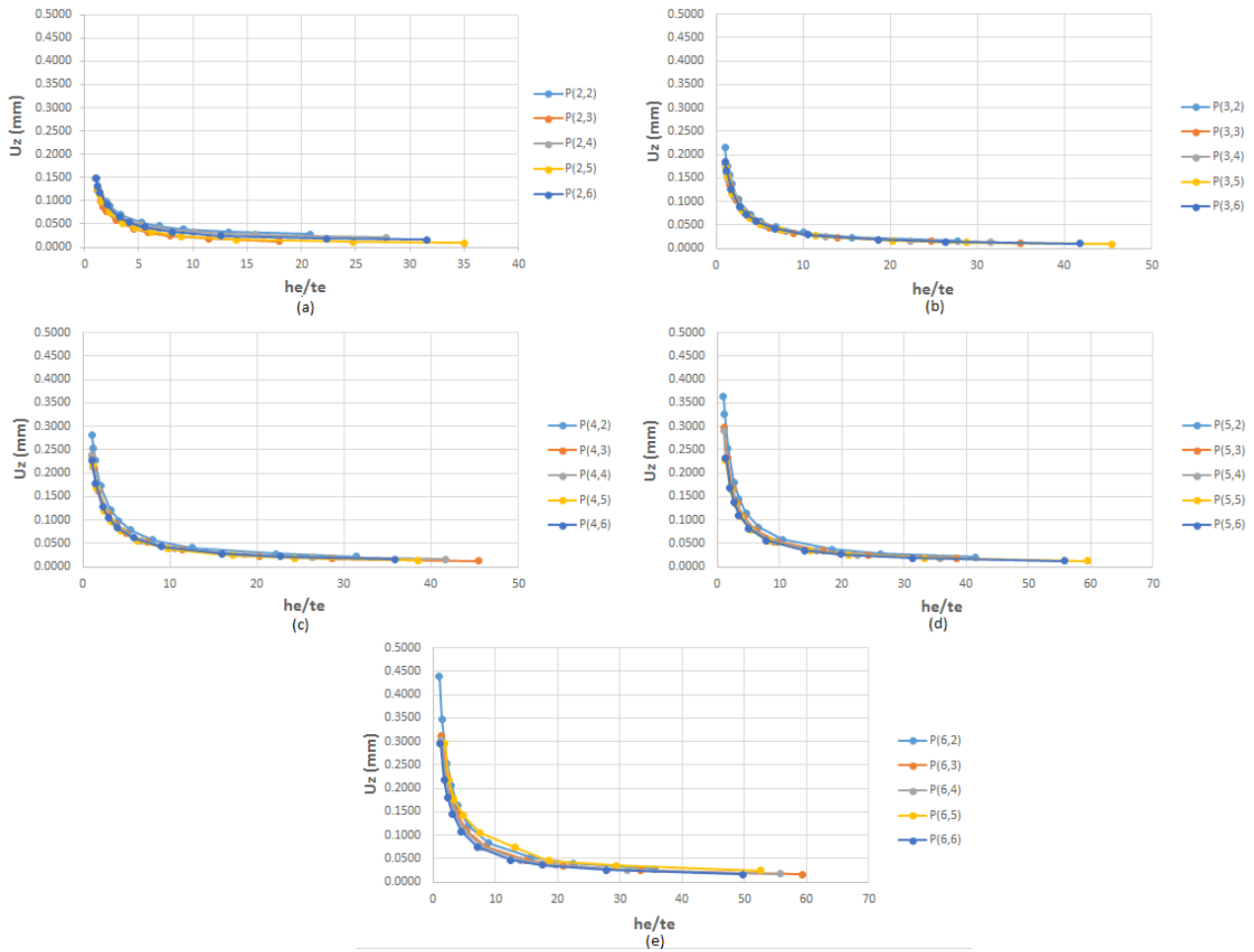


Figura 5. Variação do deslocamento normalizado devido à variação de h_e/t_e para: (a) $N_{el} = 2$, (b) $N_{el} = 3$, (c) $N_{el} = 4$, (d) $N_{el} = 5$ e (e) $N_{el} = 6$.

Como já era esperado, é possível observar na Fig. (5) que em todos os casos analisados obteve-se um valor de deflexão central menor que o valor de referência (0,69759 mm), ou seja, a presença de enrijecedores trouxe uma melhoria no que diz respeito à rigidez da placa. Do mesmo modo, à medida que o valor da relação h_e/t_e aumenta, as placas enrijecidas tendem a apresentar um menor valor de deflexão no ponto central.

A Teoria Construtal permite analisar a influência de todos os graus de liberdade no comportamento estrutural das placas estudadas. Então, visando a obtenção de um valor mínimo global de deslocamento no centro das placas para todos os casos em estudo, avaliou-se a influência dos seguintes graus de liberdade: N_{el} , N_{et} , e h_e/t_e . Com base nos resultados apresentados na Fig. (5), para cada combinação de enrijecedores longitudinais e transversais, determinou-se o valor otimizado da relação h_e/t_e (denominado de $(h_e/t_e)_o$), ou seja, determinou-se qual relação h_e/t_e minimiza o deslocamento transversal do ponto central da placa, chamado de $(U_z)_m$. Consequentemente, definem-se os valores de altura e espessura

otimizados, denominados $(h_e)_o$ e $(t_e)_o$, respectivamente. Na Tabela (2) são apresentados os valores de $(Uz)_m$, $(h_e)_o$, $(t_e)_o$ e $(h_e/t_e)_o$ entre os casos estudados (ver Fig. (5)).

Tabela 2. Valores de $(Uz)_m$, $(h_e)_o$, $(t_e)_o$ e $(h_e/t_e)_o$ para as combinações $P(N_{el}, N_{et})$.

Nel	Net	$(h_e)_o$	$(t_e)_o$	$(h_e/t_e)_o$	$(Uz)_m$
2	2	0.26471	0.01270	20.84	0.027462
2	3	0.22745	0.01270	17.91	0.013104
2	4	0.26485	0.00953	27.79	0.021384
2	5	0.28027	0.00800	35.03	0.008551
2	6	0.25242	0.00800	31.55	0.015611
3	2	0.26422	0.00953	27.72	0.015901
3	3	0.28002	0.00800	35.00	0.011845
3	4	0.25242	0.00800	31.55	0.012764
3	5	0.28883	0.00635	45.48	0.009578
3	6	0.26499	0.00635	41.73	0.010413
4	2	0.25161	0.00800	31.45	0.022081
4	3	0.28833	0.00635	45.41	0.013124
4	4	0.26471	0.00635	41.69	0.015970
4	5	0.24467	0.00635	38.53	0.013493
4	6	0.22745	0.00635	35.82	0.016142
5	2	0.26386	0.00635	41.55	0.020549
5	3	0.24407	0.00635	38.44	0.018520
5	4	0.22703	0.00635	35.75	0.018614
5	5	0.28294	0.00475	59.57	0.012396
5	6	0.26552	0.00475	55.90	0.012805
6	2	0.22620	0.00635	35.62	0.028574
6	3	0.28231	0.00475	59.43	0.016812
6	4	0.26505	0.00475	55.80	0.017218
6	5	0.24977	0.00475	52.58	0.015982
6	6	0.23616	0.00475	49.72	0.016843

Através dos dados mostrados na Tab. 2, gerou-se o gráfico que demonstra a relação entre os valores dos deslocamentos no centro da placa $(Uz)_m$ e a quantidade de enrijecedores transversais (N_{et}) . Esses valores podem ser observados na Fig. (6).

Com os dados da Tab. 2 e da Fig. (6), é possível observar que um aumento no número de enrijecedores não está diretamente relacionado com uma melhoria da rigidez no centro da placa. Isso é explicado pelo fato de que um acréscimo no número de enrijecedores acarreta em uma diminuição na altura desses reforços e, conseqüentemente, a seção transversal da placa passa a ter um momento de inércia menor. Além disso, é interessante observar a oscilação apresentada no gráfico da Fig. (6), o que demonstra que as placas com quantidades ímpares de enrijecedores transversais (N_{et}) apresentam melhores resultados que as placas com quantidades pares de enrijecedores. Isso ocorre porque placas que apresentam N_{et} ímpar possuem sempre um enrijecedor transversal exatamente no centro da placa, o que reduz a deflexão no ponto central da mesma.

Então, para cada valor de N_{el} da Tab. 2, é possível obter um valor otimizado de N_{et} , denominado de $(N_{et})_o$, o qual representa a quantidade de enrijecedores transversais que proporciona o melhor comportamento mecânico de menor deflexão, conforme mostrado na Tab. 3. Como consequência, definem-se os valores de h_e , t_e , h_e/t_e e Uz otimizados pela segunda vez e denominados de $(h_e)_{oo}$, $(t_e)_{oo}$, $(h_e/t_e)_{oo}$ e $(Uz)_{mm}$, respectivamente.

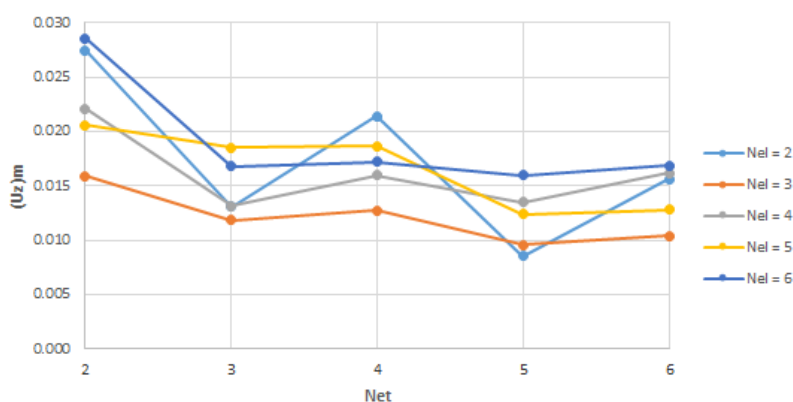


Figura 6. Variação do valor máximo normalizado do deslocamento devido à variação do grau de liberdade N_{el} .

Tabela 3. Valores otimizados de $(N_{el})_o$, $(h_e)_{oo}$, $(t_e)_{oo}$, $(h_e/t_e)_{oo}$ e $(U_z)_{mm}$ para cada N_{el} .

Nel	$(N_{el})_o$	$(h_e)_{oo}$	$(t_e)_{oo}$	$(h_e/t_e)_{oo}$	$(U_z)_{mm}$
2	5	0.28027	0.008	35.03	0.0085513
3	5	0.28883	0.00635	45.48	0.0095782
4	3	0.28833	0.00635	45.41	0.013124
5	5	0.28294	0.00475	59.57	0.012396
6	5	0.24977	0.00475	52.58	0.015982

Observa-se que os dados demonstram uma tendência para um aumento dos valores de $(U_z)_{mm}$ à medida que se aumenta o número de enrijecedores longitudinais N_{el} .

Por fim, concluiu-se que dentre todas as geometrias estudadas, a configuração P(2,5) com relação $h_e/t_e = 35,03$ foi a configuração com melhor desempenho, apresentando uma melhoria de 8158% quando comparada com a placa de referência. A configuração deformada da placa de geometria ótima é apresentada na Fig (7).

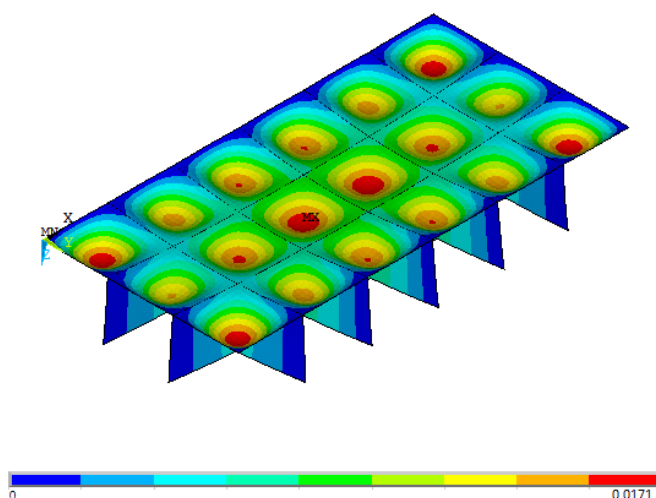


Figura 7. Configuração deformada da placa de geometria ótima P(2,5) e $h_e/t_e = 35,03$ (escala em mm).



Portanto, mantendo constante o volume total de material para todos os casos estudados, a geometria otimizada apresentada na Fig. (7) possui um $(N_{el}) = 2$, $(N_{el})_{oo} = 5$ e $(h_e/t_e)_{ooo} = 35.03$, conduzindo a um deslocamento transversal mínimo de $(U_z)_{mmm} = 0.0085513$ mm.

CONCLUSÕES

Ao utilizar-se o software ANSYS para a construção dos modelos computacionais e obtenção dos valores de deslocamento para as configurações geométricas definidas através do método Design Construtal, aliado à aplicação da técnica de Busca Exaustiva, foi possível realizar uma análise da influência de diferentes parâmetros geométricos no comportamento mecânico de placas, as quais são importantes elementos estruturais amplamente empregados na indústria metal-mecânica atualmente.

Foi possível observar que a redistribuição do material empregado na placa através da adição de enrijecedores, mesmo não havendo um aumento no volume total do componente estrutural estudado, acarreta na melhoria do desempenho estrutural do mesmo. Mostrou-se que, além da quantidade de enrijecedores, a relação h_e/t_e também tem influência na rigidez estrutural da placa. Através dos valores obtidos, foi possível notar que o aumento do número de enrijecedores não tem relação diretamente proporcional com a diminuição do deslocamento transversal no centro da placa, o que ressalta a importância de estudos quanto à otimização da geometria desses elementos. A geometria ótima obtida, entre todos os casos analisados, foi a placa P(2,5) com $h_e/t_e = 35.03$, a qual apresentou resultado de deflexão 8158% melhor do que o encontrado para a placa sem enrijecedores utilizada como referência.

Fica evidente a importância da avaliação geométrica para problemas de engenharia, mais especificamente na análise estrutural, quando são comparados, por exemplo, os casos da Fig. (5e) onde a configuração geométrica P(6,3) com $h_e/t_e = 59.43$ apresenta uma melhoria de aproximadamente 96% na redução do deslocamento transversal em relação à placa P(6,2) com $h_e/t_e = 1.02$. Como o volume de material foi mantido constante, essa significativa melhoria ocorreu unicamente devido à influência da geometria da estrutura.

Então, a utilização da modelagem computacional aliada à aplicação do método Design Construtal permite obter recomendações geométricas e tirar conclusões acerca do comportamento estrutural de diferentes arranjos geométricos possíveis para placas enrijecidas, permitindo otimizar essas estruturas no que se refere a minimizar os seus deslocamentos quando estão submetidas a carregamentos transversais uniformemente distribuídos.

AGRADECIMENTOS

M. L. Cunha agradece à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pela bolsa de Iniciação Tecnológica. G. S. Troina agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro sob a forma de bolsa de mestrado. L. A. O. Rocha, E. D. dos Santos e L. A. Isoldi agradece ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Ansyes Inc., 2009, ANSYS User's Manual: Analysis Systems.
- Bejan, A., 2000, Shape and Structure, from Engineering to Nature, Cambridge University Press, Cambridge.
- Bejan, A., 1997, Advanced Engineering Thermodynamics, 2nd Ed, Wiley, New York.
- Bejan, A. e Lorente, S., 2006, Constructal Theory of Generation of Configuration in Nature and Engineering, Journal of Applied Physics, Vol. 100, 041301
- Deb, A. E Booton, M., 1998, Finite Elements Models for Stiffened Plates under Transverse Loading, Computer & Structures Vol. 28, No. 3, pp 361-372
- Marinho, I. J. P., 2002, Projeto ótimo de estruturas metálicas de arquivancadas reutilizáveis via ANSYS, Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil.
- Salomon, A., 2000, An Evaluation of Finite Element Models of Stiffened Plates, Master of Science in Naval Architecture and Marine Engineering, Department of Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
- Sapountzakis, E. J. e Katsikadelis, J. T., 2000, Analysis of Plates Reinforced with Beams. Computational Mechanics, Vol. 26, pp 66-74.
- Shanmugam, N. E. Liew, J. Y. R., Thevendran, V., 1998, Thin-walled Structures – research and development. Elsevier, Singapore.
- Silva, H. B. S., 2010, Análise numérica da influência da excentricidade na ligação placa-viga em pavimentos usuais de edifícios, Dissertação de mestrado em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de São Carlos.



XXIV CREEM
Congresso Nacional de Estudantes
de Engenharia Mecânica



**Universidade Federal
do Rio Grande**



INSTITUTO FEDERAL
RIO GRANDE DO SUL
Campus Rio Grande

- Tanaka, M. e Bercin, A. N., 1998, Static bending analysis of stiffened plates using the boundary element method, Engineering Analysis with Boundary Elements 21, pp 147-154.
- Timoshenko, S. e Woinowsky-Krieger, S., 1976, Theory of plate and shells, McGraw-Hill, New York.
- Yousif, M. Z., Naief, N. K. M., Hamada, Y. M., 2008, Optimum Height of Plate Stiffener und Pressure Effect, The 1st Regional conference of Eng. Sci. NUCEJ Spatial ISSUE vol.11, No.3, pp 459 – 468.
- Zienkiewicz, O.C., 1971, The Finite Element Method in Engineering Science, 2^a ed. McGraw- Hill, London.