

MÉTODO DESIGN CONSTRUTAL APLICADO À AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DE PLACAS RETANGULARES COM ENRIJECEDORES INCLINADOS SUBMETIDAS À CARREGAMENTO TRANSVERSAL UNIFORME

Vinícius Torres Pinto¹; Marcelo Langhinrichs Cunha²; Grégori da Silva Troina³; Luiz Alberto Oliveira Rocha⁴; Elizaldo Domingues dos Santos⁵; Liércio André Isoldi⁶

Resumo

Este estudo aplicou o método Design Construtal associado à modelagem computacional através do método dos Elementos Finitos, para avaliar o comportamento mecânico de placas retangulares enrijecidas sujeitas a carregamento transversal uniforme. Para esse fim, foi adotada como referência uma placa retangular sem enrijecedores. Uma parcela do volume de material dessa placa foi transformada em enrijecedores através do parâmetro ϕ , o qual representa a relação entre o volume de material dos enrijecedores e o volume de material da placa de referência. Considerando $\phi = 0,3$, foram configuradas quatro placas enrijecidas, duas com enrijecedores ortogonais aos lados da placa e duas com enrijecedores inclinados em 45° . Mantendo o volume total de material constante, em cada placa foi avaliada a influência do grau de liberdade h_s/t_s (relação entre a altura e a espessura dos enrijecedores). Os resultados mostraram que variações na geometria dos enrijecedores podem aumentar a rigidez da placa, reduzindo a deflexão. Ainda, constatou-se que dependendo do número de enrijecedores, incliná-los à 45° pode ser uma alternativa para minimizar as deflexões em placas retangulares.

Palavras-chave: placas enrijecidas; deflexão; elementos finitos.

Abstract

This study applied the Constructal Design method associated with the computational modelling through the Finite Element Method, to simulate the mechanical behaviour of rectangular plates submitted to uniform transverse loading. To do so, a rectangular reference plate without stiffeners was used. A portion of the material volume of this plate was converted into stiffeners through the parameter ϕ , which represents the ratio between the stiffeners volume and the total volume of the reference plate. By adopting $\phi = 0,3$, four stiffened plates were configured, two with orthogonal stiffeners relative to the sides of the plate and two with stiffeners inclined at 45° . Keeping the total volume of material constant, the influence of the degree of freedom h_s/t_s (ratio between height and thickness of stiffeners) was evaluated on each plate. The results showed that variations in the geometry of the stiffeners can increase the rigidity of the plate,

¹ Mestrando em Engenharia Oceânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO) pela Universidade Federal do Rio Grande-FURG). E-mail: viniustorreseng@gmail.com.

² Graduando em Engenharia Mecânica Empresarial pela Universidade Federal do Rio Grande-FURG pela Universidade Federal do Rio Grande-FURG. E-mail: marcelolamcunha@hotmail.com.

³ Mestre em Engenharia Oceânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO) – FURG. E-mail: gregori.troina@gmail.com.

⁴ Doutor em Engenharia Mecânica pela Duke University-EUA, pós-doutorado na área de Turbulência no Instituto de Pesquisas Hidráulicas-UFRGS, professor do programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos-UNISINOS. E-mail: luizor@unisinis.br

⁵ Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, professor da Universidade Federal do Rio Grande-FURG. E-mail: elizaldosantos@furg.br.

⁶ Doutor em Engenharia (PROMEC) pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Pós-Doutorado vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional (PPGMC) da Universidade Federal do Rio Grande-FURG, professor associado da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande-FURG, Coordenador do PPGEO-FURG Biênio 2017-2018. E-mail: liercioisoldi@furg.br.

reducing its deflection. Further, it has been found that depending on the number of stiffeners, tilting them at 45° may be an alternative to minimize deflections in rectangular plates.

Palavras-chave: Stiffened Plates. Deflection. Finite Elements.

Introdução

Placas são componentes estruturais retos, planos e bidimensionais, onde sua espessura é muito menor do que as outras dimensões (SZILARD, 2004). Diversas estruturas de engenharia utilizam placas e painéis, como na fuselagem de aeronaves, pontes e cascos de navios. Com o objetivo de aumentar a rigidez são inseridos reforços (enrijecedores) no sentido longitudinal e/ou transversal das placas e suas proporções geométricas desempenham um papel relevante na performance desses componentes estruturais (BEDAIR, 2009).

A análise do comportamento estrutural de placas enrijecidas depara-se com a dificuldade de estabelecer soluções analíticas devido sua complexidade geométrica. As propostas existentes restringem-se a casos de geometrias simplificadas, de forma que, os métodos numéricos tornam-se uma alternativa para a solução desse tipo de problema.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) foi utilizado por Rossow e Ibrahimkhail (1978) para a aplicação do Método das Restrições na análise de placas enrijecidas com enrijecedores excêntricos e concêntricos, onde o campo de deslocamentos dos enrijecedores foi proposto em função dos deslocamentos da superfície média da placa. Para a verificação, comparou-se os resultados obtidos com os de outros autores para dois exemplos distintos: uma placa quadrada com um enrijecedor central e uma placa retangular com dois enrijecedores ortogonais.

Bedair (1997) fez uso da Programação Sequencial Quadrática para implementar um método de análise de placas enrijecidas, onde a estrutura foi idealizada considerando a placa e os enrijecedores rigidamente conectados, e então determinada a energia de deformação em termos de deformações generalizadas dentro e fora do plano da placa. Ainda, o Método dos Elementos de Contorno foi aplicado por Tanaka e Bercin (1998) na análise do comportamento estrutural estático de placas enrijecidas sob flexão, o equacionamento considerou a influência da excentricidade dos enrijecedores, bem como, rigidez de torção e flexão. Peng et al. (2005) apresentaram um modelo numérico do tipo sem malha (*mashless*) para análise estática de placas enrijecidas com enrijecedores excêntricos e concêntricos, com base na Teoria de Deformação Cisalhante de Primeira Ordem. Hasan (2007) utilizando o MEF através do software NASTRAN[®] estudou as melhores localizações de enrijecedores retangulares em placas submetidas à flexão em diferentes condições de contorno.

Placas de material isotrópico contendo enrijecedores e submetidas a flexão foram o alvo do estudo de Singh et al. (2015), onde foi utilizado o software ANSYS[®], baseado no MEF, para analisar diversas configurações de enrijecedores considerando diferentes carregamentos e condições de contorno, com o objetivo de reduzir a deflexão no centro da placa. Por fim, Troina (2017) aplicou o método Design Construtal utilizando o MEF por meio do software ANSYS[®], na busca de arranjos geométricos que minimizassem a deflexão em placas com enrijecedores retangulares e ortogonais entre si.

Sendo assim, esse estudo teve como objetivo avaliar o comportamento mecânico de placas retangulares enrijecidas sob carregamento transversal uniforme quanto à influência da variação dos parâmetros geométricos e da inclinação dos enrijecedores através da aplicação do método Design Construtal.

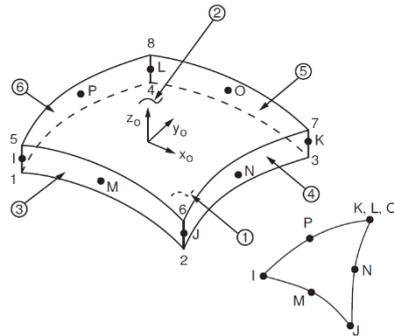
1 Modelagem Computacional

As modelagens das placas analisadas nesse foram realizadas utilizando o software ANSYS[®], fundamentado no MEF. Segundo Bathe (1996) o MEF é utilizado na solução de problemas físicos de engenharia, que envolvem normalmente uma estrutura ou componente estrutural sujeito à determinados carregamentos. Zienkiewicz (1971) explica que a análise por elementos finitos consiste basicamente em quatro etapas: criação da geometria do modelo, geração da malha, aplicação da carga e condições de contorno e a solução do problema. De acordo com Madenci e Guven (2006), modelar um problema de engenharia através do MEF para uma análise estática com comportamento linear-elástico do material, necessita a montagem de um sistema global de equações composto pelas matrizes características do elemento e pelo vetor de forças (Equação 1), onde $[K]$ é a matriz de rigidez global; $\{u\}$ é o vetor de deslocamentos nodais desconhecidos e $\{F\}$ representa o vetor de cargas externas.

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

O elemento finito adotado para compor as malhas dos modelos numéricos analisados nesse estudo foi o SHELL281 (Figura 1), disponível na biblioteca do software. Esse elemento é tipo casca, ideal para a modelagem de placas finas e moderadas, possui 8 nós e 6 graus de liberdade em cada um, sendo três translações nas direções x , y e z e três rotações em torno desses eixos (ANSYS,2018).

Figura 1 - Elemento SHELL281



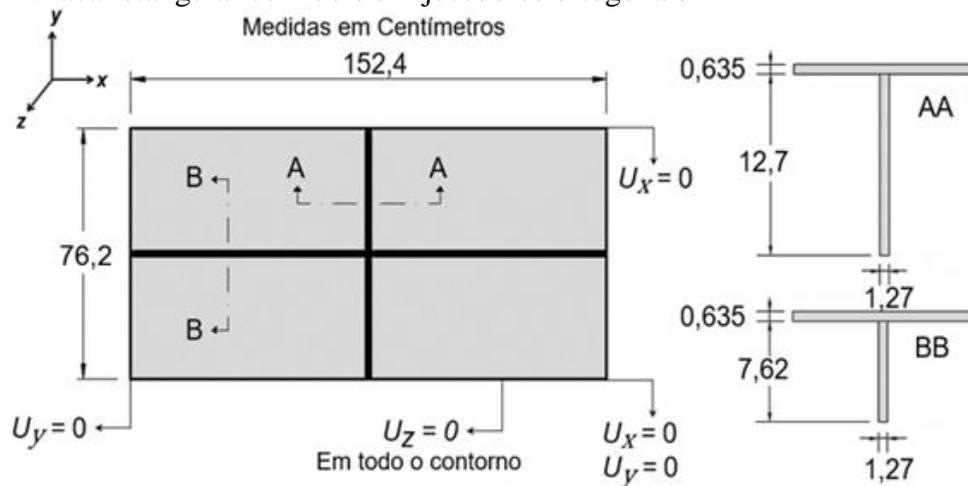
Fonte: ANSYS Help System, 2018

1.1 Verificação do Modelo Computacional

Para a verificação do modelo numérico, a placa representada na Figura 2 foi simulada através do software ANSYS®.

O caso possui material com módulo de elasticidade $E = 20.684,27 \text{ kN/cm}^2$ e coeficiente de Poisson de $\nu = 0,3$. Foi considerado um carregamento transversal uniforme de $0,006895 \text{ kN/cm}^2$ com condição de contorno de bordas simplesmente apoiadas. Para a solução desse problema foi adotado o elemento SHELL281 na versão triangular, totalizando 30.400 elementos finitos. O resultado da deflexão no centro da placa U_z juntamente com os resultados obtidos por outros autores para o mesmo caso estão expressos na Tabela 1.

Figura 2 - Placa retangular com dois enrijecedores ortogonais



Fonte: Os autores

O resultado obtido nessa verificação apresentou uma diferença aceitável em comparação com os resultados obtidos por Rossow e Ibrahimkhail (1978) e por Peng et al. (2005), considerando a precisão do modelo atual, que devido ao poder computacional disponível, possibilita a discretização do domínio em milhares de elementos finitos.

Tabela 1 - Comparação dos resultados para verificação do modelo numérico

Autores	U_z (mm)	Diferença (%)
Rossow e Ibrahimkhail (1978)	0,2245	20,07
Peng et al. (2005)	0,2185	22,2
Troina (2017)	0,2781	0,99
Presente Estudo	0,2809	--

Fonte: Elaborada pelos autores.

Por sua vez, comparando com o resultado obtido por Troina (2017) utilizando o elemento tridimensional SOLID95 na versão hexaédrica, obteve-se uma proximidade grande, embora o elemento SOLID95 apresente maior precisão, visto que, possui 20 nós que se conectam aos elementos adjacentes, enquanto o SHEEL281 na versão triangular possui 6. Sendo assim, pode-se considerar o modelo como verificado.

2 Método Design Construtal

De acordo com Bejan e Lorente (2008) a Teoria Construtal é a visão mental de que a geração das estruturas de fluxo que existem em toda a parte na natureza (bacias hidrográficas, pulmões, circulação atmosférica, tecidos vascularizados, entre outros) pode ser fundamentada com base em um princípio evolucionário de aumento do acesso ao fluxo no tempo, denominado de Lei Construtal: “Para que um sistema de fluxo de tamanho finito persista no tempo (para sobreviver), sua configuração deve evoluir de modo a facilitar o acesso às correntes que fluem através dele”.

Reis (2006) explica que o método Design Construtal é o modo pelo qual a Lei Construtal é aplicada em situações práticas, trata-se da geração da arquitetura de fluxo. O desempenho de um sistema é global e carrega consigo restrições globais fixas que incluem o espaço designado ao sistema, os materiais e componentes disponíveis, faixas limites de temperatura, pressão ou tensão. Sendo assim, o projetista reúne todos os componentes e otimiza o arranjo, de modo a desenvolver a arquitetura de fluxo que alcance melhor desempenho (REIS, 2006). Bejan e Lorente (2008) explicam que na análise de estruturas mecânicas a Lei Construtal é aplicada de modo semelhante a qualquer sistema de fluxo, quando solicitados a um carregamento os arranjos mecânicos funcionam como redes através das quais as tensões fluem entre seus componentes.

Para empregar o método Design Construtal uma placa sem enrijecedores com comprimento $a = 2000$ mm, largura $b = 1000$ mm e espessura $t = 20$ mm foi tomada como referência. A partir desta, foi estabelecida a fração volumétrica ϕ , apresentada nas Equações 2 e 3 para enrijecedores ortogonais às bordas da placa e inclinados, respectivamente, onde V_s é o volume

de material dos enrijecedores; V_r é o volume de material da placa de referência; o comprimento, a largura e a espessura da placa de referência são respectivamente $a = 2000$ mm, $b = 1000$ mm e $t = 20$ mm; h_s e t_s são a altura e a espessura dos enrijecedores, respectivamente, comum para todas as placas configuradas. O parâmetro ϕ relaciona o volume de material dos enrijecedores com o volume de material da placa de referência. Nesse estudo foi adotado $\phi = 0,3$, ou seja, 30% do volume de material da placa de referência foi removido da espessura e transformado em enrijecedores.

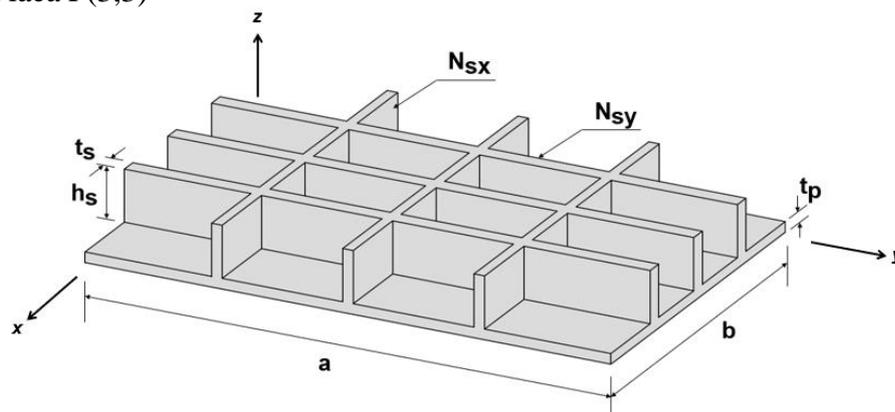
$$\phi = \frac{V_s}{V_r} = \frac{N_{ls}(ah_s t_s) + N_{ts}[(b - N_{ls}t_s)h_s t_s]}{abt} \quad (2)$$

$$\phi = \frac{V_s}{V_r} = \frac{\sum_{d=1}^n [(d_1 + d_2 + d_3 \dots d_n)h_s t_s] - (N_{int}h_s t_s^2)}{abt} \quad (3)$$

Para as placas com enrijecedores inclinados foi estabelecido um sistema de coordenadas auxiliar x' , y' , z' para referenciar os enrijecedores inclinados. Então, adotou-se a forma $P(N_{sx}, N_{sy})$ e $P'(N_{sx'}, N_{sy'})$, para placas com enrijecedores ortogonais e enrijecedores inclinados, respectivamente. Onde $N_{sx'}$ e $N_{sy'}$ são os números de enrijecedores nas direções x' e y' , assim como, N_{sx} e N_{sy} representam o número de enrijecedores nas direções x e y . Dessa forma, partindo da placa referência foram configuradas duas placas com enrijecedores ortogonais (não inclinados): $P(2,2)$, $P(3,3)$; e duas com enrijecedores inclinados em 45° : $P'(2,2)$, $P'(3,3)$. As Figuras 3 e 4 mostram as placas $P(3,3)$ e $P'(3,3)$, respectivamente. Cabe enfatizar que exclusivamente para os arranjos geométricos formados com enrijecedores inclinados, os parâmetros d_1, d_2, d_3, d_n , representam o comprimento dos enrijecedores, sendo n o número total e N_{int} o número de interseções entre os mesmos.

Quanto aos espaçamentos, para as placas com enrijecedores ortogonais, a distribuição foi feita de modo equidistante em função das laterais das placas. No entanto, para as placas com enrijecedores inclinados, os espaçamentos foram considerados em função das diagonais das placas, sendo os mesmos também equidistantes. Todos os arranjos geométricos analisados nesse estudo estão expressos na Tabela 2, lembrando que para evitar desproporção excessiva entre a altura dos enrijecedores e as dimensões da placa, a altura máxima permitida foi de 300 mm.

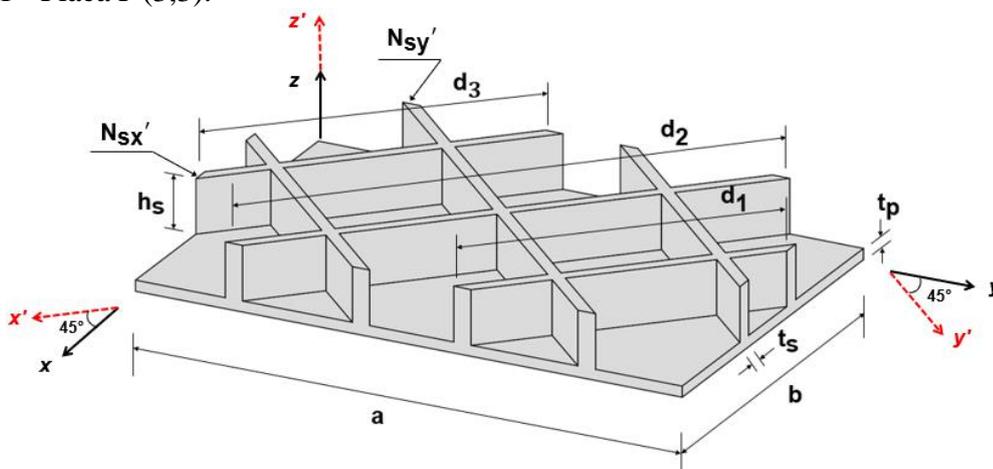
Figura 3 - Placa P(3,3)



Fonte: Os autores:

Assim, foi possível avaliar a influência do grau de liberdade h_s/t_s no comportamento mecânico da placa em relação à deflexão. O comprimento da placa $a = 2000$ mm e a largura $b = 1000$ mm foram mantidos, no entanto, a espessura $t = 20$ mm passou a ser $t_p = 14$ mm após a remoção de material para compor os enrijecedores. As espessuras de enrijecedores adotadas nesse estudo foram de chapas comerciais, de modo que, a cada diferente espessura, uma nova altura foi formada, mantendo o volume de material constante.

Figura 1 - Placa P'(3,3).



Fonte: Os autores:

Tabela 1 – Arranjos Geométricos

Espessura	Enrijecedores ortogonais				Enrijecedores inclinados			
	P(2,2)		P(3,3)		P'(2,2)		P'(3,3)	
t_s (mm)	h_s (mm)	h_s/t_s	h_s (mm)	h_s/t_s	h_s (mm)	h_s/t_s	h_s (mm)	h_s/t_s
6,35	$h_s > 300$ mm		211,316	33,278	$h_s > 300$ mm		268,944	42,353
8	251,34	31,418	168,011	21,001	265,917	33,24	213,825	26,728
9,53	211,205	22,162	141,255	14,822	223,346	23,436	179,771	18,864
12,7	158,825	12,506	106,337	8,373	167,786	13,212	135,328	10,656
15,9	127,134	7,996	85,212	5,359	134,171	8,438	108,44	6,82
19,21	105,463	5,49	70,768	3,684	111,183	5,788	90,055	4,688
22,2	91,443	4,119	61,424	2,767	96,311	4,338	78,162	3,521
25,4	80,096	3,153	53,862	2,121	84,273	3,318	68,537	2,698
31,8	64,255	2,021	43,306	1,362	67,467	2,122	55,101	1,733

Fonte: Elaborada pelos autores.

3 Teste de Independência de Malha

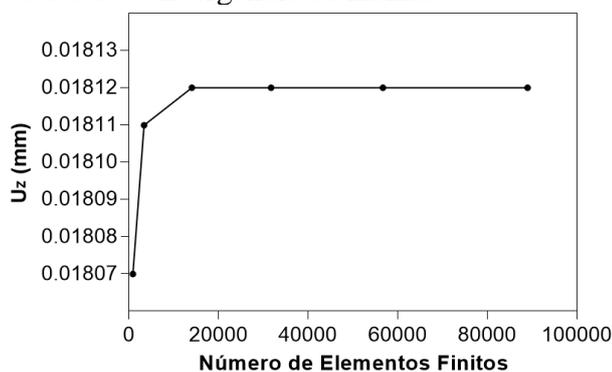
Um teste de convergência de malha foi realizado adotando o elemento SHELL281 triangular, com o objetivo de definir o tamanho dos elementos finitos que seriam utilizados nas simulações. Para tal, foi escolhida a placa com maior complexidade geométrica P'(3,3) com $h_s/t_s = 42,353$. Foram analisadas seis configurações de malhas, em cada análise o tamanho dos elementos finitos foi reduzido sucessivamente conforme apresentado na Tabela 3. De acordo com a Figura 5, pode-se observar que a partir da terceira simulação o valor da deflexão no centro da placa U_z manteve-se constante, sendo adotada então a malha M3 com o elemento finito de tamanho 25 mm. A configuração do domínio discretizado em elementos finitos pode ser visualizado na Figura 6.

Tabela 3 – Malhas adotadas no teste de independência

Malha	Tamanho do Elemento	Número de Elementos	Deslocamento U_z (mm)	Diferença Relativa (%)
M1	100	928	0,01807	0,22
M2	50	3436	0,01811	0,055
M3	25	14106	0,01812	0
M4	16,67	31758	0,01812	-
M5	12,5	56712	0,01812	-
M6	10	88968	0,01812	-

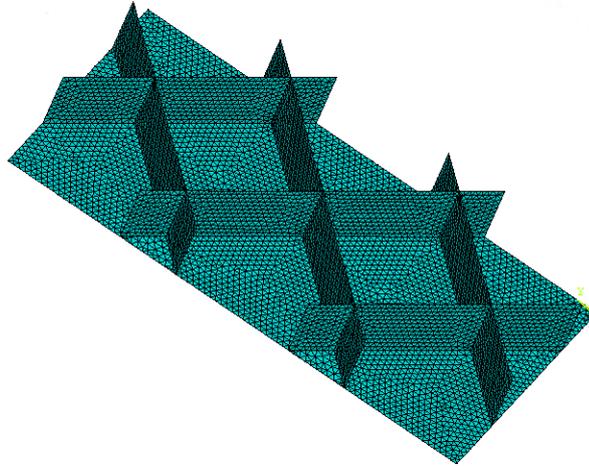
Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 2 - Resultado do teste de convergência de malha.



Fonte: Os autores.

Figura 3 - Discretização do modelo computacional para placa P'(3,3) com $h_s/t_s = 42,353$.



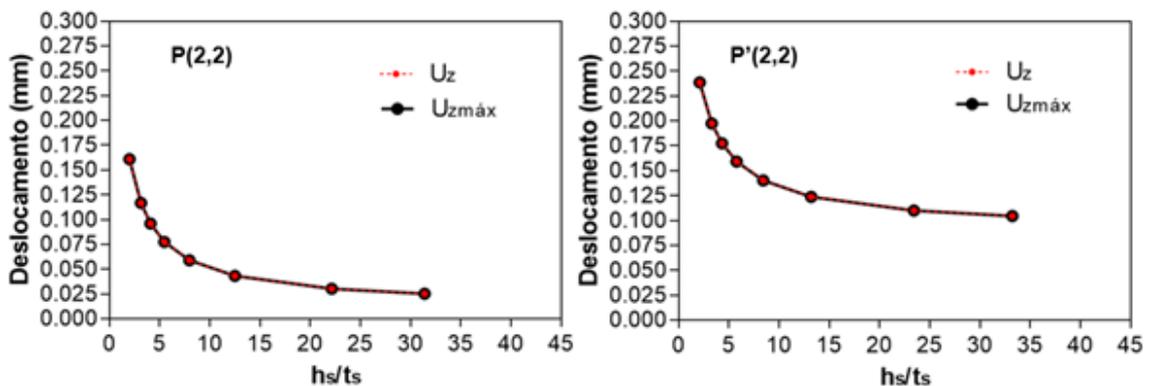
Fonte: Os autores.

4 Resultados e Discussões

Para todas as configurações geométricas de placas simuladas nesse estudo adotou-se um carregamento transversal uniforme igual a 10 kN/m² e condição de contorno de bordas simplesmente apoiadas. As propriedades do material foram o módulo de elasticidade $E = 200$ GPa e o coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$. Em todas as análises o deslocamento no centro das placas U_z e o deslocamento máximo $U_{z\text{máx}}$ foram determinados. Então foram comparados os resultados para as configurações com melhor desempenho, ou seja, menores deslocamentos.

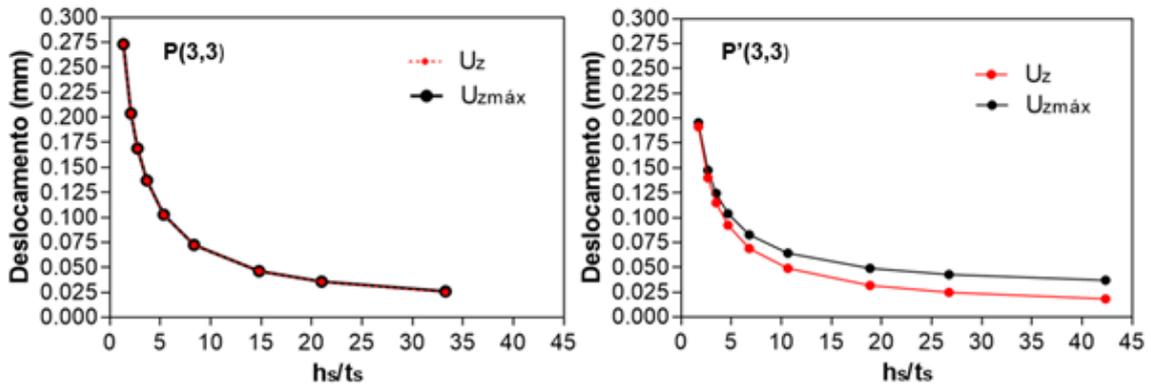
Primeiramente foram obtidos os deslocamentos para a placa sem enrijecedores, tomada como referência, cujos valores são $U_z = U_{z\text{máx}} = 0,697$ mm. Após, foi removido desta placa, através do parâmetro ϕ , 30% do volume de material e transformado em enrijecedores. Formou-se então as placas P(2,2), P(3,3) e P'(2,2), P'(3,3) e em cada uma delas avaliou-se a influência do grau de liberdade dado pela relação h_s/t_s . Os resultados estão apresentados nas Figuras 7 e 8.

Figura 4 - Deslocamentos para P(2,2) e P'(2,2)



Fonte: Os autores.

Figura 8 - Deslocamentos para P(3,3) e P'(3,3)



Fonte: Os autores.

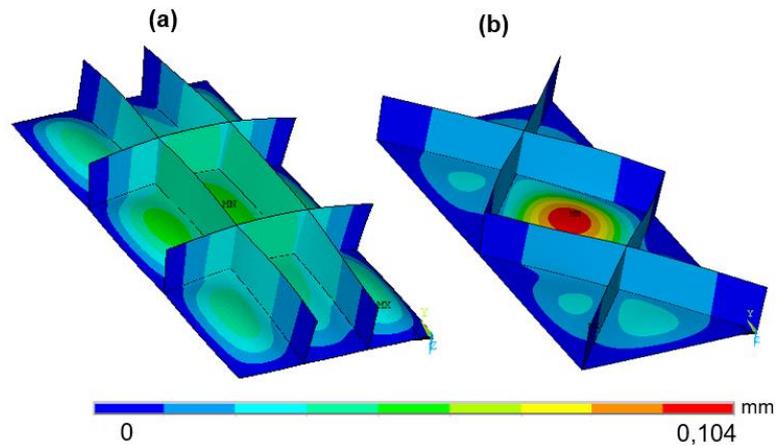
Observando as Figuras 7 e 8, percebe-se que transformar parte do volume da placa de referência em enrijecedores melhora o comportamento mecânico uma vez que todos os resultados de placas enrijecidas apresentaram redução, tanto no deslocamento central quanto no deslocamento máximo quando comparados com a placa não enrijecida de mesmo volume. Comparando os deslocamentos da placa de referência com o deslocamento da placa P'(3,3) com relação $h_s/t_s = 42,353$ com melhor desempenho, a respeito do deslocamento central, obteve-se uma redução de 97,4%, e na comparação com o deslocamento máximo a redução foi de 94,7%.

Pode-se observar, ainda, que em todas as placas enrijecidas analisadas, com enrijecedores ortogonais aos lados da placa ou inclinados, o aumento da relação h_s/t_s reduziu a deflexão central e máxima.

Comparando as placas P(2,2) e P'(2,2) os melhores resultados foram para as relações $h_s/t_s = 31,418$ com $U_z = U_{z\text{máx}} = 0,025$ mm e $h_s/t_s = 33,240$ com $U_z = U_{z\text{máx}} = 0,104$, respectivamente. A placa P(2,2) apresentou 75,96% de redução dos deslocamentos em comparação com a P'(2,2). Logo, percebe-se que para placas retangulares com dois enrijecedores em cada direção, incliná-los em 45° não é uma boa opção quando comparado com enrijecedores ortogonais aos lados da placa. A Figura 9 mostra as configurações deformadas das referentes placas.

Para as placas com três enrijecedores em cada direção P(3,3) e P'(3,3), as que apresentaram menor deslocamento central e máximo foram: P(3,3) para $h_s/t_s = 33,278$ com deslocamentos $U_z = 0,025$ mm e $U_{z\text{máx}} = 0,026$ mm e a placa P'(3,3) para $h_s/t_s = 42,353$ com $U_z = 0,018$ mm e $U_{z\text{máx}} = 0,037$ mm. Logo, a placa com enrijecedores inclinados em 45° apresentou desempenho superior quanto ao deslocamento central, com uma diferença de 28%, contrário ao que aconteceu com as placas com dois enrijecedores em cada direção.

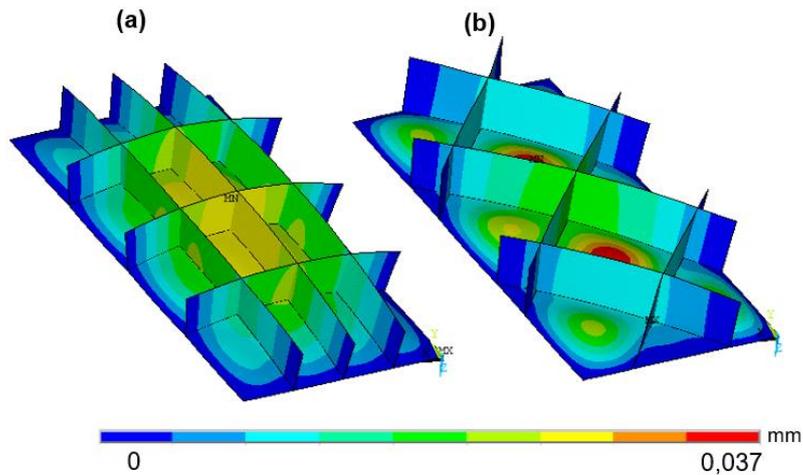
Figura 5 - Configuração deformada: (a) P(2,2) com $h_s/t_s = 31,418$ e (b) P'(2,2) com $h_s/t_s = 33,240$.



Fonte: Os autores.

Porém, quanto ao deslocamento máximo a placa com enrijecedores ortogonais mostrou maior eficiência, apresentando uma diferença de 29,7% em relação à placa com enrijecedores inclinados em 45°. As configurações deformadas para as duas placas em questão podem ser visualizadas na Figura 10.

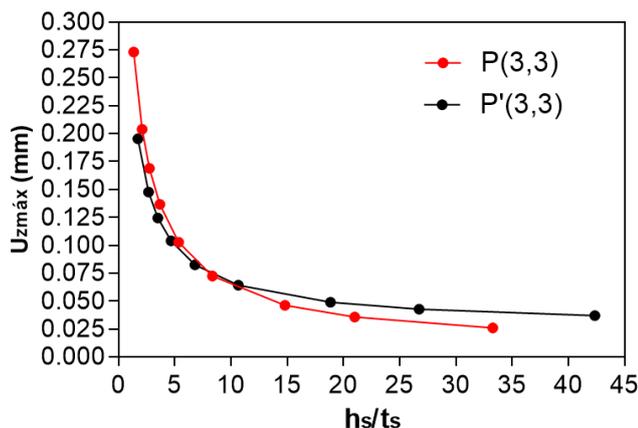
Figura 6 - Configuração deformada: (a) P(3,3) com $h_s/t_s = 33,278$ e (b) P'(3,3) com $h_s/t_s = 42,353$.



Fonte: Os autores.

Entretanto, em relação ao deslocamento máximo ao atingir a relação $h_s/t_s = 10,656$ a placa P'(3,3) passou a ter um comportamento levemente superior ao da placa P(3,3), conforme mostra a Figura 11 .

Figura 7 - Deslocamento máximos para P(3,3) e P'(3,3)



Fonte: Os autores.

5 Conclusões

Esse estudo aplicou o método Design Construtal para avaliar o comportamento mecânico de placas enrijecidas submetidas à flexão. Sendo assim, uma placa sem enrijecedores foi tomada como referência e então estabelecido o parâmetro $\phi = 0,3$, que relaciona o volume de material dos enrijecedores com o volume de material da placa de referência. Foram formadas quatro placas, duas com enrijecedores ortogonais aos lados da placa, P(2,2) e P(3,3), e duas com enrijecedores inclinados em 45° , P'(2,2) e P'(3,3). Em cada uma foi avaliada a influência do grau de liberdade definido pela relação entre altura e espessura dos enrijecedores h_s/t_s .

Primeiramente, foi observado que transformar parte do material da placa de referência em enrijecedores melhorou significativamente o comportamento mecânico da mesma quanto aos deslocamentos. Notou-se também que a variação da relação h_s/t_s pode aumentar a rigidez da placa, reduzindo as deflexões. Ainda, foi observado que inclinar os enrijecedores em 45° pode conduzir a bons resultados dependendo do número de enrijecedores. Porém, para determinar um número adequado, seria necessária uma avaliação mais abrangente, considerando outros modelos de placas com diferentes números de enrijecedores.

Portanto, a utilização do método Design Construtal associado à modelagem computacional é uma ferramenta eficaz para análise do comportamento mecânico de placas. Além disso, a modificação da geometria dos enrijecedores pode conduzir a uma melhora significativa no comportamento mecânico de placas enrijecidas, uma vez que, aumentar o parâmetro h_s/t_s reduziu a deflexão central. Entretanto, inclinar os enrijecedores em placas retangulares pode melhorar o desempenho apenas em alguns casos.

Em trabalhos futuros, cabe a investigação de placas enrijecidas com outras inclinações e quantidades de enrijecedores. Pode-se também avaliar a influência dos graus de liberdade considerados nesse estudo quanto às tensões resultantes do carregamento transversal uniforme.

6 Agradecimentos

O autor V. T. Pinto agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de Mestrado. O autor M. L. Cunha agradece à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pela bolsa de Iniciação Tecnológica. Os autores E. D. dos Santos, L. A. Isoldi e L. A. O. Rocha agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas de Produtividade em Pesquisa.

Referências

ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 19, **Help System**, Element Reference, ANSYS, Inc.

BEDAIR, O. K. Analysis and Limit State Design of stiffened plates and shells: A world view. **Applied Mechanics Reviews**, v. 62, p. 01-16, 2009.

BEDAIR, O. K. Analysis of stiffened plates under lateral loading using sequential quadratic programming (SQP). **Computer and Structures**, v. 62, p. 63-80, 1997.

BEJAN, A.; LORENTE, S. **Design with Constructal Theory**. 1ª ed. Hoboken: Wiley, 2008.

BATHE, K. **Finite Element Procedures**. 1ª ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall, 1996.

HASAN, M. M. Optimum design of stiffened square plates for longitudinal and square ribs. **Al-Khwarizmi Engineering Journal**, v. 3, p. 13-30, 2007.

MADENCI, E.; GUVEN, I. **The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS**. 1ª ed. New York: Springer, 2006.

PENG, L. X.; KITIPORNCHAI, S.; LIEW, K. M. Analysis of rectangular stiffened plates under uniform lateral load based on FSDT and element-free Galerkin method. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 47, p. 251–276, 2005.

REIS, A. H. Constructal theory: from engineering to physics, and how flow systems develop shape and structure. **Applied Mechanics Reviews**, v. 59, p. 269-281, 2006.

SINGH, D. K.; DUGGAL, S. K.; PAL, P. Analysis of Stiffened Plates using FEM – A Parametric Study. **International Research Journal of Engineering and Technology**, v. 2, p. 1650-1656, 2015.

SZILARD, R. **Theories and applications of plate analysis: Classical numerical and engineering methods**. 1ª ed. Hoboken: Wiley, 2004.

TANAKA, M.; BERCIN, A. N. Static bending analysis of stiffened plates using the boundary element method. **Engineering Analysis with Boundary Elements**, v. 21, p. 147-154, 1998.

TROINA, G. S. **Modelagem computacional e método design construtal aplicados à otimização geométrica de placas finas de aço com enrijecedores submetidas a carregamento transversal uniforme**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica). Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2017.

ZIENKIEWICZ, O.C. **The finite Element Method in Engineering Science**, 2º ed. London: McGraw- Hill, 1971.