



Verificação de modelo computacional para placas com enrijecedores do tipo viga-caixão submetidas à carga transversal uniformemente distribuída

Computational modeling verification for plates with hat-stiffeners subjected to uniformly distributed transverse load

M. A. Alves^{1,2*}; E. M. Rodrigues¹; D. C. Viera¹; V. T. Pinto^{1,3}; L.A.O. Rocha^{1,2,3};
E. D. dos Santos^{1,2,3}; L.A. Isoldi^{1,2,3}

¹Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande – FURG, 96203-900, Rio Grande/RS, Brasil

²Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Universidade Federal do Rio Grande – FURG, 96203-900, Rio Grande/RS, Brasil

³Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande – FURG, 96203-900, Rio Grande/RS, Brasil

*mari.aalves@hotmail.com

(Recebido em 07 de abril de 2023; aceito em 16 de agosto de 2023)

A utilização de modelos computacionais para avaliar o comportamento mecânico em estruturas de aço é amplamente difundida para aplicações acadêmicas e comerciais/industriais. Este trabalho propõe um modelo numérico desenvolvido no software ANSYS Mechanical APDL, que é baseado no Método dos Elementos Finitos, para analisar a deflexão de placas de aço com enrijecedores do tipo viga-caixão com formato trapezoidal, também conhecidas como *hat-stiffened plates*. O objetivo deste estudo é verificar o modelo computacional proposto, que emprega o elemento finito do tipo SHELL281, comparando seus resultados com os de dois estudos anteriores que adotam elementos finitos tipo SHELL63, SHELL93, SHELL181 e/ou BEAM3, analisando o comportamento mecânico das placas em termos da deflexão máxima na estrutura. Para isso, dois estudos de caso encontrados na literatura foram aqui reproduzidos. A diferença máxima encontrada em relação aos resultados da literatura para o estudo de caso 1 foi de 1,40% para uma placa simplesmente apoiada; já o estudo de caso 2 apresentou uma diferença média de 3,30% para a placa simplesmente apoiada e 2,43% para a placa engastada. Portanto, a partir destes resultados foi possível considerar o modelo computacional proposto como devidamente verificado.

Palavras-chave: placas enrijecidas, enrijecedor tipo viga-caixão, simulação numérica estrutural.

The use of computational models to evaluate the mechanical behavior of steel structures is widespread for academic and commercial/industrial applications. This work proposes a numerical model developed in the ANSYS Mechanical APDL software, which is based on the Finite Element Method, to analyze the deflection of steel plates with trapezoidal-shaped box-beam stiffeners, also known as *hat-stiffened plates*. The objective of this study is to verify the proposed computational model, which uses the finite element type SHELL281, comparing its results with those of two previous studies that adopt finite elements type SHELL63, SHELL93, SHELL181 and/or BEAM3, analyzing the mechanical behavior of the plates in terms of maximum deflection in the structure. For this, two case studies found in the literature were reproduced here. The maximum difference found in relation to the literature results for the case study 1 was 1.40% for a simply supported plate; in turn the case study 2 showed an average difference of 3.30% for the simply supported plate and 2.43% for the clamped plate. Therefore, from these results it was possible to consider the proposed computational model as properly verified.

Keywords: stiffened plates, hat-stiffener, structural numerical simulation.

1. INTRODUÇÃO

O transporte marítimo é responsável por movimentar cerca de 80% de todas as mercadorias comercializadas ao redor do mundo, segundo estimativa da Organização das Nações Unidas [1]. A relação custo-benefício é considerável quando comparado com outros modos de transporte, isto porque permite transportar cargas em volume e quantidades maiores, com um custo de frete mais baixo [2].

Garantir embarcações seguras, bem estruturadas e cada vez maiores de acordo com a demanda do mercado, implica na necessidade de projetos mais detalhados e que sejam capazes de prever riscos de acordo com a utilização de cada tipo de navio. Além disso, atualmente, a indústria naval está trabalhando no desenvolvimento de estruturas mais leves e resistentes [3].

Nesse contexto, as placas de aço enrijecidas são componentes estruturais utilizados na indústria naval, principalmente, para a fabricação de cascos de embarcações. Os enrijecedores tem a função de aumentar a rigidez da estrutura, melhorando assim, o seu comportamento mecânico [4]. Analisar a melhor distribuição dos enrijecedores bem como o seu formato, contribui para a diminuição dos efeitos provocados pelas cargas internas e pressão externa da água, evitando danos ao casco da embarcação [5].

Estudos que adotam a abordagem numérica para avaliar o comportamento mecânico de placas enrijecidas podem ser encontrados na literatura. Bedair (1997) [6] apresentou a aplicação da Programação Sequencial Quadrática para análise de placas enrijecidas sob carregamento lateral, cuja energia de deformação da estrutura idealizada é derivada em termos de funções de deslocamento dentro e fora do plano. Prusty e Satsangi (2001) [7] realizaram análises estáticas de painéis enrijecidos usando um elemento isoparamétrico de oito nós para a placa e um elemento de viga curva de três nós para o enrijecedor. O uso de softwares comerciais, como por exemplo o ANSYS, tornou-se muito popular para análise de estruturas. Troina et al. (2020) [4] aplicaram o Método de Design Construtal através da técnica de busca exaustiva para otimizar placas enrijecidas, simplesmente apoiadas, submetidas à flexão devido a um carregamento uniformemente distribuído, visando minimizar a deflexão central nestas estruturas. Nogueira et al. (2021) [5] adotaram a mesma metodologia aplicada por Troina et al. (2020) [4], focando na minimização das deflexões máximas e centrais em placas enrijecidas variando as alturas dos enrijecedores transversais e longitudinais. Pinto et al. (2022) [8], também utilizando essa metodologia, investigaram três arranjos de enrijecedores variando a quantidade de enrijecedores transversais e longitudinais, mantendo o volume de material constante.

Diferentemente dos trabalhos citados que utilizaram enrijecedor com seção transversal retangular, que são tradicionalmente usados, o objetivo do presente estudo é realizar a verificação do modelo computacional proposto, comparando o comportamento mecânico em termos da deflexão máxima de placas com enrijecedores do tipo viga-caixão com formato trapezoidal, também chamadas de *hat-stiffened plates*. Essas placas, consideradas como simplesmente apoiadas ou engastadas nos quatro lados, serão submetidas a uma carga transversal uniformemente distribuída. Os resultados obtidos serão comparados com os apresentados em Tharian e Nandakumar (2013) [3] e Pal et al. (2018) [9], sendo, respectivamente os estudos de caso 1 e 2 do presente trabalho.

Misra (2016) [10] salienta as vantagens, tanto estrutural como econômica, da utilização de enrijecedores de seção fechada como é o caso dos *hat-stiffeners*. Esta configuração geométrica permite um maior espaçamento entre os enrijecedores devido à sua largura. Jia e Ulfvarson (2005) [11] analisaram o comportamento estrutural de um deque de aço de alta resistência com reforços trapezoidais a partir de dados de uma estrutura real. Por sua vez, Tharian e Nandakumar (2013) [3] realizaram uma análise numérica utilizando o método dos elementos finitos para quantificar as vantagens estruturais dos enrijecedores trapezoidais (*hat-stiffeners*), em relação aos enrijecedores de seção aberta que normalmente são utilizados. Já Pal et al. (2018) [9] analisaram a deflexão e tensão máxima de placas com enrijecedores tipo viga-caixão trapezoidal, adotando diferentes tipos de condição de vinculação da placa e diferentes geometrias para o enrijecedor, mas mantendo seu volume constante.

Cabe destacar que os trabalhos de Tharian e Nandakumar (2013) [3] e Pal et al. (2018) [9], que serão usados como referência no processo de verificação, utilizaram o software ANSYS e empregaram os elementos finitos do tipo SHELL63, SHELL93, SHELL181 e/ou BEAM3. Já o presente estudo adotará o elemento finito do tipo SHELL281, do software ANSYS Mechanical APDL, que tem sido empregado com sucesso em modelos computacionais aplicados a placas com enrijecedores, como em: Pinto et al. (2022) [8], Kucharski et al. (2022) [12] e Pinto et al. (2021) [13].

Nesse contexto, as formulações de elementos finitos no software ANSYS são classificadas com base no fato de usarem tecnologia atual ou tecnologia mais antiga (chamada de *legacy*). As

versões mais atuais do software permitem o uso dos elementos finitos mais antigos, porém é recomendado o uso dos elementos finitos com tecnologia atual. Portanto, cada elemento finito mais antigo tem uma substituição de tecnologia atual recomendada [14].

No software ANSYS os elementos finitos do tipo SHELL são 2-D e representam sistemas estruturais de paredes finas (cascas), enquanto os elementos finitos do tipo BEAM são 1-D e representam vigas estruturais [14]. No caso dos elementos finitos do tipo casca citados no presente estudo, o SHELL63 e o SHELL 93 possuem tecnologia mais antiga, enquanto o SHELL181 e SHELL281 possuem tecnologia atual [15]. Destaca-se ainda, segundo Bianco et al. (2019) [16], que esses elementos finitos são baseados em uma das seguintes hipóteses cinemáticas: Kirchhoff–Love (SHELL63 e SHELL93) ou Reissner-Mindlin (SHELL181 e SHELL281). Outra diferença entre esses elementos finitos do tipo casca está relacionada ao tipo de função de interpolação: linear (SHELL63 e o SHELL181, possuindo 4 nós cada) ou quadrática (SHELL93 e o SHELL281, possuindo 8 nós cada). Já o elemento finito do tipo viga BEAM3, segundo Moaveni (2008) [17], possui 2 nós, tecnologia mais antiga e considera efeitos de tração, compressão e flexão.

2. METODOLOGIA

Neste estudo foi aplicado o Método dos Elementos Finitos (MEF) através do software ANSYS Mechanical APDL. O ANSYS permite a utilização de diversos tipos de elementos finitos que serão escolhidos conforme a análise que se deseja realizar. Para o modelo computacional proposto foi utilizado o elemento SHELL281, tanto na placa quanto nos enrijecedores, como em Pinto et al. (2022) [8]. Esse elemento finito é adequado para modelar estruturas de placas finas a moderadamente espessas, apresentando bons resultados nas análises de deformações. Cada nó deste elemento tem seis graus de liberdade: três translações (U_x , U_y , U_z) e três rotações (θ_x , θ_y , θ_z) [18].

O MEF é uma técnica computacional robusta para obter soluções aproximadas para uma variedade de problemas de engenharia com domínios complexos sujeitos a condições gerais de contorno [19]. As simulações numéricas devem ser realizadas por meio de softwares confiáveis. A escolha dos elementos finitos e tamanhos de malha estão correlacionados à precisão dos resultados. As respostas numéricas obtidas nestas simulações são diretamente influenciadas pelas propriedades do material, além da reprodução das condições de contorno e aplicação dos esforços às quais a estrutura a ser reproduzida está sendo submetida [20].

Em análise estrutural, o MEF é usualmente adotado em sua formulação de deslocamento. Desta maneira, a estrutura é dividida num certo número de pequenas áreas, os chamados elementos finitos. Estes elementos são assumidos como interconectados por um número determinado de pontos nodais, ou nós, localizados em seus limites [21]. Os deslocamentos desconhecidos são obtidos através da solução de um sistema de equações algébricas que pode ser representado por:

$$[K]. \{d\} = \{f\} \quad (1)$$

onde $\{d\}$ é o vetor dos deslocamentos nodais da estrutura, $\{f\}$ é o vetor que representa o carregamento externo e $[K]$ é a matriz de rigidez global da estrutura [22]. A matriz de rigidez do sistema é obtida através das relações deformação-deslocamento e tensão-deformação da estrutura, a partir da discretização do modelo e das propriedades do material [4].

3. RESULTADOS NUMÉRICOS E DISCUSSÃO

3.1 Estudo de caso 1: placa retangular simplesmente apoiada com dois enrijecedores

Este estudo de caso consiste na simulação numérica de uma placa com 6 mm de espessura e de 2,4 m de comprimento por 1,4 m de largura possuindo dois enrijecedores longitudinais do tipo viga-caixão com formato trapezoidal, que foi previamente investigada por Tharian e Nandakumar

(2013) [3]. A geometria e dimensões da estrutura são apresentadas na Figura 1. Foi analisada numericamente a deflexão máxima na placa que está simplesmente apoiada. De acordo com a Figura 1, nos cantos representados pelos pontos vermelho, verde e azul, foram aplicadas as seguintes restrições, respectivamente: $U_x = U_y = 0$; $U_x = 0$; e $U_y = 0$. Além disso, nas bordas da placa e do enrijecedor foi imposto $U_z = 0$. A placa está sob um carregamento transversal uniformemente distribuído de 10 kN/m^2 que foi aplicado no sentido positivo do eixo z . O módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson do material (aço) que compõem a estrutura equivalem, respectivamente, a 210 GPa e $0,3$.

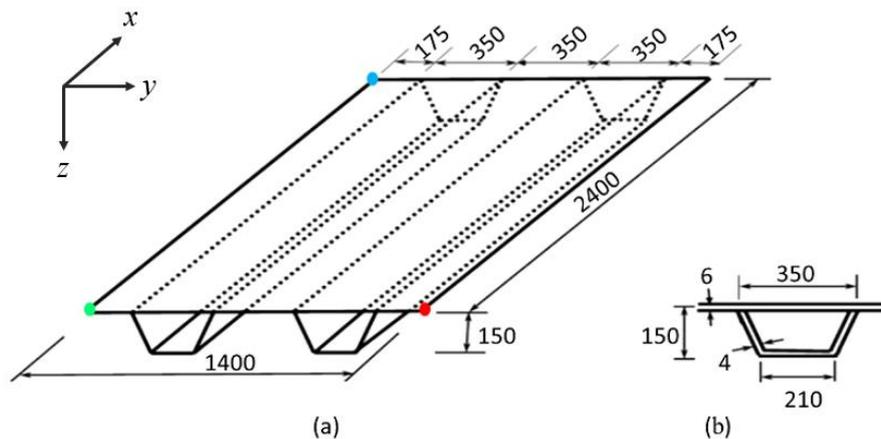


Figura 1:(a) Geometria e dimensões da placa com dois enrijecedores do tipo viga-caixão trapezoidal, em mm; (b) Dimensões do enrijecedor, em mm. Adaptado de Tharian e Nandakumar (2013) [3].

Então, o objetivo aqui foi comparar os resultados obtidos com o modelo computacional proposto, que adota elementos finitos do tipo SHELL281, aos apresentados em Tharian e Nandakumar (2013) [3], que empregaram os elementos finitos SHELL63 e SHELL93. No estudo de referência, os elementos SHELL63 e SHELL93 mostraram convergência para uma densidade de malha de 28×30 e uma razão de aspecto de 1,8.

A fim de determinar a discretização espacial a ser utilizada no presente estudo, foi realizado um teste de convergência de malha, considerando elementos finitos quadrados com 8 tamanhos diferentes. Neste teste de convergência (Figura 2), foi possível observar que a partir da malha de 20 mm (com 15600 elementos finitos) ocorre uma estabilização no valor da deflexão máxima da placa. Então, foi adotado como tamanho de elemento finito o próximo valor de malha após a estabilização, ou seja, a malha de 10 mm com 60240 elementos finitos.

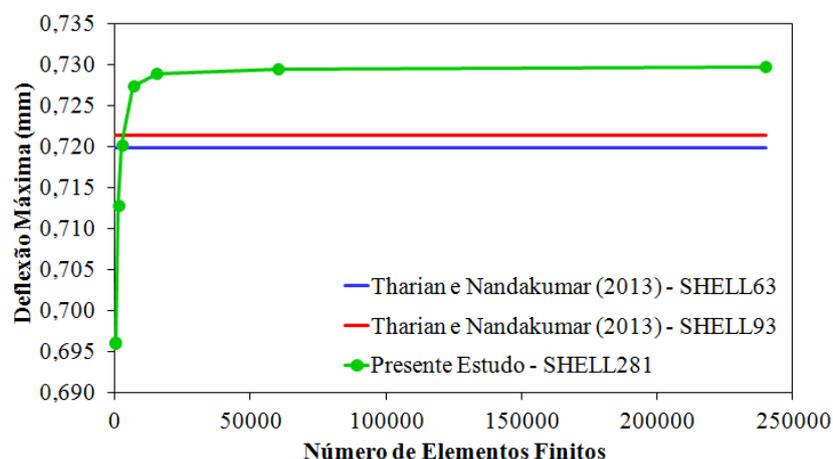


Figura 2: Teste de convergência de malha e verificação do modelo computacional.

De acordo com Tharian e Nandakumar (2013) [3], para o elemento SHELL63 a deflexão máxima obtida foi de 0,7198 mm, enquanto para o SHELL93 foi de 0,7214 mm (ver Fig. 2). No caso do elemento SHELL281, após o refinamento da malha, obteve-se um resultado de 0,7295 mm quando adotada a malha de 10 mm (com 60240 elementos finitos). O resultado obtido no presente estudo apresenta uma diferença de aproximadamente 1,35% e 1,12% em relação aos resultados gerados com o SHELL63 e SHELL93 em [3]. Portanto, é possível considerar que o modelo computacional proposto foi devidamente verificado. Entretanto, cabe destacar que os valores constantes para a deflexão máxima obtidos por Tharian e Nandakumar (2013) [3] são usados apenas como um valor de referência na Figura 2 e não têm relação com a variação do número de elementos finitos adotada no presente estudo.

Na Figura 3 é apresentada a configuração deformada da placa com dois enrijecedores do tipo viga-caixão trapezoidal, sendo possível identificar que sua deflexão máxima ocorre no ponto central.

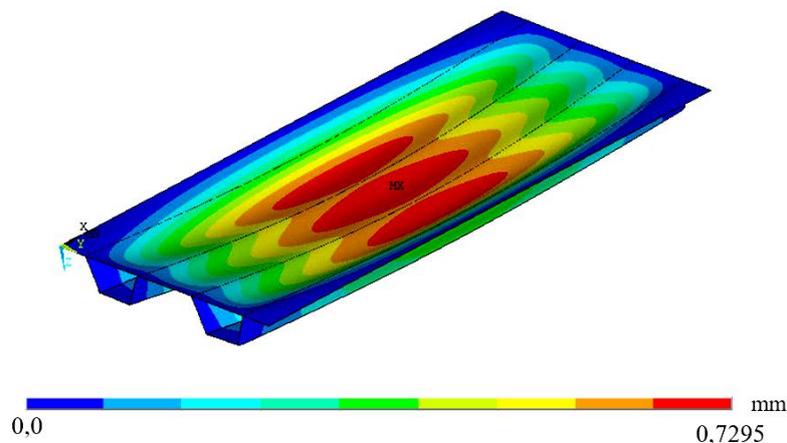


Figura 3: Resultado para a deflexão máxima obtido com o elemento finito SHELL281 considerando uma malha com elementos de 10 mm.

3.2 Estudo de caso 2: placa quadrada com um enrijecedor central

Neste estudo de caso foi investigada uma placa quadrada de aço medindo 1000 x 1000 x 10 mm com um enrijecedor central (Figura 4), como em Pal et al. (2022) [8]. Cabe destacar que o enrijecedor central (ver Figura 4) possui dimensões variáveis, como indicado na Tabela 1. Entretanto, apesar dessa variação de dimensões, o volume de aço do enrijecedor tipo viga-caixão é mantido constante e igual a 320000 mm³.

Cabe informar ainda que a placa enrijecida foi submetida a uma carga transversal uniformemente distribuída de 1 kN/m² que foi aplicada no sentido negativo do eixo z, sendo consideradas duas condições de contorno. Para a placa com as bordas simplesmente apoiadas (Figura 4), nos cantos representados pelos pontos vermelho, verde e azul foram aplicadas, respectivamente, as seguintes restrições: $U_x = U_y = 0$; $U_x = 0$; e $U_y = 0$; bem como $U_z = 0$ nas quatro bordas da placa; já a segunda condição considera a placa com as bordas engastadas, sendo imposto $U_x = U_y = U_z = \theta_x = \theta_y = \theta_z = 0$ nos quatro lados da placa. O módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson do aço adotados nesta análise são de 200 GPa e 0,3, respectivamente.

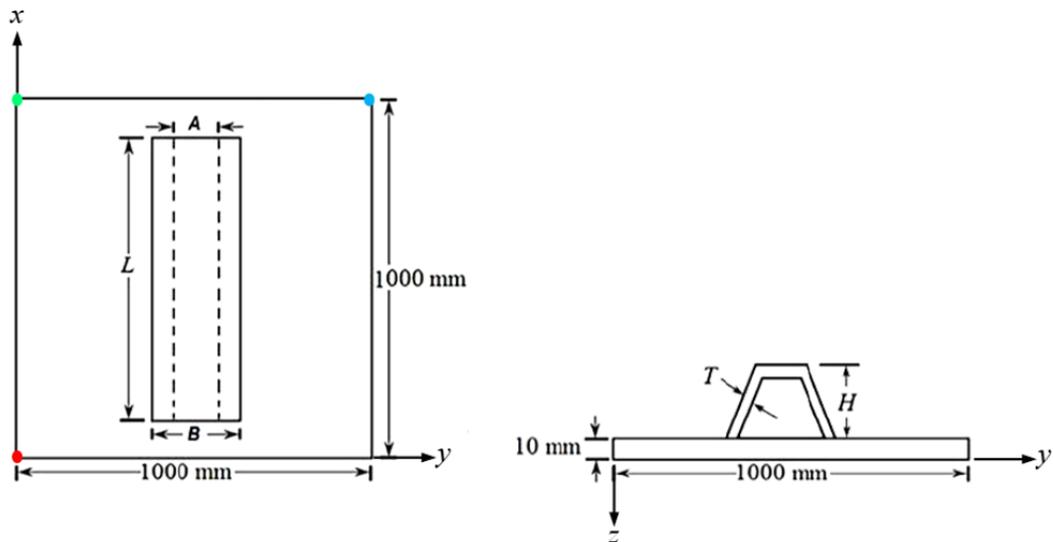


Figura 4: Geometria da placa e do enrijecedor. Adaptado de Pal et al. (2018) [9].

Tabela 1: Dimensões em mm do enrijecedor, mantendo o volume de material constante [9].

Caso	Espessura (T)	Largura inferior (A)	Largura superior (B)	Altura (H)	Comprimento (L)
1	2	35	60	65	955,90
2	3	35	60	65	637,26
3	4	35	60	65	477,95
4	5	35	60	65	382,36
5	6	35	60	65	318,63
6	2	40	60	65	932,78
7	3	40	60	65	621,86
8	4	40	60	65	466,39
9	5	40	60	65	373,11
10	6	40	60	65	310,93
11	2	40	65	70	878,09
12	3	40	65	70	585,39
13	4	40	65	70	439,04
14	5	40	65	70	351,23
15	6	40	65	70	292,70
16	2	40	60	70	881,92
17	3	40	60	70	587,95
18	4	40	60	70	440,96
19	5	40	60	70	352,77
20	6	40	60	70	293,97
21	2	35	65	65	950,02
22	3	35	65	65	633,35
23	4	35	65	65	475,01
24	5	35	65	65	380,01
25	6	35	65	65	316,67

Como já mencionado, o mesmo problema foi estudado por Pal et al. (2018) [9] que adotou o elemento finito SHELL181 para a placa e o elemento BEAM3 para o enrijecedor. Assim, como no estudo de caso anterior, pretende-se comparar os resultados obtidos no presente estudo, empregando o elemento finito SHELL281 tanto para o enrijecedor como para a placa, com os resultados apresentados em Pal et al. (2018) [9]. No estudo de referência, o elemento finito

SHELL181 mostrou convergência para uma densidade de malha de 20 x 20 e este tamanho de malha foi utilizado para todo o restante da análise.

Visando definir o tamanho ideal para o elemento finito SHELL281 a ser utilizado, foi realizado um teste de convergência de malha, para as condições propostas no Caso 1 (Tabela 1), considerando elementos finitos quadrados com 7 tamanhos diferentes para as duas condições de contorno propostas (bordas simplesmente apoiadas e bordas fixas). Neste teste de convergência (Figura 5), é possível observar que a partir da malha de 40 mm (com 796 elementos finitos) ocorre uma estabilização no valor da deflexão máxima da placa. Poderia ser adotada a malha de 20 mm com 3132 elementos finitos para determinação dos resultados, porém, optou-se em adotar uma malha mais refinada do que aquela indicada no teste de convergência de malha, ou seja, foi utilizado uma malha com 11928 elementos de tamanho 10 mm na discretização dos casos apresentados na Tabela 1. É importante ressaltar que os valores constantes para a deflexão máxima obtidos por Pal et al. (2018) [9] são usados apenas como um valor de referência na Figura 5 e não têm relação com a variação do número de elementos finitos adotada no presente estudo.

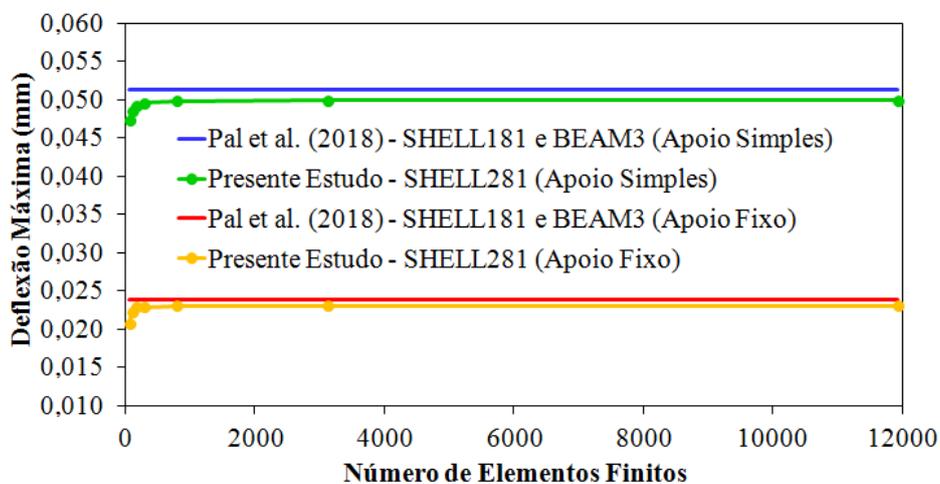


Figura 5: Teste de convergência de malha para a condição de bordas simplesmente apoiadas e condição de bordas engastadas.

A Figura 6 mostra os resultados obtidos no presente estudo para a deflexão máxima dos casos da Tabela 1 em comparação aos resultados de Pal et al. (2018) [9], para os dois tipos de vinculação da placa: simplesmente apoiada e engastada. Cabe destacar que a linha pontilhada serve apenas para auxiliar na visualização e comparação dos resultados, não indicando necessariamente uma continuidade entre as diferentes configurações de enrijecedor.

Qualitativamente, é possível notar na Figura 6 uma boa concordância entre os resultados gerados com o modelo computacional proposto e os apresentados em Pal et al. (2018) [9]. Para quantificar as diferenças existentes, os valores de deflexão máxima para os 25 casos da Tabela 1, nos dois tipos de condições de contorno investigados, bem como a diferença relativa entre o presente estudo e Pal et al. (2018) [9], são mostrados na Tabela 2.

A partir da Tabela 2 foi possível inferir que as diferenças relativas máximas foram em torno de 5%, indicando que o modelo computacional proposto conseguiu reproduzir os resultados de Pal et al. (2018) [9] de forma adequada. Além disso, diferenças relativas médias de 3,30% e de 2,42%, respectivamente, para as placas com apoio simples e com apoio fixo, foram atingidas se considerados os 25 casos analisados. Portanto, diante desses resultados pode-se considerar que o modelo computacional desenvolvido foi devidamente verificado.

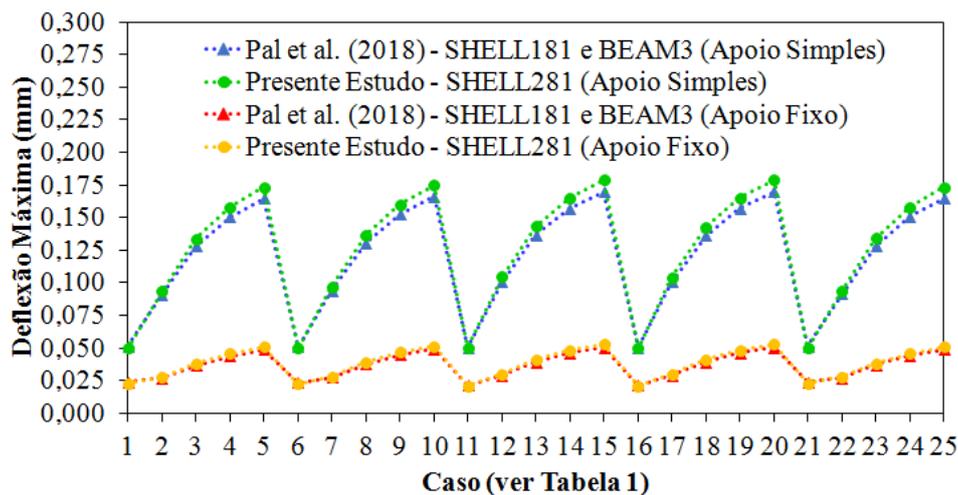


Figura 6: Deflexão máxima para os casos da Tabela 1 com a condição de bordas simplesmente apoiadas e com a condição de bordas engastadas.

Tabela 2: Tabela 2- Deflexão máxima, em mm, para os casos da Tabela 1.

Caso	Placa Simplesmente Apoiada			Placa Engastada		
	Pal et al. (2018) [9]	Presente Estudo	Diferença Relativa (%)	Pal et al. (2018) [9]	Presente Estudo	Diferença Relativa (%)
1	0,0513	0,0499	-2,73	0,0239	0,0230	-3,77
2	0,0908	0,0936	3,08	0,0271	0,0275	1,48
3	0,1279	0,1338	4,61	0,0369	0,0382	3,52
4	0,1506	0,1580	4,91	0,0440	0,0459	4,32
5	0,1647	0,1732	5,16	0,0486	0,0509	4,73
6	0,0508	0,0498	-1,97	0,0233	0,0225	-3,43
7	0,0939	0,0970	3,30	0,0277	0,0282	1,81
8	0,1306	0,1367	4,67	0,0377	0,0391	3,71
9	0,1527	0,1603	4,98	0,0446	0,0466	4,48
10	0,1664	0,1750	5,17	0,0492	0,0515	4,67
11	0,0505	0,0501	-0,79	0,0213	0,0208	-2,35
12	0,1008	0,1046	3,77	0,0292	0,0300	2,74
13	0,1365	0,1432	4,91	0,0394	0,0411	4,31
14	0,1572	0,1653	5,15	0,0461	0,0482	4,56
15	0,1700	0,1789	5,24	0,0505	0,0528	4,55
16	0,0503	0,0499	-0,80	0,0214	0,0208	-2,80
17	0,1004	0,1043	3,88	0,0291	0,0299	2,75
18	0,1364	0,1430	4,84	0,0394	0,0410	4,06
19	0,1572	0,1653	5,15	0,0461	0,0482	4,56
20	0,1700	0,1789	5,24	0,0504	0,0528	4,76
21	0,0514	0,0500	-2,72	0,0238	0,0231	-2,94
22	0,0915	0,0942	2,95	0,0272	0,0278	2,21
23	0,1284	0,1342	4,52	0,0370	0,0384	3,78
24	0,1508	0,1583	4,97	0,0440	0,0459	4,32
25	0,1648	0,1732	5,10	0,0487	0,0509	4,52

Adicionalmente, a fim de avaliar a influência da geometria do enrijecedor na análise da deflexão máxima que ocorre no centro da placa, foram comparados os casos com maior e menor valores de deflexão central para cada tipo de condição de vinculação da placa. Considerando a Figura 6 e a Tabela 2, quando analisada a condição de contorno de apoio simples o caso que apresentou a menor deflexão central foi o 6 (0,0498 mm) e o caso 15 teve a maior deflexão central (0,1789 mm), ocorrendo uma redução de 3,58 vezes no valor da deflexão máxima entre ambos os

casos. Já para as placas com as bordas engastadas, a menor deflexão aconteceu no caso 11 (0,0208 mm) e a maior no caso 15 (0,0528 mm), existindo aqui uma redução de 2,54 vezes no valor da deflexão máxima entre o pior e o melhor caso.

A Figura 7 representa a configuração deformada para os casos em que ocorreram a menor e maior deflexão na placa para as condições de bordas com apoios simples e bordas fixas, sendo possível identificar facilmente que sua deflexão máxima ocorre na região central da estrutura.

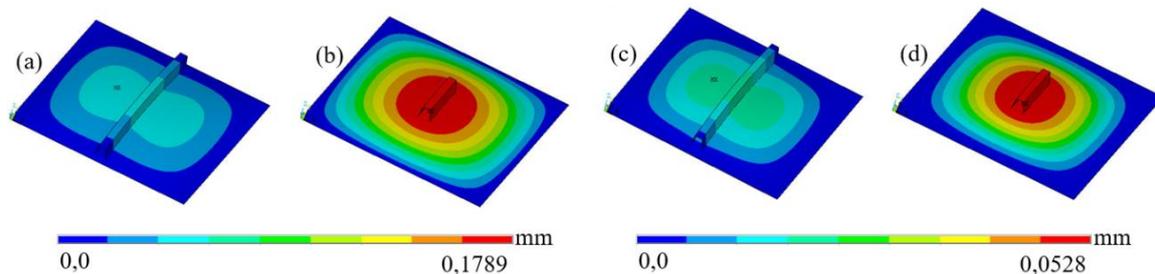


Figura 7: Menor e maior deflexão resultantes, sendo (a) Caso 6 e (b) Caso 15 com a condição de bordas simplesmente apoiadas; (c) Caso 11 e (d) Caso 15 considerando as bordas da placa engastadas.

Nas duas condições de vinculação propostas, o caso 15 (Tabela 1) que apresenta a menor dimensão do enrijecedor, obteve os maiores valores de deflexão máxima na região central. Já em relação à análise da menor deflexão, apesar de não possuir o maior enrijecedor em termos de comprimento, o caso 6 obteve uma deflexão máxima menor para a condição de bordas simplesmente apoiadas quando comparado ao caso 1 que tem o maior enrijecedor. A diferença de comprimento entre eles é de 23,12 mm e a diferença relativa entre os resultados foi de apenas 0,20%. Quando analisada a vinculação de bordas engastadas, a menor deflexão foi no caso 11 que, apesar de não ser o maior enrijecedor, possui um dos maiores comprimentos. A partir disso, é possível observar que o comprimento do enrijecedor tem influência direta na análise da deflexão máxima em placas.

4. CONCLUSÃO

O trabalho realizado nesta pesquisa apresentou resultados satisfatórios quanto à verificação do modelo computacional proposto. A diferença máxima encontrada no estudo de caso 1 foi de 1,40% em relação aos resultados de Tharian e Nandakumar (2013) [3]. Analisando o estudo de caso 2, obteve-se uma diferença média de 3,30% para as placas simplesmente apoiadas e de 2,42% para as placas com bordas fixas, comparando com os resultados de Pal et al. (2018) [9]. A partir disso, conclui-se que o modelo computacional proposto foi devidamente verificado. Pretende-se, em trabalhos futuros, seguir a análise de deflexões em placas com enrijecedores do tipo viga-caixão com formato trapezoidal e estudar também as tensões resultantes do carregamento aplicado na estrutura.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Barría C. Como uma das maiores crises de transporte marítimo da história pode afetar seu bolso [Internet]. BBC News; 05 set 2021 [citado em 19 jul 2022]. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-58454798>
2. Rocha. Transporte marítimo: As 5 maiores vantagens de escolher esse modal. Rocha Terminais Portuários e Logística; 2021 [citado em 19 jul 2023]. Disponível em: <https://www.rochalog.com.br/vantagens-transporte-maritimo/>
3. Tharian MG, Nandakumar CG. Hat stiffened plates for ship building. *Int J Appl Eng Res Dev*. 2013 Mar;3(1):1-100.
4. Troina GS, Cunha ML, Pinto VT, Rocha LAO, Dos Santos ED, Fragassa C, et al. Computational modeling and design constructal theory applied to the geometric optimization of thin steel plates with stiffeners subjected to uniform transverse load. *Metals*. 2020 Feb;10(2):220. doi: 10.3390/met10020220
5. Nogueira CM, Pinto VT, Rocha LA, Dos Santos ED, Isoldi LA. Numerical simulation and constructal design applied to plates with different heights of transverse and longitudinal stiffeners. *Eng Solid Mech*. 2021 May;15:221-38. doi: 10.5267/j.esm.2020.12.001
6. Bedair OK. Analysis of stiffened plates under lateral loading using Sequential Quadratic Programming (SPQ). *Comput Struct*. 1997 Jan;62(1):63-80. doi: 10.1115/1.3077137
7. Prusty BG, Satsangi SK. Analysis of stiffened shell for ships and ocean structures by finite element method. *Ocean Eng*. 2001 Jun;28(6):621-38. doi: 10.1016/S0029-8018(00)00021-4
8. Pinto VT, Rocha LAO, Dos Santos ED, Isoldi LA. Numerical analysis of stiffened plates subjected to transverse uniform load through the constructal design method. *Eng Solid Mech*. 2022 Jan;10:99-108. doi: 10.5267/j.esm.2021.9.001
9. Pal AK, Harry NN, Upadhyay R, Kushwaha YK. Static analysis of hat stiffened plate: A parametric study. *Int J Res Eng Sci Manag*. 2018 Sept;1(9):128-31.
10. Misra SC. Design principles of ships and marine structures. Boca Raton (US): CRC Press; 2016.
11. Jia J, Ulfvarson A. Structural behavior of a high tensile steel deck using trapezoidal stiffeners and dynamics of vehicle-deck interactions. *Mar Struct*. 2005 Jan;18(1):1-24. doi: 10.1016/j.marstruc.2005.08.003
12. Kucharski DMP, Pinto VT, Rocha LAO, Dos Santos ED, Fragassa C, Isoldi LA. Geometric analysis by constructal design of stiffened steel plates under bending with transverse I-shaped or T-shaped stiffeners. *Facta Universitatis-Series Mech Eng*. 2022 Nov;20(3):617-32. doi: 10.22190/FUME211016070
13. Pinto VT, Cunha ML, Martins KL, Rocha LAO, Dos Santos ED, Isoldi LA. Bending of stiffened plates considering different stiffeners orientations. *Mag Civ Eng*. 2021 Apr;103(3):1-24 doi: 10.34910/MCE.103.10
14. Thompson MK, Thompson JM. ANSYS mechanical APDL for finite element analysis. 1. ed. Kidlington (UK): Butterworth-Heinemann; 2017.
15. Dill HD. The finite element method for mechanics of solids with ANSYS applications. Boca Raton (US): CRC Press; 2011.
16. Bianco MJ, Habtemariam AK, Könke C, Zabel V. Analysis of warping and distortion transmission in mixed shell–GBT (generalized beam theory) models. *Int J Adv Struct Eng*. 2019 Feb;11:109-26. doi: 10.1007/s40091-019-0221-9
17. Moaveni S. Finite element analysis: Theory and application with ANSYS. 3. ed. Upper Saddle River (US): Pearson Prentice-Hall; 2008.
18. ANSYS Inc. Ansys mechanical APDL element reference. Versão 14. 2011.
19. Cook RD, Malkus DS, Plesha ME, Witt RJ. Concepts and applications of finite element analysis. 4. ed. Hoboken (US): John Wiley & Sons, Inc; 2002.
20. European committee for standardization env 1993-1-5. Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-5: general rules for plated structural elements. Bruxelas (BE): CEN; 2006.
21. Zienkiewicz OC. The Finite Element Method in Engineering Science. 2 ed. London (GB): McGraw - Hill; 1979.
22. Vaz LE. Método dos Elementos Finitos em análise de estruturas. 1 ed. Rio de Janeiro (RJ): Elsevier; 2011.