SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE PLACAS DE AÇO EM ESTRUTURAS NAVAIS E OFFSHORE

LILLIAN GONÇALVES BAPTISTA[1], MAURO DE VASCONCELLOS REAL[2]

RESUMO

Placas são elementos estruturais de superfície plana amplamente empregados em engenharia, cuja espessura é pequena quando comparada com as demais dimensões. Estas estruturas laminares podem ser delimitadas por linhas retas, denominadas enrijecedores, formando parte integrante de estruturas de navios e plataformas de petróleo *offshore*. É muito comum encontrar perfurações nessas placas para inspeção e manutenção, e o tamanho desses furos tem significativa importância no desempenho da estrutura. Uma análise não-linear da flambagem com base no método dos elementos finitos, considerando-se as imperfeições geométricas iniciais e as não-linearidades do material, foi realizada para um grupo de 150 placas. A modelagem computacional foi realizada no software *ANSYS*, onde foi possível obter a carga de ruptura última para cada modelo e analisar a influência do tamanho do furo, da esbeltez e do comprimento variável na capacidade de carga das placas. Ficou evidente que a força máxima é significativamente reduzida pelo furo. Nota-se também que quanto mais espessa a placa, maior sua resistência, que a capacidade de carga é raramente afetada com a variação de seu comprimento.

PALAVRAS-CHAVES: Flambagem de Placas. Método dos Elementos Finitos. Simulação Numérica.

NUMERICAL SIMULATION OF STEEL PLATES IN NAVAL AND OFFSHORE STRUCTURES

ABSTRACT

Plates are flat surface structural elements widely used in engineering, whose thickness is small compared to other dimensions. These laminar structures can be bounded by straight lines, called stiffeners, forming part of structures of ships and offshore oil platforms. It is very common to find holes in these plates for inspection and maintenance, and the size of these holes has great importance on the structure performance. A non-linear buckling analysis, based on the finite element method, considering the initial geometric imperfections and material non-linearity was performed for a group of 150 plates. The computer modeling was performed using ANSYS software. It was possible to get the ultimate strength for each plate model and analyze the influence of the hole size, slenderness and of the variable length on the load carrying capacity of the plates. It was evident that the maximum strength is significantly reduced by the hole. It is noted also that the thicker the plate, the greater its resistance, the load capacity is rarely affected with variation of the your length.

KEYWORDS: Buckling of Plates. Finite Element Method. Numerical Simulation.

[1]Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (FURG), lilligb@gmail.com
[2]Escola de Engenharia, (FURG), mauroreal@furg.br

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Placas finas são elementos estruturais amplamente empregados em engenharia. Este fato é explicado por diversos aspectos favoráveis ligados a estes elementos, dentre os quais se destacam a elevada relação resistência-peso e a existência de eficientes métodos analíticos descrevendo seu comportamento mecânico.

Segundo Kumar [4], as placas finas limitadas por enrijecedores são parte integrante das estruturas de navios, plataformas de petróleo offshore, comportas e docas flutuantes (FIGURA 1). Aberturas são feitas nessas placas para acesso, manutenção ou redução do peso total, ocasionando uma mudança no comportamento mecânico da estrutura.

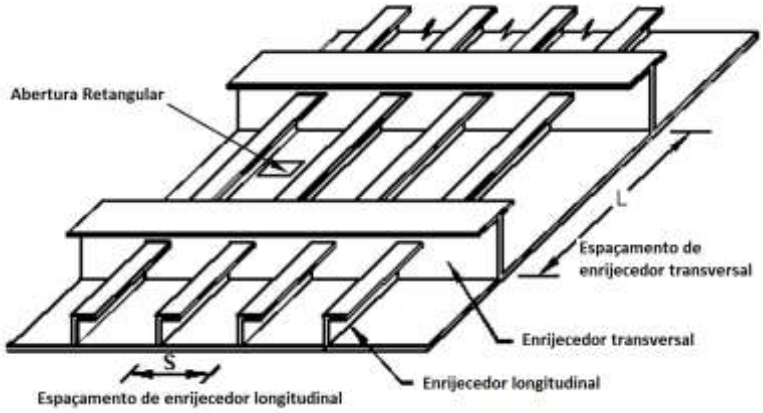

Figura 1 - Estrutura típica de um convés de navio.

Até 1930 acreditava-se que o início da flambagem de placa implicava em seu colapso, similarmente ao que se observava no comportamento de barras comprimidas [8,14]. Entretanto, com o avanço da indústria aeronáutica, diversos pesquisadores voltaram seus estudos para a instabilidade de estruturas esbeltas e concluíram que a carga de colapso de uma placa plana era realmente maior que sua carga de flambagem, mostrando que, na verdade, as placas possuem grande resistência pós-flambagem [10]. O conhecimento desta força adicional é de grande importância prática no projeto de navios e estruturas aeroespaciais, uma vez que, considerando o comportamento pós-flambagem de placas, consideráveis economias de peso podem ser obtidas.

1.2 Proposta de estudo

O objetivo deste estudo numérico com base no método dos elementos finitos é realizar a modelagem computacional no *software ANSYS* de um grupo de 150 placas finas usualmente empregadas na construção de plataformas de petróleo offshore, contendo ou não perfurações, submetidas a solicitações mecânicas de compressão uniaxial no próprio plano. Uma análise não-linear física e geométrica do comportamento pós-flambagem irá investigar a influência da espessura, comprimento da placa e tamanho do furo na resistência última.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Modelagem computacional

A modelagem computacional foi realizada no *software ANSYS* e envolve a geração de um retângulo de tamanho a x b mm com uma abertura circular centrada de diâmetro d_c (FIGURA 2).

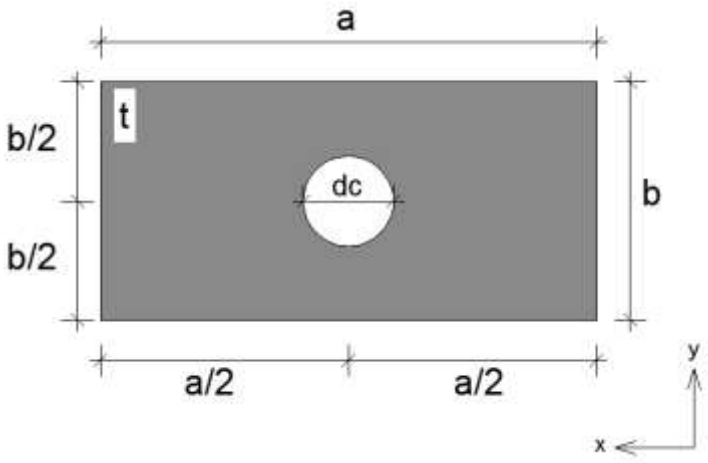

Figura 2 - Geometria das placas

Uma geometria inicial imperfeita é assumida conforme El-Sawy, Nazmy e Martini [3], sendo este valor de imperfeição igual a $w_0 = \frac{b}{2000}$, onde b é a largura da placa. Conforme Kumar [4], todas as bordas das placas foram consideradas como simplesmente

apoiadas. Todos os nós ao longo das quatro bordas foram restringidos a deflexão e rotação ao longo da direção da espessura (UZ, RZ = 0).

As bordas descarregadas podem deformar no plano, mas permanecem em linha reta. Isto é obtido através do acoplamento de todos os nós ao longo das bordas descarregados no plano de deslocamento (UY), de tal modo que os deslocamentos ao longo do comprimento da placa são uniformes. Esta condição é para gerar a situação real da placa entre reforços longitudinais e transversais. A reação da borda é restringida para obter uma força igual causada devido a borda carregada. A extremidade reativa é restringida contra a deformação axial (UX = 0) (FIGURA 3).

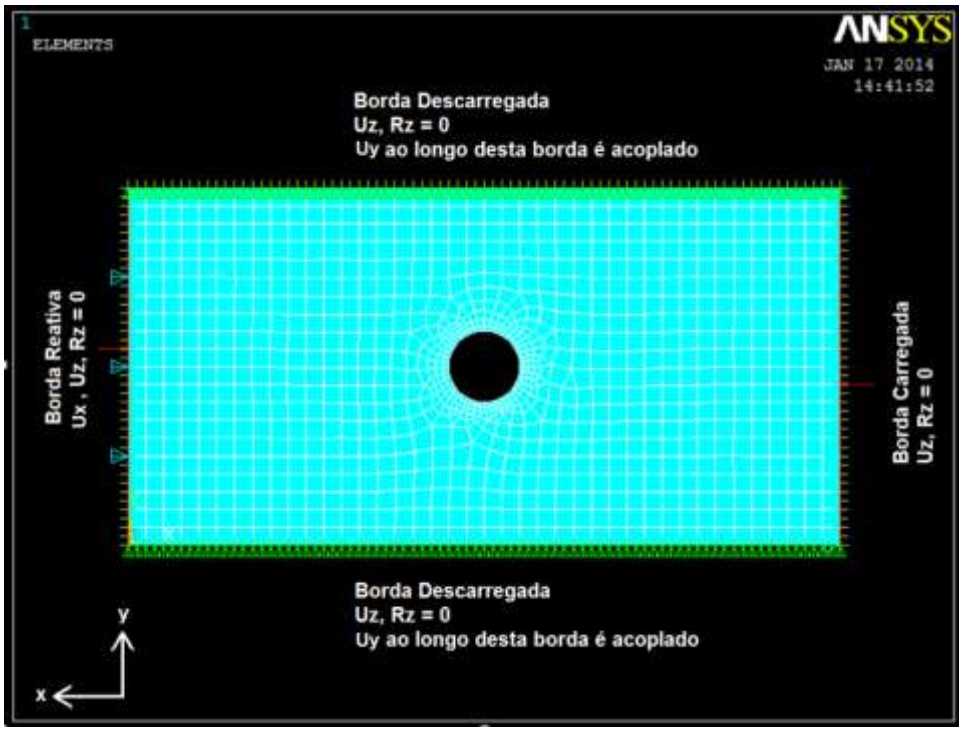

Figura 3 - Condições de contorno para modelagem das placas

Iguais incrementos de deformação axial (UX=0,010a) em x=0 são aplicados ao longo da direção do carregamento. As equações de equilíbrio não-lineares são resolvidas utilizando processo de iteração Newton Raphson. O somatório da força axial em todos os nós ao longo da borda carregada para cada incremento de deslocamento fornece a carga última resistente da amostra.

2.2 Teste de convergência do tipo de elemento

Foram escolhidos dois tipos de elementos do *software ANS*YS a fim de identificar qual deles convergia ao resultado mais rápido: *SHELL*181 e *SHELL*93. Elementos do tipo

Shell possuem grande aplicação na modelagem de estruturas finas, em que a espessura é pequena em comparação com as outras dimensões.

Foram feitos testes de convergência para os dois tipos de elementos para uma placa cujas características estão presentes na TABELA 1.

Tabela 1 - Características da placa modelo para teste de convergência do elemento

a=b (mm)	t (mm)	d (mm)	d/b
125	1,615	25	0,2
b/t	w_0 (mm)	E (GPa)	σy(MPa)
77,4	0,097	210	323,3

Os valores encontrados para os quatro testes realizados, onde o tamanho do elemento variou, estão apresentados na TABELA 2 e na FIGURA 4.

Tabela 2 - Teste de convergência do tipo de elemento

Teste	Tamanho do elemento (mm)	*SHELL*93			*SHELL*181		
		PANSYS (kN)	Erro relativo (%)	Aproximação	*PANSYS* (kN)	Erro relativo (%)	Aproximação
1	b/5	37,8709	0,0011	0,9989	38,4436	0,0096	0,9904
2	b/10	37,819	0,0025	0,9975	38,4383	0,0095	0,9905
3	b/20	37,9039	0,0002	0,9998	38,1549	0,0021	0,9979
4	b/40	37,9122	0,0000	1,0000	38,0762	0,0000	1,0000

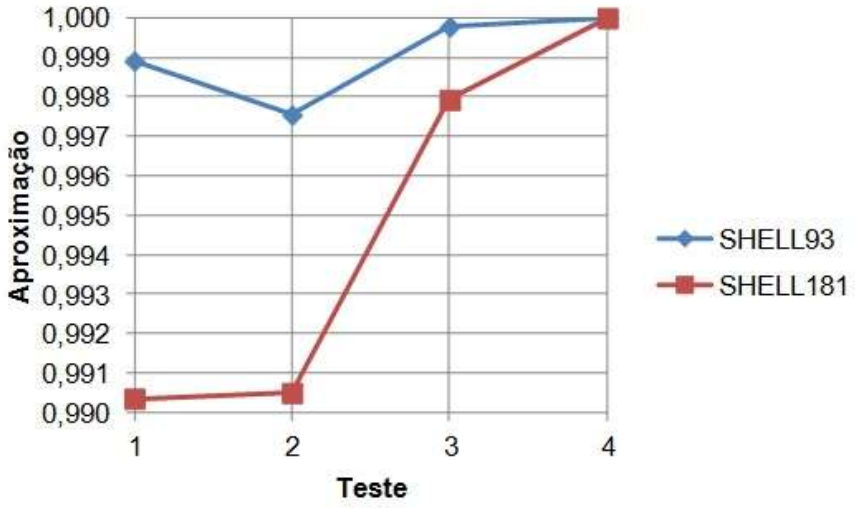

Figura 4 - Teste de convergência do tipo de elemento

O tempo de processamento para o elemento *SHELL*93 foi maior que o *SHELL*181, mas com uma malha menor, o *SHELL*93 produz resultados mais satisfatórios que o *SHELL*181. Desta forma o tipo de elemento escolhido para realizar a modelagem computacional foi o *SHELL*93.

2.3 Validação do modelo

A validação do modelo é realizada comparando-se a carga máxima encontrada através do modelo numérico rodado no *software ANSYS* com a carga máxima mostrada na TABELA 3, encontrada em testes experimentais realizados por Narayanan e Chow [5].

Tabela 3 - Valores experimentais [5].

	a=b (mm)	t (mm)	d (mm)	d/b	b/t	w_0 (mm)	E (GPa)	σy (MPa)	P_{ult} (kN)
PL1a	125	1,615	0	0,0	77,40	0,229	210	323,3	39,32
CIR2a	125	1,615	25	0,2	77,40	0,229	210	323,3	37,46
CIR2b	125	1,615	25	0,2	77,40	0,097	210	323,3	38,7
CIR3a	125	1,615	37,5	0,3	77,40	0,136	210	323,3	33,94
CIR4a	125	1,615	50	0,4	77,40	0,304	210	323,3	29,57
CIR4b	125	1,615	50	0,4	77,40	0,127	210	323,3	28,39
Cir5a	125	1,615	62,5	0,5	77,40	0,279	210	323,3	27,35
Cir6	86	2,032	25	0,3	42,32	0,254	210	334,7	42,17
Cir7	86	1,615	25	0,3	53,25	0,229	210	323,3	26,18
Cir8	86	0,972	25	0,3	88,48	0,102	210	317,6	12,35
Cir9	86	0,693	25	0,3	124,10	0,051	210	322,8	7,33
Cir10	86	2,032	40	0,5	42,32	0,102	210	334,7	33,64
Cir11	86	1,615	40	0,5	53,25	0,279	210	323,3	22,14
Cir12	86	0,972	40	0,5	88,48	0,152	210	317,6	10,89

O elemento utilizado na modelagem foi o *SHELL* 93 e a malha de elementos finitos possui tamanho igual a $b/20$, onde b é a largura da placa.

A comparação dos resultados experimentais obtido por Narayanan e Chow [5] para a capacidade de carga máxima de placas perfuradas com os valores correspondentes obtidos a partir da análise através do *software ANSYS*, dada na TABELA 4, mostra que existe uma boa concordância entre os dois conjuntos de resultados.

A subestimação ou superestimação pelo modelo numérico está dentro de um nível aceitável, onde o valor da relação P_{ANSYS}/P_{Exp} médio é 1,05, com um desvio padrão de 0,0641 e um coeficiente de variação de 6,10%.

Pode-se concluir que o modelo numérico baseado no método dos elementos finitos utilizado é capaz de modelar o comportamento e prever a capacidade de carga de placas perfuradas com precisão suficiente.

Tabela 4 - Comparação dos resultados

PLACA	$P_{ult,Exp}$ (kN)	$P_{ult,ANSYS}$ (kN)	P_{ANSYS} / P_{Exp}
PL1a	39,32	40,58	1,03
CIR2a	37,46	37,63	1,00
CIR2b	38,7	37,90	0,98
CIR3a	33,94	35,03	1,03
CIR4a	29,57	31,52	1,07
CIR4b	28,39	31,72	1,12
Cir5a	27,35	28,07	1,03
Cir6	42,17	40,15	0,95
Cir7	26,18	28,10	1,07
Cir8	12,35	13,63	1,10
Cir9	7,33	8,86	1,21
Cir10	33,64	34,24	1,02
Cir11	22,14	23,21	1,05
Cir12	10,89	11,38	1,04

2.4 Estudo paramétrico

As situações analisadas neste trabalho compreendem placas quadradas e retangulares, com ou sem perfuração, submetidas à compressão uniaxial, onde a é o comprimento, b é a largura, t é a espessura, d_c é o diâmetro do furo, E é o módulo de elasticidade do aço de 210 GPa, v é o coeficiente de *Poisson* de 0,3. O material utilizado foi o aço AH36 com tensão de escoamento σy = 355 MPa.

Os testes foram divididos em seis grupos, onde cada um apresenta variações paramétricas no tamanho da placa, na espessura e no tamanho do furo. Os valores característicos estão apresentados nas TABELAS 5 e 6.

Tabela 5 - Variações paramétricas de comprimento

	a (mm)	b (mm)	a/b
GRUPO 1	900	900	1
GRUPO 2	1800	900	2
GRUPO 3	2700	900	3
GRUPO 4	3600	900	4
GRUPO 5	4500	900	5
GRUPO 6	5400	900	6

Tabela 6 - Variações da espessura e no diâmetro do furo

t (mm)	Dc
10	0
12,5	180
15	360
19	540
22	720

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Influência do furo

A seguir serão apresentados gráficos da tensão última, obtida pela divisão da força última do ANSYS pela área $b \times t$ da seção transversal da placa, versus a deformação na direção x (ε_x), consequente dos incrementos de deslocamento UX ao longo da borda carregada (em x=0), para uma chapas de aço cuja relação $a/b = 1$, com um único furo circular centrado até e após a força máxima ser atingida, quando o tamanho do orifício (diâmetro) é variado.

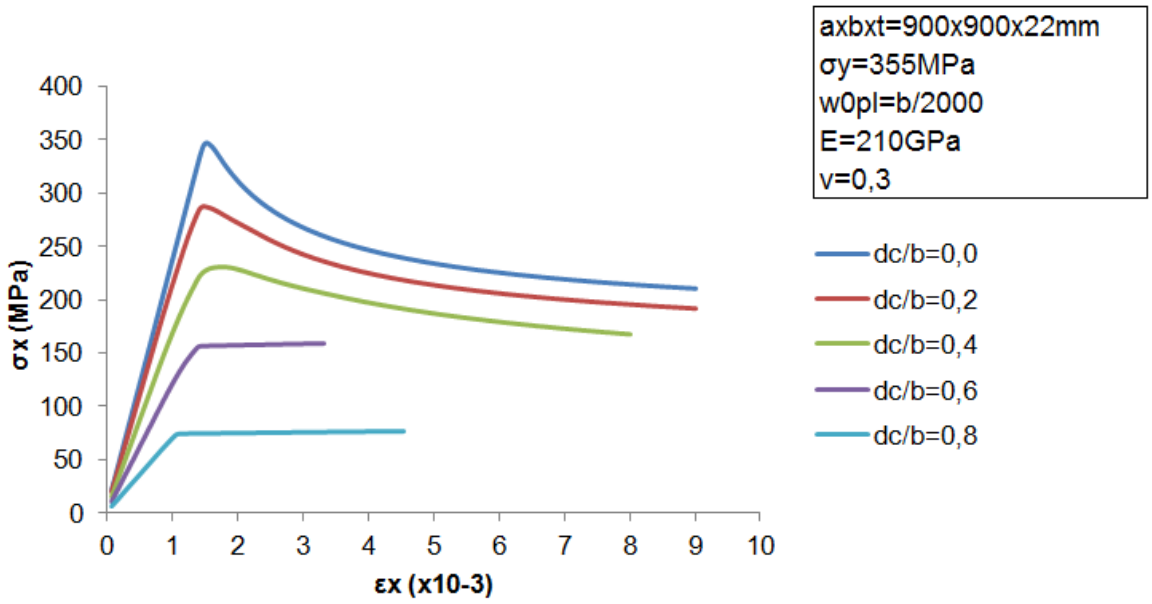

Figura 5 - Influência do furo em placa com relação a/b=1 e t=22mm

É evidente, a partir da análise da FIGURA 5 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**que a força máxima é significativamente reduzida pelo furo. Quando a área do orifício circular corresponde a 50,3% da área total da placa ($dc/b = 0{,}8$), a força máxima da placa é reduzida em aproximadamente 77,8% quando comparada com a placa maciça.

3.2 Efeito da esbeltez

A esbeltez de uma placa é um fator de forte influência na forma de como a estrutura irá sofrer flambagem, definindo se esta será elástica ou inelástica, além de determinar a carga de ruptura. Quanto mais robusta for a placa, mais resistente à flambagem ela será, o que é comprovado quando analisamos o gráfico da FIGURA 6.

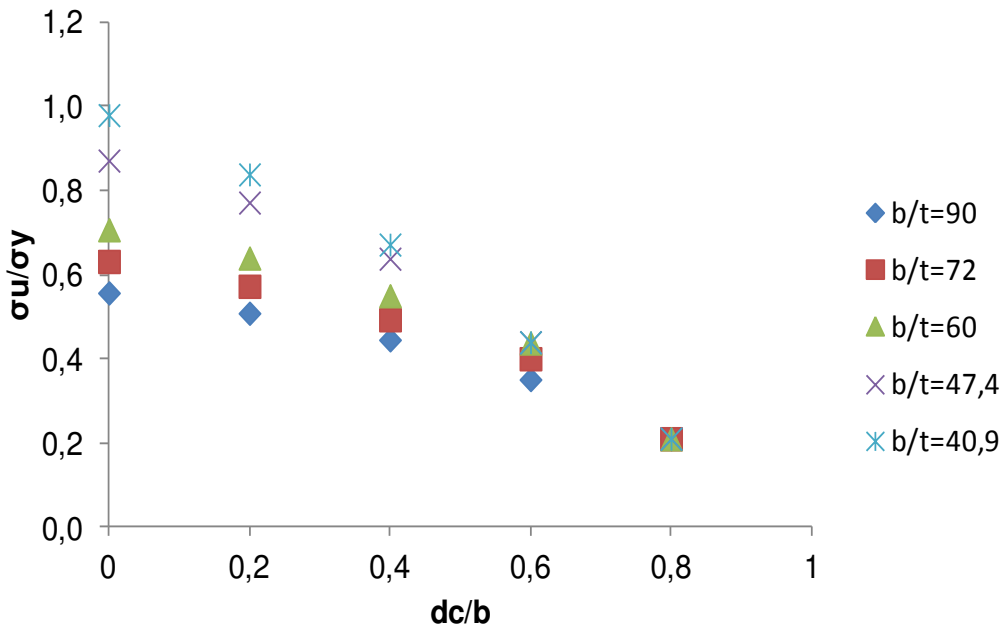

Figura 6 - Efeito da esbeltez para placa a/b=5

Para as placas ditas maciças, ou seja, sem furos, a esbeltez da placa é determinante no valor de sua resistência última. Nota-se que quanto menor a relação b/t, mais espessa a placa, e maior sua resistência. À medida que o diâmetro do furo vai aumentando, há uma convergência para o valor da tensão normal média, independentemente da espessura da placa. Tal convergência deve-se ao motivo de a carga última ser limitada pela tensão de escoamento do material e pela redução da seção transversal da placa causada pela presença do furo.

3.3 Variações no comprimento a

O gráfico da FIGURA 7 mostra os resultados obtidos para uma placa com espessura de 19mm. É interessante notar que a resistência última da placa é raramente afetada pelos aspectos de proporção a/b.

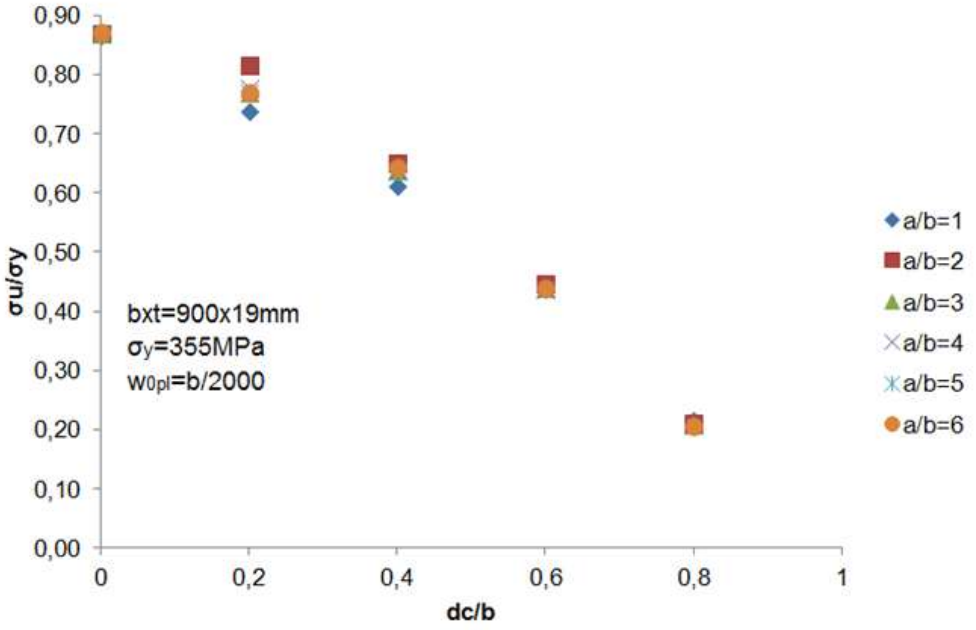

Figura 7 - Gráfico com variação no parâmetro de proporção para placa com t=19mm.

4 CONCLUSÕES

Ficou evidente que as placas maciças, ou seja, sem furo, possuem uma resistência última superior às placas perfuradas, e que a força máxima é significativamente reduzida pelo furo. Nota-se também que quanto mais espessa a placa, maior sua resistência. À medida que o diâmetro do furo vai aumentando, há uma convergência para o valor da tensão última, independentemente da espessura da placa. Na análise das variações paramétricas de proporção conclui-se que a resistência última da placa é raramente afetada com a variação de seu comprimento.

REFERÊNCIAS Bibliográficas

[1] BLEICH, F. **Theorie und berechnung der eisernen brücken**. [S.l.], Julius Springer, 1924.

[2] BRYAN, G. H. On the stability of a plane under thrusts in its own plane with applications to the buckling of the sides of a ship. [S.l.], **Proceedings of the London Mathematical Society**, v. 22, 1891.

[3] EL-SAWY, K. M.; NAZMY, A. S.; MARTINI, M. I. Elasto-plastic buckling of perforated plates under uniaxial compression. **Thin-Walled Structures**, v. 42, p. 1083-1101, 2004.

[4] KUMAR, M. S. Ultimate strength of square plate with rectangular opening under axial compression. **Journal of Naval Architecture and Marine Engineering**, 2007.

[5] NARAYANAN, R.; CHOW, F. Y. **Ultimate Capacity of Uniaxially Compressed Perforated**. [S.l.]. 1984.

[6] PAIK, J. K.; THAYAMBALLI, A. K.; KIM, B. J. Advanced ultimate strength formulations for ship plating under combined biaxial compression/tension, edge shear, and lateral pressure loads. **Marine Technology**, v. 38, p. 9-25, 2001.

[7] ROBERTS, T. M.; AZIZIAN, Z. G. Strength of perforated plates subjected to in-plane loading. **Thin-Walled Structures**, v. II, p. 153-164, 1984.

[8] ROORDA, J. **Buckling of elastic structures**. Canadá, Solid Mechanics Division, University of Waterloo Press, 1980.

[9] SAINT-VENANT, A. J. C. B. D. **Théorie de l'elasticité des corps solides**. Paris, Clebsch, 1883.

[10] SCHUMAN, L.; BACK, G. **Strength of retangular plates under edge compression**. USA, NASA Technical Report, TR, R-40, 1959.

[11] SHANMUGAM, N. E. Openings in thin-walled steel structures. **Thin-Walled Structures**, v. 28, p. 355-372, 1997.

[12] SHANMUGAM, N. E.; THEVENDRAN, V.; TAN, Y. H. Design formula for axially compressed perforated plates. **Thin-Walled Structures**, v. 34, p. 1-20, 1999.

[13] TIMOSHENKO, S. P. **Einige stabilitätsprobleme der elastizitätstheorie**. [S.l.], Zeitschrift für Mathematik und Physik, v. 58, 1910.

[14] TRAHAIR, N. S.; BRADFORD, M. A. **The behavior and design of steel structures**. 2ª Edição. ed. [S.l.], Chapman & Hall, 1988.

[15] YETTRAM, A. L.; BROWN, C. J. The elastic stability of square perforated plates. **Computers and Structures**, v. 21, p. 1267-1272, 1985.