

O Mar e os Desafios do Futuro, C. Guedes Soares e J. Beirão Reis (Eds.), Edições Salamandra, Lisboa, 2000, (ISBN: 972-689-179-5), pp.279-292

EFEITO DA GEOMETRIA E TENSÕES RESIDUAIS NA RESISTÊNCIA DE PAINÉIS REFORÇADOS À COMPRESSÃO

José Manuel Gordo e C. Guedes Soares

Unidade de Engenharia e Tecnologia Naval, Universidade Técnica de Lisboa,
Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa

Resumo

Apresenta-se o resultado de um estudo paramétrico que determina a resistência de um conjunto de placas reforçadas sujeitas a carregamento longitudinal de compressão. A resistência é estimada através de um método aproximado e simples, que se baseia na aproximação de coluna proposta por Faulkner e contabiliza os efeitos das tensões residuais. As dimensões dos escantilhões cobrem diversas configurações dando uma ideia bastante precisa do comportamento das placas reforçadas em função dos parâmetros decisórios mais importantes.

1 Introdução

O estudo do comportamento de placas finas reforçadas sujeitas a carregamentos compressivos no plano da chapa associada tem sido um assunto muito debatido ao longo dos últimos anos. Assume mais actualidade em resultado da utilização cada vez maior de aços de alta resistência em navios e outras estruturas oceanicas os quais conduzem a espessuras progressivamente mais finas. Concomitantemente, os coeficientes de segurança utilizados no projecto das estruturas são tendencialmente cada vez menores em resultado de um melhor conhecimento do comportamento dos materiais. A conjugação de estes dois factos origina estruturas muito sensíveis à instabilidade em compressão, conduzindo muitas vezes a um colapso ‘premature’, ou dito de outra forma, a um colapso sob a acção de tensões muito inferiores à tensão de cedência do material em compressão.

Intimamente associada a esta degradação de resistência, está a existência de imperfeições geométricas iniciais e as tensões residuais resultantes dos processos de fabrico em estaleiro, nomeadamente da soldadura.

Assim, ao nível dos avaliadores da qualidade dos projectos, com especial relevância para as Sociedades Classificadoras mais importantes, tem sido feito um grande esforço de actualização das regras de orientação para dimensionamento de estruturas, tendo vindo a ser progressivamente considerado o comportamento das estruturas quando sujeitas a carregamentos de compressão potencializadores de instabilidade quer nos elementos de placa entre reforços, quer nos reforços propriamente ditos ou ainda na interacção entre os dois. Além desta instabilidade manifestamente local pode-se ainda assistir a uma instabilidade de natureza mais global afectando grandes painéis do navio. No entanto este último tipo é menos frequente devido à existência de balizas bastante resistente em projectos normais.

Ao nível da investigação, todos estes aspectos têm sido bastante debatidos e estudados tendo recentemente uma das Comissões do *International Ship and Structures Congress* (ISSC) iniciado um trabalho que pretende comparar os diversos métodos disponíveis e utilizados por diferentes projectistas para dimensionamento de placas reforçadas de chapa fina. O presente estudo insere-se nesse trabalho e vem no seguimento do desenvolvimento pelos autores de um método mais vasto que, além de permitir avaliar a resistência deste tipo de elementos estruturais, fornece ainda informação sobre a resistência do casco de navios sob a acção de momentos flectores globais (Gordo *et al.* 1996).

2 Breve descrição do método

O método utilizado neste trabalho é um método aproximado baseado na formulação de Faulkner (Faulkner 1975) para a determinação da resistência máxima de placas reforçadas sujeitas a carregamentos compressivos. Esta formulação foi generalizada de forma a prever a curva tensão-alongamento tanto na fase elástica e elasto-plástica como no regime pós colapso, mais vulgarmente designado por resistência residual (Gordo e Guedes Soares 1993).

2.1 Resistência da Chapa Associada

O método considera níveis de imperfeições iniciais médios para a chapa associada dados por $d/t=0.1\beta_o^2$, onde d é a amplitude máxima das distorções, t é a espessura e β_o é a esbeltez nominal da placa. O método pode ser generalizado para ter em conta de forma explícita as imperfeições iniciais da placa, utilizando a formulação de Guedes Soares (1988). O nível de tensões residuais pode ser controlado a partir da largura da faixa em tensão de tracção, η , através da relação:

$$\bar{\sigma}_r = \frac{\sigma_r}{\sigma_o} = \frac{2\eta}{b-2\eta} \quad (1)$$

onde b é a largura da placa e σ_o é a tensão de cedência do material.

O material é considerado ter um comportamento linear perfeitamente plástico, o qual, ao ser corrigido do efeito das tensões residuais, pode ser representado matematicamente por:

$$\phi_r = \max \left\{ -1, \min \left(1, \varepsilon, \frac{\bar{\sigma}_r \cdot \varepsilon + 1 - \bar{\sigma}_r}{1 + \bar{\sigma}_r} \right) \right\} \quad (2)$$

onde ε é o alongamento normalizado pelo alongamento de cedência.

A largura efectiva da chapa associada para cada alongamento do apoio, b_e , é estimada através da fórmula de Faulkner generalizada:

$$\frac{b_e}{b} \equiv \phi_w = \frac{2}{\beta} - \frac{1}{\beta^2} \quad (3)$$

em que β é igual a $\beta_o \cdot \sqrt{\varepsilon}$. Com estas expressões simples fica definido o comportamento da placa para toda a gama útil de alongamentos. Finalmente o estado de tensão médio a que está sujeita a placa é o produto das duas expressões anteriores, ϕ_w e ϕ_r .

2.2 Resistência da Placa Reforçada

Uma vez definido o estado de tensões médio dos elementos de placa para cada alongamento, torna-se necessário incluir o comportamento do reforço o qual é condicionado pelo estado de deformação da placa e vice-versa. A formulação escolhida para prever a resistência da placa reforçada (Faulkner 1975) só parcialmente inclui esta interacção através da variação da largura efectiva da chapa associada, pelo que se tornou necessário complementar o método com a teoria de instabilidade lateral ou torsional do reforço (Faulkner *et al* 1973) a qual inclui a interacção placa reforço.

Na sua forma inicial que considera unicamente o colapso devido à flexão do conjunto placa-reforço como coluna, a resistência é avaliada pela fórmula de Johnson-Ostenfeld ponderada pela percentagem da área efectiva na área total, a qual pode ser expressa por:

$$\phi_c = \phi_e \cdot \frac{A_s + b_e t}{A_s + b t} \quad (4)$$

em que ϕ_e é a tensão crítica normalizada de Euler para a coluna composta pelo reforço e a chapa efectiva associada, corrigida pelo comportamento elasto-plástico para valores superiores a 0,5. A_s é a área seccional do reforço.

Esta formulação já foi validada com resultados experimentais e com outros métodos alternativos demonstrando-se o seu bom desempenho (Guedes Soares e Soreide, 1983).

3 Caracterização dos modelos

Os modelos utilizadas dividem-se em 18 grupos para os quais se consideraram várias espessuras da chapa associada, a saber, 10, 13, 15, 20 e 25mm, perfazendo um total de 90 modelos. Com estas cinco espessuras fica coberta a gama usual de esbeltez de placa da chaparia dos navios comerciais mais vulgares.

A geometria das placas é dividida em dois grandes grupos:

$$a \times b = 2400 \times 800\text{mm}$$

$$a \times b = 4000 \times 800\text{mm}$$

em que a é o comprimento da placa e representa tipicamente o espaçamento entre balizas. A estas dimensões corresponde razões de dimensões, a/b , de 3 e 5, respectivamente.

Os reforços considerados representam três dos quatro grandes tipos de reforços utilizados em navios, barra, 'L' e 'T', deixando por analisar os perfis bolbo devido à dificuldade de modelar a sua geometria algo complicada. No entanto este tipo de perfis pode ser entendido como tendo propriedades intermédias entre o perfil barra e o 'T'. Na Tabela 1 descreve-se a geometria da secção transversal dos perfis utilizados e associados aos diferentes grupos.

Perfil	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
Barra	150 x 17	250 x 19	350 x 35
L	150x90x9/12	250x90x10/15	400x100x12/17
T	138x9+90x12	235x10+90x15	383x12+100x17

Tabela 1 Geometria dos perfis

As características mecânicas do material são as correspondentes às de um aço de construção naval H32 com tensão de cedência de 313.6 MPa e módulo de elasticidade de 205.8 GPa. Este tipo de aço é dos mais utilizados

actualmente na construção de navios aliando boa resistência a um preço muito competitivo nas actuais condições de mercado.

3.1 Imperfeições geométricas iniciais dos modelos

As imperfeições geométricas dos modelos de placa, $a \times b \times t$, são dadas por dois termos sendo desprezados todos os restantes termos do desenvolvimento em série de Fourier da deformada da placa, w_{op} :

$$w_{op} = A_o \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} + w_{os} \quad (5)$$

O primeiro termo do segundo membro representa a elevação da chapa relativamente à superfície definida pela elevação dos reforços entre balizas, w_{os} , no segundo termo da eq. (5). A constante A_o toma o valor médio $0,1\beta^2 t$. As imperfeições do reforço são descritas por uma semi sinusóide dada por:

$$\begin{aligned} w_{os} &= B_o \sin \frac{\pi x}{a} \\ v_{os} &= C_o \sin \frac{\pi x}{a} \end{aligned} \quad (6)$$

representando a elevação e a falta de perpendicularidade resultantes dos processos tecnológicos de montagem e fabrico. As constantes B_o e C_o podem ser consideradas iguais a $0,001a$ em média (Ueda and Yao 1985).

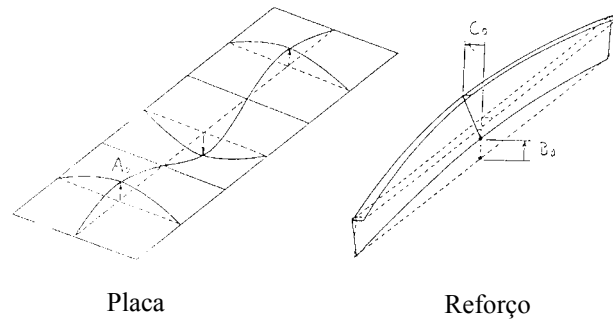


Figura 1 Definição e representação das imperfeições geométricas iniciais

3.2 Tensões residuais dos modelos

As tensões residuais da chapa associada são descritas pela eq. (1) em que a largura da faixa em tracção pode ser relacionada com a quantidade de calor debitada pela soldadura na chapa através de:

$$\eta = \frac{t_w}{2} + \frac{0,26\Delta Q}{t_w + 2t} \quad (7)$$

onde t_w é a espessura da alma do reforço e $\Delta Q = 78.8l^2$, sendo l igual a 70% da espessura da alma com máximo de 7mm (Yao 1980).

A amplitude das tensões residuais de compressão no reforço podem ser expressas por:

$$\sigma_{rr} = \frac{b_a t_a}{(h - b_a)t_a + b_f t_f} \sigma_{or} \quad (8)$$

sendo σ_{or} a tensão de cedência do reforço, b_f e t_f são respectivamente a largura e a espessura da flange, h é a altura da alma do reforço e b_a é a largura da faixa em tracção no reforço a qual pode ser expressa por:

$$b_a = \frac{t_a}{t} \left(\eta - \frac{t_a}{2} \right) \quad (9)$$

A **Figura 2** apresenta esquematicamente a distribuição de tensões residuais assumida.

4 Resistência de painéis pelo método aproximado

Os resultados da resistência dos painéis reforçados foram agrupados em dois tipos: com e sem tensões residuais. De entre estes fez-se a distinção entre as diferentes razões de dimensões, 3 e 5 respectivamente.

4.1 Placas reforçadas sem residuais

Na **Tabela 2** apresenta-se os resultados para as placas reforçadas de $a/b=3$ e na **Tabela 3** para a $a/b=5$. O índice B, L ou T significa que o reforço é uma barra, perfil 'L' ou 'T' respectivamente. O primeiro algarismo designa a razão de dimensões, os dois seguintes identificam a espessura da placa associada e os dois últimos o tipo de reforço. O alfanumérico final classifica as tensões residuais. A segunda coluna indica a tensão máxima suportada

pela placa e a terceira coluna de cada tipo de perfil dá o valor da tensão máxima normalizada pela tensão de cedência do material base.

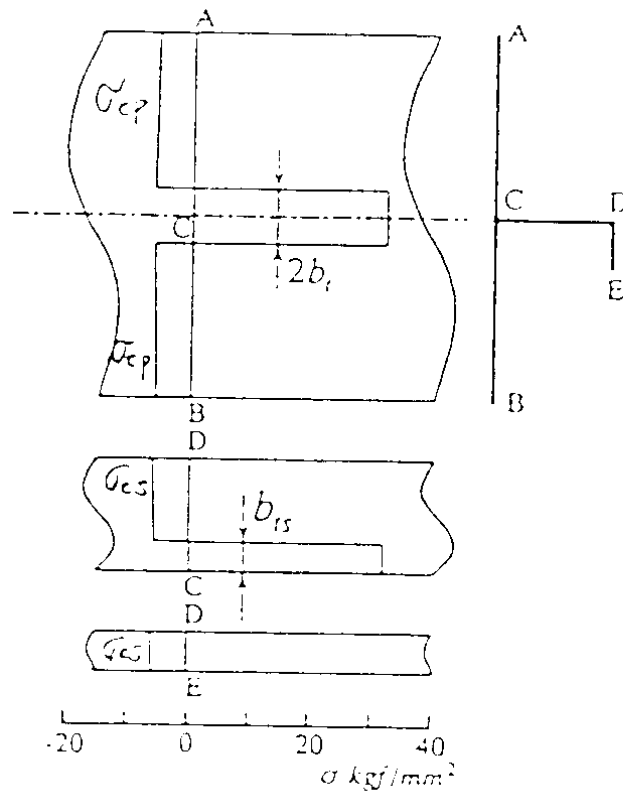


Figura 2 Distribuição das tensões residuais na placa e no reforço

Uma leitura breve da **Tabela 2** permite identificar que a eficiência dos painéis reforçados aumenta substancialmente com o aumento da espessura da placa associada qualquer que seja o tipo de perfil do reforço.

No entanto o aumento da secção transversal nem sempre origina painéis mais resistentes, apesar de normalmente o aumento de resistência acontecer com o aumento das espessuras do reforço. Considere-se por exemplo os painéis com perfil barra e espessura da chapa associada de 10mm. Do perfil 15 para o perfil 25 assiste-se um aumento de resistência da placa reforçada como seria de esperar, de 0.472 para 0.568. Mas o perfil 35 associado à mesma chapa de 10mm apresenta uma resistência muito mais reduzida, 0.424, resultado este aparentemente anormal.

Nº.	σ_u	ϕ_u	Nº.	σ_u	ϕ_u	Nº.	σ_u	ϕ_u
B31015n	148	0.472	L31015n	175	0.558	T31015n	172	0.548
B31315n	186	0.593	L31315n	208	0.663	T31315n	207	0.660
B31515n	204	0.651	L31515n	224	0.714	T31515n	220	0.702
B32015n	222	0.708	L32015n	250	0.797	T32015n	245	0.781
B32515n	229	0.730	L32515n	266	0.848	T32515n	259	0.826
B31025n	175	0.568	L31025n	172	0.548	T31025n	175	0.558
B31325n	219	0.698	L31325n	214	0.682	T31325n	216	0.688
B31525n	235	0.749	L31525n	232	0.739	T31525n	231	0.737
B32025n	263	0.839	L32025n	271	0.864	T32025n	270	0.861
B32525n	288	0.918	L32525n	290	0.925	T32525n	289	0.922
B31035n	133	0.424	L31040n	124	0.395	T31040n	128	0.408
B31335n	205	0.654	L31340n	189	0.603	T31340n	199	0.635
B31535n	234	0.746	L31540n	225	0.717	T31540n	228	0.727
B32035n	266	0.848	L32040n	263	0.839	T32040n	266	0.848
B32535n	291	0.928	L32540n	294	0.937	T32540n	294	0.937

Tabela 2 Resistência absoluta (σ_u em MPa) e normalizada (ϕ_u) das placas reforçadas sem tensões residuais de razão de dimensões 3.

A única razão plausível resulta do painel apresentar um grande desequilíbrio de resistência à instabilidade elástica entre o reforço e a placa associada, originando-se fenómenos de interacção entre a placa e o reforço que, neste caso, sendo a placa menos resistente e instabilizando primeiro, induzem a instabilização prematura do reforço, diminuindo substancialmente a resistência global. Esta degradação de resistência é perfeitamente identificável na **Figura 3** para a espessura de 10mm e para os reforços mais espessos de cada tipo, B35, L40 ou T40.

Este tipo de resultados não é tão marcado para as placas reforçadas com um comprimento 5 vezes superiores à largura, **Tabela 3**.

Os diversos perfis do tamanho 15 apresentam uma resistência ridiculamente baixa o que mostra a inadequabilidade da utilização deste perfil para espaçamentos entre balizas tão elevado; o aumento da espessura da chapa associada ao perfil 15 não resulta também em aumento da resistência, leia-se eficiência, por aumento da esbeltez da placa.

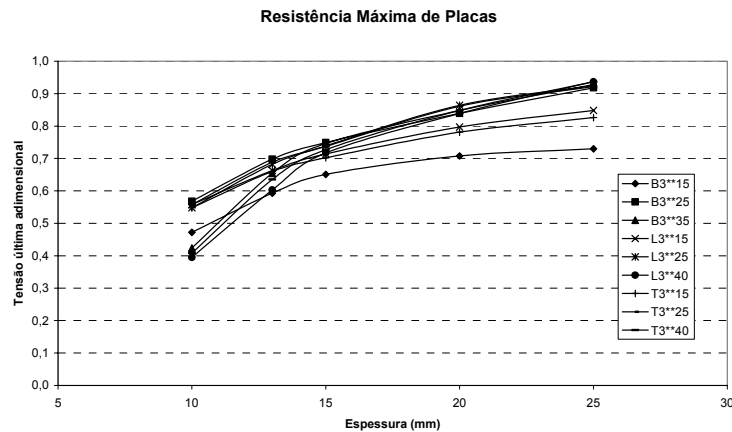


Figura 3 Representação gráfica da resistência dos painéis com $a/b=3$

Nos perfis de maiores secções transversais a tendência geral é a esperada e já descrita para as placas $a/b=3$ continuando-se a não notar uma diferença qualitativa entre os perfis equivalentes dos vários tipos.

Nº.	σ_u	ϕ_u	Nº.	σ_u	ϕ_u	Nº.	σ_u	ϕ_u
B51015n	133	0.424	L51015n	167	0.533	T51015n	160	0.510
B51315n	136	0.434	L51315n	181	0.577	T51315n	173	0.552
B51515n	135	0.430	L51515n	189	0.603	T51515n	179	0.571
B52015n	125	0.398	L52015n	199	0.635	T52015n	185	0.589
B52515n	113	0.360	L52515n	199	0.635	T52515n	180	0.574
B51025n	158	0.504	L51025n	184	0.587	T51025n	183	0.584
B51325n	203	0.647	L51325n	210	0.669	T51325n	207	0.660
B51525n	220	0.702	L51525n	222	0.708	T51525n	224	0.714
B52025n	250	0.797	L52025n	256	0.816	T52025n	252	0.804
B52525n	263	0.839	L52525n	271	0.864	T52525n	266	0.848
B51035n	162	0.517	L51040n	153	0.488	T51040n	162	0.517
B51335n	201	0.641	L51340n	207	0.660	T51340n	208	0.663
B51535n	220	0.702	L51540n	224	0.714	T51540n	224	0.714
B52035n	256	0.816	L52040n	258	0.823	T52040n	257	0.819
B52535n	283	0.902	L52540n	288	0.918	T52540n	287	0.915

Tabela 3 Resistência absoluta (σ_u em MPa) e normalizada (ϕ_u) das placas reforçadas sem tensões residuais de razão de dimensões 5.

A **Figura 4** mostra claramente que a eficiência dos perfis 15 é manifestamente inferior aos restantes sendo de concluir que esta ineficiência resulta da existencia de colapso induzido por instabilidade lateral-torsional do reforço. Apesar das placas reforçadas 15 serem equivalentes quanto à resistência à flexão devido ao facto de apresentarem semelhante momento de inércia, os perfis 15 dos diversos tipos apresentam diferentes resistências à instabilidade lateral-torsional, sendo esta resistência inferior para os perfis barra e maior para os perfis do tipo 'L'. Este tipo de instabilidade está associado de alguma forma ao momento polar de inércia em torno do ponto de soldadura do perfil à placa e esta é a razão da curva do perfil barra estar muito mais abaixo das duas outras.

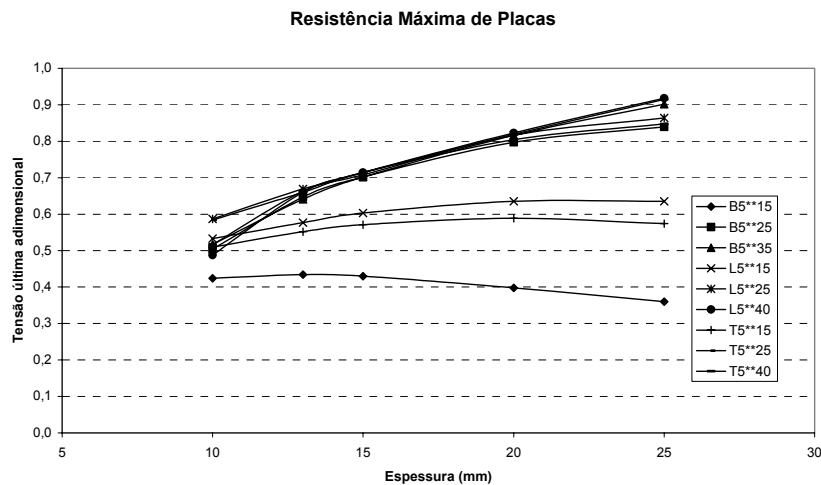


Figura 4 Representação gráfica da resistência dos painéis com $a/b=5$

4.2 Placas reforçadas com tensões residuais

Para efeitos comparativos foram analisadas as mesmas placas reforçadas com tensões residuais apresentando-se aqui unicamente os resultados para os perfis barra. O método utilizado só permite a introdução de tensões residuais nos elementos de placa, utilizado-se as correções ao comportamento do material dadas pela equação (2). O cálculo das tensões residuais compressivas é efectuado através das equações 1 e 7 e é apresentado na última coluna da Tabela 4. Nota-se que as tensões residuais compressivas da placa baixam com a espessura da mesma não apresentando grandes diferenças para os diferentes perfis.

A segunda coluna indica a tensão máxima suportada pelo painel e a terceira coluna a eficiência do mesmo. As conclusões tiradas anteriormente para placas sem tensões residuais aplicam-se também às placas com tensões

residuais havendo um aumento da tensão máxima suportada quando a espessura aumenta e em igualdade de perfil.

É também evidente a redução excessiva da tensão máxima quando o perfil é desadequado à placa, B31015y com uma eficiência de 0.536 e B31035y com eficiência de 0.475. Nos casos normais a tensão máxima aumenta com o aumento das dimensões do perfil, o que é o mesmo que dizer neste caso com o aumento do momento de inércia do perfil.

Nº.	σ_u	ϕ_u	b_t	ϕ_{Cr}
B31015y	168	0.536	36.18	0.10
B31315y	193	0.615	31.99	0.09
B31515y	203	0.647	29.81	0.08
B32015y	220	0.702	25.75	0.07
B32515y	226	0.721	22.94	0.06
B31025y	202	0.644	34.81	0.10
B31325y	225	0.717	32.18	0.09
B31525y	241	0.768	30.75	0.08
B32025y	262	0.835	27.94	0.08
B32525y	280	0.893	25.89	0.07
B31035y	149	0.475	35.08	0.10
B31335y	224	0.714	32.93	0.09
B31535y	241	0.768	31.73	0.09
B32035y	269	0.858	29.34	0.08
B32535y	285	0.909	27.55	0.07

Tabela 4 Resistência absoluta (σ_u em MPa) e normalizada (ϕ_u) das placas reforçadas Barra com tensões residuais de razão de dimensões 3.

Na **Figura 5** comparam-se graficamente os perfis barra com e sem tensões residuais identificando-se imediatamente os comentários feitos anteriormente e permitindo identificar alguma insensibilidade da tensão máxima ao efeito das tensões residuais. Convém no entanto realçar que os valores previstos para as tensões residuais são relativamente baixos, entre 7 e 10% da tensão de cedência, o que justifica de alguma forma a sobreposição de resultados.

As maiores diferenças voltam a acontecer para as baixas espessuras, com tensões residuais mais altas, e para os perfis maiores, série 35.

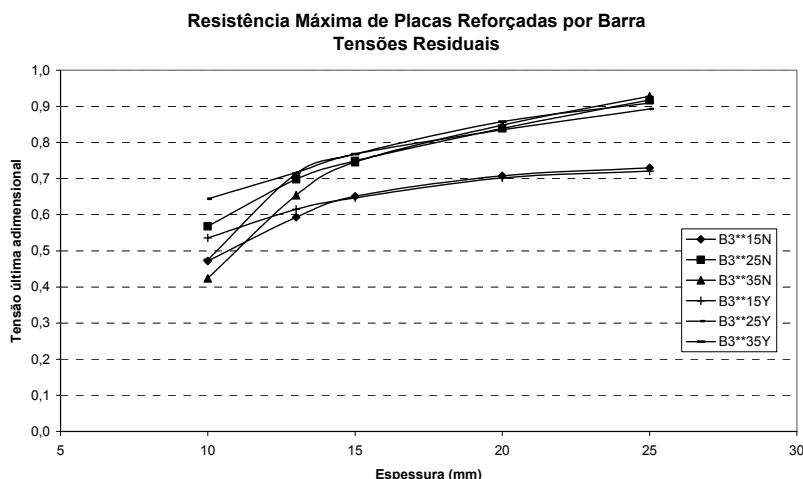


Figura 5 Comparação entre a resistência normalizada (ϕ_u) das placas reforçadas Barra com e sem tensões residuais, $a/b=3$.

5 Conclusões

O dimensionamento tradicional dos painéis de chapa fina reforçada à pressão lateral é insuficiente devido à presença de eventuais tensões planares de compressão que podem induzir um colapso prematuro.

A instabilidade elástica degrada bastante a resistência à compressão sendo essencial um bom equilíbrio entre o dimensionamento do reforço e da placa para obter um bom projecto e bons níveis de resistência.

Por outro lado não existem grandes diferenças no comportamento mecânico entre perfis equivalentes mas de diferente geometria; a esbeltez de coluna associada ao espaçamento entre balizas poderá degradar bastante a resistência dos perfis mais pequenos mas esta esbeltez depende essencialmente do momento de inércia do conjunto pelo que perfis equivalentes em termos inerciais tendem a ter a mesma resistência a não ser que existam fenómenos de instabilidade lateral-torcional.

As tensões residuais poderão não ter um impacto muito negativo. O seu impacto é maior na forma carga alongamento do que na resistência última da placa reforçada.

6 Agradecimento

Os autores agradecem à Sandra Ralheta pela execução cuidadosa dos cálculos que serviram de base à análise aqui apresentada.

7 Referências

Faulkner, D., (1975), "A review of effective plating for use in the analysis of stiffened plating in bending and compression", *Journal of Ship Research*, 19, pp.1-17.

Faulkner, D., Adamchak, J. C., Snyder, G. J. e Vetter, M. F., (1973), "Synthesis of welded grillages to withstand compression and normal loads", *Computers and Structures*, 3, pp. 221-246.

Gordo, J. M. e Guedes Soares, C., (1993), "Approximate load shortening curves for stiffened plates under uniaxial compression" D. Faulkner, M. J. Cowling A. Incecik and P. K. Das (Ed.), *Integrity of Offshore Structures – 5*, Warley, U.K., EMAS, pp.189-211.

Gordo, J. M., Guedes Soares, C. e Faulkner, D., (1996), "Approximate Assessment of the Ultimate Longitudinal Strength of the Hull Girder", *Journal of Ship Research*, Vol. 4., No. 1, pp- 60-69.

Guedes Soares, C., (1988), "Design Equation for the Compressive Strength of Unstiffened Plate Elements with Initial Imperfections", *J. Constructional Steel Research*, Vol. 9, pp. 287-310.

Guedes Soares, C. e Soreide, T. H., (1983), "Behaviour and Design of Stiffened Plates Under Predominantly Compressive Loads", *International Shipbuilding Progress*, Vol. 30, Nº 341, pp. 13-27.

Ueda, Y. e Yao, T., (1985), "The influence of complex initial deflection modes on the behaviour and ultimate strength of rectangular plates in compression", *Journal of Constructional Steel Research*, 5, pp.265-302.

Yao, T., (1980), "Compressive ultimate strength of structural members in ship structures", Tese de Doutorado, (em Japonês).

EFFECTS OF THE GEOMETRY AND RESIDUAL STRESSES ON THE COMPRESSIVE STRENGTH OF STIFFENED PANELS

José Manuel Gordo and C. Guedes Soares

Unit of Marine Technology and Engineering, Technical University of Lisbon,
Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa

Abstract

The results of a parametric study on the strength of stiffened panels under longitudinal in plane compression are presented. The strength assessment is based on an approximate method based on Faulkner's formulation that accounts for residual stress effects. The geometry of the scantlings covers a wide range of the decision parameters, thus one may have a precise idea of the behaviour of a particular configuration.