

INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA E DO MATERIAL NA RESISTÊNCIA ÚLTIMA DE PLACAS REFORÇADAS

José Manuel Gordo¹ e Carlos Guedes Soares²

RESUMO

Estuda-se a influência de diversos parâmetros na resistência à compressão de placas reforçadas através de um programa de elementos finitos. Dada a diversidade de parâmetros que afectam a resistência à compressão de placas reforçadas, limitou-se o seu número, tendo-se considerado três tipos de esbelteza da placa associada ($b/t = 40, 50$ e 80), três tipos de perfis (barra, ângulo e 'T'), dois modos de imperfeições iniciais e diversas combinações das características mecânicas do aço. Analisa-se as implicações resultantes da variação destes parâmetros na resistência máxima e no comportamento pré e pós colapso.

1. INTRODUÇÃO

O estudo das placas reforçadas sujeitas à compressão axial é vulgarmente orientado para a determinação da carga máxima suportada pela viga coluna, pois é esta carga que é referida nos códigos de projecto e construção das indústrias naval e civil. No entanto, no estudo de estruturas de maiores dimensões, com maior grau de complexidade e alguma redundância, em que coexistem elementos em diferentes estágios de carregamento, torna-se importante conhecer o comportamento dos elementos constitutivos a qualquer nível de carregamento com um certo grau de precisão.

Assim acontece no estudo da resistência do casco de navios à flexão em que os diversos elementos reforçados do casco estão a diferentes níveis da sua capacidade de carga para uma determinada curvatura do casco naquela secção. Pode inclusivamente acontecer que o momento máximo suportado seja atingido quando alguns dos elementos já cederam, encontrando-se em regime pós colapso. Devido à redundância da estrutura, a perda de capacidade de carga de alguns elementos é transferida para elementos menos carregados, podendo o conjunto apresentar uma reserva de resistência a esforços maiores.

O estudo do comportamento de placas finas reforçadas sujeitas a carregamentos compressivos no plano da placa assume mais actualidade em resultado da utilização cada vez maior de aço de alta resistência em navios e outras estruturas oceânicas a qual conduz a espessuras progressivamente mais finas. Os coeficientes de segurança utilizados no projecto

¹ Professor Auxiliar, Instituto Superior Técnico, UETN, Lisboa.

² Professor Catedrático, Instituto Superior Técnico, UETN, Lisboa.

das estruturas são tendencialmente menores em resultado de um melhor conhecimento do comportamento dos materiais. A conjugação destes 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.

2. ESTUDO SISTEMÁTICO

Estudou-se numericamente várias placas reforçadas características de navios, através de um programa de elementos finitos [1]. Os modelos são constituídos por uma placa suportada por um reforço em posição central e longitudinal.

2.1 Condições de Fronteira dos Modelos

As condições de fronteira genéricas impostas assumem simetria em ambos os bordos as quais são lateralmente inamovíveis, isto é, bordos restringidos, e simetria verticalmente móvel nos topos representando o meio do vão entre balizas. No centro do modelo impuseram-se condições fronteira que simulam a influência da baliza: imobilidade vertical dos nós pertencentes à placa e manutenção da condição plana da secção correspondente à ligação à baliza. Nessa secção, é negada a possibilidade de movimento lateral do perfil devido à sua soldadura à baliza.

Na Tabela 1 resumem-se as condições fronteira utilizadas.

Grau de Liberdade	Topo Móvel			Baliza			Topo Fixo		
	PL	AR	FR	PL	AR	FR	PL	AR	FR
Elemento	PL	AR	FR	PL	AR	FR	PL	AR	FR
Deslocamento X	DI	DI	DI	L	L	L	R	R	R
Deslocamento Y	L	L	L	R	R	R	L	L	L
Deslocamento Z	L	L	L	R	L	L	L	L	L
Rotação RX	L	L	L	R	R	R	L	L	L
Rotação RY	R	R	R	R	R	R	R	R	R
Rotação RZ	R	R	R	R	R	R	R	R	R

Tabela 1- Condições fronteira dos modelos de placas reforçadas. Chave: PL - Placa; AR - Alma do reforço; FR - Banzo do reforço; DI - Deslocamento imposto; L - Livre; R - Restringido.

2.2 Caracterização Geométrica

Os elementos de placas escolhidos apresentam uma razão b/t de 40, 50 e 80, sendo os dois primeiros representativos de construção tradicional e o terceiro típico de construções militares ou de navios em aço de alta resistência. A razão de dimensões da placa é de 3.

As imperfeições iniciais dos elementos placas foram geradas de acordo com as condições fronteira, por forma a manter as simetrias, e formadas por três componentes: uma configuração global de deformação da placa que assume dois modos ($m=n=1$ e 3) e duas amplitudes das sinusóides, 2 e 5mm; uma configuração que caracteriza basicamente o reforço e que assume duas amplitudes, 2 e 5mm; e uma distorção do topo do reforço de 1mm de amplitude a meio vão entre balizas, Tabela 2.

Pretende-se, assim, promover o desenvolvimento de deformações associados aos três modos de colapso fundamentais: ruína da placa, ruína do reforço por flexão e por

instabilidade torcional. Qualquer destes tipos de ruína, apesar de não dependerem directamente da forma e amplitude das imperfeições iniciais, poderão ser estimulados individualmente por estas duas características geométricas de cada placa reforçada em particular.

Imperfeições		Barra		Perfil 'L'	
Placa	Reforço	w11	w31	w11	w31
5mm	2mm	BF	B	TF	T
2mm	5mm	CF	C	LF	L

Tabela 2 - Classificação dos modelos de placas reforçadas e combinações utilizadas.

Com estas duas componentes geraram-se dois grupos de placas: o primeiro com amplitude no modo fundamental, série *F, e a segunda com o modo crítico predominante. Estas diferentes imperfeições originarão modos de colapso diferentes e, conseqüentemente, todo o comportamento do elemento reforçado será afectado. As séries C e L, por oposição às séries B e T, têm uma imperfeição na base do reforço maior do que a amplitude da imperfeição da placa.

2.3 Descrição das Propriedades do Material

O material utilizado tem tensão de cedência de 240MPa e módulo de elasticidade de 210GPa, excepto nas séries *M, *N e *H, em que se usou aço de alta resistência com tensão de cedência de 320MPa respectivamente no reforço, na placa associada e simultaneamente nos dois. A utilização de diferentes propriedades do material acarreta, para a mesma geometria, diferentes esbelteza da placa reforçada e da placa associada. A tensão equivalente é calculada pela ponderação das tensões de cedência dos materiais pelas áreas respectivas através da equação 1, em que o p se refere à placa e o r ao reforço:

$$\sigma_{eq} = \frac{\sigma_{op} \cdot A_p + \sigma_{or} \cdot A_r}{A_p + A_r} \quad (1)$$

Este critério é normalmente utilizado na literatura [2,3] apesar de poder ser criticado porque os alongamentos de cedência são diferentes nos dois materiais. Resulta que um dos componentes possa estar no domínio plástico enquanto o outro está no elástico, correspondendo a cada um comportamentos muito diferenciados. Dependendo da conjugação de diversos factores, a utilização da tensão mínima como tensão de referência pode apresentar melhores resultados quando comparados com os resultados experimentais disponíveis [4].

2.4 Modelo de Elementos Finitos e Resultados Numéricos

Os modelos criados são constituídos por uma placa com reforço associado: as placas tem dimensões de 3000 por 1000mm e espessuras de 25, 20 e 12,5mm a que correspondem a esbelteza de 40, 50 e 80, respectivamente; a malha tem dimensões de 100 por 100mm resultando num total de 300 elementos na placa com 8 nós cada do tipo TCS8. O número de elementos no reforço é 120 na alma com dimensões de 100 por 40mm cada e 60 no banzo, quando existente, do mesmo tipo dos anteriores.

Os resultados obtidos podem-se agrupar por esbelteza para melhor identificar as diferenças resultantes das imperfeições iniciais. O código alfanumérico utilizado tem o seguinte significado: primeiros dois algarismos – razão b/t da placa associada; B – perfil barra; C – perfil barra com imperfeições iniciais do reforço de amplitude elevada; T – perfil 'L' com imperfeições iniciais da placa de amplitude elevada; L – perfil 'L'; F – imperfeições

iniciais da placa no modo fundamental; M – aço de alta resistência no reforço; N – aço de alta resistência na chapa associada; H – aço de alta resistência na chapa associada e no reforço.

2.4.1 Razão $b/t=40$

Na Figura 1 mostra-se o comportamento de placas com $b/t=40$ com reforços em barra, com espessura igual à da placa (B) e 20% superior (B2), e em L para as diferentes formas das imperfeições iniciais. Os perfis em L tem uma espessura da alma igual à da placa e um acréscimo de 20% na espessura do banzo o que reproduz as situações mais vulgares de projecto.

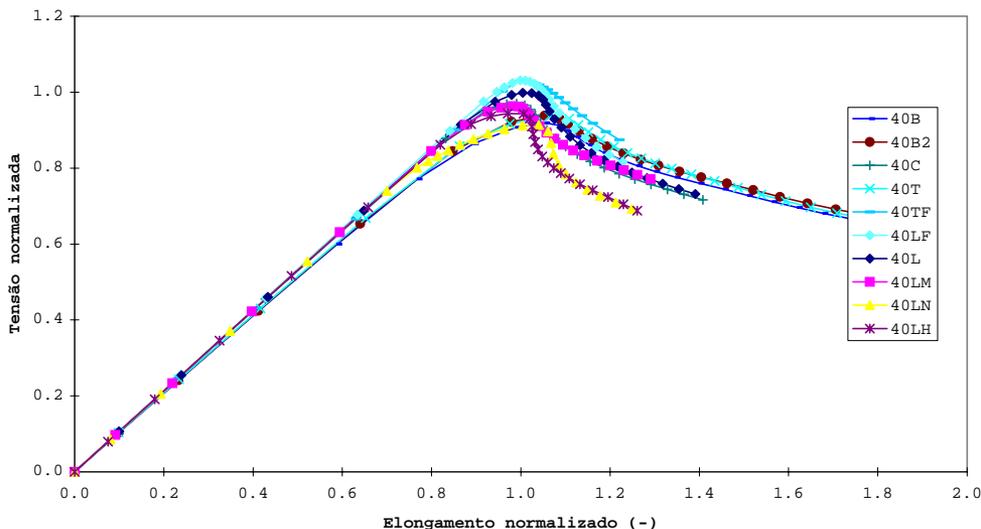


Figura 1 - Curvas tensão alongamento normalizados para placas reforçadas com espaçamento entre balizas de 3000mm e $b/t=40$.

Todas as placas reforçadas deste grupo têm uma resistência elevada, superior a 90% da tensão de cedência, associada a uma grande rigidez estrutural até ao colapso. A extensão de colapso encontra-se muito próxima da extensão de cedência.

As placas reforçadas com imperfeições de placa no modo fundamental, TF e LF, têm a maior resistência máxima e apresentam também a maior rigidez estrutural; existem pequenas diferenças de comportamento entre estas placas resultantes das imperfeições: a placa com menores distorções, LF, apresenta uma rigidez acrescida no regime de pré colapso devido à placa ser mais ‘perfeita’, mas, em contrapartida, apresenta um descarregamento superior após o colapso. Este comportamento já é conhecido das placas não reforçadas simplesmente apoiadas e reforça a convicção da grande importância do comportamento da placa no comportamento global do elemento reforçado.

É evidente a existência de três comportamentos distintos passíveis de serem agrupados: um primeiro grupo com imperfeições da placa crítica a que pertencem as placas B, B2 e T, que se apresentam menos rígidas no pré colapso, resistência máxima menor mas maior capacidade de carga no pós colapso, além de terem as extensões de colapso maiores; as placas C, L e LM com maior amplitude das imperfeições iniciais do reforço apresentam maiores rigidez e resistência máxima, com um descarregamento mais pronunciado; finalmente as placas LN e LH, com a placa associada em aço de alta resistência, têm um descarregamento abrupto.

2.4.2 Razão $b/t=50$

Este grupo de placas tem uma esbelteza superior tanto da placa como do reforço comparativamente ao grupo anterior devido às menores espessuras (-20%) para igual geometria. Continua-se a assistir a comportamentos característicos de grupos de placas em função do grau de carregamento e do nível de imperfeições, Figura 2.

No regime de pré colapso é evidente a existência de dois níveis de rigidez: o primeiro, mais flexível, correspondente às placas detentoras de maiores amplitudes das imperfeições no modo crítico; o segundo agrupa todas as restantes até cerca de 80% da carga nominal independentemente das características que as distinguem, quer geométricas, do modo das imperfeições ou das propriedades do material.

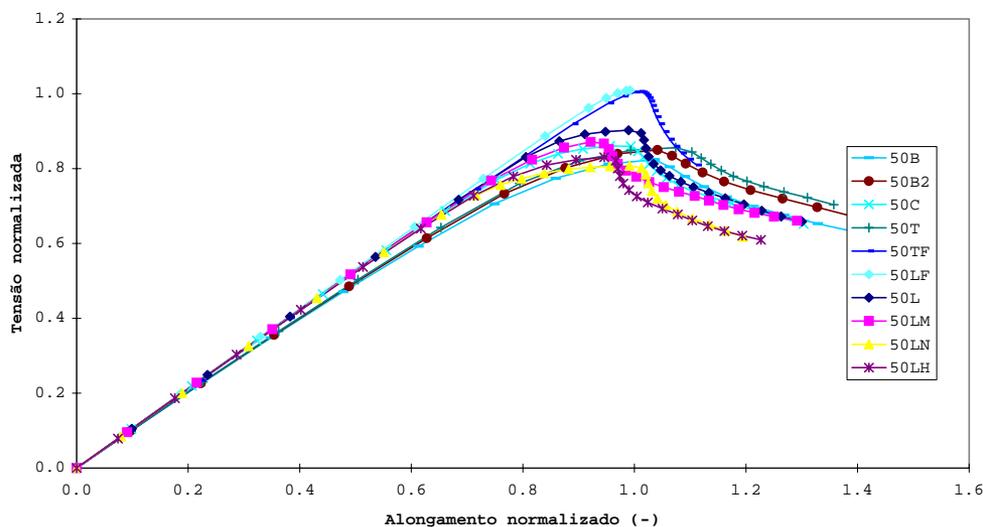


Figura 2 - Curvas tensão alongamento normalizados para placas reforçadas com espaçamento entre balizas de 3000mm e $b/t=50$.

Como aspectos mais interessantes realça-se o aumento da rigidez das placas reforçadas com maiores imperfeições na placa quando se modifica o modo das mesmas, modelos T e TF, e a perda de rigidez prematura dos painéis com reforço em aço de alta resistência (LN e LH).

A resistência máxima destas placas é também muito condicionada pelo modo das imperfeições iniciais sendo evidente da Figura 2 que as placas com distorções predominantes no modo fundamental apresentam uma resistência muito mais elevada do que as restantes. Nestas, a resistência máxima não difere substancialmente mas já o mesmo não se pode dizer relativamente à extensão última, a qual aumenta bastante com a diminuição da esbelteza de coluna para níveis e modos semelhantes das distorções.

O regime de pós colapso é dominado pela esbelteza da coluna, devido à geometria dos perfis ou aos materiais utilizados, e pela amplitude das imperfeições iniciais da placa associada, não sendo significativo o modo inicial predominante.

2.4.3 Razão $b/t=80$

As tendências já detectadas anteriormente agravam-se para placas reforçadas esbeltas sendo estas muito sensíveis a pequenas variações dos diversos parâmetros. As placas com imperfeições no modo fundamental constituem um grupo independente apresentando quer um comportamento inicialmente mais rígido quer uma resistência máxima maior, Fig. 3.

Para esta esbelteza da placa assiste-se a uma mudança de modo de deformação durante o carregamento a qual se traduz no retrocesso da curva de carregamento do modelo LF devido à passagem das deformações do modo fundamental para o modo crítico. Em comparação com este modelo, o TF apresenta uma resistência máxima ligeiramente superior não sendo tão evidente a mudança de modo apesar desta mudança ocorrer na fase de colapso e no início de descarregamento da placa reforçada.

As curvas dos dois modelos na zona de pós colapso são, no entanto, bastante semelhantes apesar de existir uma certa translação horizontal entre elas. Esta diferença é consequência do colapso local ser mais pronunciado no modelo TF do que no LF, o que origina uma plastificação acentuada nesta região diminuindo o encurtamento médio de toda a placa para o mesmo nível de tensões. Convém relembrar que as imperfeições iniciais da placa são maiores no modelo T do que no L, enquanto as imperfeições do reforço são maiores no modelo L.

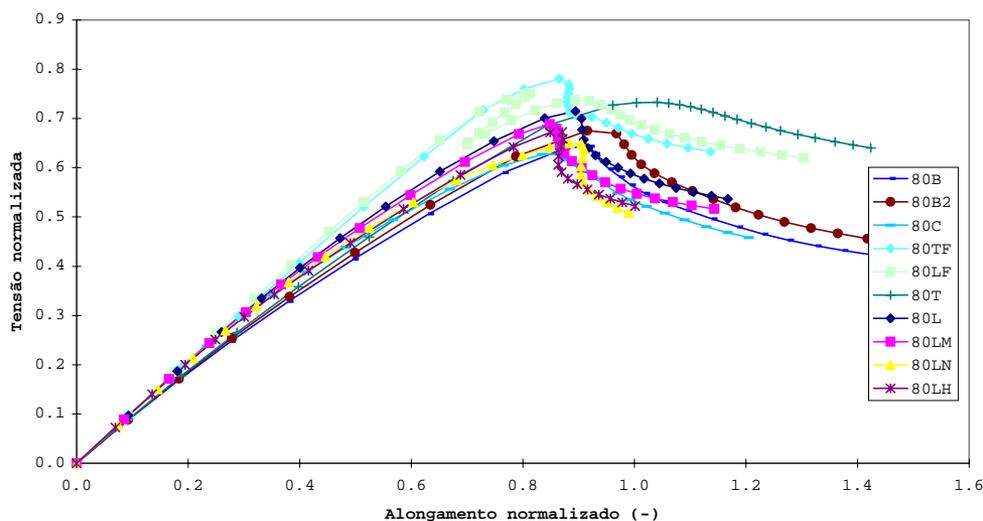


Fig. 3 - Curvas tensão alongamento normalizados para placas reforçadas com espaçamento entre balizas de 3000mm e $b/t=80$.

Na Fig. 4 é possível identificar o desenvolvimento de deformações acentuadas no lado direito da placa à qual está associada um decréscimo acentuado na capacidade de carga.

O modo de colapso da placa desenvolve-se aproximadamente com uma deformada em $m=5$ enquanto a placa apresenta uma razão geométrica de 3 e o modo das imperfeições iniciais era o fundamental. O modelo utilizado não permite investigar o colapso no modo quaternário já que as condições fronteira são de simetria, admitindo, portanto, unicamente modos ímpares. Por seu turno o reforço que inicialmente apresentava uma deformação simples em semi sinusóide, acompanha a deformação da placa nas zonas de maior deformação de que resultam deformações acentuadas ao longo da altura da alma correspondente a uma falha local do reforço por influência directa do colapso da placa. Estes enrugamentos da alma são observados com regularidade nos ensaios de placas reforçadas com chapa associada muito esbelta. Repare-se ainda que o lado direito do reforço se encontrava inicialmente para baixo, mas, devido à ampliação da deformada na zona de colapso, é obrigado a acompanhar esta deformação ficando com uma deformada global ternária e uma deformação acentuada na alma enquanto que a placa nesta zona apresenta um modo $m=5$. Esta diferença entre os modos da deformada do reforço e da placa só pode ser justificada à luz do desenvolvimento de rótulas na união entre os dois.

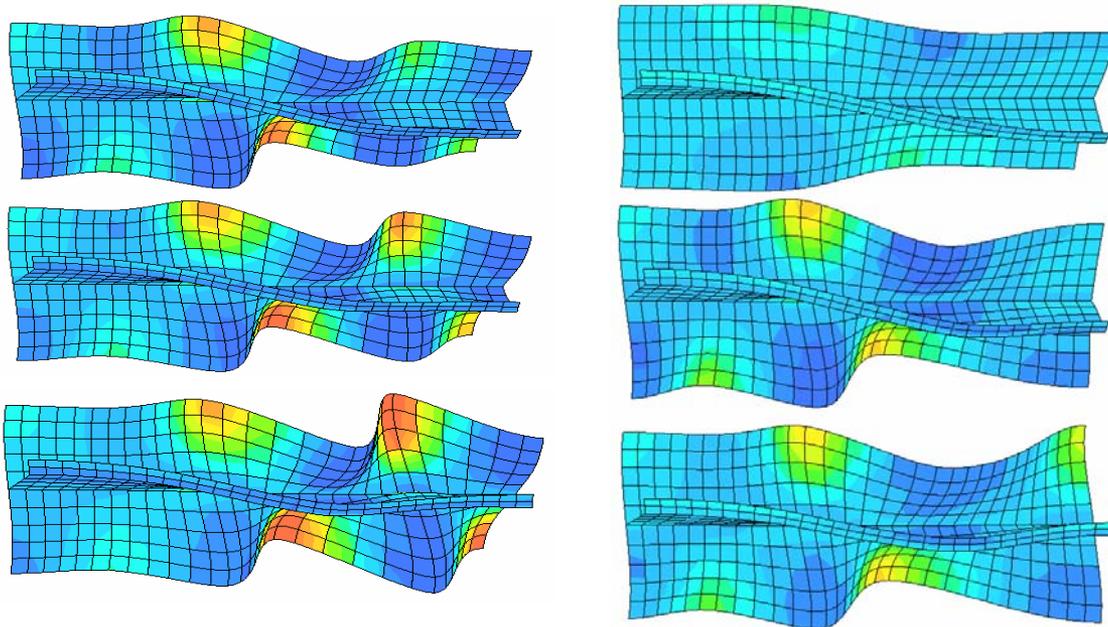


Fig. 4 - Evolução da deformada da placa reforçada 3080TF (esquerda) e 3080LF (direita) e respectiva distribuição de tensões longitudinais, vermelhos 240MPa, azuis -240MPa.

A região da placa não afectada pelas grandes deformações mantém níveis de tensão relativamente baixos a que correspondem simultaneamente níveis baixos de extensão apesar da extensão global média exceder a de cedência. Nesta zona a placa apresenta um modo 5 não muito acentuado enquanto o reforço mantém o modo fundamental.

A fase de mudança de modo da deformada da placa LF opera-se predominantemente no domínio elástico. As três imagens correspondem a fases consecutivas da sequência de carregamento, sendo a primeira respeitante ao início do processo de mudança de modo, a segunda reproduz um estado mais carregado e na terceira a força de compressão total e o encurtamento aplicado voltam a diminuir para permitir a concretização da mudança para um modo menos energético.

No vão direito, a placa passa a ter uma deformada ternária enquanto no vão esquerdo apresenta uma combinação do modo fundamental com o quinto modo o qual se mostra bem presente próximo da baliza, a meio do modelo. Esta diferença na deformada da placa provoca a diferença de comportamento na deformada do reforço, a qual se consubstancia pelo desenvolvimento de um modo ternário no reforço direito por forma a acompanhar a evolução da deformada da placa associada mantendo a perpendicularidade entre os dois elementos. No reforço do vão esquerdo, a presença do modo 5 na placa não é determinante na deformada do reforço apesar de estabilizar de alguma forma a amplitude máxima da deformada evitando que ela aumente.

Grandes deformações na alma do reforço estão também presentes na região do reforço mais próxima da zona da placa onde se desenvolvem as maiores deformações desta e na qual a deformada do reforço se opõe à deformada da placa. Esta interacção é muito importante pois condiciona tanto o comportamento da placa como do reforço [5], mas a quantificação é extremamente difícil em consequência do elevado número de parâmetros envolvidos: esbelteza da placa, esbelteza da coluna, tipo de soldadura, rigidez torcional do reforço, razão altura espessura da alma do reforço, etc. Uma das primeiras tentativas para quantificar esta interacção deve-se a Faulkner e outros [6,7] que introduziram um factor correctivo na fórmula de previsão da tensão crítica de instabilidade torcional.

2.4.4 Resistência máxima

As diversas teorias utilizadas na previsão da resistência de placas reforçadas apresentam como parâmetro predominante a esbelteza da coluna, definida de um modo geral como o inverso da raiz quadrada da tensão crítica elástica normalizada em condições de apoio simples nos extremos.

Estas teorias pouco dizem acerca da evolução do alongamento de colapso correspondente à resistência máxima e não é explícita a influência da esbelteza da placa no comportamento do conjunto. De facto, este parâmetro é incluído no cálculo do raio de giração, nominal ou efectivo consoante as teorias, e implicitamente no factor correctivo da tensão efectiva para a tensão média.

A Tabela 3 resume a dependência da resistência relativamente a estes parâmetros.

<i>b/t</i>	Esbelteza de coluna (nominal)			Resistência máxima		
	40	50	80	40	50	80
B	0,8807	0,8860	0,8919	0,919	0,824	0,643
B2	0,8111	0,8151	0,8196	0,938	0,850	0,675
C	0,8807	0,8860	0,8919	0,970	0,861	0,627
L	0,6982	0,7017	0,7055	0,998	0,903	0,715
T	0,6982	0,7017	0,7055	0,936	0,855	0,727
LF	0,6982	0,7017	0,7055	1,031	1,009	0,738
TF	0,6982	0,7017	0,7055	1,031	1,006	0,781
LM	0,7215	0,7251	0,7291	0,963	0,871	0,689
LN	0,7854	0,7893	0,7936	0,914	0,808	0,649
LH	0,8062	0,8102	0,8147	0,944	0,830	0,672
Média	0,7678	0,7719	0,7763	0,9644	0,8817	0,6916
C. de V.	0,0977	0,0981	0,0985	0,0445	0,0809	0,0698

Tabela 3 - Resistência máxima de placas reforçadas em função da esbelteza da placa, da coluna e das imperfeições iniciais.

É necessário salientar que a utilização de aço de alta resistência aumenta a esbelteza para a mesma geometria. Para além disso, a utilização de materiais diferentes no reforço e na placa levantam problemas na definição da esbelteza de coluna por indefinição da tensão de cedência. Este problema foi contornado através da utilização da tensão equivalente de cedência conforme definida anteriormente. Para se ter uma ideia das variações devidas à utilização de diferentes materiais assinala-se que a passagem de aço normal para aço AR320 provoca um aumento de 15,5% na esbelteza de placa o que pode reduzir substancialmente a largura efectiva da chapa associada. O mesmo aumento de esbelteza de coluna é esperado para a placa reforçada devido à baixa sensibilidade do raio de giração às variações na largura efectiva da placa.

As duas últimas linhas apresentam a média e o coeficiente de variação para cada razão *b/t*. Realça-se o baixo coeficiente de variação associado a cada grupo apesar das variações na esbelteza de coluna em cada grupo, sendo o valor maior de 8,1% nas placas *b/t*=50 tal como já tinha sido observado para as placas não reforçadas.

Os resultados desta Tabela estão representados graficamente na Fig. 5 evidenciando-se uma estratificação por esbelteza da placa, não sendo visível uma grande dependência da resistência relativamente à esbelteza de coluna apesar da sua variação ser pequena. Os pontos de maior valor em cada grupo correspondem às placas com imperfeições iniciais no modo fundamental.

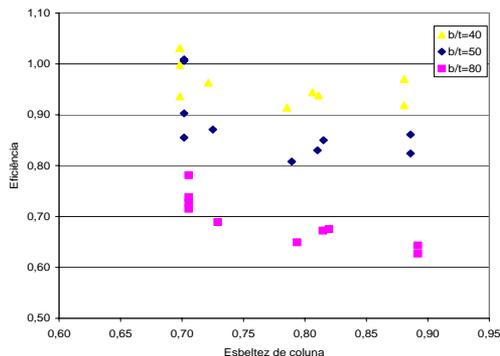


Fig. 5 - Eficiência de placas reforçadas em função da esbelteza de placa e coluna.

Globalmente a variabilidade da esbelteza de coluna é de 11% enquanto o coeficiente de variação da resistência é de 15%. Este resultado não é totalmente descabido pois os métodos de projecto de painéis prevêm que a resistência é composta por dois termos: um relativo à resistência da coluna efectiva dominado pela esbelteza de coluna e um outro relativo à eficiência da placa o qual é dominado pela largura efectiva da placa simples aqui representada pelo parâmetro b/t .

A relação entre a tensão máxima e o alongamento de colapso, encurtamento neste caso, está balizado num rectângulo definido pelas tensões normalizadas 0,6 e 1,1 enquanto os alongamentos de compressão variam entre 0,8 e 1,1 como se pode ver na Fig. 6.

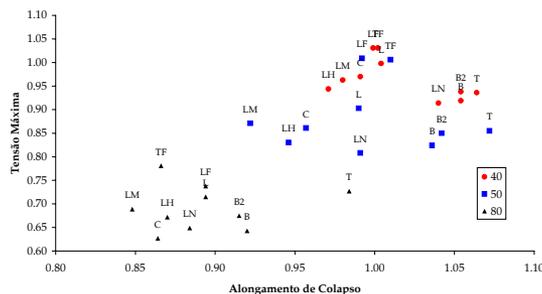


Fig. 6 - Tensão máxima versus alongamento de colapso de placas reforçadas ordenadas por esbelteza da placa, 40, 50 e 80.

Os valores mais altos das duas escalas correspondem às placas com menores esbelteza de placa e vice versa. No entanto, a distribuição não é linear, havendo pelo contrário uma estratificação horizontal pelos diversos grupos de esbelteza de placa. Quer isto dizer que a esbelteza afecta mais a resistência enquanto o modo e amplitude das imperfeições iniciais afectam grandemente a extensão de colapso, definida como a extensão à qual se dá o colapso.

Os níveis mais altos de resistência em cada grupo são obtidos para placas de imperfeições no modo fundamental e os mais baixos para as placas do tipo B e C. A maiores imperfeições iniciais críticas da placa (B) corresponde menor resistência da placa quando a esbelteza é baixa e a maiores imperfeições do reforço (C) corresponde menor resistência para esbelteza da placa elevada.

2.4.5 Placas reforçadas com diferentes materiais

Sendo vulgar a utilização de materiais com características mecânicas diferentes para as chapas e reforços por alguns projectistas e não existindo uma análise aprofundada sobre as suas consequências na literatura [4], resolveu-se estudar com algum detalhe a influência da utilização de aço com características mecânicas diferentes na placa e no reforço. Foi escolhido o modelo de placa reforçada do tipo L testando-se três casos: M com reforço em aço de alta resistência de 320MPa (HS32), N com a placa em HS32 e H com toda a placa reforçada em aço de alta resistência. Estes casos foram utilizados nos três grupos de placas num total de nove modelos. Na Fig. 6 apresentou-se a compilação de resultados da eficiência total da placa reforçada e do valor do alongamento de colapso, em que a eficiência é definida como a razão entre a tensão máxima obtida e a tensão que levaria à total cedência da secção transversal assumindo um comportamento dos materiais linear elástico perfeitamente plástico na ausência de instabilidade e deformação.

Conclui-se imediatamente que a utilização de dois materiais diferentes baixa a eficiência da placa reforçada. Esta diminuição é mais drástica quando o material de alta resistência é aplicado na placa associada e menos prejudicial quando aplicado no reforço. A diminuição da eficiência pela introdução de aço de alta resistência era expectável devido essencialmente ao aumento da esbelteza da coluna. Com estes resultados é possível afirmar que o aumento da esbelteza da placa por introdução de aço de alta resistência é determinante na redução da eficiência da placa reforçada.

Sendo a geometria da placa reforçada a mesma em todos os modelos da Fig. 7 torna-se evidente o aumento da esbelteza de coluna devido ao aumento da tensão de cedência. As repercussões maiores na resistência devem-se às variações na razão b/t sendo a dependência aproximadamente linear. A tensão equivalente é calculada pela ponderação da tensão de cedência dos materiais pelas respectivas áreas através da equação (1), tendo-se obtido para a geometria L os valores de 256,3 e 303,7MPa, respectivamente para os modelos M e N.

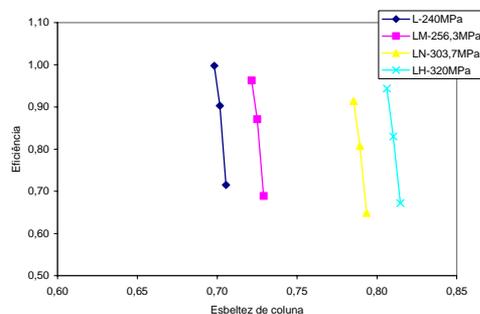


Fig. 7 - Eficiência das placas reforçadas L em função da esbelteza nominal de coluna para várias combinações de diferentes materiais. O valor indicado na legenda corresponde à tensão equivalente.

Como conclusão, poder-se-á afirmar que a introdução de aço de alta resistência no reforço não afecta grandemente a eficiência à compressão do painel. Por outro lado, um painel com uma tensão de cedência da chapa associada superior à do reforço apresenta uma eficiência menor apesar da resistência total (em unidades de tensão) ter aumentado, originando um subaproveitamento do material.

3 REFERÊNCIAS

- [1] ASAS-NLWS Atkins Eng. Sciences Ltd. ASAS-NL User Manual. Version 20. Epsom, England; 1990.
- [2] Dowling, P. J.; Chatterjee, S.; Frieze, P., e Moolani, F. M. Experimental and predicted collapse behaviour of rectangular steel box girders. *International Conference on Steel Box Girder Bridges*. London; 1973.
- [3] Dowling, P. J.; Moolani, F. M., e Frieze, P. The effect of shear lag on the ultimate strength of box girders. *Steel Plated Structures*. Granada; 1977; pp. 108-141.
- [4] Gordo, J. M. e Guedes Soares, C. Approximate method to evaluate the hull girder collapse strength. *Marine Structures*. 1996; 9(1): 449-470.
- [5] Gordo, J. M. e Guedes Soares, C.. "Approximate load shortening curves for stiffened plates under uniaxial compression". editado por: D. Faulkner, M. J. Cowling A. Incecik e P. K. Das. *Integrity of Offshore Structures - 5*; Glasgow. Warley, U.K.: EMAS; 1993: 189-211.
- [6] Faulkner, D., Adamchak, J. C., Snyder, G. J. e Vetter, M. F. Synthesis of welded grillages to withstand compression and normal loads. *Computers and Structures*. 1973; 3:221-246.
- [7] Faulkner, D. Toward a better understanding of compression induced stiffener tripping. *Steel and Aluminium Structures*. 1987; 3:159-175.

