

# ENSAIO DE FLEXÃO EM ESTRUTURA DE PAREDES FINAS REFORÇADAS

José Manuel Gordo, Carlos Guedes Soares

Instituto Superior Técnico, Unidade de Engenharia e Tecnologia Naval



## RESUMO

*Apresenta-se os resultados de um ensaio de flexão a quatro pontos de uma estrutura em caixão de paredes finas reforçadas. O ensaio tem três fases distintas em que se estuda respectivamente o comportamento elastoplástico da estrutura devido às tensões residuais na fase de pré-colapso, a resistência última sob flexão pura e a resistência residual após o desenvolvimento de grandes deformações permanentes. Apresentam-se métodos de determinação do nível das tensões residuais a partir dos resultados experimentais do comportamento global da estrutura. Avalia-se a resistência última da estrutura, caracterizando-se o tipo de colapso envolvido. A resistência residual da estrutura de paredes finas é estabelecida através de um ciclo de carga e descarga após o desenvolvimento de grandes deformações permanentes. O ensaio permitiu ainda identificar aspectos secundários da resposta da estrutura resultantes da geometria tridimensional e da esbelteza dos componentes.*

## INTRODUÇÃO

A resistência de vigas em caixão de paredes finas sob flexão é um assunto de bastante interesse em diversas áreas da engenharia, tais como a engenharia naval, mecânica e civil. No entanto existem relativamente poucos dados experimentais disponíveis (Nishihara 1984; Dowling *et al.* 1973; Mansour *et al.* 1990; Dow 1991).

O colapso de tais estruturas é normalmente muito complexo, envolvendo componentes não lineares importantes resultantes da instabilidade elasto-plástica das placas e reforços em compressão, alterações à linearidade em consequência

das imperfeições geométricas iniciais e tensões residuais, ou fenómenos de interação entre os elementos devido à tridimensionalidade da estrutura. Estas não-linearidades fazem com que o comportamento da estrutura se afaste bastante do comportamento previsto pela teoria linear de vigas sob flexão.

O ensaio descrito neste artigo pretende caracterizar o comportamento de vigas em caixão de paredes finas as quais apresentam uma geometria típica da secção transversal de navios sob flexão devido à acção das ondas e permite aferir o método numérico de previsão da resistência longitudinal de navios entretanto desenvolvido (Gordo *et al.* 1996).

## DESCRIÇÃO DO ENSAIO

O ensaio consiste na flexão pura de uma viga em caixão até ao seu colapso. A viga a ensaiar constitui a parte central de um ensaio típico de flexão a quatro pontos, estando ligada nas suas extremidades a mordentes de resistência superior que funcionam unicamente como transmissores de forças e momentos.

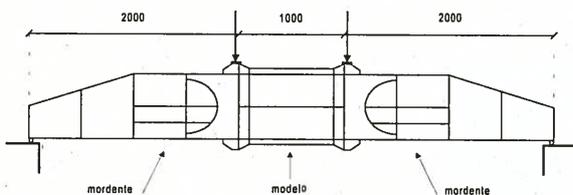


Fig 1- Esquema geral do ensaio.

O ensaio iniciou-se com a aplicação de uma série de ciclos de carga em que se aumentou progressivamente o momento flector seguido de descarregamento total. Estes carregamentos progressivos poderão dar uma estimativa do valor das tensões residuais através da avaliação da energia dissipada durante o processo.

Numa segunda fase aumentou-se a curvatura da viga em caixão até ser ultrapassado o ponto correspondente ao momento último e se encontrar bem caracterizada a descarga da estrutura após o colapso e o desenvolvimento de grandes deformações.

O último ciclo de carga e descarga foi executado após a estrutura ter entrado em colapso e se encontrar bastante danificada pelo desenvolvimento das deformações permanentes geradas na fase anterior.

### Geometria do provete

A secção transversal do provete está representada na Fig 2 onde se identificam ainda as chapas de transmissão de esforços e ligação aos mordentes a qual se faz através de 16 parafusos M22-88.

As dimensões exteriores no forro da chapa são 0,8m de largura e 0,6m de altura. As espessuras utilizadas para a chapa do forro e dos reforços da viga em caixão são

respectivamente de 3 e 4 mm (M3-200), tendo os reforços uma altura de 45 mm.

O índice 200 utilizado na identificação do modelo é o espaçamento em milímetros entre reforços longitudinais ficando perfeitamente identificada a esbelteza da placa entre reforços através da razão entre o segundo e primeiro índice, isto é,  $b/t=67$ .

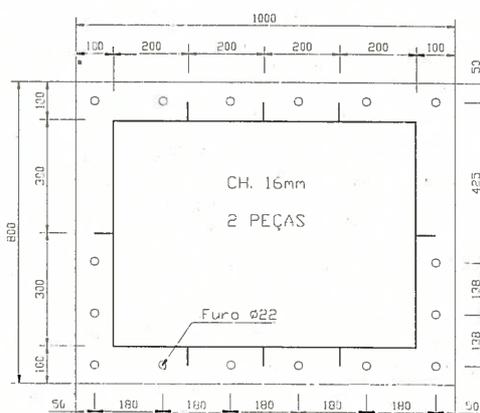


Fig 2- Geometria da viga em caixão

O comprimento total do provete é de 1,0m dividido em três partes separadas por dois reforços transversais, Fig 3. As partes exteriores têm um comprimento de 0,1m e destinam-se a funcionar como zonas de uniformização de tensões. A parte central tem um comprimento total de 0,8m o que faz com que a razão de dimensões do elemento de placa ( $a/b$ ) seja de 4.

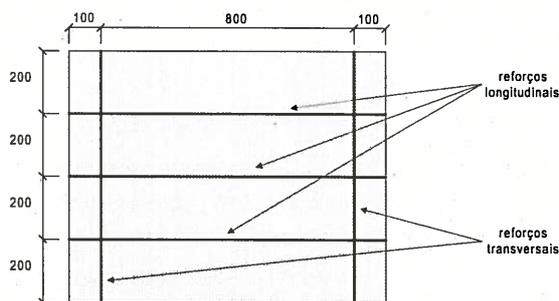


Fig 3- Arranjo dos painéis horizontais

### Propriedades mecânicas do material

Realizaram três ensaios de tracção para cada uma das espessuras. Os provetes das chapas de 3mm de espessura apresentaram uma tensão média de cedência de 183 MPa e uma tensão de rotura média de 287 MPa.

Para os provetes da chapa de 4mm utilizada nos reforços longitudinais as tensões de cedência e de rotura foram respectivamente de 310 e 417 MPa.

Os níveis de ductilidade apresentados por ambos os aços foram elevados traduzidos num mínimo de 37% para a extensão de rotura no caso da chapa de 4mm e um máximo de 50% num dos provetes da chapa de 3mm.

Ambos os aços apresentaram um patamar de cedência nítido mas relativamente curto.

### CICLOS INICIAIS DE CARGA

A Fig 4 mostra os resultados obtidos directamente nos transdutores de controlo de força e deslocamento vertical total para o carregamento de 4mm (em cima) e de 10 e 15mm (em baixo).

A área total definida pelas curvas de carga e descarga é uma medida da energia dissipada a qual resulta essencialmente dos processos plásticos que se desenvolvem na faixa junto aos reforços e que estão inicialmente num estado de tensão elevado devido às tensões residuais.

A energia dissipada é dada pela expressão:

$$E_d = \oint \vec{F} \cdot d\vec{z} \quad (1)$$

em que  $F$  é a força vertical e  $dz$  é o incremento de deslocamento vertical associado ao ponto de aplicação da força  $F$ .

Esta energia é dissipada de acordo com o modelo de tensões residuais, junto aos três reforços que se encontram em tracção no painel inferior tendo como resultado final, depois do descarregamento, no aparecimento de deformações residuais permanentes devidos ao rearranjo interno das tensões residuais ainda existentes mas de valor mais reduzido.

Da Fig 4 é possível retirar os valores das deformações permanentes correspondentes ao novo estado de equilíbrio: assim para o carregamento de 4mm tem-se uma deformação permanente

muito pequena, de aproximadamente 0,1mm, para o carregamento de 10mm cerca de 1mm e finalmente para 15mm de carga máxima uma deformação permanente de 2mm.

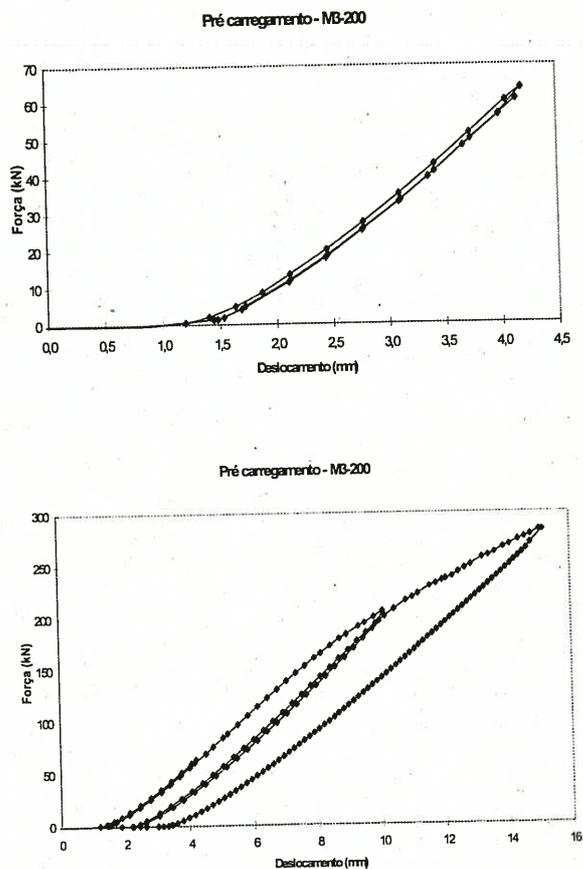


Fig 4- Representação das leituras dos dados obtidos nos transdutores de controlo de força e deslocamento globais do modelo M3-200 na fase de pré carregamento até 4mm, em cima, e início da fase elasto-plástica, em baixo, até 10mm e 15mm.

Convém realçar que os deslocamentos referidos incluem as deformações no pórtico de suporte pelo que as energias totais incluem a energia elástica absorvida na deformação do pórtico, a qual apesar de pequena comparativamente à energia elástica ou plástica absorvida pelo modelo não é negligenciável, Tabela 1. A energia dissipada está expurgada deste problema, já que o pórtico atinge tensões muito pequenas, pelo que não há dissipação de energia resultante de eventuais deformações plásticas nessa estrutura.

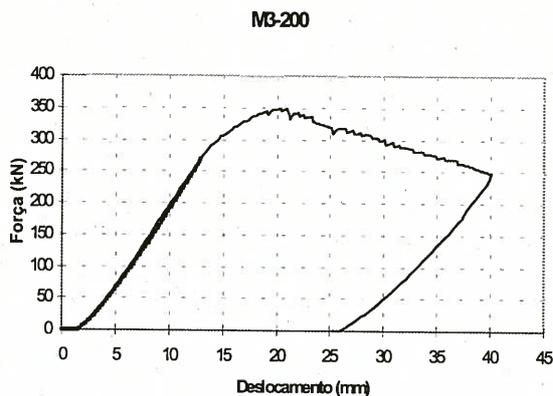
**Tabela 1** - Energia dissipada em cada ciclo de carregamento. A energia está expressa em N.m.

Deslocamento (mm)	Energia total	Energia dissipada	Ed/Et (%)	En. Total por Ciclo	En. Diss. Por Ciclo	EdC/EtC (%)
4,18	82,4	5,1	6,2	82,4	5,1	6,2
10,08	898,8	209,3	23,3	893,7	204,2	22,8
15,16	2167,1	661,6	30,5	1962,9	457,4	23,3

Por outro lado, a energia dissipada pelo efeito de Bauschinger é muito baixa comparativamente à energia dissipada por plastificação local não afectando a qualidade dos resultados apresentados. Estes valores da energia dissipada são utilizados na secção dedicada às tensões residuais.

### CICLO FINAL DE CARGA

Posteriormente aos três ciclos de carga iniciais descritos anteriormente procedeu-se ao descarregamento da viga e ao seu posterior carregamento até ao colapso, o qual se deu a um deslocamento global de cerca de 20mm. Continuou-se no entanto a aplicação de deslocamento imposto até cerca de duas vezes esse valor por forma a obter informação suficiente para caracterizar o comportamento pós colapso da viga, Fig 5.



**Fig 5** - Representação das leituras dos dados obtidos nos transdutores de controlo de força e deslocamento globais do modelo M3-200 na fase de carregamento final.

A curva força deslocamento apresenta algumas irregularidades locais na região de desenvolvimento de deformações plásticas acentuadas as quais são coincidentes com as paragens mais prolongadas da máquina de ensaios para gravação intermédia de dados. Isto mostra existir alguma dependência da resistência da estrutura relativamente à velocidade de carregamento, fenómeno de resto já perfeitamente identificado e estudado nos ensaios de tracção de caracterização de materiais.

### Curva do momento flector

Para a obtenção da curva momento-curvatura é necessário relacionar o deslocamento global com a curvatura e a força com o momento. Enquanto que para a segunda existe uma proporcionalidade directa relacionando o momento e a força aplicada, a qual é unicamente dependente da geometria do provete e pode ser dada por  $M = Fl/2$ , em que  $l$  é o comprimento da viga lateral de suporte, a primeira relação é estabelecida através das leituras em dois deflectómetros independentes que medem indirectamente a rotação entre as duas faces de extremas do provete permitindo obter a curvatura global. Se o comportamento fosse totalmente simétrico as leituras seriam iguais e redundantes portanto. Como se vê na Fig 6 os raios de curvatura medidos em lados opostos do provete, R1 e R2, são diferentes, o que significa que existe uma rotação transversal do provete juntamente com a imposição da curvatura principal.

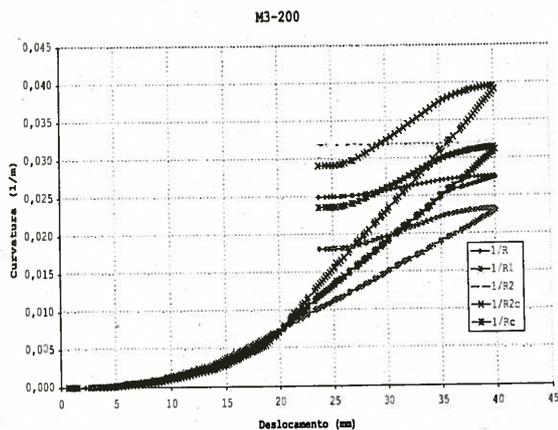


Fig 6 - Relação entre a curvatura e o deslocamento vertical de controlo obtida através das leituras dos transdutores de deslocamento de referencial solidário com cada uma das secções de carga (raios de curvatura R1 e R2) e curvatura média da viga (1/R).

A relação entre o raio de curvatura R2 e o deslocamento global apresenta um patamar a partir dos 35mm de deslocamento que corresponde à ultrapassagem do curso máximo do deflectómetro pelo que os valores da curvatura a partir desse valor deixam de significar alguma coisa. No entanto estes dados correspondem a um estado muito para além do colapso da estrutura, não influenciando a parte principal da curva.

Na fase pós colapso existe uma muito forte correlação entre as curvaturas 1/R1 e 1/R2 sendo possível colmatar a falta de informação do segundo deflectómetro através da extrapolação ' $R2c=1,98967 \times R1 - 0,00684$ ' tendo-se obtido as curvas com o índice 'c' representadas na mesma figura.

Um outro aspecto interessante reside na diferença de comportamento entre as duas curvaturas medidas antes e depois do colapso. No pós colapso já foi identificada a dependência linear entre as duas mas a taxa de crescimento num dos lados (R2) é cerca de 98% superior à outra (R1). Na fase de pré-colapso a curvatura 1/R1 é sempre superior a 1/R2 igualando-se na fase de colapso, o que quer dizer que o lado que era mais resistente e rígido na fase inicial passa a ser o menos rígido após o colapso.

Com a informação sobre as curvaturas e o momento flector criou-se a Fig 7 que inclui também a relação do momento com a curvatura corrigida.

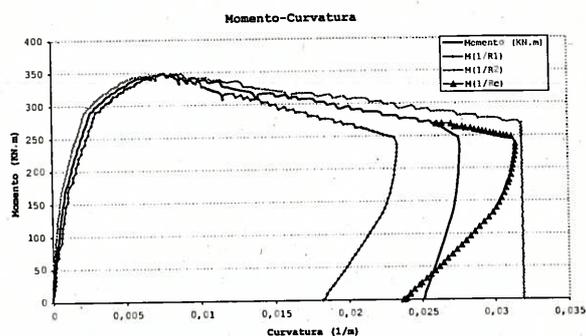


Fig 7 - Relação momento curvatura média da viga em caixão M3-200 no último ciclo de carga que levou ao colapso.

A resposta da viga em caixão apresenta claramente quatro zonas quando sujeita à flexão pura.

A primeira é de grande rigidez vai até cerca de 160kNm dependendo o momento flector linearmente da curvatura imposta.

A segunda também é tipicamente linear mas com uma rigidez inferior à primeira e termina em valores do momento semelhantes ao máximo do ciclo anterior de carga, isto é, a cerca de 290kNm; esta diminuição de rigidez deve resultar do desenvolvimento de maiores deformações que diminuem a efectividade dos painéis em compressão.

A terceira apresenta um comportamento não linear com rigidez progressivamente menor, devendo-se grande parte deste comportamento à plastificação nas faixas em tracção devidas às tensões residuais ainda não aliviadas no painel inferior e também à perda de efectividade do painel superior na fase próxima do colapso.

A quarta região inicia-se imediatamente a seguir a ser atingida a carga máxima, havendo uma dependência praticamente linear entre o momento e a curvatura e assistindo a uma perda de resistência progressiva, acompanhada do desenvolvimento de grandes deformações permanentes.

É interessante notar que é impossível distinguir as duas primeiras zonas a partir do gráfico que relaciona a força com o deslocamento imposto, Fig 5, só se tornando evidente pela utilização das medições dos deflectómetros associados à curvatura. Resta caracterizar numericamente o colapso, tendo sido atingida uma carga máxima de 349,1KNm à curvatura de 0,00767rad/m.

### Módulos estruturais

Analisada qualitativamente a existência de quatro zonas, é importante identificar o comportamento dos módulos estruturais, tanto o tangente como o secante.

O módulo estrutural tangente é definido através da derivada da curva momento curvatura o que matematicamente se expressa por:

$$\frac{dM}{d\phi} = EI_e \quad (2)$$

sendo  $I_e$  o momento de inércia efectivo da secção transversal da viga. O módulo estrutural tangente depende naturalmente da curvatura em regime elasto-plástico e anula-se na fase de colapso. A sua representação gráfica encontra-se apresentada na Fig 8 em função da curvatura, tendo-se utilizado um conjunto dos 6 pontos mais próximos para o seu cálculo de forma a diluir as 'anomalias' da curva momento curvatura e tornar a representação mais interpretável.

O módulo estrutural secante é simplesmente a razão entre o momento flector e a correspondente curvatura em cada ponto da curva,  $M_s = M/\phi$ , e apresenta valores sempre positivos. A sua importância é relativamente baixa mas, no entanto, existem dois valores característicos que permitem de uma forma simples comparar a rigidez de duas secções, e são eles o módulo secante à primeira cedência e o módulo secante ao colapso. O primeiro é bastante difícil de estimar devido à dificuldade de identificar a primeira cedência, mas o segundo é bastante simples de calcular e permite gerar aproximações à curva real.

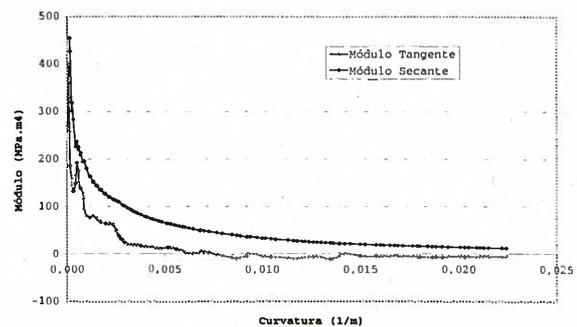


Fig 8 - Módulos estruturais tangente e secante do modelo M3-200 no ensaio final

Da análise da representação gráfica identificam-se zonas de rigidez distintas, começando por uma zona inicial muito irregular e de valores muito elevados dando-se alguma estabilização a cerca de  $150 \text{MPa.m}^4$  valor este muito próximo dos  $151 \text{MPa.m}^4$  estimados pela teoria linear elástica; segue-se nova quebra no módulo tangente a uma curvatura de 0,0008rad/m para um patamar decrescente a  $80 \text{MPa.m}^4$ ; à curvatura de 0,0025 rad/m dá-se uma nova quebra acentuada de rigidez tendendo para a rigidez nula à curvatura de 0,0075rad/m. O módulo secante tem uma variação muito mais suave, tal como seria de esperar, por representar de algum modo o valor médio do módulo tangente a uma dada curvatura, e comportando-se aproximadamente de forma linear em escala logarítmica, a qual permite identificar melhor o comportamento anterior ao colapso, Fig 9.

Estes patamares do módulo estrutural tangente ao longo do processo de carga parecem corresponder a diferentes configurações geométricas dos elementos constitutivos do caixão, não podendo no entanto ser confirmado por não estar disponível um método expedito de medição de deformações, sendo portanto impossível fazer o rasteio das mesmas. A interpretação que é possível fazer baseia-se na natureza das imperfeições iniciais dos elementos de placa e dos reforços, que levam a alterações imperceptíveis de geometria resultantes do desenvolvimento dos modos de deformação conducentes ao nível de energia mais baixo, resultando em patamares progressivamente

mais claros por estabilização do modo das deformadas.

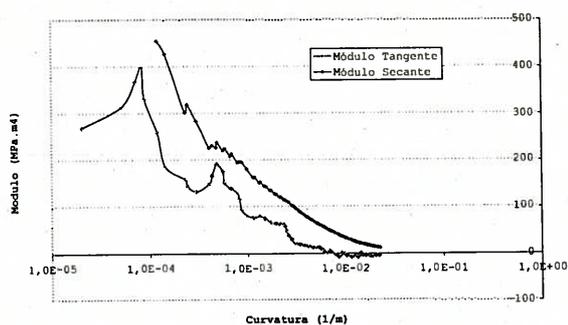


Fig 9 - Módulos estruturais tangente e secante do modelo M3-200 no ensaio final em escala logarítmica da curvatura.

A redução que se assiste em cada patamar é resultado da perda de efectividade dos elementos reforçados sobre a acção de forças progressivamente crescentes. Convém não esquecer a contribuição das tensões residuais e em especial o seu alívio pelo ciclos de carga impostos, as quais contribuem decisivamente para a estabilização das deformações induzidas criando inclusivamente memória sobre o carregamento anterior na estrutura. Repare-se que tanto o gráfico no módulo tangente como o gráfico do momento curvatura guardam informação sobre os ciclos iniciais de carga (4 e especialmente 10 mm) apesar da estrutura já ter sido sujeita a uma carga de valor superior (15mm).

Se do ponto de vista formal a estrutura só deveria recordar o último estado que lhe provocou deformações plásticas permanentes, de facto assim não acontece, talvez em resultado dos pontos de paragem prolongados em picos de carga que se mostraram não serem inócuos à estrutura com consequências directas num aumento da curvatura a carga praticamente constante.

### Tensões Residuais

As estimativas das tensões residuais de forma indirecta através dos resultados experimentais é assaz complicada obrigando ao estabelecimento de algumas hipóteses iniciais, algumas das quais são

uma aproximação simplificada e pouco precisa da realidade. No entanto, pensa-se que a estimativa não andarà muito longe da realidade dando no entanto um majorante ao valor das tensões residuais por ser demasiado simplificada.

Uma primeira via consiste em relacionar o módulo estrutural tangente da estrutura elástica, liberta de deformações plásticas, e o módulo tangente no ponto imediatamente a seguir ao máximo do anterior ciclo de carga. A variação no módulo corresponde a uma variação no momento de inércia efectiva da secção que se deve essencialmente à perda de rigidez por plastificação local. Existem contudo outros efeitos directos resultantes da plastificação local nas faixas de tracção que correspondem a alterações de natureza geométrica impossíveis de contabilizar no actual estado do conhecimento.

Os dados necessários à execução desta estimativa são as curvas momento-curvatura para cada ciclo de carga, tendo-se como hipóteses iniciais a distribuição de tensões residuais típica (Gordão and Guedes Soares 1993), e o comportamento elástico perfeitamente plástico do material, além dos valores do módulo de Young e da tensão de cedência. Assume-se ainda que nesta região de comportamento elasto-plástico global, a não linearidade resultante da perda de efectividade do painel à compressão não afecta a taxa de variação do módulo estrutural tangente, ou por outras palavras, a taxa de variação do módulo estrutural tangente deve-se exclusivamente à plastificação das faixas à tracção das placas do painel à tracção e que, na ausência desta, o comportamento era linearizável pontualmente.

### Método do módulo estrutural tangente

Considere-se que a secção da viga é constituída por duas regiões: a primeira inclui todas as zonas afectadas pelo calor da soldadura onde inicialmente as tensões residuais eram de tracção com níveis semelhantes à tensão de cedência e pertencentes à zona que ficará à tracção, neste caso a parte inferior da viga caixão, e

designe-se a sua área por  $A_p$ ; designe-se a restante área 'efectiva' da viga caixão por  $A_e$ . O módulo estrutural tangente na zona de comportamento elástico pode ser descrito por:

$$EI_e = E \int_{A_e} z^2 dA_e + E \int_{A_p} z^2 dA_p \quad (3)$$

em que  $z$  é a distancia vertical ao eixo neutro. Em regime elasto-plástico com dissipação de energia por plastificação nas zonas constituintes de  $A_p$  esta definição altera-se assistindo-se simultaneamente a uma alteração da posição do eixo neutro. Se a área  $A_p$  for uma pequena percentagem da área total então o eixo neutro mantém-se praticamente inalterado sendo possível defini-lo no mesmo referencial através de:

$$EI_p = E \int_{A_e} z^2 dA_e \quad (4)$$

Esta imprecisão pela não inclusão da alteração do eixo neutro não tem grande importância para este cálculo e desapareceria completamente se fosse possível calcular pontualmente a variação no módulo estrutural tangente o que não acontece totalmente devido à natureza discreta dos resultados experimentais. A variação do módulo estrutural tangente é simplesmente expressa por:

$$\Delta EI = EI_e - EI_p = \int_{A_p} z^2 dA_p$$

ou

$$\Delta EI = E z_p^2 A_p \quad (5)$$

dada a particularidade geométrica dos modelos em que  $z_p$  é constante para todos os componentes de  $A_p$ . Finalmente a área afectada pela plastificação pode ser avaliada através da expressão:

$$A_p = \frac{\Delta EI}{E z_p^2} \quad (6)$$

Devido à simetria do modelo,  $z_p$  pode-se considerar igual a meia altura do modelo ou retirando os valores dos resultados experimentais dos extensómetros colocados no costado lateral.

Procedeu-se à análise deste método tendo-se utilizado três pontos da curva momento curvatura em torno da curvatura correspondente ao deslocamento vertical de 15mm, último ponto de inversão de carga do ciclo anterior ao colapso. Com os dados recolhidos,  $P1 = (0,00196 \text{ rad/m; } 249,0 \text{ KN.m})$ ,  $P2 = (0,002634 \text{ rad/m; } 290,8 \text{ KN.m})$  e  $P3 = (0,00343 \text{ rad/m; } 315,8 \text{ KN.m})$ , calculou-se a variação do módulo estrutural tangente em torno do ponto P2, obtendo-se um módulo anterior ao ponto P2 de  $62,2 \text{ MN.m}^2$  e posterior de  $31,4 \text{ MN.m}^2$ , donde resulta uma variação de  $30,8 \text{ MN.m}^2$ .

Para a área  $A_p$  resulta um valor de  $962 \text{ mm}^2$ , o qual foi calculado considerando que o módulo de Young do aço é de  $200 \text{ GPa}$  e o eixo neutro se encontra na posição obtida a partir dos dados experimentais, isto é,  $400 \text{ mm}$  acima do painel em tracção. Esta área inclui a deformação plástica nos reforços barra; para efeitos de estimativa das tensões residuais considerou-se que existia equivalência percentual das faixas à tracção do reforço e da placa relativamente às áreas totais, pelo que as tensões residuais de compressão se estimam ter um valor de  $33\%$  da tensão de cedência. Lembra-se que este valor é um majorante às tensões residuais já que despreza todos os restantes efeitos redutores da rigidez estrutural.

### Método da dissipação de energia total

A segunda via indirecta de estimar o nível das tensões residuais baseia-se na energia dissipada em cada ciclo de carga e é muito menos exigente em termos matemáticos e nas hipóteses simplificativas.

Relativamente a estas últimas, é exigido que o material seja elástico perfeitamente plástico, que o eixo neutro não se altere durante o processo de carga e que o fundo seja igualmente efectivo.

Considerando<sup>8</sup> que a dissipação de energia se dá nas faixas à tracção dos painéis de fundo e que pode ser medida através da equação  $E_d = \oint \vec{F} \cdot d\vec{z}$  tal como é apresentado na **Tabela 1**, estes valores podem ser comparados com o valor teórico,

obtido através das hipóteses iniciais atrás enunciadas:

$$E_d = \sigma_o A_p \Delta l_p \quad (7)$$

em que  $l_p$  é o comprimento entre balizas no caso de soldadura contínua ou o comprimento total de soldadura no caso de soldadura descontínua. Esta equação pode ser arranjada de acordo com a geometria dos provetes para:

$$E_d = \sigma_o A_p l_p z_p \phi \quad (8)$$

A área das faixas à tracção do painel de fundo é dada por:

$$A_p = \frac{E_d}{\sigma_o l_p z_p \phi} \quad (9)$$

No caso particular do modelo M3-200 existem avaliações da energia dissipada total a 4, 10 e 15 milímetros, **Tabela 1**, e informação sobre as curvaturas correspondentes. Aplicando a equação acima e tomando como valores da tensão de cedência a média dos três valores obtidos nos ensaios de tracção corrigida proporcionalmente pela maior tensão de cedência da chapa de 4mm dos reforços, obtêm-se a tensão de 201MPa, pelo que a área  $A_p$  é 2283 e 2156mm<sup>2</sup> respectivamente para o deslocamento de 10 e 15mm. Estas áreas são muito superiores à área obtida pelo método anterior devido à dissipação de energia que ocorre nas zonas extremas do modelo, zonas essas com soldaduras fortes e muito concentradas. Considera-se, no entanto, que o método é suficientemente fiável em estruturas de maiores dimensões em que as anomalias locais sejam pouco relevantes.

O cálculo do comprimento dos cordões transversais de soldadura que fixam as balizas e as banzos conduz a um resultado mais equilibrado e próximo da realidade, isto é, 1087 e 1027mm<sup>2</sup> respectivamente para o ciclo de 10 e 15mm. Estes resultados desviam-se cerca de 10% do valor obtido pelo método anterior o que valida de alguma forma o valor indicado para as tensões residuais anteriormente.

## Posição do eixo neutro

A posição do eixo neutro pode ser estimada a partir dos dados experimentais pela análise das leituras nos extensómetros colocados no costado das viga em caixão. Para tal foram instalados quatro extensómetros verticalmente nas posições 140, 281, 410 e 508mm acima do fundo, os quais permitem estimar a posição do eixo neutro e sua variação com o carregamento, e ainda analisar a perda de efectividade do costado durante a fase elasto-plástica.

A Fig 10 apresenta as leituras nesses extensómetros identificando-se perfeitamente a fase de comportamento elástico até cerca dos 15mm de deslocamento vertical. Inicia-se depois uma fase não linear, mas não necessariamente elasto-plástica, em que cada extensómetro apresenta um comportamento diverso, sendo pois necessário fazer uma análise caso a caso.

Convém indicar nesta fase que, sendo as leituras nos extensómetros efectuadas em microns e assumindo um módulo de elasticidade de 200GPa para o aço, cada 1000 microns correspondem a 200MPa de tensão linear. Evidentemente que a partir da cedência se torna necessário utilizar as curvas dos ensaios de tracção para conhecer o estado de tensão.

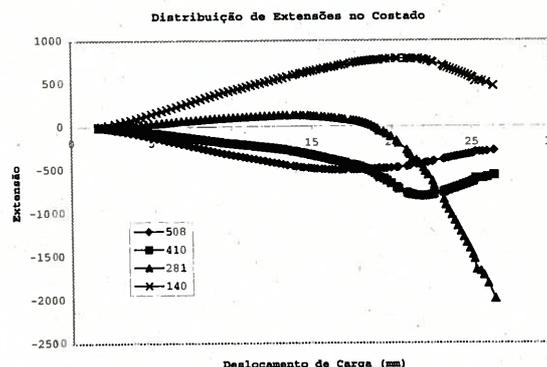


Fig 10 - Evolução das extensões no costado durante o carregamento final da viga M3-200.

Estando os extensómetros colocados no lado de fora da viga caixão os valores medidos indicam a extensão nessa superfície e não a extensão média através da espessura nessa posição. Quer isto dizer que as leituras incluem as extensões

resultantes da flexão local da chapa devido ao desenvolvimento de deformações fora do plano inicial da chapa para além das extensões devidas à flexão global da viga caixão. A partir dos 16mm de deslocamento vertical, as primeiras tornam-se dominantes originando situações em que as extensões medidas no extensómetro à compressão mais afastado do eixo neutro (508mm) são menores em valor absoluto do que as dos extensómetros mais próximos do eixo neutro (281 e 410mm).

Assim as leituras até aos 15mm permitem verificar da posição e variação da posição do eixo neutro, Fig 11, enquanto que as medições no regime elasto-plástico estão muito mais associadas ao desenvolvimento de deformações locais dando uma ideia do nível de deformação da superfície da chapa, Fig 12.

No regime de pré colapso é possível identificar uma pequena mudança do eixo neutro em direcção ao fundo à tracção devido à perda de efectividade das zonas em compressão que se identificam visualmente pela perda de linearidade à direita na Fig 11.

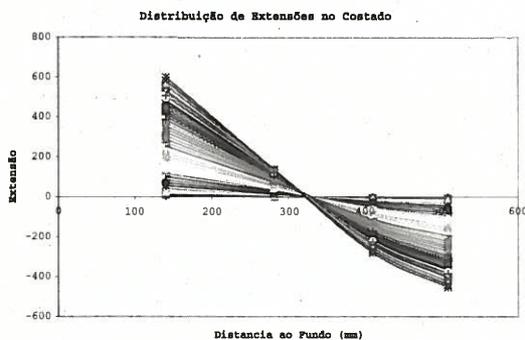


Fig 11 - Distribuição de extensões no costado durante o carregamento no regime elástico.

As extensões só ultrapassam a extensão de cedência, cerca de 885 microns para a chapa, nas zonas centrais do costado devido ao desenvolvimento de grandes deformações permanentes, atingindo no extensómetro instalado junto ao eixo neutro inicial cerca de três vezes a mencionada extensão de cedência.

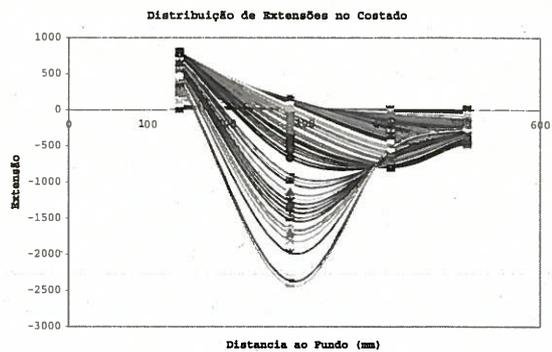


Fig 12 - Distribuição de extensões no costado durante o carregamento em regime elástico e no pós-colapso.

A Fig 13 mostra as grandes deformações permanentes no costado após o colapso da estrutura sendo evidente que estas deformações se devem exclusivamente à transmissão das deformações geradas no painel em compressão após o seu colapso. O extensómetro mais próximo do reforço, zona sem tinta na imagem, encontra-se numa zona de acentuadas variações de geometria da superfície, de facto uma zona de conformação e encontro de várias linhas de cedência, e por isso apresenta os valores elevados já apontados.

Note-se ainda o colapso do reforço na zona central a meio vão é coincidente com uma região em que não estava soldado à chapa, o que mostra que esta prática prejudica a resistência global, como se mostrará nas secções seguintes dedicadas ao colapso do painel em compressão.



Fig 13 - Deformação residual no costado do modelo M3-200 após o colapso total da viga.

## CONCLUSÕES

O ensaio da viga em caixão sujeita a flexão pura permite recolher informação sobre o comportamento mecânico deste tipo de estruturas, identificar o tipo de colapso envolvido, analisar a acção das imperfeições iniciais nomeadamente das tensões residuais, entre outros.

A recolha de informação sobre o comportamento mecânico da estrutura concretizou-se através da geração da curva que relaciona o momento flector aplicado com a curvatura realçando a natureza não linear do comportamento de estruturas soldadas novas. A linearização do comportamento só é obtida após a aplicação de processos de relaxação de tensões residuais e que neste ensaio foi obtido parcialmente com a aplicação de ciclos de carga e descarga a baixa e média carga.

Estes ciclos iniciais serviram também para conhecer de forma aproximada o estado de tensões residuais presente neste tipo de estrutura. Apresentaram-se dois métodos simples que permitem avaliar o nível de tensões residuais mantendo a estrutura intacta: o método da variação do módulo estrutural tangente e o método da dissipação da energia total.

A análise deste tipo de estruturas é geralmente feito através da análise linear elástica de vigas a qual considera a constância do módulo estrutural tangente e da imutabilidade do eixo neutro da viga ao longo do carregamento. Este trabalho

mostra que os efeitos de natureza elasto-plástica resultante quer da existência de tensões residuais ou das imperfeições geométricas são extremamente importantes na previsão do comportamento e resistência de estruturas tridimensionais de paredes finas reforçadas sujeitas a flexão.

## REFERÊNCIAS

- Dow, R. (1991). "Testing and analysis of a 1/3-scale welded steel frigate model." *Advances in Marine Structures 2*, Elsevier Applied Science, 749-773.
- Dowling, P. J., Chatterjee, S., Frieze, P., and Moolani, F. M. (1973). "Experimental and predicted collapse behaviour of rectangular steel box girders." *International Conference on Steel Box Girder Bridges*, London.
- Gordo, J. M. and Guedes Soares, C. (1993). "Approximate load shortening curves for stiffened plates under uniaxial compression." *Integrity of Offshore Structures - 5*, EMAS, Warley, U.K., 189-211.
- Gordo, J. M., Guedes Soares, C., and Faulkner, D. Approximate assessment of the ultimate longitudinal strength of the hull girder. *Journal of Ship Research*. 40[1], 60-69. 1996.
- Mansour, A. E., Yang, J. M., and Thayamballi, A. K. (1990). "An experimental investigation of ship hull ultimate strength", *Transactions SNAME*, Vol. 98, pp. 411-440.
- Nishihara, S. Ultimate longitudinal strength of mid-ship cross section. *Naval Arch. & Ocean Engng*. 22, 200-214. 1984.

