

# **DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM VIGAS EM CAIXÃO DE PAREDES FINAS REFORÇADAS SUJEITAS A FLEXÃO PURA**

José Manuel Gordo e Carlos Guedes Soares  
Instituto Superior Técnico  
Unidade de Engenharia e Tecnologia Naval

## **RESUMO**

Apresenta-se a distribuição de tensões obtidas num ensaio de flexão a quatro pontos de uma estrutura em caixão de paredes finas reforçadas. O provete ensaiado representa, à escala, estruturas típicas de navios e de pontes metálicas em construção soldada.

Analisa-se a perda de efectividade observada nos painéis sujeitos à compressão e à tracção, assim como o diferente estado de tensões observado na chapa e nos reforços resultado do tipo de colapso da estrutura.

O colapso da estrutura dá-se neste ensaio por falha da placa entre os reforços, conduzindo posteriormente ao aparecimento de grandes deformações locais nos reforços. A capacidade de carga da estrutura após ter sido atingido o momento último, diminui progressiva e lentamente, não se observando variações bruscas.

O ensaio permitiu ainda identificar aspectos secundários da resposta da estrutura resultantes da geometria tridimensional e da esbelteza dos componentes, tais como a perda de efectividade das zonas em tracção não suportadas verticalmente e a não linearidade da resposta global devido à existência de tensões residuais, desenvolvimento de grandes deformações e perda de efectividade dos painéis mais carregados.

## **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, civil e mecânica. No entanto existe 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 sob compressão, alterações à linearidade em consequência das imperfeições geométricas iniciais e tensões residuais, ou fenómenos de interacção 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.

## **DESCRIÇÃO SUMÁRIA 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, como se pode observar na figura 1.

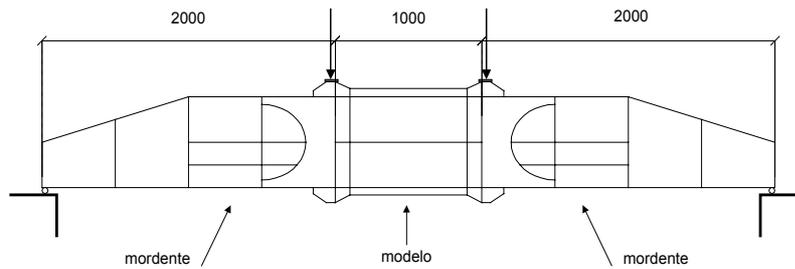


Figura 1 Esquema geral do ensaio.

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 espaçamento entre reforços longitudinais é 200mm sendo a esbelteza da placa entre reforços de 67 definida através da razão entre a largura e a espessura da placa. O comprimento total do provete é de 1000 mm dividido em três partes separadas por dois reforços transversais. As partes exteriores têm um comprimento de 100 mm e destinam-se a funcionar como zonas de uniformização de tensões. A parte central tem um comprimento total de 800 mm o que faz com que a razão de dimensões do elemento de placa seja de 4.

A secção transversal do provete está representada na Figura 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 800 mm de largura e 600 mm de altura.

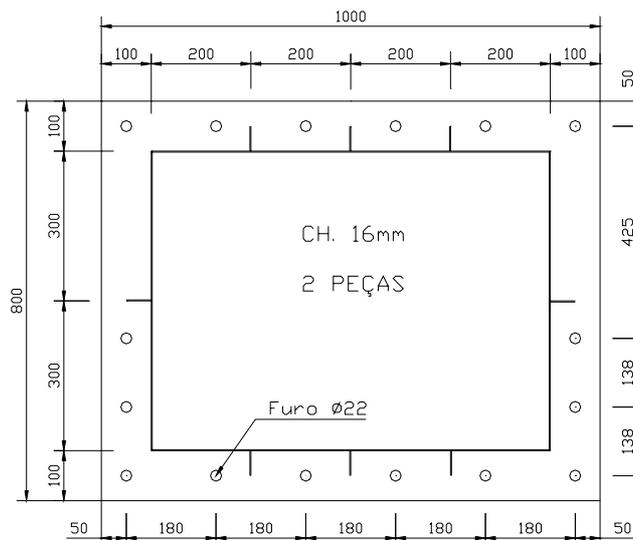


Figura 2 Geometria da viga em caixão

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. 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. A análise detalhada dos resultados obtidos relativamente à resistência e comportamento da estrutura está disponível em (Gordo e Guedes Soares, 2001).

## EFFECTIVIDADE DOS PAINÉIS EM TRACÇÃO

A efectividade de painéis em tracção raramente é referida na literatura por as hipóteses iniciais da teoria garantirem a manutenção da geometria da estrutura. De facto, é vulgar

encontrar a redistribuição de tensões tratada em detalhe quer em compressão quer em tracção quando os painéis estão sujeitos a solicitações de corte e flexão conjunta. No presente caso, ensaio em flexão pura, a perda local de efectividade não está relacionada directamente com a redistribuição de tensões mas sim com a falta de suporte local da estrutura.

Nas zonas onde existem componentes verticais a curvatura local é igual à curvatura global mas, na ausência destes componentes verticais como por exemplo a meio do modelo, a curvatura local é inferior à curvatura global por ser possível ao painel encontrar uma deflexão menos acentuada compatível com a restante estrutura.

No presente ensaio existem três contribuições para que haja perda de efectividade a meio:

1. diminuição das imperfeições iniciais a meio devido à tracção do painel, contribuição esta pouco importante e que se faz sentir unicamente na fase inicial do carregamento;
2. diminuição da curvatura a meio por falta de suporte vertical, sendo tanto maior a contribuição quanto menor o número de reforços;
3. plastificação nas faixas à tracção devidas às tensões residuais, provocando o aparecimento de extensões residuais depois de um ciclo de carregamento e diminuição das imperfeições após descarga.

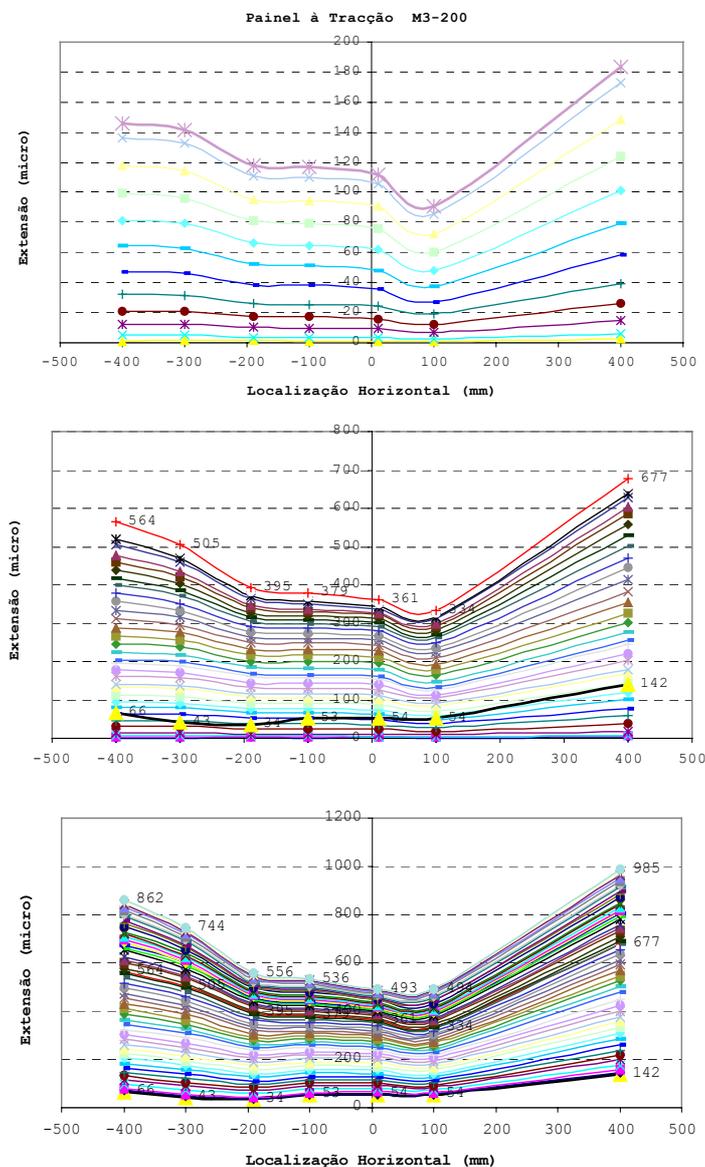


Figura 3 Distribuição transversal de extensões na fase de pré carregamento: 4, 10 e 15mm.

No modelo M3-200 foram instalados um conjunto de sete extensómetros no painel à tracção alinhados transversalmente e que permitem traçar a distribuição de extensões ao longo dos diversos ciclos de carga. A Figura 3 apresenta as medições nesses extensómetros para os três ciclos de carregamento iniciais, respectivamente a 4, 10 e 15mm de deslocamento vertical.

### **Ciclos iniciais**

No primeiro gráfico, em cima e até 4mm de deslocamento global, a distribuição transversal de extensões apresenta uma magnificação da variabilidade das extensões com o carregamento, havendo globalmente uma depressão a meio que se amplia com o carregamento e alguma variabilidade local em torno da curva de extensões médias globais. Para este carregamento não existe uma relação directa entre a extensão e a deformação porque está bem presente o atenuar das imperfeições iniciais e, estando os extensómetros colocados de um único lado da chapa, se um deles estiver colocado inicialmente numa cava a extensão medida até a placa ficar virtualmente plana é maior do que a extensão média através da espessura, e vice-versa para a crista. Neste primeiro ciclo, a descarga não originou extensões residuais o que significa que a estrutura voltou à sua forma inicial e não houve grandes deformações plásticas devidas às tensões residuais, o que é de alguma forma confirmado pelo baixo valor de energia dissipada (Gordo e Guedes Soares, 2001).

No carregamento até 10mm, gráfico central, o padrão da distribuição de extensões é semelhante ao do anterior ciclo mas com a ineficiência a meio muito mais vincada. Os valores mais altos das extensões encontram-se nos extremos, 564 e 677 microns, ainda assim abaixo da extensão de cedência que ronda os 900 microns. De qualquer forma, esta informação é compatível com o facto de já se ter dado plastificação em alguns locais, pois o que se está a medir são variações da extensão relativamente ao estado inicial. Esta plastificação local é confirmada pelo valores residuais das extensões após descarga total e que apresentam valores médios de 50 microns com máximos nos extremos à cota de 400 e -400mm de 142 e 66 microns. O máximo da extensão residual de 142 microns foi medido no extensómetro localizado junto à soldadura de canto de fecho dos blocos, sendo portanto representativo do alívio de tensões residuais.

O último gráfico da mesma figura referente ao carregamento de 15mm mostra que a carga se faz em regime elástico até aos 10mm, pela coincidência de forma entre a distribuição de extensões no máximo anterior também representada na figura (10mm) e as mais próximas neste ciclo de 15mm. A perda de efectividade acentua-se a partir dos 10mm adquirindo uma forma tipicamente sinusoidal.

O valor médio da extensão residual após o carregamento de 10mm permite estimar o aumento do comprimento do painel do fundo em cerca de 6% só devido ao alívio de tensões residuais. Este alongamento induzido pelo alívio de tensões gera uma redistribuição de tensões residuais na viga caixão não carregada e uma curvatura residual. Globalmente a redistribuição de tensões origina um estado de compressão neste painel do fundo, a que se segue uma região no costado próxima deste painel em tracção que tende linearmente para um estado de compressão ligeira no painel superior do modelo, estando o eixo de tensões nulas localizado muito acima do meio pontal.

### **Ciclo final de carga**

No ciclo final de carga reinicializou-se as leituras em todos os transdutores pelo que os resultados apresentados se encontram subtraídos dos valores residuais ao fim do ciclo de

carga e descarga a 15mm. Para obter valores absolutos relativamente ao estado inicial deverá ser considerada a soma dos valores residuais.

### *Extensómetros da chapas*

A Figura 4 apresenta os valores medidos nos extensómetros do painel de fundo indicando-se a sua posição relativamente ao plano de simetria. A análise cuidada desta figura permite identificar alguma dualidade de comportamento em extensómetros simétricos, além de outros aspectos que a seguir se descrevem.

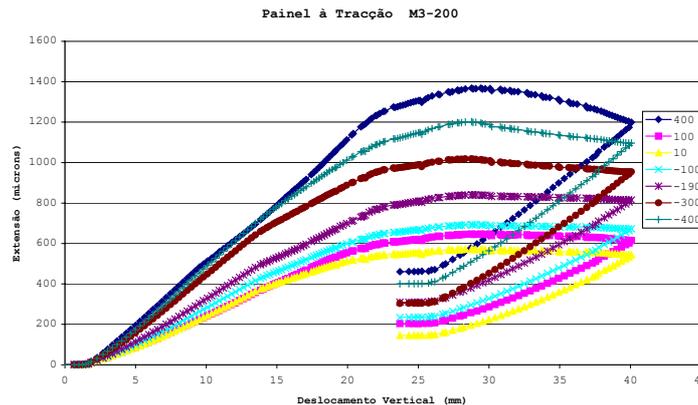


Figura 4 Distribuição de extensões no painel à tracção do modelo M3-200 em função do deslocamento absoluto do deflectómetro de controlo num dos ciclos iniciais, em cima, e no ciclo final, em baixo.

Os extensómetros mais extremos, 400 e -400mm da mediania, ultrapassam a extensão de cedência, comportando-se da mesma forma até esse valor sensivelmente, o qual é atingido a cerca de 15mm de deslocamento global vertical e a partir daí divergem, continuando o extensómetro colocado a 400mm (T11) com um comportamento linear relativamente ao deslocamento até aos 21mm, atingindo o máximo de extensão elasto-plástica a 28mm de deslocamento vertical, de resto como os outros. A justificação para esta divergência deve residir no desenvolvimento assimétrico de deformações na chapa facilitado pelo início do processo de plastificação associado em parte ao diferente estado de tensões residuais existente num e no outro lado do painel. Dum dos lados existe uma soldadura de fecho do bloco enquanto do outro lado a manufatura do canto foi executada por dobragem.

Note-se que o colapso se dá a um deslocamento vertical absoluto entre os 20 e os 21mm, (Gordo e Guedes Soares, 2001), e nesta fase o eixo neutro desloca-se rapidamente em direcção ao fundo devido à perda de efectividade do painel à compressão, fazendo com as extensões no fundo cresçam mais lentamente com o aumentar da curvatura. Daí o comportamento escalonado mas igual de todos os extensómetros a partir dos 20mm afastando-se da linearidade. A partir dos 28mm a taxa a que o eixo neutro se aproxima do fundo conjuntamente com a redução do momento suportado fazem com as extensões e consequentemente as tensões se tornem estacionária ou diminuem no fundo.

Os dois extensómetros colocados a meio das chapas e em posição simétrica, 100 e -100mm, tem um comportamento em tudo semelhante sendo de realçar a extensão residual depois da descarga, cerca de 200 microns, apesar de não ter sido atingida a extensão de cedência durante o carregamento; a máxima extensão atingida foi de 700 microns.

Na Figura 5 apresenta-se a distribuição transversal de extensões longitudinais no painel em consideração durante o último carregamento em que se impôs um deslocamento duas vezes superior ao deslocamento de colapso, seguido do respectivo descarregamento, representado no gráfico em baixo da mesma figura.

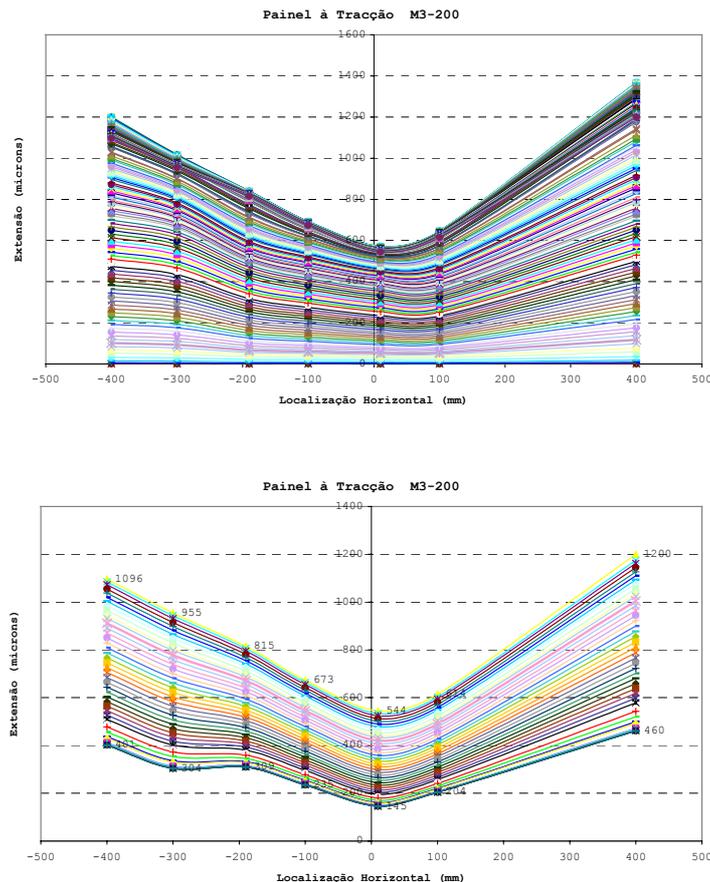


Figura 5 Distribuição de extensões no painel à tracção do modelo M3-200 na fase final de carregamento e no regime pós colapso até ao deslocamento global de 40mm, em cima, e na fase de retirada do deslocamento imposto, em baixo.

É evidente o suavizar das ‘anomalias’ locais com o desenvolvimento das grandes deformações na fase de pós colapso, restando zonas muito efectivas onde existe estrutura vertical de suporte e uma depressão central devida à falta de apoio. Na fase de carga não é claramente identificável a influência dos reforços longitudinais na sua eventual contribuição para um aumento de rigidez, mas no estado final após descarga, o extensómetro localizado junto ao reforço, aproximadamente a  $-200\text{mm}$ , apresenta claramente uma extensão residual superior aos que o rodeiam, o que pode ser interpretado como uma rigidez acrescida desta zona devido ao reforço.

De salientar os valores elevados das extensões residuais da chapa do caixão deformado conjuntamente com o facto de estarem todos os extensómetros em tracção. Os valores residuais variam entre os 150 microns ao meio e os 450 microns num dos extremos; se atender ao facto de, na maior parte do painel, não ter sido excedida a extensão de cedência, estes valores residuais correspondem a tracção efectiva na chapa do painel de fundo. Assim deverão existir zonas adjacentes em compressão residual de modo que o conjunto esteja em equilíbrio não carregado. Estas zonas só poderão ser o costado adjacente e os perfis de reforço.

Em conclusão, o facto mais saliente desta análise do comportamento do painel à tracção devido à flexão pura respeita directamente à aproximação que se comete ao considerar todo o painel totalmente efectivo em fase de projecto, sendo a parcial perda de efectividade resultado de variações de geometria fora dos planos iniciais e que eventualmente resultam da manutenção ou não da hipótese de Navier sobre as secções se manterem planas durante o processo de carga.

## ***Sobre a redistribuição de tensões***

Tal como foi referido anteriormente, a concepção da viga em caixão considera um espaço entre a ligação aos braços e a zona a ensaiar de 100mm de cada lado de forma a permitir uma melhor distribuição de tensões.

A efectividade desta transmissão de esforços foi testada através da instalação de extensómetros junto às balizas, cujas referências são T00, T01, T04, T05 e T08.

Ao analisar as medições destes extensómetros, Figura 6, nota-se uma grande diferença de comportamento entre o extensómetro mais próximo do costado e os restantes; o T00 apresenta valores extremamente elevados chegando aos 3200 microns no ponto de colapso da estrutura, correspondente a grandes deformações plásticas e comportando-se quase linearmente até essa fase, enquanto os restantes têm deformações muito menores, aparentando os centrais alguma falta de efectividade inicial. É de realçar, no entanto, que os valores medidos nestes extensómetros estão dentro da gama de extensões medidas anteriormente nos extensómetros mais centrais, apesar dos extensómetros centrais T04 e T08 que se encontram localizados junto aos reforços apresentarem uma carga retardada até aos 14mm, o que novamente referencia a memória da estrutura local relativamente aos ciclos anteriores. O T05 central mas colocado a meio da chapa longe dos reforços inicia a sua fase de carga logo no início do processo de carga.

Pode-se concluir que esta zona da chapa junto aos reforços interage fortemente com o reforço devendo o seu comportamento ser analisado conjuntamente com ele.

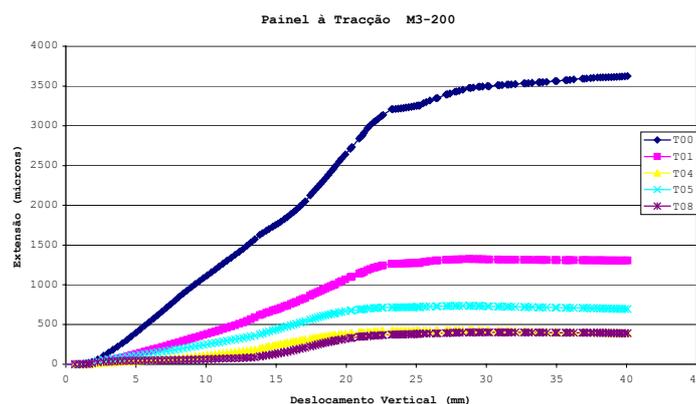


Figura 6 Leituras nos extensómetros da chaparia junto às balizas do painel de tracção do modelo M3-200.

## ***Comportamento dos reforços***

Foram colocados três extensómetros lateralmente nos reforços junto aos topos dos mesmos. Dois deles, TR00 e TR02, estão localizados a meio comprimento dos reforços junto aos extensómetros da chapa T06 e T09 respectivamente. O outro extensómetro, TR01, localiza-se junto à baliza e está próximo do extensómetro da chapa T08. Com esta disposição é possível analisar as diferenças de carregamento nos diferentes reforços a meio comprimento, a variação de carga longitudinalmente e comparar o estado de carga do reforço com o da placa. Os reforços formam com a chapa uma estrutura tridimensional e este tipo de estrutura apresenta particularidades de funcionamento em flexão, principalmente junto das zonas de suporte ou de desenvolvimento de grandes deformações fora de plano. No primeiro caso o nível de encastramento à rotação relativamente à baliza dado pelo reforço é muito superior ao dado pela chaparia donde o estado de tensão no reforço deverá ser superior ao da chapa. De facto da Figura 7 nota-se uma grande diferença de carregamento entre o extensómetro do reforço TR01 e o da chapa adjacente T08. O primeiro está muito carregado apresentando um

comportamento linear até aos 14mm de deslocamento vertical enquanto o segundo se encontra praticamente descarregado nesta fase.

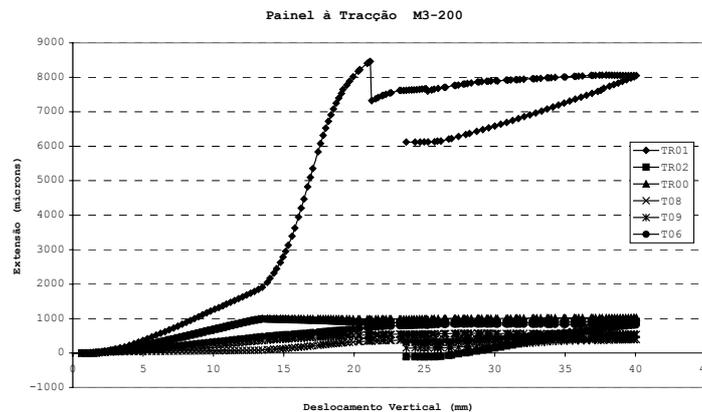


Figura 7 Deformação axial nos extensómetros dos reforços e das zonas adjacentes da chapa.

Ultrapassado o limite de deslocamento do ciclo anterior o alongamento no extensómetro TR01 dispara para valores elevadíssimos que representam uma forte plastificação nessa superfície do reforço o que só poderá ser justificado pela existência de uma zona muito afectada termicamente pela soldadura do reforço à baliza e à chapa. Ao atingir o deslocamento de colapso, este extensómetro apresenta uma descarga brusca de valor igual à extensão de cedência. Isto significa que o reforço ficou momentaneamente totalmente descarregado o que poderá ter sido consequência de uma rotura em tracção de uma das soldaduras dos reforços ou mera redistribuição de tensões devido ao rápido desenvolvimento de grandes deformações que vindas do convés se propagaram até ao fundo.

O gráfico de pormenor do comportamento dos reforços a meio vão apresenta uma paragem no crescimento das extensões e correspondentemente das tensões a partir do último ciclo de carga e descarga. Inclusivamente o ponto onde está o extensómetro do perfil central denota alguma descarga na fase de pré colapso, Figura 8. Nota-se que a maior parte da carga passa pelo reforços apesar desta estabilização a partir dos 14mm e que as extensões residuais são de sinais contrários, o que permite de alguma forma autoequilibrar todo o painel depois de retirada toda a carga. Os declives de carga e descarga dos reforços é muito superior aos da chapa adjacente resultado das diferentes rigidez à flexão.

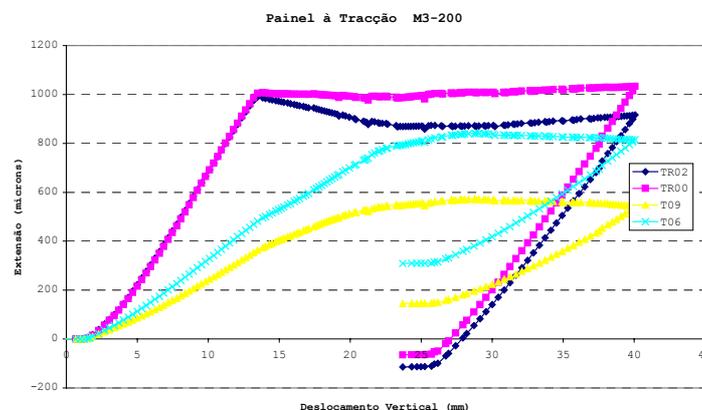


Figura 8 Extensómetros a meio vão do fundo do modelo M3-200.

## EFFECTIVIDADE DOS PAINÉIS EM COMPRESSÃO

O painel em compressão foi o mais instrumentado, tendo-se instalado 23 extensómetros dos quais 5 nos reforços e os restantes nas chapas. Optou-se por dispor de dois conjuntos de extensómetros em posição transversal de forma a obter a distribuição de extensões a meio vão e junto à baliza. Devido às expectativas relativamente ao modo de colapso foi instalada um terceiro conjunto de extensómetros a 100mm do conjunto central, portanto a um quarto do comprimento da onda do modo de instabilidade expectável, evitando-se assim perder toda a informação sobre o regime de pós colapso na eventualidade de se dar um colapso muito localizado e junto a um dos conjuntos principais.

### Conjunto de extensómetros junto à baliza

O número de extensómetros neste conjunto não permite fazer uma avaliação da distribuição de extensões na globalidade devido ao reduzido número de pontos de leitura. A distribuição local pode ser cautelosamente avaliada através da distribuição de extensões fornecida pelos 3 extensómetros da esquerda da Figura 9 que representam um elemento reforçado típico.

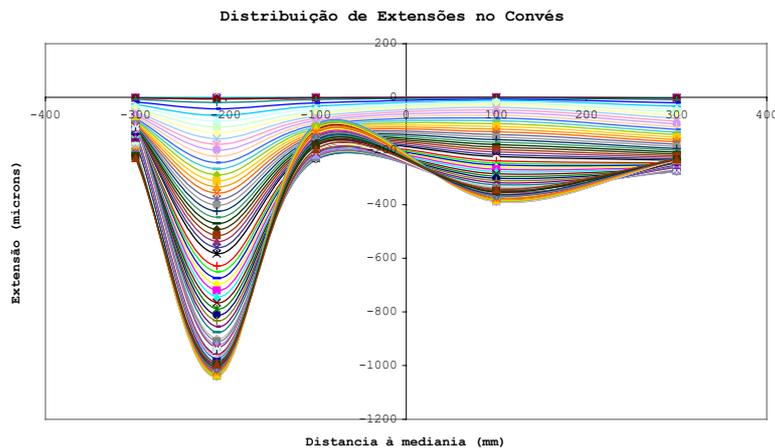


Figura 9 Extensões no painel à compressão do modelo M3-200 medidas a 50mm da baliza até ao momento máximo suportado.

Identifica-se perfeitamente mesmo na fase inicial de carregamento alguma falta de efectividade a meio das placas (cotas -300 e -100mm) comparativamente à chapa junto ao reforço (cota -210mm). Quando o colapso é atingido somente um dos cinco pontos de leitura se tinha deformado plasticamente, coincidindo de facto com o único extensómetro perto do reforço, o que faz pressupor que junto aos outros reforços aconteça o mesmo, contrariamente ao que se poderá concluir da parte direita da mesma figura.

Note-se ainda o baixo valor das extensões a meio dos elementos de placa, não esquecendo que existem extensões residuais devidas ao ciclos de carga e descarga iniciais, pelo que não se pode afirmar nada acerca do estado real de tensões.

A forma da curva do lado direito da figura, por ser construída unicamente a partir dos pontos do meio das placas, dá uma imagem semelhante à da deformação das placas e ao seu evoluir com o carregamento. Neste ponto de vista salienta-se o recuar da extensão à cota -100mm ainda na fase de pré colapso o que indica o desenvolvimento de grandes deformações naquele local em direcção ao exterior já que os extensómetros estão colocados na superfície exterior e as extensões se tornam menos negativas.

## Conjunto central de extensómetros

Nesta zona pretendeu-se obter uma distribuição mais precisa da distribuição de extensões ao longo do processo de carregamento pelo que se instalaram 9 extensómetros colocados alternadamente no meio dos elementos placa e na chapa junto aos reforços. A Figura 10 apresenta graficamente os resultados das medições nestes extensómetros em função do deslocamento imposto.

Identificam-se claramente quatro fases de evolução das deformações nos elementos de placas: na primeira fase que vai até 14mm de deslocamento imposto, o comportamento é praticamente linear sendo de salientar a existência de dois extensómetros, C02 e C12, localizados a meio dos elementos que apresentam extensões relativas positivas que aumentam com o carregamento. Tal facto deve-se à existência de deformações residuais resultantes do último ciclo de carga, com concavidade local em direcção ao interior e de amplitude suficientemente elevada para que a extensão de tracção devido ao aumento da curvatura local se sobreponha às extensões negativas devidas à compressão global do painel. No final desta fase alguns dos extensómetros apresentam variações próximas do valor da extensão de cedência.

Na segunda fase, que vai dos 14 aos 20mm, assiste-se a uma ampliação da taxa de crescimento das deformações fora de plano, acentuando-se o declive das curvas extensão deslocamento imposto.

A terceira fase é muito curta e coincide com o desenvolvimento do colapso global do painel associado a extensões que excedem largamente a extensão de cedência, mais do que quinze vezes no caso do C16.

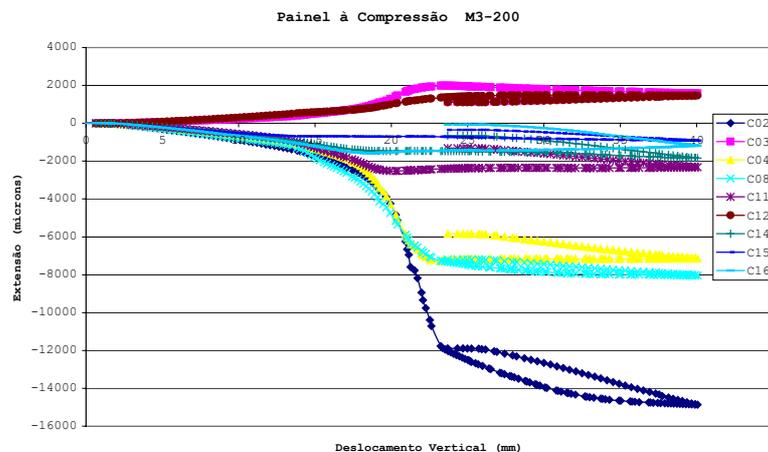


Figura 10 Medições nos nove extensómetros no painel à compressão do modelo M3-200 localizados a meio vão até ao deslocamento máximo aplicado, 40mm, seguido de retirada total do deslocamento imposto.

A quarta fase coincide com o regime pós colapso, dando-se uma grande estabilização das extensões ou mesmo algum decréscimo nos extensómetros C11, C16, C15 e C14. Os extensómetros C02 e C08 apresentam ainda crescimento das extensões devido ao facto de estarem localizados em zonas onde o colapso local continua em desenvolvimento, isto é, zonas muito próximas das rótulas plásticas.

A Figura 11 mostra a evolução das extensões nos nove extensómetros em análise até à carga máxima suportada pela estrutura. Nesta secção, as rótulas plásticas associadas às grandes deformações dão-se na zona esquerda da figura, com o desenvolvimento de uma semi onda virada ao exterior entre o bordo e o primeiro reforço, seguida de uma deformação em sentido contrário entre este reforço e o central, voltando a trocar de sinal nos reforços seguintes.

As extensões residuais são muito elevadas coincidindo praticamente com os valores máximos, descontando na melhor das hipóteses a extensão de cedência. Isto significa que não houve

lugar a grandes variações da geometria deformada durante o processo de descarga, libertando-se unicamente a energia elástica acumulada.

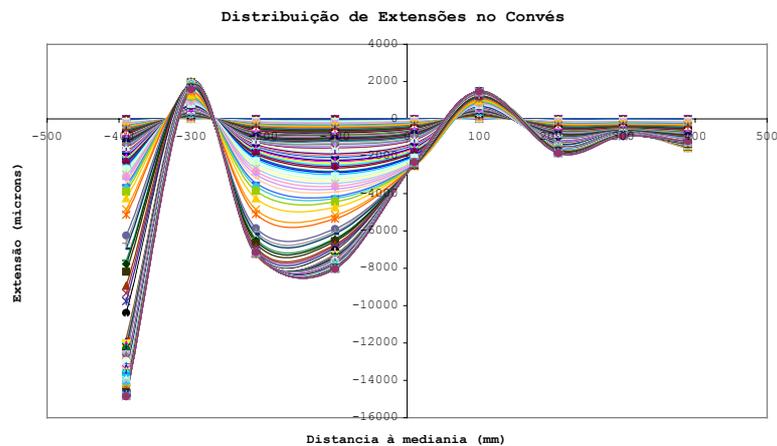


Figura 11 Extensões no painel à compressão do modelo M3-200 medidas a meio vão até ao momento máximo suportado.

### Estado dos reforços

Os extensómetros colocados a meio vão nos reforços foram quatro no total o que permitiu ler as extensões nos dois lados do reforço central através dos transdutores CR03 e CR04. A disponibilidade destas duas leituras permite calcular a tensão média através da espessura e saber a curvatura local da superfície do reforço. Os restantes dois extensómetros (CR00 e CR05) foram colocados em cada um dos outros reforços barra do mesmo lado do CR03.

Dadas as previsões de colapso do painel à compressão com deformações simétricas em reforços consecutivos, será de esperar uma boa coincidência entre as leituras dos extensómetros CR00, CR04 e CR05. De facto assim aconteceu como pode ser visto na Figura 12 até próximo da fase de colapso, notam-se uma grande coincidência do estado de carga.

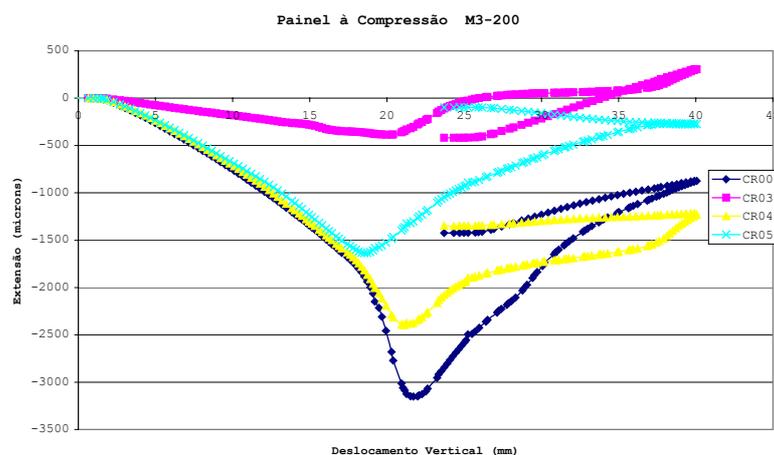


Figura 12 Medições nos extensómetros colocados nos reforços do painel à compressão do modelo M3-200 localizados a meio vão até ao deslocamento máximo aplicado, 40mm, seguido de retirada total do deslocamento imposto.

O reforço mais à direita (CR05) perde eficácia mais cedo do que os restantes não apresentando uma inflação nas extensões o que só pode significar que houve uma falha local.

Um aspecto extremamente interessante diz respeito ao carregamento de compressão que se dá nos pontos onde estão colocados os extensómetros CR00 e CR04 durante a fase de descarga da estrutura; este carregamento local resulta do facto dos extensómetros estarem colocados do lado contrário à chaparia relativamente ao eixo neutro e dado o tipo de colapso obtido com o painel a deformar para o exterior. Assim na fase de pós colapso e em carga, as grandes deformações tendem a gerar tracção no topo da alma do reforço a qual se soma algebricamente à compressão imposta, reduzindo drasticamente a extensão total. Em descarga, a redução desta tracção devida à flexão do reforço é superior à redução da compressão global aumentando o estado de extensão global. No extensómetro CR05 e em resultado do tipo e forma das deformações permanentes o processo de descarga faz-se normalmente tendendo para extensões cada vez menores.

## 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 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.

Identificam-se ainda dois fenómenos pouco estudados e com implicações na capacidade de carga deste tipo de estruturas: a perda de efectividade dos painéis em tracção, a influência da soldadura na distribuição de tensões e a interacção entre o reforço e a chapa associada.

É evidente dos resultados obtidos a complexidade da distribuição de tensões em estruturas em caixão de paredes finas reforçadas quer nas zonas em compressão quer nas zonas em tracção.

A interacção entre os reforços e a chapa associada origina distribuições de tensões bastante diferentes das que são prevista pela teoria linear elástica de flexão de vigas, agravando-se as disparidades com o aumento da carga e a entrada em regime elastoplástico.

A localização dos reforços, a falta de suporte vertical da chapa, as condições de fabrico e a rigidez das balizas afectam muito a distribuição da carga na estrutura podendo levar à entrada em deformação plástica local em estados prematuros de carregamento.

## 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., e 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. e 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.
- Mansour, A. E., Yang, J. M., e Thayamballi, A. K. (1990). "An experimental investigation of ship hull ultimate strength." *SNAME meeting*, SNAME, 13.1-13.25.
- Nishihara, S. *Ultimate longitudinal strength of mid-ship cross section*. *Naval Arch. & Ocean Engng.* 22, 200-214. 1984.
- Gordo, J. M. e Guedes Soares, C. (2001). "Ensaio de flexão em estrutura de paredes finas reforçadas".

