

MEMÓRIA DE CÁLCULO

ENSAIO EM LABORATÓRIO

O ensaio experimental tem como objetivo determinar a contribuição da resina epóxido para o comportamento estrutural do tabuleiro e garantir a fiabilidade do modelo de barras tridimensional de toda a estrutura, submetido a uma análise estática. Desta forma, realiza-se uma comparação do comportamento de um provete físico, constituído por uma secção semelhante à do tabuleiro, com o comportamento de um provete modelado através de elementos de barra, executado no mesmo programa utilizado para a realização do modelo global da ponte - *Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2012* (ver a Figura 1).

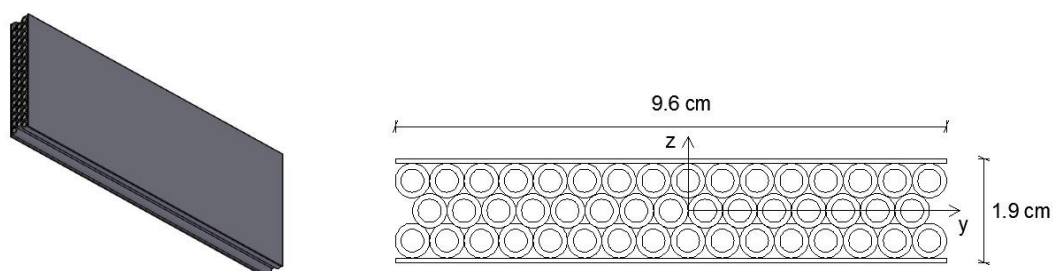


Figura 1 - Dimensões e eixos considerados no provete submetido a ensaio.

Mais especificamente, o provete é ensaiado como uma consola, onde é aplicada uma carga crescente na extremidade desimpedida, sendo medidos os respetivos deslocamentos e verificada a rigidez à flexão.

Contudo, por não ter sido possível considerar um encastramento perfeito no âmbito experimental, e de forma a visualizar a ocorrência de escorregamentos ou flexibilidade da estrutura de suporte, procedeu-se à soldadura de uma barra metálica na extremidade encastrada do provete, a fim de monitorizar os deslocamentos na extremidade desta barra através de um micrómetro digital, e calcular a rigidez de rotação do apoio, que posteriormente é introduzida no modelo de cálculo (ver a Figura 2 e a Figura 3).

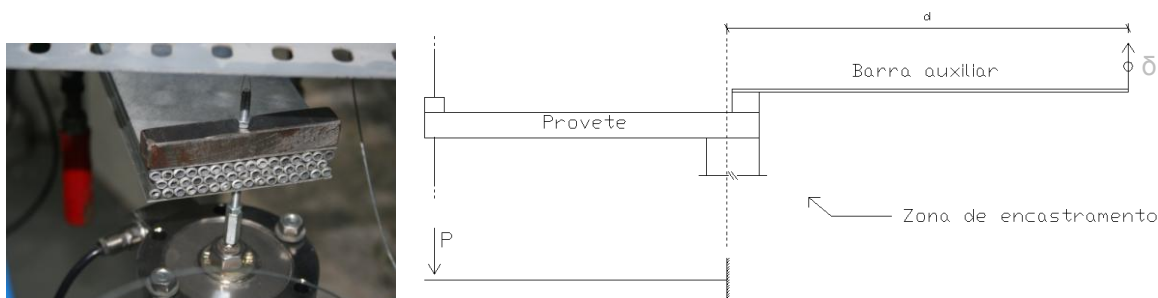


Figura 2 – Fotografia do provete antes de ser submetido ao ensaio (esquerda) e esquema geral do provete submetido ao ensaio (direita).

As características dos materiais utilizados no provete submetido ao ensaio são em seguida indicadas.

- O material utilizado nas chapas e nos tubos é o alumínio (com $E_a=70\text{GPa}$).

- A cola utilizada na junção do conjunto é a Araldite Standard AW 106 com endurecedor HV 933 U.

O modelo de cálculo, representado na Figura 3, é constituído por quatro barras longitudinais e oito barras transversais. Os elementos de barra possuem as mesmas características geométricas e do material do provete físico, o alumínio.

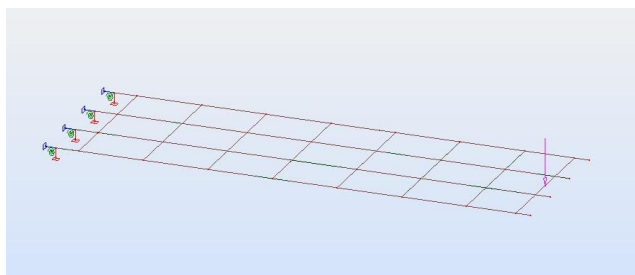


Figura 3 - Modelo de barras do provete submetido ao ensaio.

Os resultados obtidos no ensaio experimental são comparados com o modelo de cálculo através do gráfico força/deslocamento representado na Figura 4.

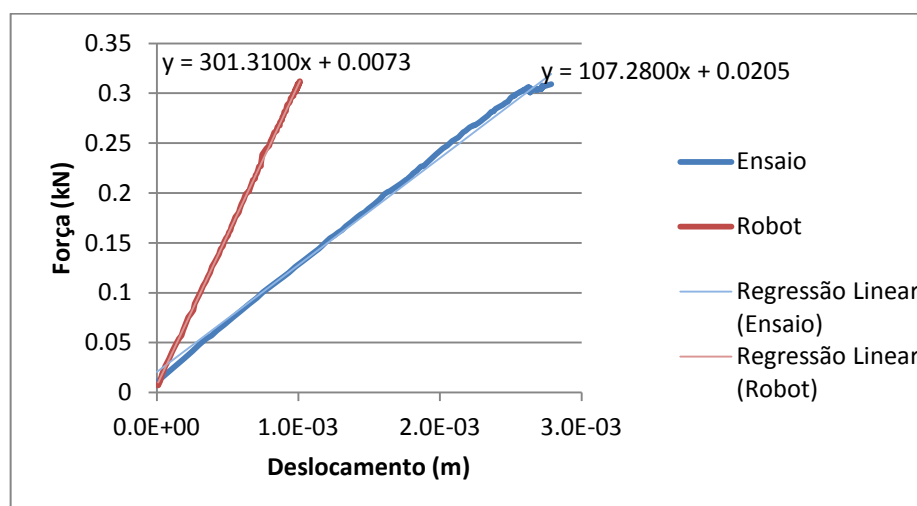


Figura 4 - Gráfico com os valores de força e deslocamento observados no ensaio e no modelo *Robot*.

Fazendo uma aproximação linear dos dados provenientes do ensaio, pode-se verificar que o declive da reta obtida corresponde aproximadamente à rigidez do provete quando submetido às cargas anteriormente descritas, concretamente, 107 kN/m. Por outro lado, verifica-se que a rigidez do modelo de cálculo é de 301 kN/m, podendo-se concluir desta forma que o modelo realizado em *Robot* é 2.81 vezes mais rígido do que o modelo experimental.

Os resultados deste ensaio, que teve como objetivo simular a influência do comportamento da cola como elemento estrutural, influenciam o modelo de barras global da ponte, usado para a análise estática, levando a considerar, por razões de segurança, um valor do momento de inércia das longarinas na direção y reduzido a 65% do seu valor.

ANÁLISE ESTÁTICA E DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA

Na análise estática dos elementos da estrutura são utilizados como base os regulamentos europeus e nacionais, nomeadamente o Eurocódigo 1 e Eurocódigo 3, sendo, sempre que necessário, consultadas as normas do Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes.

As combinações de ações consideradas tiveram em conta as cargas permanentes (peso próprio e pré-esforço), sobrecarga de utilização, variações de temperatura e a ação do vento.

A definição das secções dos elementos estruturais foi realizada através de iterações até se alcançarem as soluções finais. Para isso teve-se em conta as combinações em Estado Limite de Serviço (ELS), com o objetivo de limitar as deformações, e as combinações em Estado Limite Último (ELU) para o cálculo da resistência dos elementos.

Nos ELS são consideradas combinações que dependem da duração do estado limite em causa, isto é, estados limites de curta duração (combinações frequentes) e muito curta duração (combinações raras).

A Tabela 1 representa os deslocamentos máximos obtidos a meio vão, local onde se verificam as maiores deformações.

Visto que se recomenda como valor limite para os deslocamentos verticais e para as combinações frequentes o valor de $L/250$, e estando-se perante um limite de 22.4 cm, pode-se constatar que, mesmo para uma combinação rara, este limite é respeitado.

Tabela 1 - Deslocamentos a meio vão ($L=56$ m).

Combinação	Δ (cm)	L/Δ
Frequente	6.35	881.89
Rara	11.22	499.11

Uma vez que o tabuleiro adotado é uma solução pouco corrente, o enquadramento desta secção em normas e regras de boa prática torna-se difícil. Como tal, é essencial realizar um estudo mais aprofundado para a determinação da resistência e da rigidez desta secção.

Verifica-se que nas três longarinas que definem o tabuleiro os esforços mais críticos são os axiais e os momentos fletores. Dado que estes esforços atuam em simultâneo, as longarinas encontram-se submetidas à flexão composta.

Os principais esforços atuantes nas longarinas encontram-se representados na Tabela 2, onde se pode verificar não só os esforços máximos obtidos, como também os respetivos esforços concomitantes.

Tabela 2 – Principais momentos fletores e esforços axiais atuantes em ELU, para uma longarina.

N_{Ed} (kN)	M_{Ed} (kNm)
- 2119	- 73
1761	- 142
86	- 246
- 49	247

Assim, para a secção constituída por tubos circulares com espessura de parede de 5 mm e 3 mm, realiza-se um ábaco de interação entre os momentos fletores resistentes e os esforços axiais resistentes, onde se introduz os esforços atuantes apresentados na Tabela 2 (ver a Figura 5).

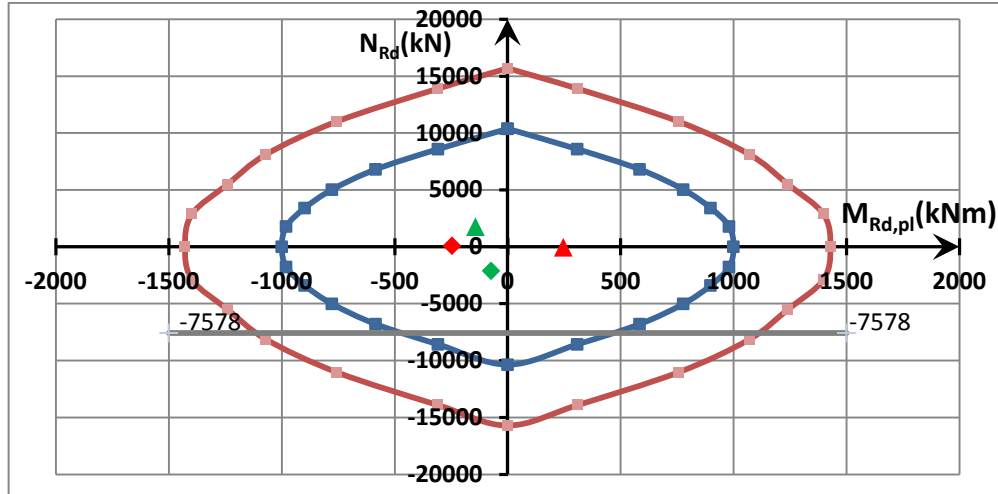


Figura 5 - Âbaco de interação entre os valores de $M_{Rd,pl}$ e N_{Rd} .

Também é determinada a resistência da secção quando submetida a esforços axiais de compressão simples, para controlo do fenómeno de encurvadura. As zonas do tabuleiro onde este fenómeno pode ocorrer são os troços retos das zonas dos acessos. Assim, de acordo com o EC3 parte 1-1, obtém-se o valor de esforço axial resistente à compressão, $N_{Rd,c}$, de 7578 kN (representado pela linha horizontal que se observa na Figura 5).

Analisando a Figura 5, pode-se concluir que tanto os momentos fletores como os esforços axiais resistentes são muito superiores aos esforços atuantes. Desta forma pode-se afirmar que, em ELU, o tabuleiro da ponte verifica as condições de segurança.

Os restantes elementos da estrutura, isto é, mastros e cabos, são verificados através do cálculo automático do *Robot*.

MODELO DE ANÁLISE MICROMECAÂNICA

Após estudada a resistência da secção, e tendo em conta o material utilizado, o aço, e a sua geometria, torna-se necessário verificar a resistência da cola aos esforços atuantes. Para tal, é realizado um modelo através do programa *FEMIX*, recorrendo a elementos finitos sólidos de vinte nós.

É de notar que o modelo de cálculo não representa toda a secção do tabuleiro, mas apenas uma parte que se repete ao longo da largura da secção de 2.50 m (ver a Figura 6).

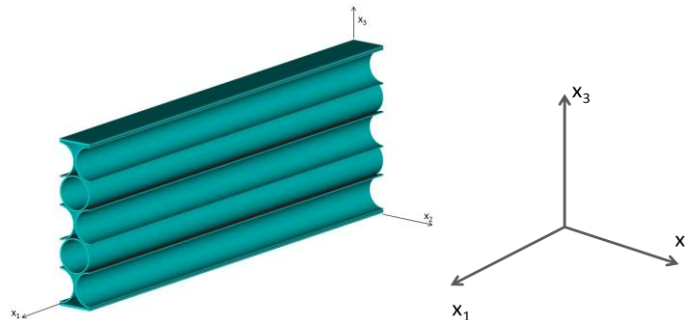


Figura 6 – Modelo de elementos finitos sólidos e referencial adotado.

Este modelo de cálculo possui não só elementos finitos que representam o aço mas também elementos finitos com características que representam a cola, onde é permitido estudar as tensões instaladas na cola e comparar o comportamento do modelo com as conclusões retiradas do ensaio descrito inicialmente.

As características dos materiais dos elementos finitos sólidos que representam a cola e o aço encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 – Características dos elementos finitos sólidos representativos da cola e do aço.

	Elementos de cola	Elementos de aço
Módulo de <i>Young</i> (GPa)	1.2	210
Coefficiente de <i>Poisson</i>	0.33	0.30
Peso próprio	Desprezado	Desprezado

Relativamente às cargas aplicadas, visto que se trata de uma análise linear, e como o tempo de cálculo do programa é muito elevado, apenas é considerado um caso de carga. Posto isto, é colocada uma carga distribuída na extremidade livre cuja resultante é -100 kN.

Este modelo pretende simular um troço do tabuleiro que se encontra submetido à flexão, e como tal, é considerado que este se encontra encastrado numa extremidade, funcionando como uma consola impedida de se deslocar segundo x_2 .

Em suma, o modelo de cálculo do *FEMIX* possui um total de 47 400 elementos finitos sólidos e 311 321 nós, sendo o tempo de cálculo para uma análise linear de cerca de 4 horas num computador pessoal.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Em primeiro lugar é verificada a deformada da estrutura, representada na Figura 7.

Pode-se verificar que a carga concentrada na extremidade provoca uma deformação excessiva, onde os deslocamentos da chapa superior são maiores do que os deslocamentos da primeira linha de tubos. Este fenómeno deve-se ao facto de a carga aplicada ser demasiado concentrada numa zona extrema da chapa, sendo admitido um carregamento de 100 kN. Na realidade, nem o valor da carga nem este efeito são relevantes, visto que se trata de uma análise linear e que a deformação local não afeta a análise do modelo.

Todos os resultados são analisados tendo em conta a relação entre o modelo de elementos finitos sólidos e o modelo de barras global da ponte, estudado anteriormente com o programa *Robot*.

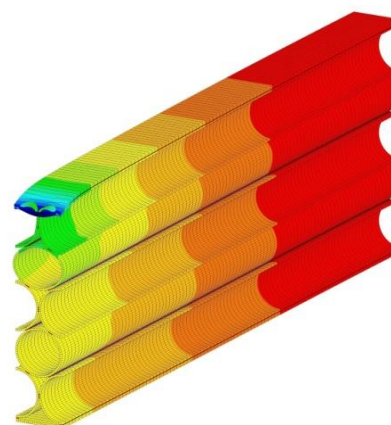


Figura 7 - Deformada do modelo de elementos finitos sólidos.

Em termos quantitativos compara-se o deslocamento vertical no nó central da base inferior do modelo *FEMIX*, com um modelo *Robot* constituído por um elemento de barra com a extremidade encastrada, onde são impostas apenas as características geométricas e só se considera a existência do material aço (ver a Tabela 4).

Tabela 4 - Comparação de resultados entre o modelo *FEMIX* e *Robot*.

	Modelo <i>FEMIX</i>	Modelo <i>Robot</i>
Carga na extremidade (kN)	100	100
Deslocamento (m)	3.2×10^{-3}	1.8×10^{-3}
Rigidez (kN/m)	31250	55095

Pode-se verificar que o modelo de barra do *Robot* é 1.76 vezes mais rígido do que o modelo de elementos finitos sólidos realizado no *FEMIX*. Inicialmente, no ensaio experimental, conclui-se que o modelo de barras do provete no *Robot* é 2.81 vezes mais rígido relativamente ao provete real ensaiado. É necessário lembrar que esta conclusão levou à redução do momento de inércia na direção y de todas as secções consideradas no modelo de barras global da ponte utilizado no seu estudo.

Desta forma pode-se concluir que o ensaio demonstra que a cola provoca na estrutura um decréscimo de rigidez de 65%. Contudo, a presente comparação sugere que o decréscimo de rigidez devido à presença da cola é de, aproximadamente, 43%.

Relativamente às tensões instaladas nos elementos de cola, verifica-se que na combinação mais crítica em ELU as tensões verificam os valores de segurança. Na Tabela 5 encontram-se indicados os valores das tensões resistentes e respetivos esforços atuantes.

Tabela 5 - Valores das tensões resistentes na cola e respetivos esforços atuantes (valores de cálculo).

	Tensão limite de elasticidade (kPa)	Tensão resistente (kPa)	Tensão atuante (kPa)
Tensão de compressão	45300	30200	1150
Tensão de corte	14000	9330	5405
Tensão de tração	22300	14870	575

É importante referir que devido à inexistência de normas e regras a seguir, relativamente a este tipo de material estrutural, torna-se necessário admitir um coeficiente parcial para o ELU, neste caso de 1.5, designado por γ_A .

BIBLIOGRAFIA

- EN 1991. 2002.** *EN 1991 - Acções em Estruturas*. Bruxelas: Comité Europeu de Normalização, 2002.
EN 1993. 2010. *EN 1993 - Projecto de Estruturas de Aço*. Bruxelas: Comité Europeu de Normalização, 2010.