



REABILITAÇÃO DE UMA PONTE CAIS COM TABULEIRO PRÉ-ESFORÇADO

António Costa¹, Júlio Appleton²

¹A2P Consult, Estudos e Projectos, Lisboa, antonio.costa@a2p.pt, ²A2P Consult, Estudos e Projectos, Lisboa, julio.appleton@a2p.pt

RESUMO

Neste artigo abordam-se os aspectos relativos à reabilitação de uma ponte cais com tabuleiro pré-esforçado sujeita à acção do ambiente marítimo.

A obra é constituída por uma plataforma em laje vigada com cinco tramos apoiada em caixões multicelulares assentes no leito do estuário. As vigas foram pré-fabricadas e pós-tensionadas apresentando 22.6m de comprimento. As lajes são também pré-esforçadas por pós-tensão e foram betonadas in situ.

A estrutura está sujeita às condições de exposição mais agressivas do ambiente marítimo, classificadas como classe de exposição XS3. À data da intervenção a obra apresentava 40 anos de idade.

A principal anomalia estrutural induzida pela deterioração observada na presente obra refere-se à corrosão dos cabos de pré-esforço. Trata-se de um tipo de deterioração que tem consequências muito gravosas para a segurança da estrutura pois pode originar o colapso dos elementos tensionados induzido por roturas frágeis.

No presente artigo descreve-se a deterioração observada nas vigas pré-esforçadas e analisam-se as suas consequências para a segurança da estrutura. Procede-se também à descrição da metodologia de intervenção implementada para reabilitar a estrutura a qual incluiu a substituição do tabuleiro.

Palavras-chave: Degradação / Betão / Pré-esforço / Reabilitação



1. INTRODUÇÃO

1.1. Descrição da estrutura

A obra em causa insere-se num estaleiro de reparação naval que tem vários cais e pontes cais, três das quais apresentam estrutura idêntica que a seguir se descreve. Na Fig. 1 apresenta-se uma vista de uma das pontes cais.

A estrutura das pontes cais é constituída por tramos de laje vigada apoiada em caixões espaçados de 26 m fundados no leito do estuário sobre uma camada de enrocamento, Fig. 2.

A laje da plataforma tem uma espessura de 0.30 m e é pré-esforçada transversalmente com cabos aderentes afastados de 0.80 m. Estes cabos têm um pré-esforço útil final de 600 kN/m. A laje está apoiada num conjunto de 6 vigas longitudinais dispostas de forma simétrica relativamente ao eixo da ponte cais. As vigas apresentam um comprimento de 22.6 m e altura de 2.35 m. São pré-fabricadas e estão solidarizadas por duas carlingas pré-esforçadas na zona do meio vão e por uma carlinga pré-esforçada em cada apoio. O pré-esforço das carlingas é constituído por 4 cabos.

O pré-esforço das vigas longitudinais centrais é constituído por 6 cabos sendo 3 cabos com 33 fios $\varnothing 7$, 2 cabos com 23 fios $\varnothing 7$, e 1 cabo com 20 fios $\varnothing 7$. Nas vigas intermédias as armaduras de pré-esforço são constituídas por 5 cabos com 33 fios $\varnothing 7$ e 1 cabo com 24 fios $\varnothing 7$. As vigas longitudinais laterais têm 8 cabos de pré-esforço, sendo 6 cabos com 34 fios $\varnothing 7$, 1 cabo com 33 fios $\varnothing 7$ e 1 cabo com 16 fios $\varnothing 7$, dado que, para além de apoiar a laje, suportam os caminhos de rolamento do guindaste. As vigas têm 2.75 m de altura, estão afastadas entre si de 3.00 m e têm um vão de 21.80 m entre eixo de apoios.



Fig. 1 – Vista de uma das pontes cais

Todo o pré-esforço foi realizado com o sistema BBRV.

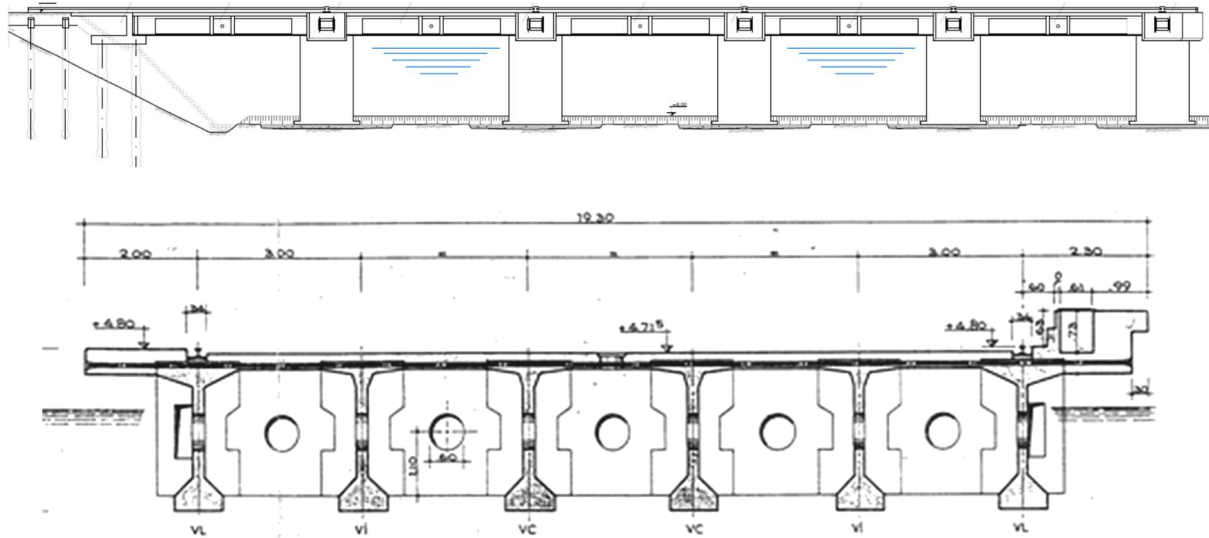


Fig. 2 – Estrutura das pontes cais. Alçado e corte transversal

As obras foram construídas na década de 70 do século passado apresentando nesta altura uma idade de cerca de 40 anos.

1.2. Antecedentes

As obras foram inspeccionadas em 1995 tendo-se verificado uma deterioração acentuada da face superior da laje da plataforma e, localmente, da face inferior. Numa das pontes cais observou-se uma degradação muito acentuada em alguns cabos de pré-esforço na zona sob o carril do guindaste, Fig. 2.

Na Fig. 3 ilustram-se os danos nos cabos de pré-esforço então observados. Nesta figura ilustram-se duas situações distintas: uma refere-se ao estado de um cabo com bainha não injectada onde se observa a destruição total dos fios de pré-esforço; a outra refere-se a um cabo onde se observou a rotura frágil dos fios de pré-esforço associada ao fenómeno da corrosão sob tensão.

As vigas longitudinais não evidenciaram na altura fenómenos de deterioração relevante, todavia a principal preocupação estava relacionada com o estado dos cabos de pré-esforço pois poderiam estar sujeitos a roturas devido à corrosão sem que o fenómeno fosse detectado à superfície do betão ao contrário do que se passa com as armaduras correntes. Foi realizada uma inspecção a estes elementos que consistiu na abertura de janelas para visualização dos cabos, execução de radiografias e medição do teor de cloretos no betão de na calda de injeção das bainhas. Nesta inspecção não foram detectados problemas nos cabos de pré-esforço.

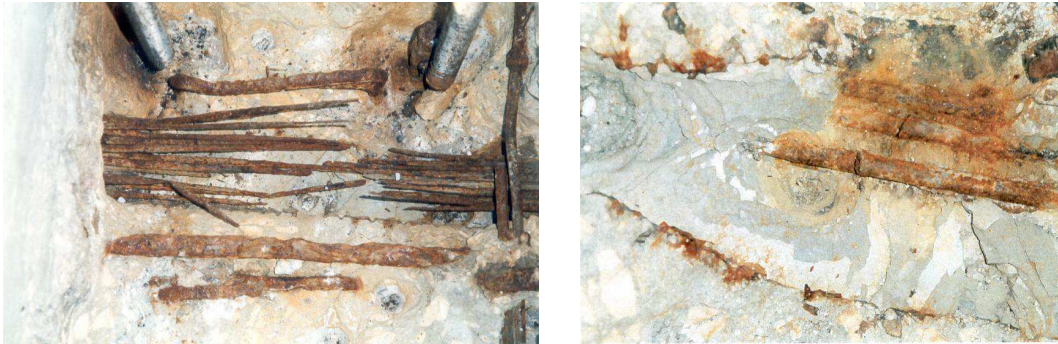


Fig. 3 – Cabos de pré-esforço da laje. Bainha não injectada à esquerda e rotura dos fios devido à corrosão sob tensão à direita.

O elevado estado de deterioração da laje conduziu a uma intervenção de reparação realizada em 1999/2000. Esta intervenção envolveu a laje e o coroamento dos caixões de apoio da plataforma.

2. DETERIORAÇÃO DAS VIGAS LONGITUDINAIS

2.1. Inspeção

Posteriormente à intervenção de reparação as obras foram inspeccionadas periodicamente a partir de 2006. Nessas inspeções vieram a observar-se problemas relevantes relativos aos cabos de pré-esforço das vigas longitudinais e das carlingas.

Os problemas observados nas carlingas referiam-se ao destacamento do betão de recobrimento das ancoragens acabando por expor estes elementos que ficavam directamente sujeitos à acção da água do mar, Fig. 4.

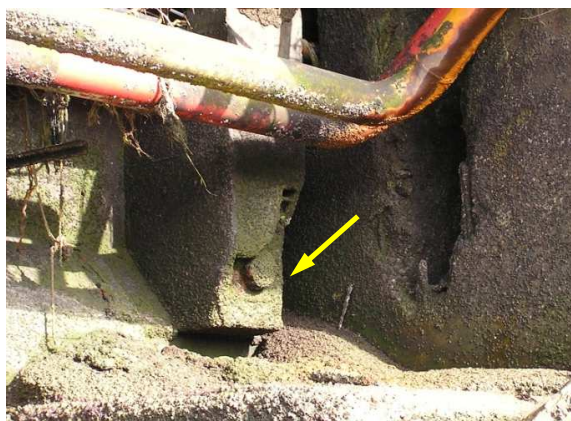


Fig. 4 – Exposição da ancoragem de um cabo em uma carlinga

Trata-se de uma condição muito desfavorável pois pode provocar a desactivação do cabo por rotura dos fios na zona da sua fixação à cabeça da ancoragem. Na Fig. 5 ilustram-se as



ancoragens do sistema de pré-esforço utilizado e a forma como os fios de pré-esforço são fixados à cabeça da ancoragem, observando-se à esquerda uma ancoragem activa antes da demolição do elemento, um conjunto constituído por uma ancoragem passiva e outra activa na fotografia do centro e a cabeça da ancoragem activa na fotografia da direita. Uma intervenção de reparação/reforço para resolver este tipo de danos é de execução muito difícil.



Fig. 5 – Ancoragens dos cabos de pré-esforço das vigas

No que se refere às vigas longitudinais, a principal anomalia observada era uma fenda longitudinal que surgia na zona superior da alma, Fig. 6. Esta fenda apresentava inicialmente um desenvolvimento relativamente pequeno e afectava poucas vigas. Com o decorrer do tempo veio a afectar um número significativo de vigas e o seu comprimento aumentou substancialmente. Trata-se de uma fenda difícil de explicar quer por efeito do comportamento estrutural da viga quer por efeito da deterioração.



Fig. 6 – Fenda longitudinal na zona superior da alma da viga

Analisado o problema veio a constatar-se que a posição da fenda coincidia com o cabo de pré-esforço superior das vigas e que a sua origem poderia estar associada à corrosão deste cabo. Trata-se de um cabo que não tem relevância estrutural para a fase definitiva da estrutura mas que foi essencial na fase construtiva para efeito do controlo das tensões de



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

tracção na zona superior da viga induzidas pelo elevado pré-esforço utilizado. Na Fig. 7 ilustra-se a disposição dos cabos de pré-esforço numa viga intermédia, numa secção próxima do quinto de vão, observando-se os cinco cabos inferiores e o cabo superior anteriormente referidos.



Fig. 7 – Cabos de pré-esforço de uma viga intermédia

Esta fenda tem uma influência muito significativa na capacidade resistente das vigas como de discute mais à frente. Esta anomalia associada à elevada incerteza quanto ao estado dos cabos de pré-esforço das vigas longitudinais conduziu à solução de intervenção que consistiu na substituição integral da plataforma das pontes cais.

Nesta altura foi já substituída a plataforma de uma das pontes cais. A intervenção realizada, envolvendo a demolição da plataforma existente, constitui uma oportunidade única para se avaliar o estado da estrutura e dos cabos de pré-esforço.

Ilustram-se nas figuras seguintes os aspectos principais relativos ao estado das vigas e dos cabos de pré-esforço.

Na Fig. 8 observam-se as fendas no interior da alma induzidas pela corrosão do cabo de pré-esforço superior após o corte da viga. A Fig. 9 ilustra as fendas à face da alma verificando-se que o que se observa à face não traduz o que se passa no interior.



Fig. 8 – Tipo de fendilhação observada na zona do cabo de pré-esforço superior



Fig. 9 – Fendas longitudinais na alma das vigas ao nível do cabo superior

A Fig. 10 ilustra o início da fendilhação a partir do cabo de pré-esforço. Estas fendas originam danos internos sem que existam sinais visíveis à superfície da alma.



Fig. 10 – Início da formação de fendas a partir do cabo ainda sem atingir as faces da alma



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

Na Fig. 11 observa-se corrosão localizada na bainha de um cabo de pré-esforço após demolição da viga. Trata-se de um comportamento característico da corrosão por acção dos cloretos a qual tende a concentrar-se em zonas anódicas com dimensão relativamente reduzida. Na fotografia da direita observam-se os fios de pré-esforço de um cabo, verificando-se uma acentuada corrosão desses fios. Alguns fios sofreram uma rotura frágil associada à corrosão sob tensão. Este tipo de dano não é, frequentemente, detetável à superfície do elemento conduzindo a situações críticas relativas à segurança que podem originar roturas sem pré-aviso. O fenómeno é mais frequente em elementos em que o betão está saturado como, por exemplo, nas zonas sujeitas à acção da maré. Nestes casos não ocorre expansão significativa dos produtos da corrosão e, conseqüentemente, não se gera fendilhação relevante pelo que a deterioração não é visível à superfície dos elementos.



Fig. 11 – Bainha corroída localmente e corrosão elevada dos fios de pré-esforço

Na Fig. 12 ilustram-se situações em que os cabos de pré-esforço não foram injectados. Na fotografia da direita a ancoragem ficou presa à parede do caixotão de apoio da viga e os fios de pré-esforço destacaram-se da bainha após a remoção da viga.



Fig. 12 – Cabos de pré-esforço não injectados



2.2. Avaliação do comportamento

Para além da corrosão dos fios de pré-esforço, que conduz a uma redução da capacidade resistente das vigas, um aspecto importante no que se refere ao comportamento destes elementos é o efeito da fenda longitudinal na alma ao nível do cabo de pré-esforço superior.

A avaliação deste efeito pode ser realizada ao nível da secção da viga e ao nível do elemento estrutural.

No que se refere ao comportamento ao nível da secção, o principal efeito da fenda é criar uma zona onde a transmissão de tensões entre o banzo inferior tracionado e o banzo superior comprimido é fortemente prejudicada. Caso ocorra uma zona fragilizada na alma da viga poderá desenvolver-se uma rotura por corte e a viga deixará de funcionar como uma secção monolítica. Mesmo não ocorrendo rotura, a transmissão de tensões através da zona fragilizada será limitada e o banzo superior será apenas parcialmente mobilizado. A Fig. 13 ilustra este comportamento.

Para que a zona acima das fendas seja mobilizável à compressão é necessário que as tensões possam ser encaminhadas através da zona danificada. Apresentando esta zona uma capacidade resistente reduzida, a transmissão de tensões é limitada e, conseqüentemente, o banzo superior só será parcialmente mobilizado. No limite ocorrerá a rotura por corte da zona em causa e a viga ficará reduzida à zona abaixo da fenda com perda substancial da sua capacidade resistente (anulação da força F_{c2} indicada na figura 13).

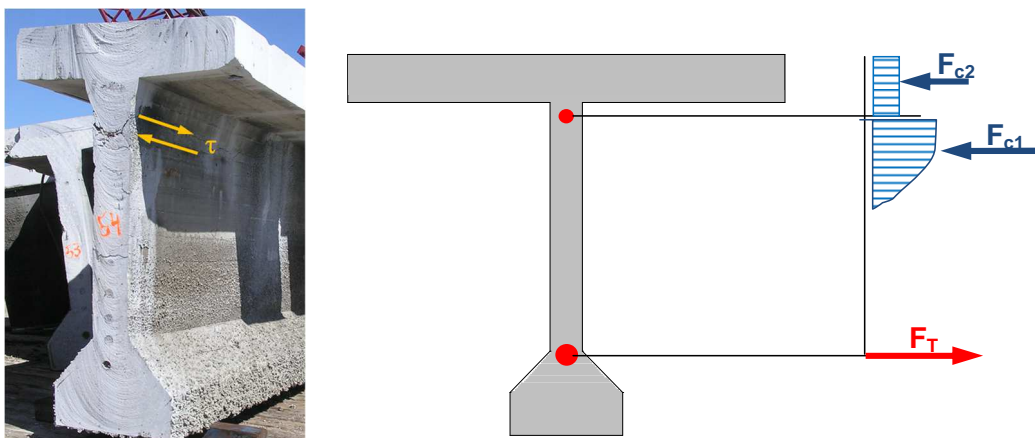


Fig. 13 – Efeito dos danos na compressão do banzo superior

Este comportamento depende significativamente da extensão da fenda na direcção longitudinal da viga. Se a extensão for pequena o fenómeno terá uma importância reduzida.



Para avaliar este efeito realizaram-se várias análises da viga com diferentes extensões da zona fendilhada. A Fig. 14 ilustra um dos casos avaliados.

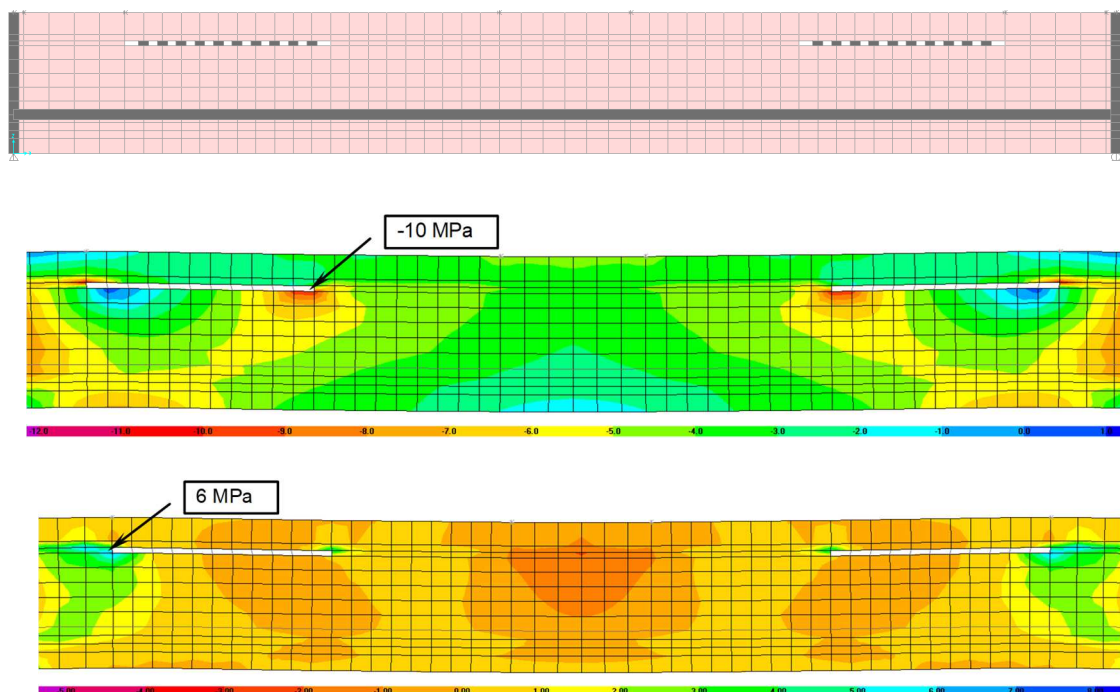


Fig. 14 – Modelo de elementos finitos da viga, tensões de compressão e tensões de tracção

A viga foi modelada por elementos finitos de casca sendo introduzida a zona danificada por eliminação da continuidade dos elementos finitos, conforme ilustrado na Fig. 14. Avaliaram-se as tensões de tracção e compressão no betão para uma situação de carga envolvendo a acção do guindaste sobre a viga. Embora tenha sido realizada uma análise elástica, menos adequada à modelação deste tipo de fenómeno, obtiveram-se algumas conclusões importantes, nomeadamente no que se refere ao desenvolvimento das tensões de tracção.

Como se pode observar na Fig. 14 as tensões de tracção actuantes nas zonas limite das fendas são muito elevadas. Isto significa que as fendas tenderão a propagar-se sob a acção de cargas elevadas levando, no limite, à separação do banzo comprimido da restante parte da viga. Com esta separação verificou-se que a capacidade resistente baixa para cerca de 30% da capacidade da viga não danificada o que conduz a uma situação de colapso.

Um outro aspecto que foi analisado refere-se ao comportamento dos fios de pré-esforço com perda de secção por acção da corrosão. Foram realizados ensaios de tracção desses fios e compararam-se os resultados com os obtidos em fios não corroídos. Na Fig. 15 ilustra-se um dos fios ensaiados.



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL



Fig. 15 – Exemplo de um fio de pré-esforço ensaiado com perda de secção devida à corrosão

Na Tabela 1 indicam-se a tensão resistente (σ_t) e a extensão última (ϵ_u) obtida para os vários provetes. Indicam-se ainda o diâmetro (D) dos fios sem danos, a área dos fios e a força de rotura (F_t). Os provetes designados por R são os relativos a fios não corroídos e os provetes designados por D são os que apresentam diferentes graus de corrosão.

É possível verificar que a tensão de rotura dos fios danificados é, em alguns casos, muito inferior à dos fios não deteriorados. Este fenómeno deve-se à corrosão por picadas que consiste numa corrosão muito localizada e profunda por vezes difícil de observar à superfície do elemento. Outro aspecto relevante do comportamento é a menor capacidade de deformação dos fios corroídos que se traduz numa perda de ductilidade. Este fenómeno deve-se à concentração das extensões nas zonas de menor secção dos fios. Na Fig. 16 representam-se os diagramas tensão-deformação de vários provetes que ilustram este fenómeno. No provete D5A, que apresenta o maior nível de corrosão, a tensão de rotura e a extensão última são muito mais baixas que no caso dos fios não corroídos.

Tabela 1 – Resultados dos ensaios dos fios de pré-esforço

Fio	D (mm)	Área (mm ²)	F _t (kN)	σ_t (MPa)	ϵ_u (%)
R1	7,07	39,258	67,71	1724	4,25
R2	7,09	39,480	68,14	1726	5,79
R3	7,08	39,369	67,32	1710	5,62
D1A	-	37,226	58,71	1577	2,05
D1B	-	36,913	65,31	1769	4,73
D2A	-	33,223	55,32	1665	4,09
D2B	-	34,180	51,5	1542	2,02
D3A	-	33,405	61,75	1695	4,19
D3B	-	36,438	64,07	1693	-
D4A	-	37,851	63,37	1674	-
D5A	-	24,265	31,52	1299	0,93

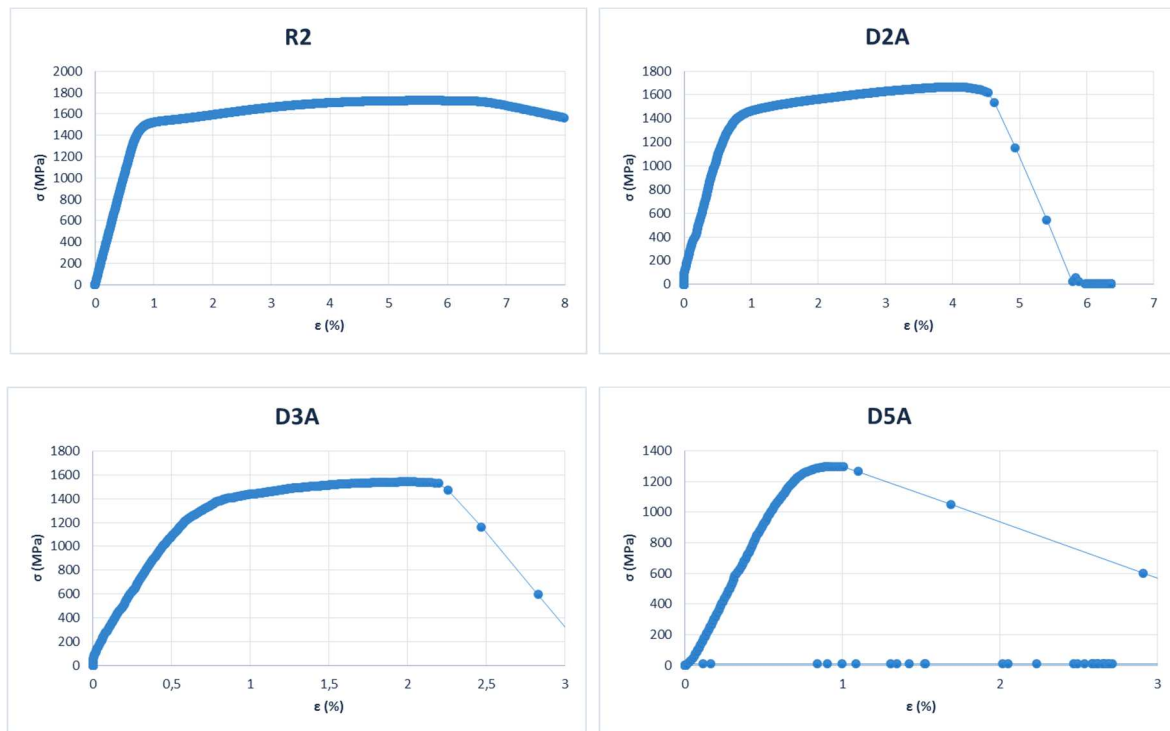


Fig. 16 – Diagramas tensão-deformação de alguns dos provetes ensaiados

3. INTERVENÇÃO DE REABILITAÇÃO

Face ao tipo de deterioração e às suas consequências para a segurança da estrutura, a opção para a reabilitação da estrutura foi a de substituir integralmente a plataforma.

De modo a manter os apoios existentes a nova plataforma a executar apresenta uma estrutura semelhante à existente mantendo-se a espessura da laje e alterando-se ligeiramente a geometria das vigas longitudinais. Esta concepção obriga, naturalmente, a adoptar vigas pré-esforçadas podendo, no entanto, questionar-se a sua adequação em termos de durabilidade dada a elevada agressividade do ambiente de exposição.

Face ao conhecimento actual dos fenómenos de deterioração envolvidos no ambiente marítimo é hoje possível definir as medidas de protecção para assegurar a vida útil necessária. Na presente obra foi especificado um betão de elevado desempenho e recobrimentos de armaduras e cabos de pré-esforço que assegurem que, no período de vida útil, os cloretos não atinjam o valor crítico ao nível destes elementos. Como medida de protecção suplementar, traduzindo o conceito de protecção multi-barreira, foi aplicada às vigas uma protecção superficial de alto desempenho. No pré-esforço das carlingas, executado em obra, foram utilizadas bainhas de polietileno de modo a garantir a protecção do aço de pré-esforço.