

**ENSAIO DE CORDÕES DE AÇO PARA PRÉ-ESFORÇO
NOVAS TÉCNICAS DESENVOLVIDAS NO LNEC**

**ESSAI DE TORONS EN ACIER POUR PRÉCONTRAINTÉ
NOUVELLES TECHNIQUES DÉVELOPPÉES AU LNEC**

António Manuel Baptista*

RESUMO

O aumento de solicitações que desde há alguns anos se vinha sentindo no LNEC para o controle de qualidade de cordões de aço para pré-esforço conduziu ao empreendimento de vários estudos, com o objectivo de desenvolver técnicas de ensaio que permitissem determinar um conjunto de características mecânicas daquele produto suficientes para se poder efectuar a sua recepção.

Na presente comunicação é efectuada uma análise de diferentes soluções testadas e da sua viabilidade de aplicação, apresentando-se ainda alguns resultados, obtidos em estudos comparativos entre as principais soluções retidas para aplicação prática.

RESUMÉ

L'accroissement des demandes d'essais au LNEC pour le controle de qualité des torons en acier pour précontrainte a conduit à des études à fin de développer des techniques d'essai qui puissent permettre la détermination d'un ensemble de caractéristiques mécaniques suffisantes pour décider sur son acceptacion à des essais de reception.

Dans la présente communication, on fait une analyse de différentes solutions qui ont été essayées et on présente quelques résultats obtenus à des essais de comparaison entre les solutions retenues pour l'exercice des essais de controle de qualité.

* Eng^o Civil, Assistente de Investigação do LNEC

1 - INTRODUÇÃO

Durante muitos anos, o controle de qualidade dos cordões de aço para pré-esforço realizado no LNEC baseou-se na determinação da força de rotura do cordão, obtida em ensaio de tracção realizado com os sistemas de amarração utilizados na sua aplicação em obra.

A crescente solicitação do LNEC para ensaios deste tipo de produto e a necessidade de um melhor conhecimento das suas características, resultantes do incremento em número e importância das obras em betão pré-esforçado realizadas no país, conduziram a uma vasta série de estudos com o objectivo de desenvolver técnicas de ensaio para os cordões mais frequentemente utilizados, constituídos por 7 fios (1 fio central e 6 fios enrolados em hélice à sua volta), de modo a se poder efectuar um controle eficaz da sua qualidade.

De entre as principais dificuldades a superar nestes estudos destacam-se o desenvolvimento de sistemas eficazes para a amarração dos cordões à máquina de ensaio, e a concepção de sistemas de registo para o traçado dos diagramas força-deformação nos ensaios de tracção estáticos.

As exigências que o sistema de amarração deve satisfazer são variáveis em função do tipo de ensaio e da natureza da informação que se pretende obter. Na secção 2 é feita uma breve exposição sobre esta questão.

O comportamento das amarrações depende basicamente do modo como asseguram a transmissão da força aplicada pela máquina ao cordão. Nas secções 3 a 7 é feita uma análise de diferentes tipos de amarração estudados, tecendo-se alguns comentários sobre a viabilidade da sua aplicação e sobre o grau de sucesso obtido na sua exploração. Na secção 8 são apresentados alguns resultados obtidos em ensaios de comparação dos sistemas de amarração retidos para aplicação prática.

Na secção 9 é feita uma referência aos sistemas de amarração utilizados em ensaios de fadiga e na secção 10 é efectuada uma análise dos sistemas de registo utilizados no ensaio de tracção, tecendo-se em seguida alguns comentários sobre a determinação do módulo de elasticidade dos cordões.

2 - EXIGÊNCIAS DE COMPORTAMENTO DAS AMARRAÇÕES

2.1 - Ensaio de tracção

O ensaio de tracção de um cordão poderá ser realizado com diferentes objectivos. Independentemente destes, existem cuidados que devem ser comuns a todos os ensaios, com particular relevância para a garantia de repartição uniforme da força pelos vários fios do cordão, e para o impedimento de deslocamentos relativos dos fios entre si, bem como de quaisquer movimentos de torção ou translacção perpendicularmente ao eixo do provete, durante o decurso do ensaio.

No caso de se pretender determinar as características do produto, o ensaio deverá culminar numa rotura do cordão na zona livre da influência do sistema de amarração.

No entanto, se se pretender efectuar apenas um controle de determinadas características garantidas pelo fabricante, poder-se-à admitir a ocorrência de roturas na zona de influência da amarração, desde que no ensaio se obtenham valores iguais ou superiores aos garantidos, devendo o ensaio ser considerado inválido no caso de tal condição não ser satisfeita. Neste caso, o sistema de amarração a utilizar poderá variar, consoante a informação que se pretenda obter.

2.2 - Ensaio de fadiga

Num ensaio de fadiga, em que se pretende quantificar a resistência de um troço de cordão a um determinado tipo de solicitação periódica ondulada, seja para fins de caracterização do produto ou para controle dos valores garantidos pelo fabricante, o sistema de amarração deve ser concebido de modo a evitar qualquer interacção com o cordão que possa conduzir a uma rotura na zona de amarração ou na sua proximidade.

Deverá ainda ser prestada uma atenção especial à uniformidade de repartição da força pelos fios, evitando-se qualquer flexão parasita ou heterogeneidade na amarração que, ao induzir condições mais gravosas de solicitação nalguns fios, possa conduzir à sua rotura prematura, sem que o resultado obtido possa traduzir o comportamento médio do cordão para a solicitação aplicada.

2.3 - Ensaio de dispositivos acessórios para aplicação do pré-esforço

Poderão existir situações em que se pretenda estudar o comportamento de determinados dispositivos acessórios necessários à aplicação do pré-esforço em obra, tais como as cunhas de amarração por exemplo. Nestes casos, quer em ensaios de tracção quer em ensaios de fadiga, poderá o sistema de amarração utilizado, ao incluir tais dispositivos, conduzir sistematicamente a roturas na zona de amarração, sendo no entanto os resultados obtidos considerados válidos, desde que se entenda que eles não são representativos do comportamento do cordão mas do conjunto cordão-dispositivos acessórios.

3 - UTILIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE AMARRAÇÃO DAS MÁQUINAS DE ENSAIO

A utilização das garras de amarração das máquinas directamente sobre a superfície do cordão, tal como habitualmente se procede no ensaio de varões para betão armado, é em geral inviável. A grande sensibilidade dos aços dos cordões a concentrações de tensões resultantes de incisões na sua superfície, aliada ao elevado valor das tensões aplicadas, conduz a roturas prematuras por corte de um ou mais fios, a partir de entalhes provocados pelas garras. Estas roturas ocorrem frequentemente ainda durante a fase de regime elástico do cordão, pelo que não é possível obter valores válidos da força de rotura ou de outras características mecânicas, devido ao risco de danificação do extensómetro.

Da constatação deste facto, surge naturalmente a ideia de utilizar um material que, interposto entre as garras da máquina e o cordão, proteja a superfície deste dos entalhes referidos. Seguindo tal procedimento, poder-se-à ser conduzido a diferentes tipos de soluções de eficácia muito variável, de que se efectua uma breve análise nas secções 4 e 5.

4 - PROTECÇÃO DA SUPERFÍCIE DO CORDÃO ATRAVÉS DE UM MATERIAL NÃO ADERENTE

No caso de se interpôr um material não aderente entre as garras de amarração da máquina e a superfície do cordão, os resultados dependerão da dureza e espessura do material e da forma da superfície de contacto.

4.1 - Utilização de materiais duros

No caso de se utilizar um material duro, de superfície lisa, em geral ocorrerá um escorregamento entre o cordão e o material interposto, sob a acção de forças tanto menores quanto menor fôr a área da superfície de contacto.

Poderão ser obtidos melhores resultados se se utilizarem duas peças com um encaixe com a forma do cordão, permitindo um melhor ajustamento à sua superfície e, conseqüentemente, aumentar a área de contacto com o cordão. Tal processo poderá permitir a determinação da maioria das características mecânicas do cordão e, eventualmente, obter uma rotura fora da zona de influência da amarração. Para o sucesso desta solução são factores condicionantes o comprimento e a espessura das peças, de modo a garantir uma uniformidade de distribuição do aperto das garras da máquina pela superfície do cordão, evitando a ocorrência de concentrações de tensões. Tal facto implica que, para possuir um sistema suficientemente fiável, deveriam ser utilizadas peças bastante longas e espessas cuja utilização, além de pouco prática, é muitas vezes incompatível com o equipamento de ensaio disponível.

Acresce-se ainda que, no caso de a dureza das peças ser inferior à dos cordões, ocorrerá um desgaste muito rápido do encaixe ao fim de algumas utilizações, o que poderá inutilizar as peças ou passar a facilitar os escorregamentos do cordão durante o ensaio. Se, no entanto, a dureza fosse superior, tal facto poderia dar origem a pequenos entalhes na superfície do cordão e conduzir à sua rotura na zona de amarração.

4.2 - Utilização de materiais macios

No caso de se utilizar um material macio, tal como folhas de alumínio, de latão, de lixa com carborundo, etc, o comportamento da amarração dependerá sobretudo da espessura do material.

Se a espessura fôr pequena, os dentes das garras da máquina atravessá-lo-ão e irão ferir a superfície do cordão, provocando roturas na amarração. A rotura será no entanto retardada em relação à aplicação directa das garras sobre o cordão, dependendo os progressos obtidos do comprimento das garras e da densidade

e altura dos seus dentes. Em geral, é possível obter resultados satisfatórios para ensaios de controle no caso de se utilizarem garras longas, com grande densidade de dentes curtos. No entanto, a percentagem de ensaios inválidos é ainda elevada, pelo que se trata de um sistema pouco recomendável.

Se a espessura do material fôr grande, os dentes das garras não chegarão a ferir o cordão, mas ocorrerá em geral um escorregamento deste em relação à amarração, devido à deformação por corte do material ou ao seu escorregamento em relação à superfície do cordão.

5 - PROTECÇÃO DA SUPERFÍCIE DO CORDÃO ATRAVÉS DE UM MATERIAL ADERENTE

A utilização de um material aderente à superfície do cordão para efectuar a sua amarração foi estudada através de duas soluções diferentes.

5.1 - Amarração através de pinhas de chumbo e estanho

Este processo de amarração baseou-se na técnica há muito utilizada no LNEC para o ensaio de cabos metálicos. Os fios do cordão são separados em cada uma das extremidades e dobrados a frio na forma de um gancho, formando um bolbo que é estanhado e posteriormente colocado num recipiente que em seguida se preenche com uma liga fundida de chumbo e estanho. Depois de a liga arrefecer, retiram-se os moldes e obtem-se uma pinha à qual é transmitida, através de um batente, a força aplicada pela máquina.

Este método, se bem que permitindo obter bons resultados, e satisfazendo em geral para a realização de ensaios de controle, é bastante dispendioso e conduz ainda a uma percentagem de roturas na amarração superior à que seria desejável. Estes dois factores implicaram o prosseguimento dos estudos em busca de outras soluções mais satisfatórias.

5.2 - Amarração através de tubos preenchidos com resinas

Este sistema de amarração havia já sido anteriormente utilizado no LNEC, na realização de ensaios de fadiga de varões para betão armado [7]. No caso do ensaio de cordões para pré-esforço o problema é mais complexo, devido à maior sensibilidade do aço a quaisquer danos superficiais, à sua menor superfície de contacto com a amarração em comparação com a dos varões, e à maior intensidade das forças aplicadas no ensaio.

A aplicação deste método aos cordões depende de um grande número de parâmetros, tais como o comprimento da amarração, a rigidez do tubo, a espessura da resina entre o tubo e o cordão, o tipo de resina, respectivo tempo de cura e características das cargas eventualmente adicionadas, a rugosidade interna dos tubos, o estado de limpeza da superfície do cordão, o correcto posicionamento do cordão em relação ao tubo e o eficaz preenchimento do tubo com a resina, sem deixar quaisquer espaços vazios (devidos a bolhas de ar, por exemplo). O deficiente

controle de um destes parâmetros poderá conduzir a escorregamentos do cordão devidos à deformação da resina, a falta de aderência entre o tubo e a resina, ou entre esta e o cordão, ou permitir roturas na amarração, devidas a eventuais ferimentos da superfície do cordão, após uma deformação excessiva do tubo e da resina sob o aperto das garras.

Depois de devidamente controlados todos estes parâmetros, foi possível obter uma solução completamente satisfatória, conduzindo a roturas simultâneas dos sete fios do cordão numa mesma secção, longe da zona de influência da amarração (veja-se a figura 1) e após uma pronunciada deformação plástica confirmada pelos registos força-deformação até à rotura e pela estricção dos fios na secção de rotura (veja-se a figura 2). A percentagem de roturas na zona de influência da amarração, ao longo de alguns anos de experiência, tem-se revelado muito baixa, tendo em geral ocorrido devido a um mau comportamento das resinas ou, eventualmente, a erros cometidos durante a preparação das amarrações.

Este tipo de amarração foi pormenorizadamente descrito numa comunicação apresentada no 1º Encontro Nacional Sobre Estruturas Pré-esforçadas, em 1986 [6].

6 - AMARRAÇÃO ATRAVÉS DE PEÇAS PRÉ-ESFORÇADAS

Se bem que o sistema de amarração referido em 5.2 se tenha revelado plenamente eficaz, apresentava no entanto o inconveniente de exigir muitos cuidados, devido ao grande número de parâmetros influenciando o seu comportamento, e de requerer um prazo de preparação bastante longo, condicionando o tempo de resposta do LNEC, sobretudo em períodos de acumulação de pedidos de ensaio simultâneos. Por este motivo, decidiu-se prosseguir os estudos na busca de uma solução mais expedita e igualmente eficaz, de modo a baixar drasticamente os tempos de preparação dos provetes. Destes estudos resultou uma nova solução, que consiste numa variação da referida em 4.1.

O sistema de amarração consiste em duas peças de um aço-liga de alta resistência, com um encaixe de forma cilíndrica e superfície rugosa onde é aplicada uma peça de cobre, recozido antes do ensaio, possuindo um encaixe com a forma do cordão (veja-se a figura 3).

As peças são apertadas em torno de uma das extremidades do cordão através de um conjunto de parafusos da classe 8.8 (veja-se a figura 3), pré-esforçados antes da realização do ensaio. Depois de apertadas, as peças são instaladas entre as garras da máquina de ensaio (veja-se as figuras 13 e 14), sendo gradualmente apertadas por estas à medida que a força aplicada pela máquina vai crescendo.

O pré-esforço dos parafusos é aplicado segundo um gradiente de forças que, conjugado com o aumento crescente do aperto pelas garras da máquina e com a deformação transversal do cordão ao longo do ensaio, permite mobilizar progressivamente as tensões de aperto transversais para zonas da amarração menos solicitadas longitudinalmente, fazendo os gradientes de tensões longitudinais variar inversamente com os de tensões transversais. Tal processo permite evitar a concentração de tensões nas extremidades da zona útil do provete e obter roturas simultâneas dos sete fios numa

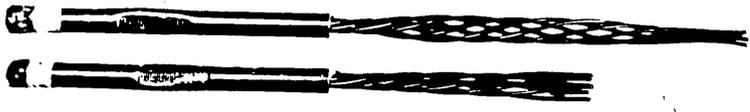


Figura 1



Figura 2

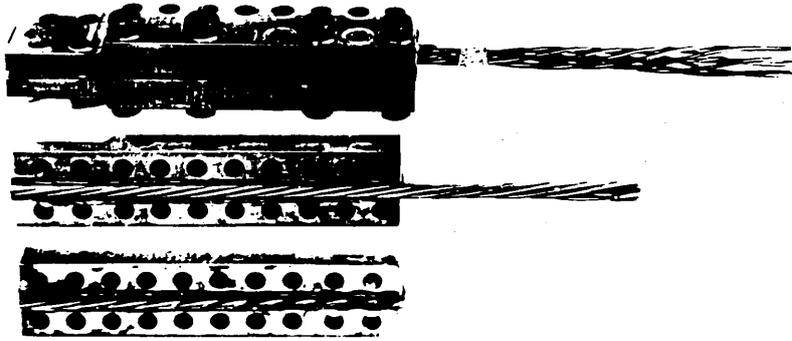


Figura 3



Figura 4

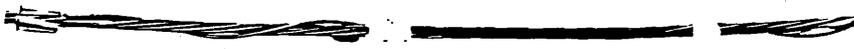
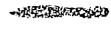


Figura 5



Figura 6



Figura 7

mesma secção, longe da zona de influência da amarração (veja-se as figuras 3 e 14), após uma pronunciada deformação plástica, tal como nos ensaios efectuados com tubos preenchidos com resinas (veja-se as figuras 4 e 9).

7 - AMARRAÇÃO ATRAVÉS DE CUNHAS PARA APLICAÇÃO DO PRÉ-ESFORÇO

A utilização de cunhas, do tipo das utilizadas em obra para aplicação do pré-esforço, como sistema de amarração, constitui uma prática há longa data utilizada no LNEC, para a realização de ensaios de tracção de cordões com o objectivo de determinar a sua força de rotura.

Tal como foi referido em 2.3, este sistema conduz a roturas do cordão na zona de amarração (veja-se as figuras 5 e 6), não permitindo portanto conhecer a verdadeira força de rotura do cordão. Deste modo, embora possa funcionar para ensaios de recepção em que se obtenham resultados superiores aos garantidos, esta solução não permite nunca rejeitar cordões defeituosos pois, ocorrendo a rotura na amarração, o ensaio será sempre considerado inválido, tal como foi referido em 2.1.

Por este motivo, caso existam suspeitas sobre a qualidade de um determinado tipo de cordão, só será possível obter conclusões se forem utilizados sistemas de amarração do tipo dos referidos nas secções 5.2 e 6.

Note-se no entanto que este tipo de ensaio apresenta bastante interesse quando utilizado para estudar o comportamento conjunto cunhas-cordão. De facto, a realização de estudos sobre o comportamento de diversos tipos de cunhas levou à conclusão que, num ensaio de tracção, e como tal muito provavelmente em obra, elas poderão ter comportamentos muito diferentes. Para tal, são factores condicionantes a sua geometria, o respeito das tolerâncias geométricas entre as cunhas e as cavidades cónicas em que serão alojadas, e as características do aço de que são constituídas (tipo de aço e tratamentos mecânicos e térmicos sofridos), bem como a densidade, geometria e dureza dos dentes de amarração.

Embora ao nível da força de rotura obtida na ensaio as diferenças possam não ser muito notórias, elas já o são ao nível da extensão na rotura que se consegue atingir nos cordões (veja-se a secção 8), permitindo portanto explorar em maior ou menor quantidade a sua ductilidade na zona de amarração. Tal facto leva igualmente a supor, embora tal estudo não tenha ainda sido efectuado, que conforme as cunhas apresentem um comportamento diferente em termos da extensão na rotura que permitem obter, também o apresentarão em termos da resistência à fadiga do cordão na zona de amarração.

Este problema, embora geralmente não seja abordado, devido ao reduzido nível de tensões na zona de amarração durante a utilização da obra, poderá assumir importância no caso de existir uma deficiente amarração do cordão ao longo do seu comprimento, ou em casos particulares, como o das pontes atirantadas, em que o esforço existente no cordão seja absorvido na sua totalidade na zona de amarração.

8 - COMPARAÇÃO ENTRE OS COMPORTAMENTOS DE DIFERENTES SISTEMAS DE AMARRAÇÃO

No quadro I apresentam-se resultados de alguns ensaios realizados com diferentes sistemas de amarração sobre troços de cordão retirados duma mesma bobine, sendo suposto que possuem aproximadamente as mesmas características mecânicas.

A simbologia utilizada encontra-se de acordo com a Norma Europeia EN 10002/1 [4].

QUADRO I

Ref.	Processo amarração	E kN/mm ²	F _{p0,1} kN	F _{p0,2} kN	F _{t1} kN	F _m kN	A _t %	Zona de rotura
A1	Peças pré-esforçadas	193	158	161	161	184	6,5	Meio do provete
A2	Tubos com resina	182	158	161	159	186	6,1	Meio do provete
A3	Cunhas tipo I	179	160	163	158	183	5,7	Na amarração
A4	Cunhas tipo I	190	158	162	161	182	5,8	Na amarração
A5	Cunhas tipo I	181	157	159	159	181	-	Na amarração
B1	Peças pré-esforçadas	184	241	247	243	276	6,5	Meio do provete
B2	Tubos com resina	178	240	248	241	276	6,0	Meio do provete
B3	Cunhas tipo I	175	239	245	238	274	5,1	Na amarração
B4	Cunha I + Cunha II	177	241	248	240	272	4,3	Na Cunha II
B5	Cunha II + Cunha III	188	241	247	240	251	1,4	Na Cunha III

Os provetes com as referências A e B eram constituídos por troços de cordão com diâmetros nominais de, respectivamente, 12,70 mm e 15,24 mm. Os provetes com o índice 1 foram ensaiados com o sistema de amarração descrito em 6, os de índice 2 com o sistema descrito em 5.2 e os de índice 3 a 5 com o sistema referido em 7. A base de medição utilizada para a determinação da extensão total na rotura (A_t) foi de 600 mm.

Nos ensaios dos provetes B3 e A3 a A5, foram utilizadas cunhas de amarração do mesmo tipo nas duas extremidades. Nos ensaios B4 e B5 utilizaram-se cunhas de diferentes tipos nas duas extremidades a fim de comparar os seus comportamentos.

No conjunto dos ensaios, verificou-se que os valores do módulo de elasticidade (E), das forças limites convencionais de proporcionalidade (F_{p0,1} e F_{p0,2}) e da força limite convencional de extensão total a 1% (F_{t1}), obtidos em cada uma das séries, A e B, são sensivelmente constantes, dentro da dispersão que é habitual na determinação destas grandezas, independentemente do sistema de amarração utilizado. O seu valor poderá ser afectado sobretudo

pela velocidade de ensaio, pelo que este é realizado segundo velocidades normalizadas, de acordo com a Norma EN 10002/1 [4] (ou ISO 6892 [5], antes da aprovação desta).

Já no caso da força máxima (F_m) atingida no ensaio, é possível notar uma certa diminuição nos ensaios com cunhas em relação aos outros dois sistemas.

No entanto, a grande diferença de comportamento entre os sistemas é observável sobretudo através dos valores obtidos para A_t . Enquanto que nos provetes 1 e 2 os sistemas de amarração permitiram explorar a ductilidade total dos fios, obtendo-se roturas longe das zonas de amarração após uma estrição apreciável para aços deste tipo, nos provetes 3 a 5 ocorreram roturas nas amarrações, observando-se comportamentos muito diferentes conforme o tipo de cunhas utilizado. Com efeito, enquanto que os valores de A_t foram da mesma ordem de grandeza nos ensaios com cunhas do tipo I (A3, A4 e B3), nos ensaios em que as roturas ocorreram em cunhas do tipo II (B4) e do tipo III (B5) tais valores foram drasticamente reduzidos.

As diferenças relativas entre os valores de F_m e de A_t obtidos nos ensaios B3 a B5 e os valores das mesmas grandezas obtidos no ensaio B₁ (veja-se as figuras 9 a 12), permitem concluir que A_t constitui um parâmetro muito mais sensível do que F_m no estudo do comportamento de cunhas para aplicação de pré-esforço, tal como foi referido na secção 7:

$$\frac{F_m^{B1} - F_m^{B3}}{F_m^{B1}} = 0,72\% ; \quad \frac{F_m^{B1} - F_m^{B4}}{F_m^{B1}} = 1,45\% ; \quad \frac{F_m^{B1} - F_m^{B5}}{F_m^{B1}} = 9,06\%$$

$$\frac{A_t^{B1} - A_t^{B3}}{A_t^{B1}} = 21,5\% ; \quad \frac{A_t^{B1} - A_t^{B4}}{A_t^{B1}} = 33,8\% ; \quad \frac{A_t^{B1} - A_t^{B5}}{A_t^{B1}} = 78,5\%$$

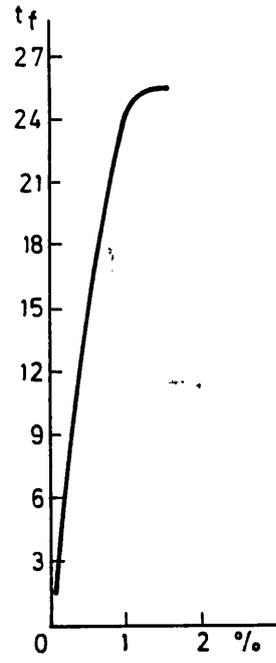
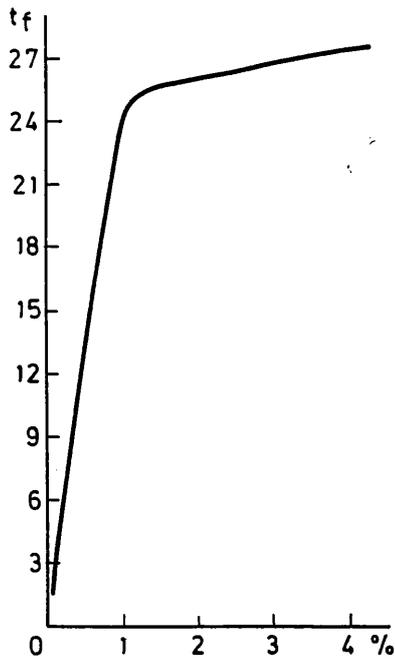
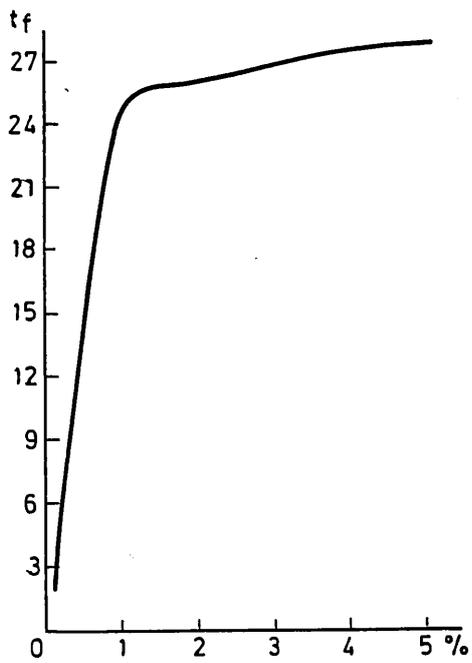
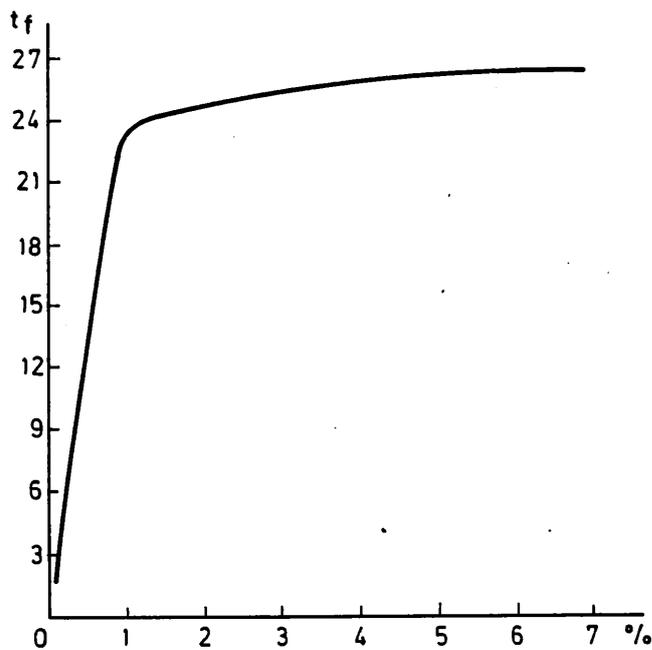
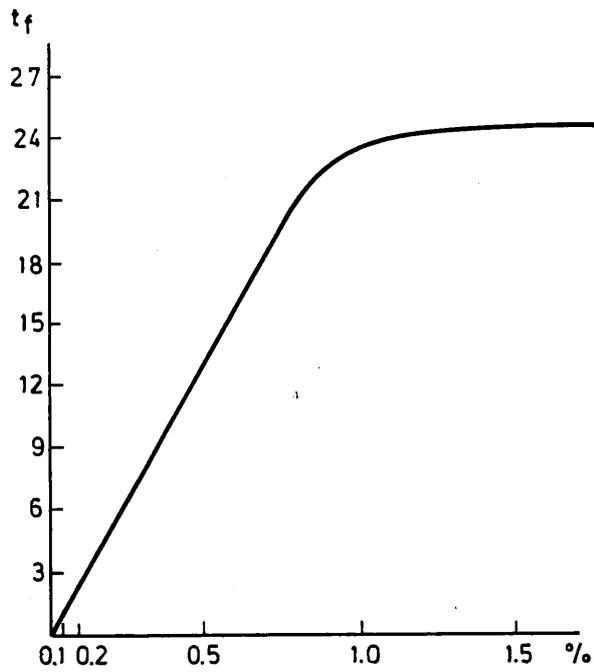
9 - ENSAIOS DE FADIGA

O estudo do comportamento dos sistemas de amarração em ensaios de fadiga foi surgindo na sequência dos progressos que se foram progressivamente obtendo no estudo de soluções para ensaios de tracção.

Atendendo às elevadas exigências colocadas pelo ensaio de fadiga, apenas foram estudadas as soluções que apresentaram um alto grau de fiabilidade na realização dos ensaios de tracção.

No que se refere à exploração do sistema de amarração através de tubos preenchidos com resina, houve apenas que aperfeiçoar a preparação das amarrações de modo a impedir qualquer deslocamento relativo dos fios entre si e do cordão em relação à amarração. Tal objectivo foi conseguido [6], tendo-se passado a explorar regularmente esta solução em ensaios de fadiga (veja-se a figura 7).

No que se refere à exploração do sistema constituído pelas peças de amarração pré-esforçadas, houve que reestudar o problema, devido ao diferente nível de tensões aplicadas e à necessidade de reduzir ao máximo a influência da amarração nas extremi-



dades da zona útil do provete. Para além de se terem introduzido ligeiras alterações no sistema, conferindo uma protecção adicional ao cordão nesta zona, foram alterados os gradientes de pré-esforço a aplicar, tendo-se conseguido obter resultados plenamente satisfatórios, traduzidos por ensaios em que os provetes, sujeitos às condições correntes de ensaio, ultrapassaram largamente os dois milhões de ciclos ou atingiram roturas a meio da sua zona útil, longe de qualquer influência da amarração.

10 - REGISTO DOS DIAGRAMAS FORÇA-DEFORMAÇÃO

10.1 - Equipamento utilizado

A realização dos estudos referidos na secção 8 só foi possível na sequência do desenvolvimento de técnicas de registo dos diagramas força-deformação dos cordões até à rotura, cujo estudo decorreu paralelamente ao das amarrações. Segue-se uma breve descrição do equipamento empregado e uma análise crítica da sua utilização.

Na determinação dos valores de E , $F_{p0,1}$, $F_{p0,2}$ e F_{t1} (veja-se a figura 8) são utilizados extensómetros com erros de exactidão inferiores a 1%. Este tipo de equipamento apresenta no entanto os inconvenientes de geralmente não poder ser utilizado até à rotura do cordão sem sofrer danos e de possuir bases de medição com um comprimento reduzido (em geral 50 mm), relativamente ao passo de enrolamento da hélice do cordão que atinge valores até 200 mm (veja-se a figura 13).

Outro inconveniente que surge na utilização destes extensómetros reside na dificuldade da sua fixação sobre os fios do cordão [6] devido à elevada dureza destes, o que rapidamente conduz a desgastes das lâminas que passam a ter tendência a escorregar sobre os fios. Este escorregamento é ainda facilitado por movimentos relativos de torção dos dois fios em que o extensómetro se encontra fixado, resultantes de diferentes níveis de tensões residuais instaladas durante o seu enrolamento aquando do fabrico do cordão.

A necessidade de dispôr de um equipamento que permitisse traçar os diagramas força-deformação até à rotura do provete, a fim de permitir determinar o valor da extensão total na rotura (veja-se a figura 9), levou à realização de estudos com o objectivo de conceber um sistema de medição suficientemente preciso.

Uma das principais características que se pretendia deste sistema era o de poder realizar medições da deformação em qualquer base de medição, de preferência com comprimentos longos (iguais ou superiores a três vezes o passo da hélice do cordão), de modo a obter um registo representativo da deformação dos sete fios. A utilização de bases de medição longas apresenta no entanto o inconveniente de, em regime plástico, o extensómetro ser afectado pela torção da hélice devida à deformação longitudinal do cordão, implicando uma rotação relativa entre dois pontos fixos ao longo de uma linha paralela ao eixo do cordão. Tal facto impede a utilização de extensómetros com uma estrutura rígida e pontos de fixação constantes, pois seriam danificados pela torção

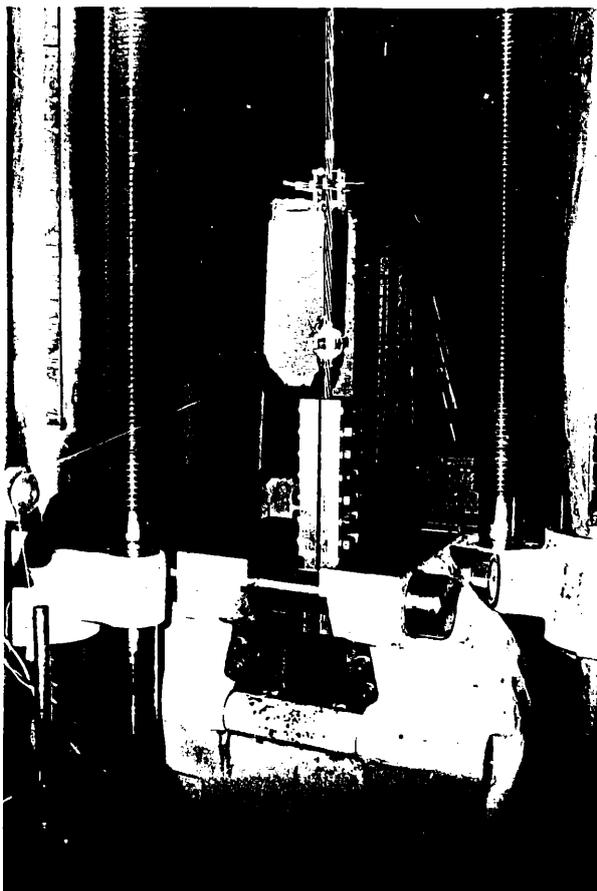


Figura 8

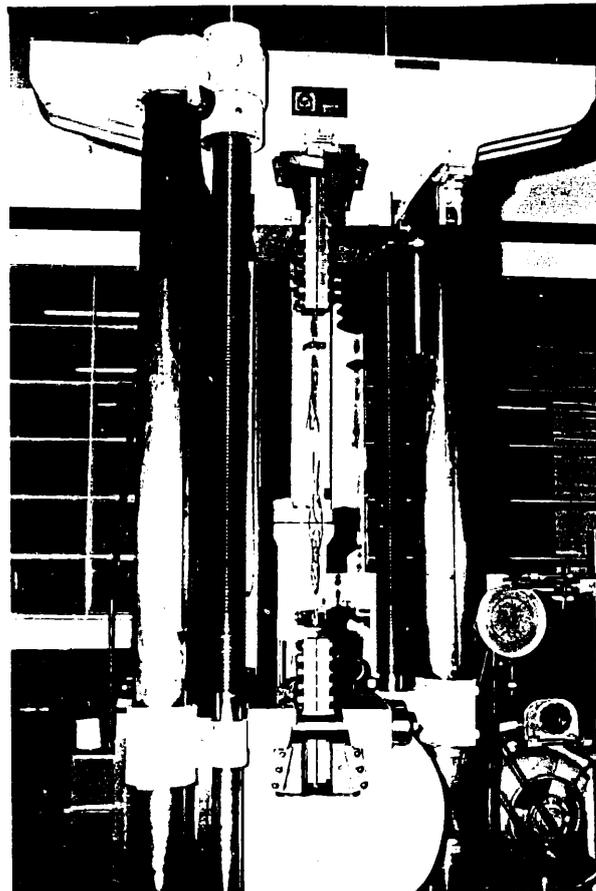


Figura 9

flexão das extremidades de fixação do extensómetro, em torno da superfície do contacto com o cordão, o que conduz à necessidade de assegurar um encastramento rígido que impeça tais movimentos.

Após se terem estudado várias soluções, optou-se por um sistema constituído por duas peças rigidamente fixadas sobre o provete e um fio inextensível, preso numa das extremidades a uma das peças, passando por uma roldana na outra peça e ligado a um extensómetro indutivo na outra extremidade (veja-se a figura 8). A calibração deste sistema permitiu concluir que dispõe de erros de exactidão inferiores a 2%. A sua utilização na determinação da extensão total na rotura conduz em geral a valores com erros inferiores a 5%. A fim de dar uma ordem de grandeza deste valor, refira-se que numa base de medição de 600 mm, correntemente utilizada (veja-se a figura 9), e para um valor de A_t de cerca de 6%, um erro de 5% na medição de A_t corresponde a um erro de cerca de 1,8 mm na medição da deformação do cordão. Este erro resulta em grande parte dos movimentos de torção anteriormente referidos e da dificuldade em determinar a origem do registo das deformações, pois este somente é iniciado depois de se ter aplicado ao cordão uma força inicial de cerca de 10% do valor nominal da força de rotura. Dependendo do nível de tensões residuais nos fios, poderão ser cometidos erros de vários décimos de milímetro na estimação da deformação durante a aplicação da força inicial, o que poderá introduzir erros até 2 ou 3% no cálculo de A_t .

QUADRO 2

	A5	B1	B3	B4	B5
E' (kN/mm ²)	181	184	175	177	188
E'' (kN/mm ²)	177	174	171	173	184
$\frac{E' - E''}{E'} \times 100\%$	2,2%	5,4%	2,3%	2,3%	2,1%

10.2 - Determinação do módulo de elasticidade

Se se observar com atenção o quadro 1, é possível notar que os valores obtidos para os módulos de elasticidade apresentam dispersões muito superiores às dos valores das forças $F_{p0,1}$, $F_{p0,2}$ e F_{t1} , igualmente obtidos a partir do diagrama força-deformação.

Com efeito, a determinação do módulo de elasticidade apresenta em geral bastantes dificuldades e é afectada por vários factores que introduzem dispersões consideráveis, sendo frequente os fabricantes apresentarem valores garantidos com variações de 10%, dentro do mesmo produto.

No que se refere à medição das deformações, a utilização de extensómetros com bases reduzidas pode conduzir a erros por excesso no valor de E , devidas a escorregamento das lâminas de fixação sobre os fios. Por outro lado, o sistema de medição utilizado até à rotura do provete, para além de possuir maiores erros de exactidão, poderá conduzir a erros por defeito no valor de E , devidos ao fenómeno de torção do cordão. No quadro 2 são apresentados valores do módulo de elasticidade obtidos em bases de 50 mm (E') e de 600 mm (E''), nalguns dos ensaios referidos na secção 8. No caso do provete A5, a determinação de E' e E'' foi feita com a mesma escala de deformações, o que impediu, neste ensaio, determinar o valor de A_t .

Entre provetes com as mesmas características mecânicas, o valor do módulo de elasticidade obtido no ensaio pode ainda variar consoante o tipo de amarração utilizado. Com efeito, a variação do módulo de elasticidade tangente ao longo do diagrama é bastante condicionada pelo comportamento do fio central do cordão. Dependendo do tipo de aperto nas extremidades do provete, este fio começará a ser esforçado mais cedo ou mais tarde, conforme a sua amarração se faça a partir das extremidades ou, mais gradualmente, através do aperto dos seis fios envolventes.

Entre diferentes lotes duma mesma produção poderão ainda verificar-se diferenças nos módulos de elasticidade devidas à variação das dimensões das secções transversais dos fios, motivadas pelo desgaste das fieiras durante a sua trefilagem. Deste modo, conforme se utilizem os valores nominais ou os valores reais da secção transversal dos cordões no cálculo de E , poderão obter-se diferenças até cerca de 2% do valor calculado. No LNEC é prática habitual efectuar a determinação de E a partir do valor real da secção do cordão, determinado por pesagem do troço a ensaiar. Este método encontra-se no entanto também sujeito a erros, pois em estudos efectuados pelo autor sobre a variação do

peso específico deste tipo de aços foram detectadas variações até 2% do valor geralmente adoptado nos cálculos (77 kN/m^3).

O valor do módulo de elasticidade pode ainda ser afectado directamente pela variação do diâmetro do fio central, pois desta dimensão depende o grau de aperto que sofrerá dos outros seis fios, sob uma determinada força aplicada ao cordão. Este aperto poderá ainda ser condicionado, para além das tensões residuais nos fios exteriores, pelo atrito entre as superfícies destes e a do fio central, o qual poderá ser afectado pela existência de oleosidades ou outras matérias estranhas.

Tem ainda interesse referir que o valor do módulo de elasticidade fornecido como resultado do ensaio corresponde habitualmente ao valor do módulo de elasticidade tangente na fase final de regime elástico do cordão, sendo o que em geral apresenta maior interesse para o estudo do comportamento da estrutura em serviço. A utilização deste valor no cálculo da deformação a aplicar às extremidades dos cordões em obra, para introdução de um determinado pré-esforço, pode conduzir a diferenças em relação às deformações correspondentes à aplicação do mesmo pré-esforço lido nos macacos. Este facto poderá resultar da variação do módulo de elasticidade durante a deformação inicial dos fios exteriores, até amarrarem convenientemente o fio central.

11 - AGRADECIMENTOS

O autor agradece o empenhamento e perseverança dos Técnicos Manuel Ferreira e Silvestre Barroqueiro, do Núcleo de Comportamento das Estruturas do LNEC, fundamentais para o êxito dos esforços investidos ao longo dos estudos referidos na presente comunicação.

12 - BIBLIOGRAFIA

- [1] Euronorm 138, Armatures de précontrainte, CECA/CCE (1979)
- [2] RILEM/FIP/CEB, Recommendation RPC 8 - Essai de fatigue sur armatures de précontrainte, RILEM (1979)
- [3] ASTM, A370 - Mechanical Testing of Steel Products, (1988)
- [4] EN 10002/1 - Matériaux métalliques; Essai de traction; Partie 1: méthode d'essai (à la température ambiante), CEN (1989)
- [5] ISO 6892 - Matériaux métalliques; Essai de traction, (1984)
- [6] POMPEU SANTOS, BAPTISTA A.M., Realização de ensaios de tracção e de fadiga de cordões de aço para pré-esforço, 1º Encontro Nacional Sobre Estruturas Pré-esforçadas, GPPE (1986)
- [7] MONTEIRO V., ARGA E LIMA, Estudo do comportamento à fadiga do Heliacero, LNEC (1975)