

REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE TRACÇÃO E DE FADIGA DE CORDÕES DE AÇO PARA PRÉ-ESFORÇO

S POMPEU SANTOS^{*}, ANTÓNIO M BAPTISTA^{**}

SUMÁRIO

A caracterização dos cordões de aço para pré-esforço envolve a realização de ensaios de tracção e de fadiga. Para a realização destes ensaios merece particular atenção a realização das amarrações das extremidades dos cordões, de modo a proteger a sua superfície de incisões provocadas pelas garras da máquina de ensaio.

Neste documento descrevem-se alguns métodos para a realização destes ensaios, dando particular atenção ao estudo da solução de amarrações adoptada no LNEC para a fixação dos cordões na máquina.

1 - INTRODUÇÃO

Os cordões de aço para pré-esforço são aços de alta resistência, constituídos em geral por 7 fios enrolados em hélice em torno dum fio central. Entre as suas características merecem especial atenção a resistência mecânica e a resistência à fadiga as quais são determinadas através da realização de ensaios de tracção e de fadiga.

Apesar de existirem actualmente recomendações internacionais para a realização destes ensaios, subsistem normalmente dificuldades relacionadas nomeadamente com a fixação dos cordões nas máquinas de ensaio.

* Engenheiro Civil, Investigador-Auxiliar do Departamento de Estruturas do LNEC

** Engenheiro Civil, Assistente de Investigação do Departamento de Estruturas do LNEC.

Em face da existência de solicitações recentes para a colaboração do LNEC no controle de conformidade de cordões de aço para pré-esforço, vem sendo desenvolvido no Departamento de Estruturas do LNEC um extensivo programa experimental tendo em vista tornar operacional a realização desses ensaios.

2 - METODOLOGIAS DOS ENSAIOS

2.1 - Ensaio de tracção

A realização dos ensaios de tracção dos cordões de aço para pré-esforço é feita habitualmente segundo recomendações internacionais e normas das quais se destacam as Recomendações RILEM-CEB-FIP (1) de 1974 e a norma americana ASTM A370 (2) de 1977.

As propriedades mecânicas de maior interesse que o ensaio de tracção permite quantificar são a força de rotura F_{pu} , as forças limites convencionais de proporcionalidade, entre as quais é corrente considerar as correspondentes às extensões de 0,1% e 0,2%, isto é, $F_{p0,1}$ e $F_{p0,2}$, o módulo de elasticidade E_p , e a extensão no instante da rotura ϵ_u . Segundo a norma ASTM interessa quantificar ainda a força correspondente à extensão total de 1%.

O comprimento útil do provete para ensaio irá depender sobretudo da base utilizada para a determinação da extensão do cordão no instante da rotura. De acordo com a norma ASTM, o provete deverá possuir um comprimento livre mínimo de 610 mm enquanto que, de acordo com as Recomendações RILEM-CEB-FIP, esse comprimento não deverá ser inferior a 4 passos da hélice de enrolamento do cordão.

No caso de se pretender evitar que o valor da força de rotura seja influenciado pela rotura prematura de um fio na zona de amarração, as extremidades do cordão deverão ser devidamente protegidas de danos causados pelo sistema de amarração.

2.2 - Ensaio de fadiga

Os ensaios de fadiga de cordões de aço para pré-esforço consistem em aplicar a um provete com um determinado comprimento uma força de tracção variando sinusoidalmente entre dois valores externos (F_{max} , F_{min}) durante um número determinado de ciclos.

Para a realização dos ensaios de fadiga dos cordões de aço para pré-esforço merecem especial atenção as Recomendações RILEM-CEB-FIP (RPC8) (3) de 1979.

De acordo com estas recomendações, os provetes para a realização dos ensaios deverão possuir um comprimento livre mínimo entre dispositivos de amarração de 750 mm ou de 5 passos da hélice de enrolamento dos fios.

Ainda de acordo com estas recomendações deve ser dada grande atenção aos dispositivos de amarração na máquina. Assim as amarrações deverão assegurar uma repartição uniforme da força entre os diferentes fios do cordão e assegurar um encastramento eficaz, impedindo deslocamentos relativos dos fios, paralela ou perpendicularmente ao cordão, e rotações que possam provocar o seu desenrolamento. Dever-se-á ainda evitar a possibilidade de introdução de esforços parasitas de flexão ou de torção, devidos a um mau posicionamento das amarrações.

A frequência da força aplicada dependerá do tipo de máquina de ensaio e da rigidez do provete, devendo a frequência própria deste ser pelo menos duas vezes superior à frequência do ensaio. São admitidos valores das frequências compreendidos entre 80 e 6 000 ciclos por minuto, embora se deva evitar que, para a frequência adoptada, se verifique um aquecimento acentuado do provete.

3 - PREPARAÇÃO DOS PROVETES

Como foi referido anteriormente um dos problemas a resolver na realização dos ensaios tanto de tracção como de fadiga dos cordões de pré-esforço é o seu modo de fixação nos cabeçotes da máquina de ensaio. Estas dificuldades são devidas à grande sensibilidade do aço dos cordões a incisões na sua superfície e ao valor bastante elevado das tensões aplicadas pelo que, em geral, os cordões não podem ser fixados directamente mas através de dispositivos apropriados.

Com o objectivo de encontrar soluções de amarração que fossem tecnicamente eficientes, isto é, não tivessem influência no modo de rotura do cordão, vem sendo desenvolvido no LNEC um vasto estudo experimental.

De acordo com sugestões recolhidas de bibliografia e experiências estrangeiras, foram experimentadas diversas soluções para a fixação dos cordões, nomeadamente através de garras especialmente protegidas, amarrações com cunhas e

peciais, amarrações com "pinhas" de liga de chumbo e estanho (e eventualmente antimônio), e mangas de tubos metálicos preenchidos com resina epoxídica.

Depois de diversas experiências concluiu-se que a solução que oferecia maiores garantias de fiabilidade era a realizada com mangas, embora tivesse sido necessário estudar e controlar a influência de vários parâmetros, nomeadamente o tipo de resina, a sua aderência ao cordão e aos tubos, o material, o comprimento e a rugosidade dos tubos e o processo do seu enchimento.

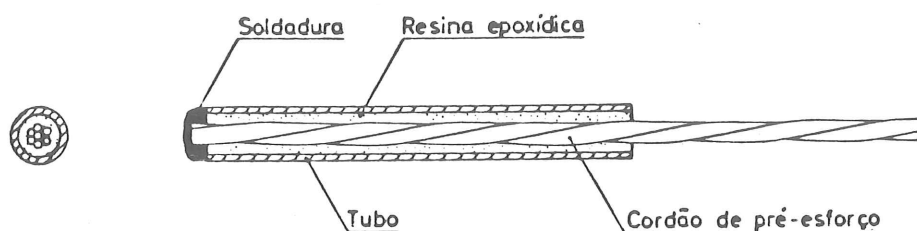
Foram estudados diversos tipos de resina com diferentes tipos de "pot-life" e de cura, bem como a adição ou não de cargas, tendo sido ensaiadas soluções com resina simples ou misturada com areia fina ou pó de carborundum.

Quanto aos tubos foram experimentadas soluções com tubos de latão e tubos de aço de diferentes espessuras, tendo sido adoptada a solução de tubos de aço rígidos. Foi também estudada a influência da rugosidade da superfície interna dos tubos na aderência da resina, o que obrigou a melhorar os processos de limpeza e desengorduramento não só dos tubos como dos cordões. Foi também decidido aumentar a rugosidade da superfície interna dos tubos abrindo uma roscas nessa superfície. Foram ainda estudadas várias soluções para o comprimento dos tubos até se obter uma solução satisfatória. Além disso, tendo-se verificado a possibilidade de deslizamento relativo dos fios do cordão dentro do tubo decidiu-se soldar as extremidades do cordão aos topos dos tubos.

Apresenta-se na Fig. 1 um esquema da amarração das extremidades dos cordões.

Figura 1

Esquema da amarração dos cordões de pré-esforço



Em resumo, a sequência de preparação das amarrações dum cordão é a seguinte:

a) Limpeza do cordão

O cordão é convenientemente limpo nas zonas das extremidades, primeiro mergulhando-o num banho de benzina para desengorduramento e depois esfregando-o com uma escova de aço accionada por berbequim para remover as camadas de óxidos superficiais.

b) Preparação das mangas

As mangas são constituídas por tubos de aço com 30 cm de comprimento nos quais é criada uma rosca interior. O diâmetro interior dos tubos é 4-5 mm superior ao do cordão. Junto duma das extremidades é feito um furo para posterior injeção da resina.

c) Soldadura das mangas ao cordão

Os tubos são soldados por arco eléctrico às extremidades do cordão. Durante esta operação o troço livre do cordão é protegido de eventuais agressões por intermédio dum invólucro de madeira especialmente concebido para este efeito.

d) Enchimento das mangas com resina

Antes da injeção da resina os tubos e as extremidades do cordão são adequadamente limpos e lavados com acetona. A resina é injectada nos tubos pelo furo existente na extremidade inferior com o auxílio duma bomba a ar comprimido, até que reflua pela parte superior. Habitualmente é utilizada resina ICOSIT KC 220, sem cargas. Só depois da cola injectada num dos tubos estar seca o cordão é virado procedendo-se então ao enchimento do outro tubo. Passadas 24 horas o provete está pronto para ensaio.

Atendendo aos valores aconselhados nas recomendações atrás referidas e aos condicionamentos do equipamento existente, os comprimentos dos provetes foram fixados em 1,30 m para os ensaios de tracção e em 1,50 m para os ensaios de fadiga, pelo que, em face do comprimento dos tubos e das soldaduras, se conseguem comprimentos livres, respectivamente de 65 cm e de 85 cm.

4 - REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

4.1 - Ensaio de tracção

Os ensaios de tracção são habitualmente realizados no LNEC numa máquina AMS-LER de 500 kN de capacidade equipada com um extensómetro electrónico autográfico MOHR - FEDERHAFF com base de 50 mm.

O extensómetro é aplicado na zona média do provete, permitindo obter directamente o diagrama forças-deformações até se atingirem extensões da ordem de 2% já que, por uma questão de segurança do próprio extensómetro este é retirado antes de se atingir a rotura do cordão. Em todo o caso, o diagrama obtido é suficiente para calcular com precisão os valores do módulo de elasticidade e das forças limites convencionais de proporcionalidade. Para se obter o resto do gráfico é simultaneamente traçado um outro diagrama força-deformações a partir da medição do deslocamento relativo de dois pontos do cordão afastados entre si 60 cm. Este diagrama, embora menos preciso que o anterior, permite obter com boa aproximação o valor da extensão na rotura. O valor da força de rotura é obtida directamente por leitura nos ponteiros da máquina.

Outro dos problemas que houve que resolver para a realização destes ensaios foi a fixação do extensómetro electrónico ao cordão. De facto, o extensómetro é fixado ao cordão através de "bicos" que são ajustados através dum sistema de molas. No entanto, em face da dureza do aço de pré-esforço, do baixo atrito e da forma da superfície dos fios, os "bicos" têm tendência a escorregar durante a deformação do cordão. Depois de diversas experiências, este problema foi resolvido criando uma rugosidade na superfície do cordão através de uma película dum betume especial sobre a qual, depois de seca, se colocam as pontas do extensómetro ficando estas assim impedidas de escorregar.

Na Fig. 2 apresenta-se o dispositivo do ensaio de tracção dum cordão de pré-esforço e na Fig. 3 o diagrama forças-deformações obtido num ensaio de tracção.

Figura 2

Ensaio de tracção dum cordão de pré-esforço

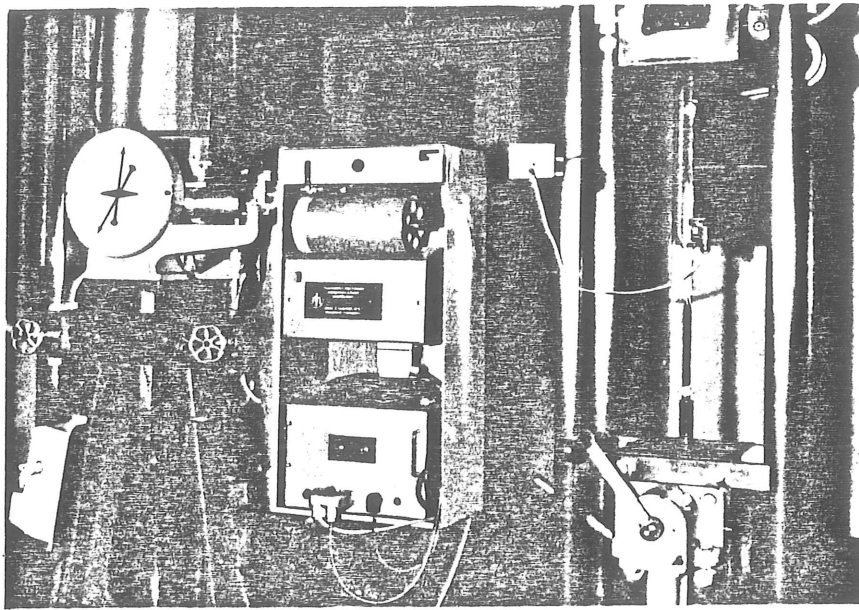
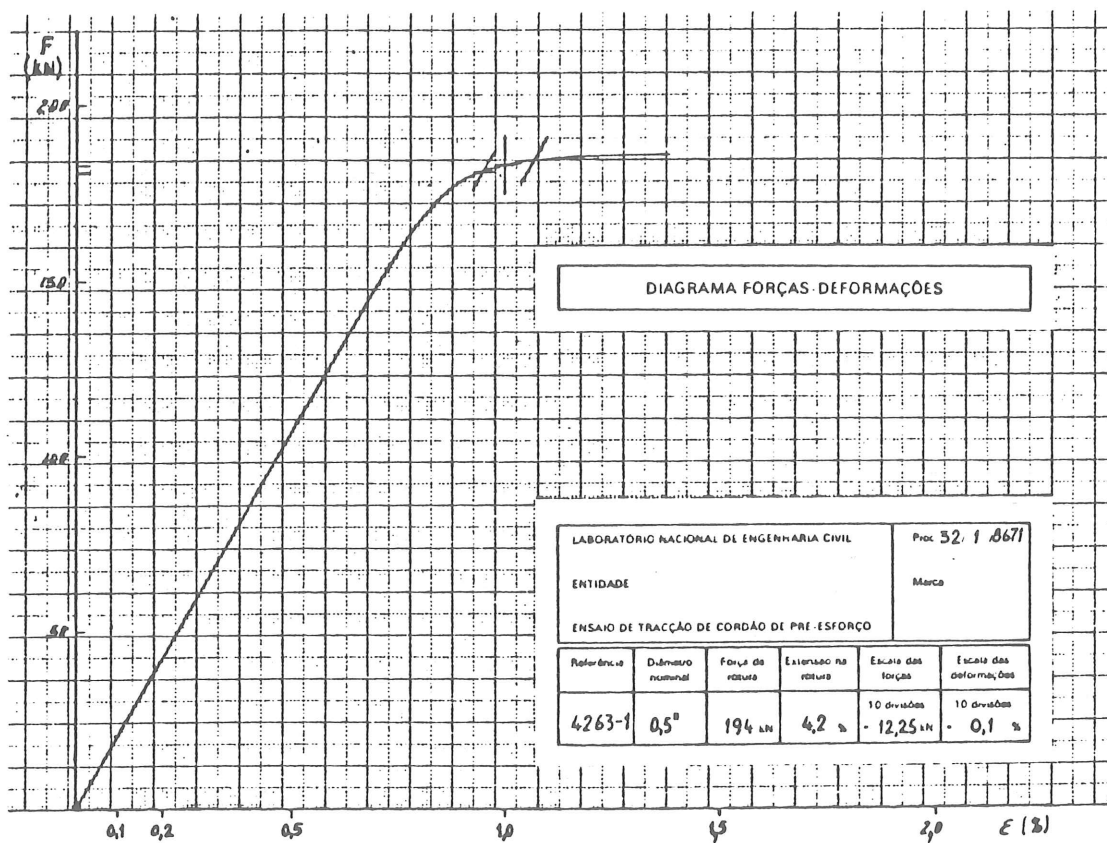


Figura 3

Diagrama forças-deformações dum cordão de pré-esforço



4.2 - Ensaio de fadiga

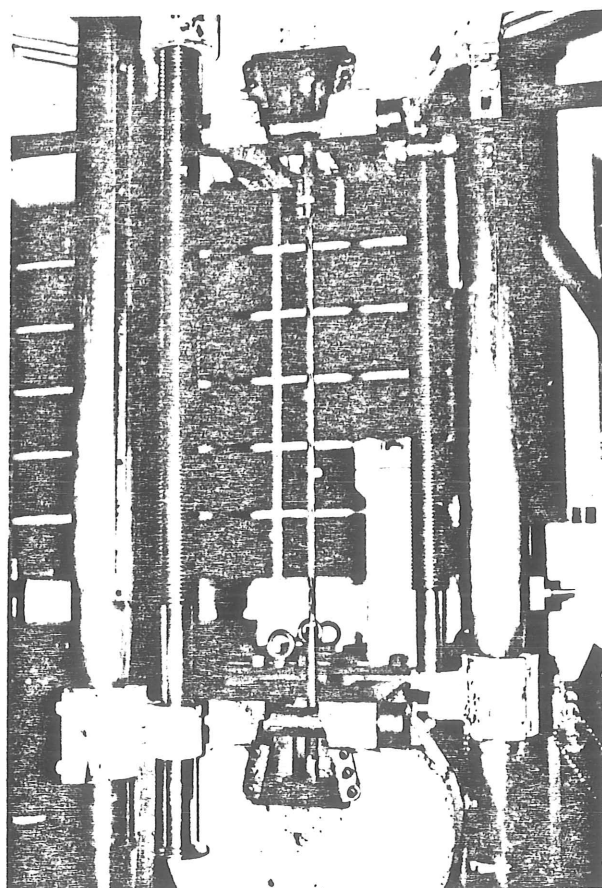
Os ensaios de fadiga são realizados no LNEC numa máquina LOSENHAUSEN de 1000 kN de capacidade (500 kN em fadiga) equipada com um contador com a precisão da dezena de ciclos e possibilidade de utilizar frequências entre 333 e 1000 ciclos/minuto.

Habitualmente os ensaios de fadiga dos cordões de pré-esforço são realizados na frequência de 500 ciclos/minuto pelo que um ensaio completo demora quase 3 dias e 3 noites.

Apresenta-se na Fig. 4 a realização dum ensaio de fadiga dum cordão de aço pa ra pré-esforço.

Figura 4

Ensaio de fadiga dum cordão de pré-esforço



5 - OBSERVAÇÕES FINAIS

As técnicas de ensaio atrás descritas encontram-se perfeitamente operacionais, permitindo a realização dos ensaios de forma rotineira.

A solução de amarração das extremidades dos cordões nas máquinas de ensaio tem provado ser perfeitamente eficaz embora se torne numa tarefa relativamente mo-rosa, pesando significativamente no custo dos ensaios, particularmente nos en-saios de tracção.

AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam o seu reconhecimento pelas contribuições dadas pelos co-legas engenheiros e pelos experimentadores do Núcleo de Comportamento de Es-truturas.

BIBLIOGRAFIA

- (1) RILEM-CEB-FIP, Tentative Recommendations for Tensile Test Steels for Pres-tressing, FIP, Slough (1974).
- (2) ASTM, A370/77 - Mechanical Testing of Steel Products, ASTM Standards (1985)
- (3) RILEM-CEB-FIP, Recommandation RPC 8 - Essai de fatigue sur Armatures de Precontrainte, RILEM (1979).
- (4) ASTM, A 416/80 - Uncoated Seven - Wire Stress - Relieved Strand for Pres-tressed Concrete, ASTM Standards (1985).
- (5) SANTOS, S POMPEU, Controle de Qualidade de Aços e de Sistemas de Prē-es-forço, Comunicação ao 1º Encontro Nacional Sobre Estruturas Prē-esforça-das, GPPE (1986).