



CENTRO DE MECÂNICA E ENGENHARIA ESTRUTURAIS DA UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA — INIC
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO 1096 LISBOA CODEX
TELEFONES 8015 79/805480

**CONTROLE DE QUALIDADE EM AÇOS E
SISTEMAS DE PRÉ-ESFORÇADOS**

F. Branco; J. Vinagre

**Comunicação apresentada no 1º Encontro Nacional sobre Estruturas
Pré-Esforçadas**

INSTITUTO SUPERIOR TECNICO



7100391214

Relatório CMEST

AI nº 9/1986

CONTROLE DE QUALIDADE EM AÇOS E
SISTEMAS DE PRÉ-ESFORÇO

*F.A. BRANCO e **J. VINAGRE

SUMÁRIO

A frequente utilização em obra de aços e sistemas de pré-esforço, importados do estrangeiro, sem o necessário controle de qualidade, pode originar acidentes estruturais. Procurando alertar os projectistas e construtores para estes aspectos, apresenta-se uma descrição das principais características e respectivos ensaios a considerar para o material de pré-esforço.

ABSTRACT

It is a common practice to use for construction imported prestressed steel and systems without considering the necessary quality control. This may lead to structural problems. Trying to call the attention of designers and contractors to this situation, it is presented a description of the necessary tests to characterize the prestress material.

* Prof. Associado do I.S.T.

** Assistente Estagiário do I.S.T.

1. INTRODUÇÃO

A ausência de aços e de sistemas de pré-esforço de fabrico nacional obriga à utilização corrente de material importado.

Estes materiais são frequentemente aplicados em obra sem qualquer afeição das suas características mecânicas. O projectista e o construtor limitam-se a tomar conhecimento das propriedades do material através dos boletins que o acompanham, emitidos pelo fabricante. Estes boletins raramente indicam todas as características mecânicas e alguns dos valores apresentados são por vezes referentes a ensaios pontuais realizados no estrangeiro. O REBAP no referente às características dos aços aborda o assunto de uma forma superficial, remetendo o leitor para bibliografia especializada. Quanto às características dos sistemas de pré-esforço o referido regulamento é praticamente omissivo. Esta situação tem já causado alguns problemas em obras realizadas em Portugal, sendo também de referir a ocorrência de alguns acidentes por falhas dos sistemas de pré-esforço, no estrangeiro.

Procurando alertar os projectistas e construtores para a necessidade da realização de um controle de qualidade cuidada no material de pré-esforço, apresenta-se de uma forma sistemática as principais características dos aços e sistemas de pré-esforço e os respectivos ensaios de caracterização. Para isto recorreu-se à Regulamentação Internacional nomeadamente à estipulação pela "Federação Internacional de Pré-esforço (FIP)", (2) e (3).

No referente aos aços são indicados os aspectos relacionados com as características mecânicas, a resistência à fadiga, relaxação, corrosão sob tensão, etc. Dentro dos sistemas de pré-esforço são analisados os aspectos referentes à pós-tensão com ancoragem mecânica, a solução mais frequentemente adoptada, sendo referidas a caracterização de comportamento estático, dinâmico e de transferência de carga do conjunto cabo-ancoragem.

2. CARACTERIZAÇÃO DOS AÇOS

2.1. Tipos de armaduras e características geométricas

As armaduras de pré-esforço apresentam-se no mercado na forma de:

fios - armaduras cuja maior dimensão transversal é inferior a 1,2cm

varões - armaduras cuja maior dimensão transversal é superior a 1,2cm

cordões - agrupamentos de fios enrolados em hēlice, de um modo estāvel (trēs fios enrolados simetricamente uns sobre os outros ou sete fios formados por uma camada de seis simetricamente enrolados em torno de um fio central recto).

cabos - agrupamentos de fios ou de cordões.

Para o controle das características geométricas (áreas e dimensões fornecidas), hā que se proceder ā verificação de 12 provetes, conforme se descreve (3) :

a) fios cilīndricos calibrados - As dimensões (δ) sō tomadas em pelo menos duas secções de cada provete devendo situar-se entre $\delta + 0.00\text{m}$ e $\delta - 0.2\text{mm}$. A partir das mēdias aritméticas dos valores obtidos determina-se a ārea mēdia de secção, a qual nō deve exceder em mais de 0.15mm^2 o valor fornecido.

b) fios cilīndricos nō calibrados - A ārea mēdia do provete ē determinada a partir do seu peso, considerando uma densidade igual a 7.85, devendo obter-se uma ārea superior ā ārea nominal. A ārea mēdia da secção (para o conjunto dos provetes) nō deve exceder o valor da secção nominal em mais de 8%.

c) fios nō cilīndricos - A ārea mēdia da secção (determinada a partir da pesagem de 12 provetes, considerando-se uma densidade igual a 7.85, e da mēdia das dimensões tomadas em pelo menos 5 secções diferentes de cada provete) deve ser superior ao valor fornecido, nō excedendo em mais de 8%.

d) cordões e varões - A ārea mēdia de cada provete nō deve, em nenhum caso, ser inferior ao valor fornecido nem o exceder em mais de 8%. Deve tambēm proceder-se ā verificação do nūmero e diāmetro dos cabos constituintes, diāmetro total, configuração das diferentes camadas de fios e peso por metro.

2.2. Características mecānicas

As características mecānicas sō obtidas a partir do ensaio de tracção. Genericamente este consiste na aplicação de uma força de tracção a um provete do material, no qual previamente se colocou um extensōmetro (deve ser executado a temperatura constante). Os provetes

com um comprimento mínimo de 500mm, devem apresentar-se rectilíneos antes do ensaio.

As principais características mecânicas são (tabela 1):

a) Resistência à rotura - definida pela força máxima (referida à secção nominal) verificada no ensaio levado até à rotura. Para os fios varia entre 140 e 220 kgf/mm², consoante o diâmetro (maiores resistências para fios de menor diâmetro); para os varões entre 100 e 140 kgf/mm²; para os cordões atinge normalmente 170 a 180 kgf/mm².

Para os cordões, a força resistente é inferior à soma das resistências dos fios considerados individualmente devido essencialmente a dois factores:

- efeito de cabo: não sendo os diagramas de forças-extensões iguais para todos os cabos, a rotura dá-se para uma força inferior à soma de resistência dos cabos. Esta redução é expressa pelo factor de eficiência dos cabos, η_C

- efeito de ancoragem: devido ao tipo de amarração dos cabos de aço nos sistemas de ancoragem. Expresso pelo factor de eficiência da ancoragem, η_A .

b) Limite convencional de elasticidade a n% - definido como sendo a ordenada do ponto de encontro do diagrama forças-extensões com a recta de inclinação 2×10^4 kgf/mm² x área de secção nominal passando pelo ponto de ordenada nula e abcissa n%.

c) Capacidade de deformação - a deformação permanente correspondente a um dado nível de tensão é determinada pela diferença entre o comprimento inicial do provete e o final, após a descarga. A deformação permanente após rotura (ϵ_{pr}) pode ser determinada colocando marcas no provete, espaçadas de 5mm ao longo de todo o seu comprimento (o comprimento necessário é igual a 10 vezes o diâmetro do varão arredondado a um múltiplo de 5mm, contendo a zona de rotura). O valor da extensão, sob a acção da carga máxima, medida fora da zona de rotura deve variar entre 3 e 7%.

d) Módulo de elasticidade - é determinado considerando-se pelo menos três zonas de carregamento entre $0.1\sigma_m$ e $0.35\sigma_{III}$ (σ_{III} - valor esperado da tensão máxima) e tomando-se a média da razão entre o incremento na tensão e o correspondente incremento na deformação total das três soluções. Para fios e varões tem-se, aproximadamente, $E = 2 \times 10^4$ kgf/mm²

e para cordões $E = 1,9 \times 10^4 \text{ kgf/mm}^2$.

Tipo de aço	Relação entre tensões limites de proporcionalidade a n_1 e a tensão de rotura do aço			Extensão após rotura
	$\sigma_{0.05/\sigma_T}$	$\sigma_{0.1/\sigma_T}$	$\sigma_{0.2/\sigma_T}$	$l_{o_r} = 10 d$ (%)
Varão laminado	0.55	0.55	0.55	10.00
Varão laminado estirado	0.75	0.75	0.75	10.00
Varão laminado estirado, envelhecido	-	0.5	0.60	15.00
Fio laminado temperado, estirado	0.7	0.8	0.85	9.00
Cordão envelhecido	0.88	0.90	0.93	-
Fio laminado temperado	0.80	0.85	0.90	8.00
Fio laminado temperado a óleo	0.92	0.93	0.94	8.00
Fio patentado simplesmente trefilado	0.62	0.70	0.80	5.00
Fio patentado trefilado, envelhecido	0.84	0.84	0.90	7.00
Fio patentado trefilado, estabilizado	0.90	0.92	0.94	9.00

TABELA 1 - Propriedades dos Aços de Prê-Esforço (1)

2.3. Ensaio de flexão alternada

Este ensaio permite apreciar a fragilidade e o estado de superfície do fio. Consiste em flectir um provete - preso numa das extremidades - várias vezes até aos 90° e de seguida endireitá-lo, trazendo a extremidade livre à sua posição inicial (alternadamente e em direcções opostas), sendo cada flexão efectuada numa superfície cilíndrica com um diâmetro especificado. Toda a operação deve ser executada à temperatura ambiente, sem choques e a baixa velocidade de modo a que o calor que se gera no provete não afecte os resultados do ensaio.

O número de provetes a ensaiar não pode ser inferior a 3, devendo-se anotar o número de flexões antes da fractura do material.

2.4. Ensaio de torção

Este ensaio permite apreciar a ductilidade do material. Consiste em

torcer um provete (porção de cabo com comprimento suficiente para a execução do ensaio) de modo a obter um número de voltas (no mínimo 10), contíguas e apertadas em volta de um mandril, de dado diâmetro (2,5 vezes a menor dimensão nominal do cabo ou 5 vezes esta dimensão caso o cabo não seja capaz de suportar o enrolamento sem rotura). O ensaio é executado à temperatura ambiente e a velocidade de enrolamento deve ser regular e suficientemente baixa para evitar o aumento de temperatura no provete (não deve exceder 1/4 de volta por segundo). O cabo não pode quebrar-se no decurso do ensaio.

2.5. Ensaio de fadiga

O ensaio de fadiga permite avaliar duma maneira aproximada as condições e possibilidades de utilização dos diferentes tipos de armaduras em cada classe de betão pré-esforçado.

Consiste em submeter um provete a uma tensão variável sinusoidal definida através dos valores extremos de carga e pela sua frequência. Quanto às propriedades de fadiga, elas definem-se:

- ou pela máxima variação de tensão relativa a uma tensão mínima (ou máxima) que um aço pode suportar, sem rotura, para um número de ciclos igual a N (FIP-CEB recomenda 2×10^6 ciclos);
- ou pelo número de ciclos que um aço pode suportar, sem rotura, para o intervalo de tensão especificado.

A variação das pulsações não deve em nenhum caso provocar um significativo aquecimento do provete (são recomendáveis valores que se situem entre 200 e 600 ciclos/minuto).

Para a determinação da resistência à fadiga do provete, o ensaio é executado variando o intervalo de valores do carregamento por incrementos de 2 a 7 kgf/mm², e ensaiando 2 a 3 provetes por incremento. Obtem-se assim uma curva de valores que permite a identificação da carga de rotura após N ciclos.

3. COMPORTAMENTO DO CONJUNTO CABO-ANCORAGEM

De forma a assegurar o bom funcionamento dos sistemas de pré-esforço é necessário o controle de qualidade do conjunto cabo-ancoragem, através da realização de ensaios de recepção dos materiais.

3.1. Ensaio de aprovação

Estes ensaios destinam-se a comprovar os requisitos mínimos necessários à verificação dos sistemas de pré-esforço. Devem ser realizados de acordo com os métodos, tipos de aço e sistemas de ancoragem empregues na obra. Frequentemente consistem numa simples verificação das características indicadas.

3.2. Ensaio estático

Os cabos de pré-esforço e o sistema de amarração devem ser ligados sob utilização de todos os componentes necessários, excepto a baíña. (No caso de aplicação de mais de um nível de pré-esforço a um mesmo tipo de sistema de ancoragem, o ensaio deve ser realizado para o maior deles).

As propriedades características do aço, assim como as propriedades geométricas e mecânicas do sistema de ancoragem, devem estar bem definidas a priori. Aplica-se ao sistema sucessivamente, 20, 40, 60 e 80% de tensão característica do aço de pré-esforço, à velocidade de 100 N/mm por minuto. Uma vez atingido o valor máximo, este é mantido constante durante uma hora.

O número de provetes idênticos e com comprimento superior a 3,0m a ensaiar deverá ser de 3. Para conjuntos de sistemas de pré-esforço idênticos, mas de diferentes capacidades, será suficiente ensaiar os dois conjuntos representativos (3 provetes de cada).

São as seguintes as medições e observações que se devem fazer:

- deslocamento relativo dos cabos em relação ao sistema de ancoragem entre os vários componentes do sistema de ancoragem.
- extensão após rotura do cabo de pré-esforço e deformações relevantes da ancoragem.
- carga da rotura, localização e modo de rotura.

3.3. Ensaio dinâmico da ligação cabo-sistema de ancoragem

Os elementos a ensaiar (no mínimo 3) serão do tipo utilizado para o ensaio estático e as medições das forças devem ser rigorosas.

Os ensaios são executados sob uma força de frequência constante, não superior a 500 ciclos de carregamento por minuto, e com uma carga máxima correspondente a 65% da tensão característica de cedência do aço de pré-esforço. A amplitude do carregamento deve ser mantida constan

te durante todo o ensaio.

Os provetes devem ser ensaiados de modo a que sejam evitadas oscilações secundárias; também se deve evitar a rotura por escorregamento do cabo no sistema de ancoragem.

A tensão de fadiga é definida como o nível de tensão suportado para 2×10^6 ciclos sem existência de rotura em mais de 5% da área total de aço do cabo.

3.4. Ensaio de transmissão de carga

Com os ensaios de transmissão de carga pretende-se comprovar a eficácia da transferência de força de pré-esforço do sistema de ancoragem para o betão.

O provete, prisma de secção quadrada de betão (de composição, compactação e tensão característica aos 28 dias igual ao aplicado em obra) é submetido a compressão axial. A parte do provete contendo o sistema de ancoragem deve estar munida com uma armadura de reforço do mesmo tipo da dimensionada para a peça real; a outra deve ser reforçada de tal modo que não ocorra a rotura prematura nessa zona.

Durante o ensaio, o incremento de tensão no betão deve ser limitado, de modo a não exceder a tensão característica de cedência.

Este ensaio apresenta duas modalidades:

a) ensaio de transferência de cargas estáticas - Aplica-se o pré-esforço por etapas de 20% até se obter no aço uma tensão de 80% da tensão característica de cedência (F_{po}) devendo ser mantida durante 48 horas levando-se, em seguida, o provete à rotura (Fig.1).

Medições e observações a ter em consideração para cada um dos três provetes a ensaiar: deformações longitudinais e transversais do betão; deformação da ancoragem; formação de fissuras, sua largura e evolução com o carregamento e com o tempo; carga de rotura, localização e modo de rotura.

b) ensaio de transferência de cargas em ciclo lento - Em relação ao carregamento procede-se do mesmo modo. Em seguida executam-se pelo menos dez ciclos de carga/descarga entre $0.15 F_{po}$ e F_{po} (o mínimo de ciclos depende da estabilização da leitura das tensões). Após o carregamento cíclico leva-se o provete à rotura fazendo-se as mesmas medições e observações de a) (Fig.2).

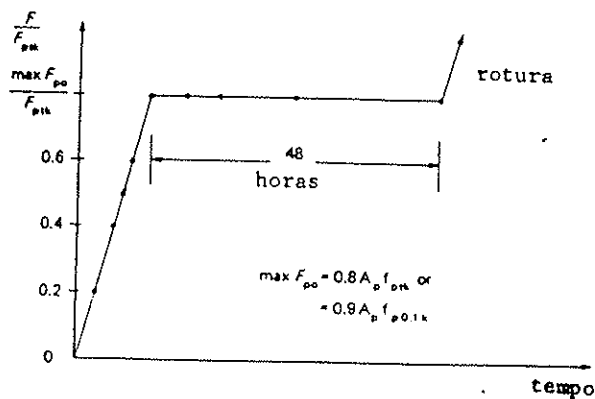


Fig. 1

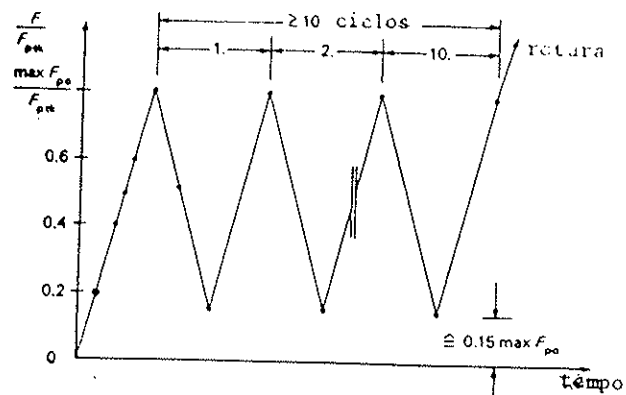


Fig. 2

Fig. 1 - Ensaio de Transferência de Cargas Estáticas (2)

Fig. 2 - Ensaio de Transferência de Cargas em Ciclo Lento (2)

3.5. Ensaio de determinação das propriedades de amarração em cabos sujeitos à fadiga

O ensaio consiste na determinação do comprimento de amarração convencional em provetes sujeitos a 1×10^6 ciclos de carga, com um momento devido a flexão variando entre um valor máximo (M_{max}), limitado pela descompressão no betão do provete, e um valor mínimo igual a $1/3$ de M_{max} .

O ensaio é executado em provetes prismáticos de secção rectangular. Os cabos (com um recobrimento constante de 2cm) devem ser dispostos simetricamente de forma a se obterem somente esforços axiais. Devem ser tensionados 24 horas antes da betonagem e re-tensionados no instante da betonagem com uma força igual a 80% da resistência média garantida pelo fornecedor.

O pré-esforço dos provetes é aplicado com simultânea relaxação de todos os cabos. No instante de tensionamento dos cabos, a reentrada de cada cabo é medida nas extremidades do provete. É anotado o desenvolvimento de deformações longitudinais do betão (ϵ_b) ao longo de três lados do provete. As medições devem ser feitas 1, 6, 24 e 48 horas após a aplicação do pré-esforço, sendo o provete submetido à fadiga, em flexão simples sob a acção de dois pontos de carga a $1/3$ do vão. O carregamento máximo é tal que produza na zona de flexão tensões nas fibras inferiores da ordem dos 75 kgf/cm, e mínimas iguais a $1/3$ daquelas. A frequência do carregamento deverá ser entre 3 a 10 Hz (Fig.3).

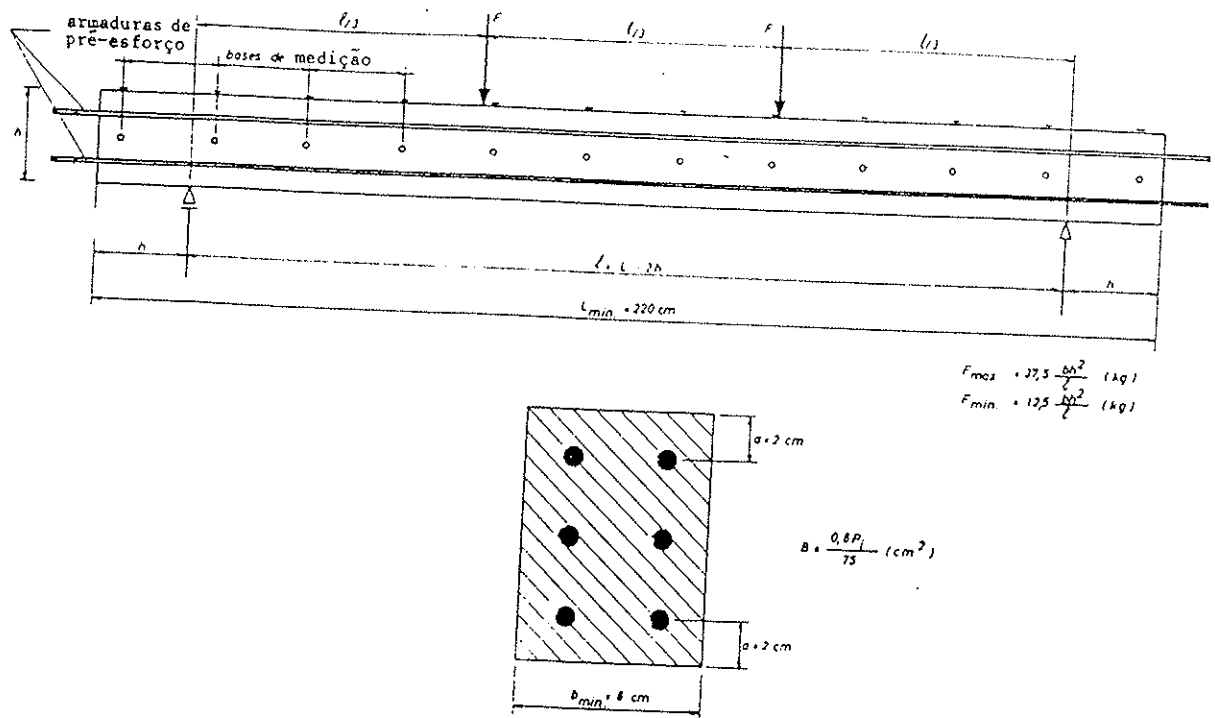


Fig. 3 - Provete para Ensaio de Determinação das Propriedades da Amarração em Cabos Sujeitos à Fadiga (2)

REFERÊNCIAS

- (1) SILVA, M, Características de Aços para prē-esforço , Curso de betão prē-esforçado, Técnico, 1978.
- (2) FIP, Recommendations, Recommendations for acceptance and application of post -Tensioning systems, 1981.
- (3) FIP, Recommendations, Recommendations for the approval, supply and acceptance of steels for prestressing tendons, 1974.