



Figura 1: Estádio em concreto protendido, Sidnei, Austrália

Um pouco da história do uso do aço no concreto protendido no Brasil e no mundo

Maria Regina Leoni Schmid
Rudloff Sistema de Protensão Ltda.

O uso aliado de aço à pedra ou argamassa, com o objetivo de se aumentar a resistência do conjunto às solicitações, é bastante antigo. Em 1770, surgiu a primeira associação do aço com pedra natural, em uma igreja em Paris, cujas vigas deveriam transferir cargas elevadas da superestrutura para as fundações. A estrutura foi construída a partir da pedra natural preparada (cortada, furada para enfição das barras de aço e com a superfície tratada), na qual a armadura foi colocada posteriormente.

Com o surgimento do cimento Portland, em 1824, na Inglaterra, chamado de “pedra artificial”, tornou-se possível se inverter a se-

qüência de fabricação: a armadura era cortada, dobrada e amarrada antes, e a “pedra” era feita posteriormente. Foi a partir de então que se deu realmente o desenvolvimento do concreto estrutural (concreto armado e protendido) mundialmente. Não só os ingleses, mas também franceses e alemães partiram para a fabricação do cimento e para o desenvolvimento de suas próprias tecnologias para isso, de tal forma que, em meados do século 19, a possibilidade de se reforçar peças de concreto com armaduras de aço já era conhecida mundialmente.

A primeira aplicação da protensão do concreto se atribui ao engenheiro norte-ame-



Figura 2: Cordoalhas de 3 e 7 fios

ricano P. A. Jackson, cuja patente foi registrada em 1872. Tratava-se de um sistema de passar hastes de ferro através de blocos e de apertá-los com porcas.

Em 1877, o americano Thaddeus Hyatt tirou conclusões importantes a respeito do concreto, principalmente no que diz respeito ao seu funcionamento em conjunto com o aço e ao efeito da aderência entre os dois materiais, comprovando hipóteses sobre a posição correta da armadura nas peças de concreto, em sua região tracionada.

Em 1886, o alemão Matthias Koenen desenvolveu um método empírico de dimensionamento de alguns tipos de construção em concreto armado. Foi ele quem concluiu que, no concreto armado, o ferro deveria absorver as tensões de tração, enquanto o concreto as de compressão.

No final do século 19, houve diversas tentativas de se criar métodos de protensão, porém sem êxito, uma vez que a retração e a fluência do concreto ainda eram desconhecidas e causavam a perda da protensão.

No começo do século 20, a partir dos estudos iniciados por Koenen, Mörsch desenvolveu os fundamentos da teoria do concreto armado, cuja essência é válida até hoje.

Foi também no início do século que Koenen e Mörsch perceberam que a retração e a deformação lenta do concreto eram os fatores responsáveis pela perda do efeito da protensão em casos diversos já ensaiados.

Foram, então, diversas as tentativas de se aplicar a protensão no concreto, incluindo inclusive o uso de cordas de piano tensionadas na fabricação de pranchas de concreto, por K. Wettstein, em 1919. Porém, foi somente em 1928 que surgiu o primeiro trabalho consistente sobre concreto protendido, quando foi realizada a introdução do aço de alta resistência na execução de protensões, pelo engenheiro francês Eugene Freyssinet. Até então, outras experiências com concreto protendido haviam sido feitas tracionando-se aço doce, cujo resultado era insatisfatório ao se considerar as perdas lentas de protensão. Porém, o resultado alcançado por Freyssinet foi uma verdadeira revolução, considerada inclusive por muitos engenheiros como uma idéia que não daria futuro.

Freyssinet conseguiu superar algumas deficiências até então existentes no uso da protensão de estruturas, chegando a resultados excelentes, tanto no sentido de se economizar aço, quanto tecnicamente. Os aços por ele usados tinham forma de arames trefilados, com resistência à ruptura de 15.000 a 18.000 kgf/cm² e possibilidade de tracionamento sob tensões de até 12.000 kgf/cm². As perdas lentas costumavam chegar a aproximadamente 20% da tensão inicial de protensão, de forma que a tensão restante nos cabos, de 8500 a 10000 kgf/cm², foi considerada eficiente e econômica para justificar o emprego desta tecnologia, cujo princípio é usado até os dias de hoje.

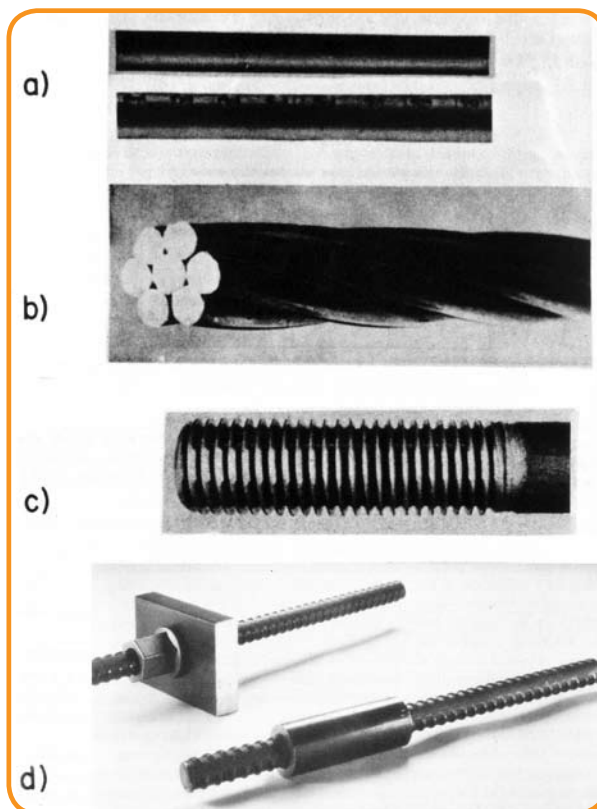


Figura 3: Tipos de barras de aço

Aplicação do protendido e sua fabricação

O emprego do concreto protendido em obras tornou-se possível com o lançamento de ancoragens e equipamentos especializados para protensão, por Freyssinet, em 1939, e Magnel, em 1940. A partir daí, o desenvolvimento do concreto protendido evoluiu rapidamente no mundo todo, principalmente no final da década de 40. A escassez de aço provocada pela Segunda Guerra Mundial na Europa abriu o caminho para o uso do concreto protendido no período de reconstrução que seguiu a guerra, uma vez que uma tonelada de aço de protensão possibilitava a construção de muito mais estruturas do que o aço comum possibilitaria.

A aplicação do aço de alta resistência na protensão de estruturas tornou possível novos métodos de construção e permitiu a construção de novos tipos de estruturas em concreto, as quais não poderiam ser concebidas sem a protensão.

A primeira obra oficialmente realizada com concreto protendido foi projetada por Freyssinet, em 1941 – a ponte sobre o rio Marne em Lucancy, cuja construção terminou em em 1945.

No Brasil, a primeira obra em concreto protendido foi a Ponte do Galeão, executada em 1948, no Rio de Janeiro (ligando a Ilha do Governador à Ilha do Fundão), com 380 m de comprimento – na época a mais extensa do mundo. Todos os materiais e equipamentos para a protensão do concreto foram importados da França, na ocasião. Os cabos de protensão eram fios lisos envolvidos por duas ou três camadas de papel Kraft. Os fios e o papel eram pintados com betume e a técnica representava o que conhecemos atualmente como a protensão “sem aderência”. Foram usados na obra cabos de 12 fios ϕ 5 mm, co-



Figura 4: Cordoalha engraxada e plastificada

nhecidos como cabos de 20 t de força.

Em 1952, foi iniciada no Brasil a fabricação do aço de protensão, através do fio de diâmetro 5 mm. As propriedades elásticas do aço eram caracterizadas por dois números de unidade kgf/mm^2 , que representavam o seu limite de escoamento a 0,2% de deformação permanente e o limite de resistência. Existiam então três categorias de aço: 115/125, 125/140 e 140/160. Os fios eram fornecidos em rolos de diâmetro pequeno (60 ou 85 cm) e necessitavam de um endireitamento antes de sua utilização, porque possuíam tensões

internas que prejudicavam o seu comportamento na peça protendida.

Em 1958, o desempenho do aço de protensão melhorou consideravelmente, devido ao tratamento térmico de alívio de tensões que passou então a ser feito. Nesta mesma época, passou-se a produzir também os fios de aço com diâmetros 7 mm e 8 mm.

De 1958 a 1968, existiam duas indústrias que fabricavam o aço duro de ϕ 5 mm para concreto protendido, dividindo o mercado. Posteriormente, estas empresas se fundiram e atualmente só existe um fabricante nacional de aços para concreto protendido.

As cordoalhas, ou fios encordoados, surgiram na década de 60, sendo então constituídas por dois, três ou sete fios – as cordoalhas que usamos atualmente, inclusive, surgiram naquela época. As cordoalhas em geral tiveram grande aceitação, devido ao fato de serem mais econômicas que os fios, o que justificou, na pós-tensão, a substituição dos fios paralelos pelas cordoalhas de sete fios com diâmetros de 12,7mm e 15,2 mm. Se anteriormente os cabos de fios de 5 mm, como usados na Ponte do Galeão, eram capazes de apresentar uma força final de 20 t de protensão, as cordoalhas de sete fios permitiram se chegar a cabos com capacidades de carga algumas dezenas de vezes maiores.

Até 1974, eram fabricados no Brasil somente aços de protensão de relaxação normal (RN), também chamados aços "aliviados". Estes aços são retificados por um tratamento térmico que alivia tensões internas de trefilação, através do qual os fios são passados em chumbo derretido entre 250 e 500°C, o que resulta na melhora da linearidade do diagrama Tensão x Deformação. Contudo, o fio de aço esticado tende a ceder com o tempo e conseqüentemente perder parte da tensão introduzida com a protensão, fenômeno conhecido como relaxação.

Parte desta relaxação pode ser provocada propositalmente durante o alívio das tensões, elevando-se a temperatura entre 350 e 400°C e provocando um alongamento no fio de, aproximadamente, 1%. Esta etapa é conhecida como estabilização e os aços produzidos e sujeitos a este tratamento termo-mecânico são denominados estabilizados ou de relaxação baixa (RB).

A partir de 1974, os aços de relaxação baixa passaram a ser fabricados nacionalmente, uma vez que apresentavam melhores características elásticas e menores perdas de tensão por relaxação do aço que os aços do tipo RN. Este avanço justificou a preferência para os aços de relaxação baixa, válida até hoje.

Os aços utilizados atualmente para a protensão caracterizam-se por suas elevadas resistências e pela ausência de um patamar de

escoamento. Podem ser agrupados nos seguintes grupos principais: fios trefilados, cordoalhas e barras.

- ◆ **Fios trefilados de aço carbono:** com diâmetro em geral de 3 mm a 8 mm, podendo atingir até 12 mm, fornecidos em rolos ou bobinas. A trefilação produz encruamento do aço, aumentando a sua resistência. Obtém-se resistências mais elevadas para fios de menor diâmetro.
- ◆ **Cordoalhas:** produtos formados por fios enrolados em forma de hélice, como uma corda. As mais comuns são constituídas por três ou sete fios. A cordoalha de 3 fios é constituída de fios de mesmo diâmetro nominal, encordoados juntos, numa forma helicoidal com passo uniforme. A cordoalha de 7 fios é constituída de seis fios de mesmo diâmetro nominal, encordoados juntos, numa forma helicoidal, com um passo uniforme e em torno de um fio central reto de maior diâmetro – seu diâmetro é pelo menos 2% maior do que o dos fios externos. Atualmente, as cordoalhas de três e sete fios são produzidas nacionalmente sempre na condição de relaxação baixa. O processo de fabricação das cordoalhas deve garantir que, ao serem cortados com discos, os seus fios componentes não saiam de sua posição



Figura 5: Piso protendido em Victoria, Austrália



Figura 6: UHE Mascarenhas de Moraes, Ibiraci – MG

original ou que, caso saiam, possam ser reposicionados manualmente.

- ◆ Barras de aço: liga de alta resistência, laminadas a quente, com diâmetro superior a 12 mm, fornecidas em peças retilíneas de comprimento limitado.

As propriedades mecânicas mais importantes dos aços de protensão são as seguintes:

- a) **Limite de escoamento convencional à tração:** tensão para a qual o aço apresenta uma deformação unitária residual de 0,2%, após descarga.
- b) **Resistência à ruptura por tração;**
- c) **Alongamento de ruptura;**
- d) **Limite de elasticidade:** tensão que produz uma deformação unitária de 0,01%.
- e) **Módulo de elasticidade, inclinação da parte elástica do diagrama.**

Especificações

Os aços de protensão são geralmente designados pelas letras CP (Concreto Protendido), seguidas da resistência característica à ruptura por tração, em kgf/mm^2 . Devem ser sempre instalados com tensões elevadas, pois as perdas de protensão são inevitáveis e não podem representar um percentual muito elevado da tensão aplicada. Após as perdas,

os esforços de protensão efetivos atuando sobre o concreto, deverão representar cerca de 70% a 80% do esforço inicial instalado. As tensões nas armaduras protendidas são entretanto limitadas a certos valores máximos, a fim de se reduzir o risco de ruptura dos cabos, e também de evitar perdas exageradas por relaxação do aço.

As cordoalhas devem ser fornecidas em rolos firmemente amarrados um a um, com diâmetro interno não inferior a 750 mm. Ao serem desenroladas e deixadas livremente sobre uma superfície plana e lisa, as cordoalhas não devem apresentar uma flecha permanente superior a 15 cm em comprimento de 2 m.

Atualmente, além dos aços convencionais para concreto protendido, são também fabricadas no Brasil:

- ◆ **Cordoalhas engraxadas e plastificadas:** são cordoalhas com características mecânicas idênticas às das cordoalhas convencionais (sem revestimento), porém possuem em sua superfície uma camada de graxa e cada cordoalha engraxada é revestida por um plástico de espessura mínima 1,0 mm, o PEAD (polietileno de alta densidade). Este plástico permite o movimento livre da cordoalha em seu interior.
- ◆ **Cordoalhas especiais para estruturas estaiadas:** são produzidas com três



Figura 7: Ponte Prince Edward, EUA

camadas protetoras contra a corrosão: seus fios são galvanizados a quente antes do encordoamento e da estabilização, as cordoalhas recebem um filme de cera de petróleo e são encapadas na cor preta, com plástico de espessura mínima

1,5 mm, resistente aos raios ultravioleta Estas cordoalhas são submetidas a ensaios específicos de tração e de fadiga, para comprovar a sua resistência e aplicabilidade para as estruturas estaiadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] VASCONCELOS, Augusto Carlos de. O concreto no Brasil: recordes, realizações, história. Vol. 1. São Paulo: Copiare, 1985.
- [02] PFEIL, Walter. Concreto protendido: processos construtivos, perdas de protensão sistemas estruturais. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1980.
- [03] KHACHATURIAN, Narbey; GURFINKEL, German. Concreto presforzado. México: Diana, 1979.
- [04] PEREIRA, J. L. S.; CARVALHO, R. G.; LACERDA, I. G.; ALVES NETO, E. S.; CUNHA, M. Concreto protendido e lajes protendidas com monocordoalhas engraxadas – noções gerais, solução estrutural e correta execução. Curitiba: Andrade Ribeiro, 2005.
- [05] Associação Brasileira de Normas Técnicas. Cordoalhas de aço para concreto protendido, Requisitos, NBR 7483. Rio de Janeiro, 2004
- [06] Belgo – Grupo Acelor. Catálogo Técnico de Produtos. Belgo, 2004. ◆