



**FUNDAÇÃO PRESIDENTE ANTÔNIO CARLOS - FUPAC
FACULDADE PRESIDENTE ANTÔNIO CARLOS DE UBÁ
ENGENHARIA CIVIL**

BRUNO RODRIGUES

CONCRETO PROTENDIDO

UBÁ/MG

2014

BRUNO RODRIGUES

CONCRETO PROTENDIDO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Civil da Faculdade Presidente Antônio Carlos de Ubá, como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador (a): Msc Iracema Mauro Batista.

UBÁ/MG

2014

CONCRETO PROTENDIDO

Resumo

O seguinte trabalho define o que é o material concreto protendido, o surgimento da ideia e da necessidade da protensão do concreto, os diferentes tipos de se protender o concreto, seus processos construtivos, as vantagens e desvantagens sobre os demais materiais e a solução do problema da fissuração do concreto convencional. São apresentadas diversas aplicabilidades do material em diferentes tipos de estruturas, bem como a apresentação dos materiais utilizados no concreto protendido. Foi baseado em livros técnicos e científicos que demonstraram a superioridade do material, como o ganho em resistência na sua utilização, a relação custo versus aumento da resistência nas diversas estruturas e a possibilidade da execução de projetos mais ousados, inviáveis com a utilização do concreto convencional.

Palavras-chave: Concreto. Concreto Protendido. Protensão. Armaduras de Aço.

PRESTRESSED CONCRETE

Abstract

The following paper defines what is prestressed concrete material, the emergence of the idea and the necessity of prestressing concrete, the different types of lengthen the concrete, their construction processes, the advantages and disadvantages about the other materials and the solution for the problem about cracking of the conventional concrete. Various applications of the material in different types of structures are presented, just like the presentation of the materials used in the prestressed concrete. It was based on technical and scientific books that demonstrated the superiority of the material, as the gain in resistance in it's use, the relation cost versus an increase in the resistance of the various structures and the possibilities of executing the most daring projects, inviable using conventional concrete.

Keywords: Concrete. Prestressed Concrete. Prestressing. Armature of Steel.

1 INTRODUÇÃO

“A protensão pode ser definida como o artifício de introduzir, numa estrutura, um estado prévio de tensões, de modo a melhorar sua resistência ou seu comportamento, sob ação de diversas solicitações” (PFEIL, 1984, p. 1).

O concreto tem resistência à tração várias vezes inferior à compressão, sendo necessário medidas para se evitar ou controlar a fissuração. A protensão pode ser empregada como um meio de se criar tensões de compressão prévias nas regiões onde o concreto seria tracionado, podendo também ser empregada como meio de solidarização de partes menores de concreto armado, para compor componentes e sistemas estruturais (HANAI, 2005).

Historicamente a ideia de protensão surgiu quase simultaneamente à ideia do concreto armado. Algumas patentes de 1886 e de 1888 foram requeridas por Jackson (Califórnia-USA) e Dohering (Alemanha). Koenem (Berlim-Alemanha), em 1906 aplicou a protensão para reduzir a fissuração de elementos de piso em argamassa. As primeiras tentativas não conseguiram garantir tensões de compressão permanentes no concreto e os efeitos da retração e da deformação lenta do concreto acabavam por anular o efeito do estiramento prévio da armadura. Após os estudos e ensaios feitos por Eugene Freyssinet, a partir de 1928, é que foi possível entender a necessidade do uso de aços que permitissem grandes deformações de estiramento. Eugene verificou que mesmo com a perda do estiramento ao longo do tempo, os esforços de compressão eram transferidos ao concreto (CARVALHO, 2012 *apud* FREYSSINET, 1948).

1.1 Objetivo

O objetivo consiste em definir o que é concreto protendido, bem como as formas de se obter a protensão. São abordadas também as etapas construtivas de peças em concreto protendido, sua utilização nas diversas estruturas e as vantagens e desvantagens sobre os demais materiais similares.

1.2 Justificativa

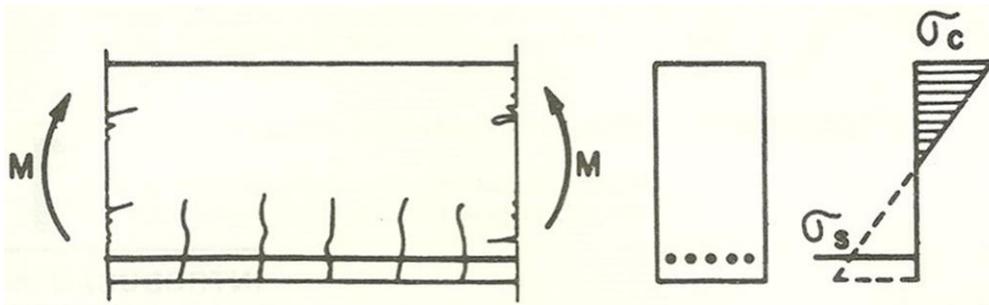
A escolha do tema foi baseada nas diversas vantagens que o concreto protendido possui sobre outros materiais, e na necessidade de se conhecer suas possibilidades para que seja analisado quando sua escolha é melhor na execução do projeto.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Conceito de concreto protendido

O concreto possui diferentes propriedades quanto à compressão e à tração. Esse comportamento pode ser melhorado com a aplicação de uma compressão prévia nas regiões onde as solicitações produzem tensões de tração. Numa viga de concreto armado convencional, sujeita a momento fletor solicitante M (FIG.1), os esforços de compressão são absorvidos pelo concreto (tensões σ_c), e as armaduras de aço resistem aos esforços de tração (tensões σ_s) (PFEIL, 1984).

FIGURA 1 – Viga de concreto armado convencional, sujeita a uma solicitação de flexão simples, em serviço.



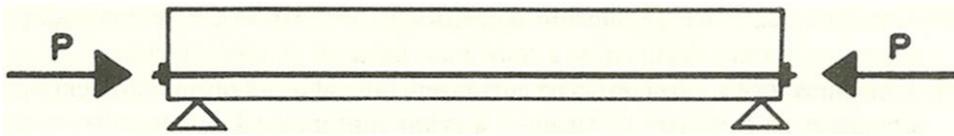
Fonte: (PFEIL, 1984, p. 2)

Na FIG. 1, a parte superior da seção de concreto é comprimida (σ_c) e a parte inferior da seção de concreto é tracionada (σ_s) e há um detalhe de fissuração para efeito de análise.

O grande problema na utilização de aços de alta resistência, como nas armaduras de concreto armado é a limitação ocorrida pelas fissuras no concreto. Com o aparecimento das fissuras, a proteção das armaduras contra corrosão é reduzida, e o resultado estético, indesejável.

A protensão do concreto é realizada por meio de cabos de aço de alta resistência. Esses cabos são tracionados e ancorados no próprio concreto (FIG.2), deslocando a faixa de trabalho do concreto para o campo das compressões, onde ele é mais eficiente (PFEIL, 1984).

FIGURA 2 – Conceito de viga de concreto protendido.



Fonte: (PFEIL, 1984, p. 3)

A FIG. 2 mostra a aplicação de um carregamento prévio na viga de concreto com cabos de aço esticados e ancorados nas suas extremidades.

Na viga de concreto armado (FIG.1), observa-se que boa parte da área da seção da viga não contribui para sua inércia. A protensão provoca tensões permanentes na seção da viga, antes da mesma ser solicitada pelos carregamentos, aplicando tensões prévias de compressão nas partes da seção tracionadas obtendo-se a contribuição da área total da seção da viga para sua inércia. A protensão também melhora o comportamento da viga para solicitações de cisalhamento (PFEIL, 1984).

2.2 Tipos de concreto protendido quanto à aderência e execução

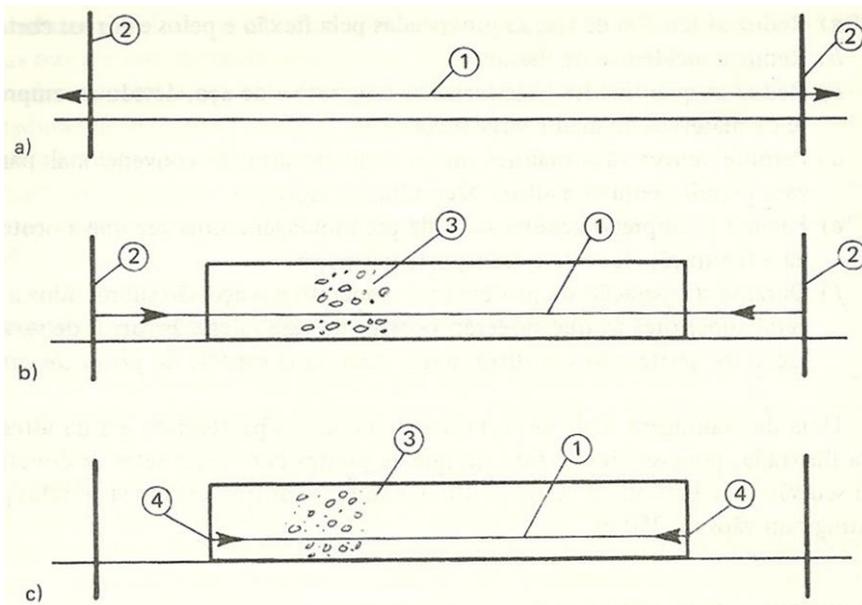
Essa classificação leva em consideração a aderência entre a armadura de protensão (armadura ativa) e o concreto. A protensão é feita por meio de cabos de aço, pré-tracionados ou pós tracionados, esticados e ancorados nas extremidades.

As vigas com armaduras pré-tracionadas são executadas seguindo os esquemas da FIG. 3, onde a armadura protendida fica aderente ao concreto em toda extensão da viga.

Nas vigas com armaduras pós-tracionadas (FIG.4), os cabos são esticados após a cura do concreto e a armadura protendida é ancorada nas extremidades, podendo ficar aderente ao concreto, ao longo da viga, por meio de uma injeção de nata de cimento.

Os sistemas compostos por armaduras são mais adequados para serem concretados em instalações fixas, denominados leitos de protensão, e os sistemas com armaduras pós-tracionadas são mais utilizados quando a protensão é realizada na obra (PFEIL, 1984).

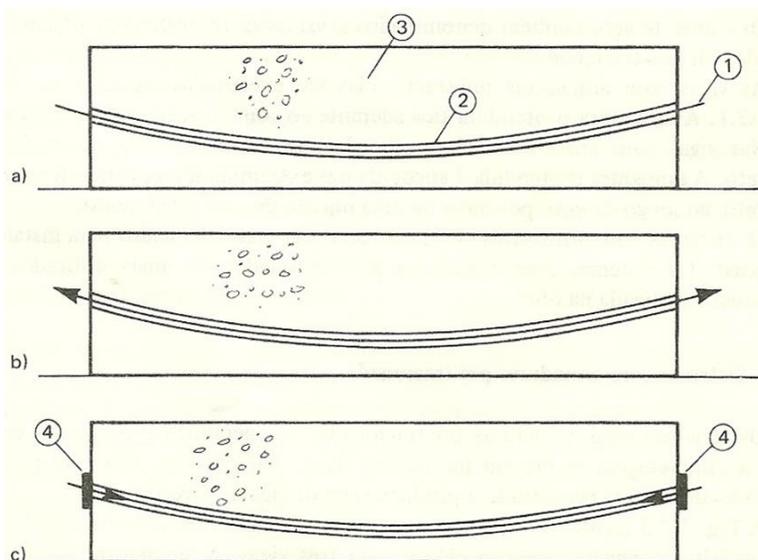
FIGURA 3 – Sequência construtiva de vigas com armaduras pré-tracionadas.



Fonte: (PFEIL, 1984, p. 6)

A FIG. 3 tem como sequência construtiva: a) as armaduras de aço (1) são esticadas entre dois pontos (2), ficando ancoradas provisoriamente nos mesmos; b) o concreto (3) é colocado dentro das formas, envolvendo as armaduras; c) após o concreto haver atingido resistência suficiente, soltam-se as ancoragens dos pontos (2), transferindo-se a força para a viga por aderência (4) entre o aço e o concreto (PFEIL, 1984).

FIGURA 4 – Sequência construtiva de vigas com armaduras pós-tracionadas.



Fonte: (PFEIL, 1984, p. 6)

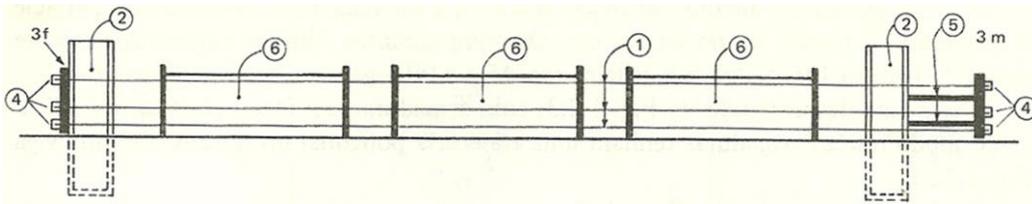
A FIG. 4 tem como sequência construtiva: a) o concreto (3) é moldado e deixado endurecer; cabos de aço (1) são colocados no interior das bainhas (2), podendo deslocar-se no interior da viga; b) após o concreto haver atingido resistência suficiente, os cabos são esticados pelas extremidades, até atingirem o alongamento desejado; c) os cabos são ancorados nas faces da viga com dispositivos mecânicos (4), aplicando um esforço de compressão no concreto (PFEIL, 1984).

2.2.1 Concreto protendido com aderência inicial (pré-tração)

A aderência entre a armadura e o concreto se inicia com o lançamento do concreto.

A FIG. 5 mostra a sequência construtiva de vigas com armaduras pré-tracionadas, em um leito alongado com capacidade para três vigas. (PFEIL, 1984).

FIGURA 5 – Esquema de execução de vigas com armaduras pré-tracionadas, em leito alongado.



Fonte: (PFEIL, 1984, p. 7)

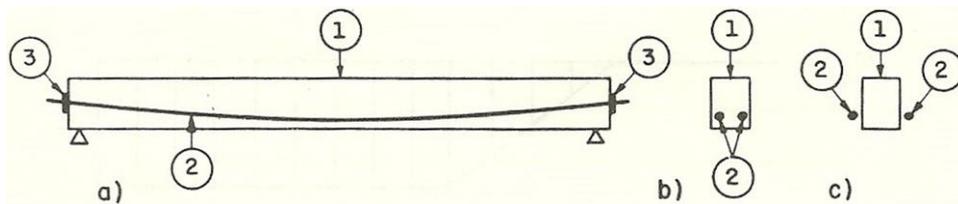
Na FIG. 5, as armaduras (1) são colocadas atravessando os encontros (2), e fixando-se em placas de ancoragem (3), por meio de dispositivos mecânicos (4), geralmente constituídos por cunhas. A placa de ancoragem da esquerda é fixa (3 f), e da direita é móvel (3 m). Com o auxílio de macacos de longo curso, esticam-se as armaduras, empurrando-se a placa de ancoragem móvel (3 m), até se alcançar o esforço de protensão desejado; a placa de ancoragem móvel é então fixada por meio de calços (5) mantendo as armaduras esticadas. O concreto (6) é compactado dentro das fôrmas, envolvendo as armaduras protendidas, que ficam aderentes. Após a cura do concreto, os macacos são recolocados em carga na placa de ancoragem móvel (3 m), retirando-se lentamente a tensão nas armaduras. A seguir, as armaduras são cortadas, junto às faces da viga. Como o encurtamento é impedido pela aderência das mesmas com o concreto, resulta que as vigas ficam protendidas. No desenho da figura, são fabricadas simultaneamente três vigas de concreto protendido (6) (PFEIL, 1984).

2.2.2 Concreto protendido pós-tracionado

Nesses sistemas, as armaduras são esticadas após o endurecimento do concreto e ficam ancoradas na face do mesmo.

A posição entre os cabos e as peças de concreto, podem ser divididas em duas categorias conforme a FIG. 6: cabos internos e cabos externos à viga (PFEIL, 1984).

FIGURA 6 – Categorias de armaduras pós-tracionadas, quanto à posição relativa entre os cabos e a viga de concreto.



Fonte: (PFEIL, 1984, p. 8)

Na FIG. 6, a) Vista lateral da viga, mostrando o cabo de protensão: 1 – viga de concreto; 2 – cabos de protensão; 3 – ancoragens dos cabos de protensão, apoiados na face da viga. b) Cabos de protensão internos – Os cabos são colocados no interior da peça de concreto, envolvidos por bainhas que impedem o contato com o concreto. Após a protensão, enche-se a bainha com nata de cimento injetada ou outro material inerte, para proteger os cabos contra a corrosão. c) Cabos externos – Os cabos ficam no exterior da peça de concreto, recebendo uma proteção mecânica e química.

Os cabos internos apresentam trechos curvilíneos e retilíneos. Os cabos externos são retilíneos ou poligonais.

A ligação entre as armaduras protendidas e o concreto, podem ocorrer por duas categorias de cabos: cabos aderentes (FIG.7) e cabos não-aderentes (FIG.8).

Nos cabos internos aderentes, são utilizadas bainhas metálicas, podendo ser lisas ou onduladas. As bainhas onduladas melhoram a aderência do cabo. Existem também bainha plásticas corrugadas, com indentações que estabelecem uma ligação mecânica entre o cabo e a viga.

A aderência dos cabos pós-tracionados e injetados com nata de cimento é inferior à obtida nas armaduras pré-tracionadas e nas armaduras convencionais de concreto armado. Os cabos internos com bainha de papel ou de plástico (lisos) (FIG.8a) e os cabos externos, sem

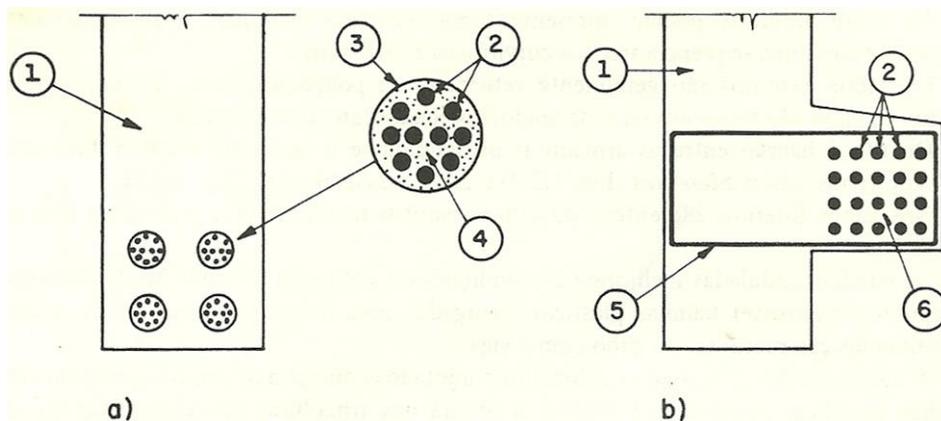
ligação direta com a viga ao longo do cabo, são considerados não-aderentes. O último é muito utilizado em projeto de reforço de obras.

Os cabos são divididos em duas categorias de acordo com sua constituição:

a) Cabos isolados ou independentes – são cabos padronizados necessários para atingir o esforço desejado.

b) Cabos concentrados – onde a protensão ocorre com um único cabo onde são colocados fios de aço (PFEIL, 1984).

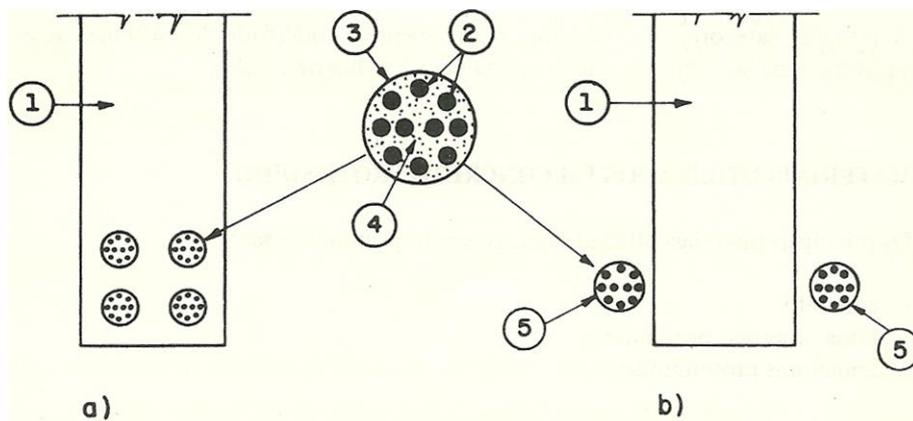
FIGURA 7 – Armaduras pós-tracionadas, aderentes ao concreto.



Fonte: (PFEIL, 1984, p. 9)

Na FIG. 7, a) cabos internos aderentes. Os cabos são colocados no interior de bainhas metálicas. Após a protensão e ancoragem dos cabos, estabelece-se aderência por injeção de nata de cimento nas bainhas; a nata de cimento constitui também um meio alcalino que protege os cabos contra corrosão: 1 – viga de concreto; 2 – aço de protensão; 3 – bainha metálica; 4 – nata de cimento injetado. b) Cabos externos aderentes. Os cabos são adjacentes à alma da viga. Estabelece-se aderência por concretagem direta do cabo, melhorando-se a ligação com a viga por meio de estribos: 1 – viga de concreto; 2 – aço de protensão; 5 – estribo de ligação com a viga; 6 – revestimento do cabo externo com concreto vibrado de boa qualidade, que protege as armaduras contra corrosão (PFEIL, 1984).

FIGURA 8 – Armaduras pós-tracionadas, não aderentes ao concreto.



Fonte: (PFEIL, 1984, p. 9)

Na FIG. 8, a) cabos internos com bainha plástica ou de papel. Após a protensão e ancoragem dos cabos, as bainhas são injetadas com graxa inerte ou com nata de cimento, a fim de proteger os cabos contra a corrosão: 1 – viga de concreto; 2 – aço de protensão; 3 – bainha plástica ou de papel; 4 – nata de cimento ou graxa inerte injetada na bainha. b) Cabos externos à seção da viga: 5 – tubo de aço ou plástico (PFEIL, 1984).

2.2.3 Definições da Norma Brasileira para os diversos tipos de protensão

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na norma NBR 6118:2007, a definição dos tipos de protensão quanto à aderência são:

- Concreto com armadura ativa pré-tracionada (protensão com aderência inicial): Concreto protendido em que o pré-alongamento da armadura ativa é feito utilizando-se apoios independentes do elemento estrutural, antes do lançamento do concreto, sendo a ligação da armadura de protensão com os referidos apoios desfeita após o endurecimento do concreto; a ancoragem no concreto realiza-se só por aderência;
- Concreto com armadura ativa pós-tracionada (protensão com aderência posterior): Concreto protendido em que o pré-alongamento da armadura (ativa de protensão) é realizado após o endurecimento do concreto, utilizando-se, como apoios, partes do próprio elemento estrutural, criando-se posteriormente aderência com o concreto de modo permanente, através da injeção das bainhas;
- Concreto com armadura ativa pós-tracionada sem aderência (protensão sem aderência): Concreto em que o pré-alongamento da armadura ativa é realizado após o endurecimento do

concreto, sendo utilizado como apoios partes do próprio elemento estrutural, mas não sendo criada aderência com o concreto, ficando a armadura ligada ao concreto apenas em pontos localizados (ABNT, 2007).

2.3 Tipos de concreto protendido quanto à intensidade de protensão

Segundo a ABNT, na norma NBR 6118:2007, os tipos de protensão quanto à sua intensidade tem relação com a durabilidade e a maneira de se evitar a corrosão da armadura. O risco de corrosão é maior na armadura ativa do que nas armaduras passivas e os cuidados a serem tomados referentes à fissuração no concreto protendido são maiores que em peças de concreto armado.

A norma define os tipos de protensão em: protensão completa, protensão limitada e protensão parcial. A escolha do tipo de protensão depende do tipo de construção e da agressividade do meio ambiente. Elementos com aderência posterior são recomendados para ambiente com fraca e moderada agressividade com o uso de protensão parcial. Para ambientes com agressividade fortes e muito fortes, é recomendada a protensão limitada. A protensão com aderência inicial é recomendada para ambiente com fraca agressividade com protensão parcial. A protensão limitada é recomendada para ambiente com moderada agressividade. A protensão completa é recomendada para ambientes com agressividade forte e muito forte.

Com a definição do tipo de protensão empregada, o uso de concreto com uma resistência à compressão mínima e cobrimentos devem ser atendidos. Tais informações são encontradas nos itens 7.4.2 e 7.4.6A da NBR 6118:2007.

A antiga norma de concreto protendido (NBR 7197), acrescentava às exigências anteriores que, em estruturas de pontes ferroviárias ou vigas de ponte rolantes, só seria admitida protensão com aderência. A protensão sem aderência, segundo a NBR 7197, só poderia ser empregado em casos especiais e sempre com protensão completa (ABNT, 2007).

2.4 Materiais utilizados em concreto protendido

Os principais materiais utilizados em concreto protendido são:

- Concreto;
- Armaduras não protendidas;
- Armaduras protendidas.

2.4.1 Concreto

As propriedades mecânicas do concreto estão relacionadas com sua resistência à compressão simples (f_{ck}). Essa resistência é determinada em ensaios de ruptura de corpos de prova cilíndricos de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, com idade de 28 dias. Após os 28 dias a resistência do concreto continua aumentando, existindo acréscimos de 20% a 30% (BOTELHO; MARCHETTI, 2013).

2.4.2 Armaduras não protendidas

Entende-se como armaduras não protendidas como sendo os vergalhões empregados no concreto armado. Essas armaduras são denominadas como convencionais ou suplementares nas estruturas protendidas.

Aços utilizados como armadura suplementar são designados como aços para concreto armado (CA) e de um valor característico do limite de escoamento (f_{yk}) em kgf/mm².

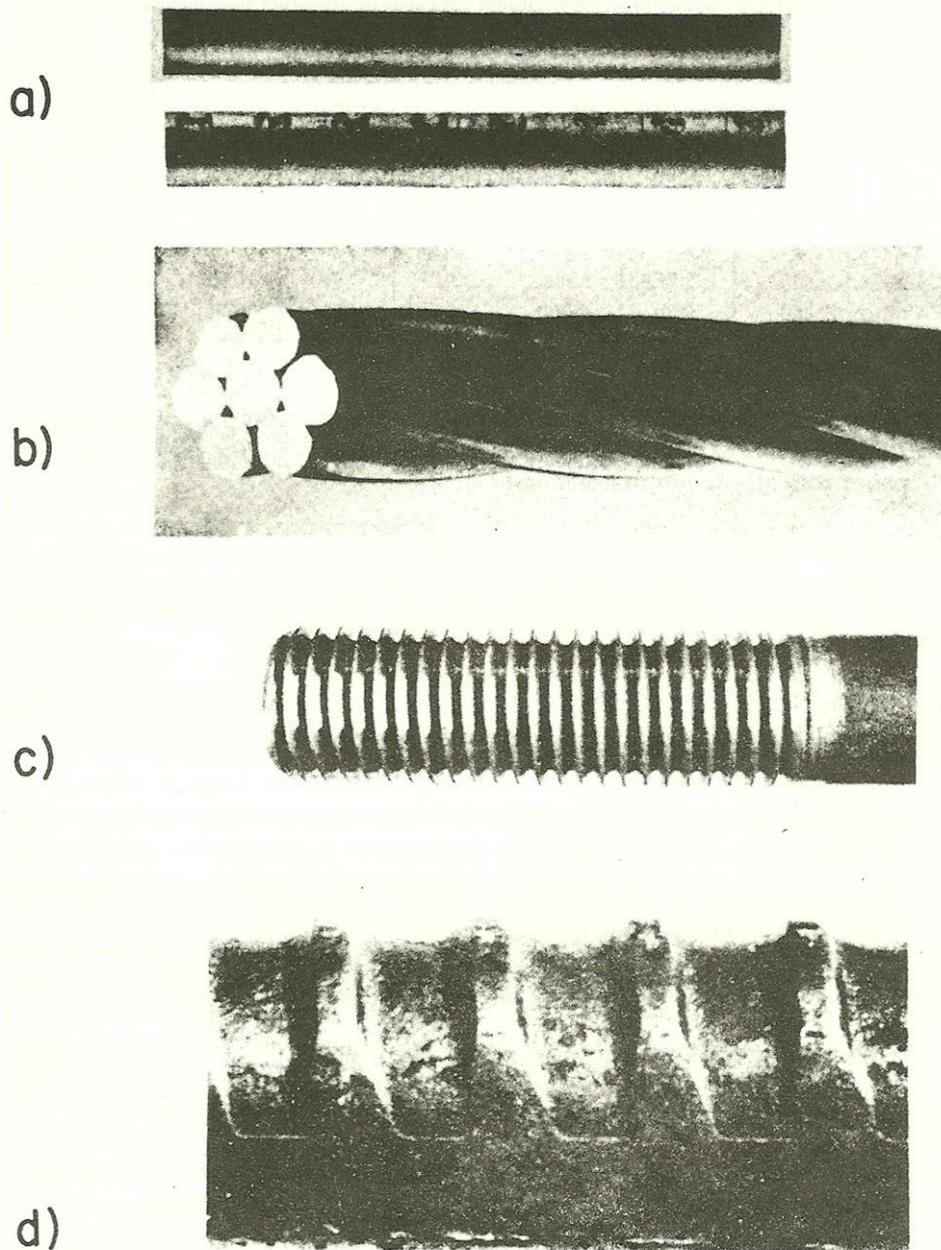
As armaduras não protendidas podem também ser constituídas por aços de alta resistência, aplicados sem protensão. Essa utilização é pouco comum devido ao maior custo dos aços do tipo CP (CARVALHO, 2012).

2.4.3 Armaduras protendidas

Aços usados como armaduras de protensão são divididos em três categorias (FIG.9):

- Fios trefilados de aço carbono, com diâmetros entre 3 mm e 8 mm (FIG.9a).
- Cordoalhas, constituídas por fios trefilados, enrolados em forma de hélice (FIG.9b).
- Barras de aço baixa liga, laminada a quente (FIG.9c,d) (PFEIL, 1984).

FIGURA 9 – Tipos de aço para armadura protendida.



Fonte: (PFEIL, 1984, p. 16)

Na FIG. 9, a) Fio trefilado, com superfície lisa ou indentada. b) Cordoalha de 7 fios, formada por um fio central retilíneo e seis fios helicoidais. c) Barra laminada com rosca na extremidade (torneada ou laminada). d) Barra laminada com deformações que permitem colocação da porca de ancoragem em qualquer posição intermediária na barra.

Os aços de protensão são designados como aço para concreto protendido (CP) e a resistência característica à ruptura por tração (f_{ptk}) é dada em kgf/mm^2 (PFEIL, 1984).

2.5 Equipamentos de protensão

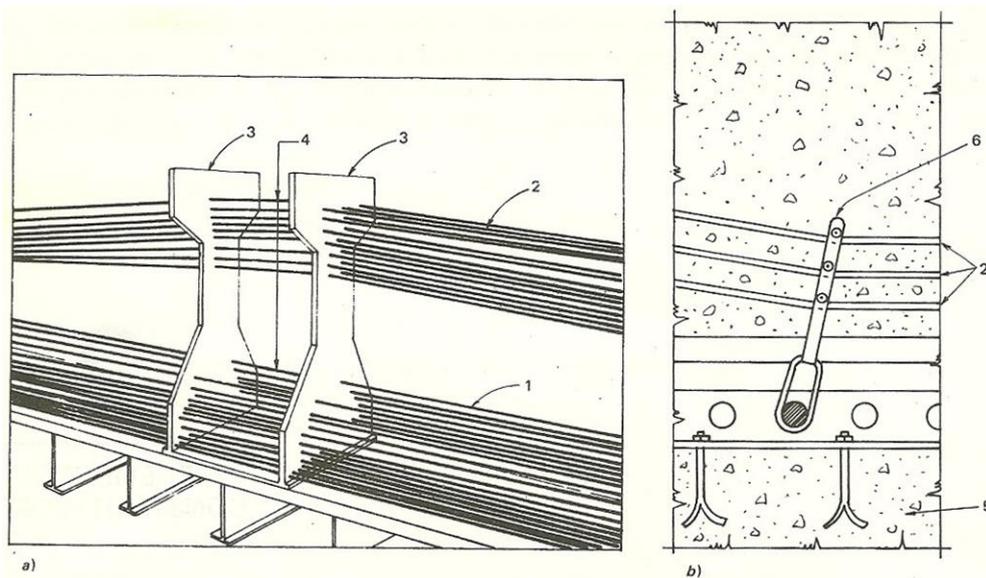
2.5.1 Equipamentos para armaduras pré-tracionadas

Nas peças com armaduras pré-tracionadas, a ancoragem ocorre por aderência com o concreto, sendo tracionadas por meio de macacos ou talhas. Na compactação do concreto as armaduras protendidas são envolvidas e, após a cura do concreto, as amarras que prendem as armaduras são soltas, e os esforços passam para o concreto, por aderência.

A FIG. 10 mostra detalhes na construção e os pontos de mudança de direção de armaduras pré-tracionadas.

A FIG. 11 mostra os dispositivos de tracionamento e fixação de armaduras pré-tracionadas, em uma usina de peças pré-moldadas (PFEIL, 1984).

FIGURA 10 – Dispositivos de mudança de direção de armaduras pré-tracionadas poligonais, em leito alongado, permitindo a execução de diversas vigas em série.

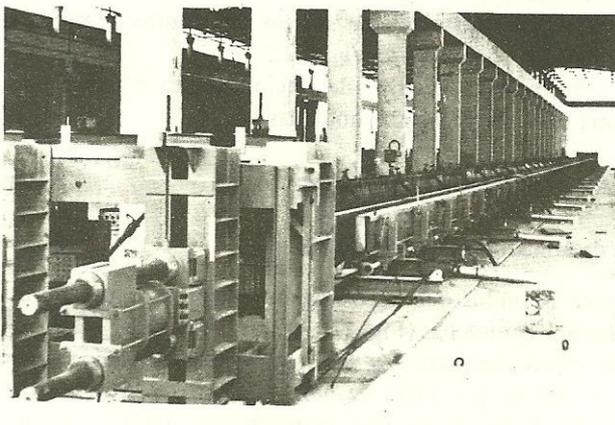


Fonte: (PFEIL, 1984, p. 22)

Na FIG. 10, a) Dispositivos de sustentação da armadura poligonal, nas extremidades da viga: 1 – armadura pré-tracionada retilínea; 2 – armadura pré-tracionada poligonal; 3 – chapa metálica perfurada, servindo de apoio para a armadura poligonal, e de fôrma da extremidade de uma viga; 4 – pontos de corte das armaduras pré-tracionadas, após a cura do concreto. b) Dispositivo de desvio da armadura poligonal, no vão de uma viga: 5 – base do leito de

fabricação, com pontos de ancoragem dos dispositivos de desvio; 6 – dispositivo de desvio das armaduras (PFEIL, 1984).

FIGURA 11 – Vista de um leito de fabricação de elementos protendidos com armaduras pré-tracionadas.



Fonte: (PFEIL, 1984, p. 22)

Na FIG. 11, em primeiro plano, aparecem os encontros metálicos para tracionamento das armaduras. As armaduras são esticadas por meio de macacos hidráulicos, permanecendo ancoradas nos encontros durante a concretagem e a cura dos elementos. Após a cura do concreto, as armaduras são desprotendidas gradualmente, nos encontros, por meio de parafusos especiais, que são vistos na figura em primeiro plano. Os esforços nos fios são então transferidos para o concreto, por aderência (PFEIL, 1984).

2.5.2 Equipamentos para armaduras pós-tracionadas

2.5.2.1 Tipos mais usuais de armaduras pós-tracionadas

As armaduras mais usuais são formadas por cordoalhas (FIG.9b) ou barras (FIG.9c,d).

As armaduras pós-tracionadas são colocadas no interior do concreto e ficam isoladas por meio de bainhas (FIG.7a) que permitem o alongamento das armaduras realizada após a cura do concreto. As bainhas são injetadas com nata e cimento, desempenhando duas funções essenciais:

a) estabelecer um grau de aderência eficaz entre as armaduras protendidas e o concreto;

b) oferecer proteção metálica e química para as armaduras, impedindo a corrosão das mesmas (PFEIL, 1984).

2.5.2.2 Bainhas para armaduras pós-tracionadas

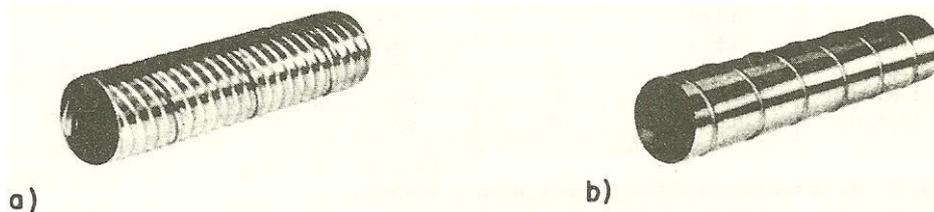
Fabricadas com chapas metálicas, podem ser lisas ou onduladas. A última é mais utilizada por ser de fácil modelagem, facilitando a execução de curvas indicadas no projeto.

Devem atender às condições:

- a) Terem resistência e estanqueidade suficientes para impedir entrada de nata de cimento no seu interior, durante a concretagem.
- b) Permitirem os alongamentos dos cabos, durante a protensão, com atrito reduzido.
- c) Terem área suficiente permitir boa acomodação dos cabos e passagem da nata de injeção.

A FIG. 12 mostra os dois tipos de bainhas usadas em cabos pós-tracionados (PFEIL, 1984).

FIGURA 12 – Tipos de bainhas usadas em concreto protendido.



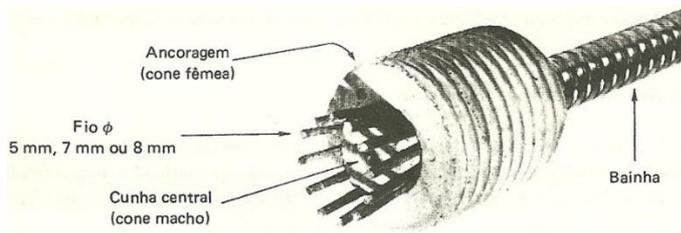
Fonte: (PFEIL, 1984, p. 23)

Na FIG. 12, a) bainha de chapa corrugada; b) bainha de chapa lisa.

2.5.2.3 Cabos de fios trefilados

No início da utilização da protensão, os primeiros cabos eram feitos com fios trefilados (FIG.9a). Após o invento das ancoragens com cunha central (FIG.13) pelo engenheiro francês Eugene Freyssinet, elas se tornaram o produto básico da indústria de protensão durante muitos anos. Na FIG. 13, a ancoragem é constituída de duas peças cônicas, macho e fêmea, em concreto de alta resistência. (PFEIL, 1984).

FIGURA 13 – Ancoragem Freyssinet para 12 fios paralelos, com diâmetros 5 mm, 7 mm ou 8 mm.



Fonte: (PFEIL, 1984, p. 24)

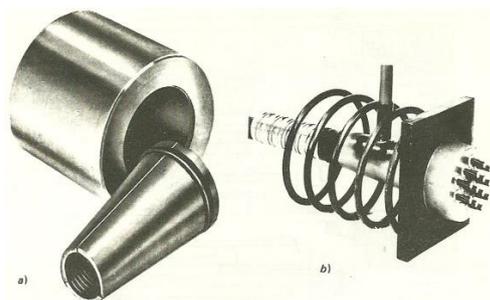
2.5.2.3 Cabos de cordoalhas

As cordoalhas mais usadas são as de 7 fios (FIG.10b), com diâmetro nominal 1/2" ou 5/8". Os cabos são constituídos por cordoalhas, colocadas lado a lado, no interior das bainhas e os mais usados variam de 1 a 31 cordoalhas por cabo, existindo cabos de até 55 cordoalhas.

Essas ancoragens foram inventadas pelo engenheiro suíço Losinger (sistemas VSL), na década de 1960-70, e tornaram-se um padrão na indústria de protensão.

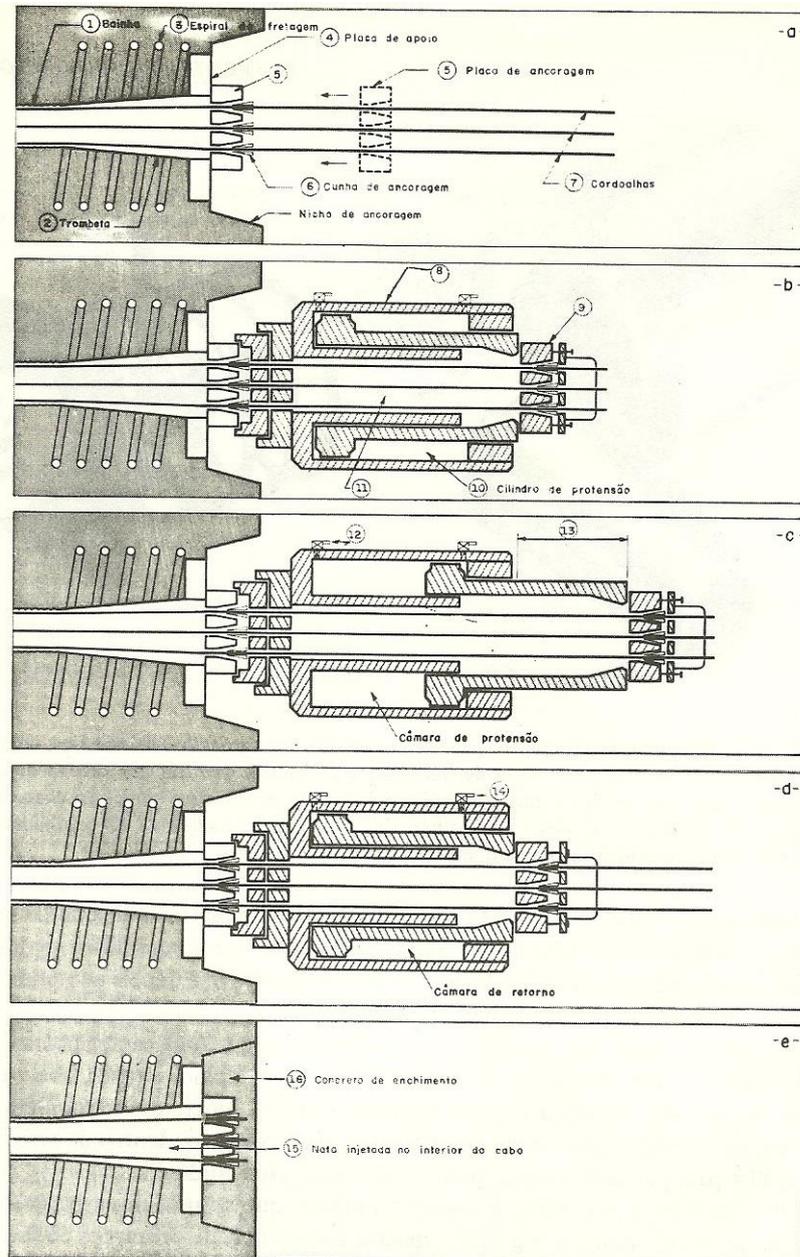
O processo de protensão é feita por meio de macacos furados, que se apoiam na placa de ancoragem ou na placa de apoio. A FIG. 14 mostra a sequência de operações de protensão, ancoragem e injeção de um cabo de cordoalhas: a) Vista de uma cunha individual, que trabalha dentro de um furo cônico num barilete (ancoragem de uma corda isolada), ou de um furo cônico na chapa de ancoragem (ancoragem simultânea de várias cordoalhas, do tipo da figura b). b) Ancoragem para 12 cordoalhas, sendo cada cordoalha fixada individualmente com uma cunha do tipo da figura a. (PFEIL, 1984).

FIGURA 14 – Exemplo de ancoragem para cabo formada por cordoalhas de sete fios, com cunhas individuais para cada cordoalha.



Fonte: (PFEIL, 1984, p. 25)

FIGURA 15 – Esquema de operações efetuadas na protensão de um cabo formado por cordoalhas ancoradas individualmente por meio de cunhas.



Fonte: (PFEIL, 1984, p. 26)

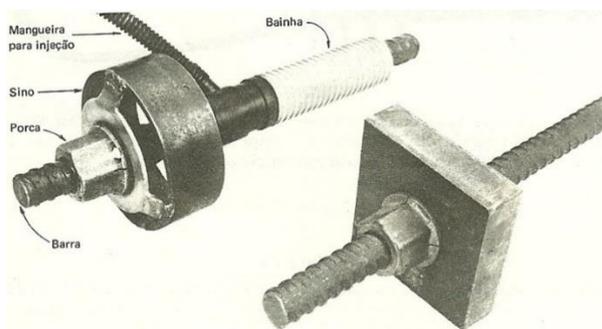
Na FIG. 15, a) Extremidade do cabo a ser protendido; colocação da ancoragem e das cunhas: 1 – bainhas; 2 – trombeta ou bainha alargada; 3 – espiral de reforço ou armadura de fretagem; 4 – placa de apoio da ancoragem; 5 – cabeça ou placa de ancoragem; 6 – cunhas de ancoragem; 7 – cordoalhas do cabo. b) Colocação do macaco e fixação do cabo: 8 – macaco hidráulico; 9 – cabeça de fixação do cabo do macaco, com cunhas; 10 – cilindro de protensão;

11 – furo central no macaco para permitir a passagem do cabo. c) Esticamento (protensão) do cabo: 12 – entrada de óleo no cilindro de protensão; 13 – curso do macaco. d) Fechamento do macaco: 14 – entrada de óleo para fechamento do macaco. As cunhas de ancoragem (6) funcionam automaticamente quando o pistão se fecha, transferindo o esforço de protensão para a ancoragem (5). A operação da alínea (c) pode ser repetida, se necessário, quando o alongamento do cabo é superior ao curso do macaco. e) Injeção do cabo e protensão da ancoragem: 15 – nata injetada no interior do cabo; 16 – concreto de enchimento do nicho de ancoragem (protensão mecânica e química da ancoragem).

2.5.2.4 Armaduras de protensão em barras

Utilizadas de forma individual, cada cabo é formado por uma barra dentro de uma bainha. A FIG. 16 mostra dois exemplos de ancoragens de barras laminadas com rosca: a) Ancoragem em forma de sino; o sino serve de fretagem do concreto onde se apoia a arruela da porca. b) ancoragem com placa retangular. (PFEIL, 1984).

FIGURA 16 – Exemplos de ancoragens de barras com roscas laminadas, tipo Dywidag (Alemanha).



Fonte: (PFEIL, 1984, p. 28)

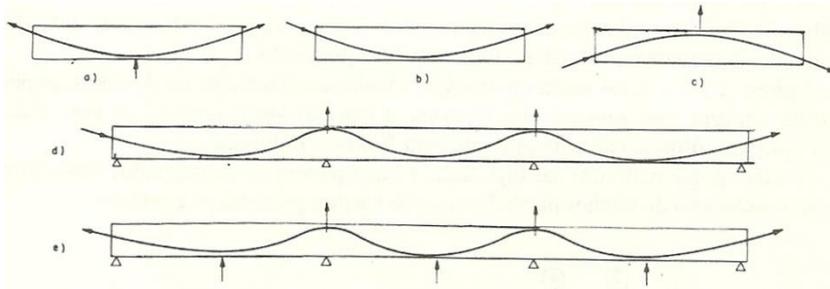
2.5.2.5 Injeção de cabos pós-tracionados

Os cabos protendidos são injetados com uma nata de cimento. Essa nata tem como função a proteção das armaduras e auxiliar na aderência entre os cabos e o concreto.

O bombeamento da nata para o interior dos cabos deve ser feito com equipamentos elétricos de grande eficiência, pois equipamentos manuais provocam entupimento na bainha.

A FIG. 17 mostra os esquemas de injeção dos cabos mais usuais. As setas indicam os pontos de entrada e saída da nata (PFEIL, 1984).

FIGURA 17 – Esquemas de injeção de nata de cimento em cabos no interior de bainhas.



Fonte: (PFEIL, 1984, p. 29)

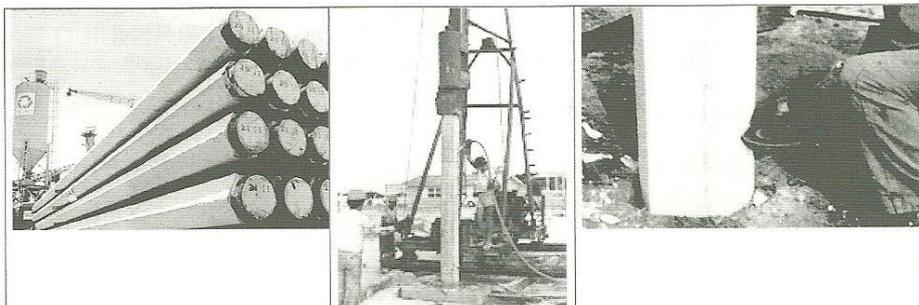
2.6 Aplicações do concreto protendido

2.6.1. Estacas pré-moldadas protendidas

Indicadas para quando se deseja executar fundações profundas com necessidade de atravessar lençóis freáticos.

Possuem duas situações críticas: o manuseio da estaca até o seu posicionamento e durante a cravação. Uma protensão com aderência inicial permite evitar fissuras e resistir melhor às ações da cravação se comparadas ao concreto armado. Na FIG. 18 observam-se estacas pré-fabricadas (CARVALHO, 2012).

FIGURA 18 – Estacas pré-fabricadas estocadas, estaca pré-fabricada sendo cravada e sendo cortada com esmeril na cota de arrasamento.

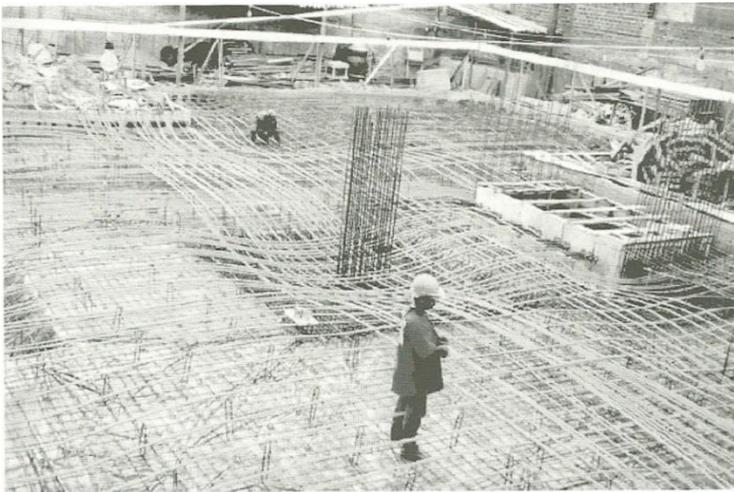


Fonte: (CARVALHO, 2012, p. 50)

2.6.2 Radiers

As fundações em radier são lajes apoiadas no solo que sustentam uma estrutura. O uso do concreto protendido constituiu uma boa solução com o uso de cabos de cordoalhas engraxadas. Na FIG. 19 pode ser vista a montagem de cordoalhas engraxadas para a realização de uma dessas lajes (CARVALHO, 2012).

FIGURA 19 – Radier com cabos de protensão.



Fonte: (CARVALHO, 2012, p. 51)

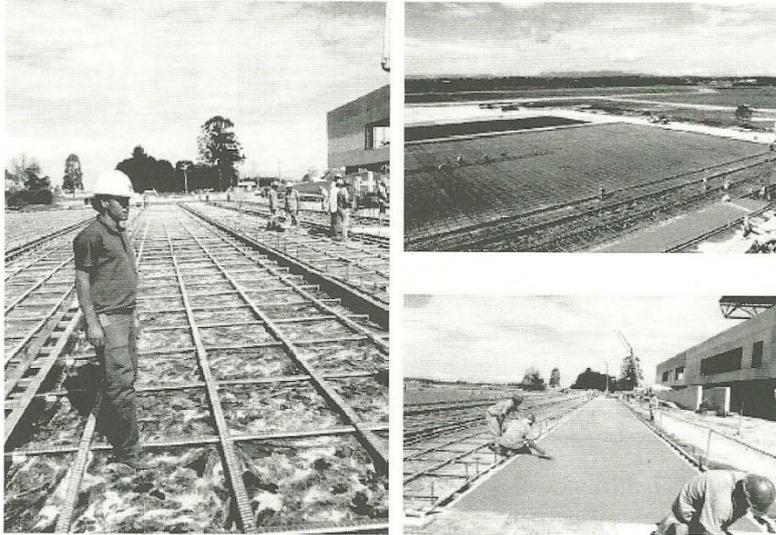
2.6.3 Reforço de blocos de fundação de grande dimensão

Utilizados para resolver problemas como erro de execução ou deterioração prematura da armadura de blocos de fundação, os cabos de protensão externos são muito comuns. Também são usados em blocos de grandes dimensões e esforços já no projeto de armadura de protensão (CARVALHO, 2012).

2.6.4 Pavimentos sobre o solo

Podem ser feitos com fibras, telas, barras ou serem protendidos com barras ou cordoalhas em situações de grande concentração de cargas, como trens de pouso de aviões nas pistas de aeroportos, ou cargas concentradas em pavimentos de indústrias ou rodovias. A FIG. 20 mostra um exemplo de pista de aeroporto em que foi usada a protensão (CARVALHO, 2012).

FIGURA 20 – Aspectos de execução da pista do pátio de aeronaves do aeroporto de Afonso Pena, Curitiba, em 1996.



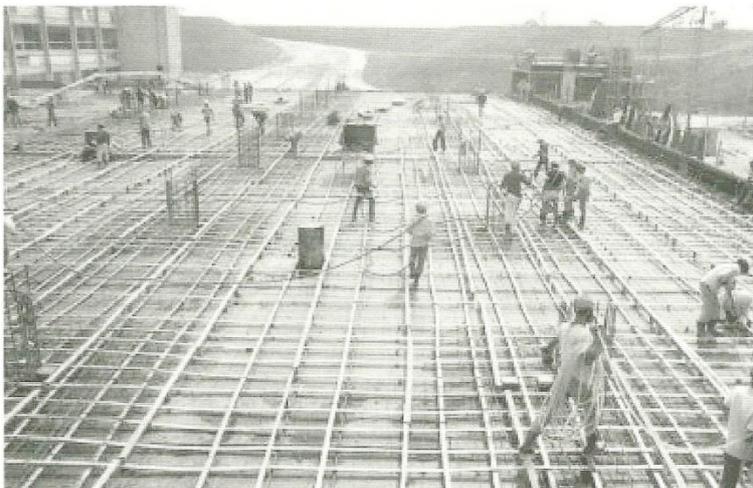
Fonte: (CARVALHO, 2012, p. 52)

2.6.5 Lajes

Há dois tipos de lajes protendidas: as moldadas no local e as pré-moldadas.

As lajes moldadas no local podem ser executadas com protensão aderente ou não aderente (cordoalha engraxada), como mostrado na FIG. 21.

FIGURA 21 – Fotografia de montagem de armação de protensão em laje de piso.

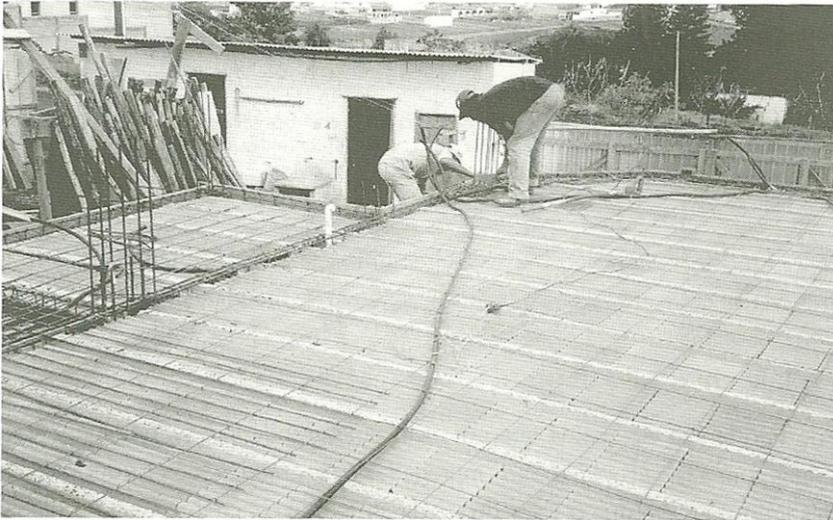


Fonte: (CARVALHO, 2012, p. 54)

Há três tipos de lajes pré-moldadas ou pré-fabricadas, como estipulam as normas:

1) A laje pré-moldada com trilhos protendidos: composta de nervuras de concreto protendido completado por elementos de enchimento como EPS (isopor) ou lajotas cerâmicas. (FIG.22)

FIGURA 22 – Fotografia da montagem da laje com vigotas protendidas.

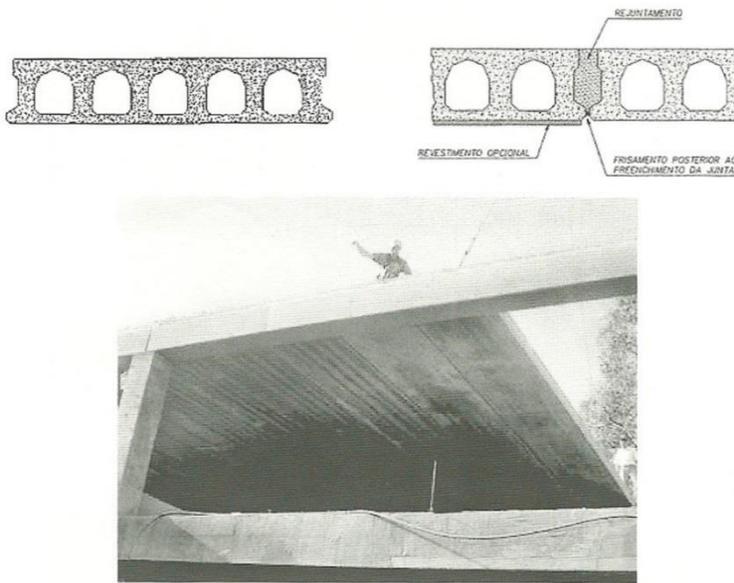


Fonte: (CARVALHO, 2012, p. 57)

2) A laje com painel alveolar: é o elemento de protensão com aderência inicial mais usado no mercado brasileiro, pois possui baixo custo de fabricação e vence vãos em torno de 9 a 10 metros.

Na FIG. 23 mostra-se a seção transversal de uma laje alveolar e também como é feita a ligação transversal entre elas, e finalmente a montagem de um painel.

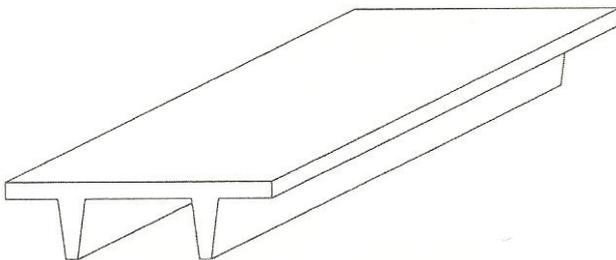
FIGURA 23 – Seção transversal de Painel Alveolar de Concreto Protendido.



Fonte: (CARVALHO, 2012, p. 58)

3) A laje em duplo tê ou “ π ”: são empregadas para grandes vãos e principalmente para edificações industriais em que o valor do pé-direito não é crítico. É usada a protensão com aderência posterior. A FIG. 24 mostra uma perspectiva esquemática de uma laje tê (CARVALHO, 2012).

FIGURA 24 – Perspectiva esquemática de uma laje tê ou π .

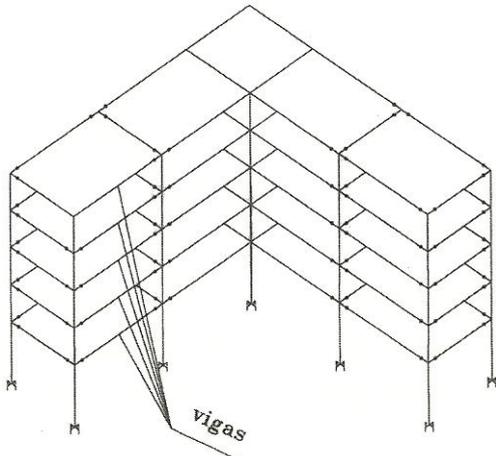


Fonte: (CARVALHO, 2012, p. 59)

2.6.6 Vigas

No Brasil as vigas protendidas são mais usadas em construções pré-moldada. As peças são executadas em fábricas, transportadas até o local, içadas e colocadas na posição final. Na FIG. 25 mostra-se um prédio com vigas pré-moldadas (CARVALHO, 2012).

FIGURA 25 – Vigas em uma edificação pré-moldada.

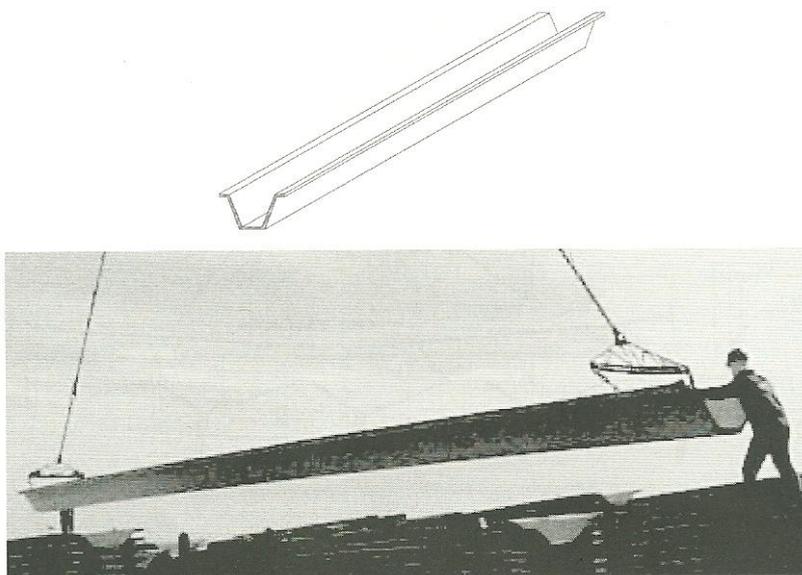


Fonte: (CARVALHO, 2012, p. 59)

2.6.7 Elementos de cobertura

As coberturas de prédio pré-moldados, principalmente aqueles com grandes vãos (até 25 metros), podem ser executadas com elementos de cobertura como as “telhas” tipo W, como pode ser observado na FIG. 26 (CARVALHO, 2012).

FIGURA 26 – Perspectiva esquemática de telha W fabricada com protensão, com aderência inicial, e uma telha sendo içada para colocação em transporte.

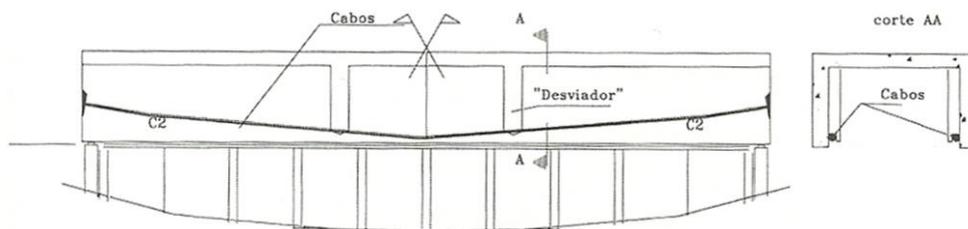


Fonte: (CARVALHO, 2012, p. 61)

2.6.8 Reforços em vigas

O reforço em vigas é feito com o uso de cabos externos não aderentes que se apoiam em desviadores e na extremidade da viga, como indica a FIG. 27 (CARVALHO, 2012).

FIGURA 27 – Viga em concreto protendido com cabos externos não aderentes.



Fonte: (CARVALHO, 2012, p. 63)

2.6.9 Painéis de fechamento

Em estruturas pré-fabricadas, o uso de painéis que resistem ao seu peso, ações horizontais, coberturas e lajes é muito comum. Esses painéis são construídos em concreto protendido. Na FIG. 28 mostra-se a montagem de um painel maciço do laboratório do NETPRÉ da Universidade Federal de São Carlos (CARVALHO, 2012).

FIGURA 28 – Laboratório de NETPRÉ da UFSCar, São Carlos.



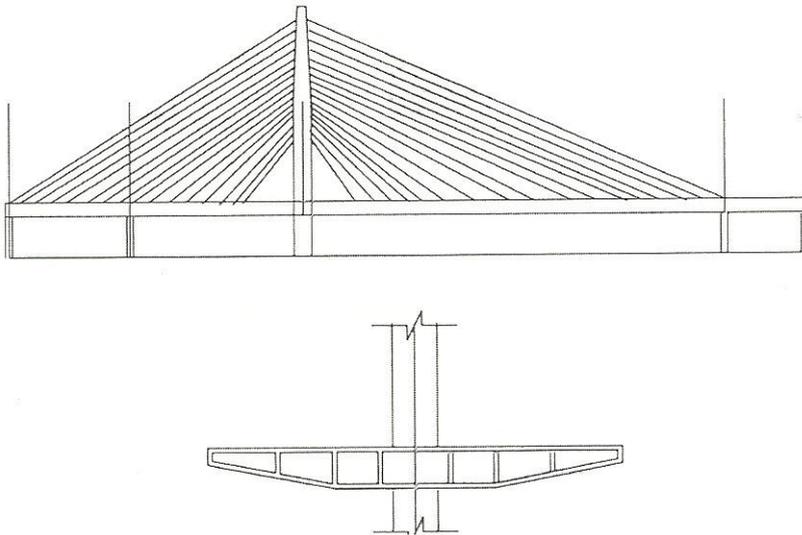
Fonte: (CARVALHO, 2012, p. 63)

2.6.10 Pontes, viadutos e passarelas

A maior aplicação do concreto protendido se dá atualmente nas pontes rodoviárias e ferroviárias. O concreto protendido apresenta, devido às suas características, uma alternativa mais barata e com pequeno custo de conservação.

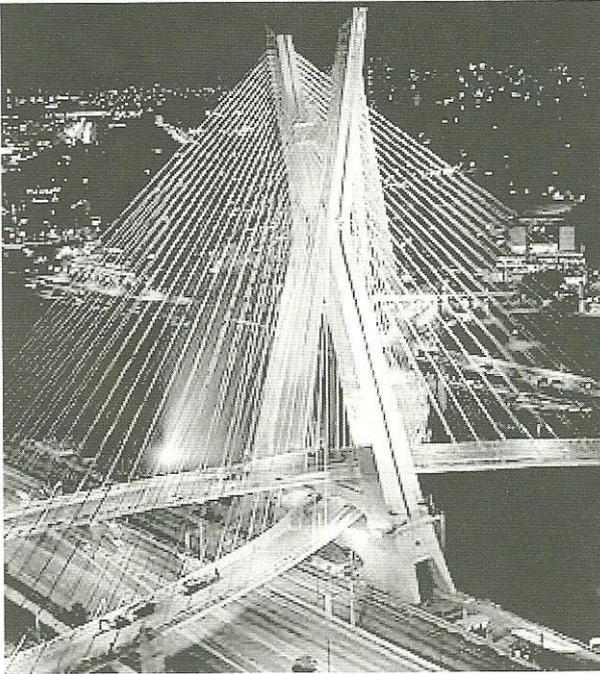
Na FIG. 29 vê-se um esquema de uma ponte (ou viaduto) estaiada e na FIG. 30, uma fotografia da ponte estaiada Roberto Marinho, em São Paulo (CARVALHO, 2012).

FIGURA 29 – Vista lateral esquemática de uma ponte estaiada e sua seção transversal.



Fonte: (CARVALHO, 2012, p. 72)

FIGURA 30 – Ponte estaiada Roberto Marinho, em São Paulo.

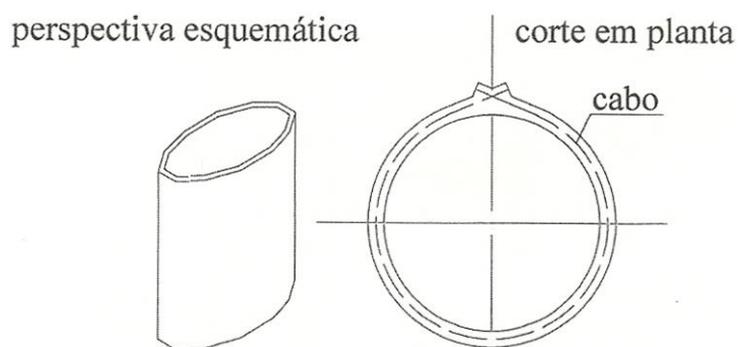


Fonte: (CARVALHO, 2012, p. 72)

2.6.11 Silos e reservatórios

Reservatórios de seção circular são projetados com protensão radial para que se melhore a fissuração das paredes. Podem ser usados cabos verticais e na cobertura. Na FIG. 31, alguns detalhes são apresentados (CARVALHO, 2012).

FIGURA 31 – Perspectiva esquemática e planta de tanque cilíndrico.

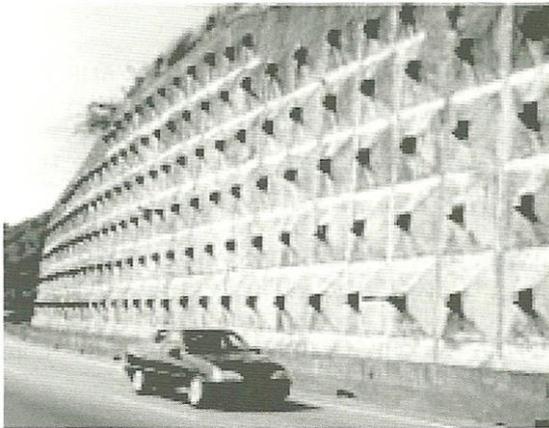


Fonte: (CARVALHO, 2012, p. 73)

2.6.12 Cortinas atirantadas

Na estabilização de taludes são construídas cortinas de concreto ancoradas em rocha ou maciço de terra, por meio de tirantes. Os tirantes são protendidos e permitem a funcionalidade da estrutura. Na FIG. 32 vê-se uma fotografia de uma cortina atirantada (CARVALHO, 2012).

FIGURA 32 – Fotografia de cortina atirantada na rodovia Piaçanguera, Guarujá – SP.

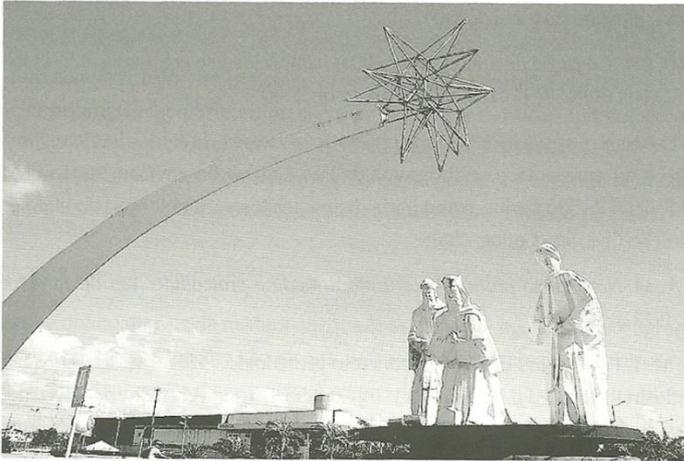


Fonte: (CARVALHO, 2012, p. 75)

2.6.13 Monumentos

Os monumentos modernos em concreto são feitos em concreto protendido, por esse material apresentar-se mais leves, durável e com pouca deformação. Um exemplo é mostrado na FIG. 33, onde é visto o Pórtico dos Três Reis Magos (o braço da estrela é protendido) em Natal, RN (CARVALHO, 2012).

FIGURA 33 – Pórtico dos Três Reis Magos, em Natal – RN.



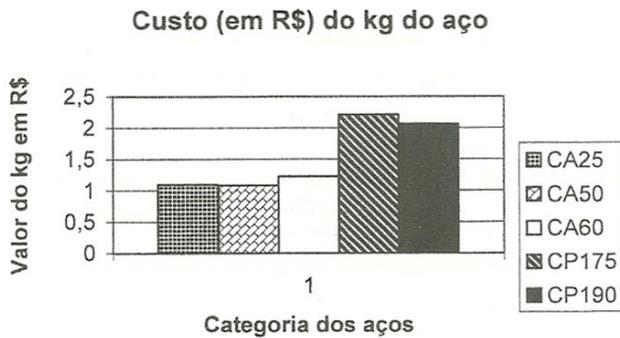
Fonte: (CARVALHO, 2012, p. 75)

2.7 Vantagens e desvantagens do concreto protendido

Em diversas situações as estruturas em concreto são mais econômicas que as executadas com outros materiais. Comparadas às estruturas de madeira e aço têm como vantagem manutenção mais simples e mais barata. Comparadas às estruturas de concreto armado, têm a fissuração impedida ou mais controlada na região tracionada nas partes que sofrem flexão.

No quesito economia das estruturas em concreto protendido, pode-se usar um estudo do custo do aço estrutural. Com base neste estudo serão comparados os aços CA25, CA50, CA60, CP175 e CP190 (os três primeiros usados em peças de concreto armado e os dois últimos, em peças de concreto protendido). Levando em consideração somente o custo do aço por quilo, chega-se ao gráfico apresentado na FIG. 34, que pode levar à uma conclusão enganosa. Nele o aço que tem preço menor por quilo é o mais barato.

FIGURA 34 – Gráfico com custos das diversas categorias do aço.

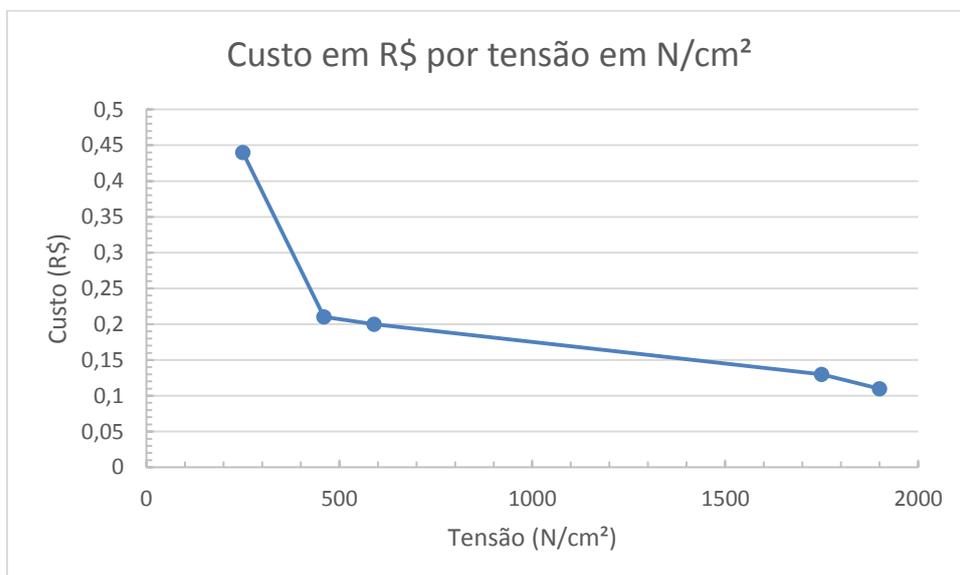


Fonte: (CARVALHO, 2012, p. 25)

No gráfico da FIG. 34, as siglas CA e CP significam, respectivamente, aço para concreto armado e aço para concreto protendido. O número junto às siglas representa sua tensão de tração dada em kgf/mm^2 . Assim, um aço CA25, por exemplo, indica que o aço é usado em concreto armado e que possui resistência de 25 kgf em cada mm^2 .

Uma análise mais correta é aquela em que se calcula o custo da força desenvolvida em cada um. Assim, 1 kg de CA25 será capaz de desenvolver uma força proporcional a sua tensão de escoamento (no caso $1,25 \times 25 = 31,25 \text{kN}$). Na divisão do custo do kg do aço pela tensão, chega-se ao preço necessário para desenvolver a força em questão ou a tensão. O gráfico da FIG. 35 mostra que, na verdade, os aços de maiores tensões limitantes são os mais econômicos.

FIGURA 35 – Custo da tensão desenvolvida pela armadura.



Fonte: (CARVALHO, 2012, p. 26) (Modificado pelo autor)

No gráfico da FIG. 35, tem-se como exemplo que para uma tensão de 240 N/cm², o valor de cada N/cm² é de R\$ 0,44 e para uma tensão de 1900 N/cm², o valor de cada N/cm² é de R\$ 0,11, ou seja, quanto maior a tensão do concreto protendido, menor seu custo em cada unidade de tensão.

Existem outras vantagens da protensão, como a diminuição da fissuração, que não é encontrada em estruturas de concreto armado.

O concreto protendido apresenta custo mais baixo que estruturas similares, sendo que as principais vantagens que acabam contribuindo para isto são estruturas:

- mais leves quando comparadas às estruturas em concreto armado por possuir menos concreto em sua composição;
- com grande durabilidade, com pequenos custos de manutenção;
- com boa resistência ao fogo;
- adequada ao uso de pré-moldagens por permitir a execução de vãos maiores com maior resistência pra o armazenamento e transporte;
- que apresentam menores deformações que as estruturas similares por serem mais resistentes;
- que fazem parte de uma tecnologia bastante conhecida nos grandes centros do país, necessitando apenas ter uma equipe de montagem de cabos, unidade de protensão e execução de protensão para complementar os trabalhos das equipes de confecção de estruturas de concreto, que existem em todo o país.

As desvantagens dos sistemas em concreto protendido são as mesmas que existem nas estruturas de concreto armado, mas com intensidade menor:

- peso final relativamente alto quando comparado às estruturas metálicas e de madeira;
 - necessidade de escoramento e tempo de cura para peças moldadas no local;
 - condutibilidade alta de calor e de som;
 - dificuldade, em algumas situações, para execução de reformas;
 - necessidade de colocação de elementos específicos: bainhas, cabos etc.
- (CARVALHO, 2012).

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Inúmeras diferenças foram apontadas tanto quanto aos processos construtivos, quanto às várias aplicações do concreto protendido. O mesmo se mostra superior em diversos aspectos quando comparado a outros materiais, como manutenção mais simples e mais barata e redução da fissuração nas regiões tracionadas.

Uma análise entre a tensão suportada e o custo da estrutura deve sempre ser feita já que o mesmo se mostra mais econômico em diversas situações por suportar carregamentos superiores. O sentido econômico do concreto protendido consiste no fato de que os aumentos percentuais de preço são muito inferiores aos acréscimos de resistência utilizáveis, tanto para o concreto como para o aço de protensão.

O concreto protendido traz consigo inovações arquitetônicas, possibilitando a produção de projetos mais ousados antes impossíveis pelas limitações do concreto convencional. As vantagens da protensão são inúmeras e justificam seu emprego mundialmente para a execução de projetos arquitetônicos convencionais e arrojados de pequeno, médio e grande porte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**. Projeto e execução de obras de concreto armado: Projeto de obras. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7197**. Projeto de estruturas em concreto protendido. Rio de Janeiro, 1978.

BAUER, L. A. Falcão (Coord.). **Materiais de Construção**. Revisão técnica de João Fernando Dias. VOL 1. 5. ed. rev. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2008. 471 p.

BOTELHO, M. H. C.; MARCHETTI, O. **Concreto armado eu te amo**. Vol 1. 7. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 2013. 525 p.

CARVALHO, R. C. **Estruturas em concreto protendido**. São Paulo: Pini, 2012. 431 p.

HANAI, J. B. **Fundamentos do concreto protendido**. 2005. 110 p. Disponível em: <<http://www.set.eesc.usp.br>>. Acesso em: 20 nov. 2014.

PFEIL, Walter. **Concreto protendido**: Introdução. VOL 1. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1984. 200 p.

PFEIL, Walter. **Concreto protendido**: Processos Construtivos, Perdas de protensão. VOL 2. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1984. 200 p.

PFEIL, Walter. **Concreto protendido**: Dimensionamento à Flexão. VOL 3. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1984. 236 p.