

WALACE PEREIRA DE SOUSA JUNIOR

ANÁLISE DO EFEITO DA PROTENSÃO EM VIGAS DE CONCRETO

**Guaratinguetá
2016**

WALACE PEREIRA DE SOUSA JUNIOR

ANÁLISE DO EFEITO DA PROTENSÃO EM VIGAS DE CONCRETO

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para a obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Wanderley Terni

Guaratinguetá
2016

S725a Sousa Junior, Wallace Pereira de
Análise do efeito da protensão em vigas de concreto / Wallace Pereira de Sousa Junior – Guaratinguetá, 2016.
70 f. : il.
Bibliografia : f. 69-70

Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.
Orientador: Prof. Dr. Antonio Wanderley Terni

1. Vigas de concreto protendido 2. Cabos de aço 3. Concreto - Análise
I. Título

CDU 624.072

ANÁLISE DO EFEITO DA PROTENSÃO EM VIGAS DE CONCRETO

WALACE PEREIRA DE SOUSA JUNIOR

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO PARA A
OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
GRADUADO EM ENGENHARIA CIVIL

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Prof. Dr. Enos Arneiro Nogueira
Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Antonio Wanderley Terni

Orientador: DEC-FEG/UNESP



Prof. Aluizio de França

Membro: DEC-FEG/UNESP



Sr. Milton César Marques

Membro: DEC-FEG/UNESP

Campus da Faculdade de Engenharia da UNESP Guaratinguetá
Dezembro de 2016

DADOS CURRICULARES

WALACE PEREIRA DE SOUSA JUNIOR

NASCIMENTO: 05/07/1992 - Caraguatatuba, São Paulo.

FILIAÇÃO: Wallace Pereira de Sousa
Ariadne Dellome de Sousa

2010/2016 Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista

SOUSA JUNIOR, W. P. **Análise do efeito de protensão em vigas de concreto**. 2016. 70 páginas. Trabalho de Graduação (Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, Guaratinguetá, 2016.

RESUMO

Neste trabalho é abordado o conceito, as características importantes e a aplicabilidade da protensão no concreto visando testar vigas de protensão por meio de simulação através de ensaio de corpos de prova e observar o melhor posicionamento dos cabos. Ressaltam-se características comparativas com o concreto armado de modo a se criar um parâmetro para melhor abordagem dos conceitos intrínsecos ao concreto protendido e melhor compreensão do fenômeno. Desse modo, pode-se abarcar o modo como as solicitações ocorrem no concreto protendido, o que é uma peça chave para desenvolver métodos e técnicas que aprimorem o posicionamento dos cabos e barras que concedem ao concreto as características peculiares da protensão.

PALAVRAS CHAVE: Protensão. Tracker. Vigas. Concreto protendido. Posicionamento dos cabos.

SOUSA JUNIOR, W. P. **Prestressing analysis in concrete beams.** 2016. 70 pages. Graduate Work – Course in Civil Engineering, Universidade Estadual Paulista, “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, Guaratinguetá, 2016.

ABSTRACT

This work addressed the concept, important features and applicability of prestressed concrete in order to test prestressed beams through a simulation model and observe the best positioning of cables. They emphasize comparative characteristics with reinforced concrete to create a parameter to best approach the intrinsic concepts on prestressed concrete and better understanding of the phenomenon. Thus, one can grasp how the requests occur in prestressed concrete, which is a key to develop methods and techniques that improve the positioning of cables and bars which give the concrete the peculiar characteristics of prestressing.

KEYWORDS: Prestressing. Tracker. Beams. Prestressed Concrete. Positioning of cables.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aplicação de força horizontal	15
Figura 2 – Ponte protendida em balaços sucessivos	18
Figura 3 – Ponte “Cantilever” Firth Fort, São Lourenço	18
Figura 4 – Utilização de tirantes protendidos em estruturas de contenção de maciços terrosos ou rochosos. a) muro vertical com tirantes protendidos; b) tirantes protendidos com placas individuais de apoio; c) tirantes protendidos, ancorados no maciço de fundação, usados como ancoragem de uma barragem	21
Figura 5 – Cabos de protensão sendo distribuídos numa laje cogumelo	21
Figura 6 – Silo de estocagem construído em concreto protendidos	22
Figura 7 – Linha de produção de pré-moldados na Bélgica, onde as fábricas investem alto nos sistemas de fôrma, cura e protensão	22
Figura 8 – Seções típicas de pré-moldados em concreto protendido	23
Figura 9 – Edifício pré-moldado	23
Figura 10 – Passarela de pedestres em vigas pré-moldadas protendidas	23
Figura 11 – Resumo das possibilidades de combinação dos processos e tipos de protensão no estado de utilização	31
Figura 12 – Cordoalhas nuas para protensão	34
Figura 13 – Cordoalhas engraxadas e plastificada	35
Figura 14 – Fios de aço de alta resistência para protensão	35
Figura 15 – a) tirantes de aço; b) fios de aço; c) cordoalhas nuas de aço; d) cordoalhas engraxadas e plastificadas	35
Figura 16 – Viga de concreto protendido para análise de diagrama de tensões	39
Figura 17 – Diagrama de tensões normais da viga em estado de vazio	40
Figura 18 – Diagrama de tensões normais da viga em estado de serviço	40
Figura 19 – Diagrama de tensões normais da viga em estado de vazio com excentricidade da força de protensão aumentada	41
Figura 20 – Diagrama de tensões normais da viga em estado de serviço com excentricidade da força de protensão aumentada	41

Figura 21 – Esquema de tensão em viga.	47
Figura 22 – Dimensões da forma de madeira	48
Figura 23 – Material Supergraute utilizado para fazer a viga	49
Figura 24 – Graute sendo colocado nas formar de corpo de prova	50
Figura 25 – Corpos de prova de graute sendo testados na máquina universal de ensaios	50
Figura 26 – Corpo de prova após rompimento	51
Figura 27 – Betoneira utilizada no experimento	52
Figura 28 – Graute sendo colocado na forma de madeira	52
Figura 29 – Viga na forma antes de curar	52
Figura 30 – Viga sendo pintada com cal branco para pintura básica	53
Figura 31 – Viga sendo testada na máquina universal de ensaios	53
Figura 32 – Viga sendo testada na máquina universal de ensaios	54
Figura 33 – Medição da fissura pelo software Tracker	54
Figura 34 – Dimensões da forma de madeira	55
Figura 35 – Segunda viga antes de ser retirada da forma	55
Figura 36 – Presilhas utilizadas para ancoragem numa das extremidades da viga	56
Figura 37 – Sistema para protensão do cabo de aço	56
Figura 38 – Dispositivo de apoio para viga	56
Figura 39 – Viga sendo instalada na máquina de ensaio universal	57
Figura 40 – Viga antes do ensaio na máquina universal de ensaios	57
Figura 41 – Viga antes do ensaio na máquina universal de ensaios	57
Figura 42 – Indicação da intensidade da força em toneladas da máquina universal de ensaios em que houve um pausado ensaio para fotos	58
Figura 43 – Fissuração na parte oposta da viga à 0,97 tf	58
Figura 44 – Indicação da intensidade da força em toneladas da máquina universal de ensaios em que houve uma pausa do ensaio para fotos	59

Figura 45 – Fissurações do lado oposto da viga à 0,26 tf	59
Figura 46 – Fissurações do lado oposto da viga à 0,26 tf	59
Figura 47 – Fissurações do lado oposto da viga à 0,26 tf	60
Figura 48 – Fissurações do lado oposto da viga à 0,26 tf	60
Figura 49 – Fissurações do lado frontal da viga à 0,26 tf	60
Figura 50 – A viga protendida rompeu à uma intensidade de esforço de 0,47 tf	61
Figura 51 – Parte frontal da viga após rompimento	61
Figura 52 – Parte frontal da viga após rompimento	61
Figura 53 – Parte oposta da viga após rompimento	62
Figura 54 – Resultados obtidos pelo programa Tracker	63
Figura 55 – Resultados obtidos pelo programa Tracker	64
Figura 56 – Resultados obtidos pelo programa Tracker	65
Figura 57 – Resultados obtidos pelo programa Tracker	66
Figura 58 – A abertura da fissura medida foi de 0,5571 cm	66
Figura 59 – Altura da fissura, que foi de 0,8893 cm	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Aços utilizados para fabricação de fios de aço para protensão	33
Tabela 2 – Aços utilizados para fabricação de cordoalhas de aço para protensão	33
Tabela 3 – Cordoalhas engraxadas e plastificadas para protensão	34
Tabela 4 – Classes de agressividade ambiental (Tabela 6.1 da NBR 6118)	43
Tabela 5 – Classes de exposição das estruturas em função das condições ambientais	44
Tabela 6 – Resultados dos ensaios de compressão	51

LISTA DE SÍMBOLOS

CG	Centro de gravidade da viga
D	Altura da viga
L	Comprimento da viga
P	Tensão de protensão da viga
A_p	Seção transversal da armadura de protensão existente
A_s	Seção total (ativa e passiva) da armadura de protensão existente
f_{syk}	Resistência à tração.
g	Peso próprio da viga
K_p	Grau de protensão
$M_{g+q,máx}$	Momento fletor característico
M_0	Momento fletor de descompressão
q	Carga de peso acidental da viga

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	O CONCRETO PROTENDIDO	15
2.1	A PROTENSÃO	15
2.2	PROTENSÃO APLICADA AO CONCRETO	16
2.2.1	Efeitos da protensão no concreto	19
2.2.2	Vantagens do concreto protendido	19
2.2.3	Desvantagens do concreto protendido	20
2.2.4	Aplicações do concreto protendido	20
2.3	PROTENSÃO EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO	22
2.4	ALGUMAS DEFINIÇÕES IMPORTANTES	23
2.5	TIPOS DE PROTENSÃO	30
2.5.1	Protensão completa	30
2.5.2	Protensão limitada	31
2.5.3	Protensão parcial	32
2.6	AÇOS UTILIZADOS NA PROTENSÃO	32
2.7	FABRICAÇÃO	35
2.7.1	Montagem do sistema protendido	37
2.8	DIAGRAMAS DE TENSÃO COMO EFEITO DE PROTENSÃO	39
3	GRAU DE PROTENSÃO OU NÍVEL DE PROTENSÃO	42
4	FISSURAÇÃO EM CONCRETO PROTENDIDO	44
5	O SOFTWARE TRACKER PARA MEDIÇÕES A PARTIR DA AQUISIÇÃO VIA VÍDEO	46
6	O EXPERIMENTO	48
6.1	PRIMEIRO EXPERIMENTO	48
6.2	FORMA DE MADEIRA PARA CONFECÇÃO DE VIGA	48

6.3	O MATERIAL UTILIZADO NAS CONFECÇÕES DA VIGA	48
6.4	OS CORPOS DE PROVA DO CONCRETO DA VIGA	50
6.5	SEGUNDO EXPERIMENTO	54
7	ANÁLISE COM PROGRAMA <i>TRACKER</i>	63
7.1	VÍDEO 1	63
7.2	VÍDEO 2a	64
7.3	VÍDEO 2b	65
8	CONCLUSÕES	67
	REFERENCIAS	69

1. INTRODUÇÃO

Segundo o dicionário Aurélio, protensão é o processo pelo qual se aplicam tensões prévias ao concreto.

Porém, o conceito é bem mais amplo, sendo que alguns autores afirmam que protensão é um recurso que consiste em introduzir numa estrutura um estado prévio de tensões, sob diversas condições de carga, melhorando o comportamento estrutural do sistema. No caso de concreto protendido, cabos de aço nas estruturas introduzem um estado prévio de tensões no concreto de modo a reduzir ou anular completamente o efeito de tração na estrutura.

O conceito utilizado para criar o concreto protendido é uma ideia totalmente diferente do concreto armado, já que numa viga bi-apoiada em concreto armado, a armadura é definida pelo momento fletor máximo e posicionada ao longo da região de tração e logo após é concretada a estrutura. Já para o concreto protendido, serão colocados cabos de aço no interior da estrutura de modo a criar um estado prévio de tensões. A posição do cabo na estrutura é colocada conforme o diagrama de momento fletor.

O foco deste trabalho foi abordar o conceito e a aplicabilidade da protensão no concreto através de testes em vigas realizadas em laboratório. Duas vigas foram feitas com a utilização do material graute, com uma das vigas simulando o concreto armado e a outra viga simulando o concreto protendido. A viga que simulava o concreto armado não possuía cabos de aço em seu interior que a tensionavam, portanto não existia o efeito de protensão, enquanto a viga que simulava o concreto protendido possuía um cabo de aço de 6 mm de diâmetro sendo tensionado por um sistema de ancoragem, no interior de um dos seus orifícios, comprimindo desse modo a viga e reduzindo ou anulando as forças de tração que atuavam no sistema.

O ensaio das vigas foi filmado com uma câmera digital e as fotos e vídeos obtidos foram analisados em computador pelo software Tracker (Programa desenvolvido por Douglas Brown, professor da Cabrillo College situada na cidade de Santa Cruz, Califórnia, EUA, em parceria com a Source Physics), utilizado para construir gráficos que demonstram a movimentação de pontos escolhidos nos vídeos e para determinar comprimentos de objetos em fotos com o auxílio de medidas pré-determinadas utilizadas como referências para a análise. Desse modo, foi possível analisar a evolução das dimensões das fissuras nas duas vigas ao longo da variação de força da máquina universal de ensaios até o rompimento das vigas.

Com os resultados obtidos pelo software *Tracker* foi possível comparar qualitativamente o comportamento estrutural entre as duas vigas e discutir vantagens e desvantagens da utilização do concreto protendido em obras de construção civil, além de entender o modo como as solicitações ocorrem no concreto protendido, algo considerado fundamental para compreender o efeito de

protensão e desenvolver métodos que aprimorem o posicionamento dos cabos e barras que concedem ao concreto protendido as características únicas da protensão

2. CONCRETO PROTENDIDO

2.1 PROTENSÃO

A palavra protensão vem de pré-tensão (presstressing em inglês) e expressa a ideia da instalação de um estado prévio de tensões em alguma estrutura.

Na engenharia, a protensão é aplicada em peças estruturais e materiais de construção (HANAI, 2002, P.1).

Segundo Veríssimo e César (1998, p.6), o princípio da protensão pode ser ilustrado a partir de uma situação na qual uma pessoa pretende carregar um conjunto de livros na forma de uma fileira horizontal, conforme se pode observar na figura 1.

Figura 1 - Aplicação de força horizontal.



Fonte: (HANAI, 2005)

Para que os livros possam ser levantados sem que caiam, é necessária a aplicação de uma força horizontal que comprima uns contra os outros, produzindo-se forças de atrito capazes de superar o peso próprio do conjunto e forças verticais nas extremidades da fila para, afinal, levantá-las.

A aplicação de uma força normal pode ser definida como forma de protender um conjunto de elementos estruturais, no caso de uma fila de livros, como objetivo de se criar tensões prévias contrárias àquelas que podem inviabilizar ou prejudicar a operação ou o uso desejado.

A roda de uma carroça é também um exemplo de estrutura protendida.

Ao contrário do que se pode imaginar, não se trata de uma peça única, a roda é constituída de várias partes de madeira devidamente preparadas, montadas por encaixes.

Em torno da roda de madeira é colocado um aro de aço cuja função é, além de proteger as partes de madeira do desgaste, solidarizar o conjunto.

No momento da colocação, o aro de aço é aquecido, de forma que seu diâmetro original

aumenta devido à dilatação do material.

Depois de colocado, o aro se resfria, voltando à temperatura ambiente e seu diâmetro tende a diminuir até o valor inicial.

Não obstante, a roda de madeira se opõe ao movimento contrário de contração do aro e este, conseqüentemente, aplica esforços sobre ela, ou seja, protendendo-a.

Pode-se citar ainda o caso do barril composto por gomos de madeira apertados por cintas metálicas.

A compressão produzida pelas cintas se opõe às tensões causadas pela pressão interna do líquido dentro do barril.

Esses exemplos demonstram uma aplicabilidade importante da protensão, qual seja a potencialidade de promover a associação de partes de uma estrutura, como por exemplo, nas estruturas de concreto pré-moldado (VERÍSSIMO E CÉSAR, 1998).

Assim, fica claro que a protensão pode ser aplicada a muitos tipos de estruturas e materiais. Pfeil (1994) propõe a seguinte definição: *“Protensão é um artifício que consiste em introduzir numa estrutura um estado prévio de tensões capaz de melhorar sua resistência ou seu comportamento, sob diversas condições de carga”*. (WALTER PFEIL, VERÍSSIMO E CÉSAR, 1998, p.2).

2.2 PROTENSÃO APLICADA AO CONCRETO

Sabe-se que o concreto apresenta resistência à tração várias vezes inferior em relação à sua resistência à compressão.

Veríssimo e César (1998) afirmam que o desenvolvimento do concreto armado e protendido se deu a partir da criação do cimento Portland na Inglaterra em 1824.

Até que, em 1855, foi fundada a primeira fábrica de cimento Portland alemã e também o francês Lambot patenteou uma técnica de fabricação de embarcações em concreto armado.

Em 1867 o francês Monier iniciou a produção de tubos, lajes e pontes utilizando o concreto armado.

Em 1877 o americano Hyatt reconheceu o efeito entre a armadura e o concreto e após essa data começou-se a utilizar a armadura somente nas regiões onde o concreto está tracionado.

A primeira idéia de pré-tencionar o concreto se deu em 1886 pelo americano P. H. Jackson de São Francisco.

Também em 1886 o alemão Mathias Koenen desenvolveu um método de dimensionamento empírico para determinados tipos de construções em concreto armado, fundamentado em resultados de ensaios segundo o sistema Monier.

No fim do século XIX, foram registradas diversas patentes de métodos de protensão e

ensaios sem êxito, pois a protensão se perdia por conta da retração e fluência do concreto, especificamente desconhecidos na época.

Porém, foi no século XX que Mörsch desenvolveu a teoria iniciada por Koenen, associando suas propriedades com inúmeros ensaios.

Os conceitos constituídos por Mörsch constituíram, ao longo de décadas e em quase todo o mundo, os fundamentos da teoria do concreto armado e seus elementos ainda são válidos. Por volta de 1912, Koenen e Mörsch reconheceram que o efeito de uma protensão reduzida era perdido com o decorrer do tempo devido à deformação lenta do concreto.

Na Alemanha, em 1919, K. Wettstein fabricou painéis de concreto protendidos com cordas de aço para piano (cordas com alta resistência).

Em 1923 o americano R. H. Dill reconheceu que era necessário utilizar fios de alta resistência sob elevadas tensões para superar as perdas de protensão.

Em 1924, já na França, Eugene Freyssinet já havia aplicado a protensão para reduzir o alongamento de tirantes em galpões de grandes vãos, sendo que, em 1928, apresentou o primeiro trabalho consistente sobre concreto protendido, percebendo a importância da armadura nas construções civis.

Foi um dos maiores estudiosos no desenvolvimento do concreto protendido, pois pesquisou as perdas de protensão produzidas pela retração e deformação lenta do concreto, admitindo-se que só é possível assegurar um efeito duradouro da protensão através de elevadas tensões no aço. Inventou e patenteou métodos construtivos, equipamentos, aços especiais, concretos especiais, etc.

Assim, começaram a surgir em diversos países comissões, comitês, institutos, para concreto armado, envolvendo representantes dos serviços públicos, da indústria da construção civil e das entidades científicas.

Contribuíram muito tanto para a evolução do concreto armado quanto para o concreto protendido através de pesquisas e do desenvolvimento de novas formas de construção.

A partir da segunda metade do século XX, o desenvolvimento do concreto protendido sofreu uma aceleração, sendo que em 1950 foi realizada em Paris a primeira conferência sobre o concreto protendido, culminando na formação da FIP (Federation Internationale de la Precontrainte).

Nesse mesmo ano, Finster Walder executou a primeira ponte em balanços sucessivos cujo método é exemplificado na figura 2.

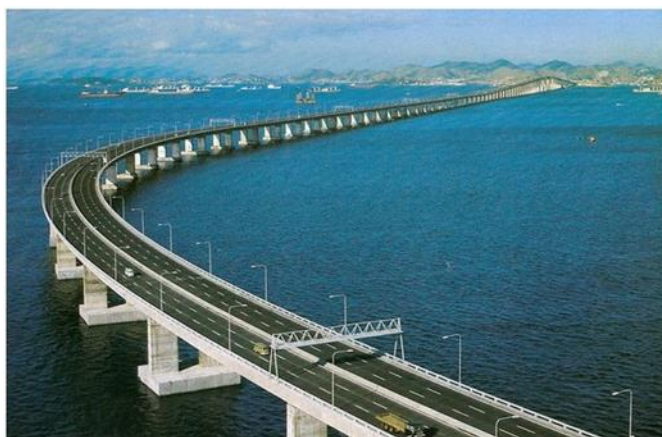
Figura 2 - Ponte protendida em balços sucessivos.



Fonte: (VERÍSSIMO E CÉSAR, 1998).

Este método se espalhou pelo mundo e, nessa mesma época, surgiram as cordoalhas de fios. O sistema que propõe colocar os cabos de protensão em bainhas, no interior da seção transversal do concreto endurecido, estabelecendo-se, mais tarde a aderência por meio de injeção de uma argamassa adequada de cimento, se impôs definitivamente. Esse sistema formou a base para a execução de estruturas protendidas de grandes vãos.

Figura 3 - Ponte “Cantilever” Firth Fort, São Lourenço



Fonte: (SANTOS ET AL, 2013)

No Brasil, a primeira obra de concreto protendido foi a da Ponte do Galeão, no Rio de Janeiro, em 1948 utilizando o sistema Freyssinet com todos os componentes importados da França.

A empresa pioneira na fabricação do aço para protensão no Brasil foi a Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira, em 1952. Na ponte de Juazeiro foi utilizado este aço na construção da segunda ponte brasileira com concreto protendido.

Em 1953 foi publicada a norma alemã a DIN 4227 que trata sobre concreto protendido. A partir de 1956 conseguiu-se um aumento da capacidade das unidades de protensão e a

racionalização dos métodos construtivos, principalmente na construção de pontes.

A partir dos anos 70 ficou consagrada a preferência por cabos protendidos internos, constituídos por cordoalhas ancoradas individualmente por meio de cunhas. Este sistema tornou-se mais competitivo por permitir a construção de cabos de grande capacidade, com protensão em torno de 200 tf a 600 tf.

Em 1978 o *Comité Euro-Internacional du Béton (CEB/FIP)* publicou o *Código para Estruturas de Concreto Armado e Concreto Protendido*. Muitas entidades de normalização em vários países usam o código modelo da CEB como base para elaboração de suas normas técnicas.

2.2.1 Efeitos da protensão no concreto

A resistência à tração do concreto está situada na ordem de 10% de sua resistência à compressão, sendo muito baixa em relação a de compressão. Devido a isso, a resistência à tração é desprezada nos cálculos.

O aço é um material com boa resistência tanto a tração quanto a compressão. A associação dos dois materiais permite que o concreto resista aos esforços de compressão enquanto o aço resista aos de tração, como é o caso do concreto armado.

Contudo, no concreto armado convencional, a parte tracionada da seção não trabalha, havendo assim, um desperdício de material. Pode-se, então, utilizar o aço para comprimir o concreto, de tal modo que ele não seja tracionado ou tenha uma tração pequena, quando atuarem as cargas externas.

A protensão introduz (na estrutura) esforços prévios que reduzem ou anulam as tensões de tração no concreto sob ação das solicitações empregadas.

Desse modo, a importância da fissuração como condição determinante de dimensionamento da estrutura diminui. Para tanto, são utilizados cabos de aço de alta resistência, tracionados e ancorados no próprio concreto. A faixa de trabalho do concreto é deslocada para o domínio das compressões, onde o material tem maior eficiência.

Com a protensão, aplicam-se tensões de compressão na seção pelas solicitações dos carregamentos, ou seja, manipulam-se as tensões internas de modo a se obter a contribuição da área total da estrutura pela inércia da mesma (VERÍSSIMO E CÉSAR, 1998).

2.2.2 As vantagens do concreto protendido

➤ No caso de peças fletidas, permite que toda a seção trabalhe sob compressão, portanto, um rendimento da capacidade resistente da seção muito maior do que nas peças de

concreto armado;

- Alta resistência à fadiga devido ao decréscimo ou até mesmo a total eliminação das inversões de sinal nas tensões devidas às cargas variáveis;
- Maior liberdade arquitetônica em edificações;
- Ao evitar o surgimento das fissuras, ocorre também maior proteção contra a corrosão;
- Mesmo no caso de uma solicitação acima da prevista em projeto, dentro do certo limite, ao cessar as cargas as fissuras se fecham sob ação da protensão;
- Permite controlar as deformações elásticas para valores inferiores aos obtidos para estruturas em aço ou em concreto armado.

2.2.3 As desvantagens do concreto protendido

- Por apresentar maior resistência, exige maior controle de execução, com equipamento e pessoal especializados;
- Exigem cuidados especiais na proteção contra a corrosão;
- A colocação dos cabos de protensão deve obedecer às posições determinadas nos cálculos, já que pequenos desvios ocasionam esforços não previstos no projeto, levando ao comportamento inadequado da estrutura e até mesmo ao colapso;
- De maneira geral, as estruturas construídas em concreto protendido exigem maior controle e atenção quando comparadas com aquelas construídas com concreto armado comum.

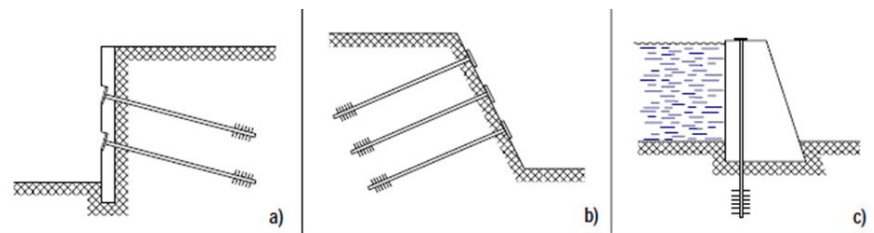
2.2.4 Aplicações do concreto protendido

As aplicações do concreto protendido são extraordinariamente vastas como em estruturas de grande porte (plataformas de exploração de petróleo, invólucros de proteção de centrais atômicas, torres de concreto e pontes estaiadas).

Também se utiliza tirantes de ancoragem protendidos em obras de terra como cortinas atirantadas, estruturas de contenção e barragens.

Outras aplicações são pisos e lajes de edifícios, sendo exemplos clássicos nas construções que exigem grandes vãos livres, como as lajes cogumelo, estruturas cilíndricas, como silos e reservatórios.

Figura 4 - Utilização de tirantes protendidos em estruturas de contenção de maciços terrosos ou rochosos. a) muro vertical com tirantes protendidos; b) tirantes protendidos com placas individuais de apoio; c) tirantes protendidos, ancorados no maciço de uma barragem.



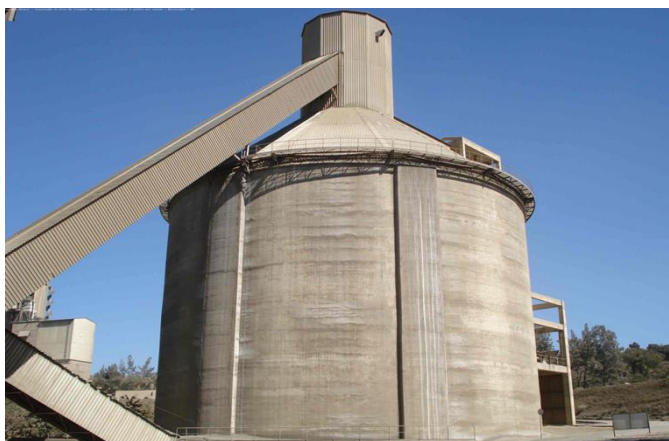
Fonte: (VERÍSSIMO E CÉSAR, 1998)

Figura 5 - Cabos de protensão sendo distribuídos numa laje cogumelo.



Fonte: (GAUSS ENGENHARIA, 2016)

Figura 6 - Silo de estocagem construído em concreto protendidos.



Fonte: (MM PROJETOS & CONSULTORIA, 2016)

2.3 PROTENSÃO EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO

A utilização de peças pré-moldadas é bastante usual pelo fato do concreto protendido alcançar maiores vãos e conferir uma maior rigidez, sendo bastante útil para estruturas onde são exigidos esforços elevados de flexão, como as estruturas pré-moldadas. Seu uso ainda torna possível uma redução de tempo significativa, que ajuda no orçamento final na obra.

A protensão com aderência inicial possui ampla aplicação na produção de elementos pré-fabricados em pistas de protensão. São utilizados fios de aço estirados ao ar livre com o auxílio de macacos hidráulicos apoiados em blocos na cabeceira da pista.

As peças são concretadas e após o ganho de resistência do concreto, com os fios liberados de modo que fiquem diretamente em contato com o concreto, há a aderência somente por atrito.

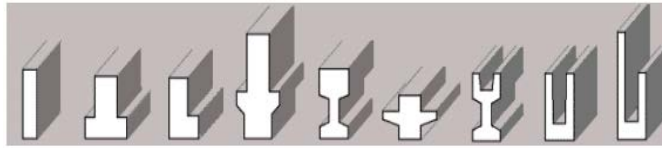
As figuras 7, 8, 9 e 10 a seguir ilustram a utilização da protensão em concreto pré-moldado.

Figura 7 - Linha de produção de pré-moldados na Bélgica, as fábricas investem alto nos sistemas de fôrma, cura e protensão.



Fonte: (TÉCHNE, 2016)

Figura 8 – Seções típicas de pré-moldados em concreto protendido



Fonte: (VERÍSSIMO E CÉSAR, 1998)

Figura 9 - Edifício pré-moldado



Fonte: (ZAP IMOVEIS, 2016)

Figura 10 - Passarela de pedestres em vigas pré-moldadas protendidas



Fonte: (VERÍSSIMO E CÉSAR, 1998)

2.4 ALGUMAS DEFINIÇÕES IMPORTANTES

As definições a seguir foram adaptadas do *Manual para Boa Execução de Estruturas Protendidas Usando Cordoalhas de Aço Engraxadas e Plastificadas* (CAUDURO, 2000).

➤ *Aço de fretagem:*

Aço de reforço usado para controlar as forças de tração que se distribuem em todas as direções e são desenvolvidas no concreto atrás das ancoragens devido à compressão provocada pelo cabo;

➤ *Aço para protensão:*

Aço de alta resistência que é usado para protender o concreto, usualmente uma cordoalha formada por sete fios. É o elemento do cabo que é alongado e ancorado para promover a necessária força de protensão. É esticado e fixado por ancoragens. Ao tentar voltar ao comprimento inicial, comprime o concreto através das ancoragens;

➤ *Ancoragem:*

É o conjunto de peças mecânicas, incluindo todos os componentes requeridos para fixar o aço para protensão que transmite permanentemente a força de protensão ao concreto;

➤ *Ancoragem Ativa:*

É a ancoragem da extremidade ativa do cabo que é usada para tensionar e fixar o aço para protensão (a cordoalha);

➤ *Ancoragem passiva:*

É a ancoragem da ponta final do cabo, normalmente colocada e fixada numa das extremidades do cabo antes deste chegar ao local da obra.

Não é usada para aplicar a protensão ao cabo;

➤ *Atrito devido às oscilações inevitáveis:*

É o atrito causado por desvios horizontais e verticais não intencionais do cabo;

➤ *Bainha plástica:*

É o material de cobertura formando um revestimento no qual o aço de protensão (a cordoalha) fica contido para evitar a aderência durante a colocação do concreto, para promover proteção contra a corrosão e conter o envolvimento de graxa inibidora de corrosão.

É feita de polietileno de alta densidade que é extrudado diretamente sobre a cordoalha envolvida em graxa;

➤ *Barras de aço complementares:*

É o aço de reforço (vergalhão) usado para controlar a distribuição das forças de tração no concreto resultantes da concentração das ancoragens desenvolvidas pelos cabos tracionados;

➤ *Cabo aderente:*

É o cabo com um espaço anelar entre a cordoalha de protensão e umas bainhas geralmente metálicas, injetadas com pasta de cimento e água que depois de tracionado promove a aderência do cabo à seção de concreto que o envolve;

➤ *Cabo monocordoalha:*

São os cabos cujas ancoragens admitem o alojamento de uma só cordoalha;

➤ *Cabo não aderente:*

É o cabo no qual o aço de protensão (a cordoalha) é impedido de aderir ao concreto e fica livre para se mover em relação ao mesmo.

Assim, a força de protensão é permanentemente transferida para o concreto pelas ancoragens;

➤ *Cabos distribuídos (regularmente distribuídos):*

São os cabos simples ou em grupos, uniformemente distribuídos, normalmente perpendiculares aos cabos em faixa (vigas, paredes, etc.) e espaçados no máximo oito vezes a espessura da laje;

➤ *Cabos em faixa:*

São grupos de cabos proximamente espaçados colocados juntos em uma faixa estreita, normalmente ao longo da linha de pilares.

Essa faixa simula vigas na espessura da laje;

➤ *Cordoalha:*

São arames de aço de alta resistência enrolados entre si ou ao redor de um fio central.

Em cabos não aderentes, a cordoalha de sete fios é usada quase que exclusivamente;

➤ *Cunbas:*

São peças de metal tronco-cônico com dentes que mordem o aço de protensão (a cordoalha) durante a transferência da força de protensão do macaco hidráulico para a ancoragem;

➤ *Deformação lenta:*

É a deformação dependente do tempo (encurtamento) do concreto sob tensão constante;

➤ *Desenhos de instalação:*

São os desenhos detalhados fornecidos pela firma de protensão ou projetistas, contendo as informações como o número, o diâmetro, o comprimento, a marcação, a localização, o alongamento e o perfil de cada cabo a ser colocado;

➤ *Desprotensão:*

Desprotensão é a liberação da força de protensão do cabo;

➤ *Encurtamento elástico:*

É o encurtamento da peça de concreto que ocorre imediatamente após a aplicação da força de protensão;

➤ *Equipamento de tensionamento:*

Consiste normalmente de macaco, bomba hidráulica de alta pressão, mangueiras e manômetro de pressão;

➤ *Estouro:*

É o colapso (rompimento) do concreto durante ou após a protensão que pode ocorrer devido a diversas causas.

Pode ser considerado similarmente como a uma explosão;

➤ *Espaçador contínuo:*

É o dispositivo contínuo usado para suportar os vergalhões e os cabos na parte inferior das lajes e promover seu cobrimento adequado;

➤ *Extremidade ativa:*

É a ponta do cabo na qual a força de protensão é aplicada;

➤ *Forma para nicho:*

É a peça plástica de utilidade temporária usada na extremidade ativa durante o lançamento de concreto para moldar uma abertura (o nicho) no mesmo, que permita ao equipamento de protensão acessar a cavidade da placa de ancoragem;

➤ *Macaco:*

É o dispositivo mecânico (normalmente hidráulico) usado para aplicar força no cabo de protensão;

➤ *Mandíbula do macaco:*

São as cunhas usadas no macaco para segurar a cordoalha durante a operação de protensão;

➤ *Monocordoalha:*

É o cabo cuja ancoragem consegue alojar-se numa única cordoalha;

➤ *Nariz do macaco:*

É a parte frontal do macaco que se encaixa no nicho de tração para alinhar o macaco com a ancoragem;

➤ *Película de concreto:*

É a pasta cimentícia misturada com agregados finos que pode se depositar no furo tronco-cônico da placa de ancoragem;

➤ *Perdas por acomodação da cunha:*

É o movimento de retorno das cunhas (geralmente entre 5 mm e 7 mm) dentro da cavidade da placa durante a transferência da força de protensão do macaco para a ancoragem, resultando em perda da força de protensão;

➤ *Perdas por atrito:*

É a perda de tensão (força) em um cabo de protensão resultante do atrito criado entre a cordoalha e a bainha, devida às oscilações inevitáveis durante a protensão;

➤ *Porta-cunhas:*

É uma peça de metal externamente cilíndrica e com furo tronco-cônico interno que aloja as cunhas, normalmente usada com uma placa para transferir a força de protensão ao concreto;

➤ *Placas das mandíbulas do macaco:*

São placas de aço projetadas para manter no lugar as mandíbulas do macaco durante a operação de protensão;

➤ *Placa de apoio:*

É uma placa de metal que se apoia diretamente no concreto e é à parte do conjunto de ancoragem;

➤ *Placa de ancoragem:*

É a placa utilizada para cabos monocordoalha, peça normalmente de ferro fundido dúctil, que aloja as cunhas e é usada para transferir a força de protensão para o concreto. O furo tronco-cônico da placa de ancoragem para alojamento da cunha tem a superfície regular, porém, rugosa;

➤ *Pós-tração:*

É o método de protensão no qual os cabos são tensionados depois que o concreto está endurecido e com resistência suficiente;

➤ *Protensão inicial:*

É a força atuante no cabo imediatamente após a transferência da força de protensão para o concreto. Isso ocorre depois que as cunhas foram assentadas na placa de ancoragem pelo recuo da cordoalha após a retirada do macaco;

➤ *Protensão parcial:*

É a protensão do concreto em níveis de tensão tais que as tensões de tração possam existir sob as cargas de serviço projetadas;

➤ *Protender:*

É colocar o material, basicamente o concreto, em um estado de compressão, anteriormente à aplicação das cargas;

➤ *Protensão efetiva:*

É a força de protensão num ponto específico de uma peça de concreto depois que todas as perdas ocorreram;

➤ *Revestimento de graxa:*

É o material de revestimento para inibir a corrosão de acordo com critério de performance do Instituto da Pós-Tração (EUA), conforme descrito nas suas especificações para *Cabos Monocordoalhadados Não Aderentes*;

➤ *Sistema encapsulado:*

É um sistema constituído de conexões à prova d'água nas ancoragens ativa, intermediárias e passivas, que tem a cavidade ao lado da cunha, posteriormente coberta por uma tampa impermeável cheia de um material inibidor de corrosão;

➤ *Tracionamento em etapas:*

É o tracionamento sequencial dos cabos em passos ou estágios separados ao invés de tensionar todos os cabos durante a mesma operação de protensão;

➤ *Zona de ancoragem:*

É a região de concreto adjacente à ancoragem sujeita às tensões resultantes da força de protensão;

➤ *Armadura de protensão:*

É a armadura de protensão constituída por fios ou barras, feixes (barras ou fios paralelos) ou cordões (fios enrolados) e se destina à produção das forças de protensão.

Denomina-se cabo a unidade da armadura de protensão considerada no projeto. A armadura de protensão também é designada por armadura ativa (VERÍSSIMO E CÉSAR, 1998);

➤ *Armadura passiva:*

É aquela que engloba toda armadura que não produz forças de protensão;

➤ *Concreto protendido com aderência inicial:*

No caso do *concreto protendido com aderência inicial*, o estiramento da armadura de protensão utiliza apoios independentes da peça, antes do lançamento do concreto, sendo que a ligação da armadura de protensão com os apoios é quebrada após o endurecimento do concreto. Quanto à ancoragem, só é feita por aderência;

➤ *Concreto protendido com aderência posterior:*

Também chamado de *armadura de protensão pós-tracionada*, o estiramento é realizado após o endurecimento do concreto, empregando como apoios partes da própria peça e, por fim, criando aderência permanente com o concreto;

➤ *Concreto protendido sem aderência:*

É semelhante ao caso anterior, porém, após o estiramento da armadura, não é criada aderência com o concreto;

➤ *Protensão sem aderência:*

Na *protensão sem aderência* há a inexistência de aderência e refere-se somente à armadura ativa já que a passiva deve estar sempre aderida ao concreto.

A armadura ativa é, com frequência, colocada dentro de dutos de metal ou de plástico.

Após a protensão, injeta-se graxa nesses dutos para proteger a armadura da corrosão;

➤ *Protensão com aderência inicial:*

Na *protensão com aderência inicial* a peça é concretada envolvendo-se uma armadura previamente tracionada e ancorada em dispositivos externos.

É a aderência que transfere a força de protensão ao concreto;

➤ *Protensão com aderência posterior:*

A *protensão com aderência posterior* é aplicada sobre o concreto já endurecido e somente depois é processada a aderência, usualmente por meio de injeção de calda de cimento no interior das bainhas.

2.5 TIPOS DE PROTENSÃO

Os tipos de protensão estão relacionados aos *estados limites de utilização* referentes à fissuração. A protensão se divide entre *completa*, *limitada* ou *parcial*.

2.5.1 Protensão completa

Ao consultar a NBR 7197, item 4.1.1, verifica-se a ocorrência de protensão completa (também chamada de protensão total) quando:

➤ Para as combinações frequentes de ações, é respeitado o estado limite de descompressão, ou seja, para situações em que há atuação da carga permanente e das sobrecargas frequentes, não são admitidas tensões de tração no concreto;

➤ Quando previstas em projeto, para combinações raras de ações, é respeitado o *estado limite de formação de fissuras*.

Esse tipo de protensão permite as melhores condições de proteção das armaduras contra corrosão e limita flutuações de tensões no aço a valores moderados.

Assim, esta forma de protensão é recomendada para elementos estruturais presentes em ambientes muito agressivos.

Sua única limitação é que quando comparada com os outros tipos de protensão possui custos mais elevados.

2.5.2 Protensão limitada

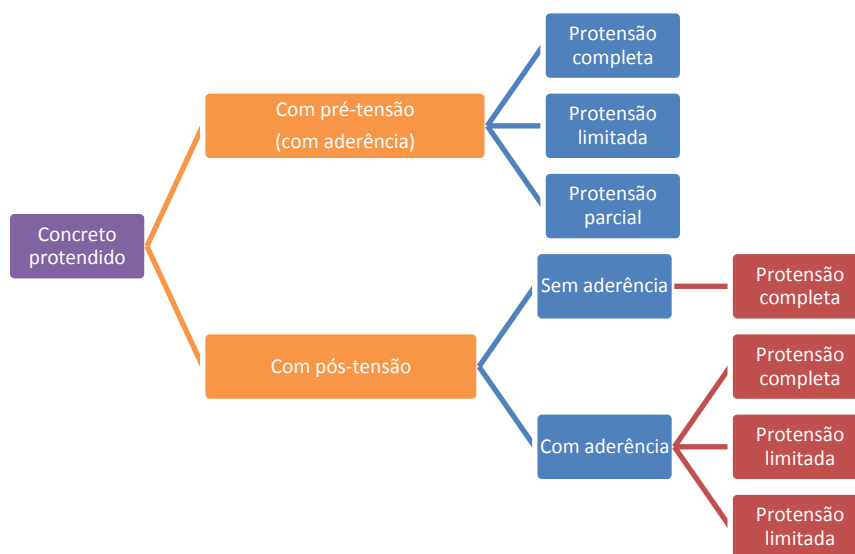
Consultando a NBR 7197, item 4.1.2, a protensão limitada ocorre quando:

- Para combinações quase permanentes de ações previstas em projeto, é respeitado o *estado limite de descompressão*;
- Para combinações frequentes de ações previstas em projeto, é respeitado o *estado limite de formação de fissuras*.

Elementos estruturais com esse tipo de protensão são dimensionados para tensões moderadas de tração em serviço, quando a probabilidade de fissurações é muito pequena.

Ao passar por uma sobrecarga que resulte na ocorrência de algumas fissuras, após a retirada da carga, há o fechamento dessas fissuras por conta da compressão sob efeito de cargas quase permanentes.

Figura 11 - Resumo das possibilidades de combinação dos processos e tipos de protensão no estado de utilização.



Fonte: Autor

2.5.3 Protensão parcial

A NBR 7197, item 4.1.3, afirma que existe protensão parcial nos seguintes casos:

- Para combinações permanentes de ações previstas em projeto, é respeitado o estado limite de descompressão;
- Para combinações frequentes de ações previstas em projeto, é respeitado o estado limite de formação de fissuras;
- Esse caso é semelhante à protensão limitada, entretanto, permite que tensões de tração atinjam valores mais elevados.

2.6 AÇOS UTILIZADOS NA PROTENSÃO

Os aços utilizados para alcançar a protensão do concreto apresentam elevada resistência mecânica e pela ausência de patamar de escoamentos. Assim, acabam se tornando um pouco mais econômicos em relação aos aços empregados na construção com concreto armado, com resistência mecânica até três vezes maior.

Esses aços de alta resistência podem ser fornecidos em diversas formas, como na forma de fios e cordoalhas, o que evita problemas relacionados com a emenda da armadura em estruturas com grandes vãos, também sendo encontrado na forma de barras de aço-liga de alta resistência.

Os aços de alta resistência utilizados no concreto protendido não são indicados para o concreto armado, já que os alongamentos excessivos produziriam grandes fissuras. Dessa forma, a ABNT apresenta duas especificações que regulamentam as características e propriedades dos aços de protensão, quais sejam, a NBR 7482 para fios de aço e a NBR 7483 para cordoalhas de aço.

A fabricação nacional de aço para protensão teve início em 1952, pela Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira. Inicialmente, com fios de 5 mm de diâmetro e, a partir de 1960, as cordoalhas com dois, três e sete fios, que foram substituindo os fios isolados de 5 mm e 8 mm de diâmetro.

Na verdade, a utilização dos fios tem diminuído gradativamente, pois as cordoalhas são mais econômicas.

Tabela 1 - Aços utilizados para fabricação de fios de aço para protensão.

Especificações para os produtos - fios para protensão							
Produto	Diâmetro aprox. (mm ²)	Área aprox. (mm ²)	Área mínima (mm ²)	Massa aproximada (kg/1000 m)	Carga mínima de ruptura (kN)	Carga mínima a 1% de deformação (kN)	Alongamento após ruptura (%)
Fio CP (baixa relaxação)							
CP 145 RB	9	63,6	62,9	500,0	91,2	82,1	6,0
CP 150 RB	8	50,3	49,6	395,0	74,5	67,0	6,0
CP 170 RB	7	38,5	37,9	302,0	64,5	58,0	5,0
CP 175 RB	6	28,3	27,8	222,0	48,7	43,8	5,0
CP 175 RB	5	19,6	19,2	154,0	33,7	30,3	5,0
CP 175 RB	4	12,6	12,3	99,0	21,4	19,3	5,0
CP 190 RB*	6	28,3	27,8	222,0	52,0	46,8	5,0
CP 190 RB*	7	38,5	37,9	302,0	72,0	65,0	5,0
Fio CP (relaxação normal)							
CP 170 RN	7	38,5	37,9	302	64,5	54,8	5,0
CP 175 RN	6	28,3	27,8	222	48,7	41,4	5,0
CP 175 RN	5	19,6	19,2	154	33,7	28,6	5,0
CP 175 RN	4	12,6	12,3	99	21,4	18,2	5,0

* Os fios podem ser fabricados sob consulta
fabricados lisos ou entalhados

1 - Todos os fios especificados acima podem ser
2 - A profundidade do entalhe pode ser especificada pelo cliente

Fonte: (ARCELOR MITTAL, 2016)

Tabela 2 - Aços utilizados para fabricação de cordoalhas de aço para protensão.

Especificações para os produtos - cordoalhas para protensão							
Produto	Diâmetro nominal (mm ²)	Área aprox. (mm ²)	Área mínima (mm ²)	Massa aproximada (kg/1000 m)	Carga mínima de ruptura (kN)	Carga mínima a 1% de deformação (kN)	Alongamento após ruptura (%)
Cordoalhas de 3 fios CP 190							
Cord. CP 190 RB 3 X 3,0	6,5	22,0	22,0	171,0	41,0	37,0	3,5
Cord. CP 190 RB 3 X 3,5	7,6	30,0	30,0	238,0	57,0	51,0	
Cord. CP 190 RB 3 X 4,0	8,8	38,0	38,0	304,0	71,0	64,0	
Cord. CP 190 RB 3 X 4,5	9,6	47,0	46,0	366,0	88,0	79,0	
Cord. CP 190 RB 3 X 5,0	11,1	67,0	66,0	520,0	125,0	112,0	
Cordoalhas de 7 fios CP 190							
Cord. CP 190 RB 9,5	9,5	56,0	441,0	441,0	104,0	94,0	3,5
Cord. CP 190 RB 12,7	12,7	101,0	792,0	792,0	187,0	169,0	
Cord. CP 190 RB 15,2	15,2	143,0	1126,0	1126,0	266,0	239,0	
Cord. CP 190 RB 15,7	15,7	150,0	1172,0	1172,0	279,0	246,0	
Cordoalhas de 7 fios CP 210							
Cord. CP 210 12,7	12,7	101	792	792	203	183,0	3,5
Cord. CP 210 15,2	15,2	143	1126	1126	288	259,0	

Fonte: (ARCELOR MITTAL, 2016)

Quanto à corrosão, seu controle nos aços de protensão é um fator de extrema importância e merecedor de enorme atenção já que, como o diâmetro dos fios é pequeno, um grau de corrosão considerado inofensivo em aços de concreto armado pode ser crítico em aços de protensão pois as depressões causadas pela corrosão funcionam como moedas, fazendo surgir perigosos picos de tensão em aços tensionados.

Os fenômenos mais temerários são a *corrosão intercrystalina sob tensão (stress corrosion)* e a *fragilidade sob a ação do hidrogênio (ou corrosão catódica sob tensão)* por serem mais perigosos que a *corrosão ordinária*.

Ocorrem devido à existência simultânea de umidade, tensões de tração e substâncias como cloretos, nitratos, sulfetos, sulfatos e alguns ácidos.

Como resultado desses fenômenos originam-se fissuras iniciais de pequena abertura que, com o passar do tempo, podem conduzir a uma fratura frágil.

Portanto, os aços de protensão necessitam ser protegidos contra a corrosão em todas as etapas, desde a fabricação, durante o transporte, até sua aplicação na obra, sendo armazenados e instalados em locais cobertos, aquecidos, secos e arejados para não serem sensibilizados pela água de condensação.

Também deve-se evitar o contato dos fios com o solo e, durante a montagem, as bainhas devem ser impermeabilizadas.

Uma alternativa é utilizar cordoalhas engraxadas e plastificadas.

Tabela 3 - Cordoalhas engraxadas e plastificadas para protensão

Especificação dos produtos - Cordoalhas para protensão engraxadas e plastificadas							
Produto	Diâmetro nominal (mm)	Área aprox. (mm ²)	Área mínima (mm ²)	Massa aproximada (kg/1000 m)	Carga mínima de ruptura (kN)	Carga mínima a 1% de deformação (kN)	Alongamento após ruptura (%)
Cordoalhas de 7 fios CP 190, cor azul							
Cord. CP 190 RB 12,7	12,7	101,0	99,0	792,0	187,0	169,0	3,5
Cord. CP 190 RB 15,2	15,2	143,0	140,0	1126,0	265,0	239,0	
Cord. CP 190 RB 15,7	15,7	150,0	147,0	1172,0	279,0	246,0	
Cordoalhas de 7 fios CP 210, cor laranja							
Cord. CP 210 RB 12,7	12,7	101,0	99,0	792,0	203,0	183,0	3,5
Cord. CP 210 RB 15,2	15,2	143,0	140,0	1126,0	288,0	259,0	
Cord. CP 210 RB 15,7	15,7	150,0	147,0	1172,0	308,0	277,0	

Fonte: (ARCELOR MITTAL, 2016)

Figura 12 - Cordoalhas nuas para protensão.



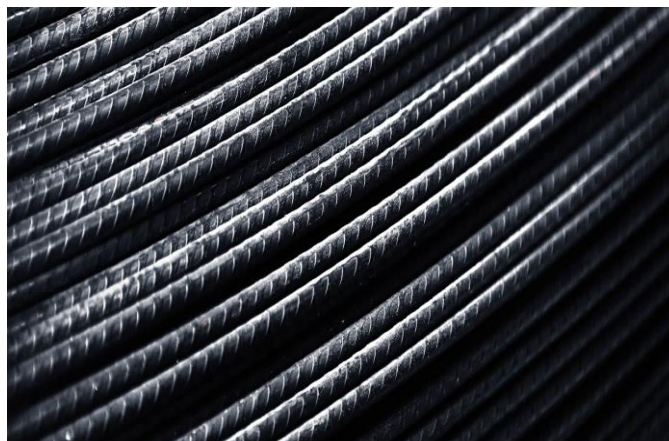
Fonte: (ARCELOR MITTAL, 2016)

Figura 13 - Cordoalhas engraxadas e plastificadas.



Fonte: (ARCELOR MITTAL, 2016)

Figura 14 - Fios de aço de alta resistência para protensão.



Fonte: (AWA COMERCIAL, 2016)

Figura 15 - a) tirantes de aço; b) fios de aço; c) cordoalhas nuas de aço; d) cordoalhas engraxadas e plastificadas.



Fonte: (AWA COMERCIAL, 2016)

2.7 FABRICAÇÃO

De maneira geral, o emprego da protensão requer a utilização de técnicas mais sofisticadas do que no caso de concreto armado (não protendido). Desse modo, o controle da qualidade necessita ser mais eficiente e, por consequência disso, o concreto utilizado também deve apresentar qualidade elevada.

Para melhor ilustrar as diferenças de qualidade, comparam-se as resistências características à compressão simples dos concretos protendido e armado.

Enquanto este apresenta valores compreendidos entre 20 MPa e 30 MPa, aquele possui valores entre 30 MPa e 40 MPa. Tais características diferenciadas se devem a três fatores:

- Forças de protensão podem promover solicitações prévias significativamente elevadas, em muitos casos superiores às encontradas em serviço;
- O emprego de materiais de alta qualidade permite redução dimensional das peças, o que também minimiza a massa de material utilizado;
- Os concretos de alta resistência apresentam maior resistência à fluência do concreto, o que reduz o efeito de perda de protensão.

Portanto, é importante que o concreto tenha melhores características mecânicas e de durabilidade para cumprir com as exigências e quesitos de desempenho impostos às estruturas de concreto protendido.

Para tanto, é necessário relacionar os tipos mais adequados de cimento, agregados (atentando com rigor para suas origens mineralógicas e granulometria bem analisada), aditivos e água, sempre obedecendo as proporções corretas para não prejudicar a integridade das armaduras.

Os cimentos mais empregados são o Portland (o mais comum) e também cimentos especiais, como o pozolânico. Também são utilizados os cimentos de alto forno e, até mesmo, o branco. A aplicação do tipo de concreto varia com a situação enfrentada.

Por exemplo, os concretos ARI, de alta resistência inicial, diminuem o tempo de desforma de uma peça, já os concretos CAR, de alta resistência, possuem resistência superior a 50 MPa e podem ser aplicados em estruturas complexas nas quais as solicitações são elevadas.

Em certas situações, agregados mais leves permitem reduzir ainda mais o peso próprio dos elementos pré-moldados.

Por exemplo, a argila expandida é mais leve e tem menor rigidez quando comparada ao basalto e ao granito, resultando em um concreto com menor módulo de deformação.

Um aspecto também muito importante é a *cura* do concreto que deve ser cuidadosa, de modo a garantir que a peça final tenha as propriedades exigidas. A *cura térmica* é largamente utilizada em elementos pré-moldados.

Pode-se, assim, manter um ritmo de produção diária de lotes por meio da reutilização das fôrmas e demais elementos de fabricação a cada ciclo completo.

A fonte de calor mais comum no Brasil é o vapor a pressão atmosférica, sendo que este modo de cura permite obter resistências mecânicas elevadas com poucas horas de processamento.

Como exemplo, pode-se considerar o cimento ARI que, em condições normais de temperatura e pressão, levaria até 28 dias para conclusão da cura.

Porém, com a aplicação de calor esse tempo cai para apenas 12 horas.

A cura a vapor é realizada em três etapas:

- Elevação da temperatura a uma taxa da ordem de 25°C/hora até alcançar a temperatura ideal (geralmente 75°C);
- Manutenção da temperatura ideal por um período de tempo de aproximadamente doze horas;
- Diminuição da temperatura de modo gradativo.

2.7.1 Montagem do sistema protendido

A montagem do sistema protendido é realizada na obra e requer cuidado de todos os envolvidos, obedecendo às seguintes etapas:

- Verificação dos materiais entregues;
- Manuseio e armazenamento adequados;
- Garantia da segurança dos trabalhadores no local;
- Montagem dos cabos;
- Montagem de todo o aço de reforço;
- Inspeção da montagem antes da concretagem, o que é realizado pelo engenheiro de projeto, de modo a garantir que tudo esteja de acordo com o estipulado no projeto;
- Supervisão das operações de lançamento do concreto.

A seguir são discutidas as etapas mais relevantes que basicamente são a *montagem* e a *inspeção*.

➤ *Montagem:*

Durante a montagem é recomendado que os instaladores tenham experiência e tenham certificado de mão de obra especializada.

Também é interessante que a mesma equipe realize a montagem e, se for o caso, a protensão de toda a obra.

Os encarregados pela montagem devem se atentar ao projeto de montagem antes de iniciar qualquer operação.

Desvios verticais da posição dos cabos podem têm tolerância de:

- Até mais ou menos 5 mm em concreto com espessura até 200 mm;
- Até mais ou menos 10 mm em concreto com espessura entre 200 mm e 600 mm;
- Até mais ou menos 15 mm em concreto com espessura acima de 600 mm. A posição horizontal dos cabos não é crítica.

No entanto, é necessário evitar oscilações excessivas (curvatura não intencional) nos cabos.

Pontos altos e baixos são as posições mais cruciais, entretanto, curvas suaves podem ser mantidas entre estas posições.

A inspeção no pré-lançamento do concreto é de extrema importância e deve ser realizada pelo engenheiro responsável, por seu representante, por um laboratório habilitado ou um montador certificado.

A análise cuidadosa engloba inúmeros fatores, como:

- Verificação dos registros e certificados de ensaios do aço de protensão;
- Uniformidade e possíveis defeitos nas placas de ancoragem;
- Defeitos na superfície e proteção dos cabos;
- Espessura da bainha plástica;

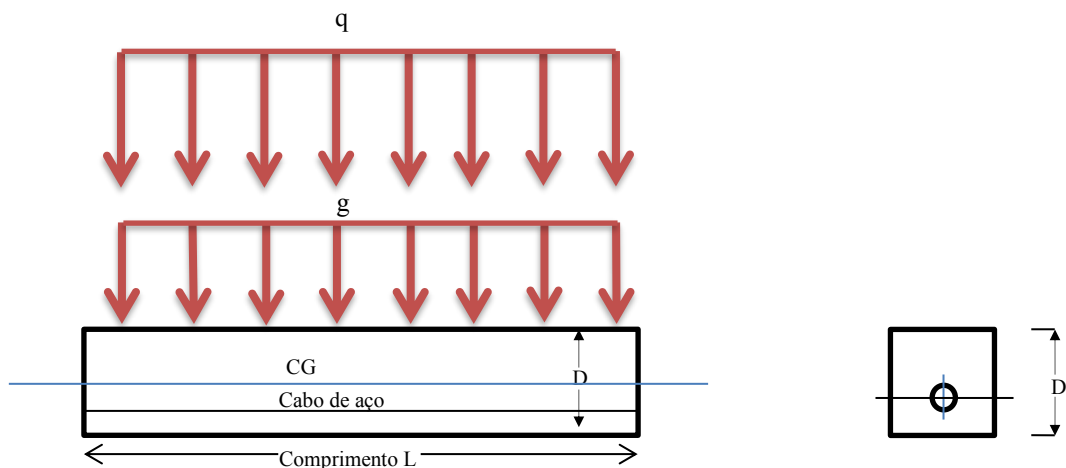
- Verificação da presença de corrosão na extremidade ativa (exceto corrosão superficial);
- Se houver danos na bainha ela deve ser reparada;
- O perfil dos cabos deve estar posicionado de acordo com o projeto;
- Revisão do método de lançamento do concreto no que toca a seu efeito sobre a estabilidade dos cabos durante a concretagem.

2.8 DIAGRAMAS DE TENSÃO COMO EFEITO DE PROTENSÃO

Considera-se a seguinte situação da viga simplesmente apoiada como exemplo para se ilustrar os diagramas de tensão em protensão:

- Atuação de uma carga de peso acidental q ;
- Atuação de peso próprio g ;
- Força de protensão P com intensidade e excentricidade constante ao longo do vão.

Figura 16 – Viga de concreto protendida para análise de diagrama de tensões



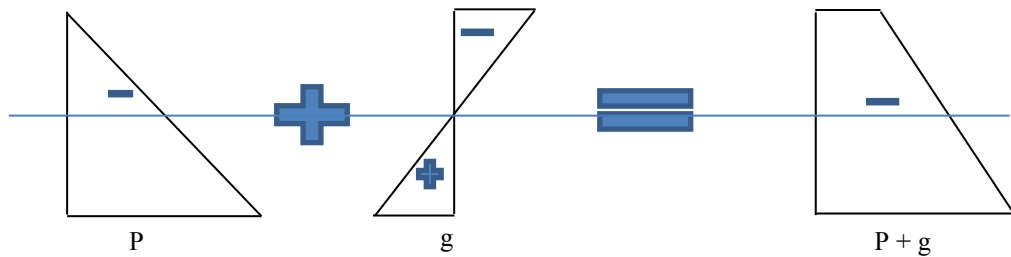
Fonte: Imagem criada pelo próprio autor

Considerando a força de protensão como uma força de caráter permanente, temos duas combinações de ações:

➤ Estado em vazio:

Caso em que a estrutura não está comportando cargas variáveis, ou seja, comporta somente o peso próprio e a protensão.

Figura 17 – Diagrama de tensões normais da viga em estado de vazio

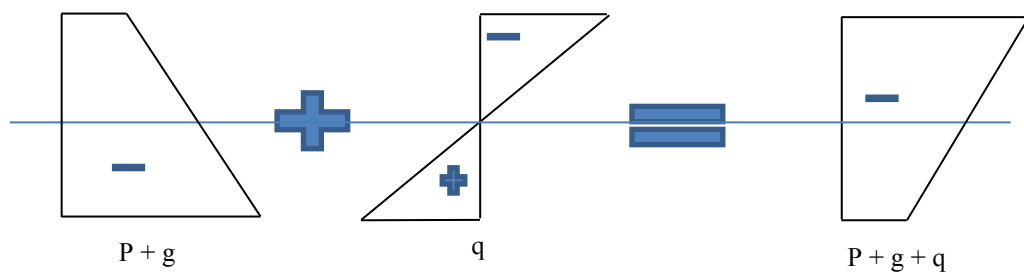


Fonte: Imagem criada pelo próprio autor

➤ Estado em serviço:

Caso em que a estrutura comporta também cargas variáveis.

Figura 18 – Diagrama de tensões normais da viga em estado de serviço



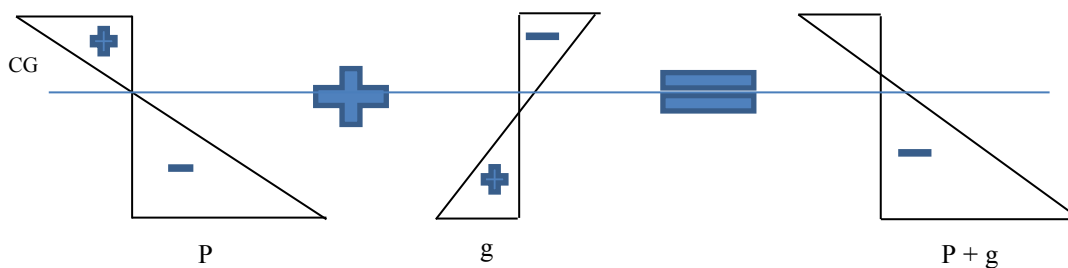
Fonte: Imagem criada pelo próprio autor

Em ambas as combinações não ocorrem tensões de tração. No estado em vazio, as tensões de compressão são até maiores do que as tensões no estado em serviço, ou seja, o acréscimo de cargas não piora a situação.

A excentricidade da força de protensão era tal que seu ponto de aplicação coincidia com a extremidade inferior do núcleo central da seção. Se a excentricidade dessa força for aumentada, teremos tensões de tração na borda superior. Porém, essas tensões de tração não representam nenhum problema, uma vez que o peso próprio atua simultaneamente.

- Estado em vazio:

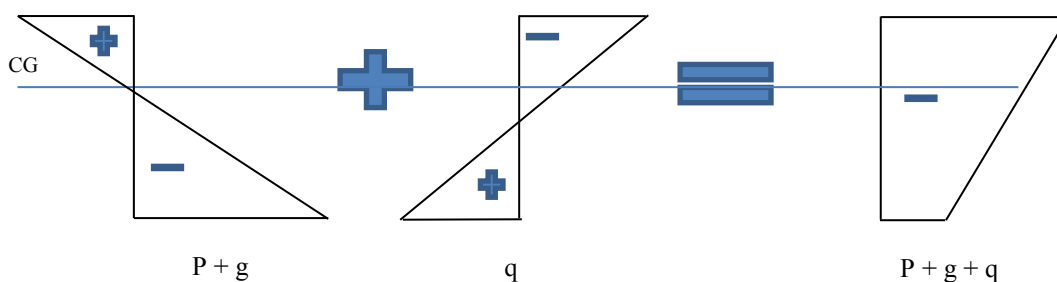
Figura 19 – Diagrama de tensões normais da viga em estado de vazio com excentricidade da força de protensão aumentada



Fonte: Imagem criada pelo próprio autor

- Estado em serviço:

Figura 20 – Diagrama de tensões normais da viga em estado de serviço com excentricidade da força de protensão aumentada



Fonte: Imagem criada pelo próprio autor

No estado em serviço existem somente tensões de compressão, iguais os valores obtidos na situação anterior. A carga acidental está muito maior, o que prova que um simples deslocamento de força normal pode melhorar a capacidade portante da viga.

Torna-se possível observar novamente que o acréscimo de cargas acarreta na redução de esforços, pois no estado vazio a seção transversal está mais solicitada do que no estado em serviço.

3 GRAU DE PROTENSÃO OU NÍVEL DE PROTENSÃO

Nos casos em que as forças de protensão devem ser empregadas visando impedir ou limitar a fissuração nas condições de utilizações, então é necessário determinar seus valores de intensidade e a disposição da armadura ativa observando os estados limites de utilização.

O grau de protensão está relacionado aos critérios de projeto empregados para determinação dos efeitos a serem introduzidos pela protensão num certo tipo de estrutura para que, desse modo, ela atenda aos requisitos estabelecidos.

É importante considerar também as exigências de durabilidade à fissuração e à proteção da armadura.

Por exemplo, de acordo com Leonhardt, para o caso de peças fletidas, o grau de protensão é definido como a relação entre o momento fletor de descompressão e o momento fletor característico máximo na estrutura, encontrado pela fórmula a seguir:

$$K_p = \frac{M_0}{M_{g+q,m\acute{a}x}}$$

É com o momento de descompressão que se atinge o estado limite de descompressão, ou seja, anula-se a tensão normal em algum ponto da seção transversal pré-solicitada pela força de protensão.

Sendo assim, avalia-se a situação de uma determinada peça quanto ao surgimento ou não de tensões normais de tração na seção transversal de concreto quando solicitada pelo momento fletor máximo.

Uma outra definição para o grau de protensão, dada por Thurlimann e citada na obra de Leonhardt baseia-se na relação entre a seção transversal da armadura de protensão existente e a seção total (ativa e passiva), cada uma multiplicada por sua respectiva resistência à tração, representada pela fórmula a seguir:

$$K_p = \frac{A_p f_{pyk}}{A_p f_{pyk} + A_s f_{syk}}$$

Segundo Leonhardt, é um erro pensar que a protensão total leva a um melhor comportamento estrutural quando comparada a uma protensão parcial ou limitada, pois existem vários fatores que devem ser considerados e que podem recomendar o uso de protensão limitada ou parcial. Dentre esses fatores pode-se citar:

- a) Em peças sob cargas com preponderância de cargas variáveis a protensão total

conduz a situações críticas, ou seja, as solicitações poderão ser demasiadamente elevadas, podem ocorrer fissuras na região sob tração dos esforços de protensão e até mesmo a diminuição da altura útil da peça. Portanto, para esse caso em específico é mais recomendável uma protensão menor;

b) Um grau de protensão elevado também pode prejudicar a estrutura por meio da indução de armadura passiva em quantidades muito pequenas quando surgirem esforços de tração e fissuras por diferenças de temperatura ou recalques de apoio;

c) O menor grau de protensão também é mais econômico, como foi relatado por Leonhardt ao mostrar o trabalho de Bachmann, de modo que existe uma composição ótima, com graus de protensão entre 0,5 e 0,6.

De acordo com pesquisas sobre danos em estruturas de concreto protendido realizadas nos últimos 20 anos a limitação da protensão conduz a comportamentos mais favoráveis.

A protensão total é necessária em casos nos quais as fissuras devem ser impedidas a todo custo, como em barras tracionadas ou em paredes de reservatório

Tabela 4 – Classes de agressividade ambiental (Tabela 6.1 da NBR 6118)

Classe de agressividade ambiental (CAA)	Agressividade	Classificação geral para o tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana ^{1 2}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹ Industrial ^{1 2}	Grande
IV	Muito forte	Industrial ^{1 3} Respingos de maré	Elevado

¹ Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

² Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

³ Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: (GIUGLIANI, 2007)

4 FISSURAÇÃO EM CONCRETO PROTENDIDO

Já faz muito tempo que o controle da abertura de fissuras em peças de concreto armado e protendido tem sido considerado um meio bastante eficaz para prevenção da ação corrosiva da armadura.

Até pouco tempo atrás era consenso que fissuras de pequena abertura impediam a penetração de agentes agressivos e o consequente processo de corrosão do aço da armadura.

Atualmente existem diversas linhas de pensamento, porém, independentemente desse fato, algumas características são comuns, como as classes de exposição das estruturas em função das condições ambientais, como ilustra a tabela 5.

Tabela 5 – Classes de exposição em função do meio ambiente.

Classes de exposição	Condições ambientais
1) Ambiente seco	- Interior de edifícios normais
2) Ambiente úmido	- Interior de edifícios com alta umidade - Peças externas - Peças em contato com o solo ou águas não agressivas
3) Ambiente úmido sujeito a congelamento	
4) Ambiente marinho	- Peças total ou parcialmente imersas na água do mar ou na zona de borrifamento - Peças em atmosfera marinha saturada (maresia)
As categorias a seguir ocorrem isoladamente ou em combinação com as acima	
5) Ambiente quimicamente agressivo	A - Agressividade química leve - Atmosfera industrial agressiva B - Agressividade química moderada C - Agressividade química severa

Fonte: (GIUGLIANI, 2007)

Também é importante comentar sobre a classificação das deformações que ocorrem no concreto, que são divididas em dois tipos principais, quais sejam, as que *dependem do carregamento* e as que *independem do carregamento*.

As deformações que dependem do carregamento têm direção definida, como por exemplo, a *deformação elástica instantânea* que é reversível e ocorre por ocasião da aplicação de carga, a *deformação elástica retardada* que ocorre com o passar do tempo enquanto houver carregamento sendo aplicado e a *fluência* que é definida como aumento de deformação sob tensão constante, ou seja, uma deformação plástica.

Já as deformações que independem do carregamento não têm direção definida, sendo comumente chamadas de *variação de volume*.

Ocorre *retração* quando uma peça de concreto que está em contato com o ar livre perde parte da água quimicamente dissociada durante a secagem.

Outro fator que provoca esse fenômeno é a *variação de temperatura*.

Independentemente do tipo de deformação, são esses fenômenos que comumente provocam fissuras no concreto.

5 O SOFTWARE TRACKER PARA MEDIÇÕES A PARTIR DA AQUISIÇÃO VIA VÍDEO

Atualmente há uma larga utilização de câmeras e dispositivos portáteis para gravação e aquisição de imagens disponíveis para as mais diversas finalidades.

Mais além, também há softwares para vídeo análises que possuem diversas aplicações, desde o ensino de ramos da física em escolas e faculdades, como mecânica, eletromagnetismo, óptica, até para visualização e análise em engenharia.

Dentre os softwares disponíveis neste contexto, ganha destaque o *software Tracker* que foi desenvolvido por Douglas Brown, professor da *Cabrillo College* situada na cidade de Santa Cruz, Califórnia, EUA, em parceria com a *Source Physics*.

É um software aberto de análise de imagem e vídeo, que utiliza bibliotecas em linguagem Java.

Assim, o *Tracker* pode ser executado em qualquer sistema operacional, já que depende apenas de uma máquina virtual Java instalada.

Também identifica automaticamente a quantidade de quadros por segundo empregados no vídeo analisado, o que permite a utilização de câmeras digitais diversas, das mais simples num telefone celular, até as mais profissionais.

Para compreender o funcionamento do programa, primeiramente deve-se entender a formação de um vídeo como uma sequência de frames (quadros).

Televisões usuais apresentam vídeos numa taxa de 60 fps (frames por segundo), enquanto que aparelhos modernos chegam a desenvolver 120 fps e uma câmera especial (as chamadas supercâmeras) chegam a produzir filmes a 10000 fps (UFRGS, 2016).

A vídeo análise se vale dessa estrutura de frames para examinar os vídeos.

De maneira simplificada, o software primeiramente apresenta um frame por vez, sendo que em cada um deles, é possível destacar os aspectos importantes do fenômeno, como, por exemplo, a posição de um determinado objeto.

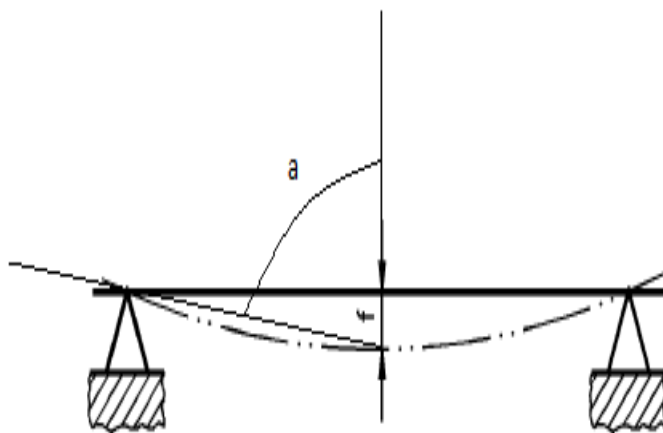
Então, o programa constrói gráficos com as variáveis escolhidas pelo usuário.

Dentro das aplicações, na engenharia civil é possível medir a flecha por meio do programa *Tracker* quando uma viga é solicitada.

A partir da determinação de um referencial é possível mensurar frame a frame o deslocamento desse referencial e determinar o valor dessa movimentação com boa precisão, além da possibilidade de analisar e manipular os dados de forma simples e rápida.

O *Tracker* também pode ser utilizado para medição de fissuras em vigas.

Figura 21 – Esquema de tensão em viga



Fonte: Imagem criada pelo próprio autor

6 O EXPERIMENTO

No laboratório de estruturas do departamento de engenharia civil da Universidade Estadual Paulista do campus de Guaratinguetá, com o auxílio do técnico Flávio Augusto Bernardes da Silva, construiu-se duas vigas, uma com características para protensão, simulando concreto protendido, e outro sem características de protensão, simulando concreto armado, de forma a comparar seus comportamentos estruturais.

6.1 PRIMEIRO EXPERIMENTO

A viga concebida como corpo de prova para o experimento possuía as dimensões de 200 cm X 10 cm X 10 cm, simulando concreto armado sem atuação de protensão no sistema.

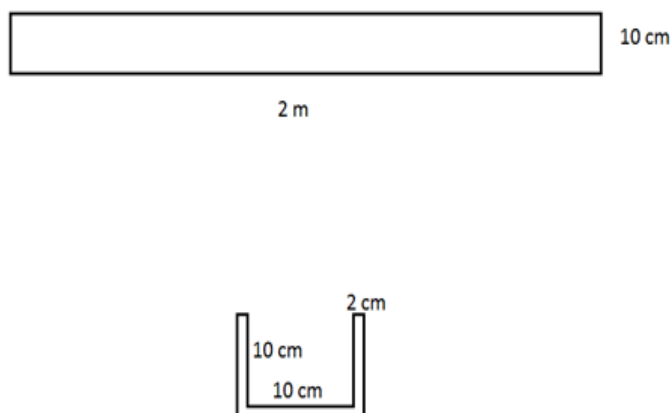
6.2 FORMA DE MADEIRA PARA CONFECÇÃO DAS VIGAS

A forma de madeira para a montagem das vigas é apresentada com as dimensões da figura 15.

Foi utilizada uma forma feita de madeira do tipo de cedrinho (cedrinho), com fixação das paredes laterais feita com parafusos do tipo Chipboard cabeça chata 4,0 x 35, sendo usados doze parafusos em cada lado da forma para fixar as paredes de madeira, totalizando 24 parafusos.

Houve poucas dificuldades na concepção da forma de madeira, já que o serviço de montagem foi encomendado por um profissional marceneiro.

Figura 22 – Dimensões da forma de madeira



Fonte: Autor

6.3 O MATERIAL UTILIZADO NAS CONFECÇÕES DAS VIGAS

Depois de confeccionada a forma de madeira em uma marcenaria, deu-se início a uma pesquisa para optar pelo melhor material para simular o concreto na viga.

O material escolhido foi o *graute* que é considerado um tipo de argamassa composta por areia, quartzo, cimento, água e aditivos que proporciona uma elevada resistência mecânica.

O *graute* é considerado como um material auto-adensável que permite preencher os vazios e juntas de alvenaria em uma estrutura. Também possui como característica o bom rendimento para recuperação de estruturas e reparo de pisos.

Pode-se encontrá-lo facilmente no mercado em grandes ou pequenos volumes, sendo necessária somente a aplicação de água e mistura antes de sua aplicação.

Figura 23 - Material Supergraute utilizado para fazer a viga.



Fonte: Autor

O *supergraute* tem as seguintes características:

➤ *Caracterização do produto:*

Composição: cimento, agregados minerais, aditivos especiais e fluidificante;

➤ *Densidade aparente:*

1,6 g/cm³;

➤ *Densidade fresca:*

2,1 g/cm³;

➤ *Aplicação:*

O *supergraute quartzolit* deve ser lançado no prazo máximo de 30 minutos. Após esse prazo, em temperatura ambiente de 25°C, sua fluidez decresce.

Em caso de temperatura maior, diminua o prazo de aplicação do *supergraute* quartzolit. O endurecimento do *supergraute* quartzolit tem início entre 1 hora e 30 minutos e 2 horas pós a sua mistura com água.

6.4 CORPOS DE PROVA DO CONCRETO DA VIGA

Antes de moldar as vigas, foram confeccionados três corpos de prova com o material *graute* de modo a avaliar sua resistência. Os três corpos foram confeccionados e testados no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual Paulista do campus de Guaratinguetá.

Figura 24 - Graute sendo colocado nas formas de corpo de prova



Fonte: Autor

Os três corpos de prova ficaram em repouso por uma semana antes de serem ensaiados na máquina universal de ensaios com o auxiliar acadêmico Flávio Augusto Bernardes da Silva.

Figura 25 - Corpos de prova de graute sendo testados na máquina universal de ensaios



Fonte: Autor

Figura 26 - Corpo de prova após rompimento.



Fonte: Autor

Os três corpos foram testados no dia dois de dezembro de 2015 até o rompimento e apresentaram as seguintes resistências conforme vê-se na tabela

Tabela 6 - Resultados dos ensaios de compressão

RESULTADOS DAS TENSÕES DE RUPTURA DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO		
Corpo de prova	Carga de ruptura (kgf)	Tensão de ruptura (MPa)
CDP 1	39000	49,59
CDP 2	41500	52,84
CDP 3	39000	49,59

Fonte: Autor

A área dos corpos de prova é de 78,54 cm². A média aritmética dos resultados da resistência dos corpos de prova é de 50,67 MPa. Isso deixa claro que o material estava adequado para o experimento da viga pois os valores de resistência do material, de acordo com dados fornecidos na embalagem do mesmo, chegam a aproximadamente 50 MPa em 28 dias. Esses valores também condizem com os valores considerados adequados pela classe de resistência do concreto, previstas na NBR 8953.

O material graute foi misturado com água em uma betoneira e foram necessários dois sacos de 25 kg para se conseguir material suficiente para confeccionar a viga. Essa viga não possuía cabos de aço e, portanto, não ocorreu protensão durante o seu ensaio.

Antes de a viga ser moldada na forma, foi utilizado óleo hidráulico como desmoldante, para impedir a aderência da viga na forma de madeira. O óleo foi espalhado no interior da forma de madeira com um pincel momentos antes de se colocar o graute na forma

Figura 27 - Betoneira utilizada no experimento.



Fonte: Autor

Figura 28 - Graute sendo colocado na forma de madeira.



Fonte: Autor

Depois de colocado na forma, respeitou-se o tempo de cura de 3 dias do material .

Figura 29 - Viga na forma antes de curar



Fonte: Autor

O desmonte da primeira viga foi realizado no dia quatorze de dezembro de 2015. No mesmo dia a viga foi pintada com cal para estabelecer um fundo branco como fundo de modo a ser possível a melhor observar a forma da fissuração em detalhes no momento do desenvolvimento do ensaio.

Figura 30 - Viga sendo pintada com cal branca para pintura básica.



Fonte: Autor

Após a pintura da viga, esperou-se um dia para que a cal de pintura secasse totalmente. A primeira viga fosse testada na máquina universal de ensaios do laboratório no dia três de maio de 2015.

Figura 31 - Viga sendo testada na máquina universal de ensaios.



Fonte: Autor

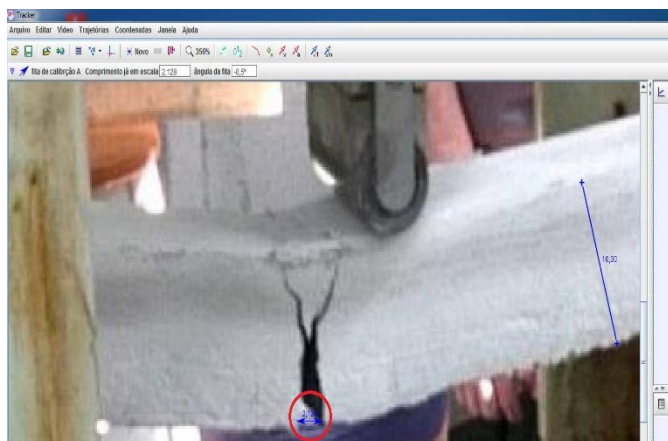
A máquina universal de ensaios, utilizada nos dois experimentos, possui capacidade de carga máxima de 100 toneladas/força, pesando 3500 Kg. A máquina pertence ao laboratório de estruturas do departamento de engenharia civil da Universidade Estadual Paulista, no campus de Guaratinguetá, onde os experimentos foram realizados. Ela é comumente utilizada para ensaios de tração, compressão, dobramento e flexão. Seu manuseio foi auxiliado em todo momento pelo técnico do laboratório Flávio Augusto Bernardes da Silva.

Figura 32 - Viga sendo testada na máquina universal de ensaios.



Fonte: Autor

Figura 33 - Medição da fissura pelo software *Tracker*.



Fonte: Autor

A viga suportou 0,37 tf antes de romper e o ensaio ser interrompido. A unidade “tf”, tonelada-força, é a que se obtém diretamente da leitura na máquina universal de ensaio.

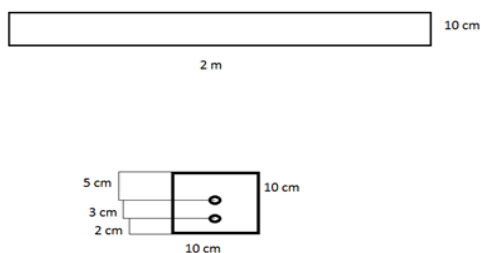
Essa viga não possuía cabos de aço e, portanto, não ocorreu protensão durante o seu ensaio.

A fissura obteve abertura máximo de 2,13 cm e que para este valor entende-se já como uma trinca. A medida dessa fissura foi calculada através do software Tracker, como indicado na figura 33.

6.5 SEGUNDO EXPERIMENTO

Foi elaborada uma segunda viga de *graute*, dessa vez com um cabo de aço de 6 mm de diâmetro do tipo CP 175 RN no seu interior para simular protensão.

Figura 34 – Dimensões da forma de madeira



Fonte: Imagem tirada pelo próprio autor

Para o segundo experimento, utilizou-se a mesma forma de madeira, o mesmo material utilizado anteriormente na viga do experimento 1 e o mesmo procedimento para criação da viga.

Figura 35 - Segunda viga antes de ser retirada da forma.



Fonte: Autor

Dois sacos de graute foram utilizados para criar a viga, misturados com água na betoneira. Depois de curada a viga foi pintada com cal e preparada para o teste. Dessa vez a viga foi confeccionada com dois orifícios, porém somente o de baixo foi utilizado para colocar o cabo de aço e simular protensão.

Nesse segundo experimento introduziu-se um cabo de aço de diâmetro de 6 mm no orifício inferior que representa a bainha e ancorado com presilhas numa extremidade para representar o cabo de protensão. Desse modo, durante o ensaio, o cabo foi tensionado e propiciou ação de protensão no teste da viga.

Utilizou-se uma câmera digital para filmar o ensaio da viga protendida e avaliar sua fissuração através da aplicação do programa *Tracker*.

Figura 36 - Presilhas utilizadas para ancoragem numa das extremidades da viga



Fonte: Autor

Figura 37 - Sistema para protensão do cabo de aço



Fonte: Autor

No ensaio dessa viga utilizou-se uma base metálica que serviu como apoio

Figura 38 - Dispositivo de apoio para viga.



Fonte: Autor

Figura 39 - Viga sendo instalada na máquina de ensaio universal.



Fonte: Autor

Figura 40 - Viga antes do ensaio na máquina universal de ensaios.



Fonte: Autor

Figura 41 - Viga antes do ensaio na máquina universal de ensaios.



Fonte: Autor

O ensaio da segunda viga foi realizado no dia oito de agosto de 2016 e teve início com uma câmera digital posicionada em frente à viga de modo a filmar a evolução das fissuras. A viga foi ensaiada até registrar 0,09 tf onde houve uma primeira pausa para fotos.

Figura 42 - Indicação da intensidade da força em toneladas da máquina universal de ensaios em que houve uma pausa do ensaio para fotos.



Fonte: Autor

Figura 43 - Fissuração na parte oposta da viga à 0,09 tf.



Fonte: Autor

A viga foi ensaiada até 0,26 tf na qual houve uma segunda pausa para tirar fotos das fissuras já existentes.

Figura 44 - Indicação da intensidade da força em toneladas da máquina universal de ensaios em que houve uma pausa do ensaio para fotos.



Fonte: Autor

Figura 45 - Fissurações do lado oposto da viga à 0,26 tf.



Fonte: Autor

Figura 46 - Fissurações do lado frontal da viga à 0,26 tf.



Fonte: Autor

Figura 47 - Fissurações do lado oposto da viga à 0,26 tf.



Fonte: Autor

Figura 48 - Fissurações do lado oposto da viga à 0,26 tf.



Fonte: Autor

Figura 49 - Fissurações do lado frontal da viga à 0,26 tf.



Fonte: Autor

Após a pausa, a máquina universal de ensaios foi novamente acionada e assim permaneceu até a ruptura da viga.

Figura 50 - A viga protendida rompeu à uma intensidade de esforço de 0,47 tf.



Fonte: Autor

Figura 51 - Parte frontal da viga após rompimento.



Fonte: Autor

Figura 52 - Parte frontal da viga após rompimento.



Fonte: Autor

Figura 53 - Parte oposta da viga após rompimento.



Fonte: Autor

A primeira viga resistiu 0,37 tf até romper, com uma intensidade muito menor que a segunda viga, que pelo fato de ocorrer protensão, resistiu até 0,47 tf até romper.

7 ANÁLISE COM O PROGRAMA TRACKER

7.1 VÍDEO 1

A primeira análise do vídeo ocorreu em um intervalo 40,04 segundos e iniciou no momento em que houve o surgimento da primeira fissura aparente na viga, que ocorreu após 240 segundos do início do vídeo, a aproximadamente 0,09 tf de força indicada na máquina de ensaios.

O eixo de medição aplicado ao programa foi colocado na base da viga e a marcação à caneta foi considerada com comprimento de 1 cm, para comparações do programa (Figura 54). Pontos da extremidade esquerda da fissura foram selecionados e, de acordo com o programa, moveram-se 0,101 cm, conforme ilustra a figura 54. Pontos da extremidade direita da fissura se locomoveram 0,0231 cm.

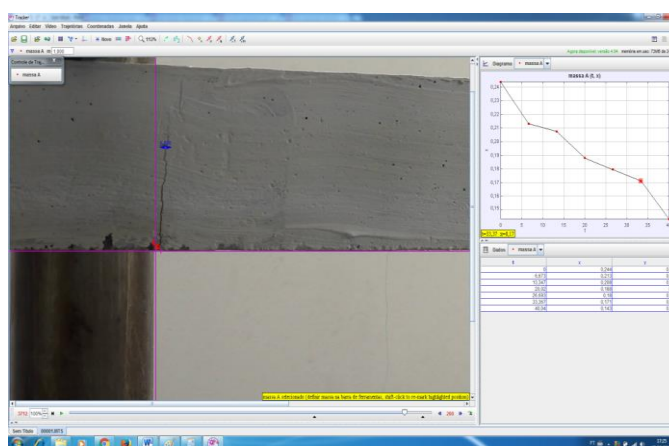
Depois que a máquina universal de ensaios alcançou 0,26 tf de força foi feita uma pausa no ensaio para tirar fotos e foi justamente onde cessou essa primeira análise.

Na figura 54, vemos o vídeo da viga sendo analisado e o eixo estipulado no programa para análise.

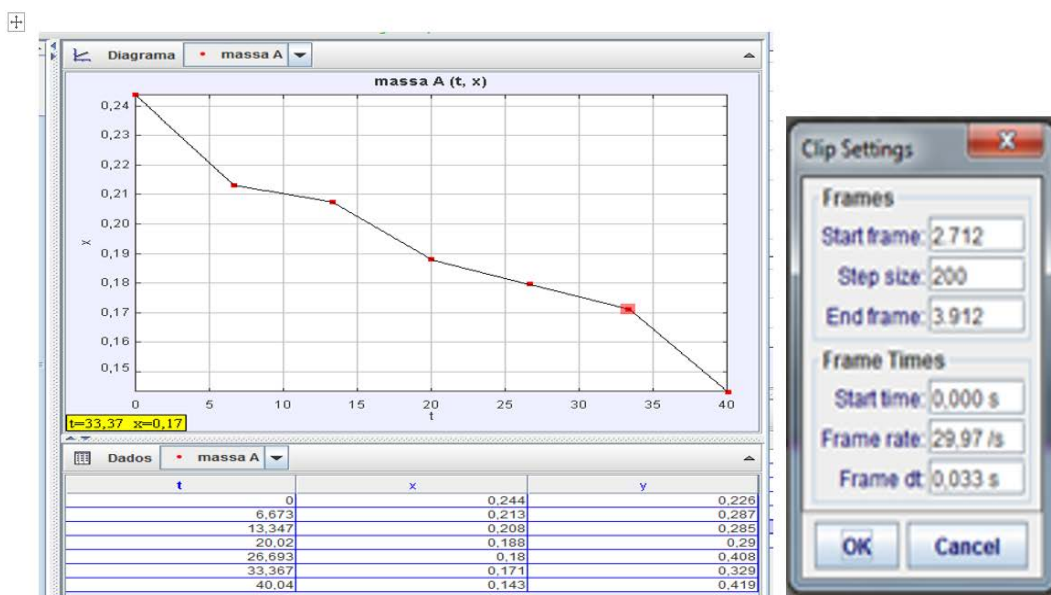
Na Figura 55 (a), é possível observar o gráfico que indica o aumento da fissura. No gráfico vemos que os pontos pré-determinados no lado esquerdo da fissura locomoveram-se aproximando do eixo de referência estipulados no programa.

Na figura 55 (b) observamos uma janela do programa *Tracker* que indica o frame inicial e final do vídeo e a taxa de frame em que o vídeo era passado no software no momento da análise.

Figura 54 - Resultados obtidos pelo programa *Tracker*.



Fonte: Programa *Tracker*

Figura 55 - Resultados obtidos pelo programa *Tracker*.

(a)

(b)

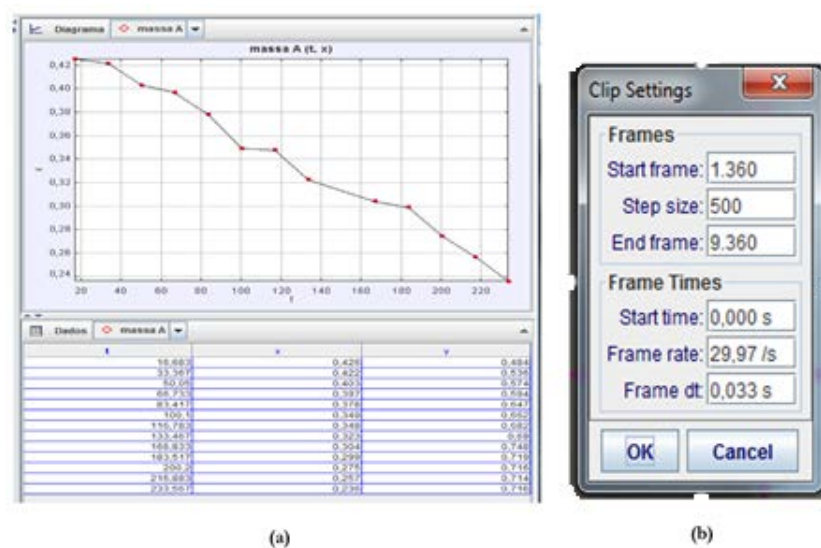
Fonte: Programa *Tracker*

7.2 VÍDEO 2A

Houve uma pequena pausa para fotos e depois continuou-se o ensaio, a partir de 0,26 tf de força da máquina de ensaios. O restante do experimento foi dividido em dois vídeos. O primeiro vídeo com intervalo de, aproximadamente, 267 segundos.

Pela análise do *Tracker*, foi possível visualizar (figura 56) que pontos colocados na extremidade esquerda da fissura, locomoveram-se 0,19 cm. Pontos da extremidade direita da fissura se locomoveram 0,0436 cm.

Na figura 56 (a) podemos visualizar o gráfico criado pelo programa *Tracker* que indica a distância percorrida por pontos na extremidade esquerda da fissura. Vemos que os pontos escolhidos na extremidade esquerda da fissura se aproximaram do eixo escolhido no programa.

Figura 56: Resultados obtidos pelo *Tracker*Fonte: Programa *Tracker*

7.3 VÍDEO 2B

O vídeo analisado é a continuação do anterior e teve um intervalo de 133,466 segundos.

Pela análise é possível observar que pontos selecionados na extremidade esquerda da viga locomoveram-se 0,163 cm. Pontos da extremidade direita da fissura se locomoveram 0,0374cm.

Esse último vídeo analisado acompanha o experimento até o final onde a viga rompeu com a força de 0,47 tf.

O experimento todo durou cerca de 680,45 segundos e cessou com o rompimento da viga, com 0,47 tf de força da máquina universal de ensaios.

Após o final do experimento é possível determinar pelo *Tracker* a altura e largura da maior fissura presente na viga, que é justamente a fissura que foi analisada nos tópicos anteriores.

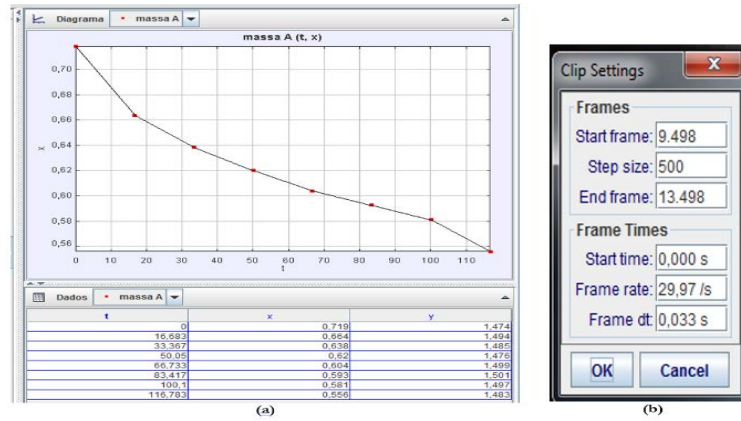
O comprimento da fissura no final foi de 0,557 cm, que equivale a soma aproximada das distâncias percorridas pelos pontos selecionados para análise na parte esquerda e direita da fissura dos tópicos acima, isto é,

$$0,101 + 0,19 + 0,163 + 0,0231 + 0,0436 + 0,0374 = 0,55 \text{ cm.}$$

Na figura 57 (a), vemos o gráfico que indica a distância percorrida por pontos escolhidos na extremidade esquerda da fissura durante o vídeo. Os pontos se aproximaram do eixo escolhido no software. Na figura 58, vemos o comprimento da fissura sendo medida pelo software após o final do vídeo. Na figura 59, vemos a altura da fissura sendo medida pelo software após o final do vídeo.

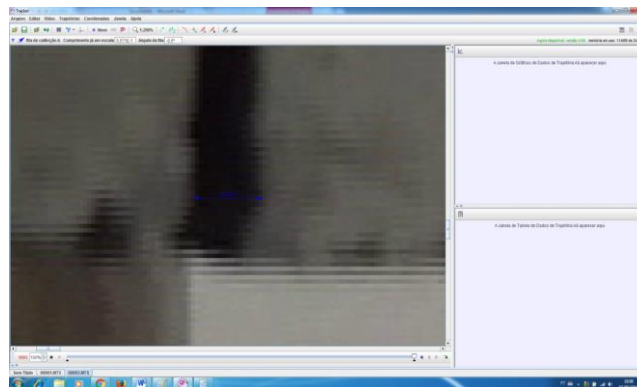
A altura da fissura principal ficou em torno de 8,893 cm, alcançando quase toda a altura da viga, que é de 10 cm.

Figura 57 - Resultados obtidos pelo programa *Tracker*



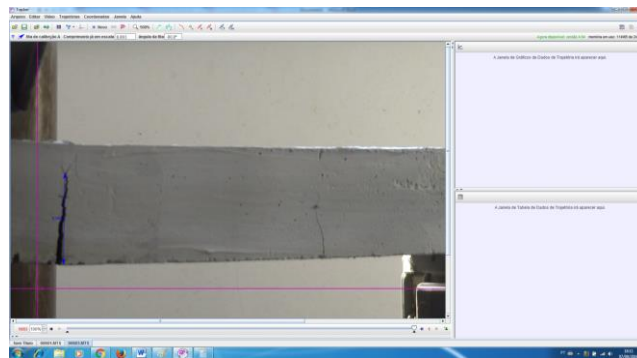
Fonte: Programa *Tracker*

Figura 58 - A abertura da fissura medida foi de 0,5571 cm.



Fonte: Programa *Tracker*

Figura 59 - Altura da fissura, que foi de 0,8893 cm.



Fonte: Programa *Tracker*

8 CONCLUSÃO

Nesse trabalho foram realizados dois experimentos, uma primeira viga simulando o concreto armado e uma segunda viga simulando o concreto protendido, com atuação do efeito de protensão.

Ambas as vigas foram testadas na máquina universal de ensaios até o rompimento. A viga que simulava o concreto protendido resistiu 0,47 tf antes de romper por completo, enquanto a viga que simulava o concreto armado rompeu com 0,37 tf. A segunda viga obteve uma fissura principal com altura de 8,90 cm e abertura de 0,55 cm, contra uma altura de fissura de 10 cm e de 2,13 cm de abertura da primeira viga.

A introdução de um estado prévio de tensões pelo cabo de aço no experimento da segunda viga, que foi tensionado e comprimiu o graute, resultou na redução ou anulação total dos efeitos de tração na viga, tipo de força na qual o concreto possui pouca capacidade de resistência. Tendo esse conceito em mente e analisando os resultados dos testes das vigas torna-se possível reafirmar que o concreto protendido possui melhor comportamento estrutural e menor incidência de fissuras do que o concreto armado, devido ao efeito da protensão, casando com a definição de Pfeil (1994) que propõe:

“Protensão é um artifício que consiste em introduzir numa estrutura um estado prévio de tensões capaz de melhorar sua resistência ou seu comportamento, sob diversas condições de carga”. (WALTER PFEIL, VERÍSSIMO E CÉSAR, 1998, p.2).

Nas vigas testadas houve uma boa aderência entre o cabo de aço e a viga de graute, resultando em uma viga com melhor capacidade de resistir a tração. A união do graute com a armadura de aço cria um componente resistente às tensões de compressão e tração devido às características dos dois materiais. Entretanto, para um bom desempenho, não basta apenas combiná-los, é necessário que exista aderência entre eles, ou seja, o trabalho de resistir às tensões deve ser realizado de maneira conjunta. Além dessa colaboração, a associação se torna possível devido ao coeficiente de dilatação térmica de ambos ser bem próximo.

Nesse trabalho também foi possível abarcar o modo como as solicitações ocorrem no concreto protendido, que é uma peça chave para desenvolver métodos e técnicas que aprimorem o posicionamento dos cabos que concedem ao concreto tensões prévias que resultam na anulação ou redução das ações de tração, características peculiares da protensão.

Os experimentos aqui realizados trouxeram como principal vantagem a abertura de oportunidades para novos testes e estudos relacionados ao concreto protendido. Como continuação aos resultados aqui obtidos sugere-se serem feitos novos testes em vigas distintas, feitas com outro tipo de material com propriedades diferentes do graute, como o próprio concreto, vigas com cabos de aço de diferentes tipos ou com cabos de aço com diferentes posições na viga,

criando novas tensões que provavelmente resultariam em um novo comportamento da estrutura, possibilitando assim analisar os resultados do efeito de protensão em diversas situações. Outra sugestão de continuação seria um trabalho onde as mesmas situações aqui exploradas fossem novamente testadas, todavia com uma análise quantitativa dos dados, de modo a promover um estudo matemático que comprove quantitativamente os efeitos da protensão e suas vantagens na construção civil.

O concreto protendido, como foi provado pelos experimentos aqui relatados, apesar de geralmente gerar um custo inicial maior em uma obra de construção, melhora significativamente o comportamento estrutural do corpo em análise e possibilita a utilização de peças de dimensões menores em grandes estruturas, gerando economia de materiais e um melhor custo benefício da obra. Graças a isso, atualmente o concreto protendido é um dos materiais de construção mais utilizados e de melhor custo benefício.

REFERENCIAS

ARCELOR MITTAL. **Aços utilizados para fabricação de fios de aço para protensão.** Disponível em: <<http://longos.arcelormittal.com.br/pdf/produtos/construcao-civil/fios-cordoalhas/catalogo-fios-cordoalhas.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2016.

AWACOMERCIAL. **Concreto protendido.** Disponível em: <<http://awacomercial.com.br/produtos/>>. Acesso em 15/08/2016.

BEZERRA JUNIOR A. G.; OLIVEIRA, L. P.; LENZ, J. A.; SAAVEDRA. N. **Videoanálise com o software livre Tracker no laboratório didático de física: movimento parabólico e segunda lei de newton.** Curitiba: Departamento Acadêmico de física, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

CAUDURO E. L. **Manual para boa execução de estruturas protendidas usando cordoalhas de aço engraxadas e plastificadas, 2.ed.**

AUTORIA. **Dados técnicos sobre a argamassa super graute** Disponível em: <<http://www.weber.com.br/reparos-reforços-e-protexão-de-concreto/produtos/grautes-adesivos-e-complementos/webertec-supergraute-quartzolit.html>>. Acesso em: 22 ago. 2016.

GAUSS ENGENHARIA. (Concreto protendido). Disponível em : <<http://www.gaussprotensao.com.br/galeriaFotos.html>>. Acessado em 10/08/2016.

GAVA, Giovana Patrícia. **Análise teórica-experimental do comportamento à flexão de vigas de concreto reforçado com fibras de aço.** 2006. 277p. Tese (Doutorado em Engenharia civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

GIUGLIANI, E. **Comentários norma NBR 6118/2007.** Campinas: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - PUC. 2007.

HANAL, J. B. **Fundamentos de concreto protendido.** São Carlos 2005. (Ebook de apoio para o curso de engenharia civil)

LABORATÓRIO DIDÁTICO DE FÍSICA. Analisando imagens e vídeos com o computador. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/cref/uab/lab/tracker.html>>. Acessado em 10.jul.2016.

LEONHARDT F. **Construções de concreto: concreto protendido.** Rio de Janeiro: Editora Interciência , 1983. v.5

MM PROJETOS & CONSULTORIA. **Concreto protendido.** Disponível em: <<http://www.mmprojetoconsultoria.com.br/feed/>>. Acessado em 11 jul.2016.

PFEIL, W. **Concreto protendido: introdução.** 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988. v.1.

SANTOS, G. O ET AL. **Tipos de pontes existentes: Projeto unificado 1, Várzea Grande, 2013.**

SENA DOS ANJOS, A. J. As novas tecnologias e o uso dos recursos telemáticos na educação científica: a simulação computacional na educação em física. **Caderno Brasileiro de Ensino de**

Física, v. 25, n. 3, p. 569-600, 2008.

TÉCHNE. Concreto protendido. Disponível em :<<http://www.planar.com.br/>>. Acessado em 12 ago.2016.

VERÍSSIMO, G. S. ET AL. **Concreto protendido**: fundamentos básicos, 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 1988.

VERÍSSIMO, G. S. ET AL. **Concreto protendido**: estados limites, 4. ed.. Viçosa: Departamento de Engenharia Civil/UFV, 1999.

ZAP IMÓVEIS. **Concreto protendido**. Disponível em : <<http://revista.zapimoveis.com.br/estruturas-pre-moldadas-ganham-espaco-em-obras-2968508-sc/>>. Acessado em 11 jul.2016.