

**FUNDAÇÃO CARMELITANA MÁRIO PALMÉRIO
FACULDADE DE CIÊNCIAS HUMANAS E SOCIAIS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

JUSCELENE MARIA SOARES CUNHA

CONCRETO PROTENDIDO

**MONTE CARMELO – MG
DEZEMBRO / 2018**

JUSCELENE MARIA SOARES CUNHA

CONCRETO PROTENDIDO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Faculdade de Ciências Humanas e Sociais da Fundação Carmelitana Mário Palmério – FUCAMP, para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Kevin Motta

**MONTE CARMELO – MG
DEZEMBRO / 2018**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, o criador que toda honra e glória lhe seja dada, por ter me dado forças, capacidade e cumprido o desejo do meu coração. Agradeço também a minha mãe Helena e minha filha Lara Soares por estarem sempre me apoiando e dando assistência diante das dificuldades encontradas.

RESUMO

A pesquisa bibliográfica apresentada neste trabalho, mostra como é feito o concreto protendido, suas vantagens e desvantagens. O concreto protendido foi criado no intuito de resistir a grandes cargas e vencer grandes vãos livres e assim diminuir o uso de pilares e vigas. É um concreto de alta resistência com fios de aço capaz de suportar grandes cargas de tração, tendo baixo peso próprio. Quanto à aderência podem ser aderente, e não aderente. Em lajes se destacam as lajes treliçadas protendidas com grandes vantagens sobre as demais, sendo um método aderente com vigotas treliçadas protendidas. Tendo facilidade ao transporte das peças e agilidade na montagem.

PALAVRAS-CHAVE: Concreto Protendido; Lajes Treliçadas Protendidas; Aderência.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Uma fila horizontal de livros.....	11
Figura 2 – Fios de treliçados de aço carbono.....	17
Figura 3 – Cordoalhas.....	17
Figura 4 – Barras de aço para protensão.....	18
Figura 5 – Protensão aderente.....	21
Figura 6 – Protensão não aderente.....	22
Figura 7 – Laje treliçada protendida.....	23
Figura 8 – Pista de protensão.....	24
Figura 9 – Macaco hidráulico de protensão.....	25
Figura 10 – Sapata.....	27
Figura 11 – Modelo de Sapata.....	35
Figura 12 – Seção completa da laje.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de agressividades e exigências relativas à fissuração excessiva e a protensão da armadura ativa.....	14
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	09
1.1	Objetivo geral	10
1.1.1	Objetivos específicos	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	Método de protensão	11
2.1.1	Protensão aplicada ao concreto	12
2.2	Tipos de protensão	12
2.2.1	Protensão completa	12
2.2.2	Protensão limitada	13
2.2.3	Protensão parcial	13
2.3	Perdas de protensão	14
2.3.1	Perdas por retração e fluência do concreto	14
2.3.2	Perdas por relaxação e fluência do aço de protensão	15
2.3.3	Perdas de protensão por atrito dos cabos	15
2.3.4	Perda de tensão na armadura decorrente da deformação imediata do concreto	15
2.3.5	Perda de Tensão na armadura decorrente de acomodação das ancoragens	15
2.4	Aços de protensão	16
2.5	Concreto para protensão	19
2.6	Lajes protendidas	20
2.6.1	Lajes	20
2.6.2	Normas	20
2.6.3	Protensão em Lajes	20
2.6.3.1	Protensão Aderente	20
2.6.3.2	Protensão Não Aderente	22
2.6.4	Lajes treliçadas protendidas	23
2.6.4.1	Processo de fabricação de lajes treliçadas protendidas	23
2.6.4.2	Passo a passo da fabricação da lajota treliçada protendida	24
2.6.4.3	Vantagens das Lajes treliçadas	25
3	METODOLOGIA	27
3.1	Procedimentos para o dimensionamento de uma laje treliçada protendida (pré-tração)	27
3.1.1	Dados da sapata	27
3.2	Dados dos fios de protensão	27
3.3	Cálculo da protensão inicial é feito pelas seguintes equações	28

3.3.1Calculando a perda de protensão por escorregamento dos fios e acomodação da ancoragem – Panc	28
3.3.2Equações usadas para a verificação do concreto no ato da protensão	29
3.4Obtemos os dados da seção completo	29
3.4.1Solicitações no meio do vão.....	29
3.4.2Calculando a flexa imediata	30
3.5Estado limite último (flexão).....	31
3.5.1Excentricidade dos fios.....	31
3.5.2Calculando o pré–alongamento	31
3.6Equações de equilíbrio	32
3.6.1Calculando o equilíbrio das forças entre o concreto e aço da treliça e fios protendido.....	33
3.6.2Verificando o Equilíbrio dos momentos	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1Cálculo utilizando a sapata da viga treliçada	35
4.1.1Cálculo de protensão usado	35
4.1.2Cálculo de perda de protensão por escorregamento acomodação	36
4.2Cálculo para verificação do concreto no ato da protensão	36
4.3Seção completa.....	37
4.4Solicitações no meio do vão.....	38
4.5Cálculo da flexa imediata.....	39
4.6Cálculo do estado limite último (flexão)	39
4.7O pré–alongamento	40
4.8Equilíbrio de força e momento	40
4.9Alongamento dos fios de protensão.....	41
4.10Tensões nos fios e armaduras passivas	41
4.11Cálculos do equilíbrio das forças entre o concreto e aço da treliça e fios protendidos.....	42
4.12Equilíbrio dos momentos	42
5 CONCLUSÃO.....	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1INTRODUÇÃO

Segundo Pfeil (1984), o concreto possui uma excelente resistência à compressão, mas muito pouca capacidade de resistir à tração. Para melhorar seu comportamento e resistência criou-se um método que consiste em introduzir em uma estrutura um estado prévio de tensões o qual chamamos de concreto protendido.

O concreto protendido foi desenvolvido pelo engenheiro Francês Eugene Freyssinet. A primeira obra utilizando concreto protendido no Brasil foi à ponte do Galeão no Rio de Janeiro em 1949, aumentando seu uso na construção civil partir 1995, principalmente no nordeste, com a chegada das cordoalhas engraxadas que são mais usadas em edifícios, que são compostas por fios de aço de alta resistência entrelaçados cobertos por uma camada de graxa e uma camada de plástico de alta resistência (VERISSIMO; CÉSAR JR, 1998).

Protender consiste em utilizar barras de aços que serão alongadas, com uma força horizontal, surgindo um efeito de compressão no concreto e assim gerando forças de atrito que são maiores que o peso próprio da estrutura e cargas as quais estão sujeitas (PFEIL, 1984).

A ABNT NBR 6118:2014, define três categorias de protensão com relação aos estados últimos de utilização aprotensão completa são casos de estruturas expostas a ambientes agressivos ela proporciona melhores condições de protensão das armaduras contra corrosão com elevada intensidade, eliminando completamente as tensões de tração no concreto.

A protensão limitada, as peças de concreto são submetidas a tensões menores do que aquelas que seriam produzidas em uma protensão completa, tendo as seguintes vantagens melhor desempenho estrutural admitindo as tensões de tração, sem ultrapassar o estado de limite de deformação de fissuras com consumo menor de armaduras (ABNT, NBR6118, 2014).

A protensão parcial em que o concreto tem uma tensão de tração maior do que a que ele suporta podendo assim haver fissuras se torna um dos métodos mais utilizados. De acordo com Hanai (2005) a utilização do concreto protendido é necessidade de ter um concreto com uma resistência maior que a convencional o concreto armado. As vantagens que levam a utilização do concreto protendido são: economia tanto para o concreto e para aço, a necessidade de vencer vãos livres de grandes dimensões com elementos de altura reduzida.

Segundo Emerick (2002), aprofundando mais em materiais utilizados, em lajes protendidas, existem basicamente dois sistemas de protensão com pós-tração em lajes protendidas em função da aderência ou não entre o cabo e o concreto. Protensão aderente com

cordoalhas aderentes comporta-se melhor quanto à distribuição das fissuras e a segurança a ruptura para efeitos de localização. O não aderente possui suas vantagens sobre a aderente, não sendo possível avaliar de forma absoluta qual é o melhor método. Diante os fatos será feito uma análise detalhada de todos os materiais utilizados na protensão de uma laje no intuito de se obter melhor resultado (EMERCK, 2002).

Acredita-se que este estudo é pela necessidade de proporcionar ao interessado o domínio dos conceitos e das técnicas básicas do concreto protendido especialmente da verificação da segurança estrutural, inclusive porque na versão atual da norma técnica NBR 6118:2014, o concreto armado e o concreto protendido são tratados em conjunto, muitos cursos de arquitetura e engenharia civil do Brasil não oferecem a disciplina concreto protendido(MIGLIORI JUNIOR, 2013). Por isso, o desenvolvimento deste estudo, tem como proposta mostrar os fundamentos do concreto protendido, suas propriedades, materiais utilizados, juntamente com sua importância no projeto estrutural.

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo elaborar uma pesquisa bibliográfica com o intuito de promover uma síntese dos fundamentos do concreto protendido.

1.1.1 Objetivos específicos

Para tanto os objetivos específicos são:

- Descrever alguns tipos de lajes protendidas, como são feitas, métodos mais usados, vantagens e desvantagens de cada um;
- Apresentar um pré-dimensionamento de uma Laje Protendida.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

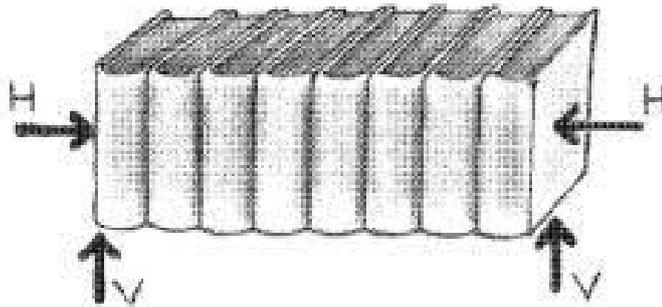
2.1 Método de protensão

Segundo Hanai (2005), a protensão que corresponde a uma pré-tensão que traduzidas em outras línguas é um modo de instalar um estado prévio de tensões em materiais de construção as estruturas.

No dia a dia são feitas determinadas ações que se parar para analisar podem ser comparadas ao conceito da física e da matemática e também na engenharia (HANAI, 2005).

A figura 1 nós dá um entendimento amplo sobre protensão. Temos o exemplo de uma pilha de livros, na forma horizontal.

Figura 1 -Uma fila horizontal de livros



Fonte: Hanai (2005)

Para manter em equilíbrio, os livros tem uma força na horizontal comprimindo-os e mantendo-os pressionados e mobilizados resultando uma força de atrito e ao mesmo tempo forças verticais nas extremidades da fila assim poderá ser levantadas. Em que as ações considerando o peso próprio dos livros e os esforços solicitantes que são: momento fletor, força cortante e força normal (HANAI, 2005).

Para levantar a fila de livros é necessária que a força normal seja aplicada antes da força vertical, assim a força normal causa tensões de compressões na pilha de livros. Aplicando uma força normal haverá uma protensão em um conjuntos de componentes ou seja as estruturas (HANAI, 2005).

Então podemos dizer que segundo Pfeil (1984) *apud* Hanai (2005) que: “protensão é um artifício que consiste em introduzir numa estrutura um estado prévio de tensões, capaz de melhorar sua resistência seu comportamento sob diversas condições de carga”.

2.1.1 Protensão aplicada ao concreto

Hanai (2005) faz o seguinte questionamento: de que forma a protensão pode melhorar as condições de utilização do concreto?

Mediante estudo, o autor conclui que o concreto resiste à compressão e há medidas para controlar a fissuração. A protensão produz tensões de compressão prévias no concreto na região em que seria tracionado devido às ações sobre a estrutura. A fila de livros horizontal dada como exemplo, lembra fatias ou aduelas pré-moldadas de concreto a qual compõe uma viga de concreto protendido. Para que isso ocorra a um sistema de protensão é colocada uma armadura e é aplicada uma força normal necessária e são ancorados nas extremidades da viga (HANAI, 2005).

Em uma peça de pré-moldado de concreto, são deixados orifícios tubulares que serão alinhados, onde passam dentro deles barra de aço com rosca nas extremidades. Também pode aplicar primeiro a força de protensão e depois injetar calda de cimento nos orifícios promovendo a aderência do aço com o concreto, resultando a armadura aderente ao concreto (HANAI, 2005).

De acordo com Hanai (2005), esse método de aderência é aplicado em grandes estruturas, como as pontes de grande vão em balanços progressivos, onde acrescenta aduelas pré-moldadas. Não é tão simples, o método de protensão aderente para ser executados tem que ter conhecimento, equipe treinada, equipamentos, todos os recursos tecnológicos necessários.

2.2 Tipos de protensão

Os tipos de protensão estão relacionados aos estados limites de utilização referentes à fissuração. A protensão pode ser completa, limitada ou parcial, de acordo com as definições a seguir.

2.2.1 Protensão completa

De acordo com a NBR 7197, item 4.1.1, existe protensão completa quando se verificam as duas condições:

- Em combinações frequentes de ações, prognosticadas no projeto, é considerado o estado de descompressão, independente da circunstância em que exercerem a carga permanente e as sobrecargas frequentes, não se pode ter tensão de tração no concreto;
- Já em combinações raras de ações, prognosticadas no projeto, é considerado o estado limite de formação de fissuras.

A protensão total propicia um aperfeiçoamento na protensão das armaduras contra a corrosão das armaduras e define as flutuações de tensões no aço, valores ponderados. Essa protensão se torna apropriada em meios com alta agressividade.

2.2.2 Protensão limitada

De acordo com a NBR 7197, item 4.12, existe protensão limitada quando se verificam as duas condições:

- Em as combinações quase permanentes de ações, prognosticadas no projeto, é considerado o estado limite de descompressão;
- Nas combinações frequentes de ações, prognosticadas no projeto, é considerado o estado limite de formação de fissuras.

Vigas com protensão limitadas são calculadas para tensão moderadas de tração em serviço, observando-se uma chance muito mínima de fissuração no concreto. E as que são abertas, são devido à ação de uma sobrecarga transitória e fecham quando há a passagem da carga. Visto que as seções ficam comprimidas sob efeito das cargas quase permanentes.

2.2.3 Protensão parcial

De acordo com a NBR 7197, item 4.1.3, existe protensão parcial quando se verificam as duas condições:

- Em combinações quase permanentes de ações, prognosticadas no projeto é considerado o limite de descompressão;
- Também em combinações frequentes de ações prognosticadas no projeto, é reconsiderado o estado limite de abertura de fissuras, em que $W_K \leq 0,2 \text{ mm}$.

O método imposto em protensão parcial é parecido com o de protensão limitada, mas podendo as tensões de tração no concreto serem maior e permitindo a formação de fissuras com abertura também maiores.

A NBR 6118 institui graduação de níveis de protensão mínimos para que se ressaltem valores constitutivos (w_k) das aberturas de fissuras. Estes valores são determinados em relação às condições do meio ambiente e da sensibilidade das armaduras à corrosão (Tabela 1). Dessa forma, para um ambiente pouco hostil com protensão parcial nível 1, o valor constitutivo da abertura da fissura é de 0,2 mm e necessita ser determinado pela combinação de ações do tipo frequente.

Tabela 1: Classes de agressividades e exigências relativas à fissuração excessiva e a protensão da armadura ativa.

Tipos de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental	Exigências relativas ao E. L. de fissuração excessiva	Combinação de ações a considerar
Concreto simples (sem protensão e sem armadura)	I a IV	Não há	-
Concreto armado (sem protensão)	I	ELS-W $w_k \leq 0,4\text{mm}$	Frequente
	II a IV	ELS-W $w_k \leq 0,3\text{mm}$	Frequente
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração ou Pós-Tração I I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2\text{mm}$	Frequente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração ou Pós-Tração II III e IV	ELS-F	Frequente
		ELS-D	Quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração III e IV	ELS-F	Rara
		ELS-D.	Frequente

Nota: ELS-W= Estado Limite de Serviço - Abertura de fissuras; ELS-F = Estado Limite de Serviço – Formação de fissuras; ELS-D= Estado Limite de Serviço – Descompressão.

Fonte: PEF – Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica (2003, p. 29).

2.3 Perdas de protensão

Segundo Cazzo(2008),o concreto protendido está submetido às forças de protensão e essas forças são permanentes, mas variam de intensidade podendo perder ou ganhar força. Havendo a perda desta força ocorre a perda de protensão.

2.3.1 Perdas por retração e fluência do concreto

De acordo Cazzo (2008) o concreto sofre alterações em sua estrutura. Com o tempo o concreto sofre um encurtamento devido ao equilíbrio térmico do concreto com o meio ambiente.

Ao longo do tempo também tem a fluência do concreto que quando é submetido a ações de longa duração produz deformações elásticas e plásticas sofrendo um encurtamento.

2.3.2 Perdas por relaxação e fluência do aço de protensão

Havendo um alívio de tensão quando a armadura se mantém em comprimento e deformação constante ocorre à relaxação e fluência do aço protendido. Ocorrendo a fluência também ocorre o aumento da deformação do aço.

2.3.3 Perdas de protensão por atrito dos cabos

Na aderência posterior a armadura é tracionada após a concretagem em que o atrito entre a bainha e o cabo causa perdas de protensão.

Tem um aumento de perda de protensão bem maior quando utilizado em trechos curvos, pois há um aumento considerável do atrito entre cabos e bainhas (CAZZO, 2008).

2.3.4 Perda de tensão na armadura decorrente da deformação imediata do concreto

Para Cazzo (2008), na protensão com aderência inicial há uma pré-tensão, primeiro os cabos são tracionados e depois se faz a concretagem após a cura do concreto a armadura é liberada das ancoragens e o concreto sofre uma tensão a qual ocorre seu encurtamento. A armadura perde tensão, pois está aderida ao concreto.

O concreto com pós-tração se procede da seguinte forma: o macaco de protensão se apoia em parte da própria peça, fazendo o fracionamento da armadura e comprimindo o concreto e não há queda de tensão por deformação imediata do concreto (CAZZO, 2008).

2.3.5 Perda de Tensão na armadura decorrente de acomodação das ancoragens

De acordo com Cazzo (2008), a acomodação dos elementos de ancoragem pode causar perda de tensão na armadura e essa perda depende do tipo de ancoragem e do tipo de protensão adotada e o comprimento dos cabos. Podendo haver uma acomodação dos cabos em pós-tração, assim aplica-se uma força de protensão maior, evitando essa acomodação.

2.4 Aços de protensão

De acordo com a NBR 7482 (Fios de aço para concreto protendido) e NBR 7483 (Cordoalhas de aço para concreto Protendido), são características do aço usado protendido a alta resistência e o não escoamento. Em relação aos aços usados no concreto armado são mais econômicos e tem uma resistência três vezes maior.

Os aços para protensão são oferecidos em grandes comprimentos, na forma de fios e cordoalhas. Não havendo a necessidade de fazer emendas por causa dos alongamentos excessivos que produzem fissuras com grandes aberturas.

Este problema é evitado através do alongamento prévio da armadura em concreto protendido. E tem as seguintes especificações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) que regulamentam as características e propriedades do aço de protensão.

Os aços de protensão são designados conforme ilustram os exemplos seguintes:

CP – Concreto Protendido

170 – f_{ptk} Resistência característica de ruptura em kN/m^2

RB – RB relaxação baixa e RN relaxação Normal

L – L fio liso e

E – fio entalhe

As formas encontradas de aços de protensão são as seguintes:

- Fios treliçados de aço carbono: com diâmetro de 3 a 8 mm, fornecidos em rolos ou bobinas, conforme Figura 2;

Figura 2 - Fios de treliçados de aço carbono



Fonte: imagem retirada do site MFRural(2018).

- Cordoalhas: fios enrolados em forma de hélice, com dois, três ou sete fios, conforme Figura 3;

Figura 3 –Cordoalhas



Fonte: imagem retirada do site Belgo Bekaert (2018).

- Barras de aço: liga de alta resistência, laminados a quente, com diâmetros superiores a 12m e comprimento limitado. A Figura 4 demonstra o modelo de uma barra de aço.

Figura 4 - Barras de aço para protensão



Fonte: imagem retirada do site AWA Comercial (2018).

De acordo com Cazzo (2008) quanto à mobilidade de tratamento podem ser:

Aços aliviados ou de relaxação normal (RN). São aços retificados por um tratamento térmico que alivia as tensões internas de trefiliação; Aços estabilizados ou de relaxação baixa (RB). São aços que recebem um tratamento termomecânico que melhora as características elásticas e reduz as perdas de tensão por relaxação (CAZZO, 2008, p. 41).

Segundo Cazzo (2008), os tipos e bitolas de aço de protensão fornecidos pela indústria variam no tempo e dependem, principalmente, dos seguintes fatores: normalização nacional e internacional, já que o aço além de ser vendido no mercado interno também é exportado para outros países .

2.5 Concreto para protensão

De acordo com Veríssimo e Cesar Junior (1998), a resistência do concreto protendido variam entre 30Mpa a 40 Mpa. A NBR 6118 (2003) recomenda –se que a resistência mínima a ser adotada para o concreto protendido é de 25 Mpa.

Veríssimo (1997) lista , alguns fatores que justificam sua resistência elevadas:

- A força de protensão pode causar solicitações prévias elevadas e costuma ser mais altas que a de uma situação de serviços;
- Devido à alta resistência do aço e do concreto há uma redução das dimensões da peça e conseqüentemente seu peso próprio;
- Os efeitos de perda de protensão oriundas da retração e fluência do concreto são reduzidos, pois a alta resistência do concreto tem módulo de deformação mais elevado diminuindo as deformações imediatas.

O autor ainda destaca que, devem observar se o concreto possui boas características de capacidade e baixa permeabilidade evitando a corrosão da armadura. Um concreto ideal com todos os requisitos impostos a estrutura de concreto protendido é de extrema importância.

Os cimentos mais recomendados são: Portland,ARI,AF,Pozolônico, dentre outros. A indicação é que o cimento tenha agregados selecionados, um traço com proporções adequadas, utilizar aditivos que não prejudicam as armaduras.

De acordo com Veríssimo (1997), em fabricas de pré–moldados o mais usual é a cura térmica (vapor), assim consegue uma maturação do concreto mais rápido por causa da temperatura alta em ambientes úmidos atingindo resistências elevadas em poucas horas.

Para obter uma resistência de 70% com a cura normal precisa - se de 28 dias, já a cura a vapor utilizando o cimento ARI consegue–se no prazo de 20 horas. Dessa forma fábricas de pré – moldados trabalham com um ciclo de 24 horas.

2.6 Lajes protendidas

2.6.1 Lajes

De acordo com Cazzo (2008), toda estrutura de área plana é considerada lajes e o comprimento e largura são sempre maiores que sua espessura, sobre ela faz as divisões dos

andares e recebe toda carga de revestimento e pisos. Segundo o autor, as lajes possuem duas principais funções: resistência, que se refere ao fato dela suportar o seu peso próprio além das sobrecargas acidentais; e isolamento, que são acústica e térmica.

As lajes se subdividem em duas grandes classes: lajes moldadas In-loco e lajes pré-fabricadas (CAZZO, 2008).

2.6.2 Normas

A ABNT possui quatro normas que regulamentam a atividade na construção civil com lajes protendidas. A NBR 6118 traz procedimentos para projetos de estrutura do concreto e a NBR 1431 traz procedimentos para execução de estruturas de concreto. A NBR 14859 traz requisitos para pré-fabricados e a NBR 14861, requisitos e procedimentos para lajes alveolares pré-moldados de concreto protendido.

2.6.3 Protensão em Lajes

Segundo Emerick (2002), há dois sistemas de protensão: o aderente e o não aderente.

2.6.3.1 Protensão Aderente

A Figura 5 demonstra um modelo aderente que de acordo com Emerck (2002), primeiro é feita a protensão das cordoalhas, depois é injetado nata de cimento dentro das bainhas metálicas onde estão os cabos. Esse processo de protensão aderente tem um comportamento melhor quanto a fissuras rupturas e efeitos localizados.

Figura 5: Protensão aderente



Fonte: imagem retirada do site AECweb (2018).

Para protensão com e sem aderência em lajes em relação a resistência a tração temos o CP – 175 e CP – 190, mas que está sendo mais empregado é o CP 190RB (EMERICK, 2002).

Segundo Emerick (2002), os cabos podem ser com ancoragem ativa e passiva, quando fixamos os cabos nas extremidades chamados de ancoragem. Quando fixados os cabos nas extremidades chamamos de ancoragem, a ancoragem é ativa quando há a protensão dos cabos e passivas quando somente fixa os cabos. Em cabos longos maiores que 40 metros, a protensão é aplicada pelas duas extremidades do cabo.

Para garantir uma perfeita ligação mecânica da armadura e o concreto e evitar corrosão faz-se uma injeção de nata de cimento e preenchendo os vazios entre a armadura e a parede da bainha (EMERICK, 2002).

Segundo Hanaí (2005), em pré-fabricados usa-se muito a protensão com aderência. São fabricados em pista de Protensão, usando fios e cordoalhas especiais e são esticados com o auxílio de um aparelho e ancorados nas extremidades e depois que as peças são concretadas se faz a cura do concreto os fios são liberados.

2.6.3.2 Protensão não Aderente

De acordo com Emerick (2002), a protensão não Aderente é um sistema de protensão feito com cordoalhas engraxadas e plastificadas. A Figura 6 é uma demonstração de Protensão não Aderente.

Figura 6:Protensão não aderente



Fonte: imagem retirada do site Impacto Protensão (2018).

Segundo Veríssimo (1997), a protensão não aderente é da seguinte forma: primeiro faz a cura do concreto para depois fazer a protensão da armadura nesse caso a armadura é ativa, porque a armadura passiva esta aderente ao concreto.

A armadura ativa em alguns casos é colocada dentro de dutos metálicos ou plásticos. Aplicam a força de protensão e injetam uma graxa para que a armadura não sofra corrosão (VERÍSSIMO, 1997).

2.6.4 Lajes treliçadasprotendidas

A Figura 7 traz um exemplo de laje treliçada protendida.

Figura 7: Laje treliçada protendida



Fonte: imagem retirada do site Impacto Protensão (2018).

As lajes treliçadas são as mais recomendadas para qualquer tipo de obra, na maioria das vezes usadas em pequenas e médias construções residenciais e comerciais.

Essa laje é formada por vigotas de concreto armado, ou somente aço, que depois receberá lajotas de isopor (mais comuns atualmente), ou mesmo de concreto ou cerâmicas. Geralmente é utilizada para vãos com no máximo 12 metros, sendo uma opção econômica e de ótima qualidade estrutural, frente a outros tipos de lajes como as maciças e nervuradas, por exemplo (CONCRENORTE, 2018, p. 03).

As lajes treliçadas, não exigem uma grande quantidade de fôrmas e escoramentos, são mais flexíveis o que aceita ao profissional que a utiliza, levantar a obra satisfazendo as curvas do projeto e alguma outra geometria desigual que o engenheiro se deparar (CONCRENORTE, 2018).

2.6.4.1 Processo de fabricação de lajes treliçadas protendidas

Segundo Albuquerque *et al*(2005),em pista de protensão é feito o tensionamento dos fios após colocação das treliças, só assim é feita a concretagem. Como foi dito é dispensado o uso de moldadoras, que eleva de forma significativa o custo. Sendo feito apenas a concretagem de uma forma é um processo rápido e simples adaptando aos diversos tamanhos de vãos. Em pistas de protensão com moldadoras exige 100 metros e também menores com aproximadamente 40 metros de comprimento (ALBUQUERQUE *et al*, 2005).

2.6.4.2 Passo a passo da fabricação da lajota treliçada protendida

Tem-se uma pista de protensão de 40 metros de comprimento como mostra a Figura 8, usam-se formas. Em uma das pontas os fios de aço com diâmetro de 5mm são fixados, é feito o tensionamento desses fios através de macaco hidráulico mostrado na Figura 9, com uma carga de tração de 2750 Kgf em cada fio de aço são ancorados com cunhas, em seguida são colocadas as treliças e feito a concretagem com um concreto de alta resistência.

O tempo de cura do concreto é de 28 dias, após a cura, os fios são liberados e temos a vigota treliçada protendida (CARVALHO, 2018).

Figura 8: Pista de protensão



Fonte: Autor (2018).

Figura 9: Macaco hidráulico de protensão



Fonte: Autor (2018).

2.6.4.3 Vantagens das Lajes treliçadas

De acordo com o manual de Treliart (2002) as principais vantagens no uso de lajes treliçadas são:

- Conseguir fazer uma laje vencendo grandes vãos livres sem vigas e pilares e suportando altas cargas;
- Fazendo as devidas considerações tem a capacidade de suportar paredes apoiadas diretamente sobre as lajes;
- Redução de vigas e pilares e fundações do sistema estrutural ganhando mais espaço;
- Usa-se menos aço, concreto, forma e mão de obra reduzindo custos;
- Redução do peso próprio assim tem-se menos cargas;
- Baixando o peso próprio há uma redução dos escoramentos;
- Não se usa forma;
- Facilidade ao transportar as peças e agilidade na montagem;

- O dimensionamento é feito uni ou bidirecional, de acordo com a estrutura;
- Sem contar que diminui trincas, fissuras por causa da aderência;

Avilla Júnior (2009) ressalta que sendo muito pequena ainda a aplicação de lajes protendidas treliçadas, conseguem-se poucas referências técnicas sobre estes elementos. Esta técnica tem sido mais aplicada na cidade de Fortaleza e na região do Triângulo Mineiro.

3 METODOLOGIA

O estudo foi desenvolvido a partir de pesquisa bibliográfica, como foco nos seguintes temas: protensão aplicada ao concreto, tipos de protensão, perdas de protensão, aços de protensão, concreto para protensão, protensão em lajes, lajes treliçadas protendida.

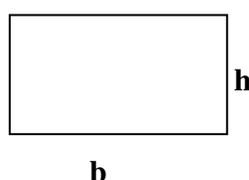
A metodologia descreve os procedimentos de coleta e análise dos dados e os materiais que levam a obtenção dos resultados. Sendo assim, O presente trabalho analisou as lajes treliçadas protendidas, o processo de fabricação e aplicação das lajes treliçadas protendidas, demonstrando seu dimensionamento.

3.1 Procedimentos para o dimensionamento de uma laje treliçada protendida (pré-tração)

3.1.1 Dados da sapata

Sapata é a área onde se encontra os fios de protensão e armadura da treliça, conforme demonstrado na Figura 10:

Figura 10: Sapata



Fonte: Autora (2018).

Em que:

A_{sap} = área da Sapata;

I_{sap} = Inércia da Sapata;

Y_{cg} = Altura do Centro de Gravidade da Sapata;

b = Base da Sapata;

h = altura da sapata.

3.2 Dados dos fios de protensão

São obtidas os seguintes dados do fio adotado:

A_{σ} = Área aproximada;

f_{ptk} = limite mínimo de fio usado para concreto;

c_p = tipo de fio usado para concreto protendido;

R_n = baixa relaxação.

3.3 O cálculo da protensão inicial é feito pelas seguintes equações

$$\sigma_{pi} \leq 0,77 f_{tk} ; 0,85 f_{py} \quad (1)$$

Pegamos o menor valor de σ_{pi} :

$$P_i = -2. A_{\sigma} . \sigma_{pi} \quad (2)$$

$$P_a = 0,97. P_i \quad (3)$$

Onde se lê:

f_{pyk} = Resistência característica de escoamento;

f_{tk} = Resistência característica a ruptura;

σ_{pi} = Tensão de Protensão inicial;

P_i = Força inicial de Protensão;

P_a = Força imediatamente anterior à transferência de protensão às peças pré-moldadas.

3.3.1 Calculando a perda de protensão por escorregamento dos fios e acomodação da ancoragem –Panc

Cálculo do deslocamento por escorregamento dos fios e acomodação de ancoragem nos fios é da ordem de 4mm, por o tipo de armadura que está sendo usada:

$$P_{anc} = (d / L . \epsilon_{aço}) . \sigma_{pi} . A_p \quad (4)$$

Onde:

d = deslocamento do ponto de ancoragem /acomodação;

L = comprimento da peça;

$\epsilon_{aço}$ = deformação do aço, por ocasião do estiramento, geralmente adotado de 0,7%;

σ_{pi} = tensão na armadura de Protensão aplicada pelo equipamento de tração;
 A_p = área do aço protendido.

3.3.2 Equações usadas para a verificação do concreto no ato da protensão.

Quando os fios são cortados após a cura do concreto, usam-se as seguintes equações:

$$\sigma_{cp} = Pa \div A_{sap} \quad (5)$$

$$\sigma_{limite} = 0,7 f_{ckj} \quad (6)$$

Onde:

σ_{cp} = Tensão do concreto protendido

σ_{limite} = Tensão limite do concreto protendido

Assim:

$$\sigma_{cp} < \sigma_{limite}$$

3.4 Obtemos os dados da seção completo

Uma seção por nervura, utilizando uma forma plástica removível, utiliza-se os seguintes dados:

A = área da seção completa;

Y_{cg} = altura do centro de gravidade da seção;

I = Inércia da seção;

W = carga excêntrica da seção completa.

3.4.1 Solicitações no meio do vão

Calcula-se o vão da laje e os carregamentos por nervura, com base nos dados, em que:

l = vão da laje;

$g1$ = peso próprio da sapata carga permanente (ppsap);

$g2$ = carga permanente peso próprio do concreto moldado em loco (ppcml);

$g3$ = carga permanente peso próprio da pavimentação e revestimento;

q = Sobre carga adotada pela NBR.

Para tanto, as fórmulas utilizadas são:

$$\sum (g + q) \quad (7)$$

$$Md = 1,4 \sum q.l^2 / 8 \quad (8)$$

3.4.2 Calculando a flexa imediata

Para cálculo da flexa imediata utilizaremos as seguintes equações:

$$ai = \alpha. pl x^4 / 12 EI \quad (9)$$

Onde:

α = coeficiente tabelado;

p = carga uniforme;

lx = menor vão;

EI = modulo de rigidez a secante.

$$EI = Ecs. Ic \quad (10)$$

$$Ecs = 0,85.5600.\sqrt{fck} \quad (11)$$

Onde:

Ecs = módulo de elasticidade a secante;

Ic = Inércia da seção;

Fck = Resistência característica do concreto.

$$p = g + \psi 2 q \quad (12)$$

$$\psi 2 q = 0,4.q \quad (13)$$

$$Ic = b. A^3 / 12 \quad (14)$$

Em que:

ψ_2 = Fator de Redução

q = carga variável

g = soma de todas as cargas permanentes

3.5 Estado limite último (flexão)

3.5.1 Excentricidade dos fios

Considerando a seção plena, a sapatapré - moldada integrada ao concreto em loco calculada pela seguinte equação:

$$ep = y_{cg2} - y_{cg1} \quad (15)$$

Onde:

y_{cg2} = altura do centro de gravidade da seção completa;

y_{cg1} = altura do centro de gravidade da sapata.

3.5.2 Calculando o pré-alongamento

Para calcular o pré-alongamento, temos que admitir uma perda total em porcentagem. Para tanto, usamos as equações seguintes:

$$P_{\infty} = 0,7 P_i \quad (16)$$

$$\sigma_{cp} = (P_{\infty} \cdot ep^2 / I). (P_{\infty} P_{\infty} / A) \quad (17)$$

$$P_{nd} = 0,9 (P_{\infty} + \alpha_p \cdot A_p \cdot \sigma_{cp}) \quad (18)$$

$$\epsilon_{pnd} = P_{nd} / A_p \cdot E_p(19)$$

Onde a Variável α_p é a relação entre os módulos de deformação.

As cordoalhas são padronizadas pela NBR 7483 e para calcula-las utiliza-se a seguinte fórmula:

$$A_p = E_p / E_c(20)$$

Onde:

$$E_p = 195000;$$

$$E_c = 0,85 \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{c,j}}.$$

Sendo que:

E_c = módulo de deformação a secante do concreto;

E_p = módulo de deformação do aço de Protensão;

A_p = área de protensão;

P_∞ = pré-alongamento;

σ_{cp} = Tensão do concreto sob efeito da protensão;

α_p = Relação entre os módulos de deformação;

P_{nd} = é a força externa ou força de neutralização;

\mathcal{E}_{pnd} = Pré-alongamento do fio protendido.

3.6 Equações de equilíbrio

Para realizar o equilíbrio de força e momento faz – se adoção de um valor de x , e posteriormente esse valor é verificado pela restrição definida para Bx .

$$Bx = x/d \quad (21)$$

Assim para $x < 0,259 \cdot d \rightarrow$ Domínio2.

$$\mathcal{E}_c = x/d - x \quad (22)$$

$$\mathcal{E}_s = (1 - Bx)/Bx \quad (23)$$

\rightarrow Logo $\Delta \mathcal{E}_p = \mathcal{E}_s$;

\rightarrow Estão na mesma posição de Protensão e a armadura do banzo inferior da treliça com o mesmo alongamento ($\Delta \mathcal{E}_p = \mathcal{E}_s$);

\rightarrow Armadura adicional é calculada em função da sua altura.

$$\mathcal{E}_s \text{ armadura adicional} = \mathcal{E}_c = (0,205 - x) / x \quad (24)$$

Cálculo paraalongamento dos fios de protensão:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{pnd} + \Delta\varepsilon_p \quad (25)$$

Em que:

B_x = Equilíbrio de força e momento;

ε_s = Alongamento da armadura adicional;

ε_p = Alongamento da armadura de protensão;

X = Altura da linha neutra;

d = Altura útil da seção (distância do centro de gravidade da armadura tracionada até a borda comprimida da seção).

Cálculo das Tensões nos fios e armaduras passivas:

$$\sigma_{sd}(treliça) = 210000 \cdot \varepsilon_s \quad (26)$$

$$\sigma_{sd}(adicional) = 210000 \cdot \varepsilon_s \text{ armadura adicional} \quad (27)$$

$$\sigma_{sd} = E_p \cdot \varepsilon_p \quad (28)$$

Devem ser respeitados os limites:

$$\sigma_{sd} \leq f_{yd} = 500/1,15 = 435 \text{ MPA}$$

$$\sigma_{sd} \leq f_{pyd} = 0,9(1750/1,15) = 1369 \text{ MPA}$$

3.6.1 Calculando o equilíbrio das forças entre o concreto e aço da treliça e fios protendidos

Equação para o cálculo da resultante de compressão no concreto se dá por:

$$R_{cd} = (0,85 \cdot f_{cd}/1,4) \cdot (b_w) \cdot (0,8 \cdot x) \quad (29)$$

Resultante de tração na armadura protendido será:

$$Rpd = fpyd(2.Ap) \quad (30)$$

O cálculo utilizado para verificar a resultante de forças da armadura da treliça é realizado por meio da equação:

$$Rsd(treliça) = Fyd(Atreliça) \quad (31)$$

O cálculo utilizado para verificar a resultante de forças da armadura adicional é:

$$Rsd(adicional) = As.fyd \quad (32)$$

3.6.2 Verificando o Equilíbrio dos momentos

$$Mrd = Rcd(h/2 - 0,4x) + \sigma_{sd}.As(treliça)(d-h/2) + Rpd(dp-h/2) + \sigma_{sd}(adicional)(d'-h/2) \quad (33)$$

Em que:

$$Mrd > Md$$

Onde:

h = altura total da seção;

d = altura útil da seção;

d' = distância do centro de gravidade da armadura até a borda mais próxima da seção;

dp = altura total da seção protendida (sapata);

x = distância da linha neutra até a borda mais comprimida ou menos tracionada da seção;

$As(adicional)$ = Área da armadura adicional;

$As(treliça)$ = Área da armadura da treliça;

Rcd = Força resistida pelo concreto;

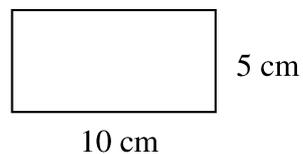
Rpd = Força resistida pela armadura de protensão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aplicando os métodos chegamos aos seguintes resultados do dimensionamento de uma laje treliçada protendida com o vão livre de 8 metros:

4.1 Cálculo utilizando a sapata da viga treliçada

Figura 11: Modelo da sapata



Fonte: autor (2018).

Cálculos realizados:

$$A = b \cdot h$$

$$A = 0,1 \cdot 0,05 = 0,005 \text{ m}^2$$

$$I_{\text{sap}} = B \cdot h^3/12$$

$$I_{\text{sap}} = 0,1 \cdot 0,05^3/12$$

$$I_{\text{sap}} = 1,042 \times 10^{-6}$$

$$Y_{\text{cg}} = b \cdot a^2/6$$

$$Y_{\text{cg}} = 0,1 \cdot 0,005^2/6$$

$$Y_{\text{cg}} = 4,167 \times 10^{-4}$$

$$f_{\text{ck}} = 30 \text{ MPA}$$

4.1.1 Cálculo de protensão usado

$$A_{\phi} = 28 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$f_{\text{ptk}} = 1750 \text{ MPA}$$

$$f_{\text{pyk}} = 1580 \text{ Mpa}$$

CP 175 RB

Protensão Inicial:

$$\sigma_{pi} \leq 0,77 f_{tk} ; 0,85 f_{py}$$

$$\sigma_{pi} \leq 0,77 f_{tk} =$$

$$\sigma_{pi} \leq 0,77 \cdot 1750 = 1347,5 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{pi} \leq 0,85 f_{py}$$

$$\sigma_{pi} \leq 0,85 \cdot 1580 = 1343 \text{ Mpa}$$

Pega - se o menor valor = $\sigma_{pi} \leq 1343 \text{ Mpa}$.

$$P_i = -2 \cdot A_s \cdot \sigma_{pi}$$

$$P_i = -2 \cdot 28 \times 10^{-6} \cdot 1343$$

$$P_i = 0,0752 \text{ MN}$$

$$P_a = 0,97 \cdot P_i$$

$$P_a = 0,97 \cdot 0,0752$$

$$P_a = 0,073 \text{ MN}$$

O $P_i = 0,0752 \text{ MN}$ é a força inicial de Protensão e o $P_a = 0,073 \text{ MN}$ é a força imediatamente anterior à transferência da protensão as peças pré= moldadas.

4.1.2 Cálculo de perda de protensão por escorregamento acomodação

O cálculo realizado para verificar a perda de protensão por escorregamento acomodação é dado por:

$$P_{anc} = (d / L \cdot E_{aço}) \cdot \sigma_{pi} \cdot A_p$$

$$P_{anc} = (4 / 8 \cdot 0,7\%) \cdot 1343 \cdot 28 \cdot 10^{-6}$$

$$P_{anc} = 2,686 \square \quad 3\%$$

4.2 Cálculo para verificação do concreto no ato da protensão

$$\sigma_{cp} = Pa \div A_{sap}$$

$$\sigma_{cp} = 0,073 \div 0,005$$

$$\sigma_{cp} = - 14 \text{ Mpa}$$

$$\sigma \text{ limite} = 0,7 f_{ckj}$$

$$\sigma \text{ limite} = 0,7 \cdot 0,7 \cdot 30 =$$

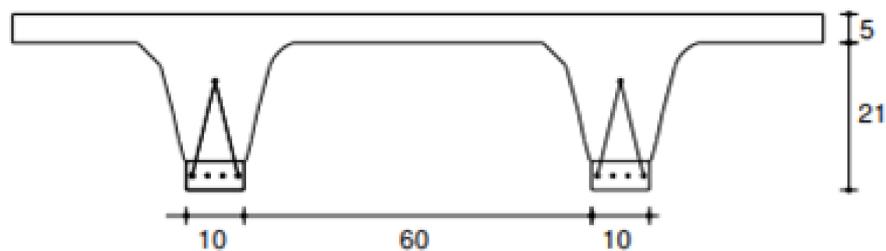
$$\sigma \text{ limite} = 14,7 \text{ Mpa}$$

Conclui-se que a resistência do concreto está de acordo com o esperado, pois $\sigma_{cp} < \sigma \text{ limite}$.

4.3 Seção completa

Utilizou forma plástica removível de 21 cm de altura, distância entre eixos de 70 cm e altura da mesa de 5 cm. Temos uma laje por nervura com as seguintes características geométricas:

Figura 12: Seção completa da laje



Fonte: Albuquerque *et al* (2005).

- Em que: área e o centro de gravidade foram encontrados pelo método analítico, calculou-se da seguinte forma:

$$A = 0,0602 \text{ m}^2$$

$$Y_{cg} = 0,1827 \text{ m}$$

$$I = B.A^2/12$$

$$I = 0,20.0,0602^3/12$$

$$I = 3,63 \times 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$W = b. a^2/6$$

$$W = 0,20.0,0602^2/6$$

$$W = 1,2 \text{ m}^3$$

Observamos que: mesmo que a seção entre os eixos é de 70 cm a NBR6118 (2003) permite a verificação do cisalhamento comolaje, porque a espessura da nervura média é de 12cm.

4.4 Solicitações no meio do vão

Calculam-se as solicitações no meio do vão, considerando que:

$$L = 8,0\text{m}$$

$$g_1 = \text{ppsap}$$

$$g_1 = Y. H$$

$$g_1 = 25.0,05$$

$$g_1 = 1,25\text{kN/m}$$

$$g_2 = \text{ppcml}$$

$$g_2 = 1,38 \text{ kN/m (adotado peso próprio do concreto moldado em } in \text{ loco)}$$

$$g_3 = 1,05 \text{ kN/m (adotado revestimento e pavimentação pela norma NBR 6120)}$$

$$q = 2,0 \text{ kN/m (adotado pela norma NBR 6120)}$$

A laje dimensionada refere-se uma laje residencial.

$$\Sigma (g + q) = 5,68 \text{ kN/m}$$

$$M_d = 1,4 \Sigma (g + q).l^2/8$$

$$M_d = 1,4 \Sigma (5,68).8^2/8$$

$$M_d = 0,0636 \text{ MN.m}$$

O momento Fletor encontrado da laje é de 0,0636 MN.m.

4.5 Cálculo da flexa imediata

$$a_i = \alpha \cdot p l^4 / 12 EI$$

$$a_i = 2,46 \cdot (4,48 \times 10^{-4}) \cdot 800^4$$

$$a_i = 4,59 \times 10^6 \text{ cm}$$

$$EI = Ecs \cdot Ic$$

$$EI = 26,071 \cdot 3,14 \times 10^{-4}$$

$$EI = 8,186 \text{ kn/m}^{-7}$$

$$EI = 8,18629 \times 10^{-7} \text{ cm}$$

$$Ecs = 0,85 \cdot 5600 \cdot \sqrt{fck}$$

$$Ecs = 0,85 \cdot 5600 \cdot \sqrt{30}$$

$$Ecs = 26071,59 \text{ Mpa}$$

$$Ecs = 26,071 \text{ kN/m}^2$$

$$p = g + \psi_2 q$$

$$p = 3,68 + 0,8$$

$$p = 4,48 \text{ kN/m}^2$$

$$\psi_2 q = 0,4 \cdot q$$

$$\psi_2 q = 0,4 \cdot 2 =$$

$$\psi_2 q = 0,8 \text{ kN/m}^2$$

$$Ic = 3,63 \times 10^{-6} \text{ m}^4$$

4.6 Cálculo do estado limite último (flexão)

$$e_p = y_{cg2} - y_{cg1}$$

$$e_p = 0,1827 - 0,025$$

$$e_p = 0,1577 \text{ m}$$

O valor encontrado é à distância do centro de gravidade da seção completa aos fios de protensão.

4.7 O pré-alongamento

Admitiu uma perda de 30%, para elaboração desse cálculo.

$$P_{\infty} = 0,7 P_i$$

$$P_{\infty} = 0,7 \cdot 0,0752 = 0,0526 \text{ MN}$$

$$\sigma_{cp} = (P_{\infty} \cdot e_p^2 / I) \cdot (P_{\infty} / A)$$

$$\sigma_{cp} = (0,0526 \cdot 0,1577^2 / 3,14 \times 10^{-4}) \cdot (0,0526 / 0,0602)$$

$$\sigma_{cp} = 5,039 \text{ Mpa}$$

$$P_{nd} = 0,9 (P_{\infty} + \alpha_p \cdot A_p \cdot \sigma_{cp})$$

$$P_{nd} = 0,9 (0,0526 + 7,47 \cdot 28 \times 10^{-6} \cdot 5,039)$$

$$P_{nd} = 0,0480 \text{ MN}$$

$$\alpha_p = E_p / E_c$$

$$\alpha_p = 195000 / 26071,6$$

$$\alpha_p = 7,47 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{pnd} = P_{nd} / A_p \cdot E_p$$

$$\epsilon_{pnd} = 0,0480 / (28 \times 10^{-6}) \cdot 195000 = 0,0044$$

4.8 Equilíbrio de força e momento

Para tanto, tem-se o cálculo para equilíbrio de força e momento.

$$X = 0,028 \text{ (adotado)}$$

$$B_x = x/d$$

$$B_x = 0,028 / 0,235$$

$$Bx = 0,1191$$

$$Bx = 0,1191 < 0,259 \rightarrow \epsilon_c = 0,01 \cdot 0,028 / (0,235 - 0,028) = 0,0014$$

Assim para $x < 0,259$. $d \rightarrow$ Domínio 2

$$\epsilon_s = (1 - Bx) / Bx$$

$$\epsilon_s = (1 - 0,1191) / 0,1191$$

$$\epsilon_s = 0,0104 \rightarrow \Delta \epsilon_p = \epsilon_s$$

$$\epsilon_{s \text{ armadura adicional}} = \epsilon_c = (0,205 - x) / x$$

$$\epsilon_{s \text{ armadura adicional}} = \epsilon_c = (0,205 - 0,028) / 0,028 = 0,0089$$

Temos o mesmo Alongamento para a armadura de protensão e a armadura do banzo inferior da treliça. Calculamos a armadura adicional em função da altura.

4.9 Alongamento dos fios de protensão

O cálculo do alongamento dos fios de protensão se dá por:

$$\epsilon_p = \epsilon_{pnd} + \Delta \epsilon_p$$

$$\epsilon_p = 0,0044 + 0,0104 = 0,0148$$

4.10 Tensões nos fios e armaduras passivas

O cálculo do alongamento das tensões nos fios e armaduras passivas se dá por:

$$\sigma_{sd}(\text{treliça}) = 210000 \cdot \epsilon_s$$

$$\sigma_{sd}(\text{treliça}) = 210000 \cdot 0,0104 = 2037 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{sd}(\text{adicional}) = 210000 \cdot \epsilon_{s \text{ armadura adicional}}$$

$$\sigma_{sd}(\text{adicional}) = 210000 \cdot 0,0089 = 1743 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{sd} = E_p \cdot \epsilon_p$$

$$\sigma_{sd} = 195000 \cdot 0,0148 = 2886 \leq f_{pyd} = 0,9 \cdot (1750/1,15) = 1369 \text{ Mpa}$$

Devem ser respeitados os limites:

$$\sigma_{sd} \leq f_{yd} = 600/1,15 = 522 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{sd} \leq f_{pyd} = 0,9(1750/1,15) = 1369 \text{ Mpa}$$

4.11 Cálculos do equilíbrio das forças entre o concreto e aço da treliça e fios protendidos

O cálculo do equilíbrio das forças entre o concreto e aço da treliça e fios protendidos se dá por:

$$R_{cd} = (0,85 \cdot f_{cd}/1,4) \cdot (b_w) \cdot (0,8 \cdot x)$$

$$R_{cd} = (0,85 \cdot 35/1,4) \cdot 0,7 \cdot 0,8 \cdot 0,028$$

$$R_{cd} = 0,333 \text{ MN}$$

$$R_{pd} = f_{pyd} \cdot (2 \cdot A_p)$$

$$R_{pd} = 1369 \cdot (2 \cdot 2,28 \cdot 10^{-6}) =$$

$$R_{pd} = 0,0767 \text{ MN}$$

$$R_{sd} (\text{treliça}) = F_{yd} (A_{\text{treliça}})$$

$$R_{sd} (\text{treliça}) = 522 \cdot (0,48 \cdot 10^{-4}) =$$

$$R_{sd} (\text{treliça}) = 0,0250 \text{ MN}$$

$$R_{sd} (\text{adicional}) = A_s \cdot f_{yd}$$

$$R_{sd} (\text{adicional}) = (3,23 \cdot 10^{-4}) \cdot 522 = 0,168 \text{ MN}$$

$$R_{cd} = 0,0250 + 0,0767 + 0,168 = 0,2697$$

4.12 Equilíbrio dos momentos

O cálculo do equilíbrio dos momentos é realizado através das forças de resistência, conforme abaixo:

$$M_{rd} = R_{cd} (h/2 - 0,4x) + f_{yd} \cdot A_s (\text{treliça}) (d - h/2) + R_{pd} (d_p - h/2) + f_{yd} (\text{adicional}) (d' - h/2)$$

$$\text{Mrd} = 0,333(0,26/2-0,4 \cdot 0,028) + 522 \cdot 0,48 \times 10^{-4} \cdot (0,235-0,26/2) + 0,0767 (0,05-0,26/2) + 522 \cdot 3,23 \times 10^{-4} \cdot (0,025-26/2) =$$

$$\text{Mrd} = 0,0660 > \text{Md OK!}$$

5 CONCLUSÃO

Através dos estudos feitos pode-se concluir que para um eficiente processo de fabricação de lajes treliçadas protendidas, devem usar um aço de protensão com uma carga de tração adequada. A concretagem deve ser feita com um concreto de alta resistência que suporte a carga ao serem cortados os fios.

Tendo esses requisitos temos um dimensionamento de uma laje treliçada protendida em todas as cargas permanentes e sobre carga que resultam o momento da laje venham a ser menor que as forças de resistência do aço protendido, treliça, armadura adicional e concreto que resultam o momento de equilíbrio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AECWEB. **Protensão Aderente**. 2018. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/prod/e/protensao-aderente-impacto-engenharia_23599_24288> Acesso em 22 out. de 2018.

ALBUQUERQUE, A. T.; MOTA, J. E.; CARACAS, J. E.; NOBRE, E. G. Lajes Treliçadas Protendidas (Pré-Tração). **Anais...** 1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto Produção em Concreto Pré-moldado, São Carlos, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7197**. Projetos de estruturas de concreto protendido. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7482**. Fios de aço para concreto protendida. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7483**. Cordoalha de aço para concreto protendido. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14859**. Laje pré-fabricada: requisitos. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14859-1**: Lajes pré-fabricadas de concreto – Parte 1: Vigotas, minipainéis e painéis – Requisitos. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14861**. Lajes alveolares pré-moldadas de concreto protendido. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14931**. Execução de Estruturas de Concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

AVILLA JUNIOR, J. **Contribuições ao projeto e execução de lajes lisas nervuradas pré-fabricadas com vigotas treliçadas**. 2009. Dissertação (Pós-Graduação em Construção Civil). Universidade Federal de São Carlos, 2009.

AWA, Comercial. **Barras de aço para protensão**. 2018. Disponível em: <<http://awacomercial.com.br/produtos/>>. Acesso em 19 set. de 2018.

BELGO BEKAERT. **Cordoalhas**. 2018. Disponível em: <<http://www.belgobekaert.com.br/Produtos/Paginas/Cordoalha.aspx>> Acesso em 22 out. de 2018.

CAZZO, R. L. **Lajes Protendidas**: aplicações em geral. 2008. Universidade de São Francisco. Disponível em: <<http://lyceumonline.usf.edu.br/salavirtual/documentos/1269.pdf>> Acesso em 03 out. de 2018.

CONCRENORTE. **Conheça os principais tipos de lajes.** 2018. Disponível em: <<https://concrenorte.com.br/conheca-os-principais-tipos-de-lajes-protendidas-trelicadas-e-pi/>> Acesso em 25 out. de 2018.

EMERICK, A. A. Projeto e Execução de Lajes Protendidas, Rio de Janeiro: **Interciência**, 2002, 191 pg.

HANAI, J.B. **Fundamentos do concreto protendido**, E-Book de apoio para o curso de engenharia civil. São Carlos, 2005.

IMPACTO PROTENSÃO. **Protensão não aderente.** 2018. Disponível em: <<http://impactoprotensao.com.br/catalogos/>> Acesso em 19 set. de 2018.

MFRURAL. **Fios de treliçados.** 2018. Disponível em: <<http://www.mfrural.com.br/busca.aspx?palavras=cabo+aluminio+awg+caa+alma+aco&categoria=6-instalacoes-rurais>> Acesso em 15 out. de 2018.

MIGLIORI JUNIOR, A. R. **Curso Concreto Protendido: Projeto e Execução.** 2013. Disponível em: <<http://site.abece.com.br/index.php/noticias-2013/2062-curso-concreto-protendido-projeto-e-execucao-julho2013>> Acesso em 29 ago. de 2018.

PEF – Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica. **Materiais e sistemas para protensão.** 2003. Disponível em: <<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.../cap-02-materiais-e-sistemas-de-protensao.pdf>> Acesso em: 09 set. de 2018.

PFEIL, W. **Concreto protendido**, 1: introdução. Rio de Janeiro: LTC Editora, 1984.

TRELIART. **Manual de fabricação lajes treliças.** 2002. Disponível em: <http://www.treliart.com.br/downloads/Manual%20de%20Fabricacao.pdf> Acesso em: 18 ago. de 2018.

VERISSIMO, G.S; CÉSAR JR, K.M.L. **Concreto protendido: fundamentos básicos.** 1998. Disponível em: <http://wwwp.feb.unesp.br/lutt/Concreto%20Protendido/CP-vol1.pdf> Acesso em: 10 out. de 2018.