

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE
CAMPUS ARACAJU
DIRETORIA DE ENSINO
COORDENADORIA DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

ALISSON RAFAEL DORIA SANTOS

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE UM *SOFTWARE* PARA O
DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS EM CONCRETO
PROTENDIDO**

MONOGRAFIA

ARACAJU

2019

ALISSON RAFAEL DORIA SANTOS

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE UM *SOFTWARE* PARA O
DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS EM CONCRETO
PROTENDIDO**

Monografia apresentada como requisito parcial
à obtenção do título de Bacharel, da
Coordenação do Curso de Engenharia Civil, do
Instituto Federal de Sergipe – Campus Aracaju.

Orientador: Prof. Msc. Euler Wagner Freitas
Santos

ARACAJU

2019

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE

CAMPUS ARACAJU

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

TERMO DE APROVAÇÃO

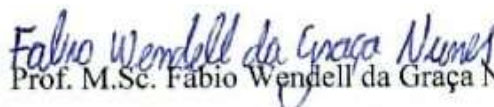
Título da Monografia Nº 148

ESTUDO DA ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DE UM SOFTWARE PARA O
DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS EM CONCRETO PROTENDIDO

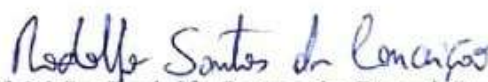
ALISSON RAFAEL DORIA SANTOS

Esta monografia foi apresentada às 08 horas e 30 minutos do dia 04 de novembro de 2019
como requisito parcial para a obtenção do título de BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo
assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.


Prof. M.Sc. Fábio Wendell da Graça Nunes

(IFS - Campus Lagarto)


Prof. M.Sc. Rodolfo Santos da Conceição

(IFS - Campus Aracaju)


Prof. M.Sc. Euler Wagner Freitas Santos

(IFS - Campus Aracaju)

Orientador

Prof. M.Sc. Luiz Alberto Cardoso dos
Santos

(IFS - Campus Aracaju)
Coordenador da COEC

Dedico este trabalho à minha família,
por todo o sacrifício.

AGRADECIMENTOS

Ofereço os meus agradecimentos primeiramente a Deus, por me dar forças para continuar e me por me guiar no caminho até aqui.

À minha família, que sempre se fez presente, se preocupou, e se esforçou ao máximo para que tudo isso fosse possível. Por serem minha base, onde sei que sempre poderei retornar, por fazerem de mim quem eu sou.

Ao meu orientador, Prof. Msc. Euler Wagner, pela paciência, dedicação e sabedoria no desenvolvimento desse trabalho. Por acreditar que, mesmo com os desafios do caminho, eu poderia chegar ao destino.

Aos professores que contribuíram de alguma forma para minha formação profissional e pessoal. À Marcílio e à Tatiana por saberem ouvir, quando se precisa ser escutado. A Rodolfo, por me ensinar que você é feito por suas ações, não por suas palavras. A Resende por exigir sempre o melhor. A Carla pela simplicidade e humildade. A Luiz Alberto pelo bom humor de sempre. A Emiliana pela gentileza, e por sempre ensinar a manter a paz, mesmo que tudo não vá como esperado. A Carlos Henrique por todo conhecimento e sabedoria.

Agradeço aos amigos que fiz e que me ajudaram nesses 5 anos. Numa jornada são muitas as dificuldades, e com cada novo desafio nos fazemos mais fortes. Obrigado a todos que participaram dessa caminhada até aqui, sou grato por tudo.

“O próprio Senhor irá à sua frente e estará com você; ele nunca o deixará,
nunca o abandonará. Não tenha medo! Não desanime!”
(Deuteronômio 31:8)

RESUMO

SANTOS, Alisson Rafael Doria. **ESTUDO DA ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DE UM SOFTWARE PARA O DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS EM CONCRETO PROTENDIDO** 67 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – Campus Aracaju. 2019.

O uso de ferramentas computacionais em elementos de concreto protendido ainda é considerado digno de estudo. Este trabalho objetiva verificar o grau de eficiência da ferramenta computacional TENDON-versão Silver, apresentando variações de situações que possibilitem analisar o seu desempenho no dimensionamento de vigas em concreto protendido. Foi adotado, para o carregamento acidental, o valor de 5 kN/m², valor em norma para ambientes de teatro (auditórios) e para o carregamento permanente os valores foram sendo variados para melhor entendimento do comportamento da peça mediante aumentos de carga, com o *software*. Variou-se os comprimentos de vão no qual a peça trabalharia, sendo estes 8 m, 10 m e 12 m, por serem comprimentos mínimos comuns ao uso da técnica construtiva da protensão no tipo de edificação aqui considerada. Algumas análises foram realizadas com as dimensões da seção transversal sendo mantidas constantes. Posteriormente, essas dimensões variaram entre 30 cm x 60 cm, 35 cm x 70 cm e 35 cm x 90 cm. Variou-se o perfil do cabo entre “Excêntrico Reto”, com a excentricidade padrão do *software* e com a excentricidade máxima permitida, e “Parabólico”. Pôde ser observado que os resultados obtidos pelo *software*, para as dimensões de flecha, passam com grande folga dentro do que a NBR 6118:2014 exige como máximo, sendo assim a flecha não foi um fator limitante para o dimensionamento em nenhum dos casos das classes de resistência do concreto. No estudo foi possível verificar que com o aumento da seção transversal obtém-se um aumento da capacidade portante das peças protendidas. Além disso, isso pode ser atingido também com o aumento da classe de resistência e da excentricidade. O *software* apresenta limitações quanto a capacidade de combinação de mais de um carregamento permanente e um carregamento acidental. A indisponibilidade do manual do usuário torna confusa a compreensão da execução nos casos de excentricidade máxima admitida. A ferramenta é capaz de atender a muitos dos fatores limitantes que a NBR 6118:2014 determina.

Palavra-Chave: *Software*, Concreto Protendido, dimensionamento estrutural.

ABSTRACT

SANTOS, Alisson Rafael Doria. **STUDY OF THE EFFICIENCY ANALYSIS OF A SOFTWARE FOR DIMENSING ELEMENTS IN PROTECTED CONCRETE.** 67f. Monography (Bachelor of Civil Engineering) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – Campus Aracaju. 2019.

The use of computational tools in prestressed concrete elements is still considered worthy of study. This work aims to verify the efficiency of the computational tool TENDON-Silver version, presenting variations of situations that allow to analyze its performance in the design of prestressed concrete beams. For accidental loading, the value of 5 kN/m² was adopted, a standard value for theater environments (auditoriums) and for permanent loading the values were varied to better understand the behavior of the piece by increasing load, with the *software*. The span lengths in which the piece would work were varied, being these 8 m, 10 m and 12 m, because they are minimum lengths common to the use of the prestressing construction technique in the type of building considered here. Some analyzes were performed with the cross-section dimensions being kept constant. Later, these dimensions ranged from 30 cm x 60 cm, 35 cm x 70 cm and 35 cm x 90 cm. The cable profile was varied between “Straight Eccentric”, with the *software's* standard eccentricity and the maximum allowable eccentricity, and “Parabolic”. It could be observed that the results obtained by the *software*, for the arrow dimensions, pass with great slack within what the NBR 6118:2014 requires as maximum, so the arrow was not a limiting factor for the dimensioning in any of the classes. of strength of the concrete. In the study it was possible to verify that with the increase of the cross section an increase of the carrying capacity of the prestressed parts is obtained. In addition, this can also be achieved by increasing resistance class and eccentricity. The *software* has limitations on the ability to combine more than one permanent load and one accidental load. The unavailability of the user manual makes the understanding of execution in the cases of maximum allowable eccentricity confusing. The tool is capable of meeting many of the limiting factors that NBR 6118:2014 determines.

Keywords: *Software*, Prestressed Concrete, structural dimensioning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Seção polida de um corpo de prova de concreto.....	19
Figura 2 - Areia natural.....	20
<i>Figura 3 - Pó de pedra/Brita 0/Brita 1.....</i>	<i>20</i>
Figura 4 - Viga em concreto simples.....	22
Figura 5 - Viga em concreto armado.....	22
Figura 6 - Aderência por adesão.....	23
Figura 7 - Aderência por atrito.....	23
Figura 8 - Aderência Mecânica.....	23
Figura 9 - Pós-tensão aderente de vigas.....	24
Figura 10 - Introdução de um estado prévio de tensões numa fila de livros. ...	25
Figura 11 - Esquema de traçado retilíneo centrado.....	26
Figura 12 - Distribuição de tensões na seção em função do ponto de aplicação da força de protensão(P).....	27
Figura 13 – Esquema de traçado retilíneo com excentricidade "e".	28
Figura 14 – Esquema de momento gerado pela força de protensão aplicada com excentricidade "e".....	28
Figura 15 - Esquema de elemento protendido com traçado curvilíneo.	28
Figura 16 - Esquema mostrando a ação das forças decompostas da força de protensão no traçado curvilíneo.	29
Figura 17 - Esquema de protensão ativa com aderência inicial.....	31
Figura 18 - Esquema de protensão ativa com aderência posterior.....	32
Figura 19 - Vigas com protensão aderente pós tracionada - concretada porem ainda não protendida.	32
Figura 20 - Cordoalha engraxada e componentes para protensão não aderente.	33
Figura 21 - Laje protendida por cordoalhas engraxadas.	33
Figura 22 - Ilustração das tensões em seção no Estado-limite de Descompressão Parcial.	35
Figura 23 - Aba "Sobre o Projeto" do TENDON.	38
Figura 24 - Aba "Carregamento" do TENDON.	39
Figura 25 - Seção "Verificações de Projeto" do software.....	40
Figura 26 - Seção "Fatores de carga", TENDON.	41
Figura 27 - Seção "Combinações de Carga" do software.	41

<i>Figura 28 - Aba "Geometria" do TENDON.</i>	42
<i>Figura 29 - Aba "Apoio" do software.</i>	42
Figura 30 - Seção "Vão e Perfil do cabo" do aplicativo.	43
Figura 31 - Seção "Materiais" do aplicativo.	44
Figura 32 - Seção "Configurações" do aplicativo.	45
Figura 33 - Seção "Configurações" do software.	45
Figura 34 - Seção "Resultado", mostrando a aba direita, onde é possível seleccionar qual diagrama deseja verificar ou gerar relatório geral.	46
Figura 35 - Aba "Resultados" do Tendon com as possibilidades de verificações quanto aos Estados Limites.	46
Figura 36 - Modelo do exemplo de Cholfe e Bonilha (2016).	48

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Carregamento Máxima (kN/m) para seção 30 cm x 60 cm.....	55
Gráfico 2 - Carregamento Máximo (kN/m) para seção 35 x 70.	55
Gráfico 3 - Carregamento Máximo (kN/m) para seção 35 cm x 90 cm.....	56
Gráfico 4 - Flecha Máxima para seção 30 cm x 60 cm.	57
Gráfico 5 - Flecha Máxima para seção 35 cm x 70 cm.	57
Gráfico 6 - Flecha Máxima Para Seção 35 cm x 90 cm.	58
Gráfico 7 - Carga Máxima para vão de 8 metros para Excentricidade Padrão x Excentricidade Máxima	60
Gráfico 8 - Flecha Máxima para vão de 8 metros para Excentricidade Padrão x Excentricidade Máxima.	61
Gráfico 9 - Comparação de deslocamentos entre as orientações de cabo na seção 30 cm x 60 cm para 12 metros de comprimento de vão.....	61
Gráfico 10 - Comparação de deslocamentos entre as orientações de cabo na seção 35 cm x 70 cm para 12 metros de comprimento de vão.....	61
Gráfico 11 - Comparação de deslocamentos entre as orientações de cabo na seção 35 cm x 70 cm para 12 metros de comprimento de vão.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Granulometrias para agregado graúdo	21
Tabela 2 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm.....	30
Tabela 3 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto	31
Tabela 4 - Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental.	34
Tabela 5 - Tabela Quadro Comparativo "Cholfe e Bonilha (2016) vs Tendon".	49
Tabela 6 - Perdas de Protensão para as seções analisadas	52
Tabela 7 - Valores Máximo para as Flechas segundo a NBR 6118:2014. *(L/250)	58
Tabela 8 – Variação de carga, flecha, FPC e N° de cordoalhas para concretos da classe C50.....	59

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ELS	Estado Limite de Serviço
ELS-W	Estado Limite de abertura das fissuras
ELS-F	Estado Limite de formação de fissuras
ELS-D	Estado Limite de descompressão
ELS-DP	Estado Limite de descompressão parcial
ELU	Estado Limite Último
NBR	Norma Técnica Brasileira
CA	Concreto Armado
CP	Concreto Protendido
CAA	Classe de Agressividade Ambiental
RN	Relaxação Normal
RB	Relaxação Baixa
FPC	Força Por Cordoalha

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	OBJETIVOS	18
2.1	OBJETIVO GERAL.....	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
3.1	CONCRETO SIMPLES.....	19
3.2	CONCRETO ARMADO	21
3.3	CONCRETO PROTENDIDO	24
3.3.1	Definições Iniciais	24
3.3.2	Traçados De Cabo	26
3.3.3	Prescrições Normativas Da NBR 6118:2014.....	29
3.3.4	O Aço e o Concreto No Concreto Protendido.....	36
3.4	Ferramentas Computacionais.....	36
3.4.1	Tendon, Versão Silver	38
4	METODOLOGIA.....	48
4.1	VERIFICAÇÃO PARA VALIDADE DO <i>SOFTWARE</i>	48
4.2	DEFINIÇÃO DOS PARAMETROS DO DIMENSIONAMENTO NO TENDON (SILVER) 50	
5	RESULTADOS	54
6	CONCLUSÃO.....	63
	REFERÊNCIAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

A NBR 6118:2014 (Projeto de estruturas de concreto — Procedimento) define elementos de concreto armado como sendo “Aqueles cujo comportamento estrutural depende da aderência entre concreto e armadura, e nos quais não se aplicam alongamentos iniciais das armaduras antes da materialização dessa aderência”.

Sabendo-se que o concreto possui uma baixa resistência à tração (cerca de 10% da sua resistência a compressão, para concretos de classe resistência convencional), e mediante algumas demandas estruturais, tais como a necessidade de suportar maiores cargas e vencer maiores vãos, surge o concreto protendido.

O concreto protendido pode ser entendido como um refinamento do concreto armado, no qual a ideia básica é aplicar tensões prévias de compressão nas regiões da peça que serão tracionadas pela ação do carregamento externo aplicado. Desse modo, as tensões de tração são diminuídas ou até mesmo anuladas pelas tensões de compressão pré-existentes ou pré-aplicadas (ZANETTE E VARGAS, 2012).

O concreto protendido propriamente dito teve sua primeira patente solicitada pelo engenheiro P. H. Jackson, em meados de 1872, em um sistema de união de blocos de concreto utilizando um tirante (ALMEIDA FILHO, 2002). Mas somente no final da década de 1920 que o engenheiro Eugène Freyssinet desenvolveu técnicas para diminuir as perdas de protensão ao utilizar aços de altas resistências. A protensão possibilita um nível menor de fissuração no concreto, garantindo uma melhor proteção da armadura contra corrosão.

A primeira obra em concreto protendido no Brasil foi a ponte do Galeão, localizada no Rio de Janeiro, construída em 1948 e inaugurada em janeiro de 1949, (MOREIRA, 2016). Desde a sua primeira aplicação, foram criadas normas que abordam exigências, definições, dimensionamento e emprego do concreto protendido. Sobre isso atualmente podem ser citadas as normas da ABNT: NBR 12655:2015 (Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento), NBR 15575:2013 (Edificações habitacionais — Desempenho), NBR 6118:2014, NBR 15200:2015 (Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio), NBR 8953:2015 (Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência), NBR 6120:2019 (Ações para o cálculo de estruturas de edificações) e NBR 6349:2008 (Barras, cordoalhas e fios de

ação para armaduras de protensão - Ensaio de tração). A NBR 6118:2014 é atualmente a principal norteadora dos projetos envolvendo elementos em concreto protendido.

Atualmente o Concreto Protendido se apresenta na construção civil como uma tecnologia inteligente, eficaz, duradoura e já consolidada, pois é capaz de oferecer ótimas relações custo-benefício (VERÍSSIMO, 2018).

Grande parte do desenvolvimento da técnica de protensão no concreto se deve especialmente ao surgimento de empresas especializadas em concreto protendido que tornaram a aplicação de elementos protendidos viável economicamente para algumas situações, tais como pontes, viadutos, e outras situações de elementos estruturais de edificações com vãos necessários de maior magnitude. Além disso, o surgimento de *softwares* e aplicativos que facilitam o processo de compreensão e da aplicação prática do sistema de protensão favoreceu o processo de dimensionamento de elementos em concreto protendido.

Com o crescimento da construção civil e o avanço tecnológico, a associação entre ferramentas computacionais e os diversos métodos de cálculos tornou-se vital para a elaboração de projetos cada vez mais complexos de forma que atendam sua funcionalidade com segurança. Entretanto, segundo Passos (2017), o número de publicações sobre a utilização de *softwares* no ensino de Engenharia Civil é relativamente baixo, esse número é ainda menor quando voltado para o dimensionamento de elementos protendidos.

Um fator a ser observado é quanto ao custo dessas ferramentas, que por sua vez é relativamente elevado. Alguns *softwares*, como o TQS PREO (TQS Informática, 2019), possuem assinaturas que podem chegar a valores superiores a R\$1660,00/mês. Mas mesmo com um custo que pode vir a ser bem elevado, a relação custo-benefício desses *softwares* justifica o uso de tais ferramentas uma vez que estas permitem um ganho significativo no tempo gasto na fase de projeto de um empreendimento. Tal relação não poderia ser diferente quando se trata de elementos em concreto protendido, uma vez que para projetos desses elementos há uma maior escassez de ferramentas voltadas ao dimensionamento.

Entretanto, faz-se necessário um estudo se tais ferramentas conseguem atender de forma eficiente as normas vigentes e ainda se contemplam em seus algoritmos os requisitos de segurança, desempenho e custo, indispensáveis para os sistemas construtivos de edificações, inclusive para as estruturas.

O estudo dar-se-á através de análises que verifiquem como os elementos pretendidos trabalham ao longo dos estágios de carregamento e nos estados limites de dimensionamento e ainda de como o *software* disponibiliza essas informações, visando o desempenho dos elementos e atendimento às normas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Analisar a eficiência do *software* TENDON, versão Silver, quanto a capacidade de dimensionar elementos em concreto protendido e disponibilizar as devidas informações para seus usuários de forma que facilite a compreensão e o entendimento da técnica de protensão.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

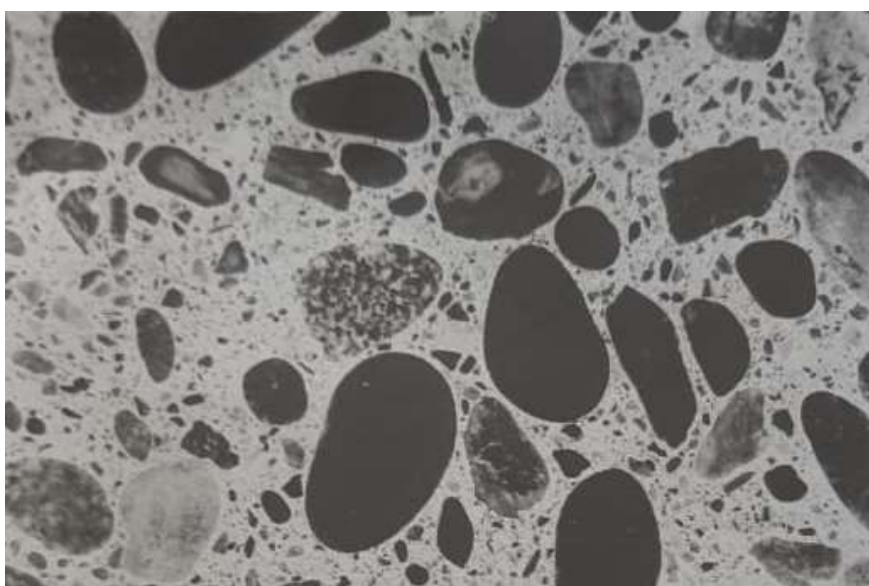
- Verificar o desempenho do *software* em relação à influência da carga no comportamento das flechas, para atendimento ao Estado Limite de Serviço de acordo com o que a NBR 6118:2014 preconiza;
- Verificar o desempenho quanto a relação da carga máxima admitida para determinadas classes de resistência do concreto;
- Verificar como a variação do comprimento de vão pode influenciar no dimensionamento, tanto nas deformações limites como nas classes de resistência de concretos mínimas;
- Verificar a variação das forças por cordoalha em função da variação do vão, da classe de resistência do concreto e da carga atuante;
- Verificar a influência da variação de seções transversais típicas empregadas na definição de classes de resistência do concreto, dos vãos limites e das cargas máximas;
- Identificar eventuais limitações de emprego da ferramenta computacional.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 CONCRETO SIMPLES

O concreto é um dos materiais mais tradicionais da construção civil, sendo composto por cimento, água, agregado miúdo (areia) e agregado graúdo (pedra ou brita) e ar. Na Figura 1 é mostrada uma seção polida de um corpo de prova de concreto. Alguns produtos podem ser acrescentados diretamente ao concreto, com a função de possibilitar-lhe o desenvolvimento de propriedades específicas, como, por exemplo, os aditivos modificadores de tempo de pega, e os plastificantes ou ainda os superplastificantes.

Figura 1 - Seção polida de um corpo de prova de concreto.



Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

Dentre os constituintes do concreto simples, o cimento, em forma de pasta (cimento e água) responde efetivamente por propriedades importantes do concreto, tais como resistência, durabilidade e estabilidade. A região da interface pasta-agregado (zona de transição) é de forte influência nas propriedades do concreto endurecido, considerada o elo mais fraco de ligação (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Os agregados têm forte interferência na massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto (MEHTA E MONTEIRO, 2014). Logo, as propriedades mais importantes do agregado são sua massa específica, textura,

granulometria, resistência a abrasão e sanidade, uma vez que a composição química da rocha matriz se torna menos importante que suas características físicas quando não houver elementos reativos com o cimento ou meio ambiente.

Na classificação dos agregados, quanto as dimensões de suas partículas, eles dividem-se em miúdo, como as areias (Figura 2), e graúdo, como as britas e pedras (Figura 3). “O agregado miúdo tem diâmetro máximo igual ou inferior a 4,8 mm, e o agregado graúdo tem diâmetro máximo superior a 4,8 mm” (BASTOS, 2006).

Figura 2 - Areia natural.



Fonte: O Autor (2019).

Figura 3 - Pó de pedra/Brita 0/Brita 1.



Fonte: O Autor (2019).

A ABNT NBR 7211:2009 (Agregados para concreto - Especificação) define agregado graúdo como “agregados cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm”. Logo tem-se a classificação disponível na Tabela 1.

Tabela 1 - Granulometrias para agregado graúdo.

Tipo de Brita	Granulometria
Brita 0 ou pedrisco	de 4,8 mm a 9,5 mm
Brita 1	de 9,5 mm a 19 mm
Brita 2	de 19 mm a 25 mm
Brita 3	de 25 mm a 50 mm
Brita 4	de 50 mm a 76 mm
Brita 5	De 76 mm a 100 mm

Fonte: Ministério de Minas e Energia (2009).

O concreto é atualmente o segundo material mais utilizado pelo homem, perdendo somente para a água (PINHEIRO, 2007). Sua utilização é da proporção de mais de 1 tonelada por habitante.

Sendo o concreto um material com um grau de resistência a compressão e durabilidade elevados, sua aplicação na construção é de grande proveito. Apesar disso, o concreto possui uma baixíssima resistência ao esforço de tração. Por isso o concreto comum, atualmente, é pouco usado na construção civil.

Entretanto, quando armado, seu uso é bastante ampliado, sendo este o mais utilizado nos dias de hoje.

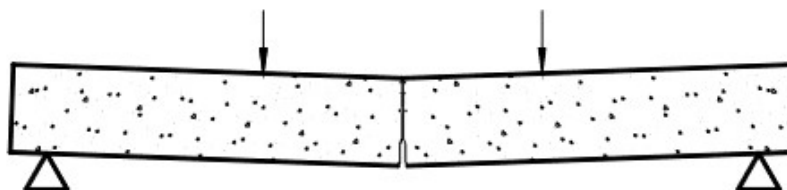
3.2 CONCRETO ARMADO

O concreto armado surgiu por volta de 1850 (BASTOS, 2006), e é constituído pela união do concreto com armações de aço, no qual o concreto responde muito bem aos esforços de compressão e o aço à esforços de tração, e ainda onde o primeiro protege o segundo das intempéries que poderiam provocar sua deterioração (corrosão), reduzindo sua vida útil.

Ainda segundo Bastos (2006), a união do concreto com o aço somente é possível devido ao fenômeno de aderência, que faz com que ambos os materiais trabalhem de forma solidária. Tal aderência faz com que as deformações no aço e no concreto devam ser muito próximas.

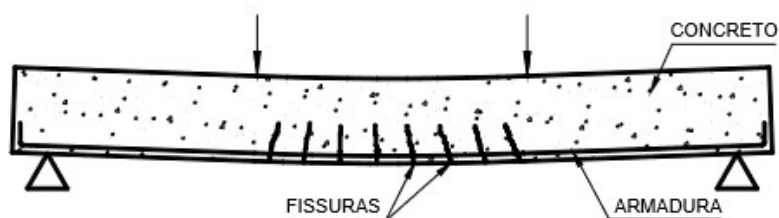
Um exemplo ilustrativo de como o concreto e o aço trabalham juntos, de forma solidaria, é obtido ao analisar uma viga de concreto simples que rompe bruscamente logo quando surgem as primeiras fissuras (Figura 4). Mas em uma viga de concreto armado a resistência à tração na flexão da peça é elevada e mesmo com o surgimento de fissuras, a estrutura ainda pode suportar bem aos esforços solicitantes (Figura 5).

Figura 4 - Viga em concreto simples.



Fonte: Bastos (2006).

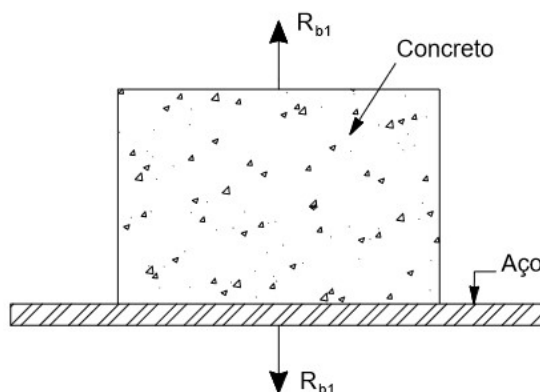
Figura 5 - Viga em concreto armado.



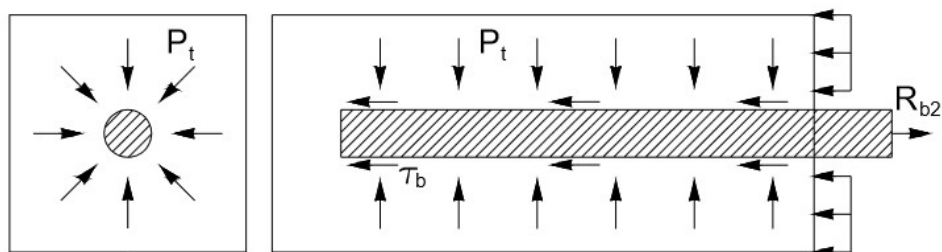
Fonte: Bastos (2006).

A NBR 6118:2014 define como sendo elementos de concreto armado “aqueles cujo comportamento estrutural depende da aderência entre concreto e armadura, e nos quais não se aplicam alongamentos iniciais das armaduras antes da materialização dessa aderência”.

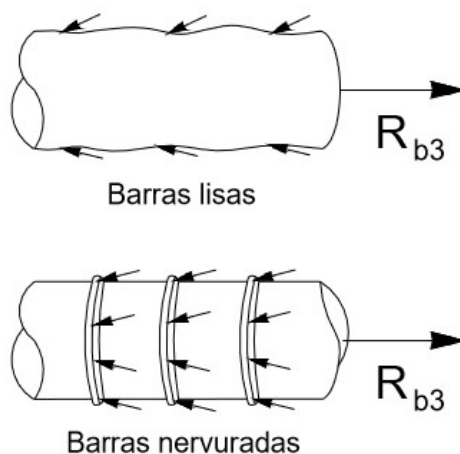
A aderência que torna a solidariedade do concreto e do aço possível pode ser classificada em aderência por adesão, por atrito e mecânica. A adesão ocorre como resultado das ligações físico-químicas que ocorrem na superfície dos dois materiais durante a pega (Figura 6). O atrito depende do coeficiente de atrito entre os materiais e é responsável pelo surgimento de uma pressão transversal na área de contato (Figura 7). A aderência mecânica ocorre devido a existência de nervuras ou irregularidades presentes nas barras de aço (Figura 8), sendo essa a parcela mais importante da aderência total (FUSCO, 2000).

Figura 6 - Aderência por adesão.

Fonte: Fusco (2000).

Figura 7 - Aderência por atrito.

Fonte: Fusco (2000).

Figura 8 - Aderência Mecânica.

Fonte: Fusco (2000).

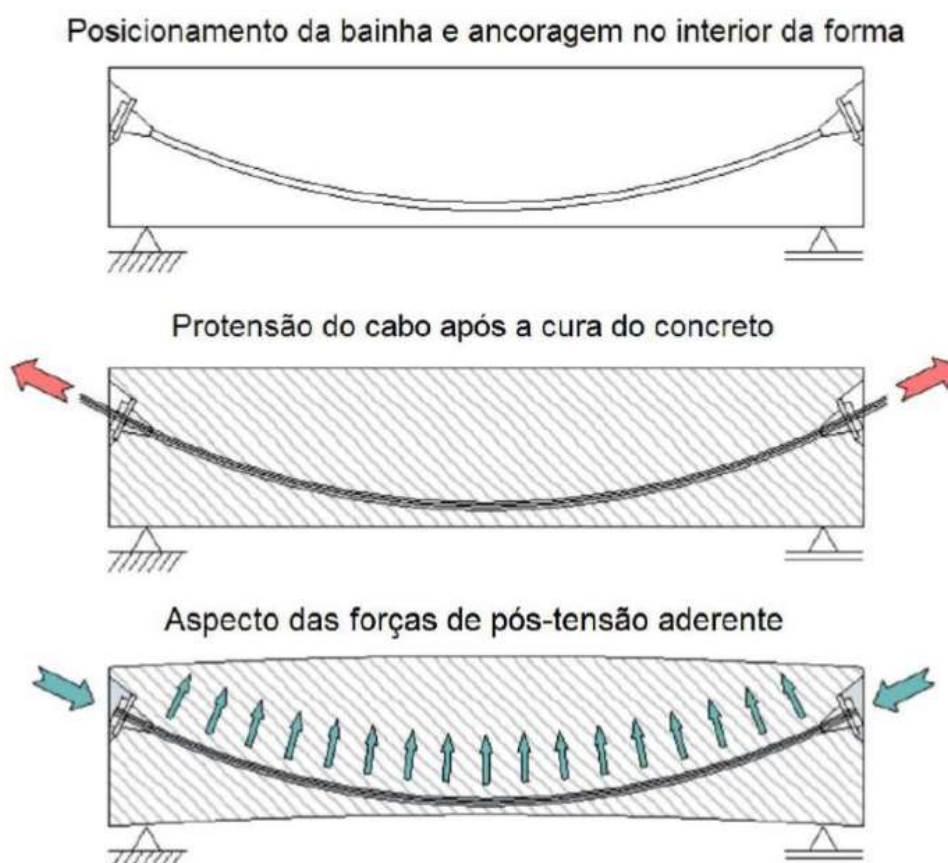
O concreto armado na construção civil é aplicado de diversas formas tais como estruturas de edifícios, pisos industriais, obras hidráulicas, rodovias, coberturas, torres, muros de arrimo, pontes, viadutos, entre outras construções portantes.

3.3 CONCRETO PROTENDIDO

3.3.1 Definições Iniciais

A união do concreto com o aço permite que o primeiro resista aos esforços de compressão e o segundo aos de tração; entretanto, no concreto armado, o concreto presente na parte tracionada não resiste bem aos esforços, exigindo elementos maiores mediante cargas mais elevadas, porém essas dimensões podem ser reduzidas ao inserir tensões prévias no aço, tracionando-o para que este comprima o concreto, reduzindo ou até anulando completamente as regiões tracionadas pela carga (figura 9).

Figura 9 - Pós-tensão aderente de vigas.



Fonte: Ortega (2017).

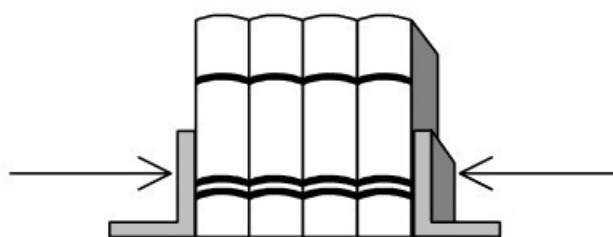
A NBR 6118:2014 define armaduras ativas como “armadura constituída por barras, fios isolados ou cordoalhas, destinada à produção de forças de protensão, isto é, na qual se aplica um pré-alongamento inicial”. A mesma NBR define armadura

passiva como “qualquer armadura que não seja usada para produzir forças de protensão, isto é, que não seja previamente alongada”.

O concreto protendido é uma técnica ainda mais recente e inovadora, tendo o primeiro trabalho consistente sobre o concreto protendido sendo apresentado em 1928 por Freyssinet, que continuou seus estudos tornando possível a criação de métodos construtivos, equipamentos, aços e concretos especiais, e suas patentes (BASTOS, 2006).

Segundo Veríssimo e Cesar (1998), a filosofia da protensão pode ser facilmente visualizada ao se colocar livros enfileirados horizontalmente, onde para que os livros sejam levantados sem que caiam é necessária a aplicação de uma força horizontal de compressão para produzir uma força de atrito maior entre os livros, sendo assim capaz de superar o peso próprio do conjunto, como mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Introdução de um estado prévio de tensões numa fila de livros.



Fonte: Veríssimo e Cesar (1998).

Ainda segundo Veríssimo e Cesar (1998), “A partir de 1949, o desenvolvimento do concreto protendido se acelerou. Em 1950, realizou-se em Paris a primeira conferência sobre concreto protendido. Surgiu a FIP (Federation Internationale de la Precontrainte). No mesmo ano, Finster Walder executou a primeira ponte em balanços sucessivos. O método espalhou-se por todo o mundo. Na mesma época surgiram as cordoalhas de fios. O sistema de colocar os cabos de protensão em bainhas, no interior da seção transversal de concreto, de modo a possibilitar a protensão dos cabos com apoio no próprio concreto endurecido, estabelecendo-se, posteriormente, a aderência por meio de uma argamassa adequada de cimento, se impôs definitivamente. Esse sistema formou a base para a execução de estruturas protendidas de grandes vãos”. Sendo este o sistema de protensão com aderência posterior descrito na NBR 6118:2014, no item 3.1.8.

“A protensão representa um sistema construtivo no qual, por meio de um processo mecânico, o aço é protendido (tensionado) dentro de limites, com o máximo aproveitamento da resistência do material, observando a segurança operacional do processo” (CHOLFE, 2016).

3.3.2 Traçados De Cabo

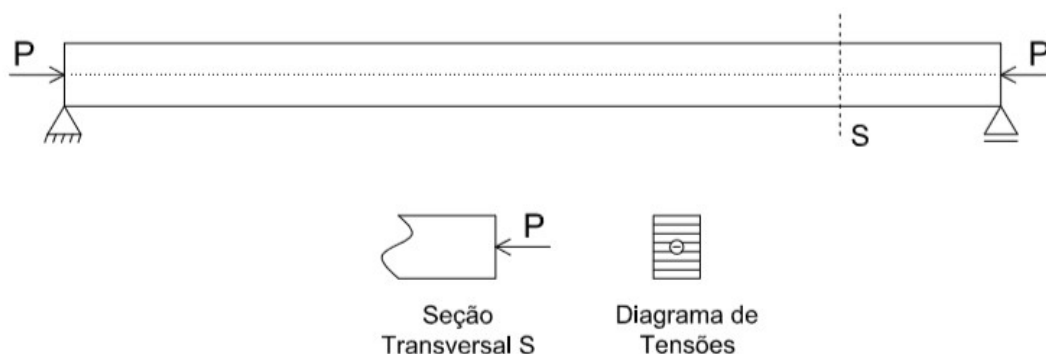
Segundo Veríssimo e César (1998), o traçado dos cabos é fundamental para a disposição final dos esforços presentes em determinado elemento protendido. Visto que estes interferem nas ações que irão se opor aos esforços, devem ser projetados e ajustados de forma situacional, variando de caso a caso.

“A armadura de protensão pode ser retilínea, curvilínea, poligonal ou de traçado misto, respeitada a exigência referente à armadura na região dos apoios” (NBR 6118:2014). Quanto a curvatura, deve-se respeitar os limites para os raios mínimos, em função do diâmetro do fio, cordoalha ou barra, ou diâmetro externo da bainha.

Na configuração com traçado retilíneo é comumente utilizado em elementos protendidos com pré-tração. Quando a força de protensão é aplicada no eixo baricêntrico, são produzidas tensões uniformes de compressão.

Ainda segundo Veríssimo e Cesar (1998), uma de suas vantagens é a facilidade na sua execução, uma vez que excentricidade permanece constante ao longo da peça protendida, conforme figura 11. Entretanto, tal arranjo acaba por provocar tensões de compressão bem elevadas no centro do vão, produzidas pela combinação do carregamento e da protensão.

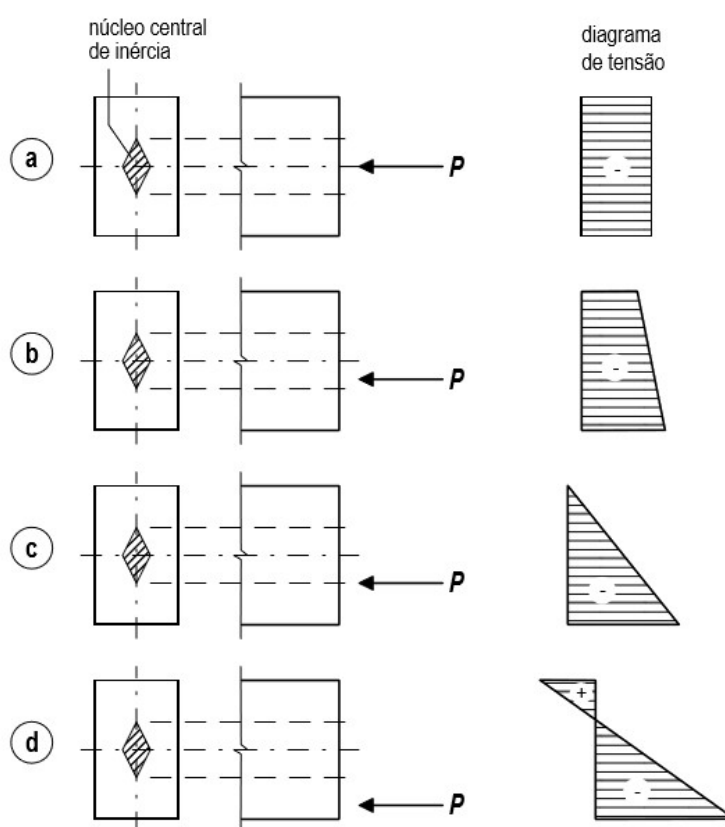
Figura 11 - Esquema de traçado retilíneo centrado.



Fonte: Gomes Junior (2009).

No momento em que é aplicada uma excentricidade à armadura ativa, as tensões de compressão aumentam no bordo mais próximo a esta e diminuem na mais distante. “Se a força de protensão for aplicada fora do perímetro do núcleo central de inércia, as tensões sofrem uma mudança de sinal ao longo da seção, surgindo tensões de tração no bordo mais distante da linha de atuação da força de protensão” (VERÍSSIMO E CESAR, 1998). Conforme mostrado na figura 12.

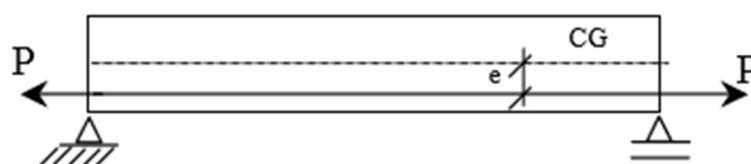
Figura 12 - Distribuição de tensões na seção em função do ponto de aplicação da força de protensão(P).



Fonte: Veríssimo e Cesar (1998).

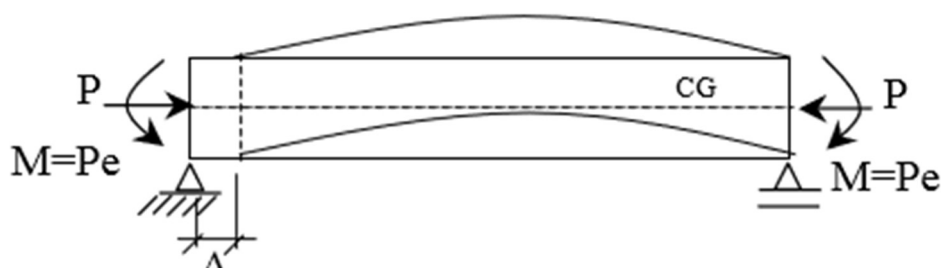
A vantagem neste caso, segundo Esteves (2002), seria o surgimento de um momento fletor causado pela excentricidade do cabo, de sentido contrário aos momentos fletores advindos dos carregamentos externos atuantes no elemento, conforme mostrado nas figuras 13 e 14, que resultam na redução das tensões e deformações presentes na peça.

Figura 13 – Esquema de traçado retilíneo com excentricidade "e".



Fonte: Esteves (2002).

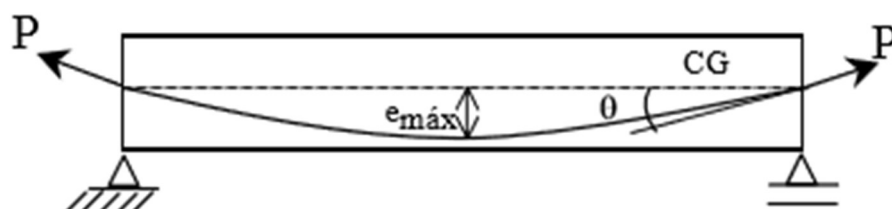
Figura 14 – Esquema de momento gerado pela força de protensão aplicada com excentricidade "e".



Fonte: Esteves (2002).

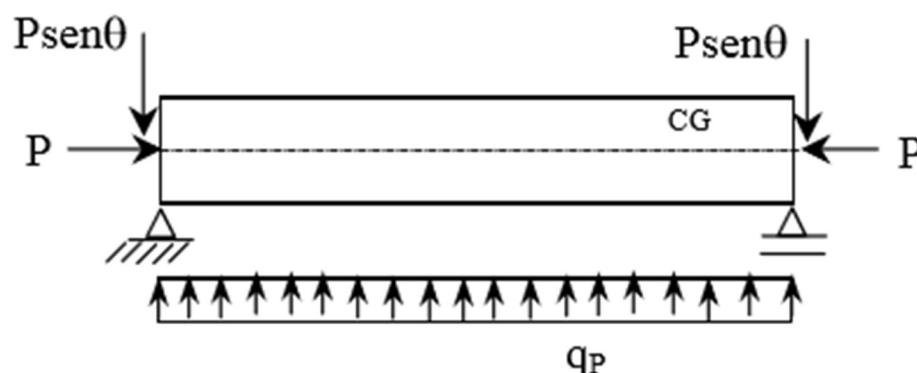
No traçado curvilíneo a tensão de protensão varia de acordo com a distância entre o cabo e linha neutra da peça protendida, gerando carregamentos distribuídos equivalentes ao efeito de cabos curvos parabólicos protendidos, conforme é apresentado nas figuras 15 e 16. Em contra partida, as deformações apresentadas devido ao uso desse traçado, costumam ser maiores que as observadas nos traçados retilíneos centralizado e excêntrico.

Figura 15 - Esquema de elemento protendido com traçado curvilíneo.



Fonte: Esteves (2002).

Figura 16 - Esquema mostrando a ação das forças decompostas da força de protensão no traçado curvilíneo.



Fonte: Esteves (2002).

O ideal seria que os esforços de protensão variassem de forma proporcional aos esforços externos. Tal situação pode ser obtida com traçado do cabo seguindo o diagrama de momentos fletores advindos do carregamento externo. Entretanto, deve-se minimizar as perdas por atrito, buscando assim, o menor número de curvas possível.

3.3.3 Prescrições Normativas Da NBR 6118:2014

Para que haja protensão faz-se necessária a utilização de aços de alta resistência por conta das altas tensões a que as barras de aço protendido estarão submetidas quando do emprego das forças de compressão. Visando a segurança, a NBR 6118:2014 exige que sejam respeitados os cobrimentos nominais apresentados na tabela 2, que variam de acordo com o elemento a ser construído, a técnica a ser utilizada e a classe de agressividade ambiental do local onde o elemento estará sendo utilizado.

Tabela 2 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm

Tipo de Estrutura	Componente ou Elemento	Classe de Agressividade Ambiental			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento Nominal (mm)			
Concreto Armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto Protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/Pilar	30	35	45	55

^a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

^b Para a face superior da laje e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obra em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

Outro fator importante quando se fala em concreto é a relação água/cimento que interfere diretamente na durabilidade (no desempenho) e na sua resistência a compressão, a norma permite que sejam adotados os valores mínimos presentes na tabela 3. É possível observar que quanto mais agressivo o ambiente é, menor deve ser a relação água/cimento, de modo que a resistência do concreto seja maior, apresente menor porosidade, e assim possibilite fornecer uma melhor proteção das armaduras. De acordo com a NBR 6118:2014, para as classes de agressividade ambiental, a classe de resistência mínima do concreto indicada para uso em peças de concreto protendido é superior as de concreto armado. Conforme mostrado no item 7.4.7 da norma e na tabela 3.

Tabela 3 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto

Concreto ^a	Tipo ^{b,c}	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

^a O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos na ABNT NBR 12655.

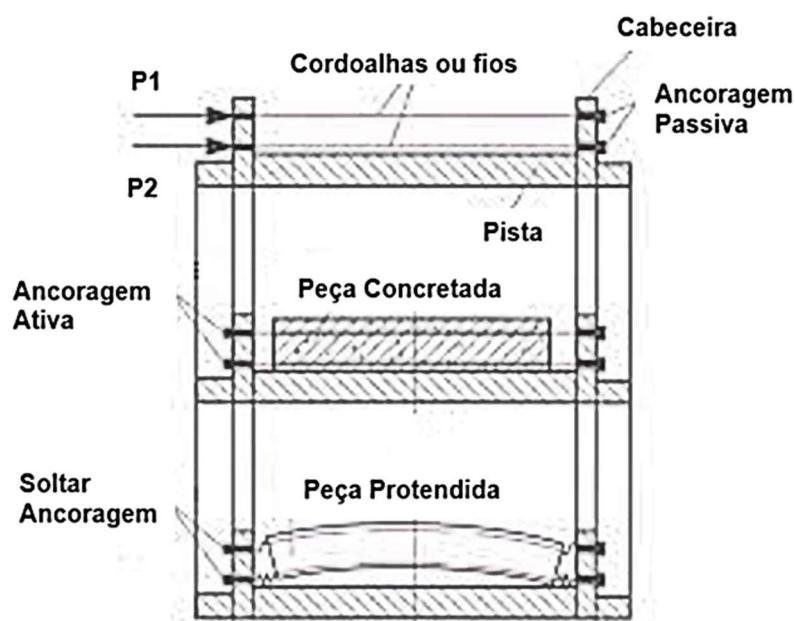
^b CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

^c CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido

Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

São três as classificações que podem ser atribuídas a elementos executados em concreto protendido quanto ao processo para sua produção, definidas nos itens 3.1.7, 3.1.8 e 3.1.9 da norma, sendo elas:

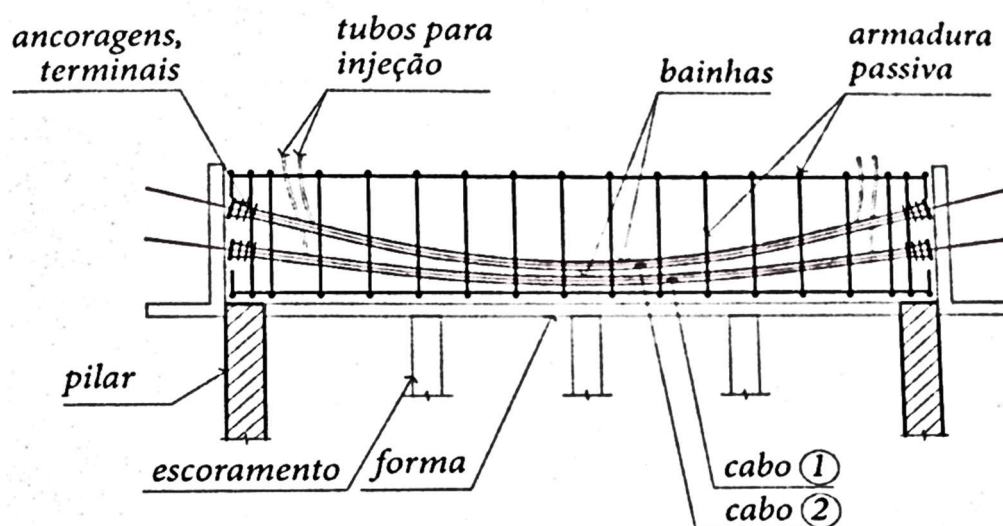
Protensão com aderência inicial ou pré-tracionada: O aço é tracionado antes do lançamento do concreto e assim, após a cura do concreto, é liberado, causando tensões de compressão no concreto que reduzem ou anulam as tensões de tração atuantes no concreto. Conforme mostra a figura 17.

Figura 17 - Esquema de protensão ativa com aderência inicial.

Fonte: Cholfe (2016).

Protensão com aderência posterior ou pós-tração com aderência: O aço inserido dentro de uma bainha é tracionado após o concreto curado, então injeta-se nata de cimento dentro da bainha garantindo o monolitismo da peça. Conforme pode ser visto na figura 18, que mostra um esquema de protensão com aderência posterior e seus componentes.

Figura 18 - Esquema de protensão ativa com aderência posterior



Fonte: Cholfe (2016).

Na Figura 19 é possível verificar uma viga com pós-tração aderente, pode-se notar a presença de cabos, porém ainda não foram tensionados (protendidos).

Figura 19 - Vigas com protensão aderente pós tracionada - concretada porém ainda não protendida.



Fonte: Cholfe (2016).

Protensão sem aderência ou pós-tração sem aderência: Nesse caso o aço está dentro de bainhas engraxadas que serão tracionadas e ancoradas em suas extremidades, sendo esses os únicos pontos de solidariedade entre esses elementos. A figura 20 mostra os componentes de ancoragem nesse caso.

Figura 20 - Cordoalha engraxada e componentes para protensão não aderente.



Fonte: Impacto Protensão Ltda. (2019).

Na figura 21 é apresentado uma laje em que foi utilizada a protensão com cordoalha engraxas plastificadas (protensão não aderente).

Figura 21 - Laje protendida por cordoalhas engraxadas.



Fonte: Cauduro (2002).

A protensão pode dividir-se em 3 graus: parcial, limitada e completa. A protensão parcial admite uma tensão de tração maior que o permitido pela protensão limitada, e a completa, como o nome já sugere, não permite nenhuma força de tração atuando na seção transversal do elemento.

A NBR 6118:2014 traz a seguinte tabela (tabela 4) como um quadro onde relaciona a classe de agressividade ambiental e o tipo de protensão, também fala sobre os Estados Limites de Serviço e as respectivas combinações de ações a serem

consideradas no dimensionamento de um elemento de acordo com sua tipologia construtiva.

Tabela 4 - Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental.

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto Simples	CAA I a CAA IV	Não há	-
Concreto Armado	CAA I	ELS-W wk $\leq$ 0,4 mm	Combinação Frequente
	CAA II e CAA III	ELS-W wk $\leq$ 0,3 mm	
	CAA IV	ELS-W wk $\leq$ 0,2 mm	
Concreto Protendido Nível 1 (Protensão Parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W wk $\leq$ 0,2 mm	Combinação Frequente
Concreto Protendido Nível 2 (Protensão limitada)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação Frequente
		ELS-D ^a	Combinação Quase Permanente
Concreto Protendido Nível 3 (Protensão Completa)	Pré-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação rara
		ELS-D ^a	Combinação Frequente

^a A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com $a_p = 50$ mm (Figura 16)

Notas:

1 Para as Classes de Agressividade Ambiental CAA-III e IV, exige-se que as cordoalhas não aderentes têm proteção especial na região de suas ancoragens.

2 No projeto de lajes lisas e cogumelo protendidas, basta ser atendido o ELS-F para combinação frequente das ações, em todas as classes de agressividade ambiental.

ONDE:

ELS-F: Estado em que se inicia a formação de fissuras. Admite-se que este estado-limite é atingido quando a tensão de tração máxima na seção transversal for igual a $f_{ct,f}$;

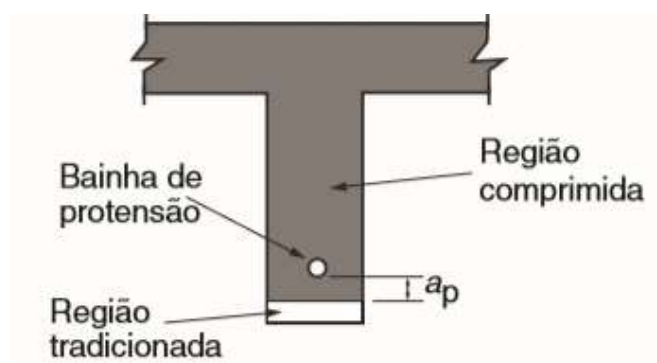
ELS-W: Estado em que as fissuras se apresentam com aberturas iguais aos máximos especificados no item 13.4.2 da norma;

ELS-D: Estado no qual, em um ou mais pontos da seção transversal, a tensão normal é nula, não havendo tração no restante da seção. Verificação usual no caso do concreto protendido (ver item 13.4.2 da norma)

ELS-DP: Estado no qual garante-se a compressão na seção transversal, na região onde existem armaduras ativas. Essa região deve se estender até uma distância a_p da face mais próxima da cordoalha ou da bainha de protensão (Figura 22).

Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

Figura 22 - Ilustração das tensões em seção no Estado-limite de Descompressão Parcial.



Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

A NBR 6118:2014 também exige a previsão das perdas da força de protensão em relação ao valor inicial aplicado pelo aparelho tensor, ocorridas antes da transferência da protensão ao concreto (perdas iniciais, na pré-tração), durante essa transferência (perdas imediatas) e ao longo do tempo (perdas progressivas).

As perdas iniciais são aquelas ocorridas na pré-tração, antes da liberação do dispositivo de tração, e são decorrentes do atrito nos pontos de desvio, do escorregamento dos fios de ancoragem, da relaxação inicial da armadura e da retração inicial do concreto.

As perdas imediatas da força de protensão na pré-tração são ocasionadas pela aplicação da protensão e, conseqüentemente, do encurtamento imediato do concreto. Na pós-tração outros fatores que levam a perdas imediatas da força de protensão além do encurtamento imediato do concreto, são o atrito entre as armaduras e as bainhas ou o concreto, o deslizamento da armadura junto à ancoragem e a acomodação dos dispositivos de ancoragem.

As perdas progressivas são, por sua vez, decorrentes da retração, da fluência do concreto e da relaxação do aço de protensão, logo é considerado que há uma interação das causas no cálculo dessas perdas.

A NBR 6118:2014 limita a posição da linha neutra no ELU como sendo x/d limitado a 0,45 para concretos convencionais, e para concretos de alta resistência x/d limitado a 0,35. Tal determinação é necessária para proporcionar o adequado comportamento dúctil em vigas e lajes e garantir a segurança dos usuários.

3.3.4 O Aço e o Concreto No Concreto Protendido

O aço utilizado na protensão tem como duas de suas características, a alta resistência e a ausência do patamar de escoamento. A elevada resistência é necessária para suportar aos esforços de pré-tração e compensar as perdas de protensão. A armadura ativa deve apresentar boa aderência, baixa relaxação e uma boa resistência a fadiga.

O concreto utilizado em elementos protendidos também deve apresentar resistência elevada devido às altas solicitações prévias causadas pela força de protensão e à necessidade de redução das deformações imediatas e, conseqüentemente, uma menor perda da protensão. Além disso, por apresentarem uma maior resistência resultam em seções menores proporcionalmente menores que as de concreto armado para uma dada magnitude de carregamento, diminuindo assim o peso próprio.

Segundo Veríssimo (2018), o concreto utilizado em elementos protendidos, deve apresentar melhor características quanto as propriedades mecânicas e a durabilidade. De forma semelhante o aço de protensão precisa apresentar certas características como resistências elevadas e ausência do patamar de escoamento. Os aços de protensão podem ser encontrados em formas de fios, cordoalhas e barras de aço-liga. Eles podem receber diferentes formas de tratamento, que os classificam em aços de relaxação normal (RN) ou relaxação baixa (RB).

O fato de possuir elevada resistência e ausência do patamar de escoamento faz com que a preocupação com a deterioração do aço de protensão seja ainda maior, uma vez que estando tensionado, se torna mais suscetível a corrosão sob tensão podendo, ainda romper apresentando um pequeno comportamento plástico.

3.4 Ferramentas Computacionais

O desenvolvimento tecnológico deu seu primeiro passo após a revolução industrial ocorrida durante os séculos 18 e 19. O fervor das grandes fábricas iniciou um processo de aprimoramento contínuo, onde os processos precisavam sempre estar sendo melhorados para que se mantivessem competitivos, sempre reduzindo custos e aumentando a produção.

Um dos fatores que tornou essa melhoria possível foi o advento e o desenvolvimento de ferramentas computacionais, que vieram a domínio civil e público no final do século 20. Sua aplicação na indústria foi responsável por um grande desenvolvimento da sociedade e do mercado. O surgimento de novos computadores, com capacidade de processamento cada vez maiores tornou possível o aprimoramento de utilitários que auxiliassem nos processos de produção industrial.

Na construção civil as ferramentas computacionais somente surgiram um pouco mais tarde. Na década de 50 iniciaram-se estudos que levaram ao desenvolvimento da computação gráfica, assim, na década de 60 surgiu o Skecthpad, o primeiro sistema computacional gráfico interativo de auxílio ao projeto (AMORIM E CHECUCCI, 2008).

Ainda segundo Amorim e Checucci (2008), “durante as décadas de 80 e 90, os programas integrados e modelos de informações de edifício continuaram sendo pesquisados, mas sem tradução em sistemas comerciais. Em contra partida, surgiu uma variedade de sistemas computacionais de apoio ao projeto, dedicados a tarefas específicas: editores geométricos bi e tridimensionais, programas de *redering*, de dimensionamento, de animação, de orçamentação, de gerenciamento de documentos etc.”

“A área da tecnologia da informação para a construção civil é um dos setores onde a distância entre o que se pesquisa, e se desenvolve academicamente, e a correspondente adoção e prática no mercado é das maiores já vistas” (NASCIMENTO e SANTOS, 2003).

Entretanto, ao analisar o desenvolvimento das tecnologias da informação aplicadas a construção, fica evidenciado que as pesquisas têm feito avanços extraordinários, como exemplo das tecnologias CAD 4D, Edifícios Virtuais e aplicações de Inteligência Artificial, Redes Neurais e Realidade Virtual na área da construção, entre outros (NASCIMENTO e SANTOS, 2002). A tecnologia da informação para a construção civil tem o objetivo de "tornar o aprendizado mais dinâmico, possibilitando interação maior entre os atores envolvidos no processo" (ALMEIDA, 2013).

Atualmente, mesmo com a grande variedade de *softwares* utilizados na construção civil, ainda são poucos os que vêm a ser utilizados no dimensionamento de elementos protendidos. Tal fato se deve tanto pelo baixo número de *softwares* voltados para a aplicação da protensão quanto pela certa resistência do mercado para

aderir as novas ferramentas computacionais para esse fim. Uma das ferramentas disponíveis, e que é objeto de análise neste trabalho, é o TENDON app, versão Silver, disponível na Play Store.

3.4.1 Tendon, Versão Silver

A ferramenta, lançada em 2017 pela ADAPT, exige a inserção de dados como tamanho da seção transversal retangular, comprimento de vão, limitado a 25 metros; perdas de protensão; diâmetro das armaduras ativas e passivas; grau de protensão utilizado; flecha máxima, excentricidade utilizada na protensão, classe de resistência do concreto a ser utilizada, orientação do cabo de protensão e carregamento. Também é requerido que se defina quais as combinações que devem ser consideradas para a realização dos cálculos.

Na figura 23 é possível ver que o *software* pede inicialmente dados como nome da obra, autor, cidade, o tipo de projeto, entretanto apenas dispõe da opção de vigas isostáticas, ele apresenta possíveis formatos de seções a serem utilizadas, porém apenas a seção retangular está liberada para esta versão. Cumpre ressaltar que não está disponível até a presente data outra versão mais avançada do que a mostrada neste estudo.

Figura 23 - Aba "Sobre o Projeto" do TENDON.

TCC II - SOBRE O PROJETO

TCC II **ALISSON RAFAEL DORIA SANTOS**

Cidade: **ARACAJU** Obra: **TCC II**

Tipo de Projeto: **Vigas Isostáticas** Norma Projeto: **NBR 6118 2014**

Tipo de Seção Transversal

☒ Seção Retangular ☐ Seção 'I' ☐ Seção 'I' com Mísula ☐ Seção 'T'

SOBRE O PROJETO

O TENDON é um software educacional, com intuito de ajudar no aprendizado de estruturas protendidas tais como vigas, lajes em uma direção e duas direções. A plataforma de funcionamento é a Android e a IOS (ainda em projeto) indicado para tablets devido a melhor visualização e manipulação dos dados além da mobilidade. Desenhado para ser um software universal possui elementos básicas e incógnitas que o usuário preenche e posteriormente pode editar o código de acordo com o seu país. [Consulte os termos de uso.](#)

☒ Concordo com os termos de uso

INICIAR PROJETO

Fonte: Tendon-Silver (2019).

Na Figura 24 tem-se a aba “Carregamento”, seção onde deve-se inserir o tipo de carregamento atuante e a localização dele na peça quando pontual, entretanto, não permite a combinação de carregamentos pontuais e distribuídos, e nem parcialmente distribuídos.

Figura 24 - Aba "Carregamento" do TENDON.

TCC II - ALISSON - CARREGAMENTO

☐ Carregamento Linear

☐ Permanente (PERM) _____ kN/m

☐ Acidental (ACD) _____ kN/m

☐ Carregamento Pontual

☐ Permanente (PERM) _____ kN

☐ Acidental (ACD) _____ kN

Posicionamento da Carga

a _____ a ≤ vão _____ m

b = (vão - a) m

CARREGAMENTO

Bem-Vindo a seção de Carregamento. Nessa etapa é possível selecionar os carregamentos lineares e carregamentos pontuais considerando para as duas opções a condição de carga permanente e acidental. Para mais informações consulte o manual do aplicativo em <http://www.tendon-app.com/manualtendon-v01p.pdf> ou pelo e-mail contact@tendon-app.com

SALVAR

Fonte: Tendon-Silver (2019).

Na seção “Verificações de projeto” (Figura 25), tem-se o tipo de protensão, tendo apenas a pós-tração aderente disponível; e o tipo de verificação, dividindo-se entre ELS + INICIAL, ELU e ELU + ELS + INICIAL. É aqui, também, que deve ser inserido a classe de agressividade e o nível de protensão, de acordo com o que é recomendado pela NBR 6118:2014 e apresentada na tabela 2. O *software* permite inserir um fator de fluência variando entre 0 e 5 e um alongamento admissível, o qual deve ter seus limites superior e inferior informados.

Figura 25 - Seção "Verificações de Projeto" do software

TCC II - ALISSON - VERIFICAÇÕES DO PROJETO

TIPO DE PROTENSÃO
Pós-Tração Aderente

TIPO DE VERIFICAÇÃO
 ELU + ELS + INICIAL

CLASSE DE AGRESSIVIDADE
 Classe I

NÍVEIS DE PROTENSÃO
 NÍVEL II - Protensão Limitada
 NÍVEL III - Protensão Completa

☐ FATOR DE RETRAÇÃO E FLUÊNCIA
 0 < Fator ≤ 5

☐ ALONGAMENTO ADMISSÍVEL

LIMITE SUPERIOR 5 %

LIMITE INFERIOR 5 %

VERIFICAÇÕES DO PROJETO

Bem-Vindo a seção de Verificação de Projeto. Nessa etapa você poderá escolher sobre o sistema de protensão a ser utilizado, classe de agressividade do ambiente, níveis de protensão e por fim as verificações do projeto relacionadas ao estado limite último, estado limite de serviço e protensão inicial. Para mais informações consulte o manual do aplicativo em www.tendon-app.com/manualtendon-v01p.pdf ou pelo e-mail contato@tendon-app.com

SALVAR

Fonte: Tendon-Silver (2019).

A aba “Fatores de carga” permite ao usuário escolher quais os valores de fatores de redução das cargas acidentais ou cargas móveis de acordo com a situação desejada (Figura 26). Entretanto é possível ver que o *software* apresenta uma informação incorreta, quando informa os valores dos coeficiente de ponderação de ações (ψ_0 , ψ_1 e ψ_2) para bibliotecas, arquivos, oficinas e garagens que segundo a NBR 6118:2014, o correto seria $\psi_0 = 0.8$, $\psi_1 = 0.7$ e $\psi_2 = 0.6$. Na aba “Combinações de carga”, são expostas as combinações anteriormente definidas com seus fatores, permitindo ainda a inserção de uma nova combinação a critério do usuário (Figura 27).

Figura 26 - Seção "Fatores de carga", TENDON.

TCC II - ALISSON - FATORES DE CARGA

Valores de redução Ψ_1 e Ψ_2

Cargas Acidentais de Edifícios

Cargas Móveis e Seus Efeitos Dinâmicos

	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
☐ Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevada concentração de pessoas	0,5	0,4	0,3
☐ Locais em que há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas	0,7	0,6	0,4
☐ Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens	0,6	0,4	0,3

FATORES DE CARGA

Bem-Vindo a seção de Fatores de Carga. Nessa etapa você poderá escolher os fatores de combinação e de redução referentes à combinação de serviço. As opções a serem escolhidas podem ser sobre cargas acidentais em edifícios ou cargas móveis e seus efeitos dinâmicos. Para mais informações consulte o manual do aplicativo em <http://www.tendon-app.com/manualtendon-v01p.pdf> ou pelo e-mail contato@tendon-app.com

SALVAR

Fonte: Tendon-Silver (2019).

Figura 27 - Seção "Combinações de Carga" do software.

TCC II - ALISSON - COMBINAÇÕES DE CARGA

NÍVEL III - Protensão Completa - ELU + ELS + INICIAL

Nome	Análise	Combinações de carga	Peso Próprio (PP)	Permanente (PERM)	Acidental (ACD)	Protensão (PROT)
ELS-F	ELS	PP+PERM+ACD+PROT	1	1	1	1
ELS-D	ELS	PP+PERM+ Ψ_1 *ACD+PROT	1	1	Ψ_1	1
INICIAL	INICIAL	PP+1.15*PROT	1	0	0	1.15
ELU	ELU	γ_g *PP+ γ_{pp} *PERM+ γ_q *ACD+Hip	γ_g	γ_{pp}	γ_q	Híper

ADICIONAR COMBINAÇÃO

COMBINAÇÕES DE CARGA

Bem-Vindo a seção de Combinações de Carga. Nessa etapa de acordo com o escolhido nas guias Verificação de Projeto e Fatores de Carga as combinações serão listadas bem como os valores escolhidos em cada item. No entanto o usuário poderá adicionar uma combinação de acordo com a sua necessidade. Para mais informações consulte o manual do aplicativo em <http://www.tendon-app.com/manualtendon-v01p.pdf> ou pelo e-mail contato@tendon-app.com

SALVAR

Fonte: Tendon-Silver (2019).

Na área “Geometria” o projetista pode inserir as dimensões da peça projetada (Figura 28). Na figura 29 é mostrada a seção “Apoio” onde pode-se escolher os tipos de apoios da viga. Obviamente, não é possível a configuração que caracterize uma

peça hipoestática, e sendo apenas possível hiperestática com grau de hiperestaticidade 1.

Figura 28 - Aba "Geometria" do TENDON.

TCC II - ALISSON - GEOMETRIA

SEÇÃO RETANGULAR



h $h \geq 450$ mm

b $b \geq 150$ mm

GEOMETRIA

Bem-Vindo a seção de Geometria. Nessa etapa o usuário pode colocar as dimensões da seção transversal que foi escolhida anteriormente na guia Sobre o Projeto. Atenção para as dimensões mínimas e máximas indicadas pelo aplicativo. Para mais informações consulte o manual do aplicativo em <http://www.tendon-app.com/manualtendon-v01p.pdf> ou pelo e-mail contact@tendon-app.com

SALVAR

Fonte: Tendon-Silver (2019).

Figura 29 - Aba "Apoio" do software.

TCC II - ALISSON - APOIO

Apoio - 1

☐ Fixo


☐ Móvel


Apoio - 2

☐ Fixo


☐ Móvel


APOIO

Bem-Vindo a seção de Apoio. Nessa etapa o usuário pode escolher os tipos de vínculos da estrutura, sendo os apoios fixos e móveis como padrão, lembrando que não é possível escolher duas vezes o apoio móvel. Para mais informações consulte o manual do aplicativo em <http://www.tendon-app.com/manualtendon-v01p.pdf> ou pelo e-mail contact@tendon-app.com

SALVAR

Fonte: Tendon-Silver (2019).

Na aba “Vão e Perfil do Cabo”, é feita a escolha do perfil do cabo, do valor referente ao comprimento de vão, sendo possível variar entre 5 metros e 50 metros, e ainda definir a excentricidade de protensão, juntamente com a orientação da forma de ancoragem nas extremidades da peça: ativa-ativa, ativa-passiva ou passiva-ativa (Figura 30).

Figura 30 - Seção "Vão e Perfil do cabo" do aplicativo.

The screenshot displays the 'VÃO E PERFIL DO CABO' section of the Tendon-Silver application. The main interface is divided into several sections:

- VÃO:** A text input field showing the span length, with a range of $5 \leq \text{vão} \leq 50$ m.
- PERFIL DO CABO:** A dropdown menu with two options: 'Excêntrico Reto' and 'Parabólico'.
- PROTENSÃO:** A dropdown menu with the option 'Ativo-Passivo'.
- Excentricidade de Protensão Personalizada:** A checkbox that is currently unchecked.
- Excentricidade:** A text input field showing a range of $0 \leq \text{Excentricidade} \leq 450.00$ mm.
- Right Sidebar:** A panel titled 'VÃO E PERFIL DO CABO' containing a welcome message, instructions, and a green 'SALVAR' button at the bottom.

Fonte: Tendon-Silver (2019).

Na seção “Materiais” fica disposto o tipo de aço utilizado para a armadura ativa e passiva e seus respectivos diâmetros, a classe de resistência do concreto e ainda a possibilidade de inserir tipos de materiais (aços e concretos) não presentes na lista (ver Figura 31).

Figura 31 - Seção "Materiais" do aplicativo.

TCC II - ALISSON - MATERIAIS

AÇO DE PROTENSÃO	DIÂMETRO DA ARMADURA ATIVA
CP-190 RB	9.5 mm
AÇO PASSIVO	DIÂMETRO DA ARMADURA PASSIVA
CA-50	8.0 mm
CONCRETO	
C-25	

MATERIAIS

Bem-Vindo a seção de Materiais. Nessa etapa o usuário pode escolher os tipos de aço de protensão, aço da armadura passiva bem como a classe do concreto da viga. Existe também um campo para preenchimento personalizado das propriedades do concreto. Para mais informações consulte o manual do aplicativo em <http://www.tendon-app.com/manualtendon-v01p.pdf> ou pelo e-mail contact@tendon-app.com

ADICIONAR MATERIAIS

SALVAR

Fonte: Tendon-Silver (2019).

Na seção “Configurações” é permitido inserir os valores de cobrimento mínimo para protensão e para armadura passiva, também devem ser preenchidas as perdas de protensão, a pré compressão mínima, os coeficientes de segurança, limites para flecha e Contra-Flecha e o número máximo de cordoalhas por cabo (Figuras 32 e 33). Vale ressaltar que o desenvolvedor não procurou justificar a razão sobre o uso da pré compressão mínima.

Figura 32 - Seção "Configurações" do aplicativo.

TCC II - ALISSON - CONFIGURAÇÕES

Cobrimento Mínimo Protensão $30 \leq \text{Cobrimento} \leq 450.00$ mm	Cobrimento Mínimo Passiva $25 \leq \text{Cobrimento} \leq 450.00$ mm
Perdas de Protensão $0\% < \text{Perdas de Protensão} < 75\%$ %	Pré Compressão Mínima $0 < \text{Pré Compressão Mínima} \leq 10$ MPa

☐ Calcular E.L.U somente com a armadura ativa
☐ Calcular E.L.U com a armadura ativa + passiva

Fatores

γ_g $0 < \gamma_g \leq 3$	γ_q $0 < \gamma_q \leq 3$	γ_c $0 < \gamma_c \leq 3$
γ_s $0 < \gamma_s \leq 3$	γ_{pp} $0 < \gamma_{pp} \leq 3$	

CONFIGURAÇÕES

Bem-Vindo a seção de Configurações. Nessa etapa o usuário pode escolher os cobrimentos da armadura passiva, cobrimentos da armadura ativa, perdas de protensão e a pré-compressão mínima. Também optar pelos modelos de cálculo somente com protensão e protensão + armadura passiva. Por fim selecionar os fatores de majoração das ações, respeitando os valores mínimos e máximos indicados pelo aplicativo. Para mais informações consulte o manual do aplicativo em <http://www.tendon-app.com/manualtendon-v01p.pdf> ou pelo e-mail contact@tendon-app.com

SALVAR

Fonte: Tendon-Silver (2019).

Figura 33 - Seção "Configurações" do software.

TCC II - ALISSON - CONFIGURAÇÕES

☐ Calcular E.L.U somente com a armadura ativa
☐ Calcular E.L.U com a armadura ativa + passiva

Fatores

γ_g $0 < \gamma_g \leq 3$	γ_q $0 < \gamma_q \leq 3$	γ_c $0 < \gamma_c \leq 3$
γ_s $0 < \gamma_s \leq 3$	γ_{pp} $0 < \gamma_{pp} \leq 3$	

Limite de flecha admissível Limite de Contra-Flecha
 L/ $0 < \text{Limite}$ L/ $0 < \text{Limite}$

Número Máximo de Cordoalhas por Cabo

1 Cordoalha ▼

CONFIGURAÇÕES

Bem-Vindo a seção de Configurações. Nessa etapa o usuário pode escolher os cobrimentos da armadura passiva, cobrimentos da armadura ativa, perdas de protensão e a pré-compressão mínima. Também optar pelos modelos de cálculo somente com protensão e protensão + armadura passiva. Por fim selecionar os fatores de majoração das ações, respeitando os valores mínimos e máximos indicados pelo aplicativo. Para mais informações consulte o manual do aplicativo em <http://www.tendon-app.com/manualtendon-v01p.pdf> ou pelo e-mail contact@tendon-app.com

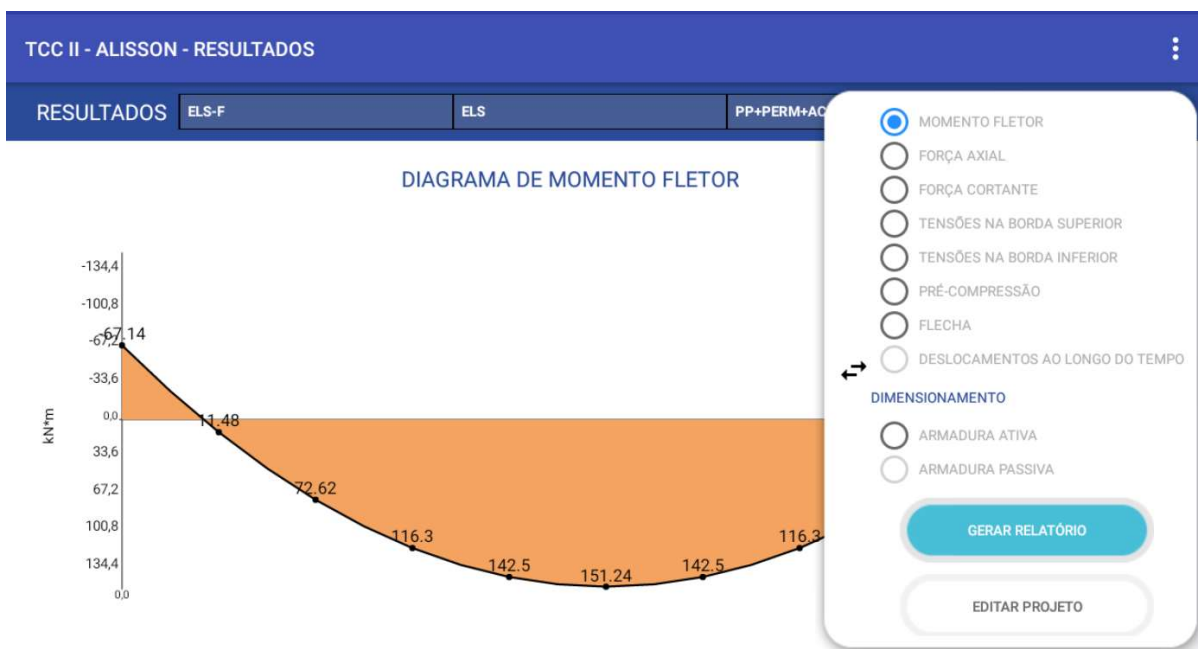
SALVAR

Fonte: Tendon-Silver (2019).

O utilitário apresenta as opções de diagramas de esforços possíveis de serem observados (diagramas de momento fletor, diagramas de esforço cortante, diagramas de esforço normal), e ainda deformações máximas e tensões nas armaduras (ver Figura 34), para o Estado Limite de Serviço de Descompressão, Estado Limite de

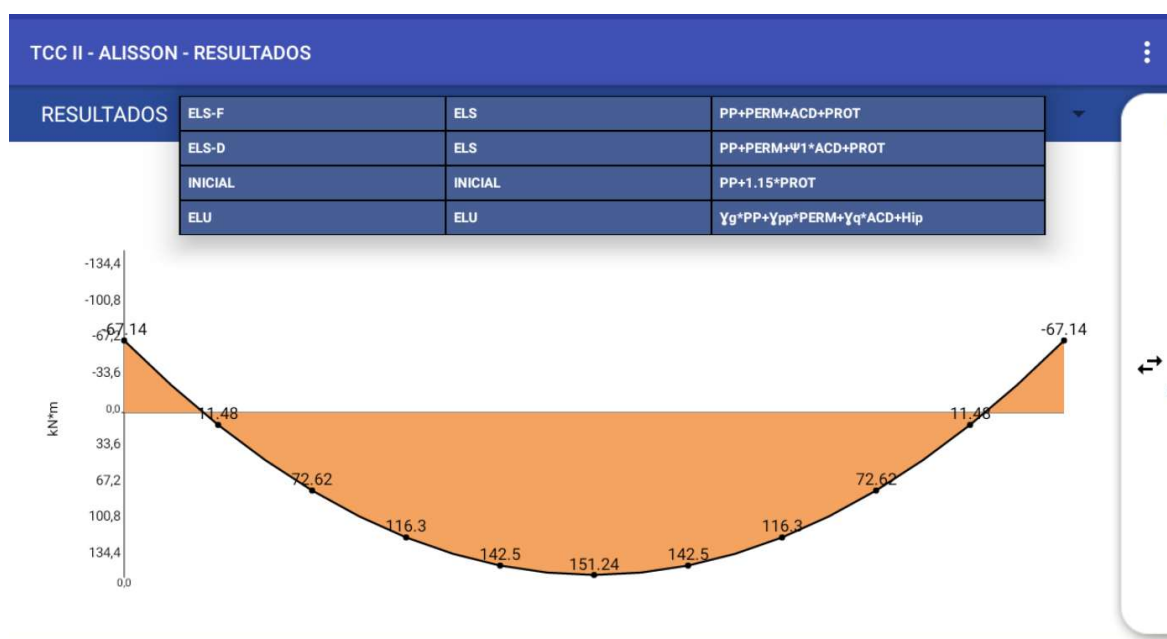
Serviço de formação de fissuras e Estado Limite Último (Figura 35), considerando o preconizado na NBR 6118:2014.

Figura 34 - Seção "Resultado", mostrando a aba direita, onde é possível selecionar qual diagrama deseja verificar ou gerar relatório geral.



Fonte: Tendon-Silver (2019).

Figura 35 - Aba "Resultados" do Tendon com as possibilidades de verificações quanto aos Estados Limites.



Fonte: Tendon-Silver (2019).

Um dado observado é que com a variação da carga para cada seção, foi notado que ao chegar em cargas acima do limite capaz de ser suportado pela combinação de fatores adotada para a peça protendida, o *software* aponta a seguinte notificação “Armadura não entrou em escoamento – Domínio 4”, onde a peça de concreto protendido teria ruína frágil. De forma semelhante, quando se adota uma carga relativamente baixa, o *software* aponta a mensagem “Força Axial (Protensão) $\leq$ zero. Não foi possível encontrar uma força de protensão positiva para o dimensionamento.”, o que indica se dispensaria protensão na peça.

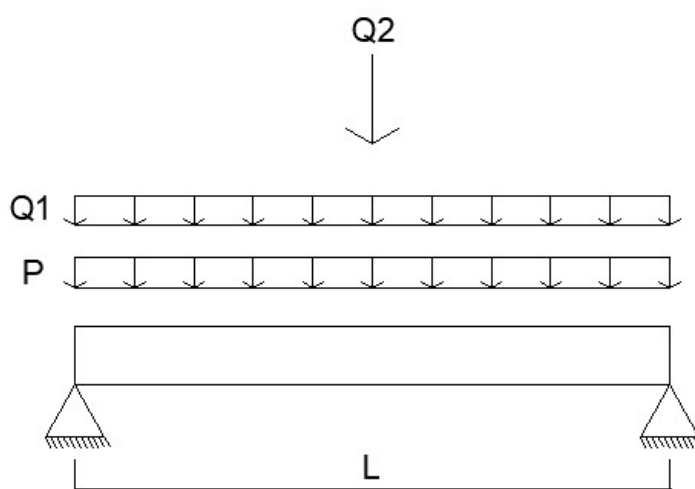
4 METODOLOGIA

O dimensionamento de peças em concreto protendido por meio de *softwares* requer observar aspectos indispensáveis, como precisão e confiabilidade dos resultados, além do conhecimento das limitações dessas ferramentas computacionais no atendimento das necessidades de seus usuários e das normas vigentes. Com base nisso, este trabalho irá apresentar verificações de recursos e limitações da ferramenta computacional TENDON-versão Silver, analisando-se variações de situações que possibilitem verificar o seu desempenho no dimensionamento de vigas em concreto protendido.

4.1 VERIFICAÇÃO PARA VALIDADE DO SOFTWARE

Visando validar os resultados extraídos do *software* era indispensável para a continuidade do estudo fazer uma comparação dos resultados obtidos no *software* com alguma aplicação encontrada na literatura, para tanto foi utilizado o caso descrito abaixo, retirado de Cholfe e Bonilha (2016), que consiste em uma viga de seção transversal de 50 cm x 100 cm, com momento solicitante, referente a carga permanente, de 400 kN·m (M_P); e dois momentos relativos a duas cargas acidentais, sendo eles 300 kN·m (M_{Q1}) e 200 kN·m (M_{Q2}). Onde L é o vão livre do elemento. A Figura 36 os carregamentos correspondentes aos momentos fornecidos no caso tomado para análise de Cholfe e Bonilha (2016).

Figura 36 - Modelo do exemplo de Cholfe e Bonilha (2016).



Fonte: O Autor (2019).

Visto que não é possível inserir momentos fletores no campo de carregamentos, para a aplicação no software foi necessário obter o carregamento distribuído equivalente aos momentos fletores. Para o caso da carga permanente o momento máximo dado pelo exemplo (400 kN·m) converteu-se diretamente através da equação de momento máximo para uma viga bi-apoiada: $M = \frac{ql^2}{8}$, onde “M” é o momento máximo no meio do vão, “q” é o carregamento distribuído e “l” é o comprimento do vão. Isolando o “q” tem-se $q = \frac{M*8}{l^2}$, obtendo então o carregamento permanente de 50 kN/m.

Para o caso dos carregamentos acidentais, os valores dos fatores de ponderação (ψ) dados pelo referido exemplo são iguais, assim foi necessário assumir 2 situações, onde foram consideradas as combinações de serviço, a frequente (ELS-D) e a rara (ELS-F). Para a combinação frequente (ELS-D), foi adotado o carregamento oriundo da combinação dos momentos fletores a partir de $Fd,ser = \psi_1 * Mq1 + \psi_2 * Mq2$, que resultou em 45 kN/m para o carregamento acidental no ELS-D. Para a combinação rara (ELS-F) a equação utilizada foi $Fd,ser = Mq1 + \psi_1 * Mq2$, resultando em um carregamento acidental de 57,5 kN/m, para o carregamento acidental no ELS-F. A tabela 5 apresenta o comparativo dos resultados obtidos no *software* com o exemplo da literatura.

Tabela 5 - Tabela Quadro Comparativo "Cholfe e Bonilha (2016) vs Tendon".

Caso	Nº de Cordoalhas	
	ELS-F	ELS-D
Cholfe e Bonilha (2016)	9	12
Tendon	9	12

Fonte: O Autor (2019).

O exemplo utiliza dois apoios do segundo gênero caracterizando um elemento com grau de hiperestacidade igual a 1 e utiliza 4 cabos por cordoalha de protensão. Nele o autor descreve a força de compressão devido a protensão exercida por cada cordoalha como sendo de 115 kN, após as perdas de protensão estimadas.

Convém salientar que no lançamento dos dados de entrada no *software* em estudo é necessário informar as perdas de protensão estimadas para os elementos estruturais ao longo do tempo. Sendo assim, foi realizado o cálculo de perdas de

protensão conforme apresentado no item 4.2, resultando no valor de 6,02% de perda total.

Conforme quadro comparativo apresentado na tabela 5, O exemplo teve como resultado, para o ELS-F, o número de cordoalhas sendo igual a 9; e para o ELS-D, como sendo 12. No *software* após as alterações citadas anteriormente obteve-se 9 cordoalhas, para o caso do ELS-F, e 12 cordoalhas, para o caso do ELS-D, o que aponta para a muito provável validação da aplicação da ferramenta em estudo para as análises posteriores de dimensionamentos, uma vez que os valores obtidos do *software* e do exemplo encontrado na literatura foram os mesmos.

4.2 DEFINIÇÃO DOS PARAMETROS DO DIMENSIONAMENTO NO TENDON (SILVER)

Considerando que o programa faz ajustes automáticos de acordo com a variação da classe de agressividade ambiental, foi seguido o mínimo admitido por norma, correspondente, portanto, a classe de agressividade I. Pois assim foi possível contemplar todas as classes de resistência de concreto que foram empregadas neste estudo quando da análise das vigas em concreto protendido. Inclusive a mínima possível para concreto protendido, a classe C25. Adotou-se o grau de protensão completa, uma vez que o parâmetro indicador de análise que foi considerado como estado limite de serviço, para efeitos de definição do nº de cordoalhas e das forças por cordoalha, foi o estado limite de descompressão (ELS-D), que não permite fibras tracionadas na seção transversal, conforme descrito na tabela 4. O outro estado limite de serviço que foi utilizado como referência no projeto foi o estado limite de formação de fissuras (ELS-F), para efeitos de verificação de flechas.

Foi adotado para o carregamento accidental o valor de 5 kN/m², valor definido em norma (NBR 6120:2019) para ambientes de teatro, onde para a aplicação no *software* foi necessário aplicá-lo em uma laje cuja as dimensões de seus vãos em planta foram iguais a 8 m x 8 m, 10 m x 10 m e 12 m x 12 m, resultando respectivamente nos carregamentos uniformemente distribuídos de 10 kN/m, 12,5 kN/m e 15 kN/m nas suas vigas de apoio, os quais foram lançados como dado de entrada no software. Foram adotadas essas dimensões para as lajes pois os comprimentos de vão no qual a peça trabalharia foram os vãos de comprimento igual a 8 m, 10 m e 12 m, por serem comprimentos mínimos comuns ao uso da técnica

construtiva da protensão no tipo de edificação aqui considerada. Para o carregamento permanente, os valores foram sendo variados, visando verificação da capacidade portante dos elementos estruturais. As dimensões da seção transversal adotadas foram de 30 cm x 60 cm, 35 cm x 70 cm e 35 cm x 90 cm, por serem também seções mínimas comuns de emprego em elementos de concreto protendido, dessa forma favorecendo as análises de desempenho do programa.

Para as armaduras, passiva e ativa, foram adotados os aços CA-50 e CP-190RB, com barras de diâmetros de 8 mm e cordoalhas de 9,5 mm, respectivamente; por serem categorias mais usuais para esse tipo de solicitação, menos custosa, mais compatível com o tipo de carregamento aqui considerado e com a magnitude das ações. Quanto a classe de resistência do concreto, buscou-se observar a influência das resistências de concreto adotadas no desempenho das vigas em estudo, verificando-se o carregamento máximo possível, as deformações limites, número de cordoalhas e força por cordoalha, considerando-se as dimensões de seção transversal e vãos acima descritos. As classes de resistência utilizadas no estudo variaram de C25 a C50, seguindo a NBR 8953:2015 (Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência) para concretos de resistência convencional. E ainda, para concretos de alta resistência, as classes C60, C70, C80 e C90.

Para as perdas de protensão, devido aos efeitos de fluência e retração ao longo do tempo, foi admitida a idade de 25 anos, além de um aço com alongamento da armadura de protensão de 8‰, a idade de protensão de 14 dias, a tensão de protensão inicial de 10MPa e a umidade relativa de 75%, todos os dados seguem ao sugerido de acordo com o Código CEB/FIP (1990). Mediante esses parâmetros, foram encontrados os valores dispostos nas tabelas 5 a 7, sendo a perda total, a adotada para o dimensionamento aqui analisado.

Tabela 6 - Perdas de Protensão para as seções analisadas.

Classe de resistência	PERDA TOTAL (%)		
	Seção 30x60	Seção 35x70	Seção 35x90
C25	14,3	14,1	14,0
C30	13,9	13,7	13,6
C35	13,6	13,4	13,3
C40	13,2	13,0	12,9
C45	12,9	12,7	12,6
C50	12,6	12,7	12,3
C60	11,9	12,4	11,6
C70	11,2	11,7	11,0
C80	10,6	10,5	10,4
C90	9,9	9,8	9,8

Fonte: O Autor (2019).

Variando-se inicialmente o carregamento permanente atuante na peça, tentou-se observar a capacidade máxima de carga para cada classe de resistência do concreto utilizada no dimensionamento da peça protendida, tanto no ELD-F quanto no ELS-D.

No estudo foram feitas verificações de dimensionamento das vigas protendidas observando-se duas condições de excentricidade: a excentricidade padrão e a excentricidade máxima. Sobre a segunda, considera-se que é um aspecto impreciso do *software*, uma vez que o manual de uso do *software* não está disponível. No entanto, foi possível observar que essa excentricidade pode ser aplicada ignorando as dimensões destinadas ao cobrimento (que são indispensáveis e se tratando de elementos protendidos) e colocando-se as armaduras de protensão faceando-se a seção transversal, assim não deixando claro como seria realizada a protensão.

Já a excentricidade padrão do *software* é aquela admitida considerando o afastamento máximo possível da armadura ativa para o centro de gravidade da seção transversal, levando-se em conta o cobrimento nominal exigido por norma para a classe de agressividade aqui estudada (classe I).

Mesmo com os limitantes observados referentes aos domínios de dimensionamento no estado limite último, apresentados no item 3.5, o fator assumido como “limite” para o estudo foi a relação x/d referente a concretos convencionais (x/d limitado a 0,45) e de alta resistência (x/d limitado a 0,35), conforme descreve o item 14.6.4.3 da NBR 6118:2014.

Os resultados foram analisados observando-se os gráficos apresentados no item 3, destacando-se que se avaliou a carga máxima admitida para cada classe de resistência de concreto, variando-se os comprimentos de vãos e as seções entre 30 cm x 60 cm, 35 cm x 70 cm e 35 cm x 90 cm. Observou-se, também, as flechas máximas obtidas para cada classe de resistência de concreto.

Além disso, foram dispostos na tabela 9 os dados encontrados quando aplicado o concreto de resistência C50, variando os vãos entre 8 metros, 10 metros e 12 metros; e também a seção entre 30 cm x 60 cm, 35 cm x 70 cm e 35 cm x 90 cm, para as quais foi possível observar os carregamentos máximos admitidos, suas respectivas flechas máximas, além da força por cordoalha e o número de cordoalha para um concreto de classe de resistência C50. Essa classe de resistência foi escolhida por ser essa a maior classe de resistência entre os concretos convencionais.

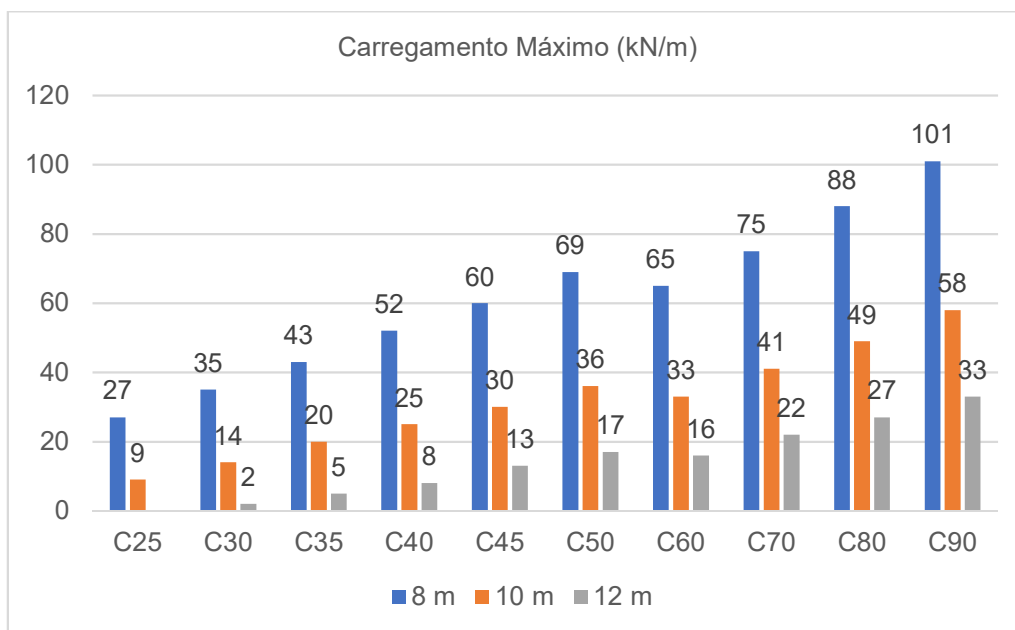
5 RESULTADOS

Os gráficos 1 a 3 relacionam a classe de resistência do concreto e o ganho quanto a capacidade de carga para uma determinada seção no Estado Limite de Serviço (ELS), estando a protensão aplicada com a excentricidade padrão do *software*. As seções transversais das vigas consideradas no estudo tiveram as seguintes dimensões de largura x altura correspondentes a 30 cm x 60 cm, 35 cm x 70 cm e 35 cm x 90 cm.

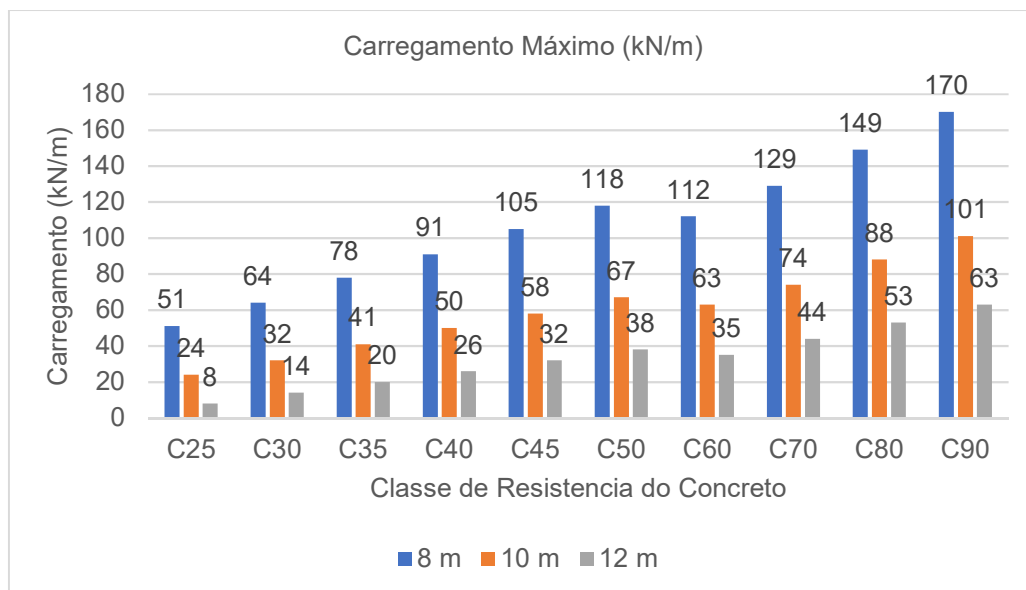
Pode-se notar que com o aumento do comprimento de vão, a capacidade portante da viga protendida foi diminuindo, como pode ser notado nos gráficos de Carga Máxima, gráficos 1 a 3, nos quais para os vãos menores tem-se cargas de maiores magnitudes. Vale ressaltar também o ganho de capacidade portante de acordo com o aumento das dimensões da seção transversal, considerando-se o concreto de classe de resistência C50, conforme apresentado na tabela 10.

Apenas para o concreto de classe de resistência C25 utilizado em uma seção transversal de 30 cm x 60 cm e aplicado em um comprimento de vão de 12 metros, não foi possível o dimensionamento, uma vez que o carregamento causou um não atendimento a uma das exigências determinadas em norma, a relação de x/d , sendo esse o limitante para essa situação.

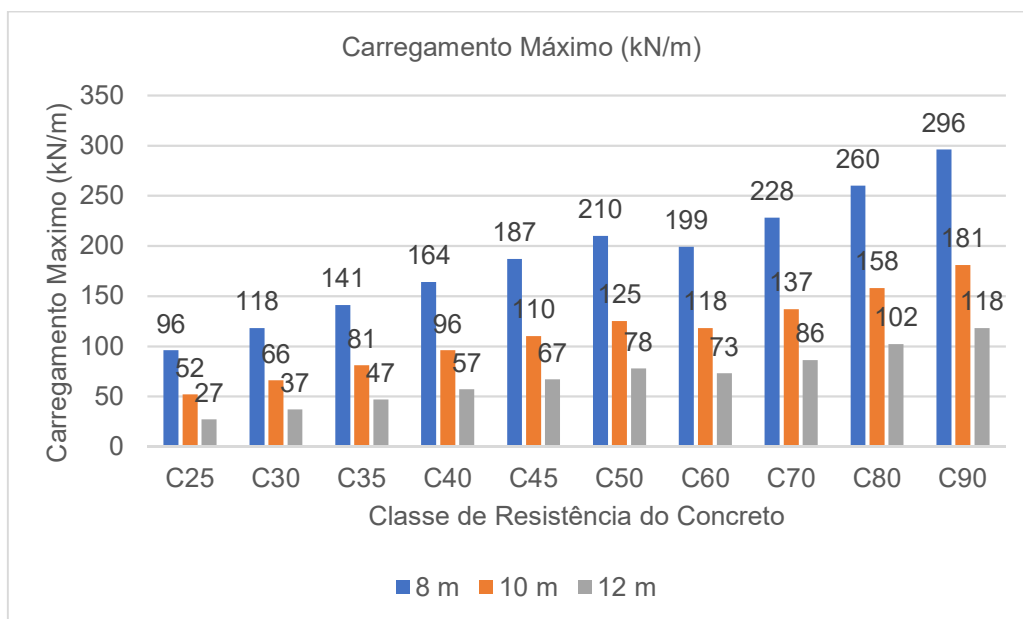
É possível observar que há uma grande redução na capacidade de carga e flechas máximas, em todos os gráficos, quando comparado ao máximo atingido pela classe de resistência de concreto C50 e com o da classe C60, mesmo com o uso de um concreto com maior resistência. Isso ocorre devido a alteração na relação x/d limite estabelecido pela NBR 6118:2014, que preconiza para concretos convencionais (classes de resistência até C50), uma relação limite de no máximo 0,45 ($x/d \leq 0,45$), enquanto que para concretos de alta resistência (classes de resistência maiores que C50), essa relação é reduzida para o limite de 0,35 ($x/d \leq 0,35$), causando uma redução na carga máxima admitida pela seção. Consequentemente, a combinação de um menor carregamento com o uso de um concreto de maior classe de resistência causa uma maior redução das deformações presentes no elemento em estudo.

Gráfico 1 - Carregamento Máximo (kN/m) para seção 30 cm x 60 cm.

Fonte: O Autor (2019).

Gráfico 2 - Carregamento Máximo (kN/m) para seção 35 x 70.

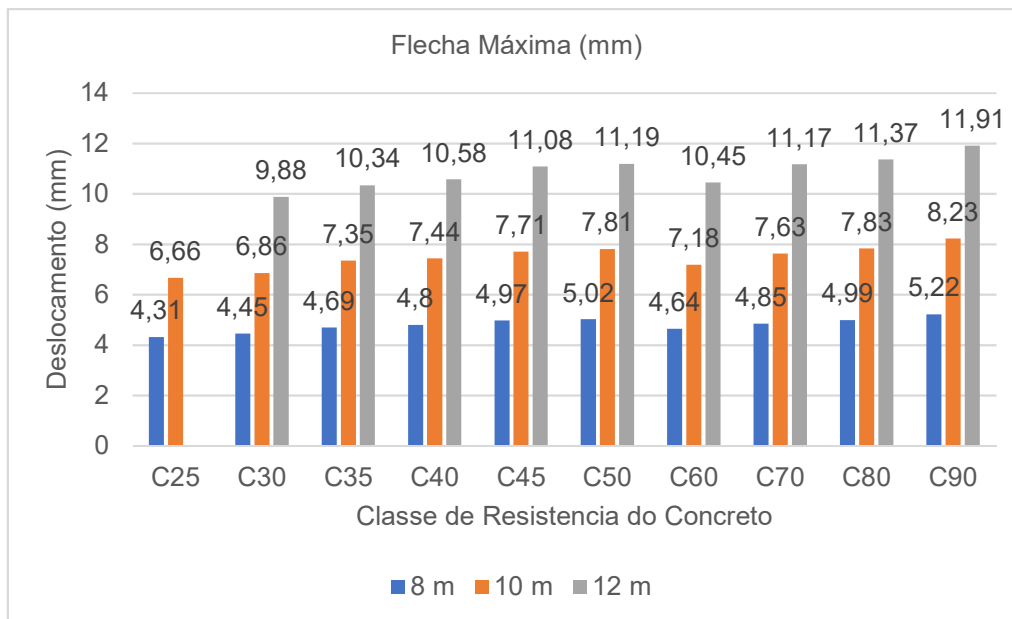
Fonte: O Autor (2019).

Gráfico 3 - Carregamento Máximo (kN/m) para seção 35 cm x 90 cm.

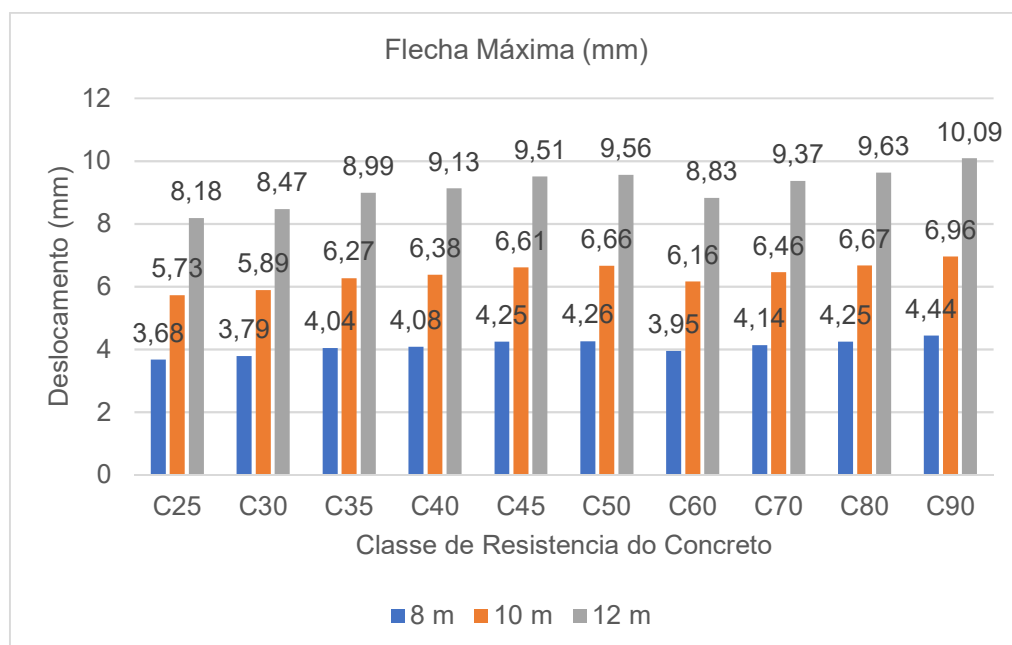
Fonte: O Autor (2019).

Os gráficos 4 a 7 apresentam a flecha máxima atingida sob as mesmas condições anteriormente citadas referentes a análise da carga máxima, no que toca a classe de resistência do concreto, excentricidade da carga de protensão, comprimentos de vão e dimensões das seções transversais.

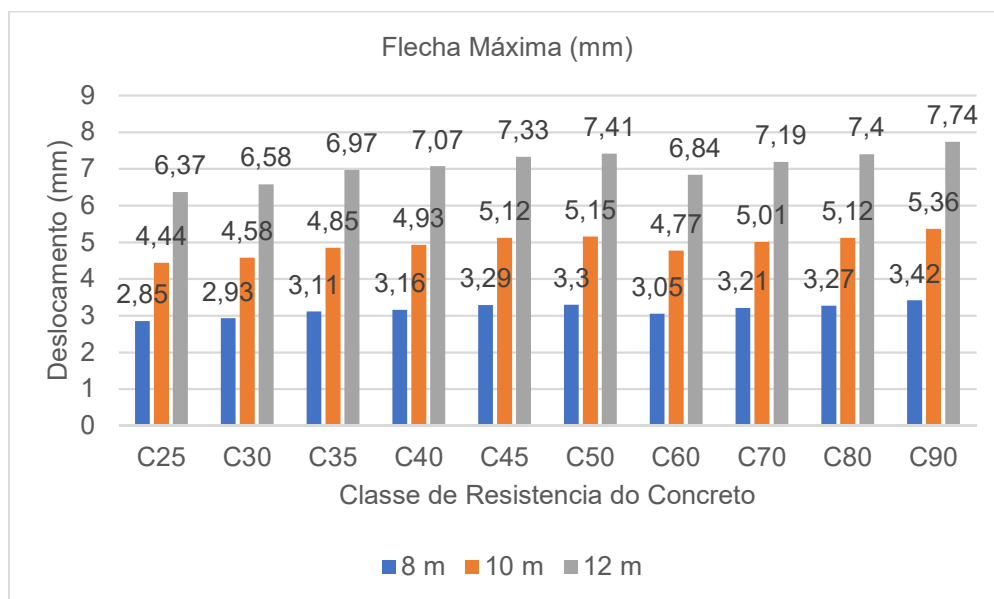
Nos gráficos 4 a 7 nota-se que com o aumento da classe de resistência do concreto e da seção transversal da viga, ocorre um aumento das flechas máximas possíveis de serem atingidas em todos os casos de seções transversais e vãos analisados, uma vez que decorrem disso um aumento de rigidez dos elementos estruturais.

Gráfico 4 - Flecha Máxima para seção 30 cm x 60 cm.

Fonte: O Autor (2019).

Gráfico 5 - Flecha Máxima para seção 35 cm x 70 cm.

Fonte: O Autor (2019).

Gráfico 6 - Flecha Máxima Para Seção 35 cm x 90 cm.

Fonte: O Autor (2019).

Na tabela 7, seguindo ao disposto na NBR 6118:2014, são descritos os valores de flechas limites para os vãos aqui considerados.

Tabela 7 - Valores Máximo para as Flechas segundo a NBR 6118:2014. *(L/250)

VÃO	FLECHA MÁXIMA ADMITIDA*
8 METROS	32 milímetros
10 METROS	40 milímetros
12 METROS	48 milímetros

Fonte: O Autor (2019).

Pode ser observado que os resultados obtidos pelo *software* passam com grande folga dentro do que a NBR 6118:2014 exige como máximo, sendo assim a flecha não foi um fator limitante para o dimensionamento em nenhum dos casos das classes de resistência do concreto, conforme apresentado anteriormente nas figuras 30 a 32.

A Tabela 8 apresenta, para o concreto convencional - classe C50, dados simplificados dos gráficos acima, acrescido da Força por Cordoalha (FPC) e do número total de cordoalhas utilizadas no emprego da protensão para o ELS-D, considerando a excentricidade padrão do *software*. Vale lembrar que a excentricidade padrão do *software* é aquela admitida considerando o afastamento máximo possível da armadura ativa para o centro de gravidade da seção transversal, não levando em conta o cobrimento nominal exigido por norma para a classe de agressividade aqui

estudada (classe I), ou seja, no *software* em estudo armadura de protensão estaria exposta, faceando o bordo inferior.

Tabela 8 – Variação de carga, flecha, FPC e N° de cordoalhas para concretos da classe C50.

C-50												
Seção	Carga(kN/m)			Flecha(mm)			FPC (kN)/Número de Cordoalhas					
	8 m	10 m	12m	8 m	10 m	12 m	8 m	N	10 m	N	12 m	N
30x60	69	36	17	5,02	7,81	11,19	73,76	27	76,15	25	74,22	24
35x70	118	67	38	4,26	6,66	9,56	76,35	36	74,49	36	75,78	34
35x90	210	125	78	3,3	5,15	7,41	75,23	48	75,61	47	75,7	46
N = Número de Cordoalhas												

Fonte: O Autor (2019).

Percebe-se que com o aumento das dimensões da seção transversal, a estrutura admite cargas maiores e possibilita uma redução nas flechas máximas resultantes desses carregamentos, como pode ser observado na tabela 8.

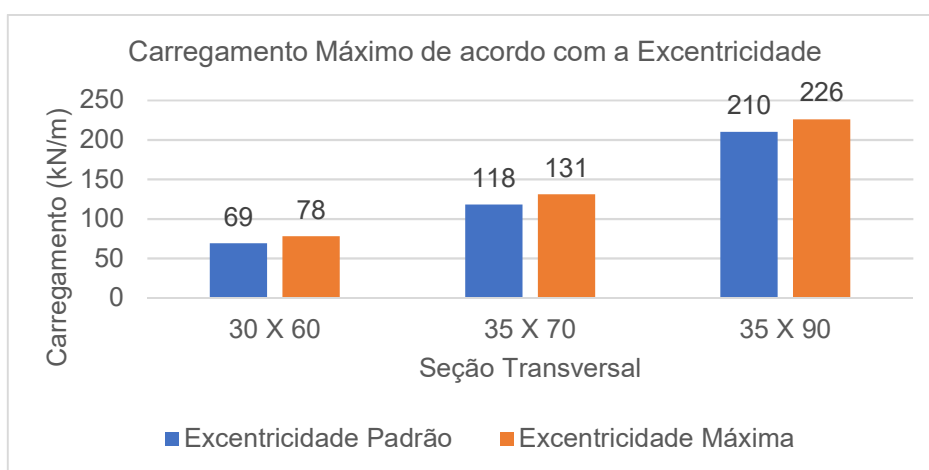
Do exposto na tabela 8, analisando-se o vão de 8 metros, quando aumentada a área da seção transversal de 30 cm x 60 cm para a 35 cm x 70 cm, a viga tornou-se capaz de suportar uma carga 1,71 vezes maior; e aumentando a seção transversal de 30 cm x 60 cm para 35 cm x 90 cm a viga torna-se capaz de suportar uma carga 3,04 vezes maior, quando comparado a seção transversal de 35 cm x 70 cm com a 35 cm x 90 cm, a peça tornou-se capaz de suportar uma carga 1,77 vezes maior.

Vale atentar-se que em alguns casos, mesmo com o aumento do carregamento máximo, propiciado pelo aumento nas dimensões da seção transversal, há uma redução da Força por Cordoalha. Essa situação é explicada pelo aumento do número de cordoalhas, caso observado na variação da seção de 35 cm x 70 cm para 35 cm x 90 cm. Nesses casos, observa-se que quando se multiplica à Força Por Cordoalha por esse maior número de cordoalhas, obtém-se a força de protensão utilizada na peça, que como esperado, acaba sendo maior, uma vez que o aumento do carregamento máximo atuante na peça protendida é substancialmente maior com o aumento da seção. Esse último fato é o que também justifica o observado de aumento na força por cordoalha, mesmo com o aumento do número de cordoalhas, entre a variação de seção de 30 cm x 60 cm para 35 cm x 70 cm. Pois o aumento do número

de cordoalhas com a variação do carregamento não se deu de tal modo que possibilitasse a redução da intensidade de força por cordoalha.

O Gráfico 7 relaciona, para uma mesma classe de resistência do concreto (C50) e um mesmo comprimento de vão (8 metros), a carga máxima suportada pelas vigas, considerando-se as seções transversais 30 cm x 60 cm, 35 cm x 70 cm e 35 cm x 90 cm, mediante a condição de protensão aplicada com a excentricidade padrão e com a excentricidade máxima possível permitida no *software*. Dela constata-se que há um ganho na capacidade de carga dos elementos protendidos quando do emprego da excentricidade máxima, conforme esperado.

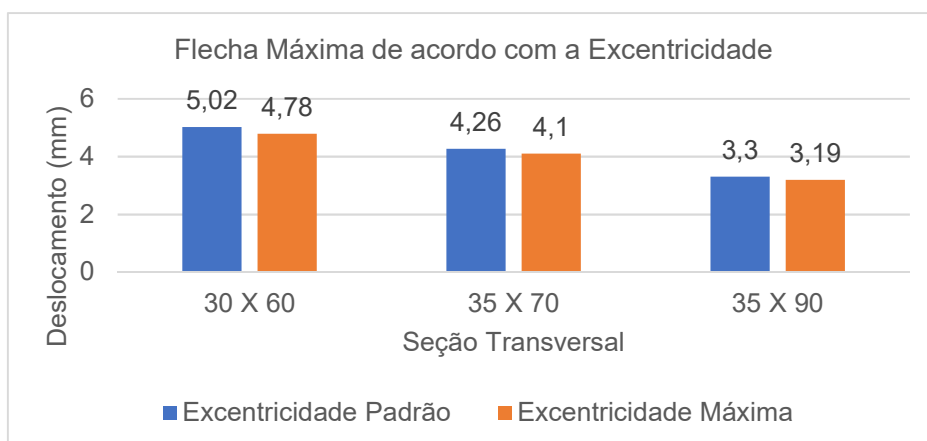
Gráfico 7 - Carga Máxima para vão de 8 metros para Excentricidade Padrão x Excentricidade Máxima.



Fonte: O Autor (2019).

O Gráfico 8 relaciona as flechas máximas, para uma mesma classe de resistência do concreto (C50), mesmo comprimento de vão (8 metros) e mesma carga (a máxima admitida pela aplicação da excentricidade padrão para respectivas seções transversais), mediante a condição de protensão aplicada com a excentricidade padrão e com a excentricidade máxima possível permitida no *software*. Dela constata-se que há uma redução da flecha máxima presente nos elementos protendidos quando do emprego da excentricidade máxima, conforme esperado.

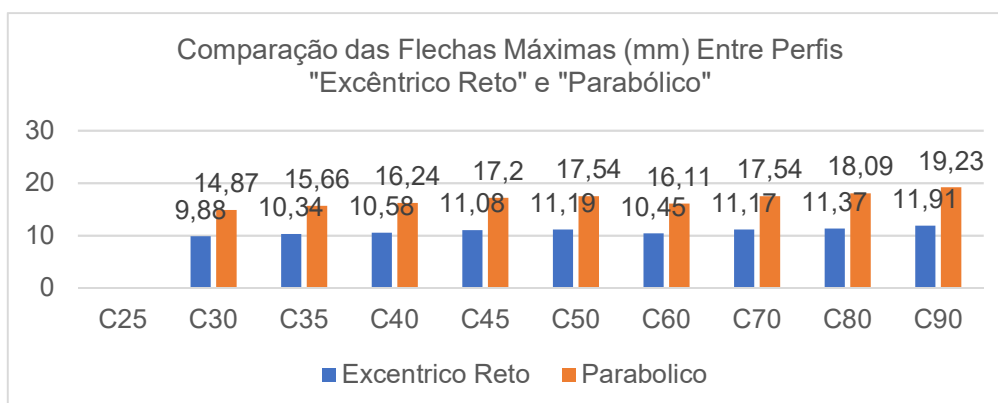
Gráfico 8 - Flecha Máxima para vão de 8 metros para Excentricidade Padrão x Excentricidade Máxima.



Fonte: O Autor (2019).

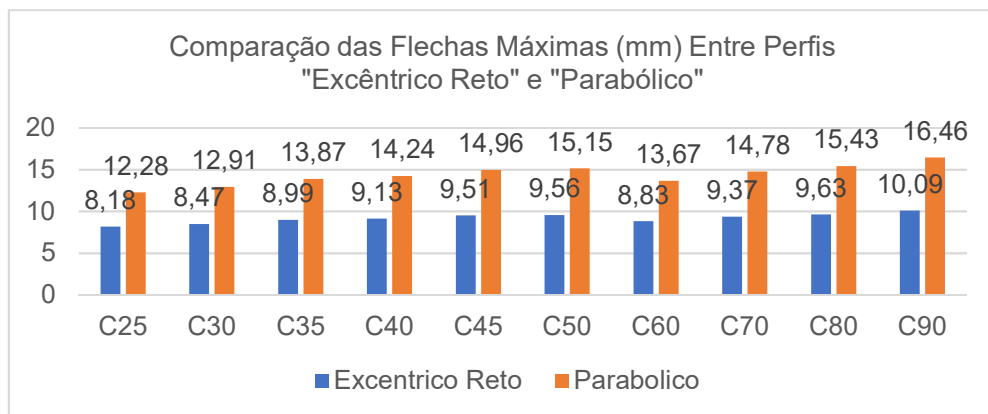
Os Gráficos 9 a 11, comparam as técnicas de protensão de acordo com o traçado do cabo, quando “excêntrico reto” e “parabólico” para o comprimento de vão de 8 metros. Nelas é possível ver que quando aplicado o traçado de cabo “parabólico” a peça apresenta maiores deformações do que as apresentadas pelo traçado “excêntrico reto”, uma vez que no primeiro a excentricidade varia, sendo reduzida à medida que se aproxima das extremidades do vão. Esse decaimento da excentricidade possibilita a redução das tensões de compressão provocadas pela protensão ao longo das seções e, por conseguinte, também da redução dos alívios de deformações provocadas pelo carregamento, desde o meio do vão até os apoios.

Gráfico 9 - Comparação de deslocamentos entre as orientações de cabo na seção 30 cm x 60 cm para 12 metros de comprimento de vão.



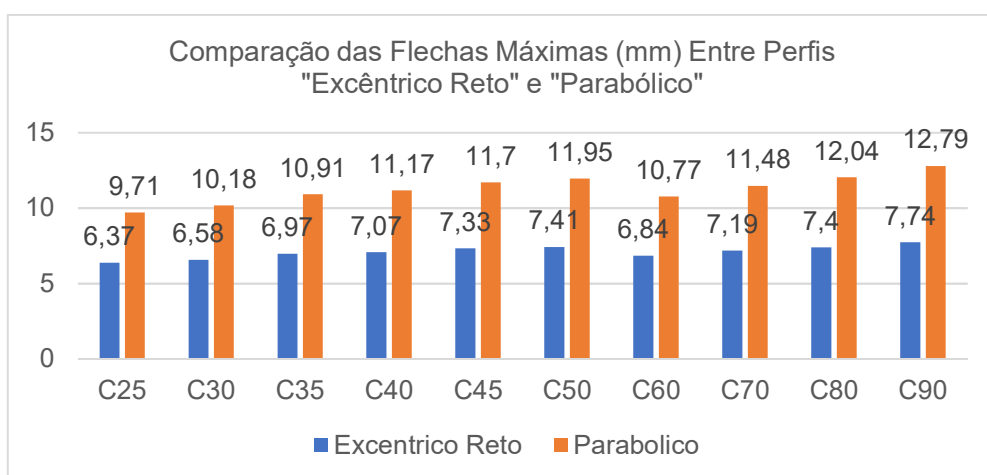
Fonte: O Autor (2019).

Gráfico 10 - Comparação de deslocamentos entre as orientações de cabo na seção 35 cm x 70 cm para 12 metros de comprimento de vão.



Fonte: O Autor (2019).

Gráfico 11 - Comparação de deslocamentos entre as orientações de cabo na seção 35 cm x 70 cm para 12 metros de comprimento de vão.



Fonte: O Autor (2019).

6 CONCLUSÃO

Utilizando um concreto de maior resistência entre as classes de resistência convencionais (C50) nas vigas protendidas, verificou-se que com o aumento da seção transversal há um ganho na capacidade de carga e uma redução das deformações mediante a carga máxima possível aqui considerada.

Notou-se um ganho quando aplicadas classes de resistência de concreto maiores. Sendo possível à estrutura suportar cargas mais elevadas, que pode ser observado, por exemplo, quando comparadas as classes C25 e C30 para comprimento de vãos de 8 metros, com seção transversal 35 cm x 90 cm onde obteve-se o ganho de 96 kN/m para 118 kN/m.

Quanto às dimensões das flechas, quando aumentada a capacidade portante da peça, fosse por meio do aumento da seção, aumento da excentricidade ou do emprego de classes de resistências maiores, observou-se uma pequena redução das flechas, cerca de 1,54% nos casos de aumento da seção transversal de 30 cm x 60 cm para 35 cm x 90 cm. Entretanto, quando aplicado o perfil parabólico, as deformações aumentaram significativamente, como pode ser visto nos gráficos 9 a 11, sendo que mesmo as maiores flechas encontradas, que foram nos casos de traçados de cabos parabólicos e maiores vãos (caso dos vãos de 12m), estavam muito abaixo do limite definido em norma.

O estudo permitiu verificar que com o aumento da seção transversal foi possível obter um aumento da capacidade portante das peças protendidas. Não sendo essa a única solução no caso de concreto protendido, foi possível entender que o aumento da excentricidade também permite ter um aumento da capacidade portante da peça, mesmo o aumento da seção sendo a causa de um ganho mais significativo.

Apesar do comportamento esperado, o *software* apresenta respostas limitadas, que para seu uso, mesmo como recurso didático, pode acabar gerando dúvidas quanto as possibilidades de seu emprego em algumas situações.

A impossibilidade de combinar carregamentos pontuais com carregamentos distribuídos e a inexequibilidade de aplicar mais de um carregamento acidental acabam sendo limitantes para o dimensionamento de estruturas mais complexas, reduzindo a aplicabilidade do *software*. A disponibilidade apenas da protensão pós-aderente impede a sua utilização para comparar eficácia de outros tipos de protensão, e os possíveis ganhos com cada um dos tipos.

A falta de acesso ao manual do aplicativo também limita bastante o entendimento do comportamento do *software*, gerando dúvidas sobre alguns processos de cálculos e daí sobre sua precisão e real eficiência para algumas situações de dimensionamento de peças protendidas; como, por exemplo, quando aplicada a excentricidade máxima, onde a ferramenta apresenta a possibilidade de aplicar a tensão de protensão na região inferior, na distância correspondente a $h/2$ do centro de gravidade da seção, levando a acreditar que a protensão seria realizada ignorando o cobrimento mínimo para os respectivos casos. Apesar desses fatos, o *software* apresentou soluções coerentes ao que preconiza a NBR 6118:2014.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA FILHO, F. M. **Estruturas de Pisos de Edifícios com a Utilização de Cordoalhas Engraxadas**. 2002. Dissertação de Mestrado, 284 p., Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2002.
- ALMEIDA, Helber R. F. L. de. **O USO DAS TECNOLOGIAS DIGITAIS DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA AULA DE CÁLCULO 1 A DISTÂNCIA**. 2013.
- AMORIM, Arivaldo Leão de; CHECCUCCI, Érica de Sousa. **TECNOLOGIAS COMPUTACIONAIS DE AUXÍLIO AO PROJETO DE EDIFICAÇÕES: POTENCIALIDADES VERSUS DIFICULDADES DE IMPLANTAÇÃO**. Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, v. 14, 2008.
- ARAÚJO, A.R. **Estudo técnico comparativo entre pavimentos executados com lajes nervuradas e lajes convencionais**. Trabalho de Diplomação – Escola de Engenharia e Tecnologia, Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo. 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento, Versão Corrigida: 2015. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6349**: Barras, cordoalhas e fios de aço para armaduras de protensão - Ensaio de tração. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.
- BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **ANÁLISE EXPERIMENTAL DE DORMENTES DE CONCRETO PROTENDIDO REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇO**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos. USP, 1999.

BASTOS, Paulo Sergio dos Santos. **FUNDAMENTOS DO CONCRETO ARMADO**. Bauru: UNESP, 2006.

C.E.B. 1990. Código Modelo do CEB/FIP.

CHOLFE, Luiz; BONILHA, Luciana. **Concreto Protendido: teoria e prática**. São Paulo: Pini, 2016.

ESTEVES, Melissa Senhorinho Ventura e. **OTIMIZAÇÃO DO TRAÇADO DE CABO EM VIGAS DE CONCRETO PROTENDIDO CONSIDERANDO O ESTADO LIMITE ÚLTIMO DE FLEXÃO**. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil. PUC. Rio de Janeiro, 2002.

FUSCO, P.B. **TÉCNICA DE ARMAR AS ESTRUTURAS DE CONCRETO**. São Paulo, Ed. Pini, 2000, 382p.

GOMES JUNIOR, Humberto Alves. **VIGAS PROTENDIDAS - ESTUDO DA NORMA E MODELAGEM COM AUXÍLIO DE PROGRAMA DE ANÁLISE COMERCIAL**. Projeto de Graduação. UFRJ. Rio de Janeiro, 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais- 2ª Edição**. 2014. Ed.: IBRACON. ISBN.:978-85-98576213. Português, p. 751.

MOREIRA, Leandro Soares. **ANÁLISE NÃO LINEAR DE VIGAS DE CONCRETO COM PROTENSÃO NÃO ADERENTE VIA ELEMENTOS FINITOS**. 2016. 135 f. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia. Fortaleza, 2016.

NASCIMENTO, Luiz Antonio do; SANTOS, Eduardo Toledo. **BARREIRAS PARA O USO DA TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL**. In: WORKSHOP NACIONAL – GESTÃO DO PROCESSO DE PROJETO NA CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS, 2., Porto Alegre, 2002. Anais... Porto Alegre, 2002.

NASCIMENTO, Luiz Antonio do; SANTOS, Eduardo Toledo. **A INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO NA ERA DA INFORMAÇÃO**. Ambiente Construído. Porto Alegre, v. 3, n. 1, p. 69-81, jan./mar. 2003.

ORTEGA, Carlos González. **AUTOMATIZAÇÃO DA DEFINIÇÃO DA PROTENSÃO USANDO DIAGRAMAS DE MAGNEL**. Projeto de Graduação – UFRJ. Rio de Janeiro, 2017.

PASSOS, Denis da Silva; VENEGA, Virginia de Sousa; ROCHA, Marcelo Lisboa. **SOFTWARES PARA SUPORTE NO ENSINO DE ENGENHARIA CIVIL: UM MAPEAMENTO SISTEMÁTICO DO USO NAS INSTITUIÇÕES BRASILEIRAS**. Revista Cereus, v. 9, n. 4, p. 2-18, 2018.

PINHEIRO, Libânio M. **ESTRUTURAS DE CONCRETO E PROJETO DE EDIFÍCIOS**. São Carlos: USP, 2007.

RELATORIO Técnico 30. Produto 22: Agregados para a Construção Civil. DESENVOLVIMENTO DE ESTUDOS PARA ELABORAÇÃO DO PLANO DUODECENAL (2010 - 2030) DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL. Ministério de Minas e Energia. 2009.

TQS Informática. TQS Store, 2019. Sistemas para uso profissional – TQS Store. Disponível em: <<https://store.tqs.com.br/systems/professional>>. Acesso em: 20/10/2019.

VERÍSSIMO, Gustavo de Souza; CÉSAR JR, Kléos M. Lenz. **CONCRETO PROTENDIDO: FUNDAMENTOS BÁSICOS**. 4ª ed. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 1998.

VERÍSSIMO, João Paulo dos Santos. **Efeitos da protensão na frequência natural de vigas de concreto**. 2018. 72 f. Monografia (Graduação) – Trabalho de Conclusão de Curso, Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia. João Pessoa, 2018.

ZANETTE, Samuel Giassi; VARGAS, Alexandre **ANÁLISE EXPERIMENTAL DA CAPACIDADE MECÂNICA DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COMPARADAS A VIGAS DE CONCRETO PROTENDIDO COM A MESMA SEÇÃO E ARMADURAS EQUIVALENTES**. UNESC. Santa Catarina, 2012.