



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE CARAÚBAS
CURSO: ENGENHARIA CIVIL

FRANCISCO SALES DIAS NETO

**AUTOMATIZAÇÃO DO METÓDO K6 PARA CÁLCULO DA ARMADURA
DE VIGAS PROTENDIDAS**

CARAÚBAS - RN
2018

FRANCISCO SALES DIAS NETO

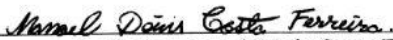
**AUTOMATIZAÇÃO DO MÉTODO K6 PARA CÁLCULO DA ARMADURA
DE VIGAS PROTENDIDAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia civil da Universidade
Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, como
requisito parcial para obtenção do título de
Engenheiro civil.

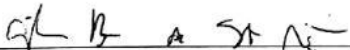
Orientador(a): Manoel Dênis Costa Ferreira.

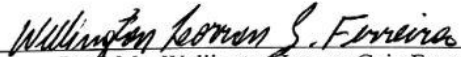
APROVADO EM: 18/04/2018

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Manoel Dênis Costa Ferreira

Presidente


Prof. Ms. Gilvan Bezerra dos Santos Junior
Primeiro Membro


Prof. Ms. Wellington Lorrán Gaia Ferreira
Segundo Membro

CARAÚBAS - RN
2018

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

N471a Neto, Francisco Sales Dias.

AUTOMATIZAÇÃO DO MÉTODO K6 PARA CÁLCULO DA
ARMADURA DE VIGAS PROTENDIDAS / Francisco Sales
Dias Neto. - 2018.
46 f.: il.

Orientador: Manoel Dênis Costa Ferreira.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2018.

1. Modelagem. 2. Protensão. 3. Método K6. I.
Ferreira, Manoel Dênis Costa , orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

DEDICATÓRIA

A minha tia Raimunda Tavares de Oliveira Nunes (in memoriam) que desde sempre pensou na família como a si mesma e fez com que eu chegasse até esse momento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Antônio Wilson e Jailma Tavares que sempre fizeram de tudo para que eu chegasse a esse momento.

Agradeço a minha família que sempre nos momentos difíceis estão ao meu lado me apoiando e me incentivando a seguir o melhor caminho.

Ao meu orientador Manoel Dênis Costa Ferreira pelo tempo atribuído a mim, pelas sugestões e ajuda.

Aos meus amigos da minha cidade que estão sempre ao meu lado, por nunca falharem comigo, por sempre serem sinceros, pelos conselhos, pelas diversões, pela amizade sincera.

Aos meus grandes amigos que a universidade me deu, amizades essa que sempre será lembrada, por todas as diversões, as tristezas, os churrascos, as noites de estudos, as disputas dentro de sala, enfim agradeço pela amizade por todo esse tempo.

A minha avó Albaniza, sempre quando vou visita-la, me faz esquecer todos os problemas, me fazendo sorrir e brincar como se fosse criança.

Agradeço a todos que me rodeiam, que sempre nos dão conselhos para crescer em termos de conhecimento.

Aos meus professores, pois é por vocês que estou onde estou, sempre passando o máximo de conhecimento, passando experiências convividas, tudo para nos prevenir do que venha a acontecer na frente, obrigado.

Por fim agradeço a minha namorada Daiane, pela paciência comigo, pelo carinho e por sempre me motivar a estudar e seguir meus sonhos.

RESUMO

A protensão é uma técnica que introduz na estrutura um estado prévio de tensões, melhorando a resistência e o comportamento do elemento estrutural, técnica essa muito importante para alcançar grandes vãos na obra, ou peças esbeltas, garantindo a integridade da mesma. A modelagem de uma ferramenta de dimensionamento para vigas protendidas é de suma importância e para isso, segue os seguintes passos: implantação da metodologia, obtenção dos esforços solicitantes na viga, atribuição da geometria da seção da viga e inserção dos materiais que serão utilizados para dimensionar o elemento estrutural; a necessidade de utilizar tais ferramentas, explica-se pela economia de tempo e de trabalho, onde a criação de planilhas automatizadas com procedimentos de cálculo torna-se de suma importância otimizando assim os resultados. Com esse intuito, o presente trabalho tem como objetivo utilizar princípios da programação a fim de gerar uma ferramenta de dimensionamento de vigas protendidas. Com isso, para a modelagem da ferramenta, foi utilizado o método do processo prático K6, utilizado para o dimensionamento da armadura ativa e passiva de uma seção retangular de uma viga. Assim sendo, foi elaborada uma planilha para automatizar e facilitar os cálculos para resolver problemas de protensão. A planilha determina, com poucos dados de entrada iniciais, as proporções de armadura ativa, passiva e uma série de outros resultados inerentes ao dimensionamento de vigas protendidas. Vale ressaltar que, a planilha apresentou alta precisão ao resolver o exemplo para validação do método e mesmo que a ferramenta seja de fácil utilização, a mesma requer que o usuário seja capacitado para interpretar os dados gerados.

Palavras-chave: Modelagem. Protensão. Método K6.

ABSTRACT

Protension is a technique that is on alert, with a resistance and a structural structure mechanism, which is very important for the control of a work, or slender piece, guaranteeing a force of the same. The modeling of a sizing tool for prestressed beams is of paramount importance and for this, it follows the following steps: implantation of the methodology, obtaining the requested stresses in the beam, assigning the geometry of the section of the beam and inserting the materials that will be used to size the structural element; the need to use such tools, is explained by the savings in time and labor, where the creation of spreadsheets with automated calculation procedures become paramount optimizing the results. With this purpose, the present work aims to use programming principles in order to generate a tool for sizing of prestressed beams. Thus, for the modeling of the tool, the practical process method K6 was used, for the active and passive armature dimensioning of a rectangular section of a beam. Therefore, a spreadsheet was designed to automate and facilitate the calculations to solve problems of prestressing. The spreadsheet determines, with very little initial input data, the proportions of active, passive armor and a number of other results inherent in the design of prestressed beams. It is worth emphasizing that, the spreadsheet presented high precision when solving the example for validation of the method and even if it is easy to use, the same one required by the user is able to interpret the generated data.

Key words: Modeling. Protension. Method K6.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Construção da ponte do Galeão	14
Figura 2 - Esquema simplificado para fabricação de peças protendidas com pré-tração.....	16
Figura 3 - Esquema simplificado de fabricação de peça protendida com pós-tração	17
Figura 4 – Utilização de protensão externa sem aderência para reforço de pontes.....	18
Figura 5 – Possibilidades de combinação dos processos e tipos de protensão no estado de utilização.....	19
Figura 6 - Exemplo de bainha metálica.....	22
Figura 7 - Cunhas embutidas em portas-cunha para fixação de fios de protensão.....	23
Figura 8 – Tabela do método K6.....	27
Figura 9 – Deformada.....	29
Figura 10 – Esquema básico de viga bi apoiada.....	29
Figura 11 – Entrada de Carregamento e coeficientes.....	30
Figura 12 –Viga de seção retangular	31
Figura 13 – Entrada da geometria e tipo de material.....	31
Figura 14 – Carregamento a ser preenchido pelo usuário	32
Figura 15 - Coeficiente a ser preenchido.....	33
Figura 16 – Geometria e materiais a ser preenchido	33
Figura 17 – Passo 1, 2, 3 e 4.....	34
Figura 18 – Relação armadura ativa e passiva	35
Figura 19 – Interface das Informações complementares	35
Figura 20 – Seção transversal.....	36
Figura 21 – Proporção entre A_{pf} e A_s	37
Figura 22 - Solicitações	38
Figura 23 – Geometria e Materiais.....	39
Figura 24 – Procedimento de cálculo e todas as variáveis calculadas	39
Figura 25 – Proporção entre A_{pf} e A_s	40
Figura 26 – Museu de Artes de São Paulo	41
Figura 27 – Carregamento para teste.....	41
Figura 28 – Coeficiente de ponderação	41
Figura 29 – Geometria e materiais para teste	42
Figura 30 – Passo 1, 2, 3 e 4.....	42
Figura 31 – Algumas sugestões de armadura passiva e ativa para a seção.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classe de agressividade ambiental (tabela 6.1 da NBR 6118:2014)	20
Tabela 2 – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal (tabela 7.2 da NBR 6118:2014)	21

Sumário

1. INTRODUÇÃO	11
1.1.OBJETIVOS	12
1.1.1. Objetivo geral	12
1.1.2. Objetivo específico	12
2. REVISÃO DA LITERATURA	13
2.1.HISTÓRICO SOBRE PROTENSÃO	13
2.2.PROTENSÃO	14
2.2.1. Sistema de protensão	16
2.2.1.1.Protensão com aderência inicial	16
2.2.1.2.Protensão com aderência posterior	17
2.2.1.3.Protensão sem aderência	18
2.2.2. Tipos de protensão	18
2.2.2.1.Protensão completa	18
2.2.2.2.Protensão limitada	19
2.2.2.3.Protensão parcial	19
2.3.MATERIAIS	20
2.3.1. Concreto	20
2.3.2. Aço para protensão	21
2.3.2.1.Fios, cordoalhas e cabos	21
2.3.3. Bainha	22
2.3.4. Injeção de calda de cimento	23
2.4.ANCORAGEM	23
2.5.COMBINAÇÃO DE AÇÕES	24
2.5.1. Estado limite último	24
3. METODOLOGIA	26
3.1.PESQUISA BIBLIOGRAFICA	26
3.2.METODO DE DIMENSIONAMENTO	26
3.3.ROTEIRO PARA DIMENSIONAMENTO	26
3.4.CARREGAMENTO	29

3.5.ENTRADA DA PLANILHA	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4.1.APLICAÇÃO	32
4.2.CARREGAMENTO	32
4.3.COEFICIENTE DE PONDERAÇÃO	32
4.4.ENTRADA	33
4.5.RELATORIO DA PLANILHA	34
4.6.INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES	35
4.7.VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS.....	36
4.7.1. Exercício resolvido, página 99~101 do livro concreto protendido – teoria e prática	36
4.7.2. Exercício resolvido com auxílio da planilha automatizada	38
4.8.TESTE E APLICAÇÃO	40
5. CONCLUSÃO.....	44
6. REFERÊNCIAS	45

1. INTRODUÇÃO

O sistema de protensão é uma técnica que consiste em gerar na armadura do elemento estrutural um pré alongamento, fazendo com que o elemento trabalhe com mais eficácia, onde nos locais que ocorrem compressão, as tensões serão resistidas pelo concreto que tem boa resistência a compressão e nos locais onde ocorre tração, os esforços sejam transferidos diretamente para a armadura que tem melhor capacidade em resistir a tração. Tal sistema, melhora o desempenho do elemento estrutural, pois cada material da composição do elemento utilizará todo o seu potencial, melhorando então os casos de fissuras resultantes da tração imposta pelas solicitações. De acordo com Hanai (2005), a protensão é um artifício que insere no elemento uma pré tensão, fazendo com que o elemento utilize melhor sua capacidade resistente, melhorando o seu comportamento mesmo com diversas cargas atuantes no elemento.

A necessidade de utilizar ferramentas computacionais para o cálculo e dimensionamento de elementos estruturais, explica-se pela economia de tempo e de trabalho com tal método. Planilhas automatizadas com os procedimentos de cálculo e com um pouco de programação, torna possível a padronização de metodologias, gerando assim um recurso que resolve de forma prática e mais rápida o problema solicitado.

Logo a modelagem de uma ferramenta de dimensionamento de vigas protendidas se torna importante e segue os seguintes princípios: inserção da metodologia, obtenção dos esforços solicitantes na viga, atribuição da geometria da seção da viga e inserção dos materiais que serão utilizados para dimensionar o elemento estrutural. Por seguinte, é importante gerar uma tabela com todos os dados calculados, para que o usuário tenha noção de como a ferramenta está trabalhando, requerendo que o usuário tenha conhecimento teórico sobre o problema que busca resolver.

Visto a necessidade de determinar a seção de uma viga protendida, uma ferramenta que automatize um método de dimensionamento torna-se de suma importância, onde para maior simplificação da resolução, o usuário precisará do mínimo de dados possíveis para realizar tal dimensionamento.

Nesse trabalho, pretende-se gerar uma ferramenta de dimensionamento de viga protendida, de modo a implementar o processo prático K6 em uma planilha no Microsoft Office Excel, automatizada com o método. Além disso, para a validação da ferramenta, serão realizadas comparações entre os resultados de um exercício proposto pelo autor do método que utiliza o processo prático K6 e os resultados gerados pela planilha automatizada com o método K6.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GERAL

Gerar uma ferramenta de dimensionamento de viga protendida, utilizando uma planilha no Microsoft Office Excel, automatizada com a aplicação do processo prático K6 de dimensionamento de vigas com seções retangulares, que de modo fácil e rápido, possa resolver o problema imposto.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

Estudar e apresentar o processo prático K6 de dimensionamento de vigas protendidas;

Utilizar princípios da programação para desenvolver uma planilha que automatize o processo prático K6 de dimensionamento de vigas protendidas;

Validar o método proposto a partir dos seus resultados e verificar a eficiência de sua utilização.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. HISTÓRICO SOBRE PROTENSÃO

Ao decorrer do tempo, de acordo com Cholve (2013), a engenharia de estruturas civis evolui admiravelmente, destacando-se as estruturas metálicas e de concreto. fFoi observado que a evolução se deu em respeito aos materiais utilizados nas estruturas, aos métodos a qual são feitos os cálculos e os projetos e em relação aos procedimentos e métodos construtivos.

Para Verissimo (1998), o concreto armado começou a desenvolver-se em meados de 1824, pois foi fomentado pelo surgimento do cimento Portland. Alguns anos depois, os alemães e os franceses também dominaram a técnica para produzir o cimento e começaram a produzir elemento estruturais e com o decorrer dos anos a se estudar formas de melhorar as propriedades deste material.

Logo, após a segunda guerra mundial, o crescimento das indústrias, impulsionou a produção do concreto, gerando um grande progresso das indústrias de cimentos e aditivos. Dumet (2005) destaca também que hoje, por causa dessa alavancada das indústrias, tem-se abundância de tipos de aditivos e cimentos. O mesmo autor também cita que a evolução do concreto, em decorrência do constante avanço do conhecimento químico do cimento, tem desempenhado papel de destaque no progresso tecnológico da engenharia civil. A seguir apresenta-se um breve histórico sobre protensão.

No mundo:

Junior (2009) relata que a protensão vem sendo usada a muito tempo atrás, observa que os egípcios por volta de 2100 a.C., já utilizavam a técnica para encurtar laminas de ferro para confeccionar barcos. Muitos anos depois, para as confecções de toneis, era utilizado a mesma técnica utilizada para forjar as embarcações.

No ano de 1866, foi registrado a primeira pessoa a aplicar a protensão em peças de concreto, este fato ocorreu no Estados Unidos. H. Jackson utilizava porcas para condicionar o estado de tensões na estrutura. No ano de 1888, Doebling na Alemanha cria a patente para as lajes protendidas, ainda na Alemanha, no ano de 1919, Wettstein fabricou painéis protendidos. (BASTOS, 2015)

Em 1928 surge o primeiro trabalho relevante sobre concreto protendido, desenvolvido por Eugène Freyssinet. O trabalho consistiu em introduzir no concreto um aço de alta resistência, utilizando o princípio da protensão. Além disso, o engenheiro francês criou, aços e equipamentos para este sistema. Tal feito, levou-o a ser considerado o criador do concreto protendido. (JUNIOR, 2009)

Por volta do ano de 1950, ocorreu a primeira conferência sobre o tema, na França. Com destaque para o trabalho de Walder, que apresentou o projeto da construção da primeira ponte em balanços sucessivos. Três anos depois, na Alemanha, foi estabelecida a primeira norma em concreto protendido nomeada de DIN 4227. (BASTOS, 2015)

no Brasil:

No ano de 1948, com o uso do sistema Freyssinet, surgiu no Rio de Janeiro, a primeira obra em concreto protendido, conhecida como ponte do galeão, com comprimento de 380 metros. Nessa época, foi considerada a ponte mais extensa do mundo. Junior (2009) também destaca que todos os materiais e equipamentos vieram da França.

Em meados de 1952, a companhia Belgo-Mineira inicia a fabricação de aço de protensão no Brasil, esta companhia foi criada a partir da junção de duas empresas que disputavam o mercado. (JUNIOR, 2009)

A Figura 1 apresenta como ocorreu o avanço da construção da ponte.

Figura 1- Construção da ponte do Galeão



Fonte: Vasconcelos, 1992.

Segundo Echeverra (2005), o concreto protendido teve seu ápice na segunda metade do século XX, com o surgimento de novos métodos de executar a protensão, aumentando neste período a procura por equipamentos e gerando uma evolução do processo de protensão.

2.2. PROTENSÃO

Como descrito por Echeverra (2005), o concreto protendido advém do concreto armado convencional com a inclusão da solicitação de compressão que faz com que o elemento tenha uma melhoria no comportamento. O citado autor ainda comenta que as solicitações de compressão são advindas das barras, cabos e fios tracionados e preso ao concreto por meio de ancoragem. Para Junior (2009), a protensão consiste em implantar na

estrutura desejada, uma tensão previa, fazendo com que o elemento sob vários tipos de carregamento, melhore o seu comportamento e a sua resistência.

Bastos (2015), destaca que é essencial utilizar a protensão para reduzir fissuras, fissuras estas que o concreto desenvolve quando está submetido a flexão. Ele deixa evidente que é necessário realizar a protensão centralizada ou com uma excentricidade para que ocorra uma redução das tensões de tração no meio e nos apoios do elemento estrutural, fazendo com que o concreto trabalhe com total eficiência, isto é, a compressão em toda a altura da seção.

Em Bastos (2015), destaca como vantagens do concreto protendido em relação ao concreto armado, que o concreto protendido utiliza concretos e aços de alta resistência (aços que resiste até a tensão de 2100 Mpa e concretos até 85 MPa), que toda seção transversal resiste as tensões submetidas, que os elementos de concreto protendido são mais leves, mais esbeltos e esteticamente mais bonitos, que o concreto fica livre de fissuras proporcionando daí mais vantagens e apresenta melhor controle de flechas, que o concreto protendido tem melhor resistência as forças cortantes, ocasionado pela inclinação dos cabos próximos aos apoios e a pré-compressão que reduz as tensões de tração diagonais e que o aço da protensão durante o estiramento é pré-testado.

Verissimo (1998) acrescenta que o concreto protendido permite projetar seções mais esbeltas que no concreto armado convencional, sobretudo se o comportamento em serviço é um fator predominante, uma vez que toda a seção de concreto pode trabalhar à compressão. Assim, normalmente as peças de concreto protendido possuem menor peso próprio, em relação a peças equivalentes de concreto armado, o que viabiliza economicamente o projeto de estruturas para grandes vãos, que permite controlar a deformação elástica e limita-la a valores menores que os que seriam obtidos para estruturas similares em aço ou concreto armado, proporciona melhores condições de durabilidade, pois anula totalmente, ou quase totalmente, as tensões de tração, principais responsáveis pela fissuração. As armaduras ficam mais protegidas, permite que a estrutura se recomponha após a atuação de uma sobrecarga eventual não prevista. Cessada a causa, as fissuras abertas se fecham devido a ação da força de protensão, que a estrutura normalmente possui maior resistência a fadiga, pois a variação de tensão no aço, proveniente de cargas moveis, é muito pequena se comparada com o valor da sua resistência característica e que a operação de protensão funciona como uma verdadeira prova de carga, pois as tensões introduzidas nessa fase são muito maiores que as correspondentes à situação da peça em serviço.

Contudo ainda de Verissimo (1998), destaca que em contrapartida, podem ser relacionadas algumas desvantagens do concreto protendido, pôr o concreto exigir maior controle na execução por utilizar um concreto de maior resistência, por os aços de alta resistência exigirem cuidados especiais de proteção contra corrosão, deve ser realizada a instalação dos cabos de protensão com uma maior precisão de modo a garantir as posições admitidas nos cálculos. Como a força de protensão possui em geral um valor muito alto, um pequeno desvio do cabo da posição de projeto pode produzir esforços não previstos, levando ao comportamento inadequado da peça e até mesmo ao colapso, por as operações de

protensão exigirem equipamento e pessoal especializados, com controle permanente dos esforços aplicados e dos alongamentos dos cabos e além disso, as construções protendidas exigem atenção e controle superiores aos necessários para o concreto armado comum.

Na visão de Verissimo (1998), o momento resistente de uma seção protendida pode ser dobrada em relação a uma seção utilizando concreto armado, ainda destaca que se utilizar o dobro da resistência característica do concreto(f_{ck}) para a estrutura protendida, ela consegue resistir a momentos fletores quatro vezes maiores que o concreto armado pode resistir.

De acordo com a definição de elementos de concreto protendido, a protensão tem os seguintes objetivos: impedir ou reduzir a fissuração e os deslocamentos da estrutura em serviço e propiciar o melhor aproveitamento dos aços especiais no Estado Limite Último (ELU). (CHOLFE, 2013)

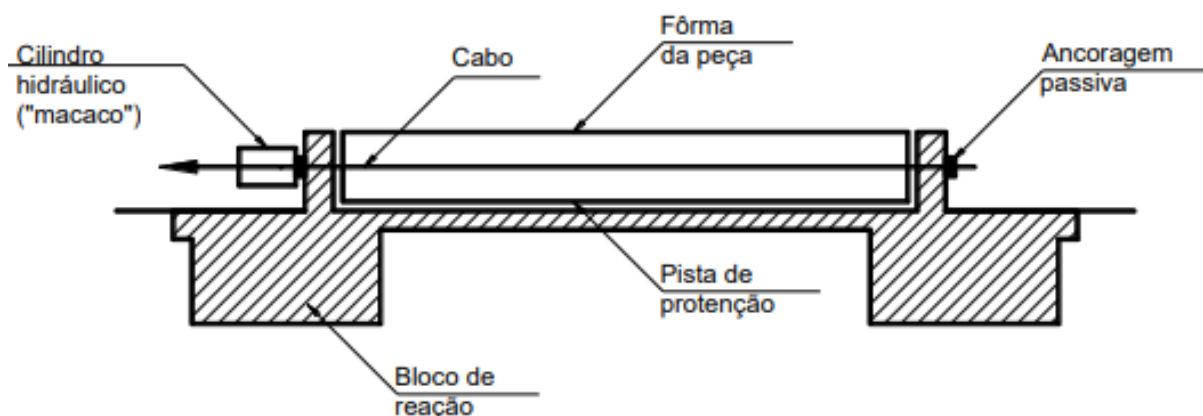
2.2.1. Sistema de Protensão

2.2.1.1. Protensão com aderência inicial

Na opinião de Bastos (2015), protensão com aderência inicial é o pré-alongamento de uma armadura de protensão, com cabos tensionados antes da concretagem do elemento. Neste caso o elemento é concretado com apoios independentes, sendo que quando o concreto endurece, a vinculação do elemento com o apoio é desfeita e a transferência da força de protensão, se dá pela aderência entre a armação e o concreto. Esse sistema é conhecido por concreto protendido com aderência inicial. Pode-se ver na Figura 2 o funcionamento deste sistema.

De acordo com a NBR 6118:2014, o concreto protendido em que o pré-alongamento da armadura ativa é realizado antes do lançamento do concreto, sendo utilizadas, com os apoios sendo a ligação da armadura de protensão e desfeita após o endurecimento do concreto, assim é feita a ancoragem no concreto apenas por aderência.

Figura 2 - Esquema simplificado para fabricação de peças protendidas com pré-tração



Fonte: Bastos (2015)

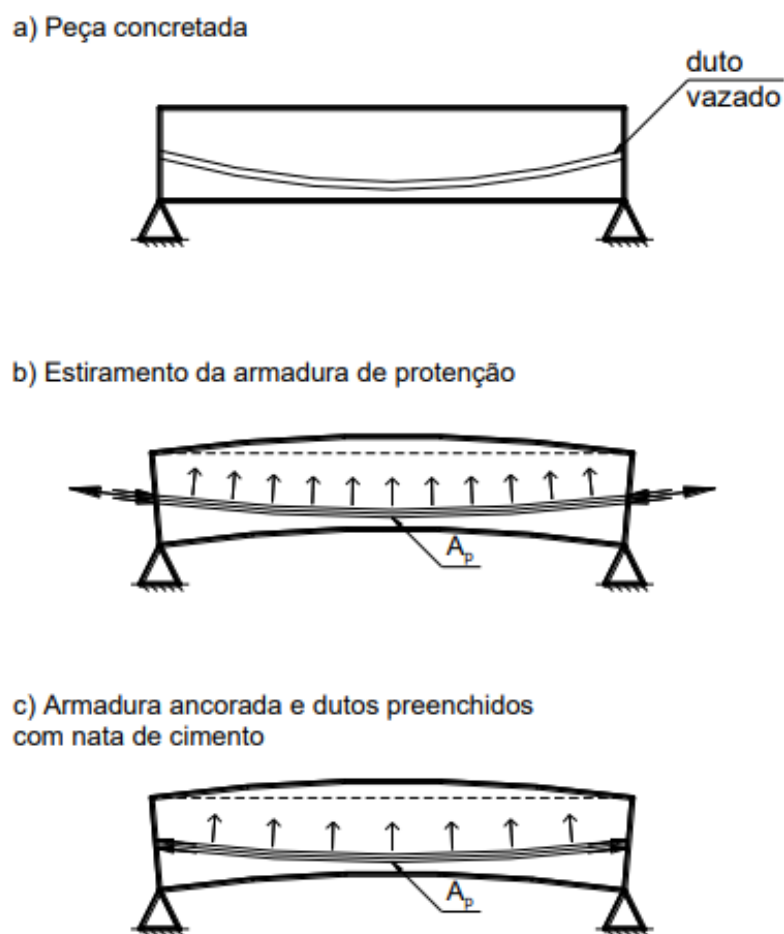
Para Bastos (2015), peças de Concreto Protendido pré-tracionadas são geralmente fabricadas em “pistas de protensão”, para possibilitar a moldagem de um grande número de peças simultaneamente, geralmente idênticas. A cura úmida a vapor é comum, a fim de permitir a transferência da força de protensão em até 24 horas.

2.2.1.2. Protensão com aderência posterior

De acordo com a NBR 6118:2014, o concreto com aderência posterior tem um pré-alongamento da armadura ativa executado após o concreto estar endurecido, sendo utilizadas, como apoios, partes da própria estrutura, criando depois do endurecimento do concreto aderência com o mesmo, de modo permanente, através da injeção das bainhas.

Bastos (2015) explica, que quando o estiramento da armadura de protensão é realizado após o endurecimento do concreto o sistema pode ser denominado Concreto Protendido pós-tracionado. Neste processo são utilizados como apoios partes do próprio elemento estrutural e se proporciona posteriormente a aderência com o concreto de modo permanente. A Figura 3 ilustra para melhor entendimento esse sistema de protensão.

Figura 3 - Esquema simplificado de fabricação de peça protendida com pós-tração



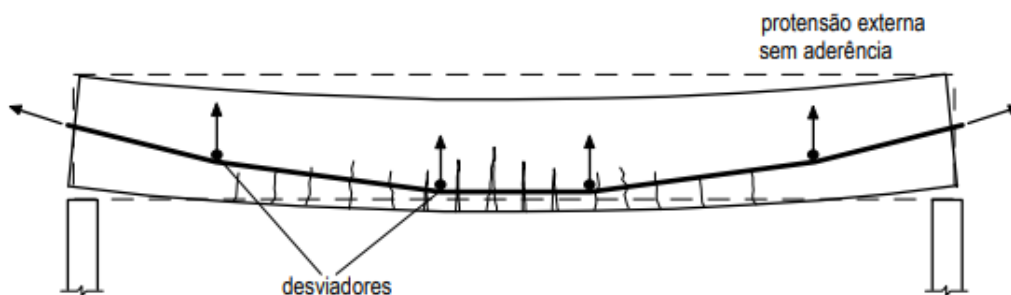
Fonte: Bastos (2015)

Via de regra, os sistemas de protensão com aderência posterior são patenteados em função, principalmente, das particularidades dos dispositivos de ancoragem, do processo e dos respectivos macacos hidráulicos utilizados para tracionar a armadura. Dentre os processos mais utilizados, pode-se citar os sistemas Freyssinet, Diwidag, VSL, Baur-Leonhardt, etc. (VERISSIMO, 1998)

2.2.1.3. Protensão sem aderência

Segundo a NBR 6118:2014, o concreto protendido sem aderência é aquele que tem um pré-alongamento da armadura ativa que é realizado após o endurecimento do concreto e não há aderência da armadura protendida com o concreto, sendo que a armadura fica ligada a alguns pontos da estrutura.

Figura 4 – Utilização de protensão externa sem aderência para reforço de pontes



Fonte: Verissimo (1998)

Para Verissimo (1998), a Figura 4 representa a protensão sem aderência, que é aplicada em peças de concreto já endurecido, nesse sistema não ocorre aderência entre a armadura e o concreto. Realiza-se o engraxamento dos cabos, reduzindo ao máximo a aderência da armadura ativa com o concreto. Entretanto, a armadura passiva deve permanecer aderente ao concreto.

2.2.2. Tipos de Protensão

2.2.2.1. Protensão completa

De acordo com a NBR 6118:2014, item 13.4.2, para protensão de peças com pré tração e classe de agressividade ambiental III e IV, as seguintes exigências devem ser atendidas:

- i. Estado limite de formação de fissuras (ELS-F) com ações de combinação rara.
- ii. Estado limite de descompressão (ELS-D) com ações de combinação frequente (o ELS-D a critério do projetista, pode ser substituído pelo ELS-DP com $a_p = 50$ mm);

Verissimo (1998) destaca que a protensão completa ou total como é geralmente chamada, protege melhor as armaduras contra corrosão e faz com que não se oscile as tensões

no aço. Ele também destaca que em meios muito agressivos, se torna mais atraente utilizar esse tipo de protensão.

2.2.2.2.Protensão limitada

Segundo a NBR 6118:2014, item 13.4.2 para protensão de peças com pré tração e classe de agressividade ambiental II ou com pós-tração com classe III e IV, devem ser atendidas as seguintes exigências:

- i. Estado limite de formação de fissuras (ELS-F) com ações de combinação frequente.
- ii. Estado limite de descompressão (o ELS-D a critério do projetista, pode ser substituído pelo ELS-DP com $a_p = 50$ mm), com ações de combinação quase permanente;

Verissimo (1998) destaca que na protensão limitada as vigas são dimensionadas a carregamentos não tão relevantes, e nestes casos considera-se a chance de ocorrer fissuração. Estas fissuras irão se fechar devido as tensões de compressão geradas pela protensão.

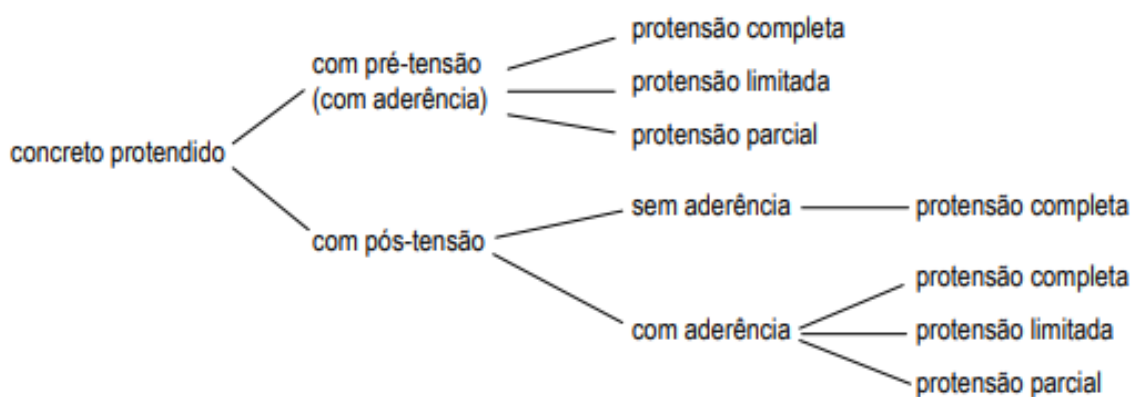
2.2.2.3.Protensão parcial

Segundo a NBR 6118:2014, item 13.4.2 para protensão de peças com pré-tração em classe de agressividade ambiental I ou com pós-tração com classe I e II, deve ser atendida a seguinte exigência:

- i. Estado limite de abertura de fissuras (ELS-W), com $w_k \leq 0,2$ mm, para combinação de ações frequente.

A Figura 5, faz um fluxograma de possíveis combinações dos sistemas e tipos de protensão, para facilitar na tomada de decisão.

Figura 5 – Possibilidades de combinação dos processos e tipos de protensão no estado de utilização.



Fonte: Verissimo (1998)

2.3. MATERIAIS

2.3.1. Concreto

Para Verissimo (1998), a construção de estruturas protendidas requer um controle de qualidade do concreto muito rigoroso. Deve-se exigir a realização de ensaios prévios, o controle contínuo do cimento e dos agregados utilizados, bem como uma fiscalização constante durante a elaboração do concreto.

De acordo com a NBR 6118:2014, item 6.4.1, a agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, independentemente das ações mecânicas, das variações volumétricas de origem térmica, da retração hidráulica e outras previstas no dimensionamento das estruturas. Como mostra a Tabela 1, a classe de agressividade aumenta com o risco de deterioração da estrutura.

Tabela 1 – Classe de agressividade ambiental (tabela 6.1 da NBR 6118:2014)

classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
II	Moderada	Submersa Urbana ^{a, b} Marinha ^a	Pequeno
III	Forte	Industrial ^{a, b} Industrial ^{a, c}	Grande
IV	Muito forte	Respingos de maré	Elevado

Fonte: NBR 6118 (2014)

Bastos (2015) ressalta que para construir utilizando concreto protendido, é notório que se tenha um maior controle de qualidade do concreto e da integridade do elemento. A NBR

6118:2014, sugere uma correlação da classe de agressividade ambiental e a qualidade do concreto. Com essa correlação é imposto uma relação água/cimento e a classe do concreto, como pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2 – correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal (tabela 7.2 da NBR 6118:2014).

Tipo de estrutura	Componente elemento ou	Classe de agressividade ambiental (Tabela 1)			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

Fonte: NBR 6118 (2014)

Do ponto de vista de Junior (2009), para o concreto é de total importância que se tenha as melhores propriedades mecânicas e que o elemento construído com esse tipo de material, tenha uma boa vida útil, isto também se pretende obter nas estruturas de concreto protendido, isto é, boa resistência e boa durabilidade.

É de extrema importância que os elementos construídos em concreto protendido passem por um processo de cura realmente cautelosa, pois o concreto com boa cura, garante que o mesmo propicie as características desejáveis para esse material. Em peças pré-moldadas, para se obter um ganho de produtividade, são utilizados métodos de cura e materiais que acelere o processo de ganho de resistência do concreto. (BASTOS, 2015).

Além da necessidade de boa resistência e de controle específico da retração e da fluência, é importante que o concreto tenha boas características de compacidade e baixa permeabilidade, para que se tenha uma proteção eficiente da armadura contra corrosão. No caso de concreto protendido, o aço da armadura ativa, solicitado por tensões elevadas, torna-se mais susceptível a corrosão, sobretudo a chama corrosão sob tensão. (HANAI, 2005)

2.3.2. Aço para protensão

2.3.2.1. Fios, cordoalhas e cabos

Os aços para protensão caracterizam-se por não possuírem patamar de escoamento, diferente do aço da armadura passiva, e também por apresentarem elevadas resistências. Como a protensão requer o estágio de alongamento da armação, a mesma deve ter uma boa resistência. Além disso, devem ter boas propriedades de aderência, ductilidade, boa resistência a fadiga, baixa relaxação e boa resistência a corrosão, tudo isto visando compensar as perdas de protensão. (BASTOS, 2015)

Junior (2009), destaca que os aços de protensão se diferem pelo tratamento que pode ser de relaxação normal (RN), que é um tratamento térmico que retifica o aço, para aliviar as tensões no processo de fabricação e pode ser de relaxação baixa(RB), pois o aço recebe tratamento termomecânico que maximiza as propriedades elásticas e diminui a perda por relaxação. Denomina que os aços de protensão se apresentam com a forma de CP, seguida da numeração correspondente a tensão que o aço suporta e associado ao tipo de tratamento para melhor especificação.

De acordo com Bastos (2015), o aço para protensão se encontra no mercado em forma de fios trefilados de aço, com diâmetro de 3 a 8 mm, em rolos ou bobinas, de cordoalhas (fios enrolados em hélice, com 2, 3 ou 7 fios) ou de barras de aço-liga de alta resistência, laminadas a quente, com $\phi \geq 12$ mm, e com comprimento limitado.

Para Junior (2009), os cabos são formados pelo agrupamento de 2 ou mais fios, cordoalhas ou barras, como consequência desse agrupamento é possível obter forças de protensão maiores, que dependem da quantidade de elementos no cabo.

2.3.3. Bainha

Junior (2009) afirma que as bainhas são tubos que devem permitir que a armadura de protensão passe por ela como o mínimo de aderência por atrito entre a armadura e o concreto. As bainhas devem ser perfeitamente estanques, para que no caso da concretagem, não tenha penetração do concreto ou calda de cimento penetrada na bainha, o que poderia tampar a bainha, fazendo com que não consiga passar a armadura de protensão. As bainhas geralmente são utilizadas no sistema de protensão sem aderência e no sistema com aderência posterior.

Figura 6- exemplo de bainha metálica



Fonte: BASTOS (2015)

De acordo com a NBR 6118:2014, as bainhas devem ser de material metálico, que promova uma livre movimentação dos cabos do sistema de protensão utilizado, logo, devem também ser capazes de resistir à pressão do concreto fresco sem deformar consideravelmente e aos esforços solicitados quando aplicado o pré-alongamento na armação de protensão. As bainhas não devem permitir a entrada de concreto ou calda de cimento no momento da concretagem.

2.3.4. Injeção de calda de concreto

A injeção da calda de cimento no interior da bainha metálica, geralmente utilizada no sistema de pós tração para melhor proteger a armadura contra a corrosão e promover a aderência entre a armadura de protensão e o concreto do elemento, deve ser realizada com uma calda com cerca de 40% peso de água em relação ao de cimento. (BASTOS ,2015).

Tendo em vista a corrosão sob tensão, nem o cimento nem o aditivo podem conter cloro. Também no caso de outros aditivos químicos, devem ser tomadas as precauções devidas, a não ser que tenham sido expressamente testadas. (VERISSIMO, 1998)

2.4.ANCORAGEM

Na opinião de Junior (2009), a ancoragem de uma forma mais simples, deve evitar que os cabos da protensão diminuam as tensões, ou seja, evitar que os cabos voltem as posições originais. A ancoragem é o elemento responsável por manter os cabos de protensão tensionados, e não percam a carga que foi aplicada pelo macaco hidráulico.

Bastos (2015) destaca que a ancoragem mais econômica e simples, são aquelas que são responsáveis por fixar os fio e cordoalhas por meio de portas cunhas e cunhas. No caso das cunhas, elas podem ser tripartidas ou bipartidas, e ficam acomodadas nas portas cunhas como podemos ver na Figura 7.

Figura 7 - Cunhas embutidas em portas-cunha para fixação de fios de protensão.



Fonte: Bastos (2015)

Verissimo (1998), destaca que no caso de fios lisos, pode-se utilizar ácido para deixar o fio com superfície áspera e com isso melhorar a aderência nessa situação. Ele afirma, entretanto, que para se ter uma ancoragem com boa aderência é preciso que se faça uma ancoragem mecânica.

2.5.COMBINAÇÃO DE AÇÕES

2.5.1. ELU

De acordo com a NBR 6118:2014, para combinação de ação no estado limite último, deve ser utilizado a Equação 1

$$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{eg} F_{egk} + \gamma_q (F_{q1k} + \sum \psi_{0j} F_{qjk}) + \gamma_{eq} \psi_{0e} F_{eqk} \quad (1)$$

Para o dimensionamento no estado limite último, a NBR 6118:2014, destaca os valores para os coeficientes de ponderação das ações. Como mostra na tabela 11.1 e 11.2 da norma em questão.

Tabela 11.1 – Coeficiente $\gamma_f = \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f3}$

Combinações de ações	Ações							
	Permanentes (g)		Variáveis (q)		Protensão (p)		Recalques de apoio e retração	
	D	F	G	T	D	F	D	F
Normais	1,4 ^a	1,0	1,4	1,2	1,2	0,9	1,2	0
Especiais ou de construção	1,3	1,0	1,2	1,0	1,2	0,9	1,2	0
Excepcionais	1,2	1,0	1,0	0	1,2	0,9	0	0

onde

D é desfavorável, *F* é favorável, *G* representa as cargas variáveis em geral e *T* é a temperatura.

^a Para as cargas permanentes de pequena variabilidade, como o peso próprio das estruturas, especialmente as pré-moldadas, esse coeficiente pode ser reduzido para 1,3.

Fonte: NBR 6118 (2014)

Tabela 11.2 – Valores do coeficiente γ_{f2}

Ações		γ_{f2}		
		ψ_0	ψ_1 ^a	ψ_2
Cargas acidentais de edifícios	Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ^b	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas ^c	0,7	0,6	0,4
	Biblioteca, arquivos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3

^a Para os valores de ψ_1 relativos às pontes e principalmente para os problemas de fadiga, ver Seção 23.

^b Edifícios residenciais.

^c Edifícios comerciais, de escritórios, estações e edifícios públicos.

Fonte: NBR 6118 (2014)

3. METODOLOGIA

O projeto desenvolveu-se nas seguintes etapas: pesquisa bibliográfica; definição de método empregado; definição de ferramenta a ser formulado o dimensionamento; definição de geometria e dos materiais; inserção de ações permanentes, variáveis e consequentes coeficientes de ponderação; teste e verificação dos estados limites.

Para a formulação da ferramenta de dimensionamento, foi utilizado a metodologia empregada no Livro do Engenheiro Luiz Cholve: Concreto Protendido – Teoria e Prática (Cholve, 2013). Essa metodologia foi escolhida, pois dimensiona vigas protendidas com seções retangulares, no ELU nos domínios 2, 3 e 4. No cotidiano, as construções em sua maioria utilizam vigas retangulares. O método pode ser utilizado para outros tipos de seções, com exceção das seções circulares. De acordo com Cholve (2013), para o cálculo de outras seções, elas podem ser compostas por retângulos bem posicionados, dando uma aproximação aceitável para o dimensionamento.

3.1.PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Nessa fase foram realizadas pesquisas bibliográficas sobre vigas protendidas e dimensionamento de elementos protendidos, com intuito de obter mais conhecimentos teóricos sobre o assunto, de tal forma a se familiarizar e conseguir formular uma ferramenta para o dimensionamento de vigas protendidas. Nessas pesquisas bibliográficas foram utilizados livros, teses, dissertações, monografias, entre outras fontes de literatura.

3.2.MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO

A modelagem do referente trabalho, tomou como base o tópico 3.6 - Vigas Protendidas: Dimensionamento de seções retangulares no estado limite último – domínios 2, 3 e 4 – com aplicação do método k6. (CHOLFE, 2013)

De acordo com Cholve (2013), o método k6 é utilizado para dimensionamento de vigas retangulares no estado limite último, sob solicitações normais. O método é válido para seções com armadura de protensão (ativa), armadura Passiva ou os dois casos, distribuídas na proporção adequada ao nível de protensão escolhido.

Ainda Cholve (2013) completa, a seção da viga sendo retangular, facilita a dedução das fórmulas de equilíbrio, possibilitando a formulação de tabelas ou programas simplificados de modo fácil. Como podemos ver na realidade, a maioria das seções das vigas são retangulares. Para outros tipos de seções (exceto para seções circulares) é admitido aproximações por meio da composição de retângulos bem posicionados, obtendo-se resultados com um bom grau de aproximação dos valores reais.

3.3.ROTEIRO PARA DIMENSIONAMENTO

O seguinte roteiro foi baseado no capítulo 3.6 do livro concreto protendido – Teoria e prática, que mostra o passo a passo para o dimensionamento de seções retangulares, nos domínios 2, 3 ou 4 no estado limite último.

Tabela de Dimensionamento de Vigas com Seções Retangulares armadas com Armadura Ativa (A_p) e Armadura Passiva (A_s)							ε_{pd} $\Delta \varepsilon_{pd}$ ε_{sd}	σ_{pd} (MPa)			σ_{sd} (MPa)			
$\beta_x = x/d$	$\beta_z = z/d$	$K_6 = bd^2 / M_{sd}$				ε_{cd} (‰)	CP175	CP190	CP210	CA50				
β_x	β_z	$K_6 = \text{Para concreto com } f_{ck} \text{ (MPa)} =$					32,5	1.487	1.614		1.782			
		25	30	35	40		30	1.476	1.601		1.768			
							27,5	1.465	1.588		1.754			
							25	1.454	1.575		1.739			
							22,5	1.443	1.563		1.725			
							20	1.432	1.550		1.711			
							17,5	1.420	1.537		1.696			
							15	1.409	1.525		1.682			
							12,5	1.398	1.512		1.668			
0,02	0,993	21,441	17,867	15,315	13,401	0,204	10	1.387	1.499	1.653	435			
0,04	0,986	5,601	4,668	4,001	3,501	0,417								
0,06	0,979	2,623	2,185	1,873	1,639	0,638								
0,08	0,972	1,562	1,302	1,116	0,976	0,870								
0,10	0,965	1,069	0,891	0,764	0,668	1,111								
0,12	0,957	0,802	0,668	0,573	0,501	1,364								
0,14	0,949	0,645	0,538	0,461	0,403	1,628								
0,16	0,940	0,551	0,459	0,394	0,344	1,905								
0,18	0,931	0,493	0,411	0,352	0,308	2,195								
0,20	0,922	0,448	0,373	0,320	0,280	2,500								
0,22	0,912	0,410	0,342	0,293	0,257	2,821								
0,24	0,902	0,380	0,316	0,271	0,237	3,158								
0,26	0,892	0,354	0,295	0,253	0,221	9,962						1.387	1.499	1.653
0,28	0,884	0,331	0,276	0,237	0,207	9,000						1.383	1.494	1.648
0,30	0,875	0,312	0,260	0,223	0,195	8,167						1.379	1.490	1.633
0,32	0,867	0,295	0,246	0,211	0,184	7,438	1.376	1.486	1.496					
0,34	0,859	0,280	0,234	0,200	0,175	6,794	1.358,8							

Para determinar a área de aço ativa (A_p) e a área de aço passiva (A_s), a priori é necessário conhecer a geometria da seção, materiais a serem utilizados, momento solicitante de cálculo (M_{sd}) e o alongamento da armação ativa. Com esses dados, é possível fazer o dimensionamento seguindo algumas etapas.

Passo 2 – com o Msd, com b e dp, determina-se o fator k6 a partir da Equação 2.

dp → distância do topo da viga até o centro geométrico da armadura ativa

$$\beta_z = \frac{z}{dp}; \quad (4)$$

$$\varepsilon_{cd} = 3,5\% < \varepsilon_{cd} < 0;$$

$$\Delta\varepsilon_{pd} = 0 < \Delta\varepsilon_{pd} < 10\%$$

$\varepsilon_{cd} \rightarrow$ deformação do concreto
 $\Delta\varepsilon_{pd} \rightarrow$ variação de deformação na armadura ativa

calcula-se:

$$\varepsilon_{pd} = \Delta\varepsilon_{pd} + \Delta\varepsilon_{pi} \quad (5)$$

$\varepsilon_{pd} \rightarrow$ deformação total da armadura ativa

Daí com o valor da equação 5, vai na tabela K6 e obtém-se o valor de σ_{pd} . Com todos esses dados já se pode calcular a armadura ativa, como podemos ver na equação 6.

$$A_p = \frac{M_{sd} \cdot 10^4}{\beta_z \cdot d_p \cdot \sigma_{pd}}; \quad (6)$$

$\sigma_{pd} \rightarrow$ tensão na armadura ativa
 $A_p \rightarrow$ armadura ativa
 logo determina:

$$N_{td} = A_p \cdot \sigma_{pd} \quad (7)$$

$N_{td} \rightarrow$ força de tração na armadura ativa

$$x = \beta_x \cdot d_p \quad (8)$$

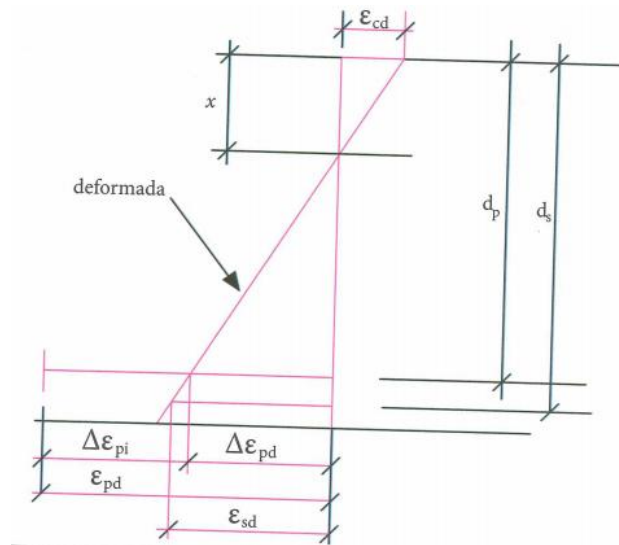
$$y = 0,8 \cdot x \quad (9)$$

Passo 3 – com os valores já determinados na parte 1 e 2, como x, y, N_{cd} , σ_{pd} , e $\Delta\varepsilon_{pd}$, para introduzir no dimensionamento a armadura passiva, será necessário calcular ε_{sd} , logo poderá ser obtido pela relação de triângulos na deformada conhecida, como podemos ver na Figura 9 a seguir, permitiu-se obter então a equação para ε_{sd} .

$$\varepsilon_{sd} = \frac{ds - X}{d_p - X} \cdot \Delta\varepsilon_{pd} \quad (11)$$

$ds \rightarrow$ distância do topo da viga até o centro geométrico da armadura passiva
 $\varepsilon_{sd} \rightarrow$ deformação na armadura passiva

Figura 9 - Deformada



Fonte: Cholfe (2013)

Passo 4 – com o valor da equação 12, encontra-se σ_{sd} e com isso, forma a equação 12:

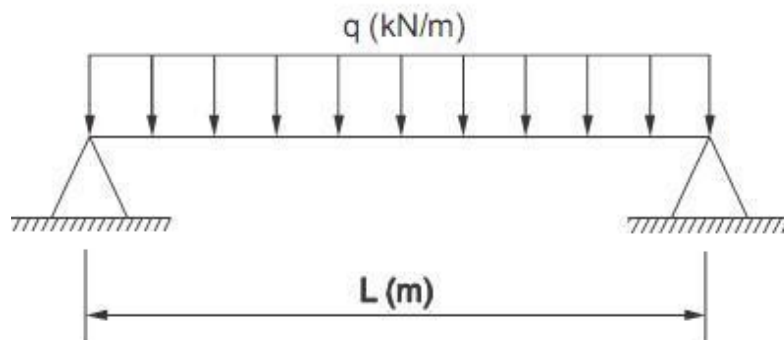
$$A_p \cdot \sigma_{pd} + A_s \cdot \sigma_{sd} = N_{td} \quad (12)$$

3.4.CARREGAMENTO

A priori, a planilha calcula as combinações de carregamento de vigas bi apoiadas como podemos ver na Figura 10, sendo que para o dimensionamento de qualquer viga, o fator mais importante é momento solicitante imposto na mesma. Para esse modelo de viga, o momento máximo é calculado de acordo com a equação 13.

$$M_{\text{máx}} = \frac{ql^2}{8} \quad (13)$$

Figura 10 – esquema básico de viga bi apoiada.



Fonte: própria do autor

Como toda ferramenta de dimensionamento, para conseguir fazer os cálculos, a inserção dos carregamentos permanentes, variáveis, coeficientes de ponderação se fazem necessário, visto que o fator determinante do cálculo de uma viga é o momento solicitante.

Figura 11 – Entrada de carregamento e coeficientes.

CARREGAMENTO						
PERMANENTE		VARIÁVEL				
g1 (KN/m)	g2 (KN/m)	q1 (KN/m²)	q2 (KN/m)	q3 (KN/m)	q4 (KN/m)	q5 (KN/m)
60	12	12	3	3	5	2

COEFICIENTES						
PERMANENTE		VARIÁVEL				
γg1	γg2	γq1	γq2	γq3	γq4	γq5
1,4	1,3	1,4	1,3	1,4	1,4	1,2

PONDERADOR				
ψ0,(1)	ψ0,(2)	ψ0,(3)	ψ0,(4)	ψ0,(5)
0,5	0,6	0,5	0,6	0,6

Fonte: Própria do autor

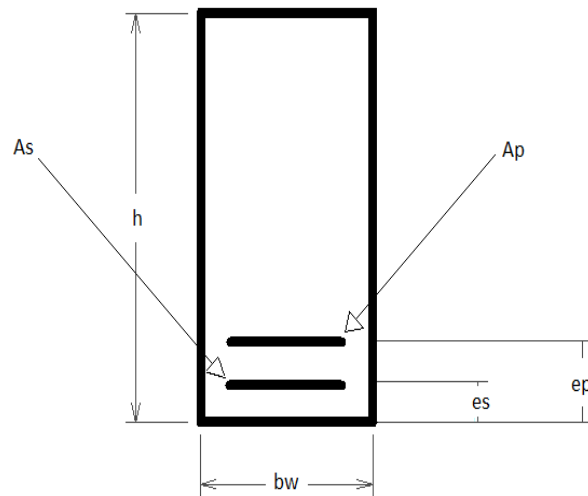
Para simplificação dos cálculos, a planilha foi, a priori, desenvolvida para calcular vigas bi apoiadas, a qual são adicionados os carregamentos permanentes e variáveis atuantes na estrutura e a planilha calcula as combinações das ações para o estado de limite último, como sugere o método k6.

Os coeficientes permanentes e variáveis podem ser obtidos na NBR 6118:2014, tabela 11.1 e os coeficiente ponderadores na tabela 11.2, mas para simplificação ao lado da planilha tem as tabelas com os coeficiente e explicação sobre o método de cálculo e inserção dos dados na planilha.

3.5.ENTRADA DA PLANILHA

Para a entrada da planilha de dimensionamento são necessários os seguintes dados básicos: comprimento da viga, altura e base da mesma, junto com **es** e o **ep**, explicitados na Figura 12, uma vez que é necessário informar a geometria utilizada para se realizar o dimensionamento da armadura ativa e passiva em questão.

Figura 12 – viga de seção retangular



Fonte: Própria do autor

Com o método implementado, tornou-se possível o dimensionamento das seções com o mínimo de dados possível, onde todas as equações foram automatizadas e a partir dos seguintes dados apresentados na Figura 13 é possível dimensionar a seção da viga.

Figura 13 – Entrada da geometria e tipo de material

Geometria		Materiais	
L (m)	-	Fck	-
bw (m)	-	$\gamma_{\text{concreto}} (\text{kN/m}^3)$	-
h (m)	-	Aço C.P.	-
es (m)	-	Aço C.A	-
ep (m)	-	$\Delta \epsilon_{pi}$	-

Fonte: Própria do autor

Como pode-se ver, poucos dados são necessários para se realizar o dimensionamento da seção da viga. Na parte da geometria, os dados a serem preenchidos são: a largura da viga (para o cálculo do peso próprio), a base da viga, altura, e_s e e_p que são a distância da base até o centro da armadura passiva e ativa respectivamente. Já na parte dos materiais, os dados requerentes são o fck do concreto, peso específico do concreto, tipo do aço de ativo e passivo e o pré alongamento da armadura ativa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1.APLICAÇÃO

Com o passar dos anos, a necessidade de criar planilhas para automatizar tarefas vem aumentando cada vez mais, visto que todo o trabalho de cálculo é realizado pelo computador. Entretanto, no que se refere a planilha implementada neste trabalho, mesmo com a simplicidade da formulação, o seu uso requer um nível mínimo de conhecimento para inserir os dados necessários e interpretar os resultados obtidos.

A solução para o dimensionamento de viga com seções retangulares da planilha de dimensionamento foi possível graças a metodologia simplificada do processo prático K6, a priori, o presente trabalho, buscou utilizar conceitos de lógica em uma ferramenta de simples utilização, a fim de gerar uma planilha, que a partir de um número mínimo de dados, seja capaz de fazer todo o dimensionamento e verificações para garantir o melhor desempenho da estrutura, fazendo com que tempo seja diminuído, pois todo processo de cálculo a planilha será responsável de executar.

Essa ferramenta de dimensionamento é uma implementação do processo prático K6. O dimensionamento inicia-se com a determinação do fator K6 e por meio de tabelas e equações simples é possível determinar a armadura ativa e passiva em vigas.

4.2.CARREGAMENTO

Nessa parte de carregamento, a planilha necessita que o usuário compute os carregamentos impostos na estrutura permanentes e variáveis, como podemos ver na Figura 14 a seguir.

Figura 14 – Carregamento a ser preenchido pelo usuário

CARREGAMENTO						
PERMANENTE		VARIÁVEL				
g1 (KN/m)	g2 (KN/m)	q1 (KN/m ²)	q2 (KN/m)	q3 (KN/m)	q4 (KN/m)	q5 (KN/m)
-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Própria do autor

Para os carregamentos permanentes, o índice g1 é referente aos carregamentos permanentes na estrutura e g2 é para casos que se considera a fluência como um carregamento permanente. Como carregamento variável podemos ter, cargas acidentais na estrutura, vento, temperatura, entre outros. Nesta seção se torna necessário conhecer o carregamento imposto na viga a ser dimensionada.

4.3.COEFICIENTE DE PONDERAÇÃO

Para se calcular o momento solicitante em uma estrutura, é importante ponderar esses carregamentos, pois é um método que garante melhor a segurança da estrutura. Nos casos que tenha mais de uma carga variável, se torna necessário utilizar os coeficientes ponderadores, pois nem sempre todas as ações atuantes na estrutura estão sendo aplicadas ao mesmo tempo e

com a máxima intensidade, esses coeficientes são uma forma estatística que prevê o quanto aquela força atua na estrutura quando outra ação está sendo aplicada.

Na interface da planilha é necessário realizar o preenchimento dos coeficientes de ponderação como podemos ver na Figura 15, para poder utilizar a combinação das ações (item 11.8.2.4, NBR 6118:2014, tabela 11.3), já que o método impõe o uso do maior valor de momento, obtido da combinação no estado limite último, pela seguinte equação:

$$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{eg} F_{egk} + \gamma_q (F_{q1k} + \sum \psi_{0j} F_{qjk}) + \gamma_{eq} \psi_{0e} F_{eqk}$$

Figura 15 - Coeficiente a ser preenchido

COEFICIENTES						
PERMANENTE		VARIÁVEL				
γ_{g1}	γ_{g2}	γ_{q1}	γ_{q2}	γ_{q3}	γ_{q4}	γ_{q5}
-	-	-	-	-	-	-
		PONDERADOR				
		$\psi_{0,(1)}$	$\psi_{0,(2)}$	$\psi_{0,(3)}$	$\psi_{0,(4)}$	$\psi_{0,(5)}$
		-	-	-	-	-

Fonte: Própria do autor

Para o preenchimento, a norma 6118:2014, item 11.7.1, traz as tabelas 11.1 e 11.2 para auxiliar nos coeficientes a serem adotados de acordo com suas especificações.

4.4.ENTRADA

A Figura 12 ilustra uma seção que serve para orientar o usuário quando for inserir os dados da geometria da planilha. Além dos dados referentes a geometria, para os cálculos, será necessário informar as propriedades dos materiais utilizados para o dimensionamento. A Figura 16 mostra tudo que precisa para se realizar o dimensionamento em questão.

Figura 16 – Geometria e materiais a ser preenchido

ENTRADA			
Geometria		Materiais	
L (m)	-	Fck	-
bw (m)	-	$\gamma_{concreto}$ (kN/m³)	-
h (m)	-	AçoC.P.	-
es (m)	-	AçoC.A	-
ep (m)	-	$\Delta\epsilon_{pi}$	-

Fonte: Própria do autor

Para elaboração da planilha de dimensionamento foram escolhidos os seguintes materiais:

- Concreto classe C25, C30, C35 e C40;
- Armaduras ativas: Aços CP 175, CP 190 e CP 210;
- Armadura passiva: Aço CA50.

Cabendo ao usuário decidir qual desses materiais será empregado nos cálculos da viga a ser dimensionada.

4.5.RELATÓRIO DA PLANILHA

Como um bom projetista, a interpretação das informações geradas por qualquer programa, deve ser minuciosamente analisada, pois qualquer falha, pode vir a gerar problemas futuros.

A planilha foi automatizada para dar o máximo de informações ao usuário, onde na Figura 17 é possível ver todos os índices do passo 1, 2, 3 e 4 do dimensionamento quando feito manualmente, sendo que aqui a planilha faz todos os cálculos.

Figura 17 – Passo 1, 2, 3 e 4

1º Combinação dos momentos solicitantes Msd		5º Hipótese $A_p \neq 0$; $A_s \neq 0$	
Msd (MN.m)	-	X	-
2º Determinação de K6; $A_p \neq 0$; $A_s = 0$		ϵ_{sd}	-
dp (m)	-	6º Pela tabela	
ds (m)	-	σ_{sd} (Mpa)	-
K6	-		
3º Valores a partir de K6		7º Relação da armadura ativa com a passiva	
β_x	-	$A_{pf} \cdot \Delta p_d + A_s \cdot \delta_{sd} = N_{td}$	
β_z	-	#VALOR!	
ϵ_{cd}	-		
$\Delta \epsilon_{pd}$	-		
ϵ_{pd}	-		
4º Valor da tensão de acordo com ϵ_{pd} na tabela			
σ_{pd} (Mpa)	-		
AP (cm ²)	-		
Ntd (KN)	-		

Fonte: Própria do autor

Para o dimensionamento da armadura ativa e ou passiva, foi desenvolvida uma tabela para sugerir alguns modos de distribuir os aços (proporção entre aços ativos e passivos) do dimensionamento da viga. A Figura 18 apresenta como foi sugerido no espaço de observações.

Figura 18 – dimensionamento da armadura ativa e passiva

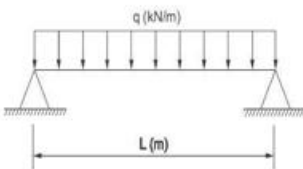
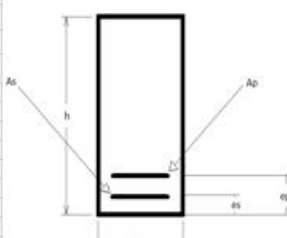
8ª Sugestões para armadura ativa e passiva		
Observações	Ap (cm²)	As (cm²)
concreto armado	-	-
só armadura ativa	-	-
50 % DE Ap	-	-
Sugestão Ap = As	-	-

Fonte: Própria do autor

4.6. INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES

Preocupado no melhor entendimento do usuário com a planilha, foi destinado ao lado dos espaços que serão atribuídos os dados iniciais, algumas tabelas e imagens para auxiliar no modo de utilizar a planilha, garantindo assim maior facilidade na utilização. A Figura 20, mostra como está a interface da parte de informações complementares.

Figura 19 – Interface das Informações complementares

INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES																																																								
Carregamento	COEFICIENTES PODERADORES																																																							
	Tabela 11.1 – Coeficiente $\gamma = \gamma_1 \cdot \gamma_2$ <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Combinações de ações</th> <th colspan="8">Ações</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Permanentes (G)</th> <th colspan="2">Variáveis (Q)</th> <th colspan="2">Protensão (P)</th> <th colspan="2">Recalques de apoio e retração</th> </tr> <tr> <th></th> <th>D</th> <th>F</th> <th>D</th> <th>F</th> <th>D</th> <th>F</th> <th>D</th> <th>F</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Normal</td> <td>1,4</td> <td>1,0</td> <td>1,4</td> <td>1,2</td> <td>1,2</td> <td>0,9</td> <td>1,2</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Especial ou de construção</td> <td>1,3</td> <td>1,0</td> <td>1,2</td> <td>1,0</td> <td>1,2</td> <td>0,9</td> <td>1,2</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Excepcional</td> <td>1,2</td> <td>1,0</td> <td>1,0</td> <td>0</td> <td>1,2</td> <td>0,9</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table> D é decorrente, F é decorrente, Q representa as cargas variáveis em geral e P a temperatura. * Para as cargas permanentes de pequena variabilidade, como o peso próprio das estruturas, especialmente as gravidade, esse coeficiente pode ser reduzido para 1,3.			Combinações de ações	Ações								Permanentes (G)		Variáveis (Q)		Protensão (P)		Recalques de apoio e retração			D	F	D	F	D	F	D	F	Normal	1,4	1,0	1,4	1,2	1,2	0,9	1,2	0	Especial ou de construção	1,3	1,0	1,2	1,0	1,2	0,9	1,2	0	Excepcional	1,2	1,0	1,0	0	1,2	0,9	0	0
Combinações de ações	Ações																																																							
	Permanentes (G)		Variáveis (Q)		Protensão (P)		Recalques de apoio e retração																																																	
	D	F	D	F	D	F	D	F																																																
Normal	1,4	1,0	1,4	1,2	1,2	0,9	1,2	0																																																
Especial ou de construção	1,3	1,0	1,2	1,0	1,2	0,9	1,2	0																																																
Excepcional	1,2	1,0	1,0	0	1,2	0,9	0	0																																																
Geometria 	Materiais • Concretos: Classes C25, C30, C35 e C40 • Armaduras Ativas: Aços CP175, CP190, CP210 • Armaduras Passivas: Aço CA50																																																							
Tabela 11.2 – Valores do coeficiente γ_2 <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Ações</th> <th colspan="3">γ_2</th> </tr> <tr> <th>q1</th> <th>q2*</th> <th>q3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permaneçam fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas?</td> <td>0,5</td> <td>0,4</td> <td>0,3</td> </tr> <tr> <td>Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permaneçam fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas?</td> <td>0,7</td> <td>0,6</td> <td>0,4</td> </tr> <tr> <td>Bibliotecas, arquivos, oficinas e garagens</td> <td>0,8</td> <td>0,7</td> <td>0,6</td> </tr> <tr> <td>Vento: Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral</td> <td>0,6</td> <td>0,3</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Temperatura: Vibrações uniformes de temperatura em relação à média anual local</td> <td>0,6</td> <td>0,5</td> <td>0,3</td> </tr> </tbody> </table> * Para os valores de q1 relativos às pontes e principalmente para os problemas de fadiga, ver Seção 23. * Edifícios residenciais. * Edifícios comerciais, de escritórios, estações e edifícios públicos.				Ações	γ_2			q1	q2*	q3	Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permaneçam fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas?	0,5	0,4	0,3	Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permaneçam fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas?	0,7	0,6	0,4	Bibliotecas, arquivos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6	Vento: Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0	Temperatura: Vibrações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3																										
Ações	γ_2																																																							
	q1	q2*	q3																																																					
Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permaneçam fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas?	0,5	0,4	0,3																																																					
Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permaneçam fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas?	0,7	0,6	0,4																																																					
Bibliotecas, arquivos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6																																																					
Vento: Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0																																																					
Temperatura: Vibrações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3																																																					

Fonte: Própria do autor

As informações complementares servem como auto ajuda, pois elas são de fácil interpretação e bem objetivas, guiando o usuário para o caminho correto na utilização da planilha.

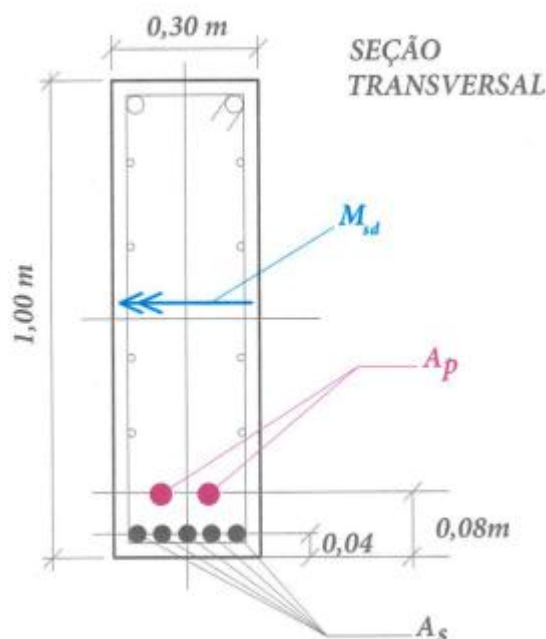
4.7.VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Para validar a metodologia utilizada no trabalho, será transcrito um exercício resolvido (CHOLFE, 2013) utilizando o processo prático k6, logo será comparado com os dados calculados pela planilha, onde para validação, todos os dados gerados pela planilha terão que ser iguais aos cálculos no exemplo.

4.7.1. Exercício resolvido, página 99~101 do livro concreto protendido – teoria e prática

Dimensionar a seção retangular a seguir esquematizada, dentro das hipóteses do ELU, utilizando-se a tabela de K6 (Tabela 12)

Figura 20 – seção transversal



Fonte: Cholfe (2013)

Solicitações: $M_{g1k} = 350 \text{ kN} \cdot \text{m}$;

Materiais: $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$

$M_{g2k} = 227 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Aços: CP 190 e CA 50

$M_{q1k} = 220 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ($\Psi_0 = 0,7$)

$\Delta\epsilon_{pi} = 5,5 \%$

$M_{q1k} = 120 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ($\Psi_0 = 0,8$)

$\gamma_g = \gamma_q = 1,4$

1º Momento solicitante de calculo

$$M_{sd} = 1,4 \cdot (350 + 247) + 1,4 \cdot (220 + 0,8 \cdot 120)$$

$$M_{sd} = 1.250 \text{ kN} \cdot \text{m} = 1,25 \text{ MN} \cdot \text{m}$$

2º Hipótese: $A_p \neq 0$; $A_s = 0$ (somente armadura ativa)

$$b = 0,3 \text{ m}$$

$$d_p = 1 - 0,08 = 0,92 \text{ m}$$

$$K_6 = \frac{0,3 \cdot 0,92}{1,250} = 0,203$$

→ tabela $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$

$$\beta_x = 0,4$$

$$\beta_z = 0,834$$

$$\varepsilon_{cd} = 3,5 \text{ ‰}$$

$$\Delta \varepsilon_{pd} = 5,25 \text{ ‰} < 10 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{pd} = 5,25 \text{ ‰} + 5,5 \text{ ‰} = 10,75 \text{ ‰}$$

Tabela com $\varepsilon_{pd} = 10,75 \text{ ‰}$ → Aço CP190 → $\sigma_{pd} = 1.502 \text{ MPa}$

$$\text{Armadura } A_p = \frac{1,25 \cdot 10^4}{0,834 \cdot 0,92 \cdot 1502} = 10,85 \text{ cm}^2;$$

$$N_{td} = A_p \cdot \sigma_{pd} = 10,85 \cdot 10^{-4} \cdot 1502 = 1,629 \text{ MN}$$

3º Hipótese: $A_p \neq 0$; $A_s \neq 0$ (Armadura ativa e passiva)

Deformação na armadura passiva com $d_s = 1 - 0,04 = 0,96$

$$\varepsilon_{sd} = \frac{d_s - X}{d_p - X} \cdot \Delta \varepsilon_{pd} = \varepsilon_{sd} = \frac{0,96 - 0,368}{0,92 - 0,368} \cdot 5,25 = 5,63 \text{ ‰} < 10 \text{ ‰}$$

$$x = \beta_x \cdot d_p = 0,4 \cdot 0,92 = 0,368$$

tabela com

$$\varepsilon_{sd} = 5,63 \text{ ‰} \rightarrow \text{Aço CA 50} \rightarrow \sigma_{sd} = 435 \text{ MPa}$$

Equação Final

$$A_{pf} \cdot \sigma_{pd} + A_s \cdot \sigma_{sd} = N_{td}$$

$$1502 \cdot A_{pf} + 435 \cdot A_s = 16.290 \text{ } A_{pf} \text{ e } A_s \text{ em cm}^2$$

Figura 21 – Proporção entre A_{pf} e A_s

TABELA 13 – DIVERSAS PROPORÇÕES ENTRE A_{pf} E A_s		
A_{pf}	A_s	Observações
0	37,4cm ² – 8Ø25	Concreto armado
10,85 cm ² – 8Ø15,2	0	Só armadura ativa
8,40 cm ² – 6Ø15,2	8,44 cm ² – 5Ø16	Aplicação numérica anterior
5,60 cm ² – 4Ø15,2	18,11 cm ² – 6Ø20	Sugestão

Fonte: Cholfe (2013)

4.7.2. Exercício resolvido com auxílio da planilha automatizada

Figura 22 - Solicitações

Momentos solicitantes(Mk)			
Permanente		Variável	
mg1	mg2	mq1	mq2
350	227	220	120
COEFICIENTES			
PERMANENTE		VARIÁVEL	
γ_{g1}	γ_{g2}	γ_{q1}	γ_{q2}
1,4	1,4	1,4	1,4
PONDERADOR			
$\psi_{0,(1)}$		$\psi_{0,(2)}$	
0,7		0,8	

Fonte: Própria do autor

Como mostra a Figura 22, temos que o primeiro passo a ser feito na planilha é preencher os espaços dos momentos solicitantes permanentes e variáveis, em seguida temos que preencher o espaço destinado aos coeficientes de ponderação referente a cada solicitação, a planilha foi além de executar apenas dimensionamento partindo do momento de outro programas, com isso, surgiu a ideia de realizar a planilha para dimensionar a armação de vigas

bi apoiadas, onde insere os carregamentos e daí a planilha faz o cálculo do momento solicitante.

Figura 23 – Geometria e Materiais

ENTRADA			
Geometria		Materiais	
L (m)	-	Fck (Mpa)	30
bw (m)	0,3	γ_{concreto} (kN/m ³)	25
h (m)	1	Aço C.P.	CP 190
es (m)	0,04	Aço C.A	CA 50
ep (m)	0,08	$\Delta\epsilon_{pi}$ (‰)	5,5

Fonte: Própria do autor

Na Figura 23, apresenta a entrada ou definição da geometria da viga e dos materiais utilizados para dimensionar a área de protensão da mesma, onde o espaço vazio L, corresponde ao comprimento da viga, no qual é utilizado para realizar o cálculo dos momentos solicitantes, como nesse caso já foi imposto os momentos, não foi preciso preencher esse campo.

Figura 24 – procedimento de cálculo e todas as variáveis calculadas

1º Combinação dos momentos solicitantes Msd	
Msd (MN.m)	1,250
2º Determinação de K6; Ap ≠ 0; As = 0	
dp (m)	0,92
ds (m)	0,96
K6	0,203
3º Valores apartir de K6	
βx	0,4
βz	0,834
εcd	3,5
Δεpd	5,25
εpd	10,75
4º Valor da tensão de acordo com εpd na tabela	
σpd (Mpa)	1502,90
AP (cm²)	10,842
Ntd (KN)	1629,39
5º Hipótese Ap ≠ 0; As ≠ 0	
X	0,368
εsd	5,630
6º Pela tabela	
σsd (Mpa)	435
7º Relação da armadura ativa com a passiva	
$A_{pf} \cdot \Delta p_d + A_s \cdot \delta_{sd} = N_{td}$	
Apf . 1502,9 + As 435 = 16293,9	

Fonte: Própria do autor

A Figura 24, nomeada de relatório da planilha, traz todos os dados importantes do dimensionamento realizado pela planilha, tais como: tensões, momento solicitante provindo de combinação de ações, entre os outros dados. Com a relação de proporção entre as armaduras passiva e ativa, cabe ao engenheiro ou o usuário da planilha realizar um simples cálculo para ter o valor das áreas de aço de cada tipo (ativa e passiva) do dimensionamento. No entanto, pode-se ver na Figura 25, que a planilha aponta algumas sugestões entre estas proporções.

Figura 25 – Proporção entre Ap e As

8º Sugestões para armadura ativa e passiva		
Observações	Ap (cm²)	As (cm²)
concreto armado	0	37,46
só armadura ativa	10,84	0
50 % DE Ap	5,42	18,73
Sugestão Ap = As	8,41	8,4

Fonte: Própria do autor

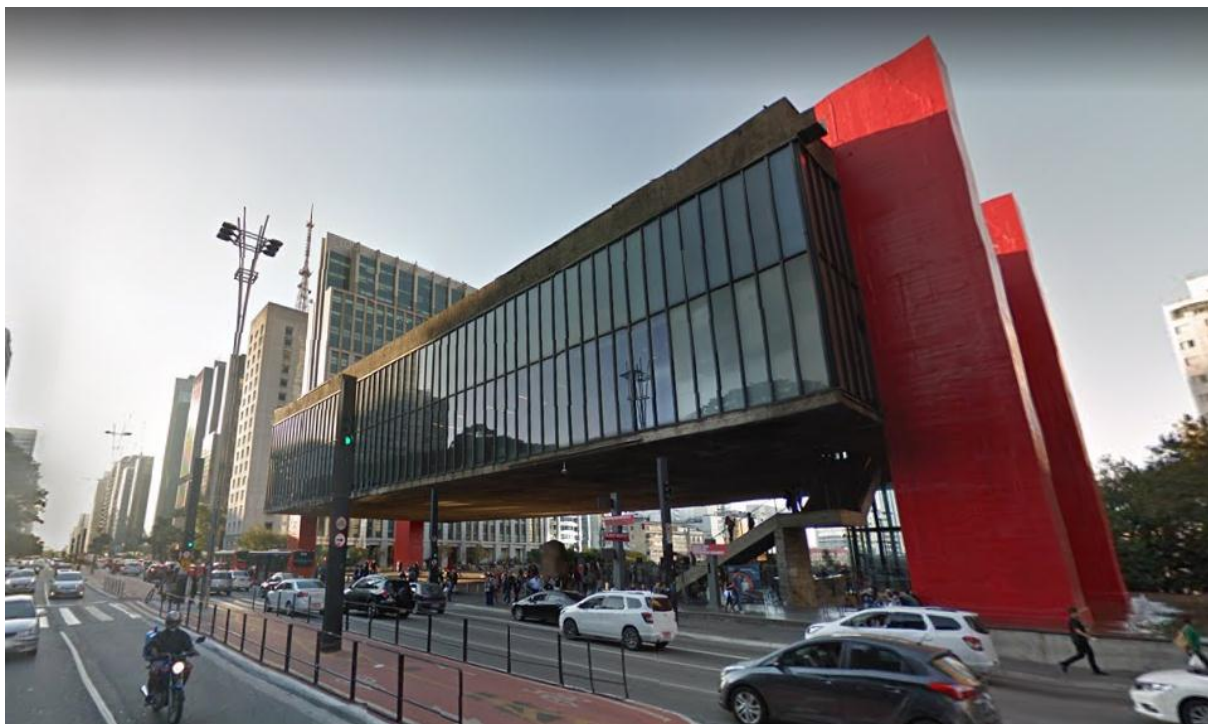
Como pode-se ver, todos os valores foram iguais, sendo que devido à arredondamentos feitos pelo livro, uma pequena diferença na segunda casa decimal pode ser

vista em alguns parâmetros calculados, além disso ao validar o método com esse exemplo, foi possível determinar que a planilha tem precisão de 100%, visto que não existe arredondamentos nos cálculos.

4.8. TESTE E APLICAÇÃO

Para realizar o teste com a planilha automatizada, foi escolhido uma edificação que tem sua estrutura composta por vigas bi apoiadas, onde o dimensionamento da viga será realizado pela planilha. A edificação escolhida, foi o museu de artes de São Paulo, que possui um grande vão livre.

Figura 26 – Museu de Artes de São Paulo



Fonte: Google Maps (2018)

Adotando os seguintes valores para o teste na planilha:

Figura 27 – Carregamento para teste

CARREGAMENTO						
PERMANENTE		VARIÁVEL				
g1 (KN/m)	g2 (KN/m)	q1 (KN/m ²)	q2 (KN/m)	q3 (KN/m)	q4 (KN/m)	q5 (KN/m)
120	10	8	5	4	0	0

Fonte: Própria do autor

Para o carregamento, foram adotados os valores com base no site da MASP, onde foi encontrado um valor de aproximadamente 140 kN/m. O teste está sendo feito para a viga da cobertura da edificação na qual se estimou para os carregamentos os valores da Figura 27.

Figura 28 – coeficiente de ponderação

COEFICIENTES						
PERMANENTE		VARIÁVEL				
γ_{g1}	γ_{g2}	γ_{q1}	γ_{q2}	γ_{q3}	γ_{q4}	γ_{q5}
1,4	1,4	1,4	1,4	1,2	0	0

PONDERADOR				
$\psi_{0,(1)}$	$\psi_{0,(2)}$	$\psi_{0,(3)}$	$\psi_{0,(4)}$	$\psi_{0,(5)}$
0,7	0,6	0,6	0	0

Fonte: Própria do autor

Para os coeficientes, foram adotados de forma que estivesse atuando diversas solicitações diferentes, entre elas temperatura, vento, entre outras. Esse critério se valeu na escolha da ação.

Figura 29 – Geometria e materiais para teste.

ENTRADA			
Geometria		Materiais	
L (m)	74	Fck (Mpa)	40
bw (m)	2,5	$\gamma_{\text{concreto}} (\text{kN/m}^3)$	25
h (m)	4	Aço C.P.	CP 190
es (m)	0,2	Aço C.A	CA 50
ep (m)	0,4	$\Delta \epsilon_{pi}$	5

Fonte: Própria do autor

Para a geometria, foi adotado o comprimento real da viga de cobertura que é 74 metros, a seção da viga foi encontrada no site da MASP, logo ela tem 2,5 metros de base e 4 metros de altura. O material foi adotado um fck de 40 MPa, o aço da armadura ativa do tipo CP 190 com pré alongamento de 5%, já o aço da armadura passiva foi o CA 50.

Com todos os dados adicionados, a planilha gera todo procedimento de cálculo, como podemos ver na Figura 30.

Figura 30 – Passo 1, 2, 3 e 4.

1º Combinação dos momentos solicitantes Msd	
Msd (MN.m)	137,092
2º Determinação de K6; $A_p \neq 0$; $A_s = 0$	
dp (m)	3,6
ds (m)	3,8
K6	0,236
3º Valores apartir de K6	
β_x	0,24
β_z	0,902
ϵ_{cd}	3,158
$\Delta \epsilon_{pd}$	10
ϵ_{pd}	15
4º Valor da tensão de acordo com ϵ_{pd} na tabela	
σ_{pd} (Mpa)	1525,00
AP (cm ²)	276,842
Ntd (KN)	42218,42
5º Hipótese $A_p \neq 0$; $A_s \neq 0$	
X	0,864
ϵ_{sd}	10,731
6º Pela tabela	
σ_{sd} (Mpa)	435
7º Relação da armadura ativa com a passiva	
$A_{pf} \cdot \Delta \epsilon_{pd} + A_s \cdot \delta_{sd} = N_{td}$	
$A_{pf} \cdot 1525 + A_s \cdot 435 = 42218,42$	

Fonte: Própria do autor

O primeiro ponto, foi a combinação de ações, onde o maior valor entre os momentos solicitantes foi o assumido. Depois foi determinado o valor da equação 2, com ele foi obtido o β_x , β_z , ϵ_{cd} , $\Delta\epsilon_{pd}$, ϵ_{pd} . Depois foi obtido o valor de σ_{pd} , de acordo com a equação 5 indo na tabela K6, logo após foi calculada a equação 6 e por seguinte a 7 como vimos anteriormente na descrição do processo. Partindo para o passo 3, encontra-se o x e dele determina-se o valor da equação 11, novamente busca-se o valor correspondente para σ_{sd} na tabela, que por sua vez finaliza o último passo, que consiste apenas em determinar a relação entre a armadura passiva e ativa, retornando a equação 12:

$$A_{pf} \cdot 1428,13 + A_s \cdot 435 = 19700,9$$

A partir dessa expressão, pode-se então determinar variadas seções com proporções de armadura ativa e passiva diferentes. Como ilustrado na Figura 31, que apresenta algumas distribuições para a armação da seção.

Figura 31 – algumas sugestões de armadura passiva e ativa para a seção

8ª Sugestões para armadura ativa e passiva		
Observações	A_p (cm ²)	A_s (cm ²)
concreto armado	0	970,54
só armadura ativa	276,84	0
50 % DE A_p	138,42	485,27
Sugestão $A_p = A_s$	215,40	215,4

Fonte: Própria do autor

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho possibilitou desenvolver uma planilha que automatiza o dimensionamento de viga protendida, utilizando princípios de programação, reduzindo tempo e tornando ainda mais simples a utilização do método prático k6, que dimensiona seções retangulares nos domínios 2, 3 e 4 e no estado limite último.

De modo geral, a planilha de dimensionamento de viga protendida serve para a maioria das aplicações de vigas, sendo que o método, foi deduzido para seções retangulares para facilitar a criação de tabelas e programas simplificados, visto que, na prática, a maioria das seções das vigas são retangulares. Apesar disto, o método pode ser utilizado em outras geometrias, através da composição de retângulos bem posicionados obtendo-se uma aproximação aceitável para o dimensionamento.

Por mais que a planilha seja de fácil utilização, vale salientar que não se pode ser utilizada por pessoas que não consigam interpretar os dados gerados, pois de forma geral, o profissional tem que ter um conhecimento sobre o tema para que possa melhor interpretar os dados e entender o processo do dimensionamento.

Por fim, com auxílio dos estudos realizados e aplicações dos conhecimentos obtidos ao longo deste trabalho, foi possível absorver novos conceitos, para melhor compreender as metodologias utilizadas e pesquisadas, com grande contribuição acadêmica e prática.

Como recomendação para trabalhos acadêmicos posteriores, pode-se realizar um trabalho com objetivo de criar um *software* utilizando linguagens de programação para esse mesmo método, acrescentando a possibilidade do aplicativo realizar o dimensionamento não só para vigas bi apoiadas, mas também para vigas contínuas, tornando melhor a ferramenta de cálculo, para uma maior satisfação do usuário em compreender os processos envolvidos e também economizar tempo com isso. Outro ponto que pode ser agregado, é na avaliação da flecha da viga e as verificações de perda de protensão.

6. REFERÊNCIAS

ABNT NBR 6118:2014 – **Projeto de Estruturas de Concreto** – Procedimento, versão corrigida, ABNT, 2014.

BASTOS, P.S.S. **Concreto Protendido**. Curso de Concreto Protendido. Data completa 2015. Notas de Aula. Universidade Estadual Paulista.

CARELLI, J.A. **Análise Estrutural**. Curso de Análise Matricial de Estruturas. Data completa 2012. Notas de Aula. Universidade do Oeste de Santa Catarina.

CHOLFE, L.; BONILHA, L.A.S. **Concreto Protendido – Teoria e Prática**: 1. ed. São Paulo: Editora PINI, 2013.

DUMET, T.B. **Aderência de cordoalhas em concreto de alta resistência com e sem fibras de aço**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Universidade de Estadual Paulista. São Paulo. 2005.

ECHEVERRIA, H.A.C. **Aplicação da Retroanálise na identificação da Parcela Devida à Fluência do Concreto da Perda de Protensão de Vigas Pré-moldadas de Pontes**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2003.

GOOGLE MAPS. [Museu de Artes de São Paulo]. [2018]. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/@-23.5620247,-46.6559019,3a,75y,352.49h,104.8t/data=!3m6!1e1!3m4!1svoY_vc2JnglizBgzOavg1Q!2e0!7i113312!8i6656>. Acesso em: 10 de abril 2018.

HANAI, J. (2005). **Fundamento do concreto protendido**. 1st ed. [ebook] São Carlos: Departamento de engenharia de estruturas, p.7. Disponível em: http://www.set.eesc.usp.br/mdidatico/protendido/arquivos/cp_ebook_2005.pdf > Acesso em: 10 Jan. 2018

JUNIOR, H. A. G.; **Vigas protendidas – estudo da norma e modelagem com auxílio de programa de análise comercial** – Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

LEONHARDT, F. **Construções de Concreto: Concreto Protendido**, 5. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1983.

VASCONCELOS, A.C. **O concreto no Brasil. Recordes – realizações – história**. 2ªed. São Paulo, PINI: 1992. v.1.

VERÍSSIMO, G.S.; CÉSAR JR., K.M.L. **Concreto Protendido-Fundamentos Básicos**. Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil, Viçosa/MG, 1998.