



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

JOÃO MATHEUS ALVES MONTEIRO

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA DIMENSIONAMENTO DE
PEÇAS DE CONCRETO PROTENDIDO SUBMETIDAS À
FLEXÃO**

Caruaru, 2016

JOÃO MATHEUS ALVES MONTEIRO

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA DIMENSIONAMENTO DE
PEÇAS DE CONCRETO PROTENDIDO SUBMETIDAS À
FLEXÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste - CAA, da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas
Orientador(a): Prof(a). Dr(a). Giuliana F. F. Bono

Caruaru, 2016

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Paula Silva CRB/4 - 1223

M775s Monteiro, João Matheus Alves.
Simulação numérica para dimensionamento de peças de concreto protendido submetidas à flexão. / João Matheus Alves Monteiro. – 2016.
64f.: il.; 30 cm.

Orientadora: Giuliana F. F. Bono.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Engenharia Civil, 2016.
Inclui Referências.

1. Programas de computador. 2. Simulação. 3. Concreto protendido. 4. Análise estrutural (Engenharia) - Processamento eletrônico de dados. I. Bono, Giuliana F. F. (Orientadora). II. Título.

620CDD (23. ed.) UFPE (CAA 2016-259)

JOÃO MATHEUS ALVES MONTEIRO

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA DIMENSIONAMENTO DE PEÇAS DE
CONCRETO PROTENDIDO SUBMETIDAS À FLEXÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste - CAA, da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas

A banca examinadora composta pelos professores abaixo, considera o candidato JOÃO MATHEUS ALVES MONTEIRO aprovado com NOTA _____:

Caruaru, 07 de Dezembro de 2016.

Prof(a). Dr(a). Giuliana F. F. Bono _____

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Orientadora)

Prof. Dr. Humberto Correia Lima Júnior _____

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliador)

Prof(a). Dr(a). Juliana Von Schmalz Torres _____

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliador)

Prof. Dr. Cléssio Leão Silva Lima _____

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Coordenador da disciplina)

Dedico este trabalho aos meus pais, Valdemar e Margareth, pelo apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me mostrou caminhos impossíveis de imaginar.

Aos meus pais e irmãos, que sempre me proporcionaram condições de seguir meu caminho com apoio incondicional em todos os momentos.

Aos meus amigos pelo convívio, pela amizade e por toda a ajuda que me concederam, em especial, à minha namorada, que me proporcionou carinho, apoio e confiança ao longo desta jornada.

A todos os professores pela contribuição na minha formação profissional, em especial, à minha orientadora Profa. Dra. Giuliana Bono pela confiança, ensinamentos e atenção na orientação deste trabalho.

“A felicidade só é verdadeira quando compartilhada.”

(Christopher McCandless)

RESUMO

O presente trabalho apresenta a implementação de um programa computacional para o dimensionamento das armaduras longitudinais de uma seção de um elemento estrutural em concreto protendido submetido à flexão normal. Apesar da difusão do concreto protendido, ainda há poucos programas numéricos que permitam o dimensionamento de estruturas protendidas, sendo estes, em sua maioria, caros e de difícil acesso aos estudantes de engenharia. A utilização de um software computacional para o dimensionamento de estruturas protendidas é de grande valia para facilitar e estimular o estudo desse sistema estrutural. Uma revisão bibliográfica fundamentou o desenvolvimento do programa, utilizando-se as recomendações normativas brasileiras pertinentes e fazendo-se uso do software MATLAB para o auxílio computacional. A rotina computacional elaborada neste trabalho contempla as verificações normatizadas pela ABNT NBR 6118:2014 de estados limites último e de serviço, obtendo-se as áreas de aço ativo e passivo necessárias para atendimento das tensões nos estados limites. Além das armaduras necessárias, são obtidas as características geométricas da seção do elemento estrutural analisado. Para validação das implementações, foram analisadas seções de concreto protendido existentes na literatura, permitindo a verificação da funcionalidade do programa implementado. Nota-se, portanto, ser resultado deste trabalho uma ferramenta prática que possibilite análises mais ágeis de estruturas em concreto protendido, otimizando tempo e incentivando novos estudos.

Palavras-chave: Simulação Numérica, Concreto Protendido, Análise Estrutural.

ABSTRACT

This work presents the implementation of a computational program for the dimensioning of the longitudinal reinforcement of a section of a structural element in prestressed concrete, subjected to normal flexion. Despite the diffusion of the prestressed concrete, there are still a few numerical programs that allow the sizing of prestressed structures, which are mostly expensive, and difficult to engineering students get access. The use of computational software for the dimensioning of prestressed structures is of great value to facilitate and stimulate the study of this structural system. A bibliographical review underlay the development of the program, using the pertinent Brazilian normative recommendations and making use of MATLAB software for computational assistance. The computational routine elaborated in this work contemplates the verifications normalized by ABNT NBR 6118:2014 of final limit state and service, obtaining the areas of active, and passive steel necessary to attend the tensions in the limit states. In addition to the necessary reinforcement, the geometric characteristics of the section of the structural element analyzed are obtained. For validation of the implementations, sections of prestressed concrete existent in the literature were analyzed, allowing the verification of the functionality of the implemented program. Therefore, as a result of this work, it is a practical tool that allows for more agile analysis of structures in prestressed concrete, optimizing time, and encouraging new studies.

Keywords: Numerical Simulation, Prestressed Concrete, Structural Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tensões normais em uma viga protendida.	18
Figura 2 – Concreto com pré-tração.	19
Figura 3 – Concreto com pós-tração.....	20
Figura 4 - Diagrama força de protensão x tempo para peça protendida pré-tracionada.....	21
Figura 5 - Diagrama força de protensão x tempo para peça protendida pós-tracionada.	22
Figura 6 - Diagrama tensão deformação para aços de armaduras ativas.....	23
Figura 7 - Estado-limite de descompressão parcial.....	25
Figura 8 - Tensões na protensão completa para a combinação frequente de ações.....	30
Figura 9 - Tensões na protensão completa para a combinação rara de ações.	31
Figura 10 - Deformações em uma seção sob momentos fletores positivos crescentes.	34
Figura 11 - Esforços e deformações no ELU.	36
Figura 12 - Concreto de envolvimento da armadura.....	39
Figura 13 - Fluxograma da rotina ELS.m.....	42
Figura 14 - Fluxograma da rotina ELU_Ap.m para protensão aderente.	43
Figura 15 - Fluxograma da rotina ELU_Ap.m para protensão não-aderente.....	44
Figura 16 - Fluxograma da rotina ELU_As.m para protensão aderente.....	45
Figura 17 - Fluxograma da rotina ELU_As.m para protensão não-aderente.	46
Figura 18 - Alocação das armaduras.	47
Figura 19 - Escolha do tipo de seção.....	49
Figura 20 - Características geométricas.....	50
Figura 21 - Parâmetros da protensão, ações e demais dados de entrada.	51
Figura 22 - Resultados da seção dimensionada.	52
Figura 23 - Características geométricas - segundo exemplo.....	53
Figura 24 - Parâmetros da protensão, ações e demais dados de entrada - segundo exemplo...	54
Figura 25 - Resultados da seção dimensionada - segundo exemplo.....	55
Figura 26 - Alertas à alocação das armaduras.	56
Figura 27 - Seção alveolar utilizada por Faleiros Júnior (dimensões em mm).	56
Figura 28 - Características geométricas - terceiro exemplo.	57
Figura 29 - Parâmetros da protensão, ações e demais dados de entrada - terceiro exemplo....	58
Figura 30 - Resultados da seção dimensionada - terceiro exemplo.....	58
Figura 31 - Características geométricas - quarto exemplo.	59
Figura 32 - Parâmetros da protensão, ações e demais dados de entrada - quarto exemplo.....	60

Figura 33 - Resultados da seção dimensionada - quarto exemplo.....61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação dos resultados obtidos com os de Pellegrino Neto e Cardoso (2015)	52
Tabela 2 - Comparação dos resultados obtidos com os de Loureiro (2015)	55
Tabela 3 - Comparação dos resultados obtidos com os de Faleiros Júnior (2010)	59
Tabela 4 - Comparação dos resultados obtidos com os de Cunha (2012).....	62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa.....	14
1.2	Motivação.....	15
1.3	Objetivos	15
1.3.1	Objetivo Geral	15
1.3.2	Objetivos Específicos.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3	REFERÊNCIAL TEÓRICO	18
3.1	Conceitos básicos de concreto protendido	18
3.1.1	Tipos de protensão	19
3.1.2	Perdas de protensão	20
3.1.3	Valores representativos da força de protensão	20
3.2	Aços para protensão	22
3.2.1	Limites por ocasião de protensão	24
3.3	Estado-Limite Último.....	24
3.4	Estados-Limite de Serviço	24
3.5	Níveis de protensão	26
3.6	Procedimentos para dimensionamento de uma seção transversal de concreto protendido.....	28
3.6.1	Estimativa da força de protensão P_{∞}	28
3.6.2	Determinação da força de protensão P_i	33
3.6.3	Determinação da área de armadura ativa	33
3.6.4	Pré-alongamento.....	33
3.6.5	Verificação do estado-limite último.....	35
3.6.6	Verificação do estado-limite de abertura de fissuras	39
4	METODOLOGIA	41

4.1	Procedimentos utilizados no programa	41
4.2	Validação do programa	47
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.1	Exemplo 1	49
5.2	Exemplo 2	52
5.3	Exemplo 3	56
5.4	Exemplo 4	59
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
	REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

Pode-se definir protensão como “[...] o artifício de introduzir, em uma estrutura, um estado prévio de tensões, de modo a melhorar sua resistência ou seu comportamento, sob ação de diversas solicitações.” (PFEIL, 1984, v.1, p. 1).

Esta melhora de performance é o alicerce para o crescente uso de estruturas protendidas no Brasil, o que pode ser observado em levantamento realizado pela Fundação Getúlio Vargas (FGV), sob encomenda da Associação Brasileira de Construção Industrializada de Concreto (Abcic), o qual indicou, em 2014, que 9,4% das empresas produzem exclusivamente o concreto protendido, enquanto em 2011 nenhuma empresa afirmou produzir apenas esse tipo de concreto (AMORIM, 2015).

Apesar da difusão do concreto protendido, ainda há poucos programas que permitam o dimensionamento de estruturas protendidas, sendo estes, em sua maioria, caros e de difícil acesso aos estudantes de engenharia. Em contrapartida, adotar o cálculo manual no desenvolvimento de projetos em concreto protendido pode ser inviável pelo dispêndio de tempo exigido.

O desenvolvimento do projeto de uma estrutura em concreto protendido apresenta várias etapas, podendo-se citar, como exemplo, a escolha do tipo de protensão, dimensionamento da seção do elemento estrutural, traçado dos cabos de protensão ao longo do elemento, detalhamento da estrutura, entre outras. É de fácil percepção a necessidade de racionalizar algumas etapas, o que ocorre frequentemente na engenharia com a utilização de programas computacionais.

1.1 Justificativa

Maior liberdade arquitetônica devido à possibilidade de vencer grandes vãos, maior área útil do pavimento devido a menor quantidade de pilares e diminuição na altura total do prédio devido à redução nas espessuras das lajes são algumas vantagens citadas por Emerick (2002) que explicam o uso de protensão nas edificações.

A necessidade de vencer grandes vãos justificou a entrada das estruturas protendidas no mercado brasileiro, contudo as diversas outras vantagens, aliadas a tecnologias de protensão mais baratas ao passar dos anos, foram as responsáveis por sua consolidação.

Com o concreto protendido radicado no Brasil é imprescindível obter praticidade no cálculo destas estruturas, seja pela concorrência estimulada pelo mercado que não permite o

desperdício de tempo, seja pela necessidade dos estudantes se aprofundarem nas diversas etapas de um projeto de protensão.

Uma solução para racionalizar o desenvolvimento dos projetos em concreto protendido é o uso de programas, havendo neste ponto algumas dificuldades: pouca disponibilidade de programas comerciais e alto custo para obtenção dos existentes. É, portanto, oportuno o desenvolvimento de rotinas que facilitem os cálculos de estruturas de concreto protendido.

1.2 Motivação

Durante a graduação em engenharia civil deve-se estudar os diferentes tipos de sistemas estruturais para possibilitar as mais adequadas tomadas de decisão no cumprimento da profissão, inclusive os que envolvem protensão, tema este geralmente fora da grade curricular obrigatória das universidades.

A solidificação das estruturas protendidas no mercado brasileiro não deixa dúvidas da importância deste tipo de estrutura, estimulando seu estudo e busca por ferramentas que auxiliem o seu cálculo.

O desenvolvimento de uma rotina para uma etapa da elaboração de um projeto de concreto protendido é uma forma de racionalizar os cálculos além de sedimentar e ampliar os conceitos adquiridos sobre o sistema estrutural.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um programa computacional para o dimensionamento das armaduras longitudinais de uma seção de um elemento estrutural em concreto protendido submetido à flexão normal, seguindo-se as recomendações normativas pertinentes e o referencial teórico adotado.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Explicitar uma metodologia baseada no referencial teórico para o dimensionamento das armaduras longitudinais de uma seção de um elemento estrutural em concreto protendido.

- Fazer uso do software MATLAB para elaboração de uma rotina na qual se aplique esta metodologia, obtendo-se as áreas de aço ativo e passivo necessárias para atender as verificações de estados-limites último (ELU) no ato da protensão e após a utilização normal da estrutura (tempo infinito) e estados-limites de serviço (ELS) referentes a formação de fissuras, abertura das fissuras, compressão excessiva e a descompressão, normatizados pela ABNT NBR 6118:2014, conforme a necessidade de cada nível de protensão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Carvalho (2012) destaca a existência de um maior número de soluções possíveis para um mesmo projeto em concreto protendido do que em concreto armado, devido, a por exemplo, o fato de se poder mesclar as armaduras ativas e passivas no elemento estrutural. Cita, ainda, as diferentes metodologias para determinação da armadura de protensão, tanto em estruturas pré-moldadas quanto nas moldadas no local, nas quais se podem utilizar as condições de verificação no estado-limite último ou as condições nos estados-limites de serviço, ficando a critério do projetista. No entanto, em Carvalho (2012) é apresentado um roteiro de pré-dimensionamento da armadura ativa para respeitar o estado-limite último para em seguida se verificarem as condições de serviço.

Para Hanai (2005), primeiro se deve estimar a força de protensão, após todas as perdas, com a qual as exigências de serviço sejam respeitadas e utilizando-se da tensão limite para o tipo de armadura definida, determinar a área de aço ativo para, por fim, verificar se estão respeitadas as condições do estado-limite último, fazendo-se uso, nesta etapa, de um processo iterativo no qual é arbitrado um valor de tensão na armadura ativa ou a posição da linha neutra.

Cunha (2012) elabora um programa para dimensionamento de uma seção de concreto protendido utilizando várias rotinas elaboradas em linguagem object pascal. Uma característica é a intuitiva entrada de dados pelo usuário, além da sucinta apresentação dos dados de saída. Há a possibilidade de escolha do tipo de seção a ser utilizada, podendo ser retangular, 'T' ou uma seção genérica. O programa faz o dimensionamento de elementos que utilizem protensão com aderência, utilizando-se apenas de armaduras ativas para atendimento do estado-limite último e realizando-se uma posterior verificação das condições de serviço. Em seu trabalho fica a cargo do usuário estimar as perdas de protensão.

Mandarás (1993, apud Cunha, 2012) sugere que, se o dimensionamento for realizado a princípio com as exigências de serviço para então se verificar o estado-limite último, caso este não seja atendido, pode-se adicionar armadura suplementar (passiva), aumentar a resistência característica à compressão do concreto, incrementar a armadura ativa inicial, ou alterar a geometria da seção.

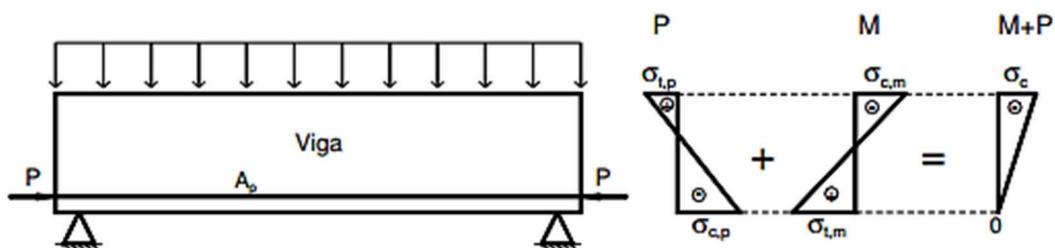
Loureiro (2015) recomenda o dimensionamento das armaduras longitudinais em lajes e vigas que contenham protensão em duas etapas: primeiro se determinam as armaduras ativas utilizando-se do estado-limite de serviço para na segunda etapa dimensionar-se no estado-limite último, verificando a possível necessidade de acrescentar armaduras passivas complementares.

3 REFERÊNCIAL TEÓRICO

3.1 Conceitos básicos de concreto protendido

Sabendo-se que o concreto tem resistência à compressão muito superior à resistência à tração, a ideia de protender o concreto pôde ser concebida, a qual consiste em uma armadura previamente alongada imprimir tensões prévias de compressão nas regiões nas quais o concreto seria tracionado pelas ações provenientes da utilização normal da estrutura. Pode-se observar na Figura 1 a combinação das tensões de tração (σ_t) e compressão (σ_c) em uma viga, provenientes da força de protensão (P) e do momento fletor solicitante (M).

Figura 1 – Tensões normais em uma viga protendida.



Fonte: Bastos (2015).

Nota-se na Figura 1 ocorrência de tensões opostas devido à protensão e ao momento fletor, o que pode resultar em tensões nulas, tensões de compressão ou tensões de tração.

A norma brasileira define elementos de concreto protendido como:

[...] aqueles nos quais parte das armaduras é previamente alongada por equipamentos especiais de protensão, com a finalidade de, em condições de serviço, impedir ou limitar a fissuração e os deslocamentos da estrutura, bem como propiciar o melhor aproveitamento de aços de alta resistência no estado-limite último (ELU) (NBR 6118, 2014, p. 3).

De acordo com o momento que se realiza a protensão, antes ou depois do lançamento do concreto, pode-se classificar as peças protendidas em dois grupos: elementos pré-tracionados ou pós-tracionados.

Nos dois tipos de protensão uma força inicial é introduzida para alongamento da armadura ativa, entretanto esta força não se mantém constante ao longo do tempo, havendo, portanto, perdas de protensão e, em consequência, diferentes valores representativos da força de protensão.

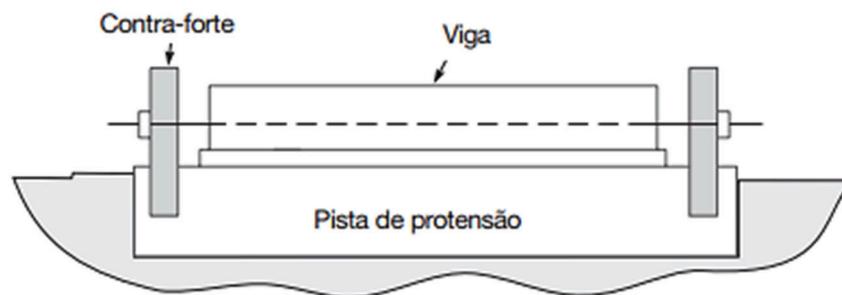
3.1.1 Tipos de protensão

O concreto protendido tem sua armadura ativa tracionada antes (pré-tração) ou após (pós-tração) o lançamento do concreto, permitindo-se, ainda, o classificar de acordo com a aderência empregada em sua armadura.

A ABNT NBR 6118:2014 esclarece:

Concreto com armadura ativa com aderência inicial (pré-tracionada): antes do lançamento do concreto, a armadura ativa é pré-alongada com o auxílio de apoios independentes do elemento estrutural como apresentado na Figura 2, não persistindo a ligação dos apoios com a armadura após o endurecimento do concreto e, portanto, faz-se a ancoragem da armadura apenas por aderência.

Figura 2 – Concreto com pré-tração.



Fonte: Cauduro (2002).

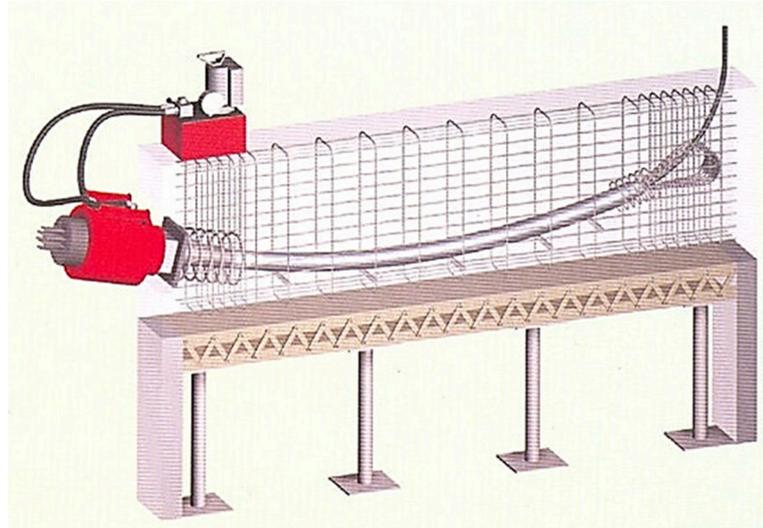
Nota-se na Figura 2 a independência dos apoios (contra-fortes) que auxiliam o pré-alongamento da armadura de protensão antes da obtenção aderência com o concreto.

Concreto com armadura ativa com aderência posterior (pós-tracionada): após endurecimento do concreto, a armadura ativa é pré-alongada com o auxílio de apoios que são partes do próprio elemento estrutural, criando-se posteriormente aderência com o concreto, através da injeção de natas de cimento nas bainhas.

Concreto com armadura ativa sem aderência (pós-tracionada): após endurecimento do concreto, a armadura ativa é pré-alongada com o auxílio de apoios que são partes do próprio elemento estrutural, no entanto não é criada aderência com o concreto, ficando a armadura ligada ao concreto apenas em pontos localizados.

Na Figura 3 é observada a operação de estiramento da armadura de protensão, após o concreto da peça já apresentar a resistência à compressão necessária.

Figura 3 – Concreto com pós-tração.



Fonte: Bastos (2015).

É notado na Figura 3 a ausência de apoios independentes da estrutura, sendo realizada a protensão com apoios que são partes do próprio elemento estrutural.

3.1.2 Perdas de protensão

As estruturas protendidas estão, por definição, sob a ação das forças de protensão, as quais estão permanentemente aplicadas. No entanto, a intensidade dessas forças está suscetível a variações de intensidade, sendo chamadas as diminuições de perdas de protensão.

Carvalho (2012) explica que as perdas podem ser classificadas como imediatas e diferidas, estando associadas, respectivamente, ao modo de execução da protensão, juntamente com as propriedades elástica do aço e do concreto, e as propriedades viscoelásticas do concreto e do aço.

Para as perdas imediatas destacam-se a por atrito, geralmente entre cabo e bainha, a por deformação da ancoragem e a por deformação imediata do concreto, enquanto que para as perdas ao longo do tempo destacam-se devido a retração do concreto, a fluência do concreto e a relaxação da armadura ativa (CARVALHO, 2012).

3.1.3 Valores representativos da força de protensão

A força de protensão apresenta valores particulares para as diferentes situações que são típicas de um elemento protendido, apresentam-se as seguintes:

P_i é a força máxima aplicada à armadura de protensão pelo equipamento de tração, antes de ser realizada a ancoragem de qualquer tipo.

P_a na pré-tração é a força na armadura de protensão no instante imediatamente anterior à sua liberação das ancoragens externas, na seção de abscissa $x = 0$. É correspondente ao valor da força P_i menos as perdas de tensão pela relaxação do aço, escorregamento dos fios ou cordoalhas nas ancoragens provisórias e retração inicial do concreto, não estando a peça solicitada por ações externas.

$P_o(x)$ é o valor inicial da força de protensão transferida ao concreto, na seção de abscissa x . No caso de pré-tração é obtida subtraindo as perdas de tensão originadas pela deformação imediata do concreto da força de tração P_a . Na pós-tração é obtida subtraindo as perdas de tensão originadas pelo escorregamento dos fios ou cordoalhas, atrito nos cabos, acomodação da ancoragem, da deformação imediata do concreto e relaxação inicial da armadura.

$P_t(x)$ corresponde ao valor da força de protensão após também deduzidos os valores das perdas de tensão decorridas das perdas progressivas de protensão. É uma função que depende do tempo e tende para o valor final $P_\infty(x)$, após todas as perdas terem ocorrido.

Na Figura 4 e na Figura 5 estão ilustrados os valores representativos da força de protensão, em função do tempo, para os casos de elementos protendidos pré-traçados e pós-traçados, respectivamente.

Figura 4 - Diagrama força de protensão x tempo para peça protendida pré-traçada.

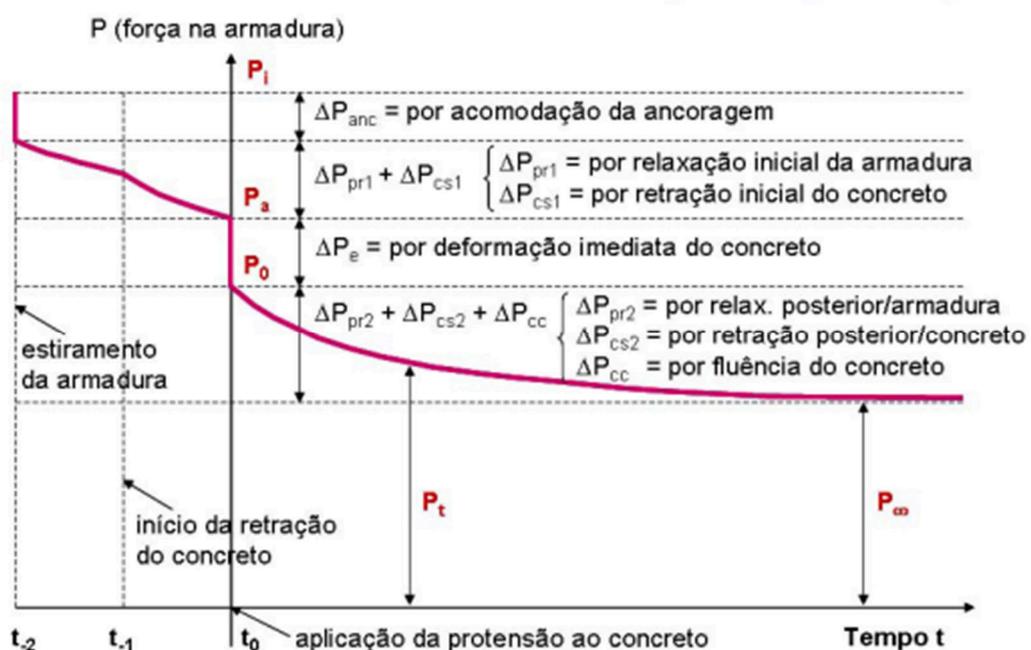
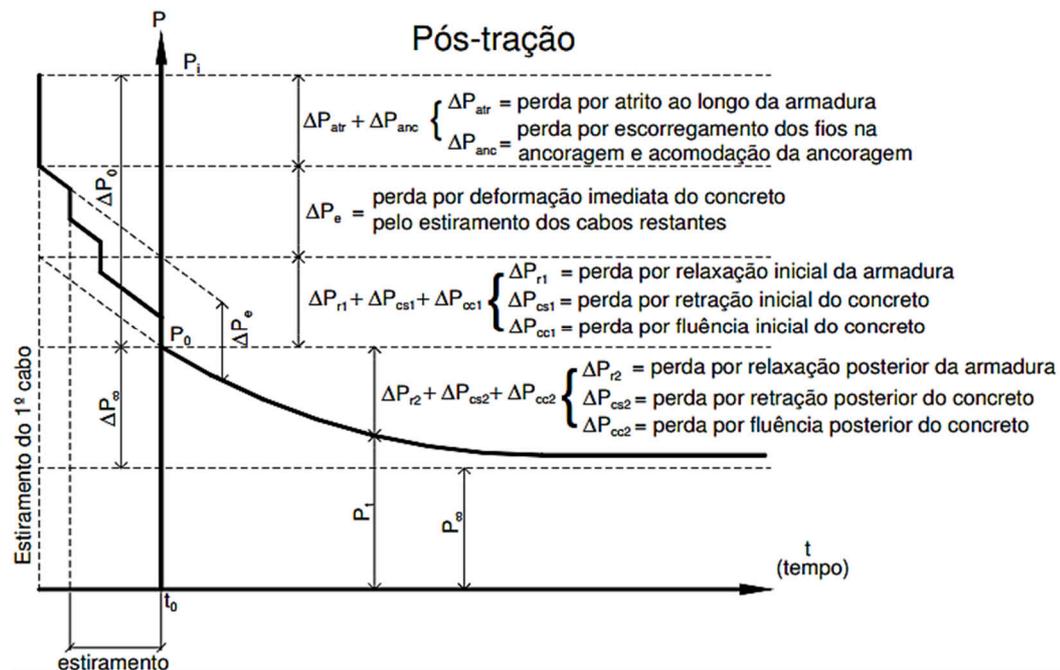


Figura 5 - Diagrama força de protensão x tempo para peça protendida pós-tração.



Fonte: Bastos (2015).

Fica, então, evidenciada a influência das perdas no valor da força de protensão ao longo do tempo, sendo, portanto, de grande importância sua correta estimativa para elaboração de projetos de concreto protendido.

3.2 Aços para protensão

Os aços utilizados para protensão (armaduras ativas) são caracterizados por sua elevada resistência em comparação aos utilizados como armadura passiva (sem protensão: CA-60, CA-50 e CA-25), além de não possuírem patamar de escoamento.

A designação da armadura ativa é dada pela sigla “CP” (concreto protendido), seguida pela resistência característica mínima à tração (f_{ptk}) em kN/cm^2 e pela indicação se o aço é de relaxação normal ou baixa por meio das siglas “RN” ou “RB”, respectivamente.

Destaca-se que os aços de baixa relaxação produzem perdas de tensão por relaxação de cerca de 25% das perdas por relaxação normal (BASTOS, 2015).

Os aços para armaduras ativas são apresentados nas seguintes formas:

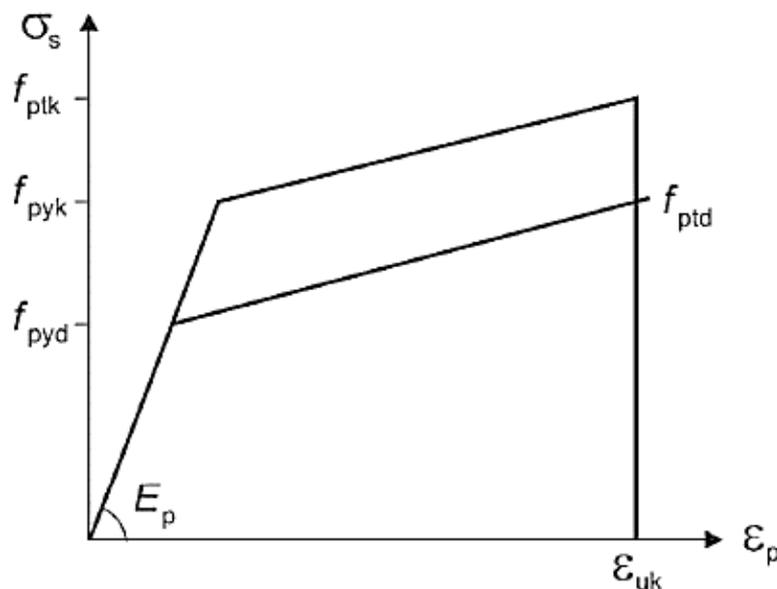
- Fios trefilados de aço carbono: possuem diâmetro de 3 a 8 mm, fornecido em rolos ou bobinas;

- Cordoalhas: são constituídas de fios enrolados em forma de hélice, com dois, três ou sete fios;

- Barras de aço-liga de alta resistência: com comprimento limitado e diâmetros superiores a 12 mm, são laminadas a quente.

A ABNT NBR 6118:2014 especifica que o diagrama tensão-deformação de armaduras ativas deve ser fornecido pelo fabricante, no entanto permite para o cálculo nos estados-limite de serviço e último, utilizar o diagrama simplificado mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Diagrama tensão deformação para aços de armaduras ativas.



Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

Em que:

f_{ptk} é a resistência mínima à ruptura por tração;

f_{pyk} é a resistência característica de escoamento convencional, corresponde à deformação residual de 0,2%;

E_p é o módulo de elasticidade (na falta de informações do fabricante ou ensaio, adotar 200 GPa);

ϵ_{uk} é a deformação na ruptura.

3.2.1 Limites por ocasião de protensão

A ABNT NBR 6118:2014 limita a tensão inicial a ser empregada no aço ativo na execução da protensão:

Para as armaduras pré-tracionadas:

- Aços de relaxação normal (RN)

$$\sigma_{pi} \leq 0,77f_{ptk} \text{ e } \sigma_{pi} \leq 0,90 f_{pyk} \quad (1)$$

- Aços de relaxação baixa (RB)

$$\sigma_{pi} \leq 0,77f_{ptk} \text{ e } \sigma_{pi} \leq 0,85 f_{pyk} \quad (2)$$

Para as armaduras pós-tracionadas:

- Aços de relaxação normal (RN)

$$\sigma_{pi} \leq 0,74f_{ptk} \text{ e } \sigma_{pi} \leq 0,87 f_{pyk} \quad (3)$$

- Aços de relaxação baixa (RB)

$$\sigma_{pi} \leq 0,74f_{ptk} \text{ e } \sigma_{pi} \leq 0,82 f_{pyk} \quad (4)$$

- Cordoalhas engraxadas de relaxação baixa (RB)

$$\sigma_{pi} \leq 0,80f_{ptk} \text{ e } \sigma_{pi} \leq 0,88 f_{pyk} \quad (5)$$

- Aços CP-85/105 em barras

$$\sigma_{pi} \leq 0,72f_{ptk} \text{ e } \sigma_{pi} \leq 0,88 f_{pyk} \quad (6)$$

A ABNT NBR 6118:2014 estabelece ainda que ao término da operação de protensão, seja a armadura pré ou pós-tracionada, a tensão $\sigma_{p0}(x)$, decorrente da força $P_0(x)$, não pode superar os limites estabelecidos para armaduras pós-tracionadas.

3.3 Estado-Limite Último

O estado-limite último é o estado relacionado à segurança da estrutura quanto a qualquer colapso ou ruína que interrompa o seu uso (NBR 6118, 2014).

3.4 Estados-Limite de Serviço

Os estados-limites de serviço estão relacionados às condições de uso do usuário da estrutura, além de máquinas e equipamentos por ela suportados. Relacionam-se, ainda, ao conforto, à durabilidade e aparência (NBR 6118, 2014).

É de interesse das estruturas protendidas, principalmente para o dimensionamento da seção transversal dos elementos estruturais, os seguintes estados-limites de serviço definidos pela ABNT NBR 6118:2014:

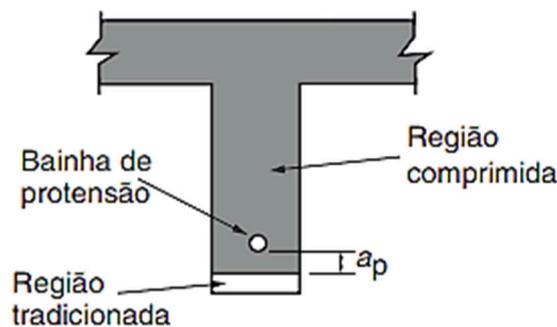
a) Estado-limite de formação de fissuras (ELS-F): estado no qual se inicia a formação de fissuras. Admite-se que este estado-limite é alcançado quando a tensão de tração máxima na seção transversal for igual à resistência do concreto à tração na flexão (f_{ct}).

b) Estado-limite de abertura das fissuras (ELS-W): estado no qual as fissuras se apresentam com aberturas iguais aos máximos especificados pela ABNT NBR 6118:2014 em seu item 13.4.2. Para estruturas de concreto protendido com protensão parcial, o limite para abertura de fissura é de 0,2 mm.

c) Estado-limite de descompressão (ELS-D): estado em que em um ou mais pontos da seção transversal a tensão normal é nula, não havendo tração no restante da seção, sendo uma verificação a ser feita no estágio I.

d) Estado-limite de descompressão parcial (ELS-DP): estado no qual é garantida a compressão na seção transversal na região em que se encontram armaduras ativas. Essa região deve se estender até uma distância a_p da face mais próxima da armadura de protensão, conforme Figura 7.

Figura 7 - Estado-limite de descompressão parcial



Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

e) Estado-limite de compressão excessiva (ELS-CE): estado no qual as tensões de compressão atingem o limite convencional estabelecido. No item 17.2.4.3.2 da ABNT NBR 6118:2014 é fixado o limite de 70% da resistência característica do concreto f_{ckj} prevista para a idade de aplicação da protensão.

3.5 Níveis de protensão

A ABNT NBR 6118:2014 classifica o concreto protendido em três níveis de protensão: protensão completa, limitada e parcial. Esta classificação é obtida em função da classe de agressividade ambiental a qual estará submetida a estrutura e norteia as verificações, com as combinações pertinentes, necessárias para elaboração de um projeto de concreto protendido. No Quadro 1 são apresentadas as classes de agressividade ambiental e no Quadro 2 os níveis de protensão existentes e os respectivos estados-limites de serviço a serem respeitados.

Quadro 1 - Classes de agressividade ambiental (CAA)

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

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

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

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

Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

Quadro 2 - 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 $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	Combinação frequente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV	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 3.1).

NOTAS

1 As definições de ELS-W, ELS-F e ELS-D encontram-se em 3.2.

2 Para as classes de agressividade ambiental CAA-III e IV, exige-se que as cordoalhas não aderentes tenham proteção especial na região de suas ancoragens.

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

Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

Conforme explicitado no Quadro 2, quanto maior a agressividade do ambiente, maior será o nível de protensão exigido, pois menor deverá ser a probabilidade de fissuração da estrutura sob cargas em serviço. Logo, são assim descritos os níveis de protensão por Bono (1999): protensão completa é o nível de protensão caracterizado pela ausência de tensões de tração, ou seja, com probabilidade desprezível de fissuração sob cargas em serviço; na protensão limitada existem tensões normais moderadas de tração e com baixa probabilidade de fissuração; e a protensão parcial é caracterizada por tensões de tração e, conseqüentemente, fissuração do concreto da seção sob atuação de cargas em serviço, sendo o único caso em que é necessário impedir a demasiada abertura das fissuras.

3.6 Procedimentos para dimensionamento de uma seção transversal de concreto protendido

Para o dimensionamento de um elemento estrutural protendido, diferente do método usualmente empregado no concreto armado, é comum dimensionar a estrutura para atender os estados-limites de serviço para depois se realizar a verificação no estado-limite último. No presente trabalho será adotada a sequência supracitada, acrescentando-se, nos casos em que não há atendimento ao ELU, armadura passiva.

Serão consideradas as hipóteses básicas expressas no item 17.2.2 da ABNT NBR 6118:2014, destacando-se as seguintes:

- a) A seção transversal se mantém plana após a deformação.
- b) Tanto a deformação das barras passivas aderentes quanto o acréscimo de deformação das barras ativas aderentes em tração ou compressão devem ser iguais ao do concreto no qual estão inseridas.
- c) Para armaduras ativas não aderentes, o acréscimo das tensões é expresso a seguir, devendo ainda ser divididos pelos coeficientes de ponderações adequados:

- Para elementos com a relação vão/altura útil igual ou inferior a 35:

$$\Delta\sigma_p = 70 + f_{ck}/100\rho_p, \text{ não ultrapassando } 420 \text{ MPa.}$$

- Para elementos com a relação vão/altura útil superior a 35:

$$\Delta\sigma_p = 70 + f_{ck}/300\rho_p, \text{ não ultrapassando } 210 \text{ MPa.}$$

na qual

$$\rho_p = \frac{A_p}{b_c d_p}$$

$\Delta\sigma_p$ e f_{ck} - são dados em megapascal (MPa);

ρ_p - é a taxa geométrica da armadura ativa;

b_c - é a largura da mesa de compressão;

d_p - é a altura útil referida à armadura ativa.

3.6.1 Estimativa da força de protensão P_∞

Para a estimativa da força final de protensão, deve-se obter uma força para qual se respeite todos os estados-limites de serviço exigidos para o nível de protensão adotado.

Nos itens a seguir está o equacionamento necessário para estimar a força P_∞ para cada nível de protensão, adotando-se o maior valor da força obtido dos estados-limites de serviço

requeridos, conforme Hanai (2005). Ressalta-se que sempre deverá ser verificado o estado-limite de compressão excessiva, verificando-se se a máxima tensão de compressão não é superior a 70% do f_{ck} do concreto.

Nos exemplos a seguir, admiti-se que as tensões normais de tração causadas pelos carregamentos ocorram na borda inferior.

3.6.1.1 Protensão completa (nível 3)

Conforme já apresentado no Quadro 2, para a protensão completa é necessário verificar os estados-limite de descompressão e formação de fissuras, utilizando-se respectivamente a combinação frequente e rara de ações.

a) Estado-limite de descompressão (ELS-D)

A fim de verificar o atendimento ao ELS-D na borda inferior da seção transversal do elemento estrutural, utiliza-se a combinação frequente de ações na seguinte equação:

$$\sigma_{bg1} + \sigma_{bg2} + \psi_1\sigma_{bq1} + \psi_2\sigma_{bq2} + \sigma_{bP\infty} = 0 \quad (7)$$

na qual

σ_{bg1} - é a tensão normal na base devido ao peso próprio do elemento estrutural;

σ_{bg2} - é a tensão normal na base devida à carga permanente adicional;

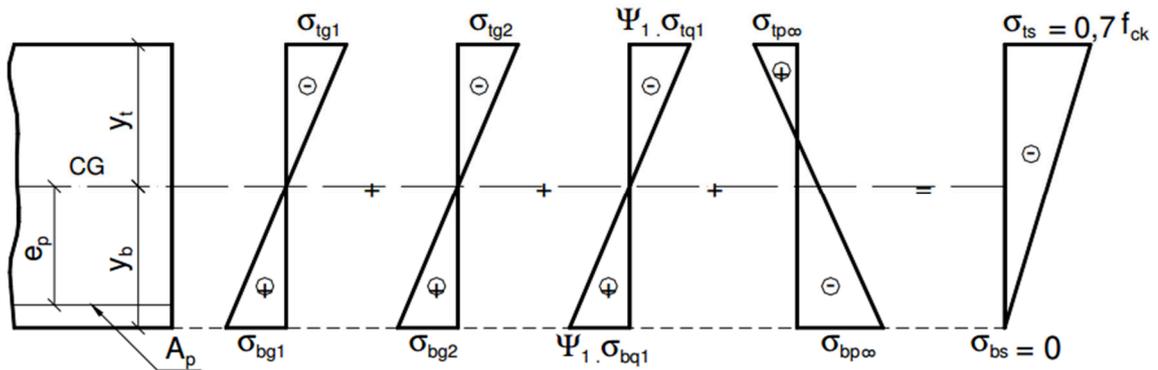
σ_{bq1} - é a tensão normal na base devida à carga variável principal;

σ_{bq2} - é a tensão normal na base devida à carga variável secundária;

$\sigma_{bP\infty}$ - é a tensão normal na base devida à força de protensão final.

Esta situação, se considerado q_2 igual a zero, é ilustrada nos diagramas de tensão da Figura 8.

Figura 8 - Tensões na protensão completa para a combinação frequente de ações.



Fonte: Bastos (2015).

na qual

A_p - é a área da armadura de protensão;

e_p - é a excentricidade da força de protensão aplicada;

y_b - é a distância entre o centro de gravidade e a base da seção transversal;

y_t - é a distância entre o centro de gravidade e o topo da seção transversal;

σ_{tg1} - é a tensão normal no topo devido ao peso próprio do elemento estrutural;

σ_{tg2} - é a tensão normal no topo devida à carga permanente adicional;

σ_{tq1} - é a tensão normal no topo devida à carga variável principal;

$\sigma_{tp\infty}$ - é a tensão normal no topo devida à força de protensão final;

σ_{bs} - é a tensão resultante na base da seção do elemento estrutural;

σ_{ts} - é a tensão resultante no topo da seção do elemento estrutural.

Ψ_1 - é o coeficiente de ponderação apresentado no item 11.7 da ABNT NBR 6118:2014.

Da equação (7), pode-se determinar $\sigma_{bP\infty}$ e em sequência $P_{\infty,est}$ a partir de:

$$\sigma_{bP\infty} = \frac{P_{\infty,est}}{A_c} + \frac{P_{\infty,est} e_p}{W_b} \quad (8)$$

na qual

A_c - é a área de concreto da seção transversal;

W_b - é o módulo de resistência em relação a base.

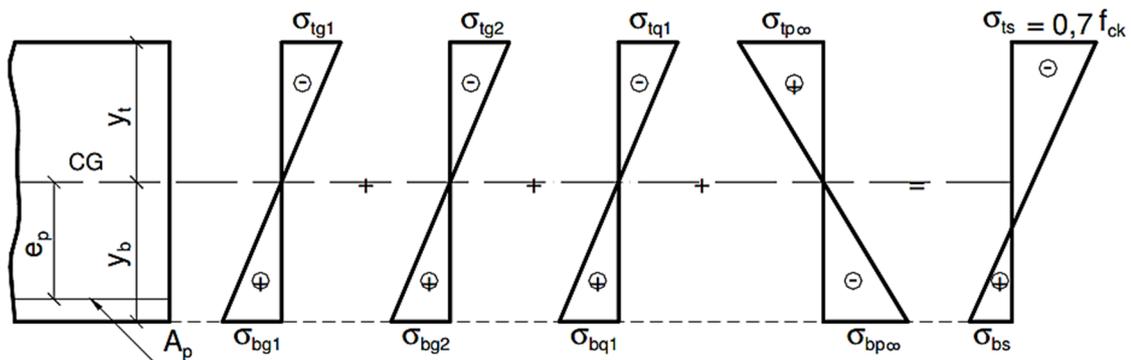
b) Estado-limite de formação de fissuras (ELS-F)

A fim de verificar o atendimento ao ELS-F na borda inferior da seção transversal do elemento estrutural, utiliza-se a combinação rara de ações na seguinte equação:

$$\sigma_{bg1} + \sigma_{bg2} + \sigma_{bq1} + \psi_1 \sigma_{bq2} + \sigma_{bP\infty} = \begin{cases} 1,5f_{ctk} & (\text{para seção retangular}) \\ 1,2f_{ctk} & (\text{para seção T ou I}) \end{cases} \quad (9)$$

Esta situação, se considerado q_2 igual a zero, é ilustrada nos diagramas de tensão da Figura 9.

Figura 9 - Tensões na protensão completa para a combinação rara de ações.



Fonte: Bastos (2015).

Da equação (9), pode-se determinar $\sigma_{bP\infty}$ e em sequência $P_{\infty,est}$ a partir da equação (8) já citada.

3.6.1.2 Protensão limitada (nível 2)

Conforme já apresentado no Quadro 2, para a protensão limitada é necessário verificar os estados-limite de descompressão e formação de fissuras, utilizando-se respectivamente a combinação quase-permanente e frequente de ações.

a) Estado-limite de descompressão (ELS-D)

A fim de verificar o atendimento ao ELS-D na borda inferior da seção transversal do elemento estrutural, utiliza-se a combinação quase-permanente de ações na seguinte equação:

$$\sigma_{bg1} + \sigma_{bg2} + \psi_2\sigma_{bq1} + \psi_2\sigma_{bq2} + \sigma_{bP\infty} = 0 \quad (10)$$

na qual

ψ_2 - é o coeficiente de ponderação apresentado no item 11.7 da ABNT NBR 6118:2014.

Desta equação, pode-se determinar $\sigma_{bP\infty}$ e em sequência $P_{\infty,est}$ a partir da equação (8) já citada.

b) Estado-limite de formação de fissuras (ELS-F)

A fim de verificar o atendimento ao ELS-F na borda inferior da seção transversal do elemento estrutural, utiliza-se a combinação frequente de ações na seguinte equação:

$$\sigma_{bg1} + \sigma_{bg2} + \psi_1\sigma_{bq1} + \psi_2\sigma_{bq2} + \sigma_{bP\infty} = \begin{cases} 1,5f_{ctk} & \text{(para seção retangular)} \\ 1,2f_{ctk} & \text{(para seção T ou I)} \end{cases} \quad (11)$$

Desta equação, pode-se determinar $\sigma_{bP\infty}$ e em sequência $P_{\infty,est}$ a partir da equação (8) já citada.

3.6.1.3 Protensão parcial (nível 1)

Conforme já apresentado no Quadro 2, para a protensão parcial é apenas necessário atender como condição de serviço o estado-limite de abertura de fissuras (menor que 0,2 mm), utilizando-se a combinação frequente de ações. Entretanto, para determinar a força P_{∞} , será utilizado o estado-limite de descompressão, utilizando-se a combinação quase-permanente de ações, deixando-se para verificar o atendimento do estado-limite de abertura de fissuras para uma etapa posterior.

a) Estado-limite de descompressão (ELS-D)

A fim de verificar o atendimento ao ELS-D na borda inferior da seção transversal do elemento estrutural, utiliza-se a combinação quase-permanente de ações, já descrita na equação (10). Em seguida, determina-se $\sigma_{bP\infty}$ e, conseqüentemente, $P_{\infty,est}$ a partir da equação (8).

3.6.2 Determinação da força de protensão P_i

A partir da arbitragem da perda de protensão, considerada em Hanai (2005) na ordem de 20 a 30%, excluídas as perdas por atrito dos cabos, determina-se a força inicial $P_{i,est}$ utilizando-se o valor da força já determinada $P_{\infty,est}$, como se segue na expressão abaixo:

$$P_{i,est} = \frac{P_{\infty,est}}{(1 - \Delta P_{arb})} \quad (12)$$

3.6.3 Determinação da área de armadura ativa

É determinada a área de aço ativo, a qual respeite o limite por ocasião de protensão da tensão inicial decorrente da força inicial estimada, expresso no item 3.2.1 deste trabalho:

$$A_{p,est} = \frac{P_{i,est}}{\sigma_{pi,lim}} \quad (13)$$

Tendo em vista as limitações de diâmetros das armaduras, calcula-se a área de aço que efetivamente será empregada ($A_{p,ef}$), utilizando o número de fios, cordoalhas ou cabos necessário para atender a área de aço estimada ($A_{p,est}$) e a área unitária correspondente ao diâmetro escolhido.

Em seguida, determina-se a força inicial efetiva, decorrente da divergência entre a área de aço calculada e efetiva:

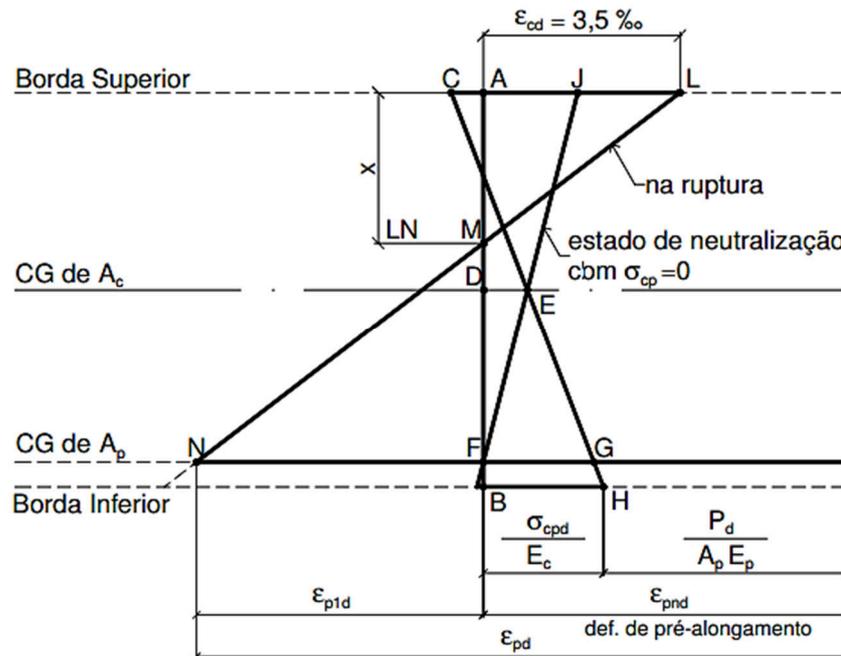
$$P_{i,ef} = P_i = A_{p,ef} \times \sigma_{pi,lim} \quad (14)$$

3.6.4 Pré-alongamento

“Pré-alongamento é a deformação da armadura ativa correspondente à situação em que se anula a tensão no concreto à altura do centro de gravidade desta armadura” (HANAI, 2005, p. 83).

Bastos (2015) fornece um exemplo, ilustrado na Figura 10, de uma seção transversal submetida a momentos fletores positivos progressivamente aumentados até se atingir a ruptura nos domínios 3 ou 4 que melhor elucida o conceito de pré-alongamento.

Figura 10 - Deformações em uma seção sob momentos fletores positivos crescentes.



Fonte: Bastos (2015).

Inicialmente, considerando apenas a atuação da força de protensão de cálculo (P_d):

- Ao nível do CG da armadura ativa, o concreto tem a deformação de encurtamento correspondente a relação de sua tensão neste ponto (σ_{cpd}) e seu módulo de elasticidade (E_c): segmento FG (Figura 10);

- Por sua vez, a armadura ativa tem a deformação de alongamento correspondente a relação da força de protensão de cálculo (P_d) com sua área (A_p) e módulo de elasticidade (E_p): segmento GI (Figura 10);

Agora as solicitações externas são incrementadas até que se anule a deformação na fibra correspondente ao CG da armadura de protensão (estado de neutralização):

- O alongamento que sofre o concreto até que anule o encurtamento ao qual primeiro foi submetido (segmento FG), é também o alongamento acrescido a armadura ativa, passando a ter deformação correspondente ao segmento FI (Figura 10). Esta deformação é a denominada de pré-alongamento (ϵ_{pnd}).

Por fim, as solicitações externas são incrementadas até que se atinja o encurtamento de ruptura do concreto:

- A deformação na borda superior atinge o valor último de 3,5 ‰;
- Há fissuração na borda inferior, elevando-se a linha neutra (LN);
- A deformação na armadura de protensão é ε_{pld} (segmento FN) que somada ao pré-alongamento (ε_{pnd}) resulta na deformação total de cálculo (ε_{pd}).

O cálculo do pré-alongamento pode ser realizado com a equação (15):

$$\varepsilon_{pnd} = |P_{nd}| / (A_p E_p) \quad (15)$$

na qual

$$P_{nd} = P_d + (E_p/E_c) A_p \times \sigma_{cpd} \quad (16)$$

na qual a tensão do concreto ao nível do CG da armadura é expressa na equação (17):

$$\sigma_{cpd} = P_d \left(1/A_c + e_p^2/I_c \right) \quad (17)$$

Atentando-se que a força de protensão no estado-limite último, após a ocorrência de todas as perdas (P_∞), tem seu valor de cálculo ponderado pelo coeficiente de ação favorável, conforme equação (18):

$$P_d = 0,9 \times P_\infty \quad (18)$$

3.6.5 Verificação do estado-limite último

Para atendimento ao estado-limite último é calculada a armadura passiva complementar à armadura ativa anteriormente dimensionada para atendimento do momento fletor último que solicita a seção estudada.

O processo adotado consiste no cálculo do momento último por tentativas, em que é arbitrada uma tensão na armadura de protensão (σ_{pd}) e a solução é por fim determinada quando o equilíbrio entre as forças de compressão e de tração é estabelecido.

O roteiro para o cálculo do momento fletor último, conforme a ABNT NBR 6118:2014 e recomendações de Bastos (2015), é apresentado a seguir:

- Cálculo do pré-alongamento (ϵ_{pnd});
- Adotada inicialmente a hipótese de ruptura nos domínios 3 ou 4:

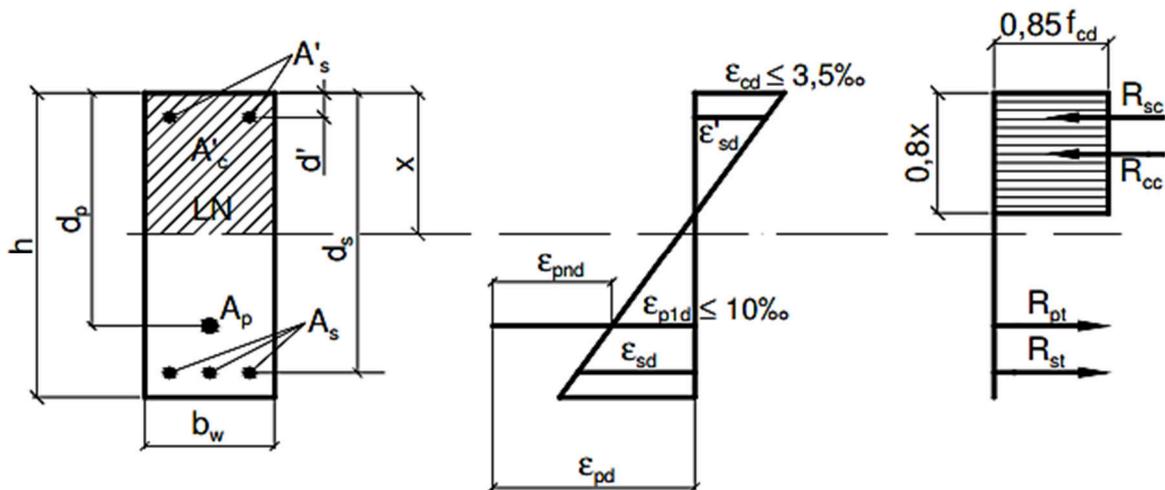
$$\sigma_{cd} = 0,85f_{cd} ; \epsilon_{cd} = 3,5 \text{ ‰}; \quad (19)$$

- Hipótese inicial para σ_{pd} :

$$\sigma_{pd}^{(1)} = f_{pyd} = \frac{f_{pyk}}{1,15} \quad (20)$$

- Obtém-se a posição da linha neutra utilizando-se as equações de equilíbrio de forças, ilustradas na Figura 11:

Figura 11 - Esforços e deformações no ELU.



Fonte: Bastos (2015).

Apenas para facilitar o entendimento utilizou-se de uma seção retangular, mas as expressões a seguir são válidas para qualquer tipo de seção:

$$R_{cc} + R_{sc} = R_{pt} + R_{st} \quad (21)$$

$$R_{cc} = \sigma_{cd}A'_c \quad (22)$$

$$R_{sc} = \sigma'_{sd}A'_s \quad (23)$$

$$R_{pt} = \sigma_{pd}A_p \quad (24)$$

$$R_{st} = \sigma_{sd}A_s \quad (25)$$

na qual

R_{cc} - é a força resultante de compressão aplicada no concreto;

R_{sc} - é a força resultante de compressão aplicada na armadura passiva;

R_{pt} - é a força resultante de tração aplicada na armadura ativa;

R_{st} - é a força resultante de tração aplicada na armadura passiva;

A'_c - é a área de concreto comprimido;

A'_s - é a área de armadura passiva comprimida;

A_s - é a área de armadura passiva tracionada.

Na hipótese de que a armadura passiva escoou, seja na compressão, seja na tração:

$$\sigma_{sd} = f_{yd} \quad (26)$$

$$\sigma'_{sd} = f'_{yd} \quad (27)$$

Reescrevendo a equação (21), fazendo as devidas substituições:

$$\sigma_{cd}A'_c + f'_{yd} A'_s = \sigma_{pd}A_p + f_{yd}A_s \quad (28)$$

A área comprimida de concreto (A'_c) depende da posição da linha neutra (x), sendo assim, isola-se esta incógnita e a escreve em função da área de aço passivo tracionado (equação (29)), não sendo necessário considerar, em um primeiro momento, área de aço passivo comprimido.

$$x = f(A_s) \quad (29)$$

- e) Igualando-se o momento fletor último resistido (M_{ud}) ao atuante (M_{sd}), tem-se com as equações (29) e (30) um sistema de duas equações e duas incógnitas, em que se determinam a posição x e a área de aço A_s .

$$M_{ud} = \sigma_{pd}A_p(d_p - 0,4x) + f_{yd}A_s(d_s - 0,4x) + f'_{yd}A'_s(0,4x - d') \quad (30)$$

É importante salientar que nesta etapa das recomendações de Bastos (2015) necessita-se verificar o atendimento da ABNT NBR 6118:2014 em seu item 14.6.4.3, que define a relação entre posição da linha neutra e altura útil máxima de 0,45 para concretos de f_{ck} igual ou inferior a 50 Mpa, visando proporcionar adequado comportamento dútil em vigas e lajes, uma vez que a capacidade de rotação dos elementos estruturais é função da posição da linha neutra no ELU: quanto menor for a relação x/d_p , tanto maior será essa capacidade.

- f) Utilizando-se a compatibilidade de deformações, determina-se a deformação na armadura de protensão (ε_{p1d}):

$$\frac{\varepsilon_{cd}}{\varepsilon_{p1d}} = \frac{x}{d_p - x} \quad (31)$$

- g) Se a deformação na armadura de protensão (ε_{p1d}) for menor que 10‰, a hipótese de ruptura nos domínios 3 ou 4 se confirma e segue-se para o passo (h), se for maior que 10‰ a ruptura estará no domínio 2 ($\varepsilon_{p1d} = 10‰$) e segue-se para o passo (j).
- h) Determina-se a tensão na armadura (σ_{pd}) com a deformação $\varepsilon_{pd} = \varepsilon_{p1d} + \varepsilon_{pnd}$, através do diagrama tensão-deformação.
- se σ_{pd} tiver diferença relativa inferior a 1% de $\sigma_{pd}^{(1)}$: segue-se para o passo (i);
 - caso contrário: adotar novo valor para tensão na armadura ($\sigma_{pd}^{(1)} = \sigma_{pd}$) e voltar ao passo (d).

- i) Verifica-se a deformação na armadura passiva tracionada (ε_{sd}):

$$\frac{\varepsilon_{cd}}{\varepsilon_{sd}} = \frac{x}{d_s - x} \quad (32)$$

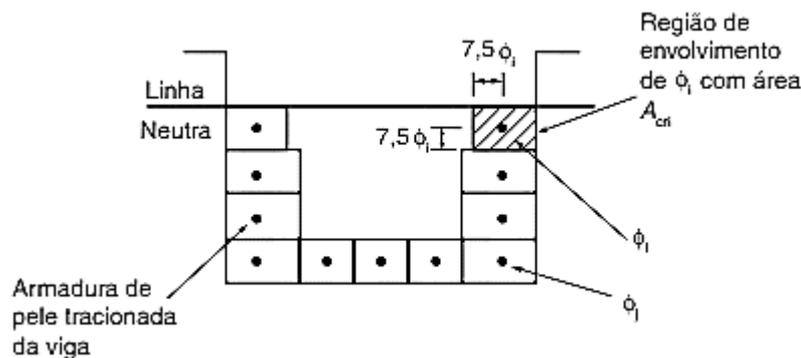
- Se ε_{sd} for maior que ε_{yd} , a armadura estará escoando e a tensão será a de escoamento, conforme anteriormente adotado e tem-se a seção dimensionada.
- Caso contrário: voltar para passo d) e adotar novo valor para tensão na armadura passiva.

- j) Determina-se a tensão na armadura ativa (σ_{pd}) com a deformação $\varepsilon_{pd} = \varepsilon_{p1d} + \varepsilon_{pnd}$, através do diagrama tensão-deformação.
- k) Refaz-se os passos (d) e (e) com nova tensão na armadura calculada e segue-se ao passo (l).
- l) Verifica-se as deformações do concreto no domínio 2 (com $\varepsilon_{p1d} = 10\text{‰}$), utilizando-se a equação (31).
- Se ε_{cd} menor que 3,5‰ confirma-se o domínio 2 e realiza-se o passo (i).

3.6.6 Verificação do estado-limite de abertura de fissuras

Como já explicado neste trabalho, para elementos protendidos com protensão parcial estabelece-se um limite de 0,2 mm para a abertura característica de fissuras (w_k). Segundo o item 17.3.3.2 da ABNT NBR 6118:2014, o valor da abertura característica pode ser determinado da seguinte forma: primeiro, considera-se uma área do concreto de envolvimento (A_{cr}) para cada elemento ou grupo de elementos das armaduras tracionadas (exceto os cabos protendidos que se encontram dentro de bainhas) formada por um retângulo cujos lados estejam a no máximo $7,5\phi$ do eixo da barra da armadura, conforme Figura 12.

Figura 12 - Concreto de envolvimento da armadura



Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

Tem-se, então, que o valor característico da abertura de fissuras é o menor entre as equações a seguir:

$$w_k = \frac{\phi_i \sigma_{si} 3\sigma_{si}}{12,5\eta_I E_{si} f_{ctm}} \quad (33)$$

$$w_k = \frac{\phi_i \sigma_{si}}{12,5 \eta_1 E_{si}} \left(\frac{4}{\rho_{ri}} + 45 \right) \quad (34)$$

na qual

$\phi_i, \sigma_{si}, E_{si}, \rho_{ri}$ - são definidos para cada área de envolvimento;

A_{cri} - é a área de envolvimento protegida pela barra ϕ_i ;

E_{si} - é o módulo de elasticidade do aço da barra considerada;

ϕ_i - é o diâmetro da barra que protege a região de área A_{cri} ;

ρ_{ri} - é a taxa de armadura passiva ou ativa aderente (fora da bainha) em relação a A_{cri} ;

σ_{si} - é a tensão de tração no centro de gravidade da armadura considerada, calculada no estágio II;

η_1 - é o coeficiente de conformação superficial da armadura considerada.

Ressalta-se que em peças estruturais protendidas, σ_{si} é o acréscimo de tensão entre o estado-limite de descompressão e o carregamento considerado, considerando também a armadura envolvida por bainha.

O coeficiente de conformação superficial da armadura passiva será igual a 1,0 quando utilizadas barras lisas, para barras entalhadas será igual a 1,4 e para barras nervuradas será considerado 2,25. Para as armaduras ativas, será igual a 1,0 para fios lisos, para cordoalhas de 3 a 7 fios será igual a 1,2 e para fios dentados será considerado 1,4.

4 METODOLOGIA

Baseado no referencial teórico deste trabalho foi elaborado com o auxílio do software MATLAB, amplamente utilizado por estudantes de engenharia, um programa para o dimensionamento das armaduras longitudinais de uma seção transversal de um elemento de concreto protendido, estando os procedimentos, que foram adotados no programa, desenvolvidos em acordo com as recomendações das normas ABNT NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento e NBR 8681/04 - Ações e segurança nas estruturas – Procedimento e validados com exemplos constantes na bibliografia.

4.1 Procedimentos utilizados no programa

Utilizando-se de uma interface gráfica para facilitar a interação com o usuário, o programa desenvolvido faz uso de diversos procedimentos, com a sua execução nas seguintes etapas:

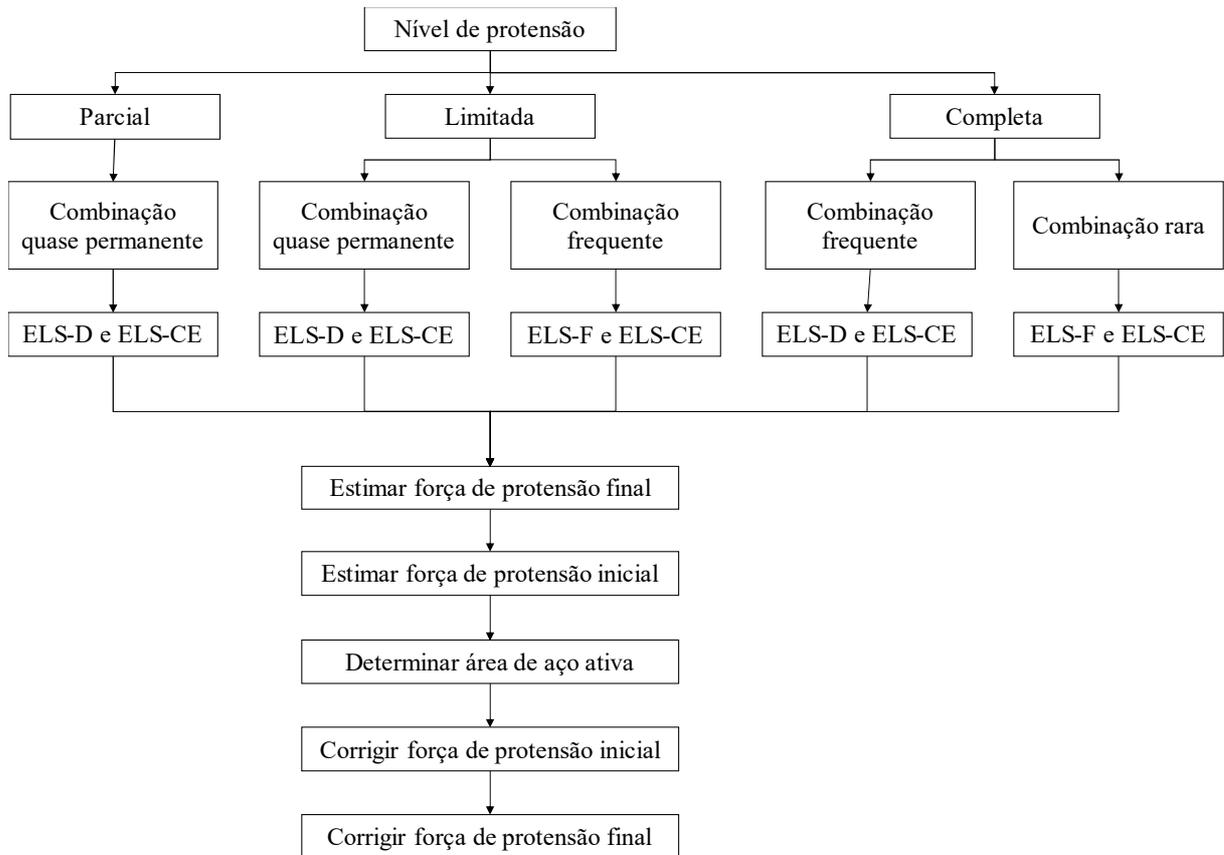
- a) Definição do tipo de seção a ser utilizada;
- b) Definição das características geométricas da seção;
- c) Definição dos parâmetros de protensão, ações e demais dados de entradas necessárias;
- d) Pré-dimensionamento da armadura ativa através dos estados-limites de serviço;
- e) Verificação do estado-limite último apenas com a armadura ativa;
- f) Se necessário, dimensionamento de armadura passiva complementar para atendimento ao estado-limite último;
- g) Verificação do estado-limite último no ato da protensão;
- h) Verificação da alocação das armaduras;
- i) Se utilizada protensão parcial, verifica-se a abertura de fissuras;
- j) Apresentação dos resultados.

Ressalta-se que a estimativa das perdas de protensão, importante etapa para dimensionamento de qualquer elemento com armadura ativa, não é realizada por este software, estando a cargo do usuário produzir tais estimativas.

As etapas ‘a’, ‘b’ e ‘c’ acima citadas são de interação com o usuário, nas quais são inseridos dados de entrada.

A etapa ‘d’ está implementada na rotina ELS.m do programa, com um fluxograma de seus procedimentos apresentado na Figura 13.

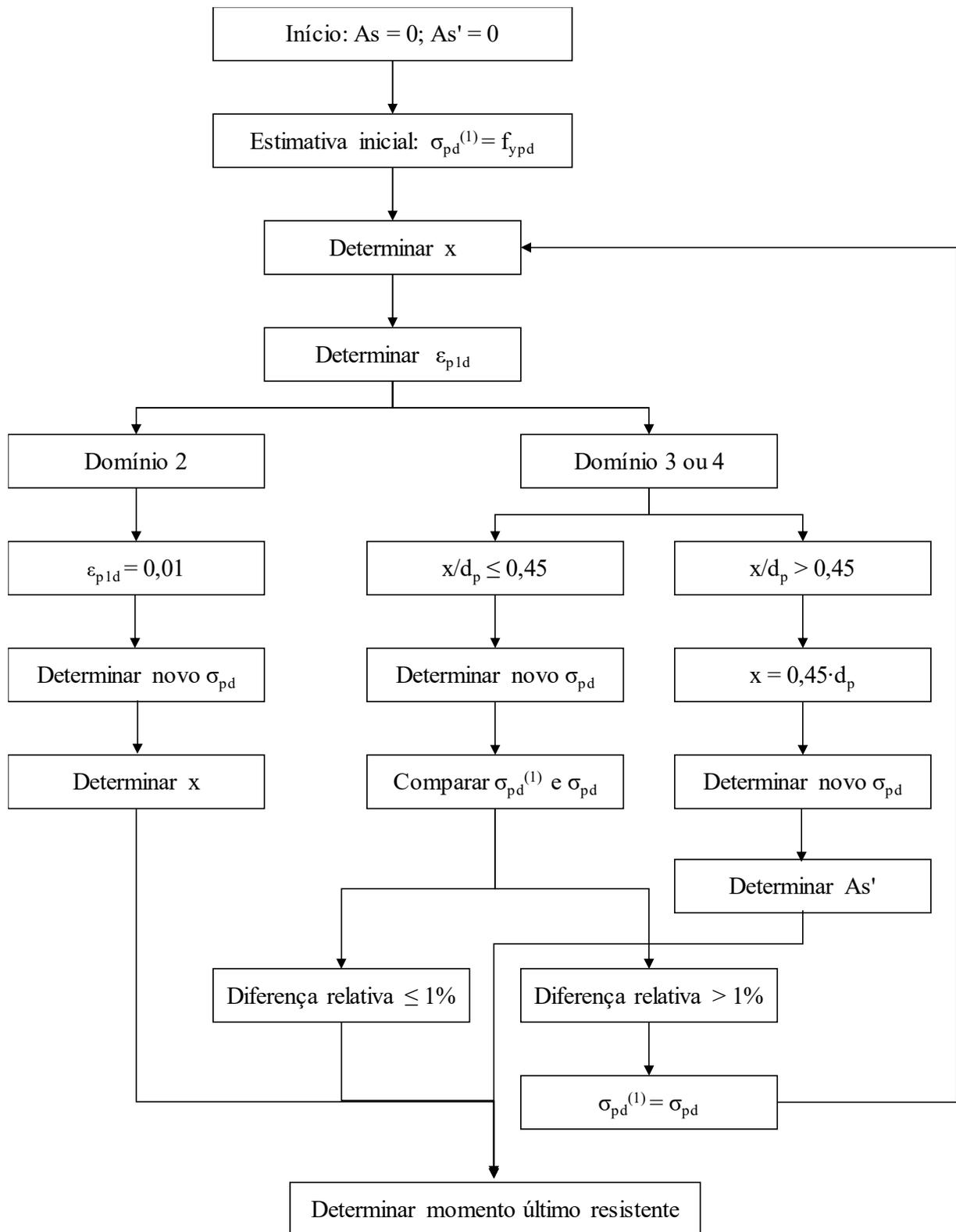
Figura 13 - Fluxograma da rotina ELS.m



Fonte: Do Autor (2016).

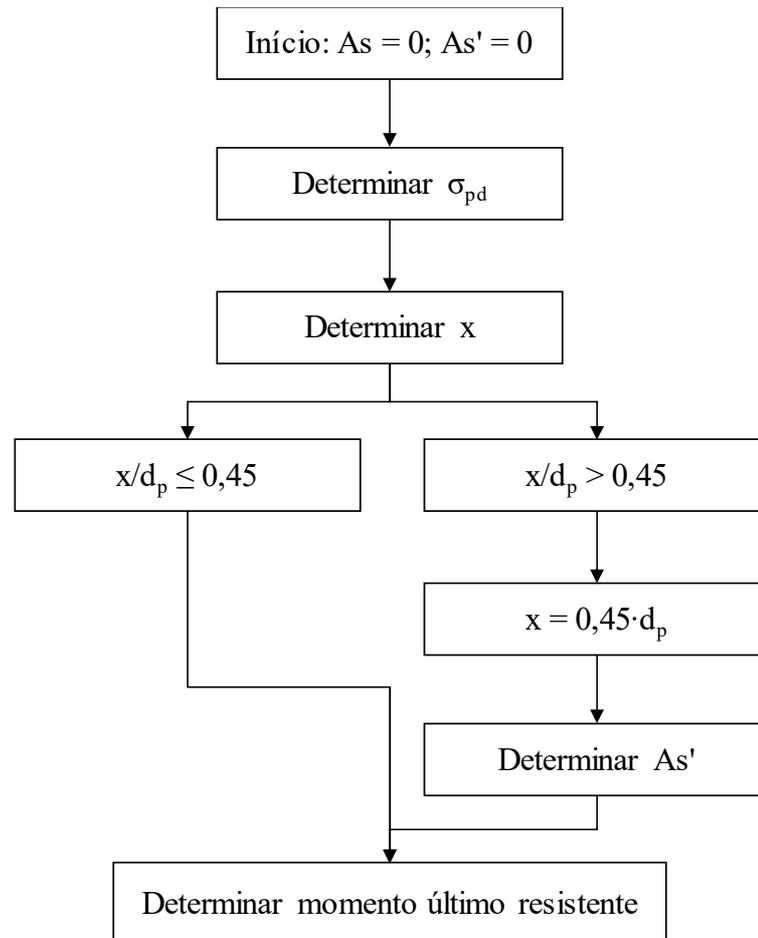
A etapa 'e' corresponde a rotina ELU_Ap.m com a execução conforme a aderência da protensão, sendo apresentado no fluxograma da Figura 14 os procedimentos para a protensão aderente e na Figura 15 o fluxograma para a protensão não-aderente.

Figura 14 - Fluxograma da rotina ELU_Ap.m para protensão aderente.



Fonte: Do Autor (2016).

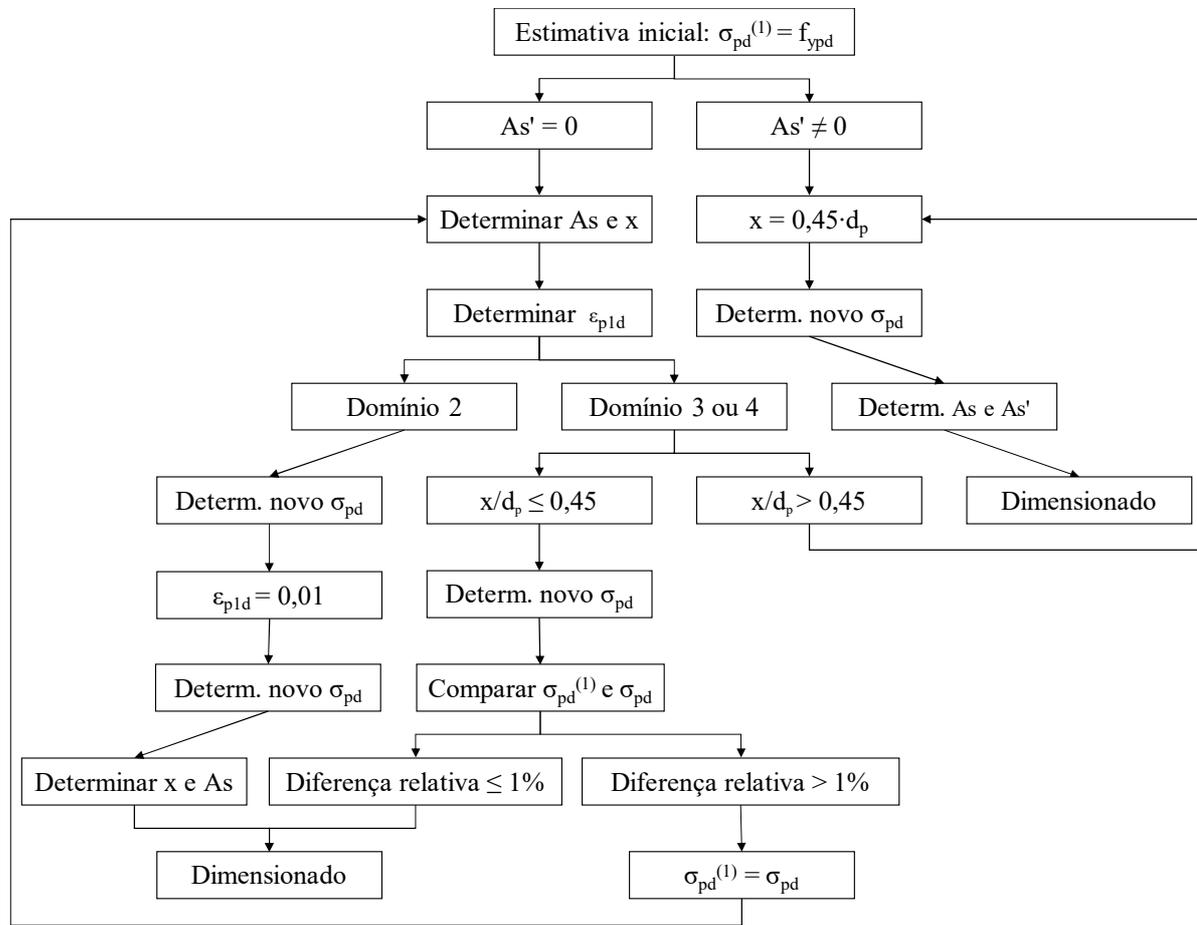
Figura 15 - Fluxograma da rotina ELU_Ap.m para protensão não-aderente.



Fonte: Do Autor (2016).

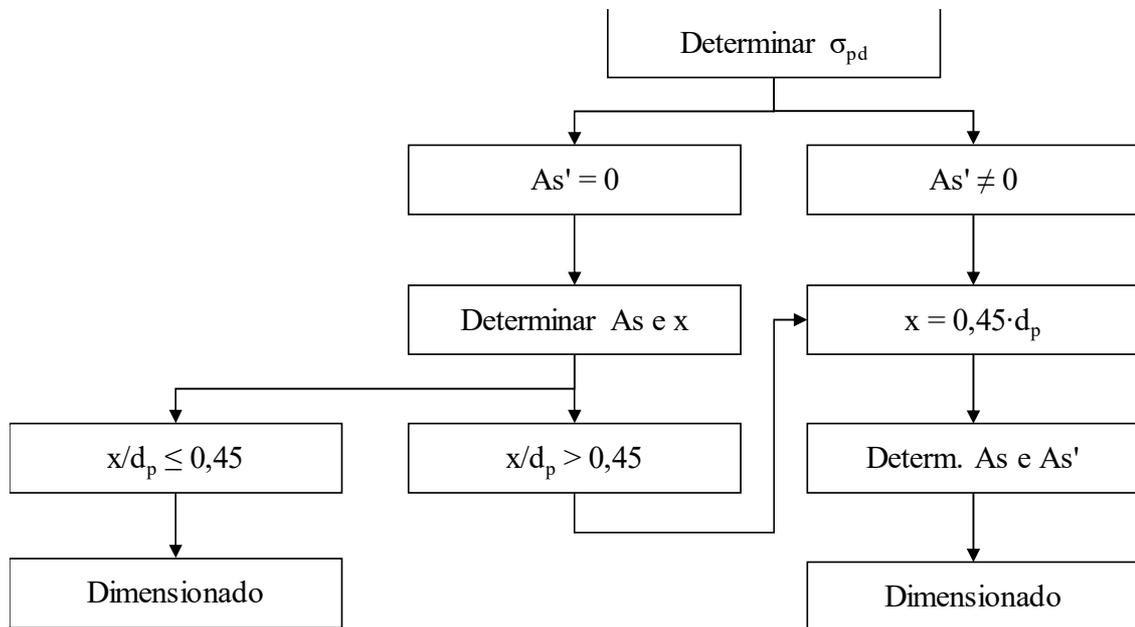
Se o momento último resistente calculado sem armadura passiva de tração for inferior ao momento último atuante, a etapa 'f' é iniciada, executando a rotina ELU_As.m para dimensionamento da armadura passiva, conforme apresentado no fluxograma da Figura 16 para protensão aderente e na Figura 17 para protensão não-aderente.

Figura 16 - Fluxograma da rotina ELU_As.m para protensão aderente.



Fonte: Do Autor (2016).

Figura 17 - Fluxograma da rotina ELU_As.m para protensão não-aderente.

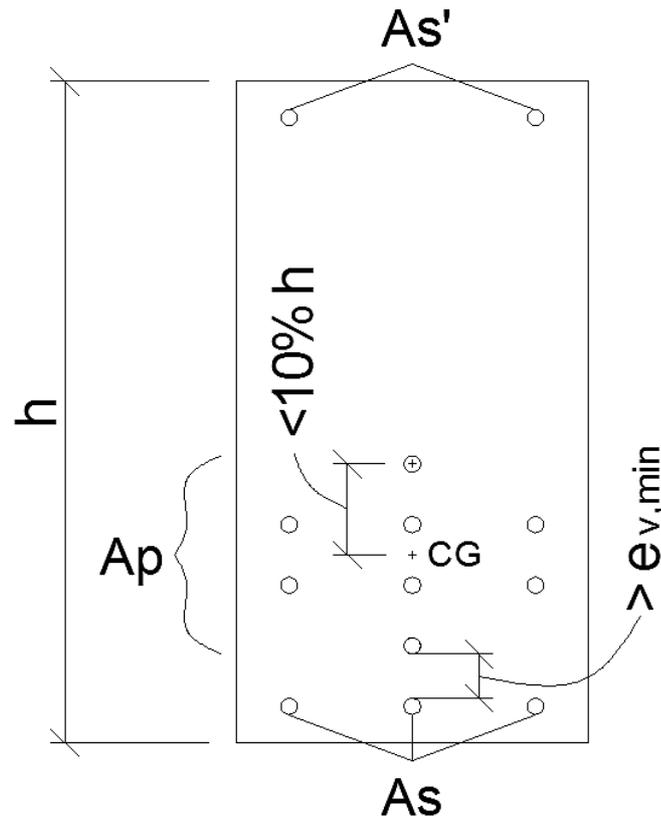


Fonte: Do Autor (2016).

Na etapa 'g' busca-se verificar se a seção dimensionada está em conformidade com o item 17.2.4.3.2, alíneas a e b, da ABNT NBR 6118:2014, no qual são limitadas as tensões máximas de compressão e tração atuantes na seção no ato de aplicação da protensão. Caso não sejam respeitadas estas exigências da norma, o programa apresenta um aviso ao usuário alertando a desconformidade.

Devido as diversas possibilidades de alocação das armaduras, a etapa 'h' é apenas uma indicação do programa quanto a uma possibilidade de alocação, sinalizando excessivas quantidades de aço para a geometria da seção dimensionada. A disposição adotada no programa consiste na existência de ao menos o espaçamento vertical mínimo ($e_{v,min}$) entre armaduras ativas e passivas, além da verificação do item 17.2.4.1 da ABNT NBR 6118:2014, em que os esforços nas armaduras apenas podem ser considerados concentrados no centro de gravidade (CG) correspondente, se não houver um afastamento superior a 10% da altura entre este centro de gravidade e o da armadura mais afastada. Na Figura 18 são ilustradas algumas características da alocação.

Figura 18 - Alocação das armaduras.



Fonte: Do Autor (2016).

Embora apenas indentificado na Figura 18 a verificação do afastamento do centro de gravidade da armadura mais distante para as armaduras de protensão, esta verificação também é realizada nas armaduras passivas.

Se utilizada protensão parcial, ocorre, na etapa 'i', a verificação da abertura de fissuras, para isto utiliza-se da disposição das armaduras adotada na etapa 'h'. Em situações de excessivas aberturas de fissuras, o programa emitirá um alerta para que o usuário tenha uma maior atenção a este estado-limite de serviço.

4.2 Validação do programa

O programa foi validado em duas etapas: primeiro utilizou-se um exemplo de Pellegrino Neto e Cardoso (2015) para a validação da rotina implementada para verificação dos estados-limites de serviço. Neste exemplo é utilizada metodologia de cálculo semelhante a implementada no programa e através dos estados-limites de serviço, a armadura ativa é dimensionada. Em sequência, foi utilizado um exemplo de Loureiro (2015), no qual é pré-

estabelecida uma área de aço ativo para a posterior verificação do estado-limite último e verificação da possível necessidade de empregar-se armadura passiva tracionada para o respeitar. Em ambos os casos, foram comparados os resultados obtidos com o programa desenvolvido neste trabalho com os constantes na literatura.

Por último, analisaram-se os resultados obtidos em exemplos feitos por Faleiros Júnior (2010) e Cunha (2012). Ambos os autores fizeram uso de metodologia diferente da desenvolvida no programa para o dimensionamento, determinando a armadura ativa por meio do estado-limite último para então se realizar as verificações de serviço, ordem inversa da utilizada neste trabalho.

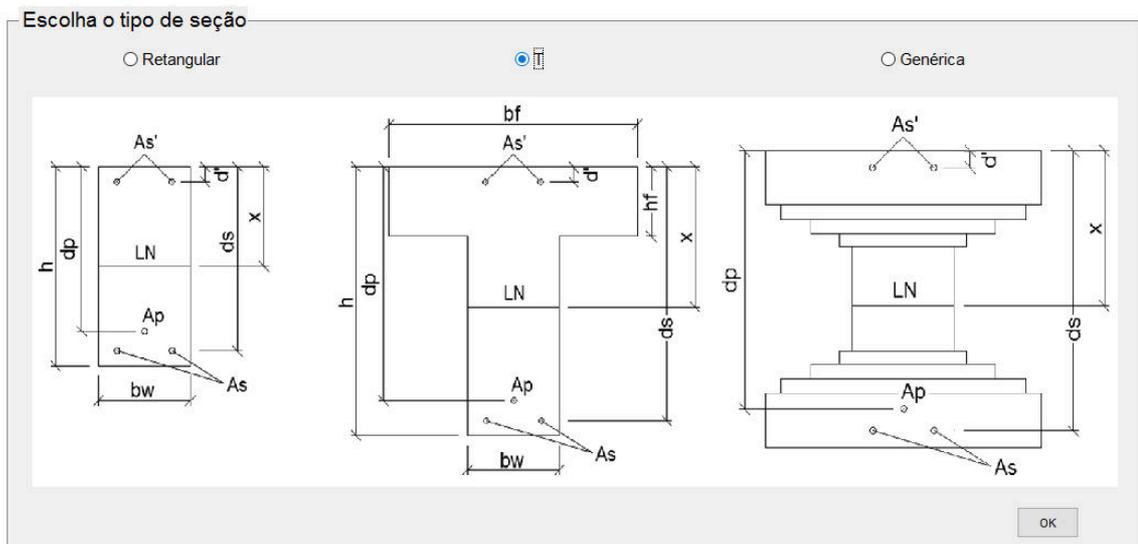
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir será apresentada a execução do programa, utilizando-se de exemplos conhecidos na literatura para posteriores comparações.

5.1 Exemplo 1

O primeiro exemplo executado foi o de Pellegrino Neto e Cardoso (2015) em que é apenas dimensionada a armadura ativa necessária para atender aos estados-limites de serviço, não se verificando o estado-limite último. O projeto consiste em uma viga isostática de uma passarela de pedestres com protensão limitada. Faz-se a primeira interação com o programa ao escolher o formato da seção a ser utilizada como mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Escolha do tipo de seção.



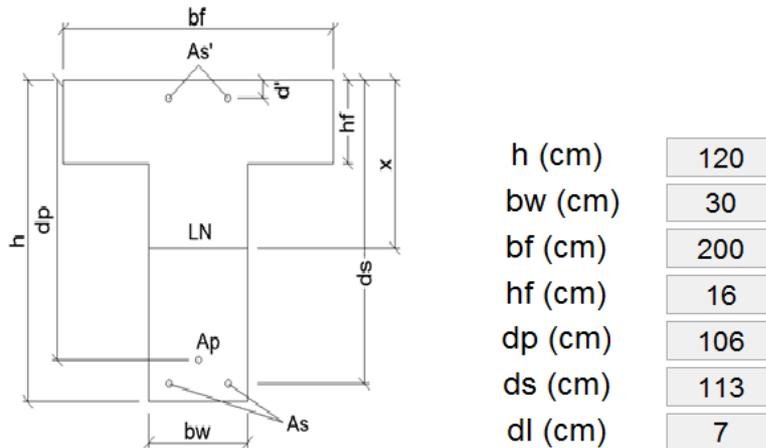
Fonte: Do Autor (2016).

As possibilidades para o formato da seção apresentadas no programa são: retangular, “T” e genérica, na qual retângulos são definidos a fim de caracterizar qualquer seção desejada pelo usuário.

Para este problema a seção utilizada tem a forma “T”, ressaltando-se que no exemplo original, a seção “T” tem uma suave inclinação na parte inferior da mesa, partindo de uma altura inicial de 12 cm até uma altura de 20 cm no encontro com a nervura. Para não haver relevantes alterações no resultado, adotou-se a altura média de 16 cm para a mesa.

Em seguida, as características geométricas da seção escolhida são definidas conforme é apresentado na Figura 20.

Figura 20 - Características geométricas.



OK

Fonte: Do Autor (2016).

Diferentemente do exemplo de Pellegrino Neto e Cardoso (2015), é necessária a informação da posição da armadura passiva, visto que neste será também verificado o estado-limite último, sendo conservados os valores originais e adotados os necessários para o prosseguimento do dimensionamento. Então foi utilizado 113 cm para o posicionamento referente a armadura tracionada (dp) e 7 cm para o posicionamento referente a armadura comprimida (dl).

O próximo passo consiste na entrada dos parâmetros da protensão, as ações atuantes e as demais informações necessárias para o completo dimensionamento proposto pelo programa, conforme é observado na Figura 21.

Figura 21 - Parâmetros da protensão, ações e demais dados de entrada.

Parâmetros da protensão	Ações	Outros parâmetros
Tipo de protensão <input checked="" type="radio"/> Pós-tração <input checked="" type="radio"/> Aderente <input type="radio"/> Pré-tração <input type="radio"/> Não Aderente Tipo de Relaxação <input type="radio"/> Relaxação normal <input checked="" type="radio"/> Relaxação baixa <input type="radio"/> Cordoalha engraxada RB <input type="radio"/> Aços CP85/105 em barras Nível de protensão Tipo de aço <input type="radio"/> Parcial <input type="radio"/> Liso <input checked="" type="radio"/> Limitada <input checked="" type="radio"/> Cordoalha <input type="radio"/> Completa <input type="radio"/> Dentado Phi ativo (cm) <input type="text" value="1.27"/> Ep (GPa) <input type="text" value="200"/> fptk (MPa) <input type="text" value="1900"/> fpyk (MPa) <input type="text" value="1710"/> euk (%) <input type="text" value="3.5"/>	Mg1 (kN.cm) <input type="text" value="123437.5"/> Mg2 (kN.cm) <input type="text" value="50000"/> Mq1 (kN.cm) <input type="text" value="78125"/> Mq2 (kN.cm) <input type="text" value="0"/> Psi1 <input type="text" value="0.4"/> Psi2 <input type="text" value="0.3"/> Yf,g1 <input type="text" value="1.4"/> Yf,g2 <input type="text" value="1.4"/> Yf,q1 <input type="text" value="1.4"/> Yf,q2 <input type="text" value="1.4"/>	fck (MPa) <input type="text" value="35"/> fckj (MPa) <input type="text" value="28"/> Perda inicial (%) <input type="text" value="10"/> Perda total (%) <input type="text" value="25"/> Cobrimento (cm) <input type="text" value="3"/> Vão* (cm) <input type="text" value="2500"/> <small>*Vão apenas necessário se não há aderência, caso contrário pode-se adotar 0 (zero)</small>
		<input type="button" value="OK"/>

Fonte: Do Autor (2016).

Destaca-se na Figura 21 que para os esforços permanentes há uma divisão entre os que estarão presentes no ato da protensão ($Mg1$), neste exemplo apenas o peso próprio, e os impostos em ocasião posterior ($Mg2$), neste exemplo o esforço proveniente do guarda-corpo e do revestimento. Nota-se, ainda, a possibilidade de separar a ação variável principal ($Mq1$) das demais ações variáveis ($Mq2$).

O concreto utilizado pode ser até a classe C50, sendo também necessária a especificação de sua resistência no ato da protensão ($fckj$) para as devidas verificações recomendadas pela ABNT NBR 6118:2014.

Este programa não estima as perdas de protensão, como já destacado anteriormente, estando, portanto, a cargo do usuário fornecer as informações das perdas iniciais e totais.

Ao fim da entrada de dados é obtida a última janela do programa com os resultados da seção dimensionada, podendo-se observar na Figura 22.

Figura 22 - Resultados da seção dimensionada.

Seção dimensionada:		
Área de aço ativo: 22.22 cm ²	Características Geométricas	
Área de aço passivo tracionado: 1.01 cm ²	Estádio 1	Estádio 2
Área de aço passivo comprimido: 0.00 cm ²	Área da seção: 6320.00 cm ²	Área da seção: 2661.33 cm ²
Bitola do aço passivo tracionado: 6.3 mm	Linha neutra: 37.62 cm	Linha neutra: 12.48 cm
Bitola do aço passivo comprimido: 0 mm	Inércia: 8567515.27 cm ⁴	Inércia: 1590515.87 cm ⁴
Força de protensão inicial: 3116 kN	Momento Resist.: 61406.23 kN.cm	
Força de protensão final: 2337 kN		
Nova Seção	Fechar	
	Fechar e Limpar Memória	

Fonte: Do Autor (2016).

A área de aço ativo necessária determinada por Pellegrino Neto e Cardoso (2015) foi de 22,10 cm², enquanto o programa deste trabalho determinou 22,22 cm², sendo ainda justificável essa ínfima diferença (1,0%) devido ao programa arredondar a área de aço para um valor que represente um número inteiro de barras.

Observa-se, ainda, que se obteve a área de aço passivo tracionado necessário para atender ao estado-limite último, o qual não foi verificado no exemplo original. Nota-se, também, as características geométricas como resultado apresentado pelo programa.

Na Tabela 1 é apresentada uma comparação dos resultados deste exemplo.

Tabela 1 - Comparação dos resultados obtidos com os de Pellegrino Neto e Cardoso (2015)

Pellegrino Neto e Cardoso	Autor
Armadura ativa (cm ²)	
22,1	22,22
Diferença: 1,0%	

Fonte: Do Autor (2016).

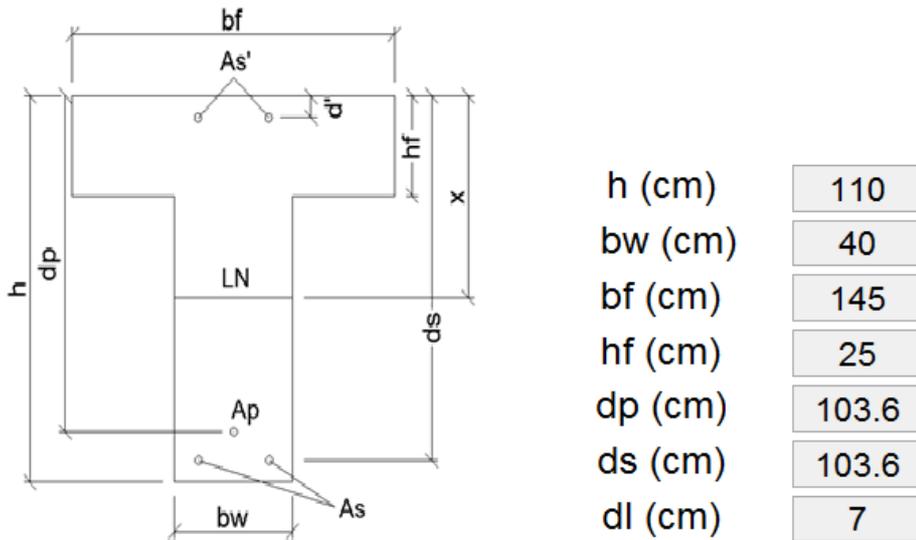
5.2 Exemplo 2

O segundo exemplo executado, de autoria de Loureiro (2015), parte-se de uma armadura ativa previamente dimensionada e, através do estado-limite último, verifica-se a necessidade de adicionar uma armadura passiva complementar. Para validar as rotinas do programa que

verificam o estado-último, inseriu-se no código do programa uma armadura ativa igual ao do exemplo, pois não há as informações dos estados-limites de serviço que levaram a este dimensionamento.

A seção utilizada foi a do tipo “T” com as características apresentadas na Figura 23:

Figura 23 - Características geométricas - segundo exemplo.



OK

Fonte: Do Autor (2016).

Para manter fidelidade ao exemplo de Loureiro (2015), manteve-se o posicionamento das armaduras ativa e passiva tracionada na mesma altura, embora, como já explicado, faz parte da metodologia adotada no presente trabalho a verificação da alocação das armaduras com a separação entre as regiões de armaduras ativas e passivas, sendo, portanto, esperado neste exemplo um aviso alertando o usuário da necessidade de verificar a alocação das armaduras.

Os demais parâmetros para dimensionamento são apresentados na Figura 24.

Figura 24 - Parâmetros da protensão, ações e demais dados de entrada - segundo exemplo.

Parâmetros da protensão	Ações	Outros parâmetros
Tipo de protensão <input checked="" type="radio"/> Pós-tração <input type="radio"/> Aderente <input type="radio"/> Pré-tração <input checked="" type="radio"/> Não Aderente Tipo de Relaxação <input type="radio"/> Relaxação normal <input type="radio"/> Relaxação baixa <input checked="" type="radio"/> Cordoalha engraxada RB <input type="radio"/> Aços CP85/105 em barras Nível de protensão Tipo de aço <input type="radio"/> Parcial <input type="radio"/> Liso <input type="radio"/> Limitada <input checked="" type="radio"/> Cordoalha <input checked="" type="radio"/> Completa <input type="radio"/> Dentado Phi ativo (cm) <input type="text" value="1.52"/> Ep (GPa) <input type="text" value="200"/> fptk (MPa) <input type="text" value="1900"/> fpyk (MPa) <input type="text" value="1710"/> euk (%) <input type="text" value="3.5"/>	Mg1 (kN.cm) <input type="text" value="67157.12"/> Mg2 (kN.cm) <input type="text" value="149700"/> Mq1 (kN.cm) <input type="text" value="32300"/> Mq2 (kN.cm) <input type="text" value="0"/> Psi1 <input type="text" value="0.4"/> Psi2 <input type="text" value="0.3"/> Yf,g1 <input type="text" value="1.4"/> Yf,g2 <input type="text" value="1.4"/> Yf,q1 <input type="text" value="1.4"/> Yf,q2 <input type="text" value="1.4"/>	fck (MPa) <input type="text" value="30"/> fckj (MPa) <input type="text" value="23"/> Perda inicial (%) <input type="text" value="8"/> Perda total (%) <input type="text" value="20"/> Cobrimento (cm) <input type="text" value="3"/> Vão* (cm) <input type="text" value="800"/> <small>*Vão apenas necessário se não há aderência, caso contrário pode-se adotar 0 (zero)</small> <div style="text-align: right;"><input type="button" value="OK"/></div>

Fonte: Do Autor (2016).

Na ausência do comprimento do vão, adotou-se um valor de forma que se mantivesse a coerência com o exemplo constante na literatura (8,0 m), utilizando-se dos mesmos procedimentos para o dimensionamento. De maneira semelhante, os momentos fletores apresentados foram agrupados de modo que o momento fletor de cálculo atuante calculado pelo programa fosse equivalente ao do exemplo de Loureiro (2015), fazendo-se a devida separação entre os momentos já atuantes no ato da protensão e os de origem posterior.

Após inseridos todos os dados de entrada obteve-se o dimensionamento da seção, com os resultados apresentados na Figura 25.

Figura 25 - Resultados da seção dimensionada - segundo exemplo.

Seção dimensionada:		
Área de aço ativo: 21.00 cm ²	Características Geométricas	
Área de aço passivo tracionado: 20.39 cm ²	Estádio 1	Estádio 2
Área de aço passivo comprimido: 0.00 cm ²	Área da seção: 7025.00 cm ²	Área da seção: 3135.94 cm ²
Bitola do aço passivo tracionado: 25 mm	Linha neutra: 39.12 cm	Linha neutra: 19.39 cm
Bitola do aço passivo comprimido: 0 mm	Inércia: 7543091.82 cm ⁴	Inércia: 2648767.53 cm ⁴
Força de protensão inicial: 3161 kN	Momento Resist.: 46914.52 kN.cm	
Força de protensão final: 2529 kN		
Nova Seção	Fechar	
	Fechar e Limpar Memória	

Fonte: Do Autor (2016).

Nota-se a necessidade de 20,39 cm² de armadura passiva complementar aos 21 cm² de armadura ativa fornecidos pelo exemplo, estando em conformidade com o verificado por Loureiro (2015), quando dimensionou 20,41 cm² de armadura passiva.

Na

Tabela 2 é apresentada uma comparação dos resultados deste exemplo.

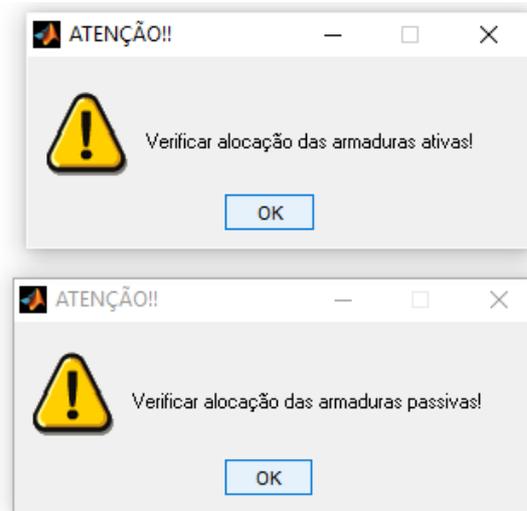
Tabela 2 - Comparação dos resultados obtidos com os de Loureiro (2015)

Loureiro	Autor
Armadura passiva tracionada (cm ²)	
20,41	20,39
Diferença < 0,01%	

Fonte: Do Autor (2016).

Como já esperado, o programa emitiu os alertas a respeito da alocação das armaduras, a serem vistos na Figura 26.

Figura 26 - Alertas à alocação das armaduras.



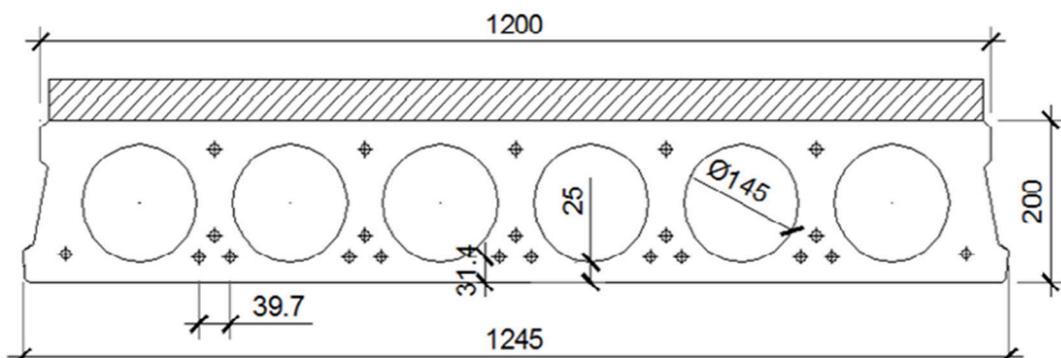
Fonte: Do Autor (2016).

Ressalta-se, que apesar dos alertas, não necessariamente há um problema em desconformidade com as exigências normativas, apenas indica que a alocação das armaduras não se adequa a metodologia adotada no programa.

5.3 Exemplo 3

Para o terceiro exemplo utilizou-se de uma adaptação ao resolvido por Faleiros Júnior (2010), no qual a metodologia é diferente da utilizada neste trabalho, com o dimensionamento da armadura ativa através do estado-limite último para a posterior verificação dos estados-limites de serviço. A seção transversal deste exemplo é alveolar, conforme mostrado na Figura 27.

Figura 27 - Seção alveolar utilizada por Faleiros Júnior (dimensões em mm).

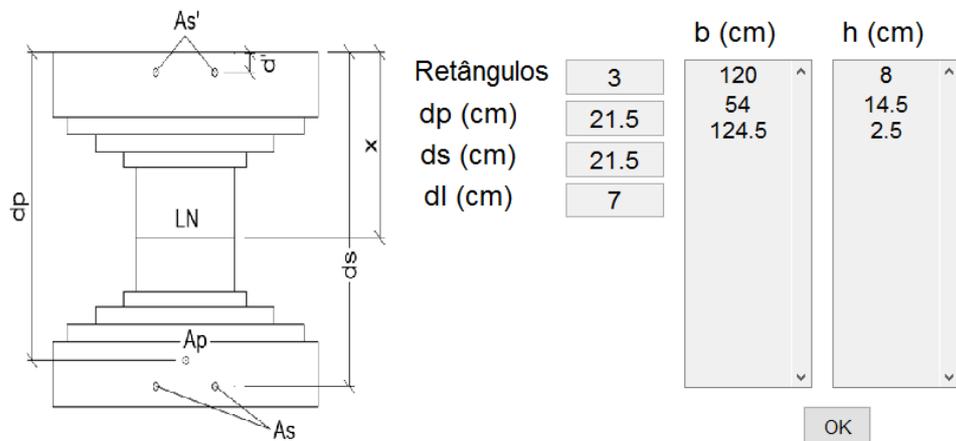


Fonte: Faleiros Júnior (2010).

Conforme visto na Figura 27 foi utilizada uma laje alveolar de 20 cm de altura com uma capa de 5 cm de espessura e alvéolos de 14,5 cm de diâmetro, além de largura variável entre 120 e 124,5 cm.

Para inserir as características geométricas no programa, utilizou-se a hipótese de seção genérica, na qual foram inseridos retângulos que melhor descrevessem a região de concreto, já descontando os alvéolos. Para isso, foram descritos três retângulos, conforme apresentado na Figura 28.

Figura 28 - Características geométricas - terceiro exemplo.



Fonte: Do Autor (2016).

Observa-se na Figura 28 que o primeiro retângulo tangencia a parte superior dos alvéolos, o segundo exprime uma área aproximada à região de concreto contida na altura dos alvéolos e o terceiro os tangencia na parte inferior, mantendo-se, ao fim, a altura original da peça.

Os demais parâmetros para dimensionamento são apresentados na Figura 29:

Figura 29 - Parâmetros da protensão, ações e demais dados de entrada - terceiro exemplo.

Parâmetros da protensão	Ações	Outros parâmetros
Tipo de protensão <input type="radio"/> Pós-tração <input checked="" type="radio"/> Aderente <input checked="" type="radio"/> Pré-tração <input type="radio"/> Não Aderente	Mg1 (kN.cm) <input type="text" value="1607"/> Mg2 (kN.cm) <input type="text" value="1827"/> Mq1 (kN.cm) <input type="text" value="2813"/> Mq2 (kN.cm) <input type="text" value="0"/>	fck (MPa) <input type="text" value="50"/> fckj (MPa) <input type="text" value="30"/> Perda inicial (%) <input type="text" value="5"/> Perda total (%) <input type="text" value="15"/> Cobrimento (cm) <input type="text" value="2.5"/> Vão* (cm) <input type="text" value="0"/> Alfa** <input type="text" value="1"/>
Tipo de Relaxação <input type="radio"/> Relaxação normal <input checked="" type="radio"/> Relaxação baixa <input type="radio"/> Cordoalha engraxada RB <input type="radio"/> Aços CP85/105 em barras	Psi1 <input type="text" value="0.6"/> Psi2 <input type="text" value="0.4"/> Yf,g1 <input type="text" value="1.4"/> Yf,g2 <input type="text" value="1.4"/> Yf,q1 <input type="text" value="1.4"/> Yf,q2 <input type="text" value="1.4"/>	*Vão apenas necessário se não há aderência, caso contrário pode-se adotar 0 (zero)
Nível de protensão Tipo de aço <input type="radio"/> Parcial <input type="radio"/> Liso <input checked="" type="radio"/> Limitada <input checked="" type="radio"/> Cordoalha <input type="radio"/> Completa <input type="radio"/> Dentado		**Alfa conforme item 17.3.1 da NBR 6118 (2014), necessário para o cálculo do momento de fissuração
Phi ativo (cm) <input type="text" value="0.95"/> Ep (GPa) <input type="text" value="205"/> fptk (MPa) <input type="text" value="1900"/> fpyk (MPa) <input type="text" value="1710"/> euk (%) <input type="text" value="3.5"/>		<input type="button" value="OK"/>

Fonte: Do Autor (2016).

Após a inserção de todos os dados necessários para o dimensionamento do programa desenvolvido neste trabalho, conforme mostrado na Figura 29, segue-se para a obtenção dos resultados, apresentados na Figura 30.

Figura 30 - Resultados da seção dimensionada - terceiro exemplo.

Seção dimensionada:		
Área de aço ativo: 2.80 cm ²	Características Geométricas	
Área de aço passivo tracionado: 0.00 cm ²	Estádio 1	Estádio 2
Área de aço passivo comprimido: 0.00 cm ²	Área da seção: 2054.25 cm ²	Área da seção: 288.26 cm ²
Bitola do aço passivo tracionado: 0 mm	Linha neutra: 11.28 cm	Linha neutra: 2.27 cm
Bitola do aço passivo comprimido: 0 mm	Inércia: 130619.83 cm ⁴	Inércia: 6404.25 cm ⁴
Força de protensão inicial: 407 kN	Momento Resist.: 3300.25 kN.cm	
Força de protensão final: 346 kN		
<input type="button" value="Nova Seção"/>		<input type="button" value="Fechar"/>
		<input type="button" value="Fechar e Limpar Memória"/>

Fonte: Do Autor (2016).

O resultado obtido por Faleiros Júnior (2010) foi de uma área de aço ativo de 2,76 cm², já a mostrada na Figura 30 foi de 2,80 cm², evidenciando a coerência do dimensionamento realizado pelo programa, que, apesar das diferentes metodologias empregadas neste exemplo, houve grande similaridade nos resultados.

Na

Tabela 3 é apresentada uma comparação dos resultados deste exemplo.

Tabela 3 - Comparação dos resultados obtidos com os de Faleiros Júnior (2010)

Faleiros Júnior	Autor
Armadura ativa (cm ²)	
2,76	2,8
Diferença: 1,4%	

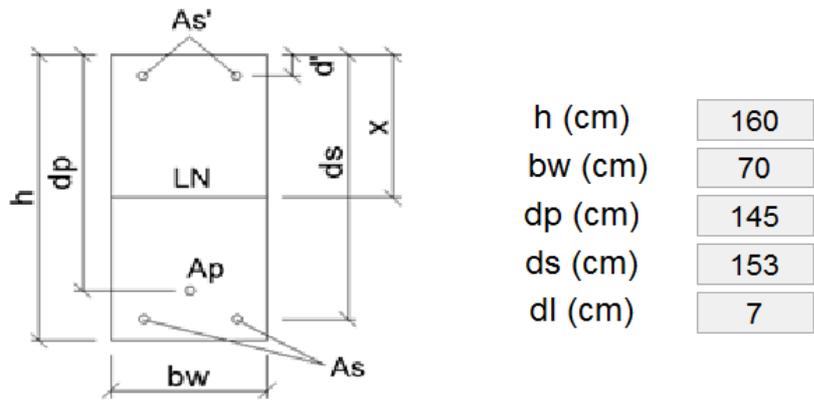
Fonte: Do Autor (2016).

5.4 Exemplo 4

Por fim, analisou-se o dimensionamento da seção executado por Cunha (2012), no qual, assim como em Faleiros Júnior (2010) a armadura ativa foi dimensionada para atender o estado-limite último para em seguida se verificar os estados-limites de serviço, ordem inversa da incorporada no programa desenvolvido.

Neste exemplo, a seção foi retangular, com as características apresentadas na Figura 31.

Figura 31 - Características geométricas - quarto exemplo.



h (cm)	160
bw (cm)	70
dp (cm)	145
ds (cm)	153
dl (cm)	7

OK

Fonte: Do Autor (2016).

Todos os demais parâmetros adotados por Cunha (2012) e que foram aplicados neste trabalho são mostrados na Figura 32.

Figura 32 - Parâmetros da protensão, ações e demais dados de entrada - quarto exemplo.

Parâmetros da protensão	Ações	Outros parâmetros
Tipo de protensão <input checked="" type="radio"/> Pós-tração <input checked="" type="radio"/> Aderente <input type="radio"/> Pré-tração <input type="radio"/> Não Aderente	Mg1 (kN.cm) <input type="text" value="354000"/> Mg2 (kN.cm) <input type="text" value="0"/> Mq1 (kN.cm) <input type="text" value="279800"/> Mq2 (kN.cm) <input type="text" value="0"/>	fck (MPa) <input type="text" value="30"/> fckj (MPa) <input type="text" value="20"/> Perda inicial (%) <input type="text" value="5"/> Perda total (%) <input type="text" value="26"/> Cobrimento (cm) <input type="text" value="3"/> Vão* (cm) <input type="text" value="0"/>
Tipo de Relaxação <input type="radio"/> Relaxação normal <input checked="" type="radio"/> Relaxação baixa <input type="radio"/> Cordoalha engraxada RB <input type="radio"/> Aços CP85/105 em barras	Psi1 <input type="text" value="0.4"/> Psi2 <input type="text" value="0.3"/> Yf,g1 <input type="text" value="1.3"/> Yf,g2 <input type="text" value="0"/>	*Vão apenas necessário se não há aderência, caso contrário pode-se adotar 0 (zero)
Nível de protensão Tipo de aço <input type="radio"/> Parcial <input type="radio"/> Liso <input checked="" type="radio"/> Limitada <input checked="" type="radio"/> Cordoalha <input type="radio"/> Completa <input type="radio"/> Dentado	Yf,q1 <input type="text" value="1.5"/> Yf,q2 <input type="text" value="0"/>	
Phi ativo (cm) <input type="text" value="1.57"/> Ep (GPa) <input type="text" value="200"/> fptk (MPa) <input type="text" value="1900"/> fpyk (MPa) <input type="text" value="1710"/> euk (%) <input type="text" value="3.5"/>		<p style="text-align: right;">OK</p>

Fonte: Do Autor (2016).

Em sequência, dimensionou-se a seção, obtendo-se os resultados apresentados na Figura 33.

Figura 33 - Resultados da seção dimensionada - quarto exemplo

Seção dimensionada:		
Área de aço ativo: 46.50 cm ²	Características Geométricas	
Área de aço passivo tracionado: 7.15 cm ²	Estádio 1	Estádio 2
Área de aço passivo comprimido: 14.35 cm ²	Área da seção: 11200.00 cm ²	Área da seção: 2996.15 cm ²
Bitola do aço passivo tracionado: 6.3 mm	Linha neutra: 80.00 cm	Linha neutra: 35.20 cm
Bitola do aço passivo comprimido: 6.3 mm	Inércia: 23893333.33 cm ⁴	Inércia: 6269470.36 cm ⁴
Força de protensão inicial: 6521 kN	Momento Resist.: 90833.24 kN.cm	
Força de protensão final: 4825 kN		
<div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 20px;"> Nova Seção Fechar </div> <div style="display: flex; justify-content: flex-end; margin-top: 5px;"> Fechar e Limpar Memória </div>		

Fonte: Do Autor (2016).

O dimensionamento realizado por Cunha (2012) resultou em uma área de aço ativo de 53,39 cm², enquanto a obtida com o método deste trabalho foi de 46,50 cm², uma diferença de 8,7%.

Na Figura 33 pode-se observar que 7,15 cm² de armadura passiva tracionada e 14,35 cm² de armadura passiva comprimida foram necessários para atendimento das exigências da ABNT NBR 6118:2014, não apenas para o estado-limite último, como também da capacidade de rotação dos elementos estruturais, sendo evidenciada esta última pela armadura comprimida dimensionada, a qual só é determinada pelo programa quando a sua ausência implicaria na relação da posição da linha neutra e da altura útil ser maior que 0,45, em desconformidade com o item 14.6.4.3 da referida norma. Cunha (2012) obteve 0,516 para esta relação, explicitando a coerência dos resultados do programa e seu alinhamento com a mais recente ABNT NBR 6118:2014.

Na Tabela 4 é apresentada uma comparação dos resultados deste exemplo.

Tabela 4 - Comparação dos resultados obtidos com os de Cunha (2012)

Cunha	Autor
Armadura ativa (cm ²)	
53,39	46,5
Diferença: 8,7%	
Relação x/d	
0,516	0,45

Fonte: Do Autor (2016).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nota-se, portanto, ser muito dispendioso o dimensionamento de seções pretendidas a mão, com várias condições a serem atendidas e diversas variáveis, requerendo, então, uma ferramenta que racionalize este processo e o torne menos trabalhoso, o que se obteve com a elaboração deste programa, ganhando-se tempo, precisão e facilitando análises de estruturas em concreto pretendido.

Teve-se, então, elaborado um trabalho o qual permite auxiliar estudantes de engenharia com interesse em estruturas com protensão, facilitando-se o estudo por meio de sua fundamentação teórica e ajudando nos cálculos com o programa desenvolvido.

Destaca-se, ainda, a elaboração do programa com o emprego de interfaces gráficas facilitadoras de sua execução, com as quais é exigido apenas um conhecimento básico de protensão, não sendo necessário, por parte do usuário, ter conhecimentos avançados na linguagem do MATLAB para a correta utilização.

Constata-se, com a validação do trabalho em exemplos constantes na literatura, a sua correção perante as exigências normativas brasileiras, além de sua eficiência em analisar diferentes situações de dimensionamento, as quais resultam em armaduras ativas, passivas de tração e passivas de compressão, conforme a necessidade.

Por fim, sugere-se para trabalhos futuros o desenvolvimento de rotinas para o cálculo das perdas de protensão e para a verificação ao cisalhamento, complementando o programa produto deste trabalho e possibilitando dimensionamentos mais completos de elementos pretendidos.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, K. **Abcic divulga levantamento sobre o desempenho da indústria de pré-fabricados de concreto em 2014**, 2015. Disponível em: <<http://construcaomercado.pini.com.br/negocios-incorporacao-construcao/negocios/abcic-divulga-levantamento-sobre-o-desempenho-da-industria-de-pre-fabricados-366279-1.aspx>>. Acesso em: 25 março 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 238 p.
- BASTOS, P. S. S. **Concreto Protendido - Notas de aula**. Bauru: Unesp, 2015. 94 p.
- BONO, G. F. F. **Sistema Computacional para Análise de Vigas em Concreto Armado e Protendido**. 134 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 1999.
- CARVALHO, R. C. **Estruturas em concreto protendido**. São Paulo: Pini, 2012. 110 p.
- CAUDURO, E. L. **Manual para a Boa Execução de Estruturas Protendidas Usando Cordoalhas de Aço Engraxadas e Plastificadas**. São Paulo: Belgo Bekaert Arames, 2002.
- CUNHA, J. F. S. **Procedimentos para cálculo e verificação de seções transversais de concreto protendido no estado limite último e de serviço para flexão normal**. 67 p. Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.
- EMERICK, A. A. **Projeto e execução de lajes protendidas**. Rio de Janeiro: Interciência, 2002. 116 p.
- FALEIROS JUNIOR, J. H. **Procedimentos de cálculo, verificação e detalhamento de armaduras longitudinais na seção transversal em elementos protendidos**. 179 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.
- HANAI, J. B. **Fundamentos do Concreto Protendido**. São Carlos: EESC: Departamento de Engenharia de Estruturas, 2005. 110 p.
- LOUREIRO, G. J. Dimensionamento à flexão de lajes e vigas protendidas no ELU. In: BUENO, S.; KIMURA, A. (coords). **ABNT NBR 6118: 2014 – Comentários e Exemplos de Aplicação**. São Paulo: Ibracon, 2015. p. 368-382.
- PELLEGRINO NETO, J.; CARDOSO, S. D. Exemplo de uma viga isostática protendida. In: BUENO, S.; KIMURA, A. (coords). **ABNT NBR 6118: 2014 – Comentários e Exemplos de Aplicação**. São Paulo: Ibracon, 2015. p. 355-367.
- PFEIL, W. **Concreto Protendido - Introdução**. 2^a. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, v. 1, 1984.