



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Metodologia prática para otimização da protensão em vigas isostáticas de pontes

Huber R. Tokunaga¹, Paulo Chaves de R. Martins², Willian Taylor M. Silva³

¹ Universidade de Brasília / Departamento de Engenharia Civil / huber.ribeiro@gmail.com

² Universidade de Brasília / Departamento de Engenharia Civil / profpaulochaves@gmail.com

³ Universidade de Brasília / Departamento de Engenharia Civil / taylor@unb.br

Resumo

O presente trabalho tem por objetivo o estudo de um método prático para otimização do processo de determinação da protensão (força e excentricidade) e a verificação dos estados limites de serviço. A complexidade natural dos processos iterativos que envolvem um projeto de estruturas protendidas torna comum a busca contínua por processos otimizados de cálculo. Nesse sentido, um processo eficiente será aquele com o menor número de iterações possível. No Brasil, a protensão é definida por métodos muito dependentes da experiência do projetista sênior. Compreende, principalmente, a definição dos cabos e verificação de tensões nas seções, repetindo o processo até que sejam alcançados os resultados esperados. Nesse contexto, o presente estudo apresentará metodologias que permitem análises gráficas. Para a definição da protensão será utilizado o conceito dos diagramas de Magnel, e para a verificação das tensões o dos fusos de passagem. Para tanto, serão utilizados projetos de vigas isostáticas protendidas de pontes ferroviárias. Ambos os métodos podem ser úteis nos processos de elaboração ou verificação de projeto, bem como em estudos teóricos, permitindo praticidade quanto a otimização da protensão e das seções protendidas.

Palavras-chave

Concreto Protendido; Diagramas de Magnel; Fusos de Passagem; Projeto de Pontes; Pontes Ferroviárias;

Introdução

Pode-se dizer que a protensão surgiu em função da baixa resistência à tração do concreto, como visto no livro de Leonhardt, (LEONHARDT, 1983), “A deficiente zona à tração do concreto fez com que, desde o início, se pensasse em colocar sob compressão as zonas tracionadas das estruturas de concreto, através de uma protensão, de tal modo que os esforços de tração tenham, em primeiro lugar, de anular estas tensões de compressão antes que surjam tensões de tração no concreto”.

Assim, a técnica de protensão consiste, basicamente, em inserir uma força de compressão que permite um campo de tensões no concreto compatível com um objetivo desejado. Em geral, tal objetivo está associado à redução ou eliminação das tensões de tração no concreto, para melhorar o funcionamento da estrutura, considerando a deficiência da resistência à tração do concreto.

Para aplicar a técnica, deve-se definir a intensidade e a posição da força de protensão na estrutura. A força é inserida por meio de alongamento aplicado em cabos de armaduras específicas, por equipamentos especiais de tensão. A definição da força depende da estática da estrutura, do processo construtivo empregado e da região onde a força é aplicada. Nesse cálculo, deve-se prever ainda as possíveis perdas de protensão. É comum que os cabos possuam o posicionamento próximo ao da linha do diagrama de momentos, que reproduz a linha de forças principais de tração na peça. Para vigas isostáticas, o sistema de forças auto equilibradas internas à estrutura não gera reações nos apoios.

Em geral, nos escritórios de cálculo estrutural no Brasil, métodos tradicionais partem de uma predefinição de cablagem, realizada a partir da experiência dos engenheiros seniores como exemplo, processos vistos em (DUARTE, 1995) e (CARVALHO, 2012). A partir dessa predefinição, as seções são adequadas por processos iterativos, pela verificação de tensões, em estado limite de serviço (ELS) e em estado limite último (ELU).

Nesse contexto, várias técnicas para cálculo de protensão foram desenvolvidas, ao longo do tempo, com o objetivo de simplificar os cálculos e otimizar as seções transversais. Dentre elas, destaca-se o método dos

diagramas de Magnel, ainda pouco difundido no Brasil, desenvolvido por um importante pesquisador de concreto protendido, o engenheiro belga Gustave Magnel (MAGNEL, 1954). Destaca-se também o método dos fusos de passagem, já mais difundido, aqui representado pela teoria apresentada pelo Frances Jacques Fauchart (FAUCHART, 1970).

Por meio do método dos diagramas de Magnel, é possível obter um conjunto de valores viáveis para a excentricidade e força de protensão em uma seção transversal definida. O método desenvolvido por Magnel foi ainda destrinchado por grandes referências em concreto protendido, como o francês Roger Lacroix (LACROIX, 1992) e o americano Antoine Naaman (NAAMAN, 2004). O fuso de passagem, por sua vez, permite verificar a adequação da força de protensão ao longo de todo o vão, além de permitir verificar das seções transversais para diferentes fases de carregamento no ELS.

Objetiva-se com este trabalho aplicar o método de Magnel, juntamente com o conceito de fuso de passagem em vigas isostáticas de pontes, para comparar (a) o dimensionamento da protensão, realizado com métodos de cálculo tradicionais (b) o dimensionamento da protensão das mesmas vigas por meio dos conceitos dos diagramas de Magnel, bem como para (c) apresentar uma análise de verificação de tensões em ELS.

1 Metodologia

1.1 Diagramas de Magnel

A definição dos diagramas tem origem no estado de tensões de uma seção transversal. Para esse estado de tensões, consideram-se os carregamentos extremos, mínimo e máximo, bem como a força de protensão aplicada.

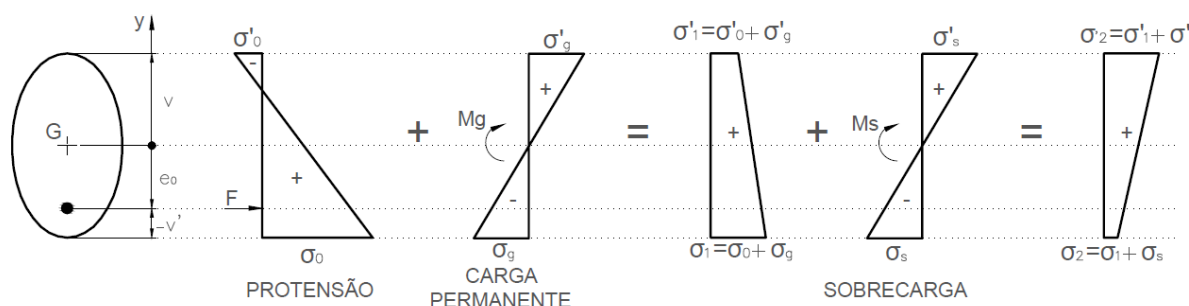
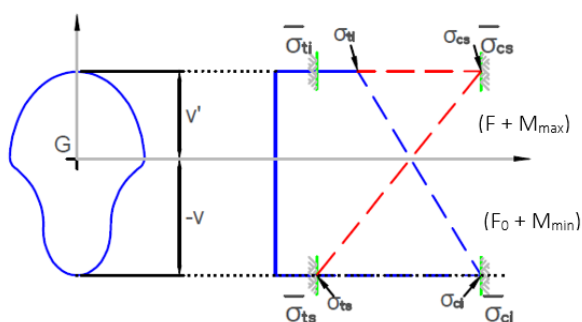


Figura 1 - Esquema de tensões para um ciclo de carregamento de estrutura protendida. Adaptado de (FAUCHART, 1970)

Assim, é possível verificar os limites de tensões que irão ocorrer nos extremos superiores e inferiores de uma seção transversal. Apresenta-se, como exemplo, para a fibra inferior, a inequação para computar as tensões, partindo da força normal aplicada, do momento resultante da força de protensão e do carregamento externo (mínimo ou máximo):

$$\sigma_{ti} = \frac{F_i}{A_c} - \frac{F_i \cdot e_0}{Z_t} + \frac{M_{min}}{Z_t} \geq \bar{\sigma}_{ti} \quad (1)$$



I	$e_0 \leq k_b + (1/F_0)(M_{min} - \bar{\sigma}_{ti} Z_t)$
II	$e_0 \leq k_t + (1/F_0)(M_{min} + \bar{\sigma}_{ci} Z_b)$
III	$e_0 \geq k_b + (1/(F \text{ or } \eta F_0))(M_{max} - \bar{\sigma}_{cs} Z_t)$
IV	$e_0 \geq k_t + (1/(F \text{ or } \eta F_0))(M_{max} + \bar{\sigma}_{ts} Z_b)$
V	$e_0 \leq e_{0\text{ mp}} = y_b - d_{c\text{ min}}$ (máxima excentricidade prática)

Figura 2 – Diagrama de tensões críticas + Inequações dos Semi-Planos (NAAMAN, 2004)

Para verificar as tensões em ambas fibras da seção, sob os carregamentos extremos, repete-se a inequação. Considerando que existem dois casos de carregamento extremos (máximo e mínimo) e que os limites de tensões ocorrem nas duas fibras (superior e inferior), surgem então quatro inequações, conforme figura 2. A força de protensão aplicada é representada por “F” e as tensões limite são representadas por “σ”. A quinta expressão refere-se ao limite geométrico máximo para a excentricidade a ser adotada. F₀ representa a força de

protensão inicial, já descontadas as perdas imediatas. Ao descontar de F_0 o coeficiente de redução (η), para estimar as perdas no tempo, obtém-se F_∞ .

Ao escrever as inequações dessa maneira, Magnel verificou que era possível plotar um gráfico em duas dimensões, no qual as inequações representariam semiplanos. No caso presente, são retas as igualdades derivadas das inequações para as variáveis escolhidas. Cada reta irá separar o plano em duas partes, uma na qual a inequação será satisfeita e outra não. Para o eixo Y foi adotada a excentricidade e_0 , e para o eixo X, a razão $1/F_0$, por simplicidade e praticidade gráfica.

As retas das quatro inequações formam um polígono, conforme Figura 3. Esse polígono pode ser interpretado como uma área de viabilidade, dentro da qual os valores de excentricidade e força satisfazem as condições de tensões representadas pelas inequações. Destaca-se que essa área pode, ainda, ser limitada pelas condições geométricas do elemento, representada pela inequação V.

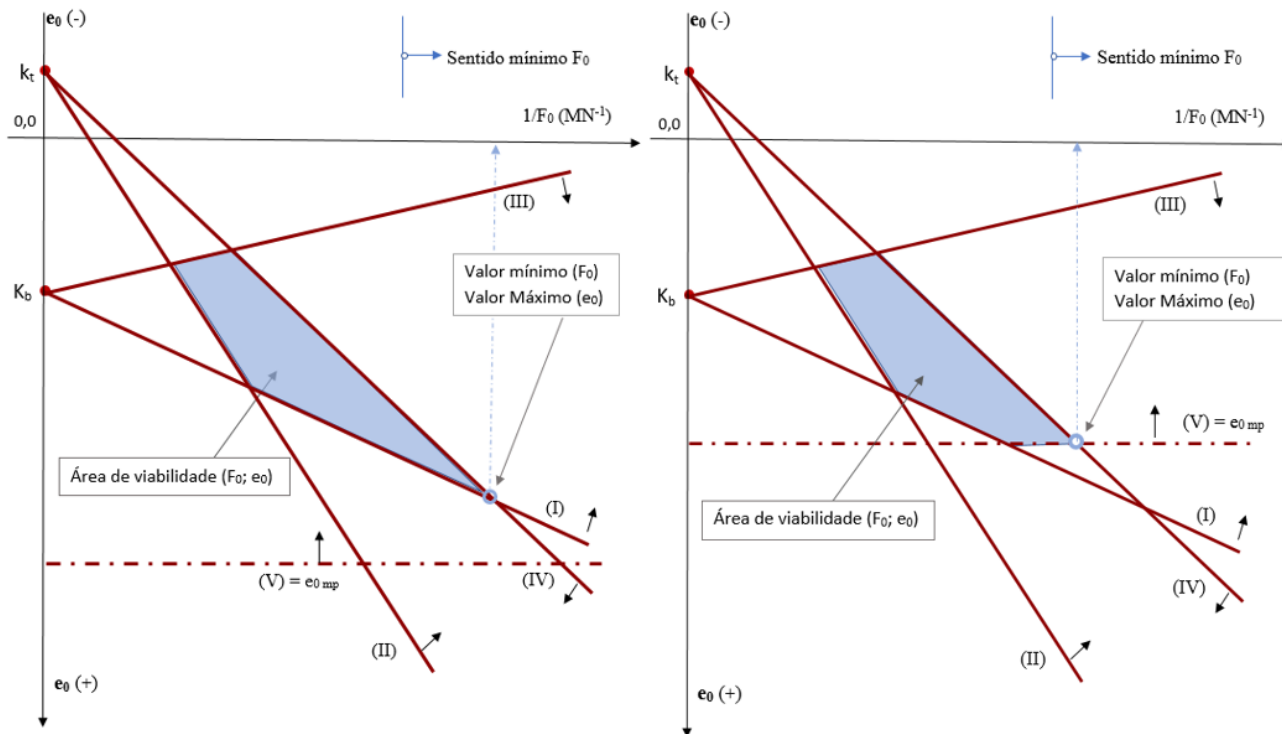


Figura 3 – Área de viabilidade formada pelas inequações com e sem restrição pela reta V

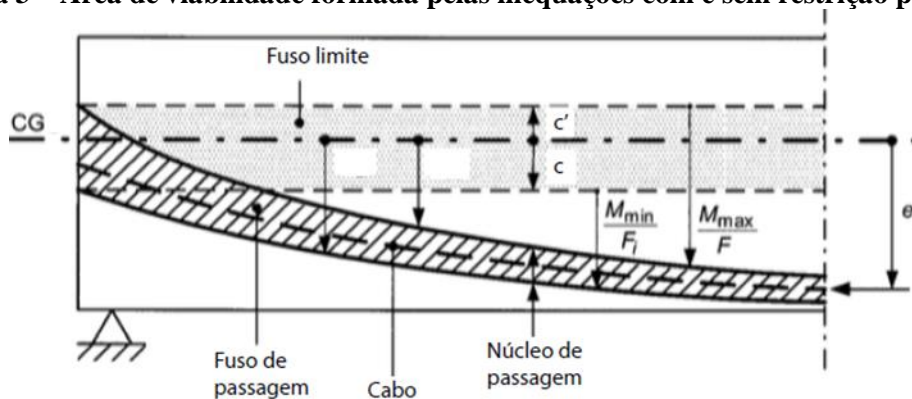


Figura 4 - Definição do Fuso de Passagem a partir do Fuso Limite. Adaptado de (NAAMAN, 2012).

Para os fusos, o cálculo é simples. Conhecido o núcleo limite, em cada seção (fuso limite ao longo do vão), pode-se determinar, a partir dos momentos mínimo e máximo, o núcleo de passagem, em cada seção, que, ao longo do vão, dará origem ao fuso de passagem. O fuso de passagem é definido como o lugar geométrico dos limites máximo e mínimo das excentricidades ao longo do vão.

$$c \leq e_c \leq c' \quad (2)$$

$$c = \min \left(k_b \left(1 - \frac{\sigma_{ti}}{\sigma_{G0}} \right); k_t \left(\frac{\sigma_{ci}}{\sigma_{G0}} - 1 \right) \right) \quad (3)$$

$$c' = \min \left(k_t \left(1 - \frac{\sigma_{cs}}{\sigma_{G\infty}} \right); k_b \left(\frac{\sigma_{ts}}{\sigma_{G0}} - 1 \right) \right) \quad (4)$$

$$\text{lim sup} = c' - \frac{M_{max}}{F_{\infty}} \quad (5)$$

$$\text{lim inf} = -c - \frac{M_{min}}{F_0} \quad (6)$$

1.2 Estudos de Caso – Vigas isostáticas de pontes

O estudo de caso trata da análise da protensão para vigas longarinas isostáticas de obras de arte especiais (OAE). Foram aplicados os conceitos apresentados na metodologia do diagrama de Magnel e dos fusos de passagem e comparados os resultados com o projeto original.

Para tanto, foram adotados projetos executivos de OAE de uma ferrovia voltada ao transporte de cargas, a Ferrovia de Integração Oeste Leste, localizada no estado da Bahia, no trecho de Ilhéus/BA até Barreiras/BA. As obras dessa ferrovia são de responsabilidade da VALEC Engenharia, Construções e Ferrovias.

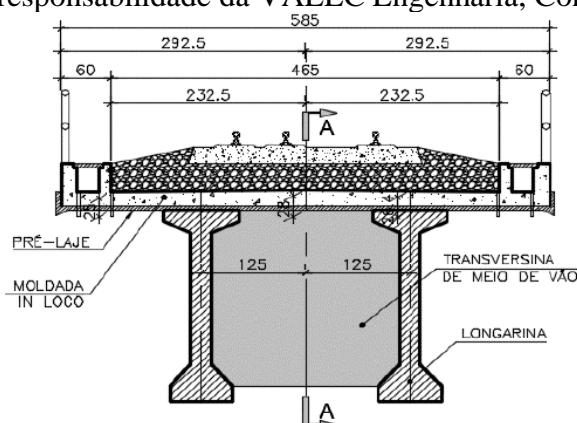


Figura 5 - Seção transversal das OAE em estudo (medidas em cm)

Foram escolhidos projetos de ponte e viaduto ferroviário de lotes diferentes de construção, elaborados em épocas distintas, por projetistas de diferentes escolas do país. Todavia, para efeito comparativo, os projetos possuem, em semelhança, a seção transversal do tabuleiro e o sistema estrutural em geral. Os projetos foram elaborados respeitando as recomendações das normas (ABNT-6118, 2014), (ABNT-7187, 2003) 7187 e usando o a definição de trem tipo dada pela (ABNT 7189, 1985).

O sistema estrutural é composto de superestrutura com vigas em concreto protendido com pelo menos um vão simplesmente apoiado. A seção transversal tem 5,85 m de largura total, comportando via permanente de 4,65 m de largura, para bitola larga (1,60 m), conforme ilustra a figura 5. A seção transversal é constituída de duas vigas em seção “I”, em concreto protendido, ligadas por transversinas nas extremidades. Sobre elas é concretada a laje do tabuleiro, em concreto armado. Para o presente trabalho, foram analisados dados de projetos para 3 tipos de vãos distintos: 35, 30 e 25m.

1.3 Premissas adotadas/calculadas

Para construção dos diagramas parte-se das seguintes premissas definidas: as características geométricas da seção, os esforços extremos, adotados para fase inicial de protensão e fase de serviço, o coeficiente de perda total, considerando perdas imediatas e diferidas, e as tensões limites de compressão e tração para as fibras inferiores e superiores, considerando cada fase de carregamento.

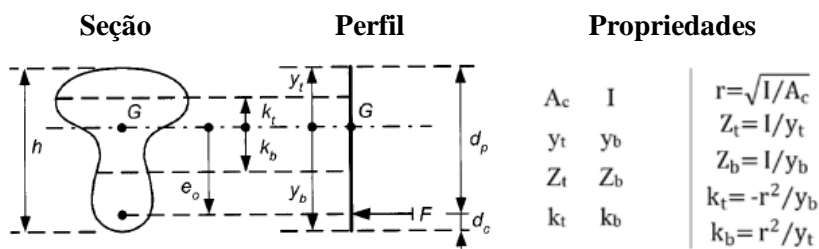


Figura 6 - Parâmetros geométricos (NAAMAN,2004) e (MARTINS, 2018) adaptados.

Foram utilizadas as características das seções transversais de cada viga, considerando a viga isolada e a viga somada à mesa colaborante da laje.

Tabela 1 – Caract. Geométricas Seção Cheia

	Vão35m	Vão 30m	Vão 25m
Ac (m ²)	1,975	1,892	1,655
I (m ⁴)	2,749	2,270	1,325
h (m)	3,00	2,8	2,35
h laj (m)	0,265	0,265	0,265
h _t (m)	3,265	3,065	2,615
y _t laj (m)	1,177	1,071	0,845
y _t (m)	0,912	0,806	0,580
y _b (m)	2,088	1,994	1,770
Z _t laj (m ³)	2,335	2,119	1,568
Z _t (m ³)	3,013	2,815	2,283
Z _b (m ³)	1,317	1,138	0,749
γ	0,566	0,562	0,535
k _t (m)	-0,667	-0,602	-0,452
k _b (m)	-0,517	-0,453	-0,311
d _c (m)	1,182	1,120	0,947

Tabela 2 - Momentos Fletores (KN.m) seção meio do vão

	Vão35m	Vão 30m	Vão 25m
peso próprio viga	4276	3018,0	1642,0
peso laje + transversinas	2637,8	2195,8	1505,5
sobrecarga permanente	4422,7	3429,9	2353,9
carga móvel	13212,7	10551,0	7575,8

Tabela 3 – Tensões limites

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
	ELS-CE	ELS-F	ELS-D
$\bar{\sigma}_{ti}$ (MPa)	-3,85	-3,21	0,00
$\bar{\sigma}_{ci}$ (MPa)	24,50	17,50	17,50
$\bar{\sigma}_{cs}$ (MPa)	24,50	17,50	17,50
$\bar{\sigma}_{ts}$ (MPa)	-3,85	-3,21	0,00

Tabela 4 - Coeficientes de perdas

	Vão35m	Vão 30m	Vão 25m
perdas instantâneas	0,078	0,067	0,082
perdas diferidas	0,201	0,168	0,193
η (perdas totais)	0,279	0,236	0,275

Foram adotados os esforços de cada projeto, porém todos discriminados nas mesmas categorias: peso próprio das vigas, peso da laje e das transversinas, peso dos equipamentos de via (lastro, dormentes, trilhos e fixações) e carga móvel. A seção em análise será a seção do meio do vão por possuir os esforços críticos.

No que se refere às combinações de carregamentos, para a situação de esforços mínimos, foi considerada a fase de ato da protensão (peso próprio + protensão) e a fase de cargas permanentes da superestrutura (restante das cargas permanentes + laje). Para os esforços máximos, foram adicionadas as cargas móveis. Os esforços obtidos estão representados na tabela 2.

As verificações foram feitas para os estados limites de serviço: compressão excessiva (ELS-CE), formação de fissura (ELS-F) e descompressão (ELS-D). Sendo que o primeiro foi adotado para fins didáticos de explicação da construção do ábaco, uma vez que são menos restritivos tanto para tração quanto para compressão. Cada estado foi identificado como Caso 1, 2 e 3, de forma respectiva. As tensões limites fixadas, são mostradas na Tabela 3. Os coeficientes de perdas, obtidos a partir dos cálculos de cada projeto, estão resumidos na Tabela 4.

Com relação aos fusos, inicialmente, no presente estudo, havia objetivo de utilizá-los apenas para validar o par F e e₀. No entanto, verificou-se também grande utilidade para a verificação de tensões no ELS. A seguir será apresentada a análises por fusos para a viga do vão de 35m.

Foram adotadas sete fases de carregamento conforme tabela 5. Foi adotada a protensão completa, conforme tabela 13.4 da NBR 6118, que estipula verificação do ELS-F (Caso 2) para combinação rara e ELS-D (Caso 3) para combinação frequente. Os valores de esforços e de limites de tensões para cada caso estão nas tabelas supracitadas 2 e 3. A protensão foi dividida em duas etapas, a primeira a ocorrer no dia 3 da concretagem da viga e a segunda no dia 10. As resistências do concreto para cada data constam da tabela 7.

Tabela 5 – Fases de protensão

Fase	Carregamento
Fase 1	Peso próprio viga isolada + 1ª etapa de protensão
Fase 2	Fase 1 + 2ª etapa de protensão
Fase 3	Fase 2 + peso próprio lajes e transversinas
Fase 4	Fase 3 + sobrecarga permanente
Fase 5	Fase 4 + carga móvel
Fase 6	Fase 4 + perdas diferidas
Fase 7	Fase 6 + carga móvel

Tabela 6 – Etapas de protensão

	1ª etapa	2ª etapa
F ₀ (KN)	6118,7	12237,4
F _∞ (KN)	4785,5	9570,9

Tabela 7 – Tensões limites por data

t (dias)	$\bar{\sigma}_t$ (MPa)	$\bar{\sigma}_c$ (MPa)
3	2,93 (1,2fctm)	16,24 (0,7fcj)
10	3,52 (1,2fctm)	21,41 (0,7fcj)
28	3,21 (fctm)	17,50 (0,5fcj)

Análise de tensões no ELS, costuma ser trabalhosa e envolve diversas condições de cálculo. Deve-se verificar as tensões para cada bordo (inferior, superior e superior da laje colaborante); para cada estado limite (diferentes limites de tensão e combinações de carregamento), para cada fase de carregamento (diferentes esforços externos, diferentes idades do concreto, diferentes áreas de seção transversal e diferentes esforços de protensão, considerando a divisão em etapas e também as perdas). Cada verificação para tantas variáveis deve ser repetida para um mínimo de seções transversais, a cada décimo do vão.

Uma das grandes vantagens do fuso é poder representar uma envoltória de condições específicas. A princípio, pode-se traçar um fuso para cada uma das condições descritas. No entanto, o excesso de linhas tornaria a análise pouco prática. Então, é importante definir critérios para traçar os fusos, de forma eficiente.

Para o presente estudo, como critério para definição dos fusos foram adotadas as necessidades de avaliar diferenças de tensões: pelas etapas construtivas, pela idade do concreto, pelas forças de protensão (etapas e perdas) e pela variação de carregamentos. Foram então definidos os três fusos básicos, conforme tabela 8:

Tabela 8 – Critérios por fusos definidos

Fuso - Fase 1	Fuso - Fase 2 e 1-A	Fuso - Fase 3 a 7
Área da seção da viga	Área da seção da viga	Área da seção da viga + laje
Protensão 1ª Etapa	Protensão 2ª Etapa	Protensão 2ª Etapa com e sem perdas
Idade inicial (3 dias)	Idade média (10 dias)	Idade longa (> 28 dias)
Peso próprio viga	Peso próprio viga e/ou laje e transversinas	Variação de carregamentos (peso próprio a carga móvel)

2 Resultados e Discussões

A partir das premissas estabelecidas, foram traçados os diagramas de Magnel para cada OAE, aqui representadas pelos diferentes vãos de 35m, 30m e 25m. Por simplicidade e economia de espaço, a análise por fusos foi realizada apenas para o vão de 35m.

Para os diagramas de Magnel, conforme indicado na metodologia, no eixo Y está representada a excentricidade e_0 (m) enquanto o eixo X a razão $1/F_0$ multiplicada por $10E-6$. Cada reta traçada representa uma das inequações da figura 2. A reta V, que representa o limite geométrico, se destaca por ter o valor constante de e_0 . Os domínios de valores viáveis para o par F e e_0 , considerando as condições de contorno e premissas estabelecidas, estão representados pelas áreas hachuradas.

Numa análise expedita, pode se dizer que, caso os valores do par F e e_0 , do projeto de referência, estejam inseridos nas áreas hachuradas, a escolha da protensão respeitou os limites de tensões preestabelecidos, para a seção definida, nas fibras inferior e superior, para as fases extremas de carregamento adotadas.

Os diagramas estão apresentados na figura 7, para as 3 vigas, para os 3 casos de análises definidos. Considerando que a principal diferença entre cada caso são os limites de tensão, pode-se observar, pelos diagramas, os efeitos da restrição de tensões. Do caso 1 para o caso 3, os limites ficam mais restritos, conforme tabela 3, assim, a área de viabilidade reduz-se progressivamente, sendo maior para o caso 1, menor para o caso 2, e muito reduzida ou inexistente para o caso 3. Isso significa que menor será a quantidade de opções de valores para o par F e e_0 , considerando as demais premissas não alteradas.

Com relação ao caso 3, observa-se uma área muito restrita para a Viga de 30m, enquanto para as vigas de 35m e 25m a área é inexistente. Para a Viga de 30m, isso mostra que há uma pequena combinação de valores para o par F e e_0 para satisfazer as condições de contorno do projeto. Já para as vigas de 35m e 25m, não foi possível, então, uma solução de protensão, considerando os limites de tensão e as demais premissas.

De qualquer forma, no caso 3, para as três vigas, a forma muito restrita do diagrama é um indicativo de necessidade de revisão e adequação de algumas premissas, como características geométricas ou de limites de tensão, para otimizar o projeto como na viga 30m ou para viabilizar o projeto como nas demais.

Para fins de otimização, os diagramas podem fornecer o ponto de mínima força de protensão possível a ser adotada, de forma que os limites de tensão não sejam extrapolados. Em geral tal ponto é dado pelo encontro das retas I e IV. Todavia, deve-se verificar se a excentricidade associada a essa protensão mínima é fisicamente possível na prática. Para tanto, verifica-se a compatibilidade com a reta V.

No presente estudo, para todas vigas analisadas, a área de viabilidade está limitada pela reta V, com exceção da Viga 30m para o caso 3, que possui o encontro das retas I e IV acima da reta V. Em geral, a limitação geométrica foi fator preponderante. A força mínima de protensão (F_0) necessária é obtida, então, cujo valor surge na abscissa.

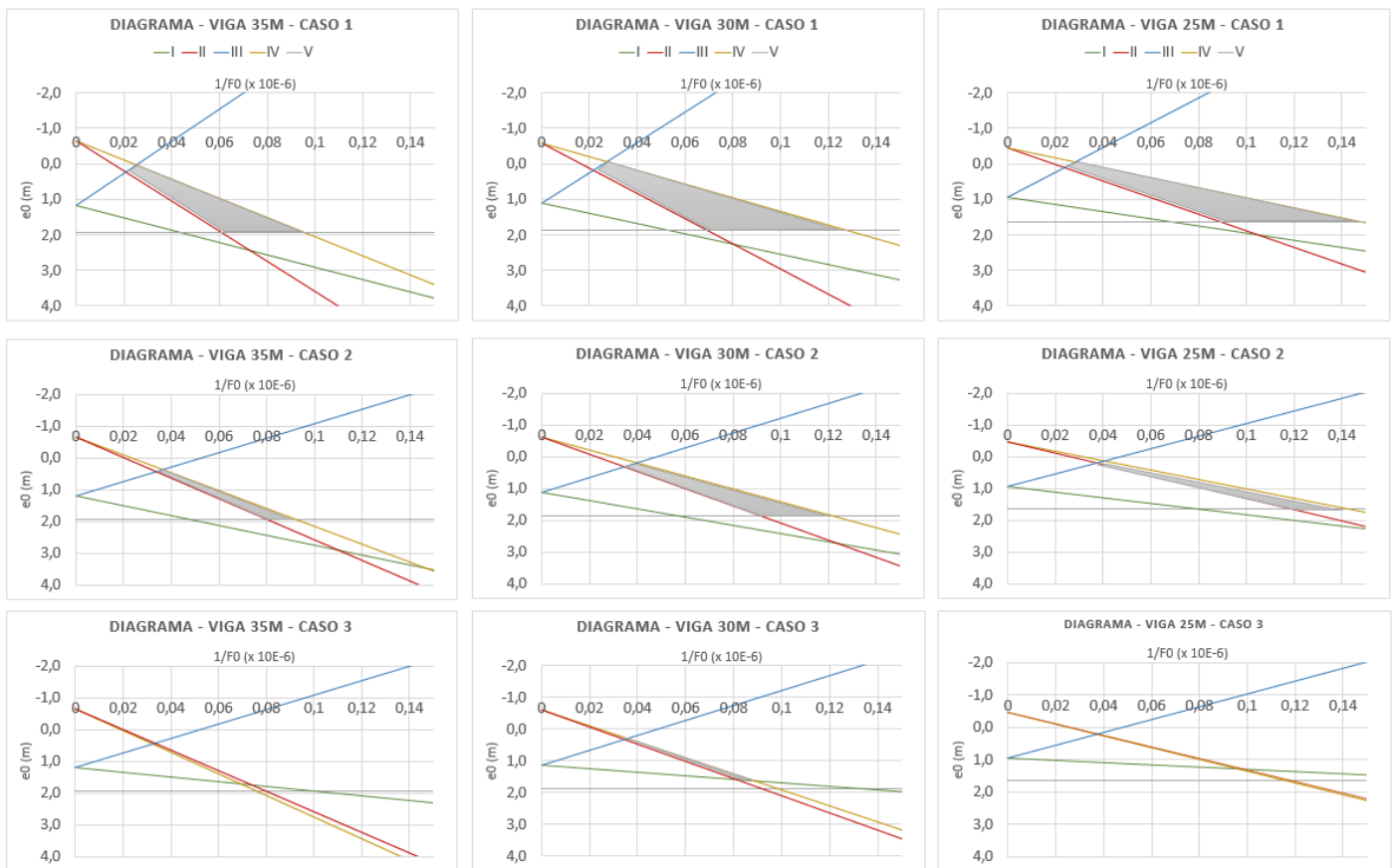


Figura 7 - Diagramas de Magnel

Os valores obtidos de força de protensão mínima são apresentados na tabela 5. Ressalta-se que as forças F_0 incluem as perdas imediatas. Já as soluções de protensão adotadas em cada projeto de referência estão representadas na tabela 6.

Tabela 5 - Força de protensão mínima pelos Diagramas de Magnel

		Vão35m	Vão 30m	Vão 25m
Caso 1	$1/F_0$ (MN)	0,096	0,128	0,149
	F_0 (KN)	10371,1	7825,4	6689,8
Caso 2	$1/F_0$ (MN)	0,092	0,122	0,143
	F_0 (KN)	10821,2	8211,6	7005,4
Caso 3	$1/F_0$ (MN)	0,068	0,087	0,094
	F_0 (KN)	14672,0	1155,9	10642,5

Tabela 6 - Protensão adotada pelos projetos executivos (Cabo de 12 cordoalhas de 12,7mm)

	Vão 35m	Vão 30m	Vão 25m
Quantidade cabos	8	6	5
$F_{max}/cabo$ (KN)	1660,0	1660,0	1660,0
F_i (KN)	13280	9960	8300
F_0 (KN)	12244,2	9291,7	7616,1

Ao comparar os valores obtidos pelos diagramas de Magnel com projetos de referência, verifica-se que o par F e e_0 do projeto original está inserido dentro das áreas de viabilidade, para os casos 1 e 2, o que demonstra atendimento a todas as premissas preestabelecidas. Em outras palavras, significa que as soluções de força de protensão e excentricidade respeitam os limites de tensão para os casos de carregamento dados.

No que se refere ao caso 3, verifica-se que, para todas as vigas, a força mínima obtida pelo diagrama é superior àquela adotada pelo projeto. Isso significa que os limites de tensão estipulado para o Caso 3 foram mais restritivos que os estipulados para o projeto. Pode-se dizer, então, que o projeto original não foi realizado para o estado limite de serviço de descompressão (ELS-D).

Ressalta-se, que para as vigas de 35m e 25m, os limites de tensão foram tão restritivos que, para além da questão da força mínima superior à de projeto, não haveria solução possível, mantidos os demais parâmetros.

Os diagramas permitem ainda uma análise com foco em otimização. Dada uma condição de tensão pode-se otimizar a escolha da protensão. Como exemplo, considerando um caso único de tensões, refletido pelas condições do caso 1, observa-se que a protensão adotada pelos projetistas possui valores superiores ao mínimo fornecido pelo diagrama. Pode-se inferir que o projetista estaria agindo de modo conservador.

Dessa forma, a seção transversal e a protensão poderiam ser otimizadas. No caso da Viga de 35m, 7 cabos de mesmo tipo poderiam ser suficientes para proporcionar a protensão necessária com segurança. No entanto,

deve-se notar que, em alguns casos, a adoção da força mínima calculada de forma exata não pode ser traduzida em número de cabos e cordoalhas disponíveis no mercado.

Uma vez definida a protensão mínima para a seção crítica, deve-se verificar as condições de tensão para as outras seções do vão. Como indicado na metodologia, para o presente estudo, optou-se por utilizar o conceito dos fusos de passagem. Em uma análise tradicional, conforme descrito nas premissas, deve-se ser verificar inúmeras condições que podem impactar nas tensões de uma seção.

Normalmente, essa análise é feita por tabelas extensas ao longo de uma memória de cálculo. Deve ser realizado um trabalho cuidadoso para que todas tensões estejam dentro dos limites. Na tabela 8 são apresentadas as tensões para cada bordo e para cada fase de carregamento, para a seção do meio do vão (S5). Foram adotadas a força e excentricidade de projeto. Os valores sublinhados são os não passantes conforme limites estipulados para o caso 2, ELS-F. Essa será denominada solução 1.

Na análise tradicional, deve-se elaborar uma tabela dessas para, no mínimo, cada décimo do vão. No entanto, deve-se ressaltar que ao tentar equalizar as tensões numa seção pode haver interferências em outras. Ao propor uma solução de alteamento de cabo, por exemplo, deve-se refazer todas as tabelas e analisar cada célula novamente. A análise por fusos tenta otimizar esse processo. São apresentados os três fusos para a vão de 35m, para o caso 2, solução 1, na figura 8.

Para os fusos de passagem, o eixo X representa o comprimento da viga, enquanto o eixo Y representa a distância para o C.G. (centro de gravidade da viga). Estão representadas também, em linhas pontilhadas, as fibras superiores e inferiores da viga, bem como a fibra superior da laje. As curvas em azul e amarelo representam os limites mecânicos superior e inferior da região onde o cabo poderia ser alocado, sem desrespeitar os limites de tensão. Para efeitos comparativos e fácil visualização, obteve-se uma posição geométrica para representar os cabos da viga, chamada de cabo representante ou resultante.

O cabo representante fora do fuso indica desrespeito as tensões limites. Fica visível que as fases iniciais possuem os valores extrapolados, principalmente a fase 2, em coerência com os valores da tabela 8.

Fica evidente, também, a vantagem de visualizar todas as seções de uma só vez, sem depender somente das consultas à várias tabelas. Uma outra vantagem a destacar é ao aplicar uma solução para uma seção, é possível ver o impacto em todas as outras seções de forma rápida.

Para as tensões que extrapolam os limites, devem ser buscadas soluções que, de preferência, tenham menor impacto em custo. Nesse sentido, como solução foram adotados, então: o retardamento da protensão na primeira etapa (fase 1) de 3 para 5 dias, para maior ganho de resistência pelo concreto; o alteamento do cabo representante em 2,4cm, para redução da tensão no bordo superior; e a adequação da fase 2 para que a 2ª etapa de protensão ocorra após a concretagem da laje. A seção da laje ajuda no equilíbrio das altas tensões que aparecem em função da protensão. A fase F2 foi então substituída pela fase F1-A, para verificar as tensões na viga em função da carga da laje. Essa foi nomeada solução 2.

Tabela 8 – Tensões por fase de carregamento (MPa) - seção S5

	Solução 1 (proposta ELS-F)							Solução 2 (proposta ELS-F e ELS-D)						
data	3	10	28	>28	>28	>28	>28	5	5	6	>28	>28	>28	>28
fase	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F1	F1-A	F3	F4	F5	F6	F7
σ_{srlaj}	0,00	0,00	-0,60	1,29	6,95	2,07	7,72	0,00	0,00	-0,48	1,41	7,07	2,16	7,82
σ_{sr}	<u>-3,27</u>	<u>-11,57</u>	0,93	2,39	6,78	2,69	7,07	↓-3,10	↓-0,001	1,02	2,49	6,87	2,77	7,15
σ_i	12,54	<u>29,56</u>	<u>18,26</u>	14,90	4,87	9,78	-0,26	12,39	↓9,63	↓18,04	14,68	4,64	9,60	↑-0,43

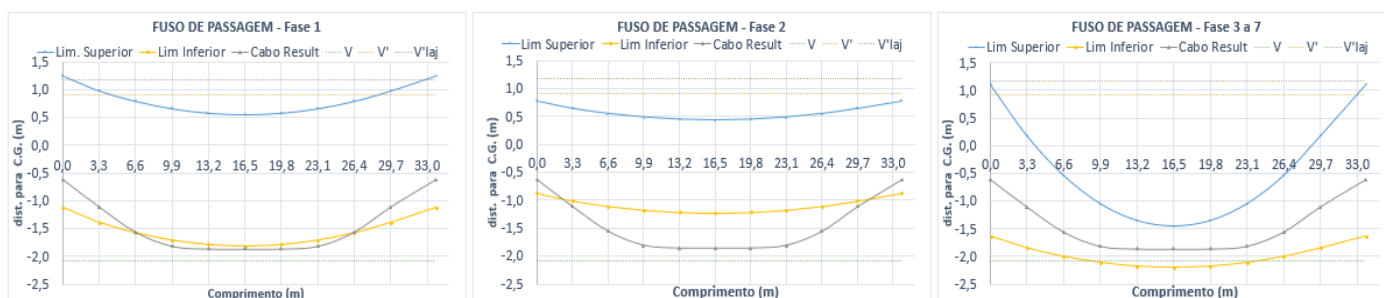


Figura 8 – Fusos Solução 1 (proposta ELS-F)

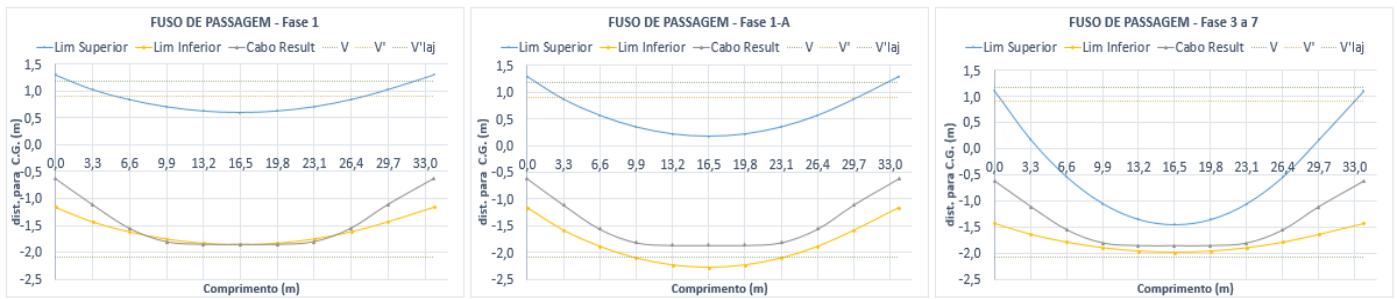


Figura 9 – Fusos Solução 2 (proposta ELS-F)

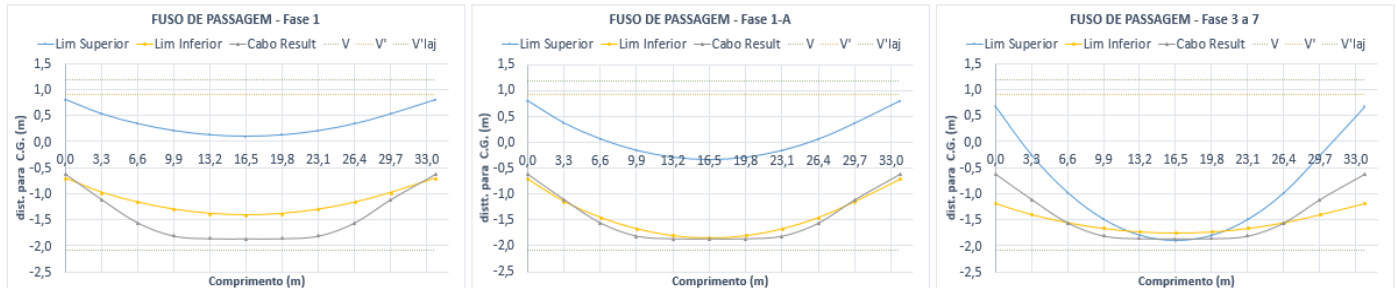


Figura 10 – Fusos Solução 2 (proposta ELS-D)

Foi então analisada solução 2 para o ELS-D, no qual o limite para tração é nulo, conforme tabela 2. As tensões são as mesmas da tabela 8 anterior. Para solucionar as tensões não passantes das fases 1 e 3 restaria a opção de altear os cabos, porém isso geraria uma perda do efeito de protensão desejável na fase F7. Uma solução comum é assumir que as fases 1 a 3 são transitórias, considerando que as tensões não extrapolam limites de fissuração e que elas tendem a desaparecer à medida que as fases avançam, ou seja, que as demais cargas são inseridas na estrutura. Assim, a partir da fase F4 as tensões já estão dentro dos limites. É necessária apenas adequação da F7. No entanto, essa é uma solução com risco alto, caso qualquer uma das fases atrase muito mais que o previsto. A estrutura pode ficar submetida a tensões acima do limite por tempos indeterminados, o que pode ser muito comum em obras públicas.

Para solucionar a fase 7, poderia ser aumentada a força inicial de protensão F_0 , porém isso reverteria todos efeitos positivos obtidos pela mudança da solução 1 para solução 2. Resta então aumentar a seção transversal (W_i). Verifica-se que, para o caso ELS-D, alterações mais robustas começam a ser necessárias. Isso mostra que o projeto não foi dimensionado para esse estado.

Os fusos desenhados para esse estado limite, na fase 1, mostram o cabo representante muito distante da zona adequada, o que representa as diferenças dos valores da tabela com o limite nulo para tração. Além disso, em geral o cruzamento das linhas, no fuso fase 3 a 7, demonstra que não há solução possível de traçado ao longo do vão, considerando as premissas adotadas. É um bom indicativo de necessidade de ajuste da seção transversal. O que mostra consonância com as análises pelos diagramas de Magnel, para o caso 3.

É possível observar pelos fusos o efeito da restrição de tensões para cada caso. No fuso fases 3 a 7, observa-se, na região próxima ao meio do vão, que a área entre os limites se reduz a cada caso. O que, também em acordo com os diagramas, demonstra que menores são as opções de excentricidade para o cabo resultante.

Ressalta-se, também, que os limites do fuso, em amarelo e azul, obtidos basicamente pelos limites de tensão, representam a restrição mecânica para posicionamento dos cabos. Outra restrição a ser observada, é a geométrica, representada pelos limites físicos do elemento. É interessante notar que o limite inferior do fuso em alguns casos fica fora do limite geométrico da viga. Em teoria o cabo poderia ser alocado até esse limite, mas considerando a premissa de protensão interna, a geometria da peça é limitante. Nesses casos, diz-se que a limitação geométrica foi preponderante. Isso vai ao encontro da definição da reta V do diagrama de Magnel que demonstrava o limite físico preponderante para a maioria dos casos.

3 Conclusão

Pelo exposto, verifica-se que o comparativo do método dos diagramas de Magnel, associado aos conceitos de fusos de passagem, com os projetos originais, elaborados por métodos tradicionais, indicou que as soluções de protensão estão condizentes. Tanto a força de protensão total, como a quantidade de cabos e as excentricidades puderam ser associadas à solução original. Isso demonstra que o emprego dos métodos, por

se tratar de um procedimento simples, é uma poderosa ferramenta, principalmente para a verificação de projetos e para pré-dimensionamentos.

Para além da análise comparativa de valores, ao realizar as análises, foram identificados inúmeros outros benefícios pelo uso dos diagramas, associados principalmente à possibilidade de verificação e otimização. É possível analisar a variação dos diversos parâmetros de cálculo correlacionados, de forma prática por meio de uma visualização gráfica. Podem ser obtidas inúmeras ações para verificação e otimização de projeto. No presente trabalho, duas ações se destacaram:

1. A partir de um projeto dado, com definições da seção transversal, força de protensão e excentricidade, pode-se desenhar as retas para verificar se os valores F e e_0 para protensão respeitam as condições de contorno. De posse do diagrama, a análise fica simples, os pontos F e e_0 inseridos na área de viabilidade demonstram que as condições de tensão foram respeitadas, não havendo necessidade de verificar as tensões por meio de cálculos extras.

2. Dada uma seção transversal, pode-se verificar qual a menor força de protensão e respectiva excentricidade que satisfazem às condições de tensão, otimizando o projeto. Verifica-se que a menor força de protensão é dada pelo encontro das retas I e IV, ou também pela limitação geométrica, reta V. Além dessas, outras soluções e análises podem ser obtidas, como por exemplo:

1. A partir de uma excentricidade fixada, e_0 , para o cabo resultante de uma viga, pode-se determinar uma faixa de valores viáveis para a força de protensão. Isso pode ser útil para achar uma faixa de carregamentos acidentais (máximos e mínimos) que podem ser suportados por uma viga em estudo. Como por exemplo ao determinar um carregamento móvel máximo para uma ponte.

2. Da mesma forma, partindo de uma força de protensão fixada, F , pode-se determinar uma faixa de valores viáveis para a excentricidade. Isso pode ser útil para uma viga contínua, na qual aplica-se a mesma força de protensão para seções diferentes, (meio do vão e apoio).

3. As inequações podem ainda ser usadas para otimizar propriedades da seção transversal. A partir de uma condição de carregamento máximo, caso as tensões de tração e compressão de serviço não atinjam os respectivos limites, os módulos resistentes Z_t e Z_b podem estar maiores que o necessário.

Ademais, a associação do diagrama de Magnel com os conceitos de fuso de passagem permite a extensão da análise de uma seção para o vão completo. Torna-se prática a visualização da variação de parâmetros de cálculo refletida na região de posições viáveis para o cabo resultante. Além disso, os fusos se mostraram como ótima ferramenta gráfica para a verificação das tensões nos estados limites de serviço. É possível verificar a adequação do posicionamento do cabo de protensão ao longo de toda a viga de forma prática, considerando o efeito de uma solução proposta em cada seção ou fase.

A versatilidade na manipulação de dados associada a visualização gráfica permite uma ferramenta de cálculo e verificação de projeto muito poderosa. Principalmente quando associada a fins de otimização.

Por fim, os métodos apresentados de forma associada, principalmente pela aplicação na forma gráfica, apresentam evidentes vantagens nos processos de pré-dimensionamento e dimensionamento de estruturas, na verificação e otimização de projetos, bem como no campo da didática do ensino do cálculo da protensão.

Referências

LEONHARDT, F. Construções de Concreto. Tradução de João Luís Escosteguy Merino. Rio de Janeiro:

Interciência, v. 5: Concreto Protendido, 1983.

MAGNEL, G., Prestressed concrete, 3rd Ed. London: Concrete Publications Ltd, 1954.

CARVALHO, R. C. (2012). Estruturas em Concreto Protendido. (PINI, Ed.) São Paulo.

DUARTE, E. P. Projeto e Cálculo de uma viga isostática de concreto protendido. RJ, Brasil. MAC Protensão / Belgo Mineira, 1995. (Não publicado).

LACROIX, R., CHAUSSIN, R. La Précontrainte. École Nationale des Ponts e Chaussées, 1992.

NAAMAN, ANTOINE E. Prestressed concrete analysis and design: fundamentals. 2. ed. Ann Arbor: Techno Press 3000, 2004.

MARTINS, PAULO CHAVES DE REZENDE. Curso de concreto protendido. Brasília: UnB, 2018. Apostila (não publicado).

JACQUES FAUCHART - Beton Précontraint, 1971, (Não publicado)

ABNT NBR 6118:2014 projeto de estruturas de concreto: procedimento.

ABNT. NBR 7189:1985 Cargas móveis para projeto estrutural de obras ferroviárias

ABNT. NBR 7187:2003 Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido-procedimento.