

Metodologia prática para determinação de cablagem em vigas de pontes isostáticas

Huber R. Tokunaga¹, Paulo C. de R. Martins², Willian T. M. Silva³

¹ Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília
SQSW 303, bloco C, AP 507, Sudoeste, CEP 70673-303, Brasília/DF, Brasil
huber.ribeiro@gmail.com

² Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília
Rua 9 Sul, Lote 12, Ap 901, Águas Claras, CEP 71938-360, Brasília/DF, Brasil
profpaulochaves@gmail.com

³ Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília
Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, Prédio SG-12, 1º andar, Campus Darcy Ribeiro,
Universidade de Brasília, CEP 70910-900, Brasília - DF, Brasil.
taylor@unb.br

Abstract. Structural design, in essence, involve choices and definitions among combinations of various possibilities. They become iterative processes. Thus, an efficient design process will be the one with the least number of iterations. In this sense, this paper aims to develop a practical methodology for determining the tendons in prestressed bridge beams. In general, in Brazil, the tendons are defined by methods based on iterative processes, highly dependent on the experience of the designer. Basically, the process involves the definition of tendons and section checking. If the expected results are not achieved, the process is repeated. The proposed methodology will include the determination of the tendons using Magnel diagrams and the definition of the feasible domain, as well the definition of the limit zone for the prestressing steel, considering isostatic structures. This article refers only to a methodology for cases of isostatic bridges. The developed proposal can be applied in manual calculations or inserted in automated routines, in the framework of an application for practical design process as in theoretical studies.

Keywords: Prestressed concrete, Railway bridges, Magnel diagrams.

1 Introdução

A NBR 6118:2014 [1] apresenta a definição de elementos de concreto protendido como aqueles nos quais partes das armaduras são previamente alongadas por equipamentos especiais de tensão, com o intuito de, em condições de serviço, impedir ou limitar a fissuração e os deslocamentos da estrutura, assim como propiciar o melhor aproveitamento de aços de alta resistência no estado-limite último.

Assim, basicamente, a técnica de protensão consiste em inserir uma força de compressão que gere um campo de tensões no concreto compatível com um objetivo desejado, em geral, reduzindo ou eliminando as trações. Isso significa determinar a intensidade e a posição da força na estrutura, o que depende da estática da estrutura, do processo construtivo empregado e da região onde a força é aplicada. Os cabos seguem, preferencialmente, o formato 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 conforme Martins [2]. O projeto deve prever ainda as perdas da força de protensão em relação ao valor inicial aplicado pelo aparelho tensor.

Nesse contexto, várias técnicas foram desenvolvidas ao longo do tempo com o objetivo de simplificar os

cálculos e otimizar as seções transversais com a força de protensão e excentricidade do cabo. 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 [3].

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. 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).

Por sua vez, os diagramas de Magnel definem, para uma seção transversal conhecida, um domínio de valores possíveis para o par excentricidade e força de protensão em uma seção ao longo do vão. O método desenvolvido por Magnel foi ainda destrinchado e aprimorado por grandes referências em concreto protendido, como o francês Roger Lacroix [4] e o americano Antoine Naaman [5].

Objetiva-se com este trabalho realizar a comparação entre: (a) o dimensionamento da cablagem de vigas de concreto protendido, realizado com os métodos de cálculo tradicionais (b) o dimensionamento da cablagem das mesmas vigas por meio dos conceitos dos Diagramas de Magnel.

2 Metodologia

2.1 Diagramas de Magnel

A construção dos diagramas parte das condições limite de tensões nas fibras superiores e inferiores, sob os carregamentos extremos, máximos e mínimos. Tais tensões são condições de contorno prefixadas no projeto.

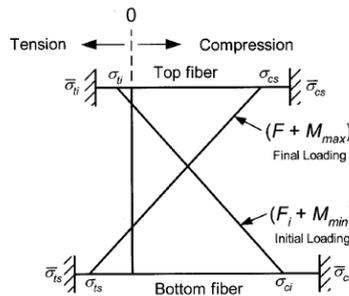


Figura 1. Diagrama de tensões crítico sob carregamentos extremos (Naaman, A.[5])

Pode-se escrever, assim, uma inequação para computar as tensões numa seção transversal, partindo da força normal aplicada, do momento resultante da força de protensão e do carregamento externo (mínimo ou máximo):

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

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 quatro inequações, conforme Fig. 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; Fi representa a força de protensão inicial, já descontadas as perdas imediatas; η é o coeficiente de redução de Fi para estimar as perdas no tempo, fornecendo F∞.

I	$e_o \leq k_b + (1 / F_i)(M_{min} - \bar{\sigma}_{ti} Z_t)$
II	$e_o \leq k_t + (1 / F_i)(M_{min} + \bar{\sigma}_{ci} Z_b)$
III	$e_o \geq k_b + [1 / (F \text{ or } \eta F_i)](M_{max} - \bar{\sigma}_{cs} Z_t)$
IV	$e_o \geq k_t + [1 / (F \text{ or } \eta F_i)](M_{max} + \bar{\sigma}_{ts} Z_b)$
V	$e_o \leq (e_o)_{mp} = y_b - (d_c)_{min} = \text{maximum practical eccentricity}$

Figura 2. Inequações dos Semi-Planos (Naaman, A.[5])

Assim, pode-se plotar um gráfico em duas dimensões das curvas definidas pelas inequações. No caso presente, são retas as igualdades derivadas das inequações para as variáveis escolhidas. Cada curva 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_o , e para o eixo X, a razão $1/F_i$, por simplicidade e praticidade gráfica.

As curvas se interceptam, formando um polígono de vértices A, B, C, D, conforme Fig. 3. Esse polígono pode ser interpretado como um domínio de viabilidade, dentro do qual os valores de excentricidade e força satisfazem as condições de tensões representadas pelas inequações.

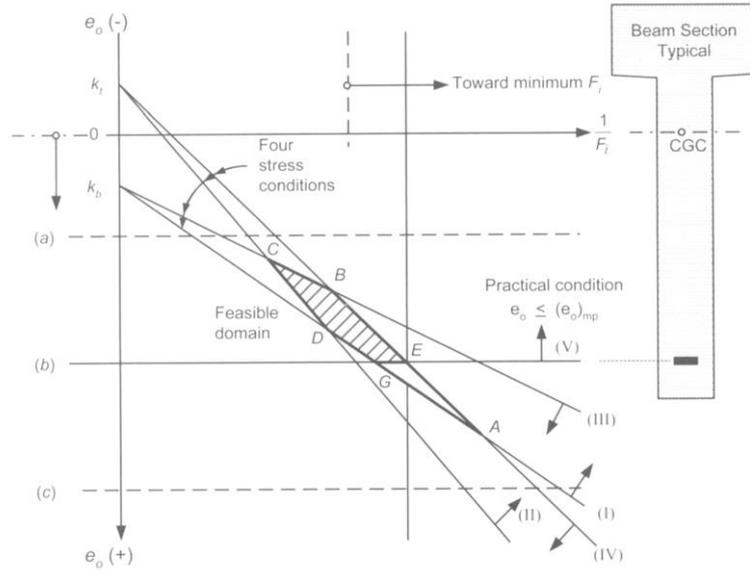


Figura 3. Domínio viável definido pelas condições de tensão dadas pelas inequações (Naaman, A.[5])

Ao determinar a força de protensão para uma seção crítica, assume-se, em primeira aproximação que seja constante para todo o vão. Em qualquer hipótese, é necessário determinar as excentricidades limite ao longo do vão, sem violar as condições de contorno de tensão. Para verificar tais excentricidades, pode-se construir o Diagrama de Magnel para cada seção ou usar as definições de fuso limite e fuso de passagem, mais práticas. O fuso limite é o lugar geométrico dos centros de pressão ao longo da viga. Os valores dos limites geométricos serão dados pelos parâmetros c e c' , que podem ser obtidos pelos limites de tensões, conforme Fig. 4, para cada seção.

$$c \leq e_c \leq c' \tag{2}$$

Conhecido o núcleo limite pode-se determinar, a partir dos momentos mínimo e máximo, o núcleo de passagem, em cada seção, que dá origem ao fuso de passagem, definido como o lugar geométrico dos limites máximo e mínimo das excentricidades ao longo do vão, conforme visto em Fauchart [6].

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

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

$$\lim \sup = c' - \frac{Mmax}{P_{\infty}}$$

$$\lim \inf = -c - \frac{Mmin}{P_0}$$

Figura 4. Limites máximos e mínimos para o fuso de passagem (Martins,P.[2])

2.2 Projetos de Pontes Ferroviárias – Estudos de Caso

Para aplicação do diagrama de Magnel, foram adotados como estudos de caso, projetos executivos de obras

de arte especiais (OAE) da Ferrovia de Integração Oeste Leste, localizada no estado da Bahia, no trecho de Ilhéus/BA até Barreiras/BA, e essencialmente voltada ao transporte de cargas. As obras dessa ferrovia são de responsabilidade da VALEC Engenharia, Construções e Ferrovias.

Foram escolhidos projetos de ponte e viaduto ferroviário de lotes diferentes de construção, elaborados em épocas distintas, por projetistas de diferentes escolas do país.

O estudo trata da análise da protensão para as vigas longarinas isostáticas das OAE. Para efeito comparativo, os projetos possuem, em semelhança, a seção transversal do tabuleiro. No entanto, para o presente trabalho, foram analisados dados de projetos para 3 tipos de vãos distintos: 35m, 30m e 25m. O sistema estrutural se constitui de superestrutura 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, para bitola larga (1,60 m), conforme ilustra a Fig. 5. Estruturalmente 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.

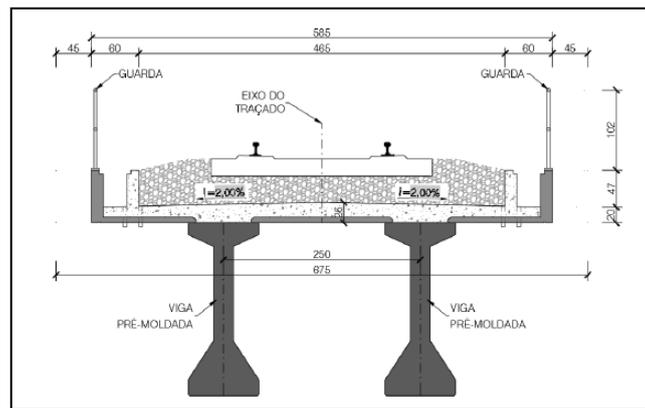


Figura 5. Seção transversal típica das OAE

2.3 Premissas adotadas/calculadas

Para construção dos diagramas são necessárias as seguintes premissas: 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. Para a elaboração dos ábacos foram utilizadas as características das seções transversais de cada viga, considerando a viga isolada e a viga somada à mesa colaborante da laje.

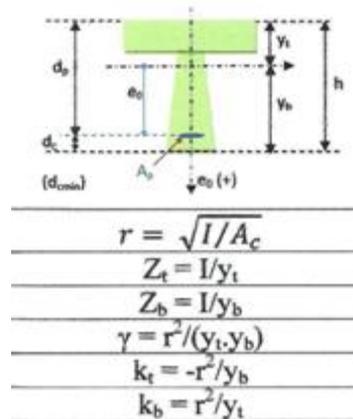


Figura 6. Parâmetros geométricos (Martins,P.[2]) adaptado.

Tabela 1. Características Geométricas Seção Cheia

	Vão 35m	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
e laj (m)	0,265	0,265	0,265
h laj (m)	3,265	3,065	2,615
Yt laj (m)	1,177	1,071	0,845
Yt (m)	0,912	0,806	0,580
Yb (m)	2,088	1,994	1,770
Zt laj (m ³)	2,335	2,119	1,568
Zt (m ³)	3,013	2,815	2,283
Zb (m ³)	1,317	1,138	0,749
γ	0,566	0,562	0,535
Kt (m)	-0,667	-0,602	-0,452
Kb (m)	-0,517	-0,453	-0,311
dc (m)	1,182	1,120	0,947

De cada projeto, foram obtidos os esforços discriminados nas seguintes categorias: peso próprio das vigas, peso da laje e das transversinas, peso dos equipamentos de via (lastro, dormentes, trilhos e fixações) e carga móvel. Foram sempre adotados os esforços para a seção do meio do vão por serem os críticos.

A viga dos projetos foi concebida para ser concretada e protendida num pátio de fabricação e ser içada para o posicionamento final. 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 do trem tipo (considerado no meio do vão). Os esforços obtidos estão representados a seguir:

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

	Vão 35m	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

As verificações foram feitas para os estados limites de serviço, de formação de fissura e de descompressão e também para o estado limite último. As tensões limites fixadas, são mostradas na Tab. 3. As perdas, obtidas a partir dos cálculos elaborados para cada projeto, estão resumidas na Tab. 4.

Tabela 3. Tensões limites

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

Tabela 4. Coeficientes de perdas

	Vão 35m	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

3 Resultados e Discussões

Os diagramas de Magnel podem ser elaborados para as diversas variações das seções ao longo do processo construtivo e para as diversas fases de carregamento. No presente documento foram apresentadas somente as curvas considerando as seções cheias e as fases mínimas e máximas, consideradas as combinações críticas de dimensionamento, o que simplifica a análise. A seguir são apresentados os Diagramas de Magnel elaborados para cada OAE, juntamente com o fuso de passagem. As retas que representam as inequações da Fig. 2 estão identificadas à direita do diagrama.

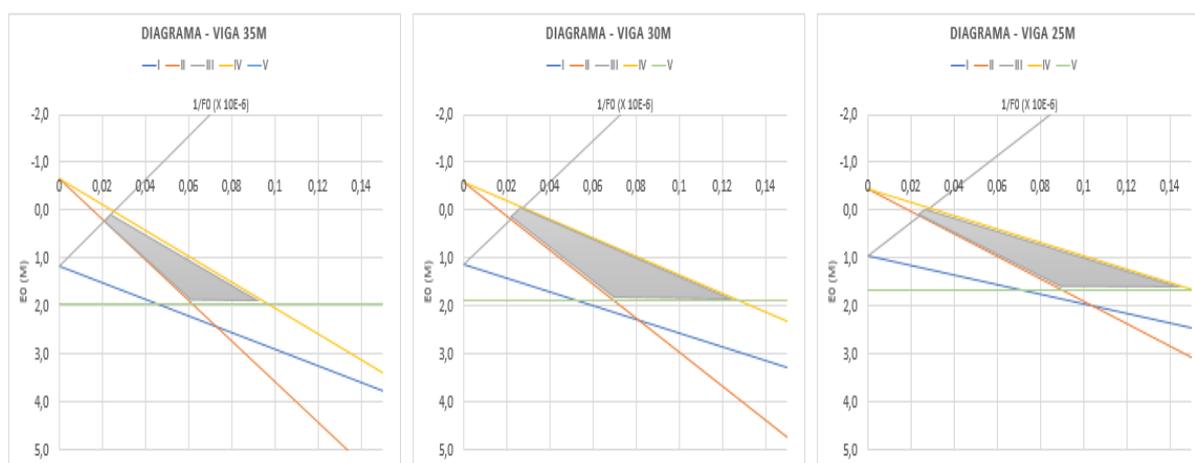


Figura 7. Diagramas de Magnel (Vigas 35m, 30m, 25m)



Figura 8. Fusos de Passagem (Vigas 35m, 30m, 25m)

A força mínima de protensão (F_0) necessária é obtida pela interseção entre as retas IV e V nos diagramas apresentados acima, cujo valor surge na abscissa de $1/F_0 \cdot 10^{-6}$. Os valores de força de protensão assim obtidos são apresentados na Tab. 5. Já as soluções de protensão adotadas para cada projeto executivos estão representadas na Tab. 6. Ressalta-se que as forças F_0 incluem as perdas imediatas.

Tabela 5. Força de protensão mínima pelos Diagramas de Magnel

	Vão 35m	Vão 30m	Vão 25m
1/F0 (MN)	0,096	0,128	0,149
F0 (KN)	10371,1	7825,4	6689,8

Tabela 6. Protensão adotada pelos projetos executivos

	Vão 35m	Vão 30m	Vão 25m
Cabo de 12 cordoalhas de 12,7mm			
Quantidade	8	6	5
Fmax/cabo(KN)	1660,0	1660,0	1660,0
F0 (KN)	12244,2	9291,7	7616,1

Verifica-se que a protensão adotada pelos projetistas possui valores superiores ao mínimo fornecido pelo diagrama. Ressalta-se que a força de protensão dada pelos encontros das retas IV e V é o mínimo a ser adotado para a seção sem que os limites de tensão sejam extrapolados. Verifica-se, assim, que os valores adotados no projeto estão dentro do polígono determinado pelos semi-planos. Em outras palavras, significa que as soluções adotadas de força de protensão e excentricidade respeitam os limites de tensão para os casos de carregamento especificados. Pode-se inferir, assim, que os projetistas agiram de modo conservador e adotaram força superior à mínima necessária. O que permitem inferir que a seção transversal e a protensão poderiam ser otimizadas. Verifica-se, ainda, que os projetistas adotaram valores próximos ao mínimo. Note-se que, em muitos casos, a adoção da força mínima calculada de forma exata não pode ser traduzida em número de cabos e cordoalhas disponíveis para protensão no mercado.

Os fusos calculados, por sua vez, mostraram-se compatíveis com os traçados de cabos adotados nos projetos. Para efeitos comparativos e fácil visualização, obteve-se uma posição geométrica para representar os cabos de cada viga, chamada de cabo representante. Na Fig. 8 pode-se verificar que o cabo representante de cada viga se encontra totalmente dentro do fuso de passagem, o que significa que as excentricidades adotadas para os cabos permitem o atendimento aos limites de tensões prefixados nas fibras superiores e inferiores ao longo de toda viga.

4 Conclusão

Os resultados obtidos podem ser considerados conclusivos, pois o comparativo com os projetos realizados pelos métodos tradicionais no Brasil indicou que as soluções de protensão obtidas com o uso do Diagrama de Magnel 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 do diagrama de Magnel, por se tratar de um procedimento simples, é uma poderosa ferramenta, principalmente para a verificação de projetos e para pré-dimensionamentos. Ademais, verifica-se que o método dos diagramas de Magnel permite outros benefícios, por sua visualização gráfica que permite a correlação entre dados de maneira prática. Uma vez elaborado o diagrama, inúmeras soluções ou análises podem ser obtidas:

1. Considerando definidas a seção transversal, a força de protensão e a excentricidade, pode-se desenhar as retas para verificar se os valores propostos, para o par F e e_0 , respeitam as condições de contorno referentes às tensões. De posse do diagrama a análise fica simples. Os pontos F e e_0 , dentro do quadrante, demonstram que as condições de tensão foram respeitadas. Não há necessidade de verificar as tensões por meio de cálculos.

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, as inequações de ligação direta com as tensões limite de tração. Ou considerando a limitação geométrica, reta V.

3. Dada uma excentricidade fixada, e_0 , para a resultante dos cabos 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 pela viga em estudo. As inequações podem ainda ser usadas para definir/otimizar propriedades da seção transversal.

Por fim, o método dos diagramas de semi-planos de Magnel pode ser aplicado em sua forma gráfica, com evidentes vantagens nos processos de pré-dimensionamento e dimensionamento de estruturas, na verificação de projetos e principalmente no campo da didática do ensino do cálculo da protensão. Pode, também, ser aplicado em sua versão numérica, com implantação simples e expedita em programas de análise e projeto, em particular de vigas de pontes e assemelhadas.

Agradecimentos. Este artigo teve apoio incondicional dos professores da Universidade de Brasília, Paulo Chaves e Willian Taylor, motivo pelo qual presto meu sincero agradecimento. Agradeço também aos colegas de mestrado que, ao longo de todos os anos, foram grande fonte de trocas de conhecimentos. Por fim, agradeço pela oportunidade a Universidade de Brasília e a VALEC Engenharia, Construções e Ferrovias.

Declaração de Autoria. Os autores confirmam que são os únicos responsáveis pela autoria deste trabalho, e que todo o material aqui incluído como parte do presente trabalho é propriedade (e autoria) dos autores, ou tem a permissão dos proprietários a serem incluídos aqui.

Referências

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118:2014 projeto de estruturas de concreto: procedimento.
- [2] Martins, Paulo Chaves de Rezende. Introdução ao curso de concreto protendido. Brasília: UnB, 2018. Apostila.
- [3] Magnel, G., Prestressed concrete, 3rd Ed. London: Concrete Publications Ltd,1954.
- [4] Lacroix, R, and A.Fuentes, le project de Béton précontraint, in French. Paris: Editions Eyrolles, 1981.
- [5] Naaman, Antoine E. Prestressed concrete analysis and design: fundamentals. 2. ed. Ann Arbor: Techno Press 3000, 2004.
- [6] Jacques Fauchart - Beton Precontraint,1971