

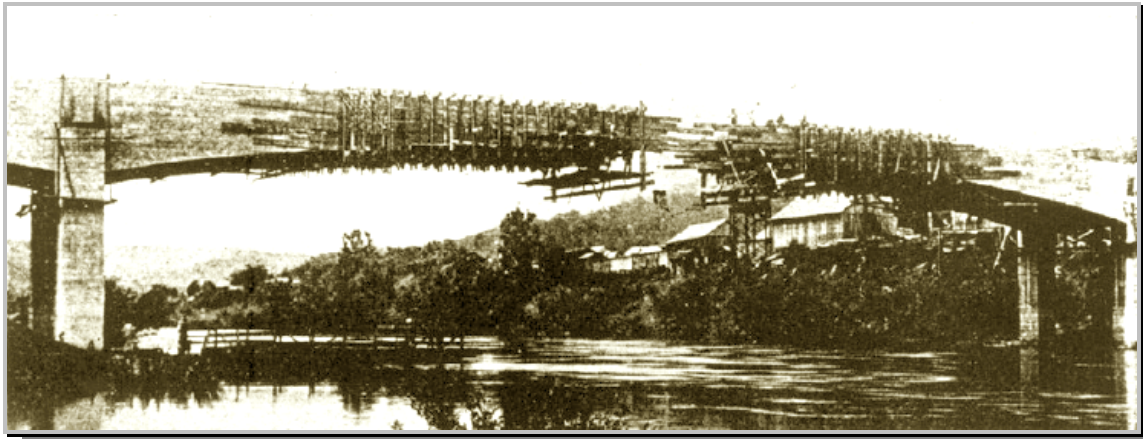


Pontes construídas em balanços sucessivos

Primeira Ponte de Concreto Armado, em balanços sucessivos, no mundo.

Eng. Emilio Baumgart –1930

Ponte sobre o Rio do Peixe – Santa Catarina / Rio Grande do Sul.



Fase de construção : Quase fechando o vão central

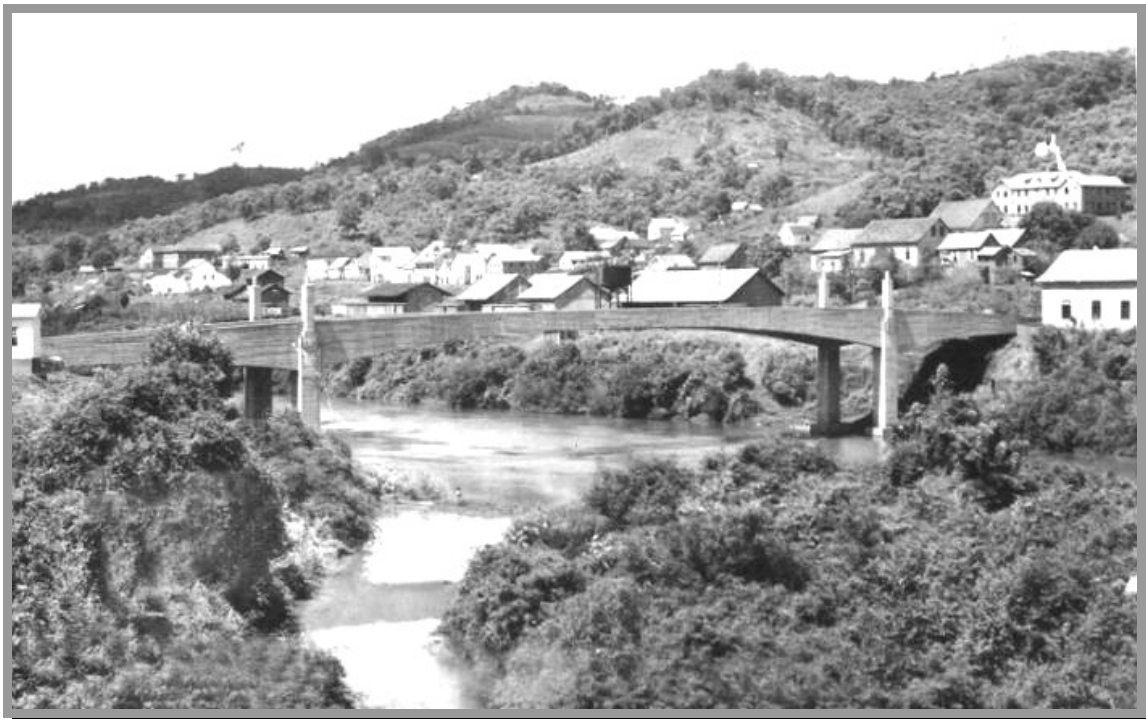
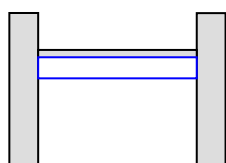


Figura 1 - Ponte pronta.



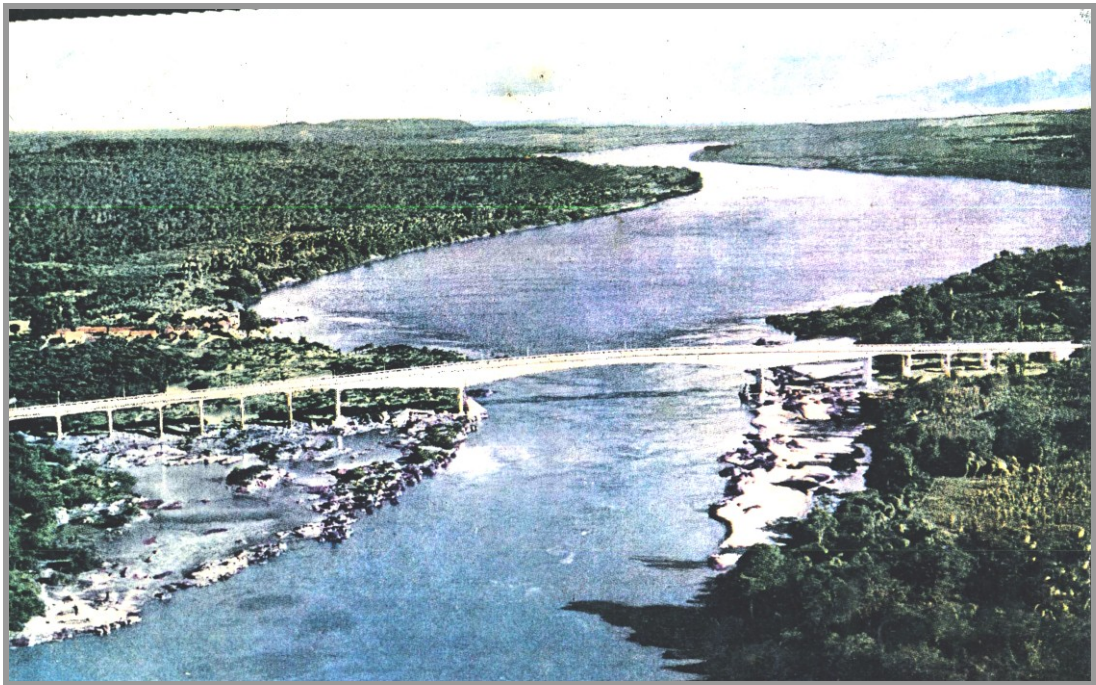
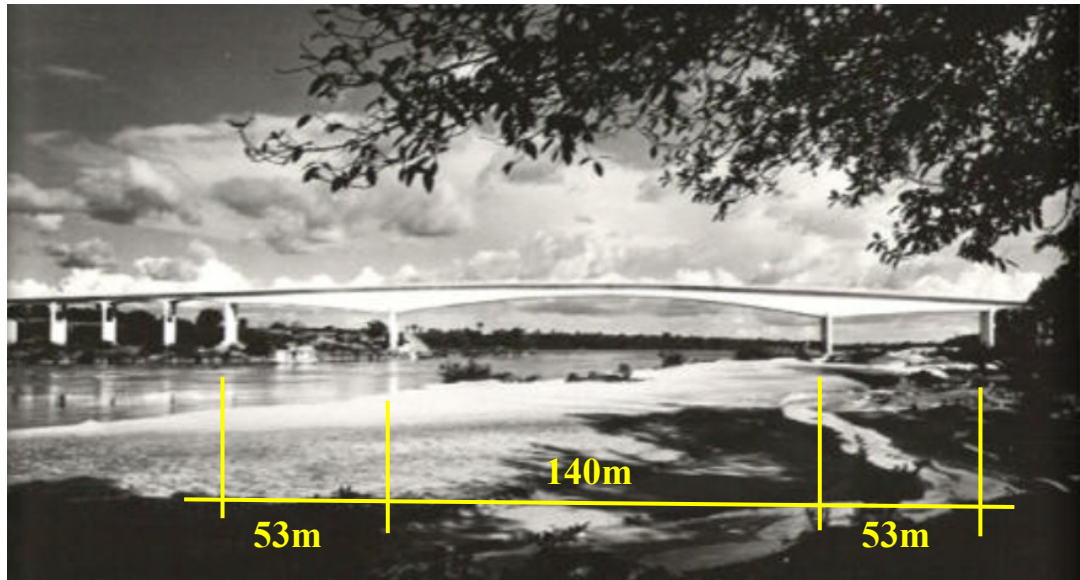
Seção transversal

Vão central = 68m ; Comprimento Total =120m
Ver descrição detalhada na página sobre o
Eng. Emilio Baumgart.



Tabuleiro Celular

Pontes em concreto protendido, construídas em balanços sucessivos.



**Figura 2a - Ponte sobre o rio Tocantins em Estreito
Rodovia Belém-Brasília – Divisa Maranhão / Goiás
Vão central = 140m , o maior vão do mundo na época - 1960 / 1961**

Projeto e construção:
Dr. Eng. Sérgio Marques de Souza.

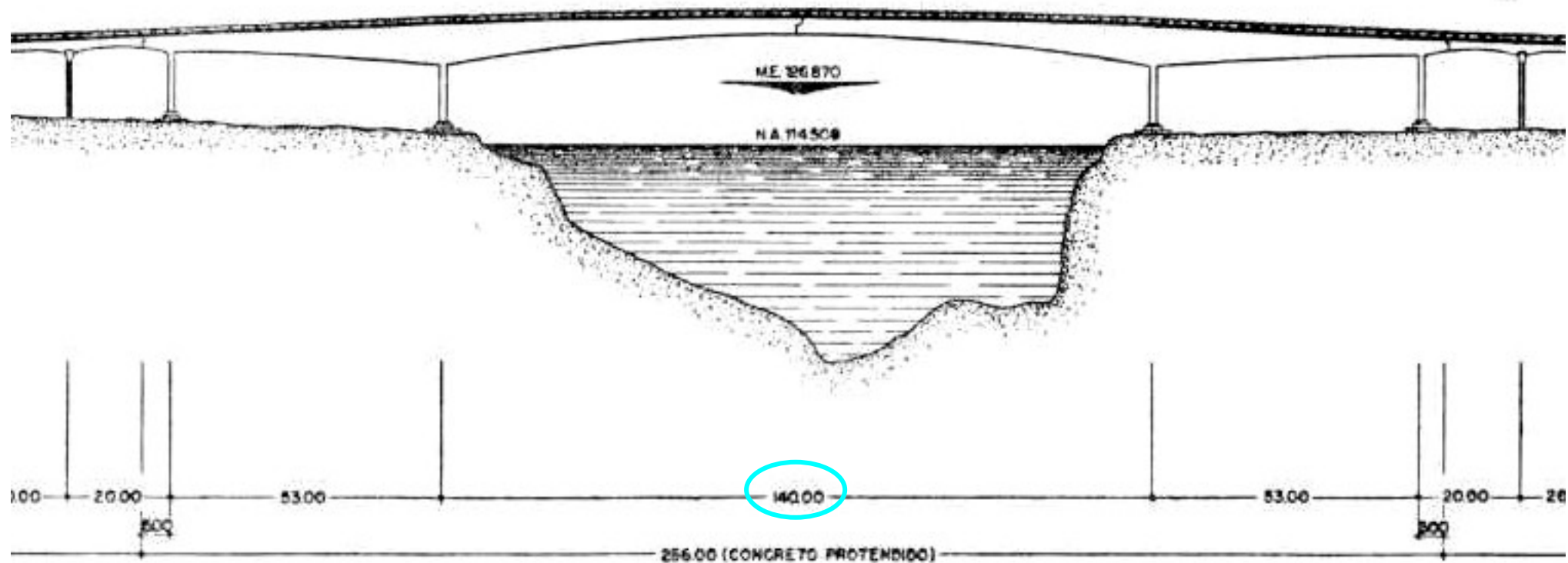


Fig 2b

A grande profundidade do rio Tocantins nessa seção impedia o escoramento direto. Foi usado o método dos balanços sucessivos, utilizado pela primeira vez por Emilio Baumgart na ponte sobre o rio do Peixe/ SC em 1930.

Projeto e construção: Dr. Eng. Sérgio Marques de Souza.

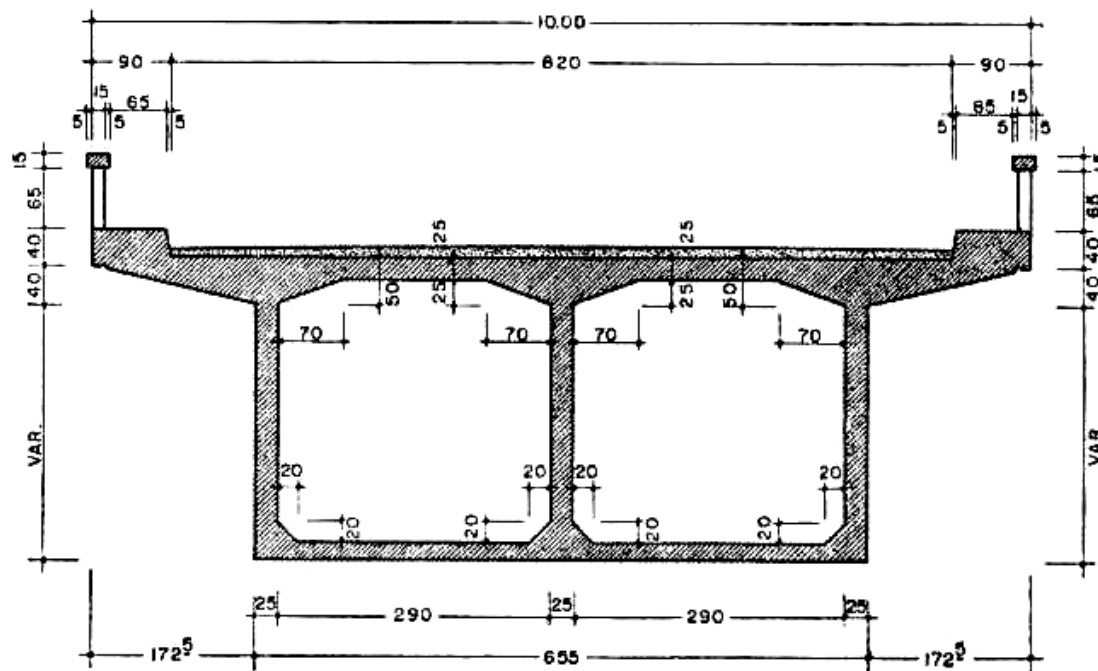


Figura 2c - Seção transversal

Rodovia Belém-Brasília – Divisa Maranhão / Goiás
Vão central = 140m , o maior vão do mundo na época - 1960 / 1961

Projeto e construção:

Dr. Eng. Sérgio Marques de Souza.



Tabuleiro Celular

Pontes em concreto protendido, construídas em balanços sucessivos

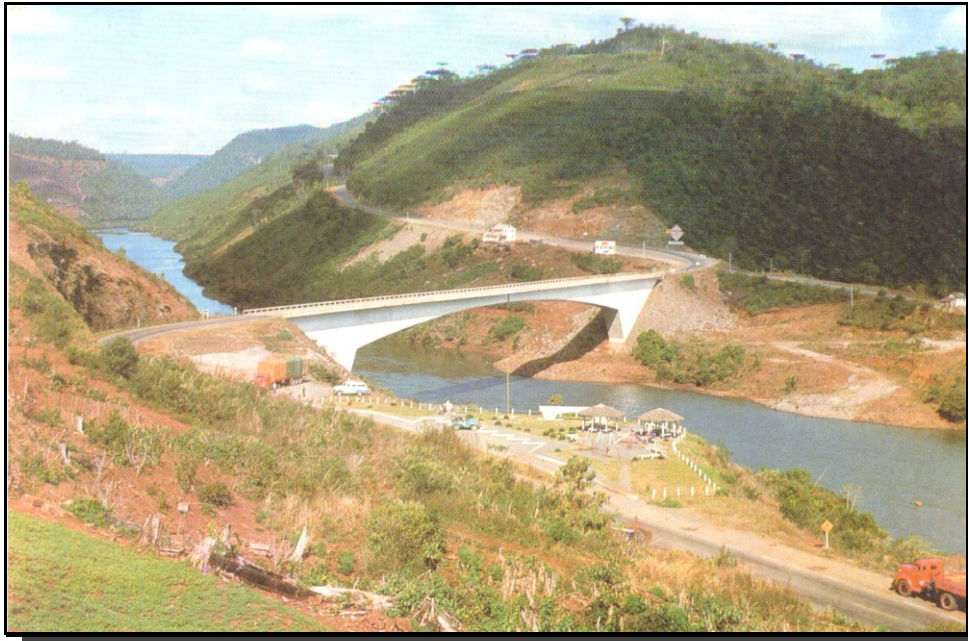
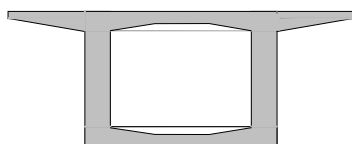


Fig. 3 Ponte sobre o Rio Pelotas - Vão central 189 m
Divisa do Rio Grande do Sul com Santa Catarina - 1966/1967



Seção transversal

Projeto e construção:
Dr. Eng. Sérgio Marques de Souza.



Ponte sobre o Rio Pelotas - Vão central $L = 189\text{m}$.

Na ocasião era o 2º maior vão do mundo.

O maior vão era o da ponte de Bendorf com 208m (ver fig. 11).

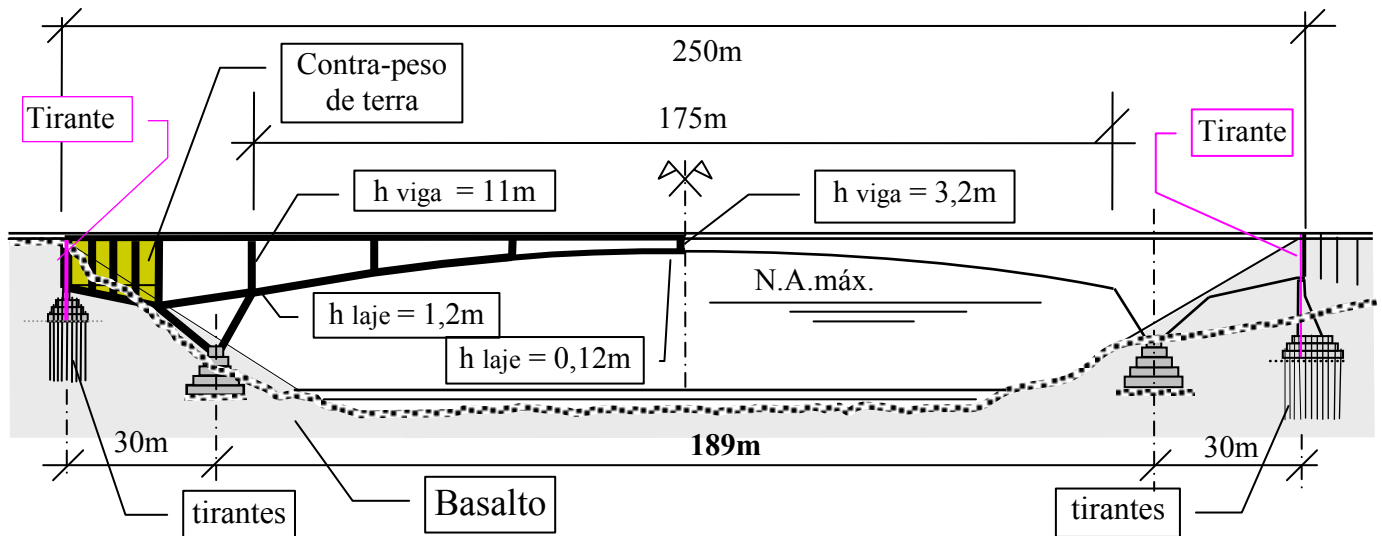


Fig. 4- Ponte sobre o Rio Pelotas - Fase de execução – 1966/1967

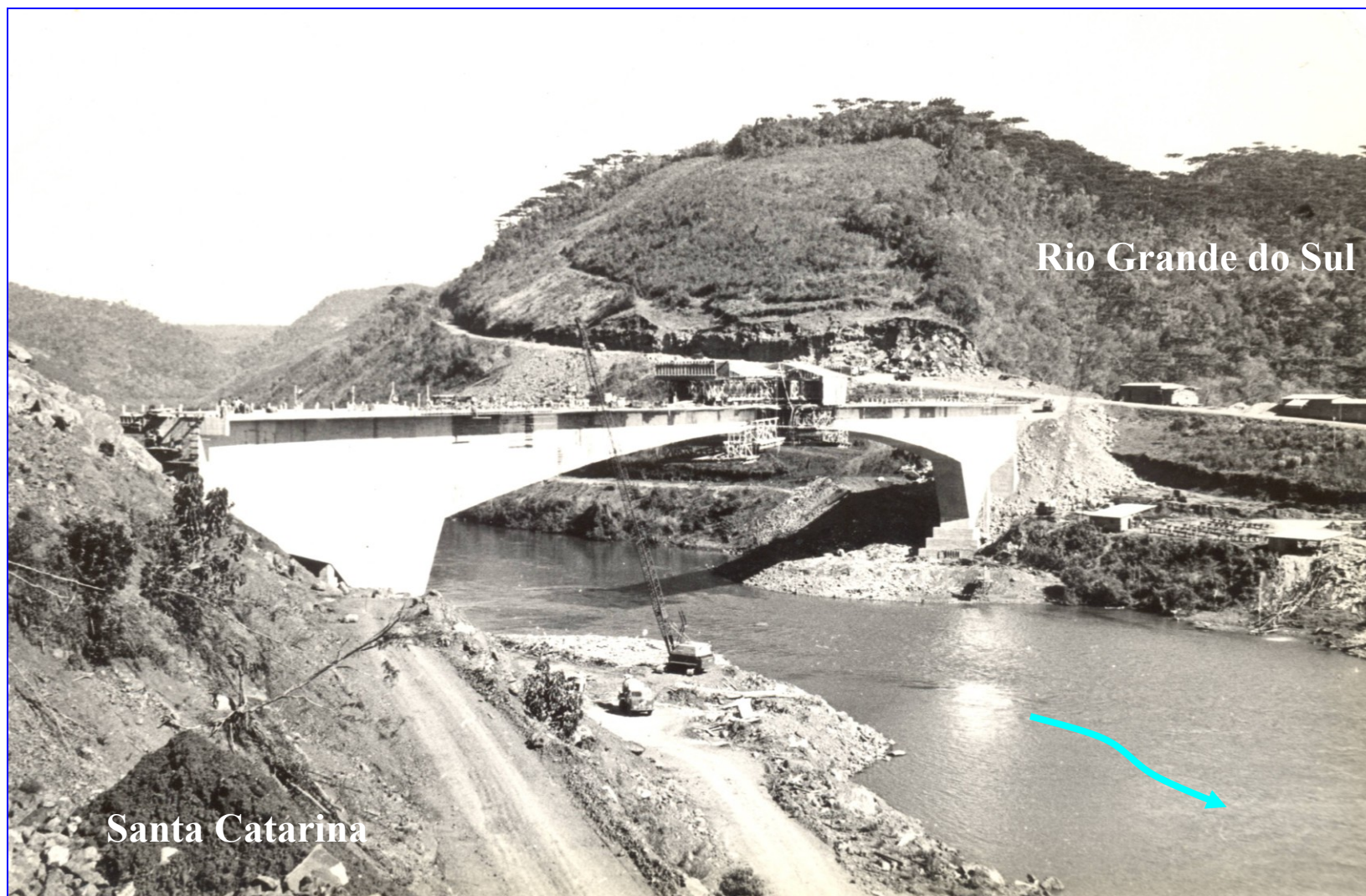


Fig.5 - Ponte sobre o Rio Pelotas – Fase final de execução – 1967



Fig. 6 - Foto em 2011, com a ponte “afogada” pelas águas represadas do rio Pelotas.
Uma barragem a jusante da ponte elevou o nível das águas.



Fase final da execução

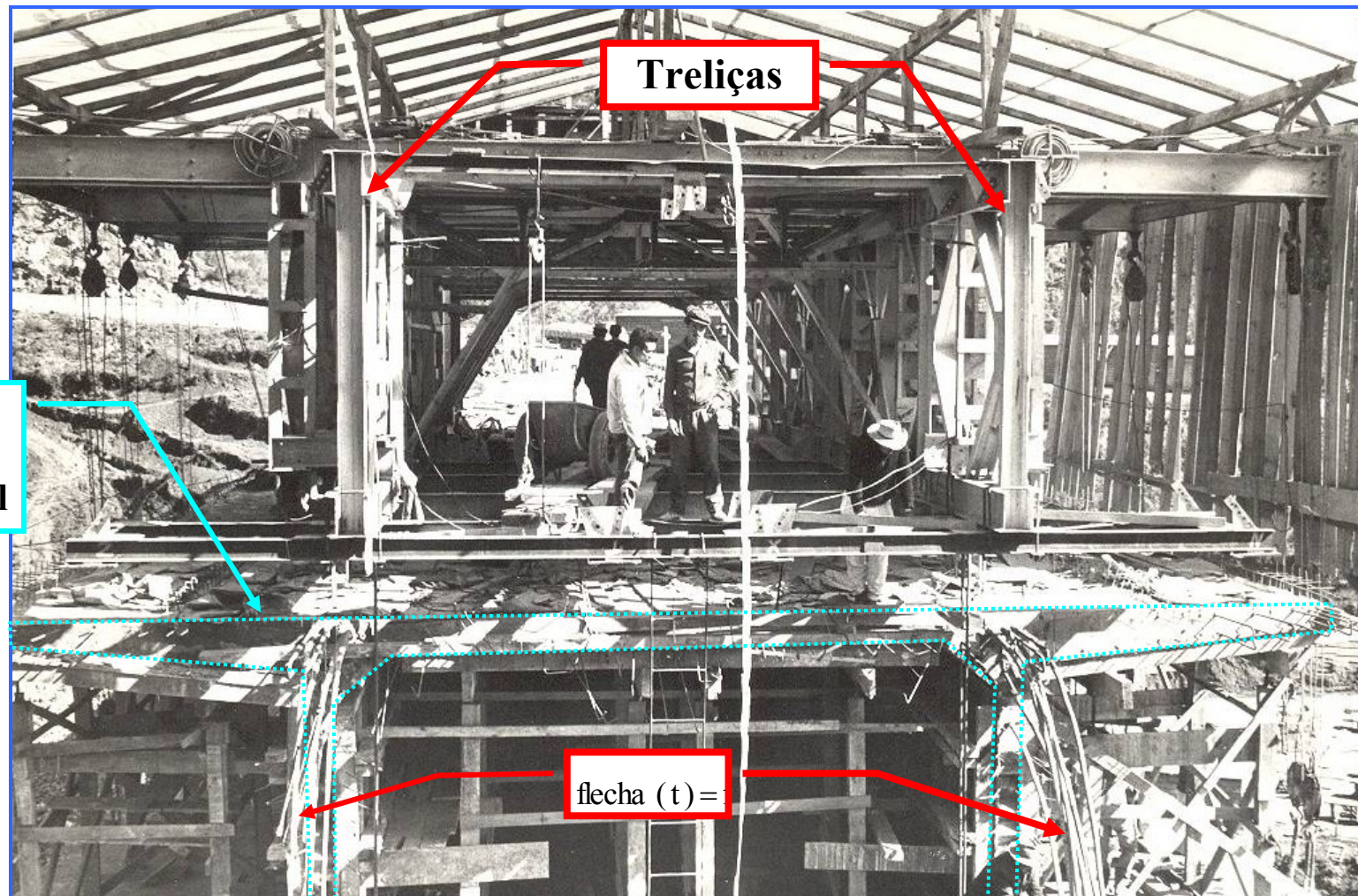


Fig. 7 – Pouco antes das duas metades da ponte se encontrarem no meio do vão central- – 1967



Tabuleiro Celular : Pontes construídas em balanços sucessivos.

Flecha lenta no meio do vão.

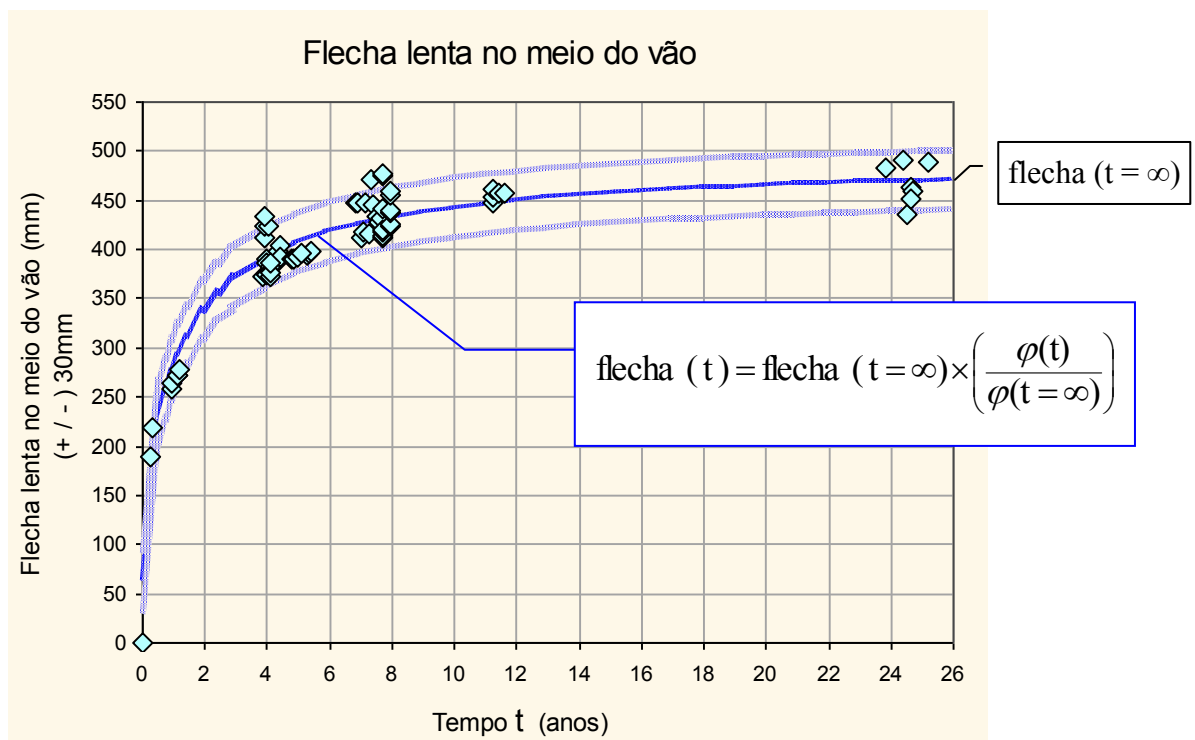
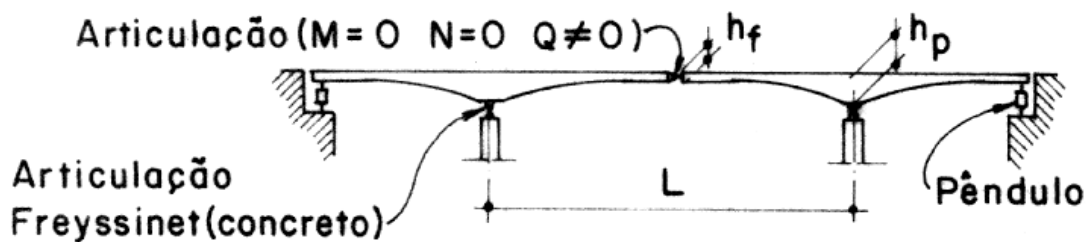


Fig. 8 - Ponte Rio Pelotas : Medições de flechas no meio do vão ao longo do tempo.

A variação da flecha, durante o dia, se deve ao aquecimento da laje superior do tabuleiro, pelo sol. Quando a laje superior é aquecida, a flecha no meio do vão aumenta.

Quando, no fim do dia, a laje resfria, a flecha no meio do vão diminui.

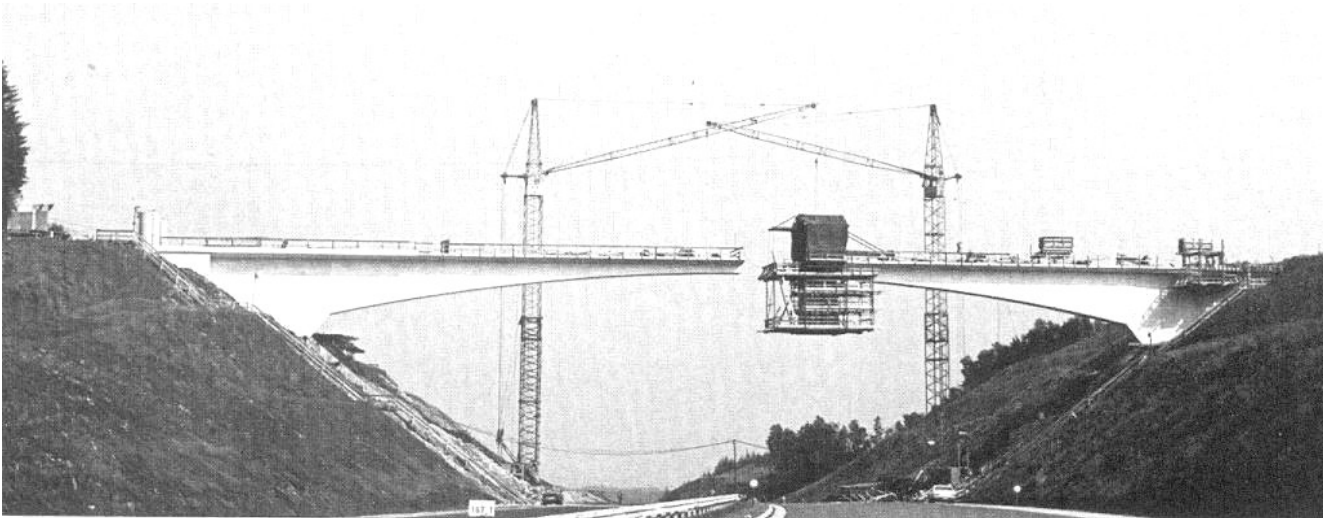
A variação da flecha, ao longo do tempo, segue uma curva afim com a variação da fluência do concreto comprimido, $\varphi(t)$, prevista pela norma NBR 6118, no Anexo A, item A.2.2.3.

A previsão da flecha lenta ($t = \infty$), na fase do projeto, foi de 600mm. A flecha lenta observada foi de 490mm. Ver [16] e [15].

As medições confirmam a regra empírica : “Após um ano, temos a metade da flecha lenta final.”



Tabuleiro Celular
Pontes construídas em balanços sucessivos.



- Fig. 9 - Auto-estrada alemã perto de Münster.
- Concreto Leve - Vão=85m
- *Firma* : Dyckerhoff & Widmann 1967

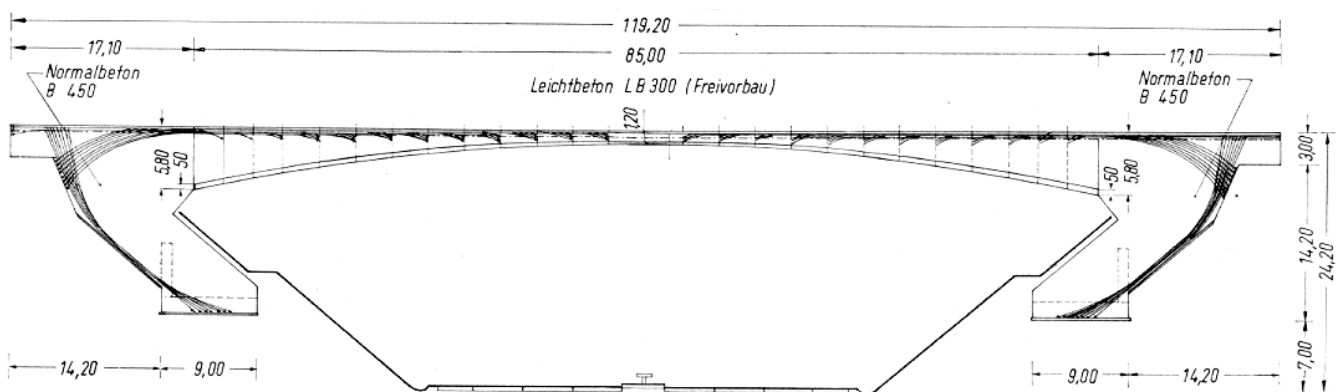
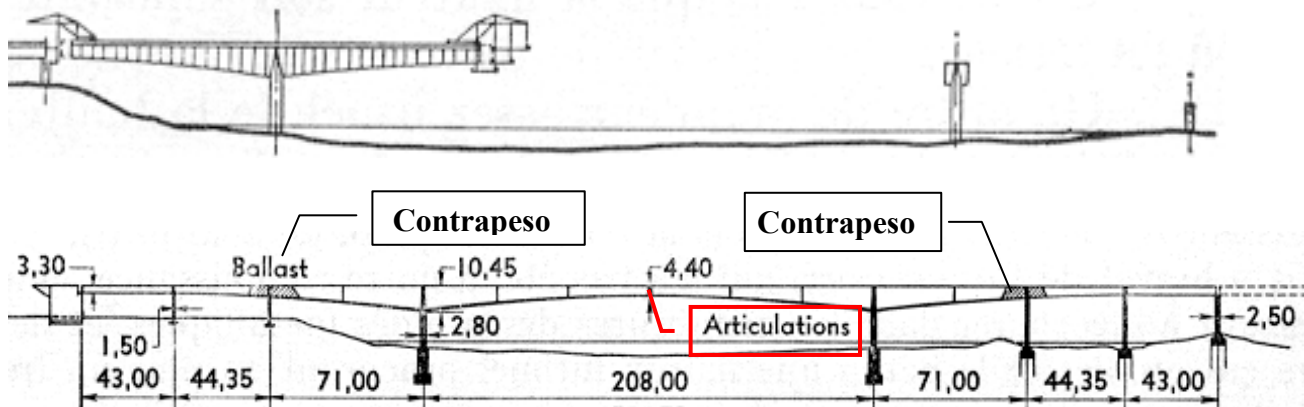
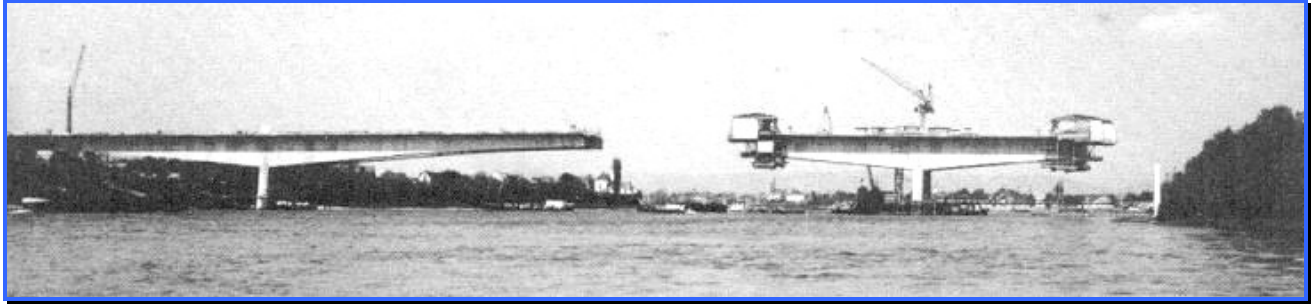


Fig. 10 – Detalhes



Ponte Bendorf – Alemanha - Vão = 208m
Ponte em balanços sucessivos com tabuleiro celular.
Firma : Dyckerhoff & Widmann - 1963



Sendo o vão lateral muito pequeno, foi necessário colocar contrapesos.

Fig 11 - Balanços sucessivos concretados no local

Ponte d' Oleron – França – Vão = 79m
Ponte em balanços sucessivos com tabuleiro celular.
Firma : Campenon Bernard -1966

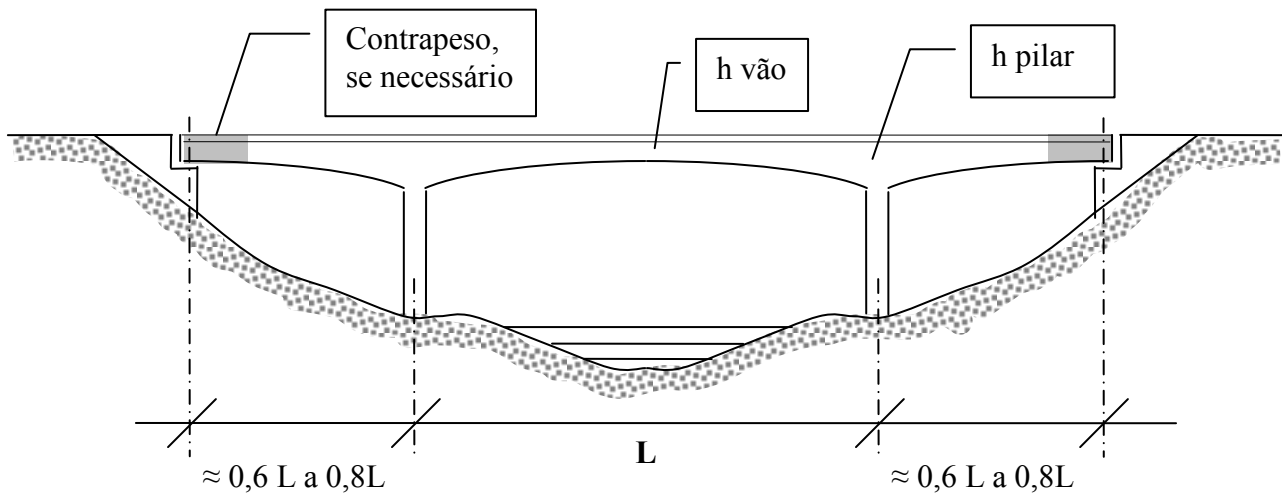


Fig. 12 - Segmentos pré-moldados



Tabuleiro Celular em concreto protendido

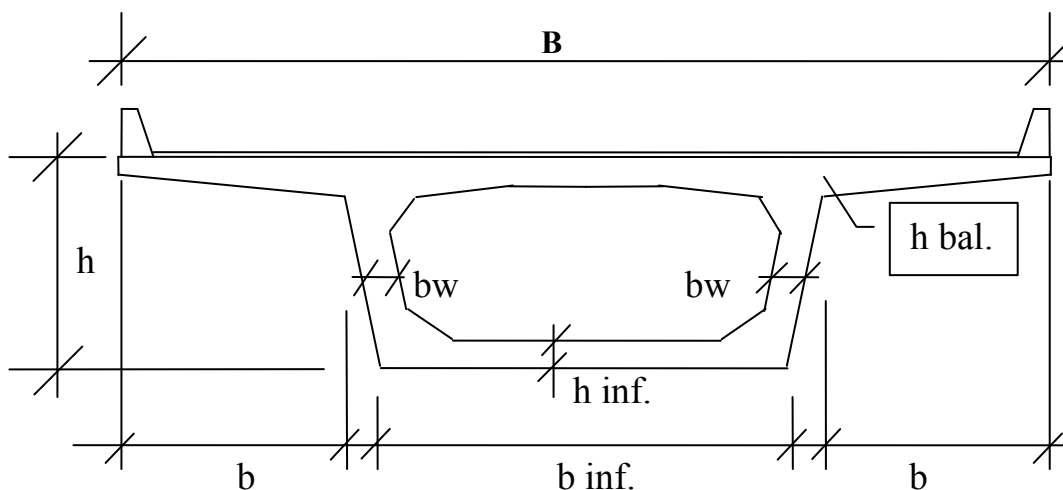
Pré-dimensionamento baseado nas dimensões de obras existentes.



Vista Lateral

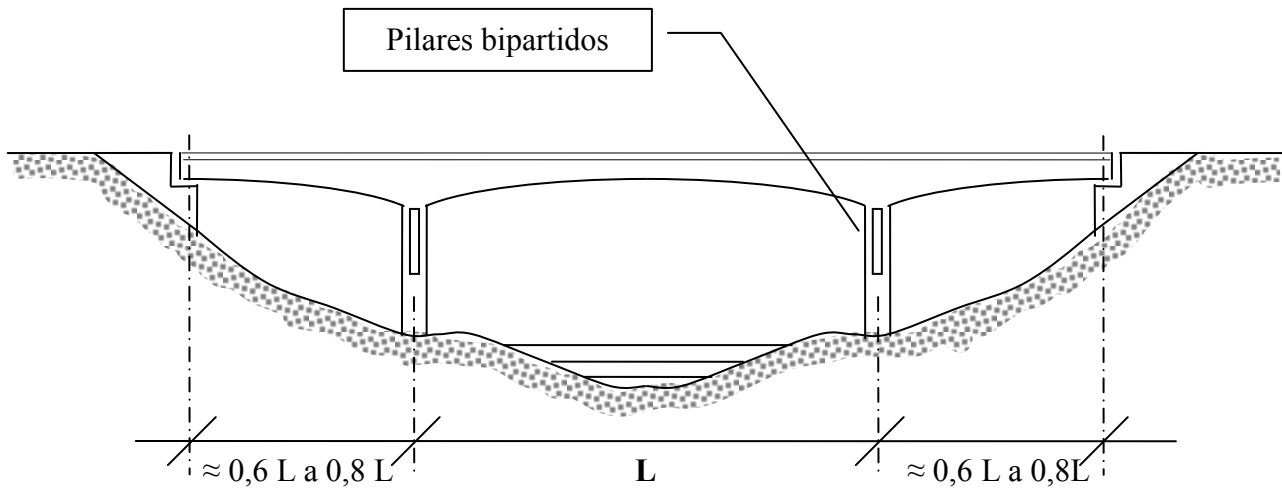
Figura 13

- Algumas obras têm um vão lateral muito pequeno, até mesmo igual a $0,30 L$. Nesses casos, é necessário usar contrapesos sobre os apoios extremos para evitar o levantamento desses apoios.
- Quando os contrapesos não são suficientes, usam-se tirantes, para ancorar o tabuleiro na infraestrutura.



Seção Transversal

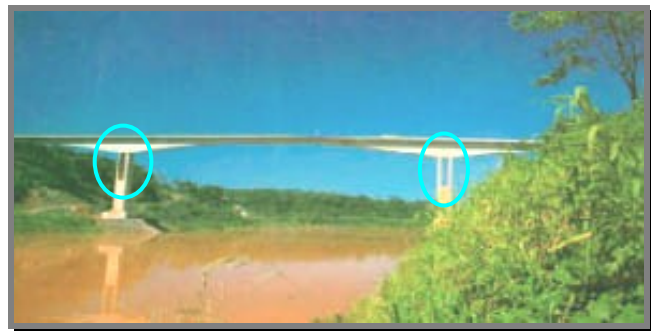
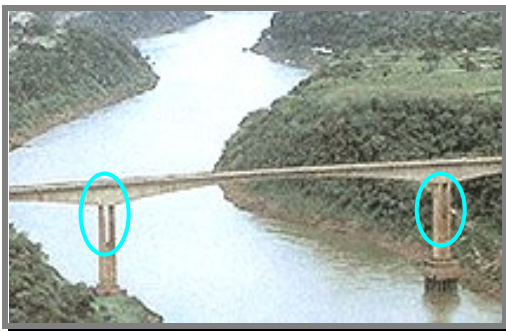
Figura 14



Vista Lateral

Figura 15

- Um sistema estrutural muito usado é a ponte protendida contínua, com os pilares bipartidos.
- Esse pilares bipartidos têm boa estabilidade para resistir aos momentos fletores.
- Permitem, ao mesmo tempo, o encurtamento longitudinal da ponte no vão central.
- Esse encurtamento ocorre por causa da retração e da deformação lenta do concreto devida à protensão.
- Com esse tipo de pilar, as variações de temperatura no tabuleiro da ponte não causam grandes esforços nas fundações.
- *Exemplo de obra com pilares bipartidos :*



- Fig.16- Tabuleiro unicelular. Ponte Brasil – Argentina, sobre o rio Iguazu.
- Vãos : 130m - 220m -130m Largura do tabuleiro : 16,5m
- Projeto : Figueiredo Ferraz – ETEL
- Construção : Sobrenco – Supercimento - 1985



Outros sistemas estruturais já foram usados nas pontes com tabuleiro celular.

Sistemas estruturais com tabuleiros contínuos

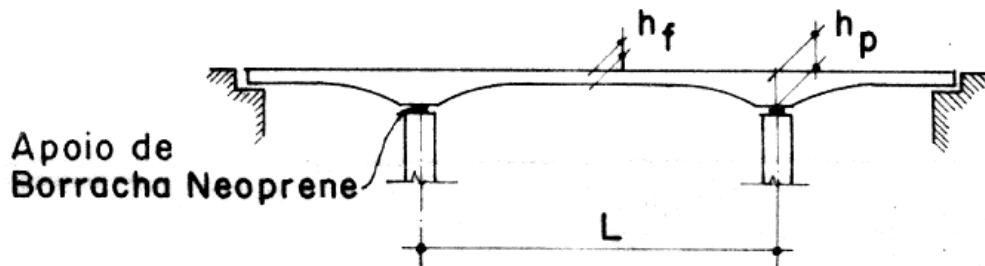


Figura 17 a

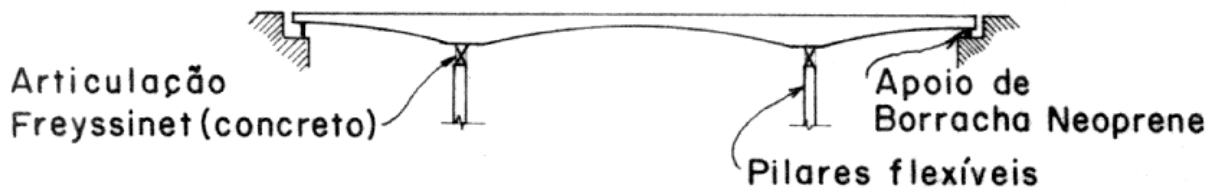


Figura 17 b

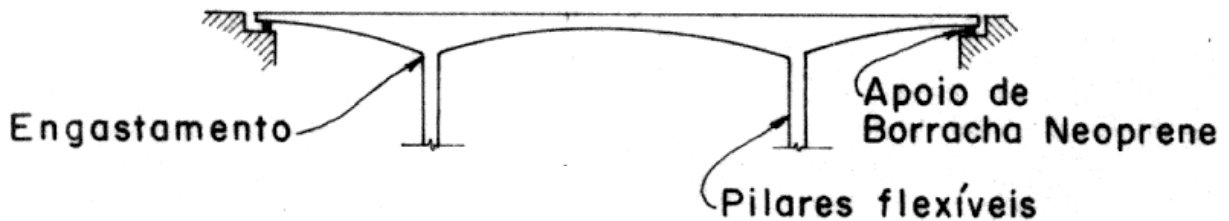


Figura 17 c

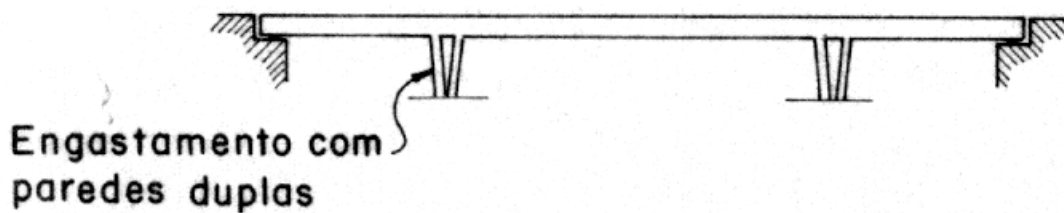


Figura 17 d

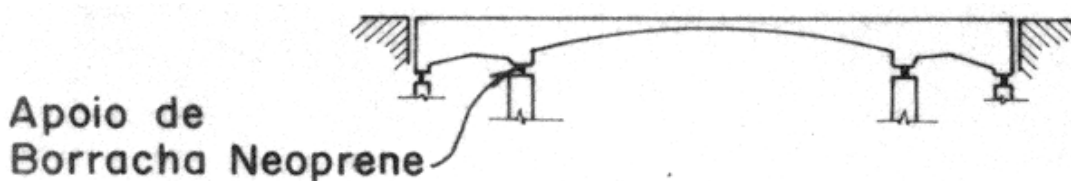


Figura 17 e



Sistemas estruturais com tabuleiros articulados.

Esses sistemas estruturais são pouco usados hoje em dia. A flechas devidas à deformação lenta do concreto (fluência) são muito grandes. As pontes ficam com problemas.

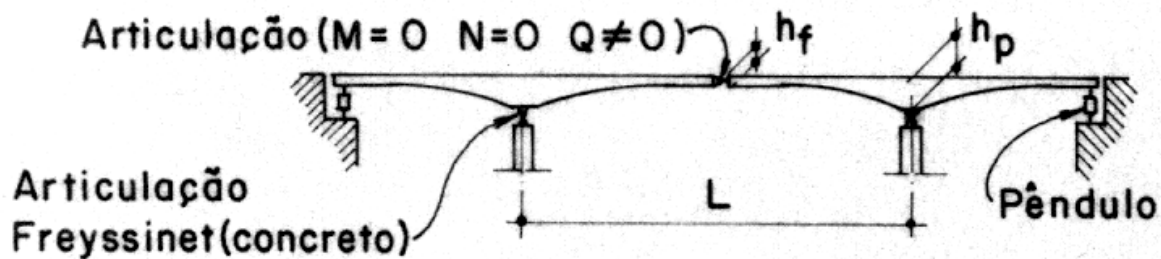


Figura 18a

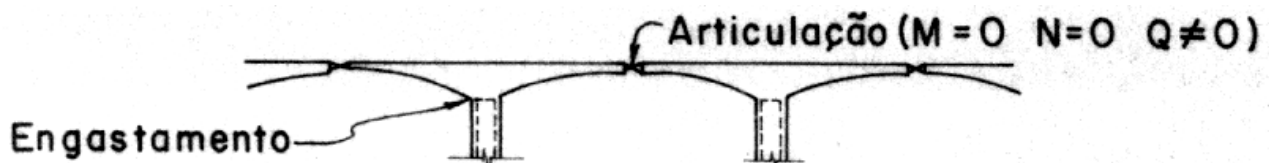


Figura 18 b

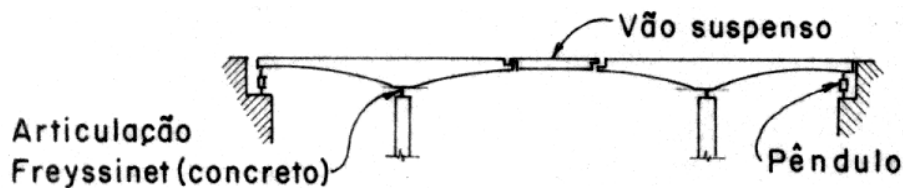


Figura 18 c

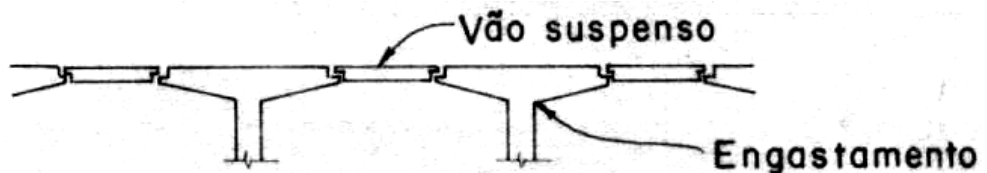


Figura 18 d



Ponte sobre o Lago de Brasília

Vãos : 100m + 200 m + 100m = 400m comprimento total



Figura 19a – Ponte em concreto protendido + Vão Gerber de aço.

Foto: Ver [18] - Roger Pamponet da Fonseca

- Projeto Arquitetônico : Oscar Niemeyer – 1967
- Projeto Estrutural com Rótula Central : Eng. Sergio Marques de Souza - 1970

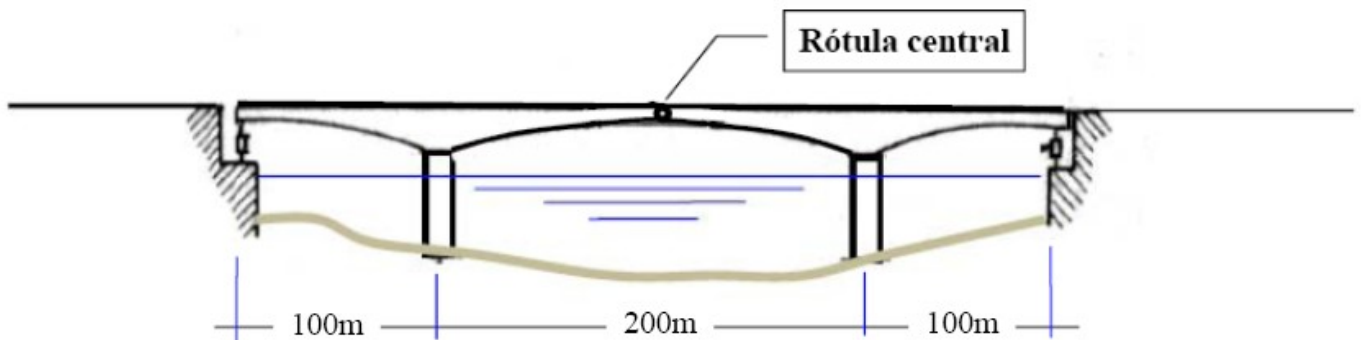


Figura 19b

- Modificação posterior para Estrutura com um Vão Gerber central em aço, quando parte da estrutura de concreto protendido já estava executada : Eng. J.C de Figueiredo Ferraz - 1971.

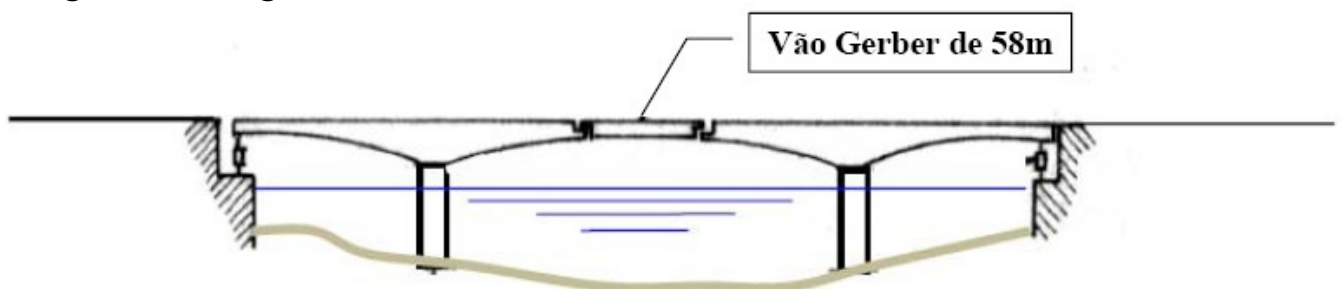


Figura 19c



Vista aérea da ponte sobre o lago de Brasília

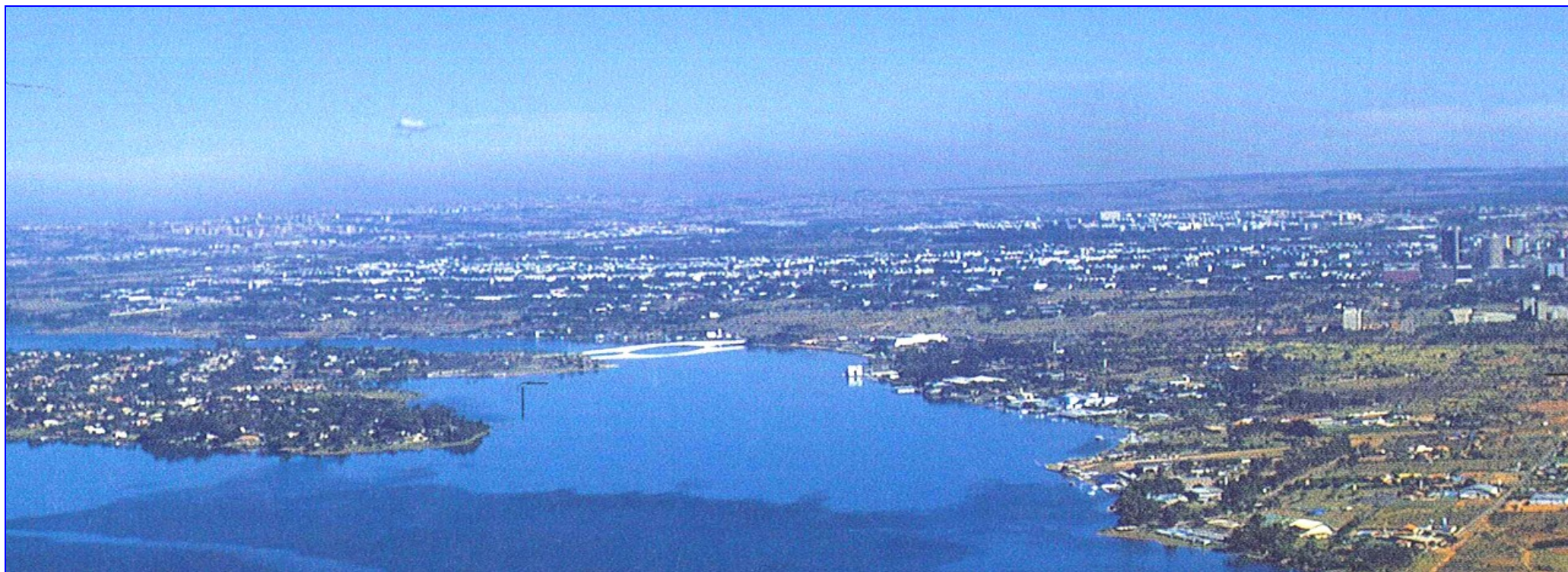


Figura 20

Ponte com Vãos de : $100\text{m} + 200\text{ m} + 100\text{m} = 400\text{m}$ comprimento total



Seção transversal

- São muito usadas as seções com 2 vigas.
- As vigas podem estar em planos inclinados ou em planos verticais.



Figura 21 a



- As seções com 3 vigas são de execução difícil e são pouco usadas nas pontes e nos viadutos.

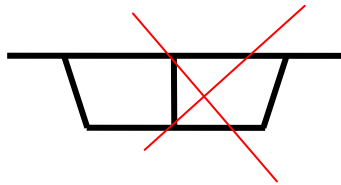
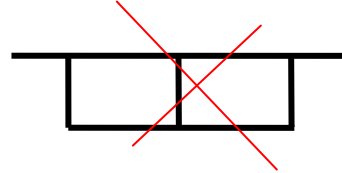


Figura 21 b



- Em pontes e viadutos, com grande largura, são usadas seções transversais com 4 vigas agrupadas de vários modos.

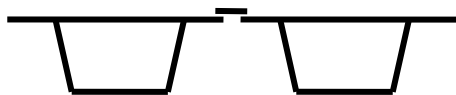
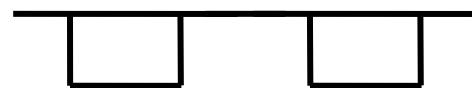
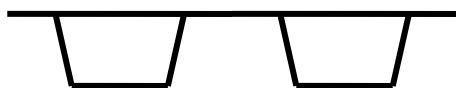
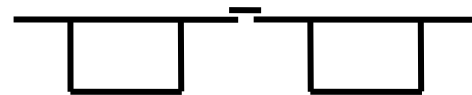


Figura 21c



- Outros tipos de seção transversal já foram usadas. Hoje em dia, não são mais usadas.

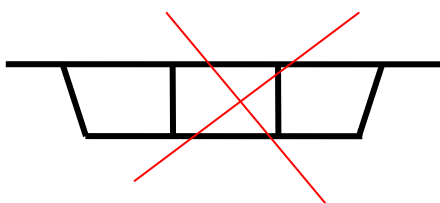


Figura 21d



Altura da viga sobre o pilar.

Concretos com : (24 MPa \leq fck \leq 30 MPa)

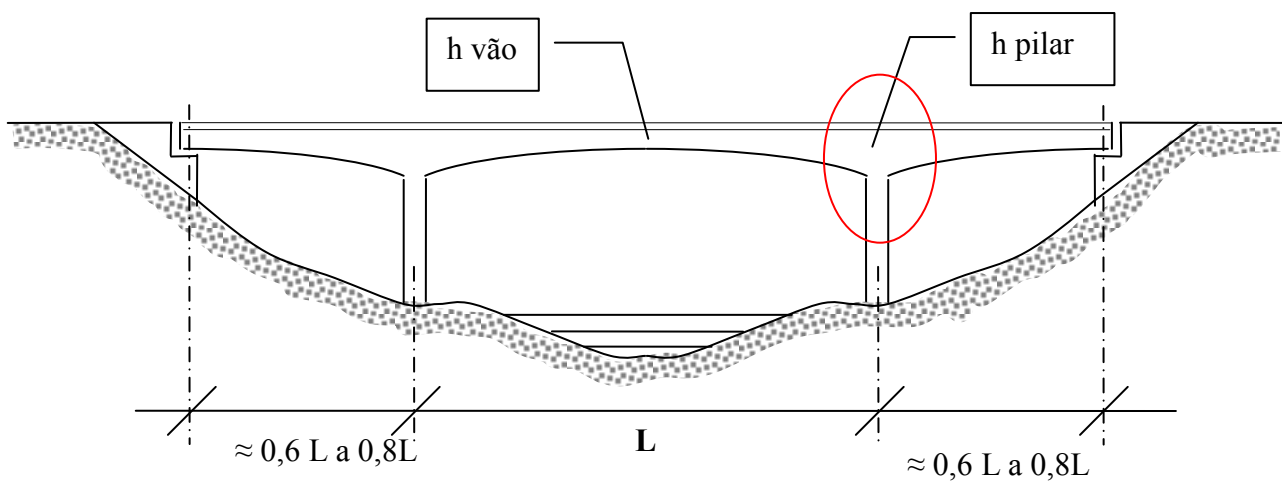
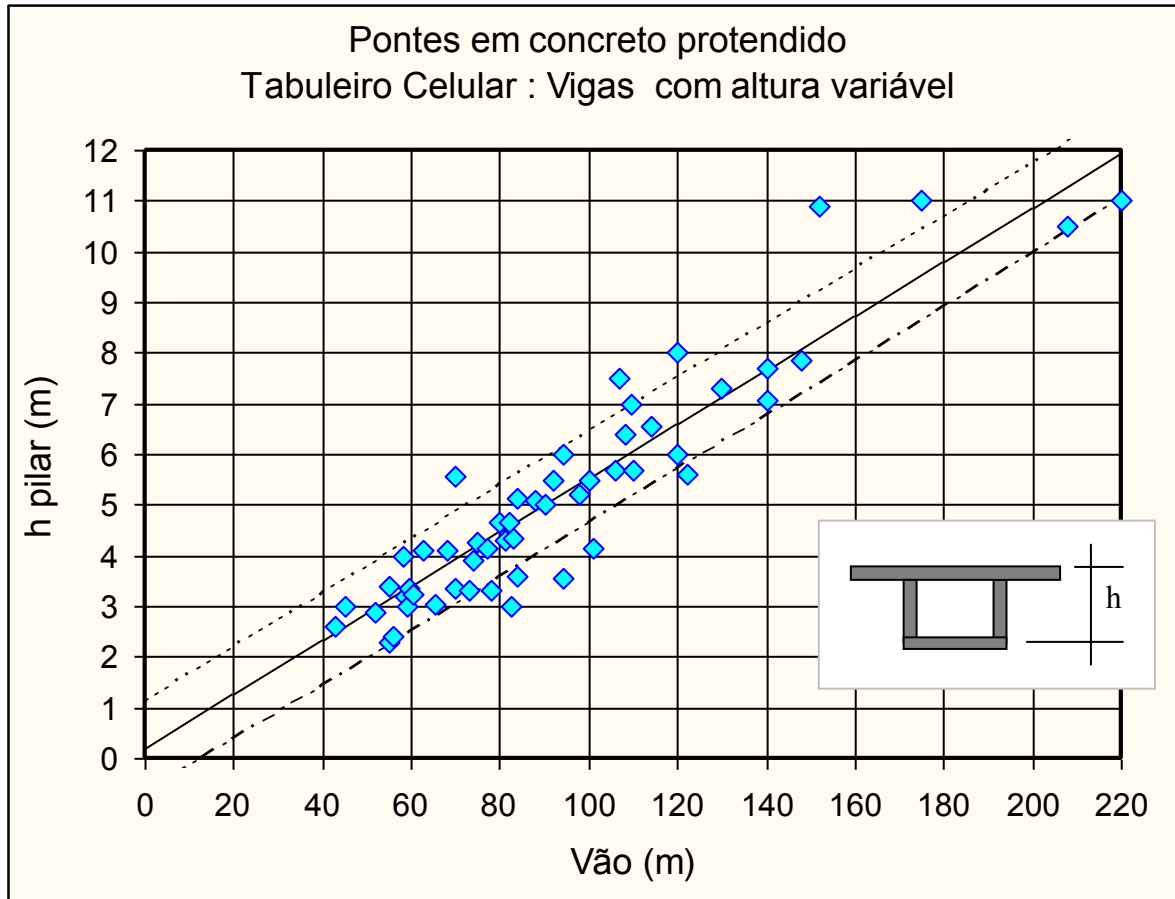


Figura 22



Altura da viga sobre o pilar.

Concretos com : (24 MPa ≤ fck ≤ 40 MPa)

Pontes em concreto protendido
Tabuleiro Celular : Vigas com altura variável
Altura da viga sobre o pilar

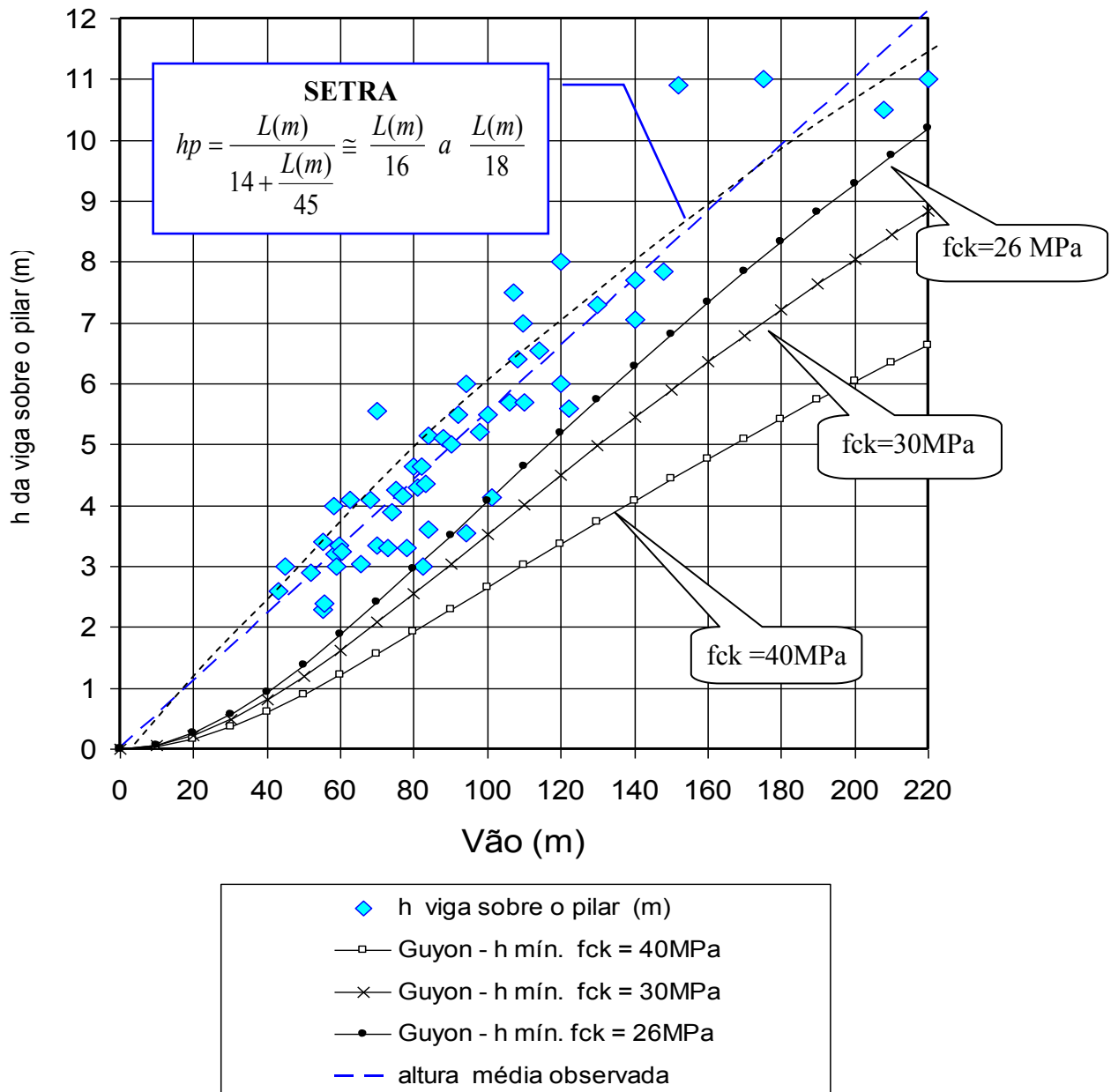


Figura 23

Segundo Guyon [1], a altura mínima da viga sobre o apoio vale:

$$\frac{h}{L} \geq \frac{75(m) \times \gamma_c(t/m^3)}{fck(t/m^2)} \times \frac{\left(\frac{L(m)}{100(m)}\right)}{1 + 0,70 \times \left(\frac{L(m)}{100(m)}\right)^{1,50}} ; \quad \gamma_c = \text{peso específico} = 2,5t/m^3$$

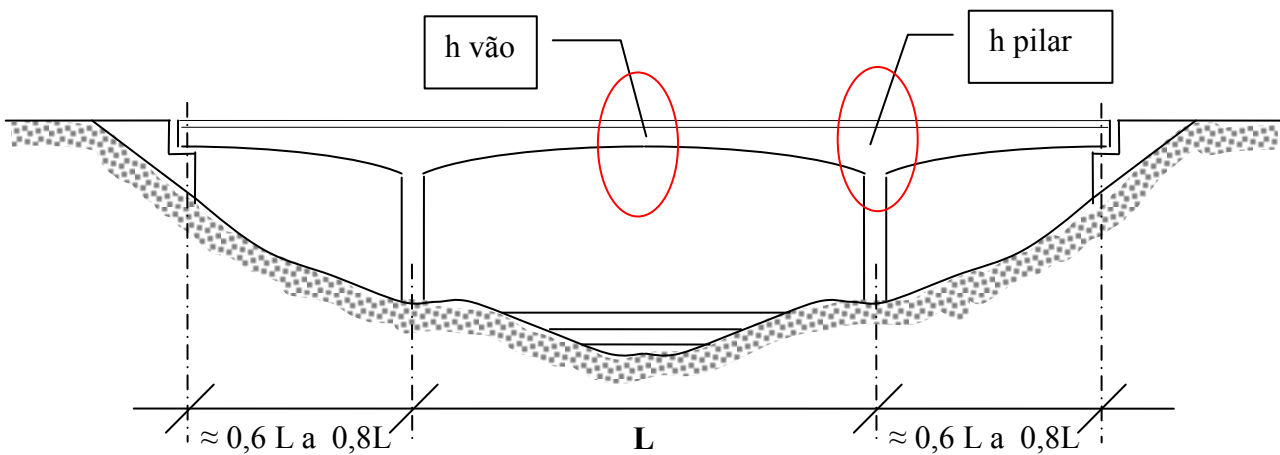
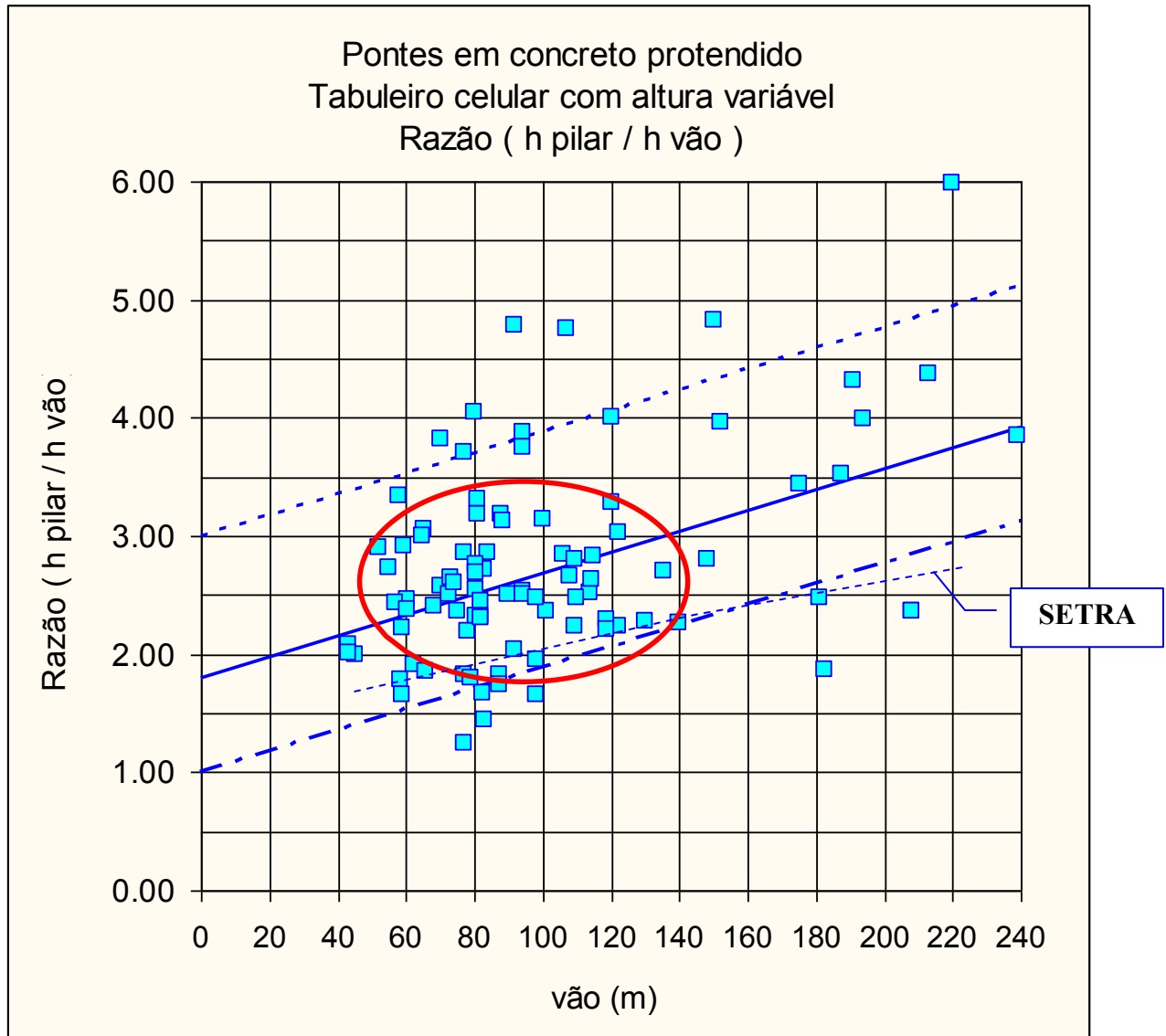


Figura 24

Concretos com : ($24 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 35 \text{ MPa}$)



Viadutos urbanos em concreto protendido, com altura constante.

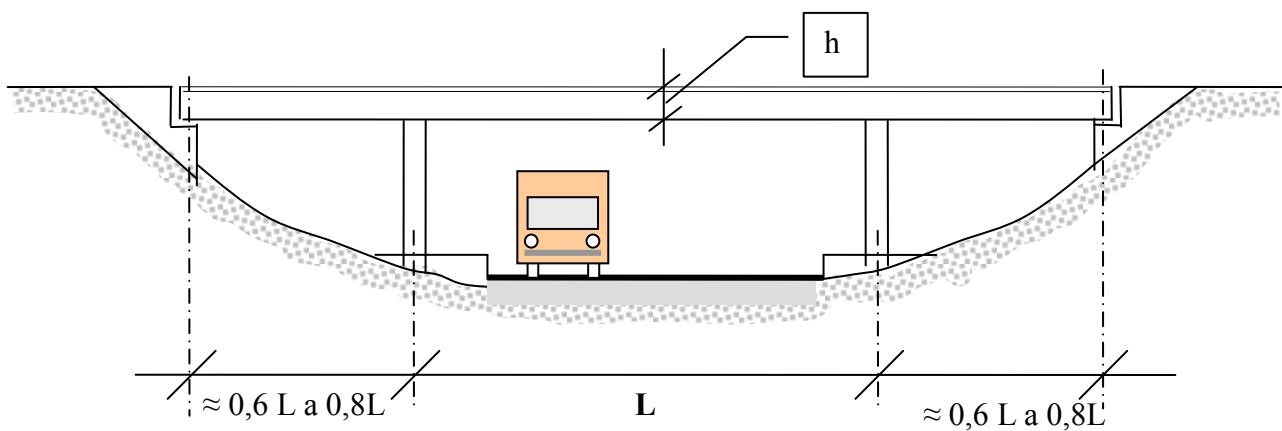
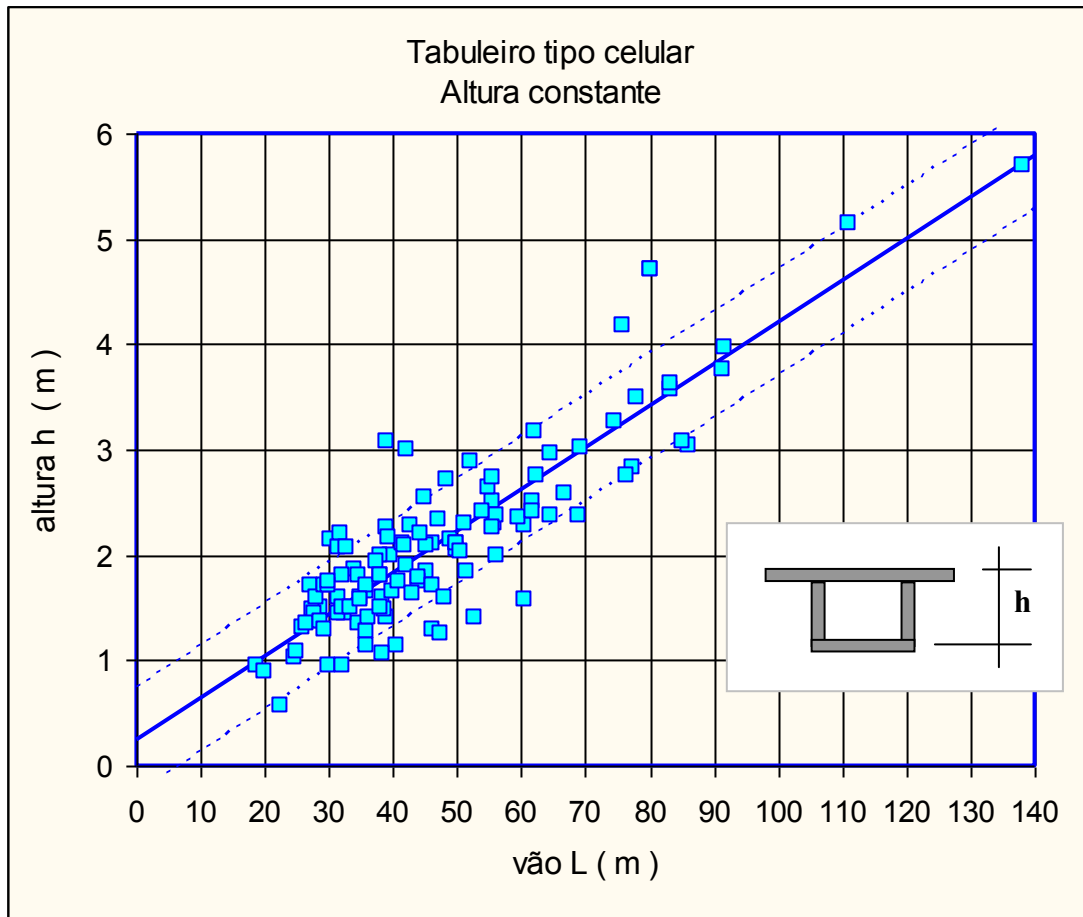
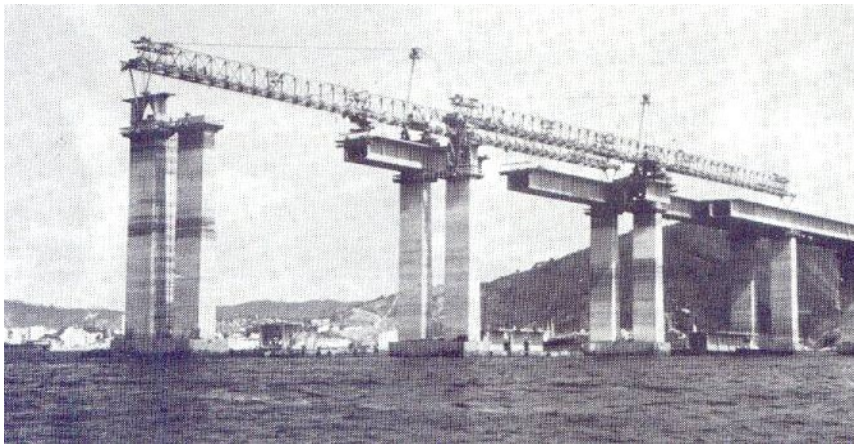
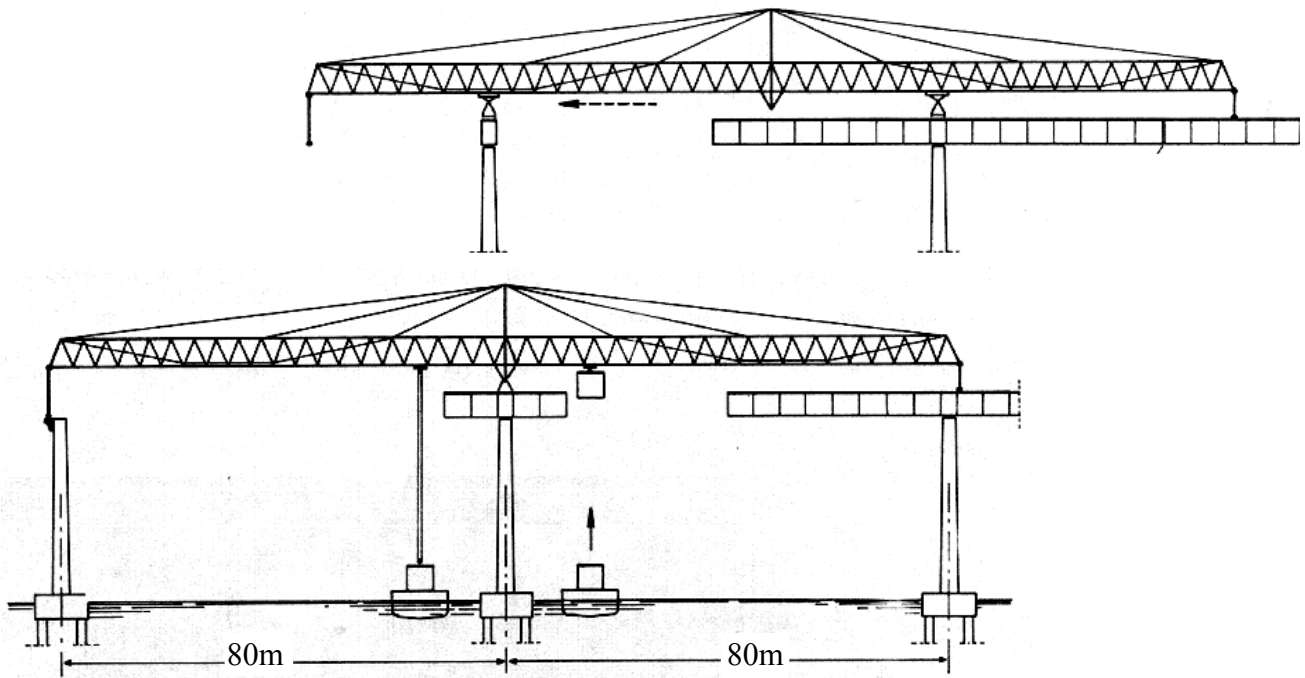


Figura 25

Concretos com : (24 MPa \leq f_{ck} \leq 35 MPa)

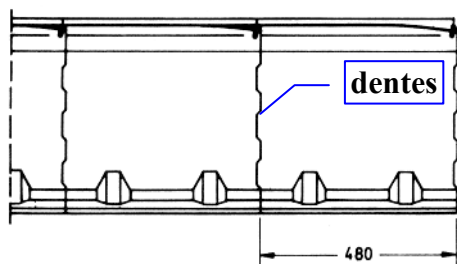


Ponte Rio Niterói - 1974
Projeto : Antonio Alves de Noronha Engenharia

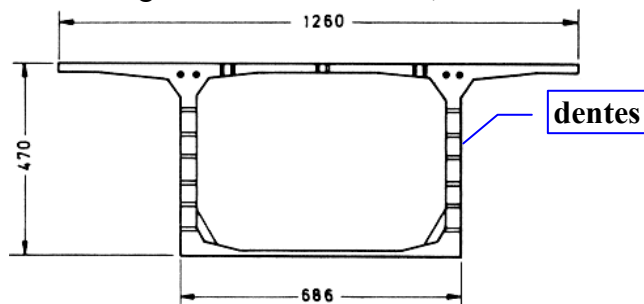


Altura da viga = 4,70 m

Largura do tabuleiro = 12,60 m



Comprimento da aduela = 4,80 m



Largura 6,86 m

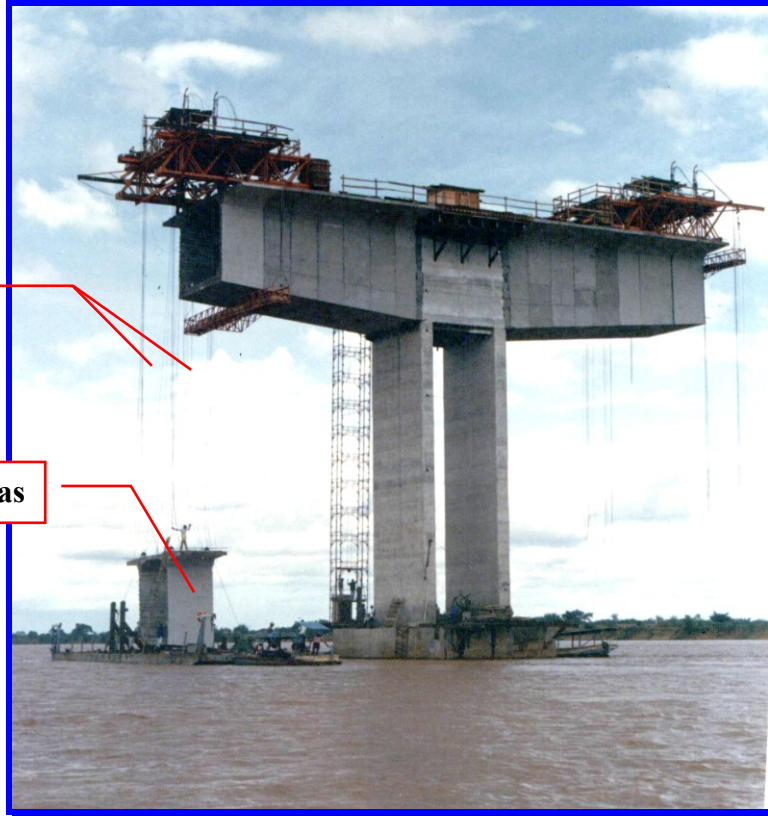
Fig. 26 - Ponte Rio Niterói



Ponte sobre o Rio São Francisco – Bom Jesus da Lapa – BAHIA

Projeto : Projconsult

Construção : Construtora Queiroz Galvão S.A. Ano : 1990



Cabos
para içamento

Aduelas pré-moldadas

Balanços executados com Aduelas Pré-moldadas



Dentes de encaixe entre as aduelas.
Os dentes melhoram a transmissão
de forças cortantes



Estocagem das aduelas pré-moldadas

Figuras 27 - Fabricação , Estocagem e Transporte das aduelas pré-moldadas.



Ponte sobre o Rio São Francisco
Projeto : Projconsult. 1990



Transporte fluvial, içamento e Montagem das aduelas pré-moldadas



Figura 28 - Ponte pronta



Comparação entre as alturas das vigas

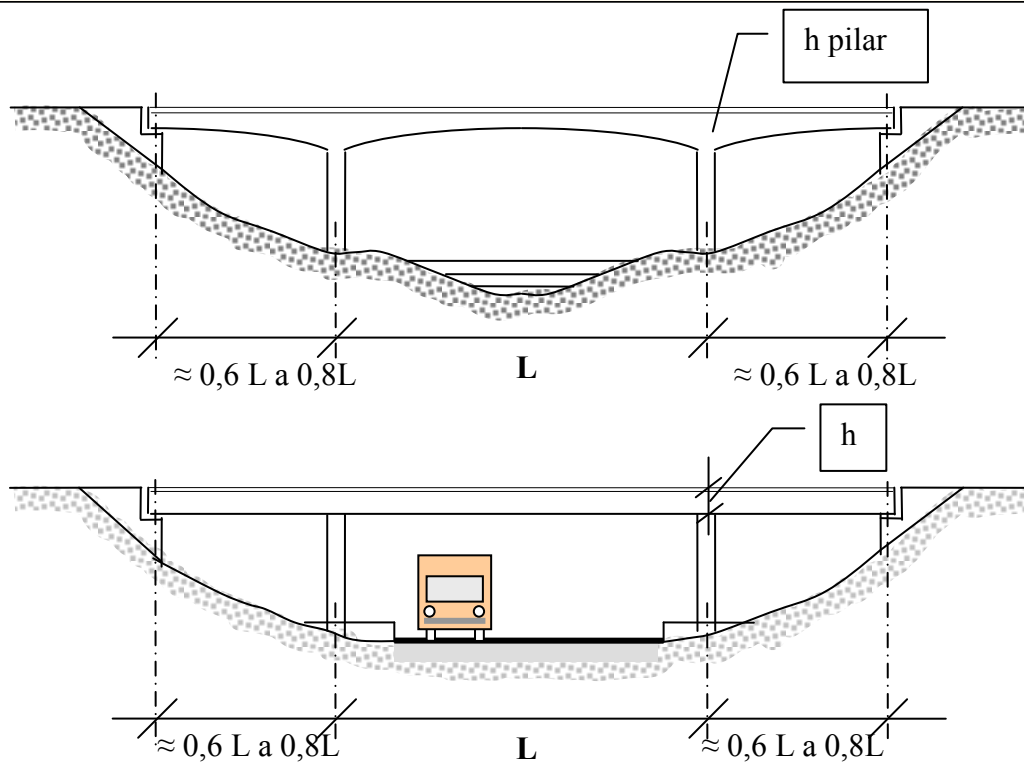
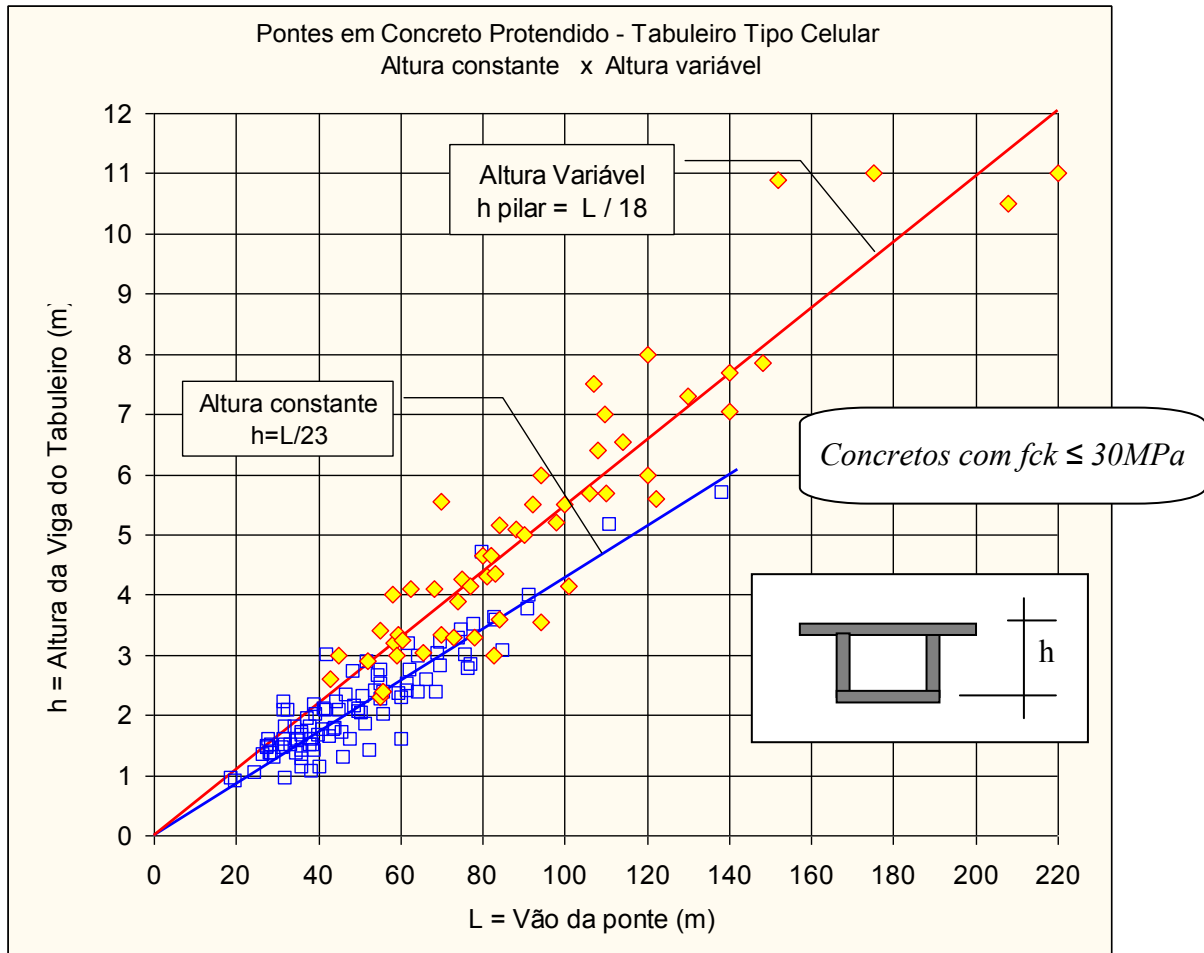
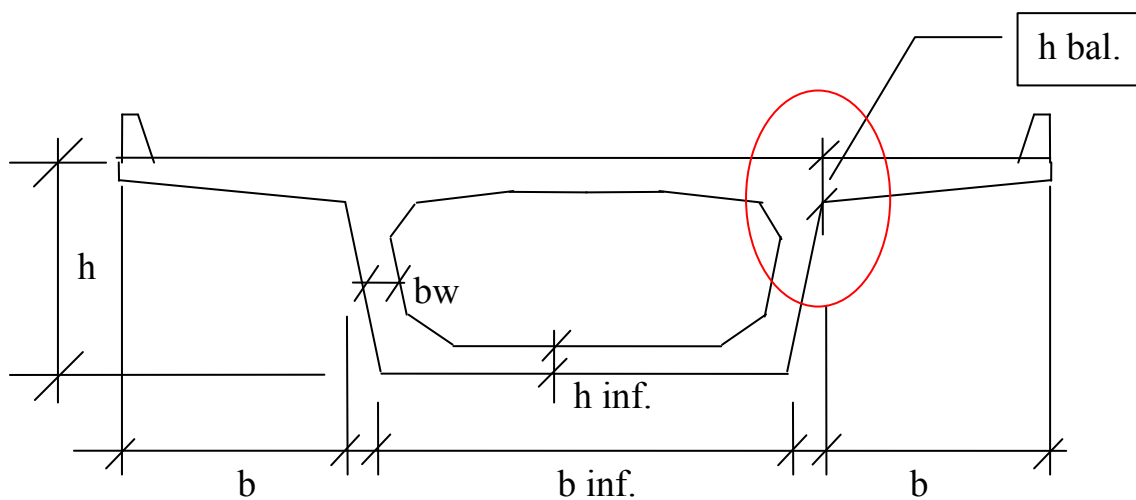
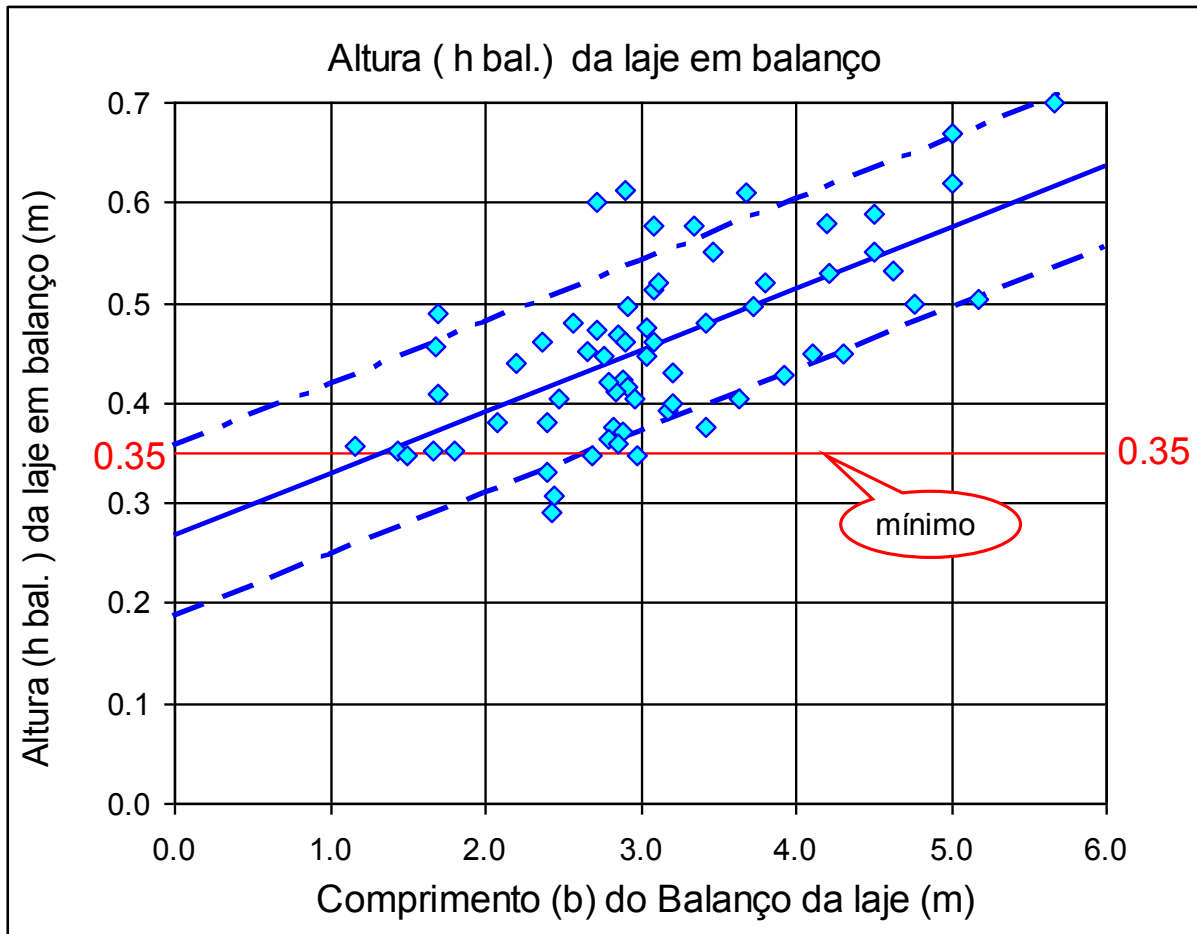


Figura 29



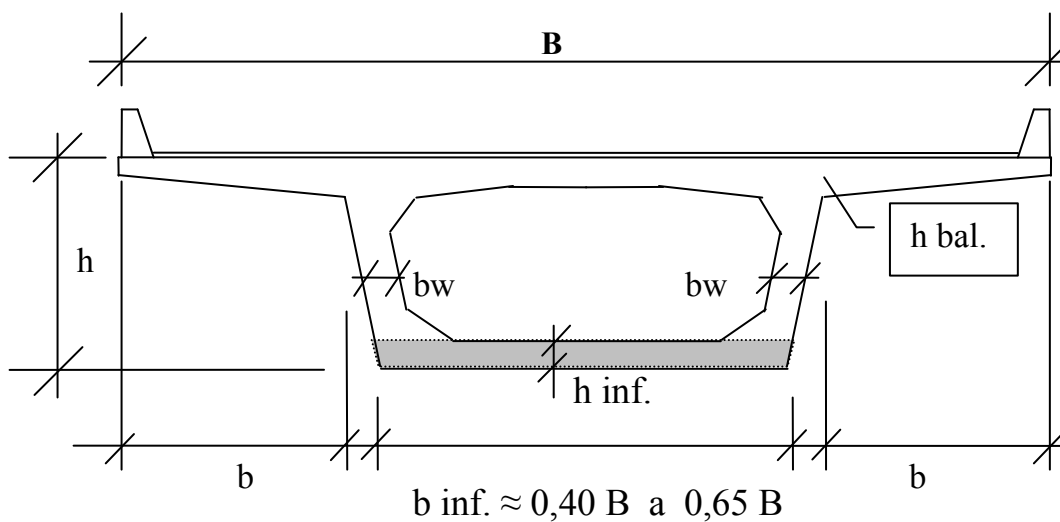
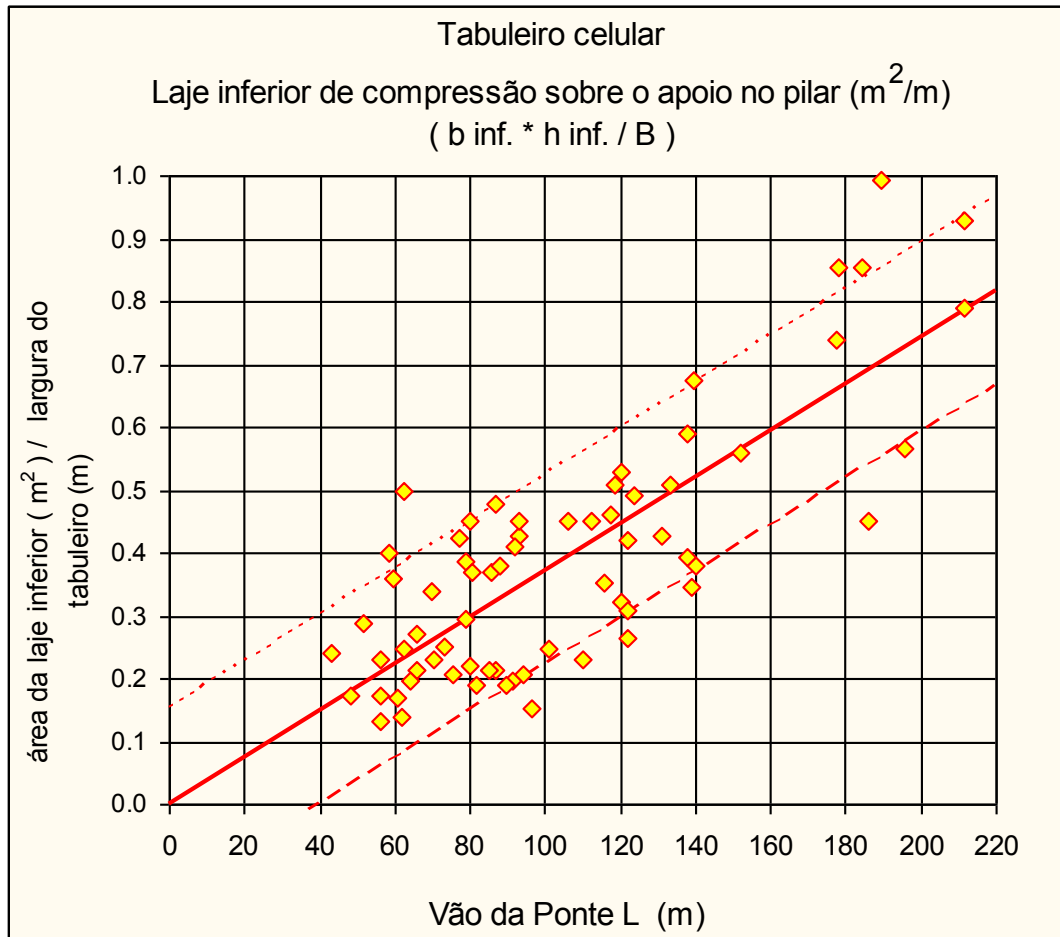
Seção Transversal

Figura 30

Concretos com : (25 MPa \leq fck \leq 35 MPa)



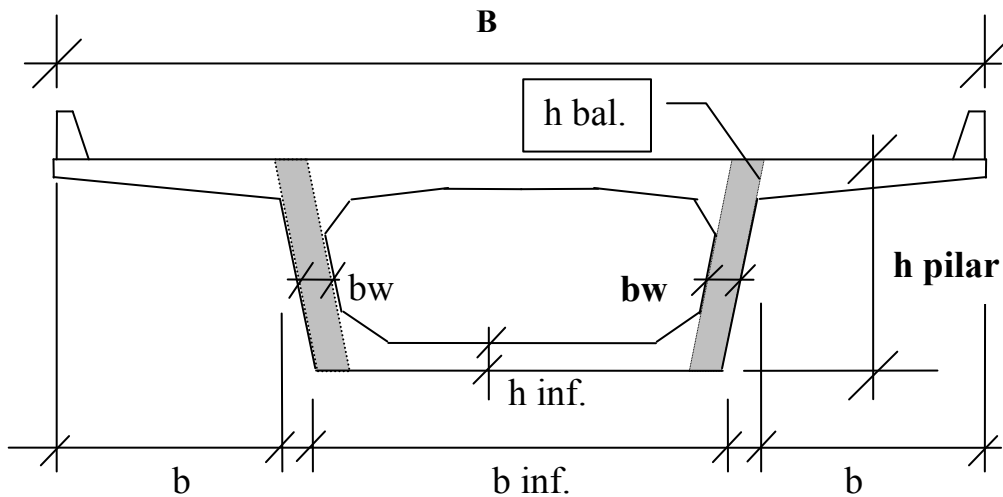
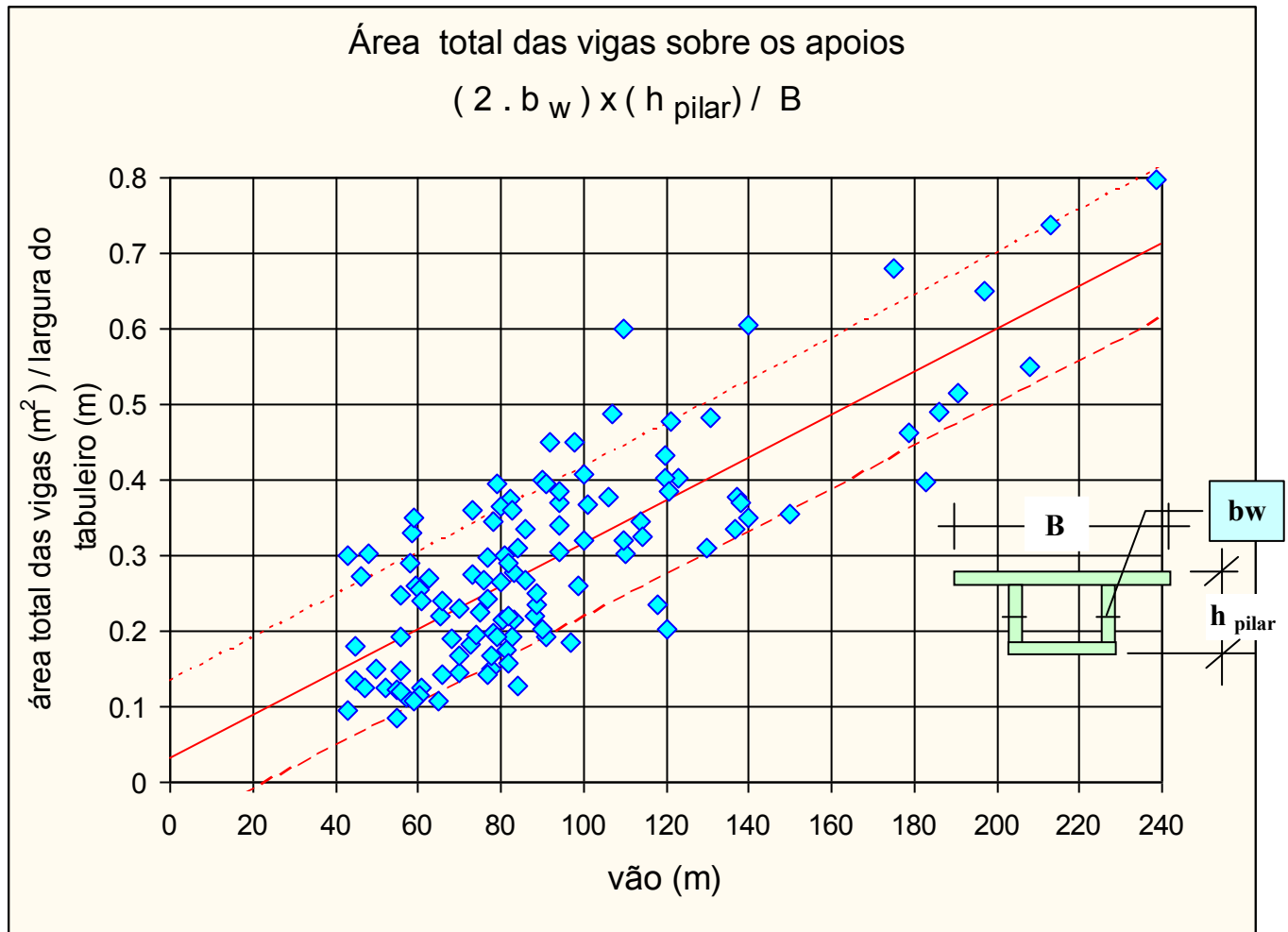
Largura e Espessura da laje inferior, na seção sobre o pilar.



Seção Transversal

Figura 31

Concretos com : ($25 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 35 \text{ MPa}$)



Seção Transversal

Figura 32

Concretos com : $(25 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 35 \text{ MPa})$



Tabuleiro celular com 2 vigas - Concreto Protendido Espessura média (m^3/m^2)

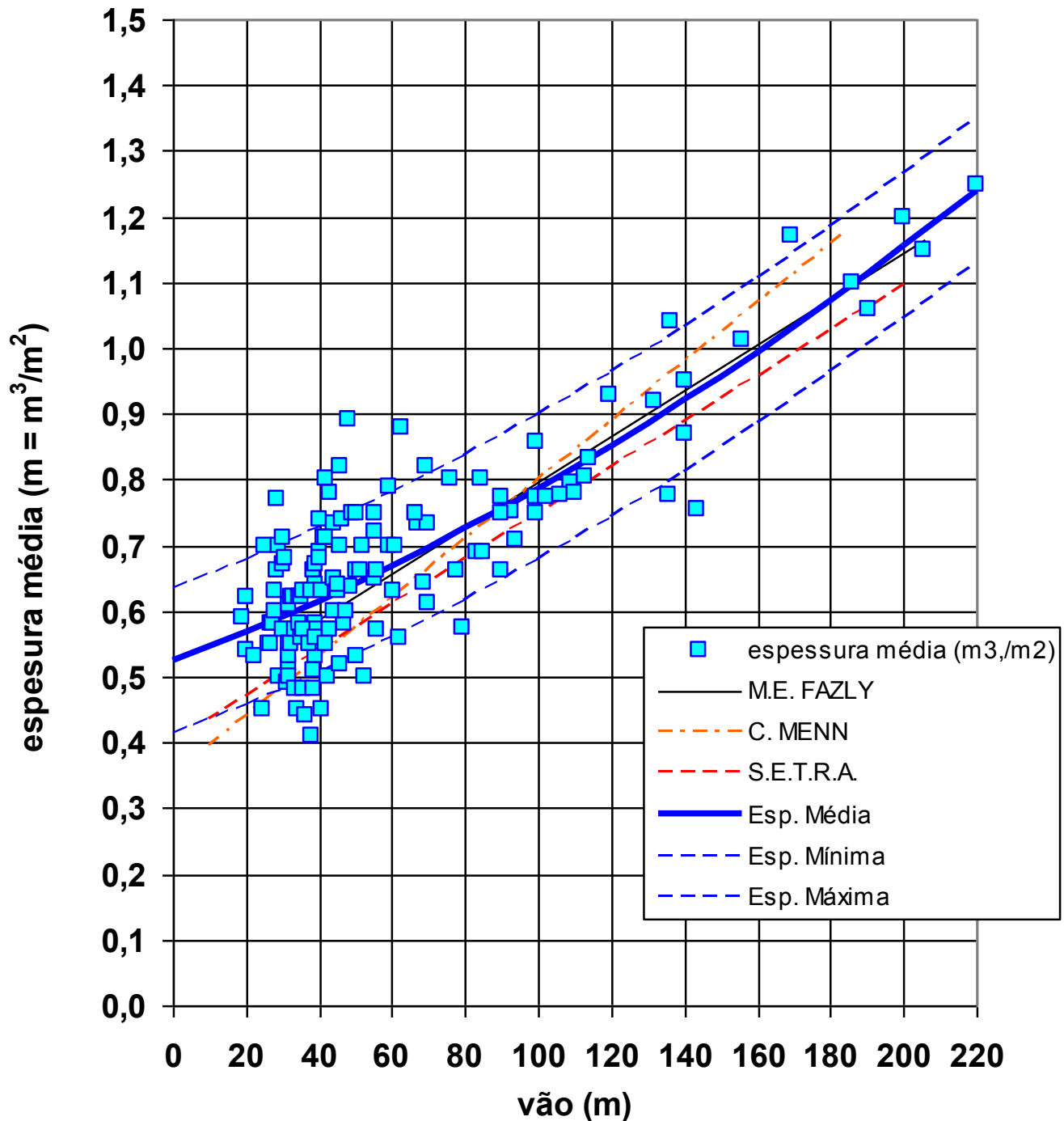


Figura 33 - *Estimativa da quantidade de concreto:*
($25 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 45 \text{ MPa}$)

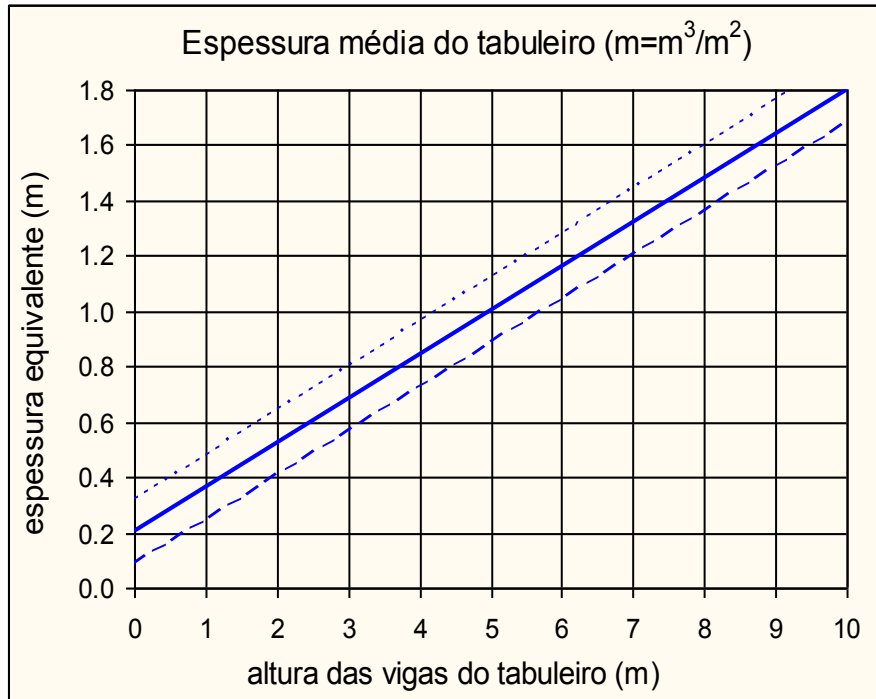


Figura 34 Concretos com : ($25\text{MPa} \leq f_{ck} \leq 45\text{MPa}$)

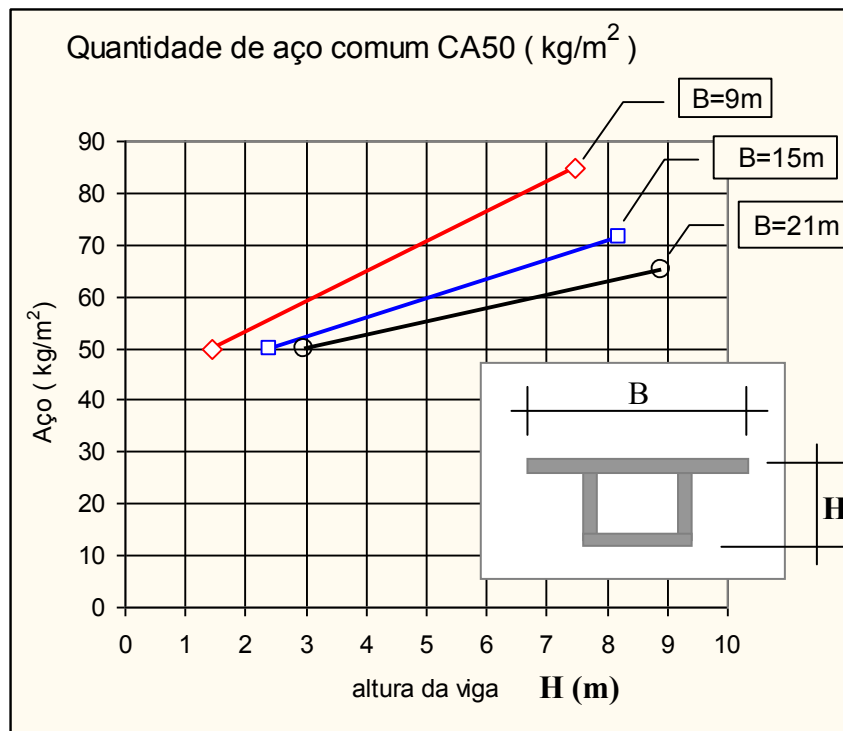


Figura 35 Estimativa da quantidade de aço CA40 ou CA50



Pontes em concreto protendido.

Tabuleiro celular com 2 vigas

Quantidade de armadura de aço de protensão.

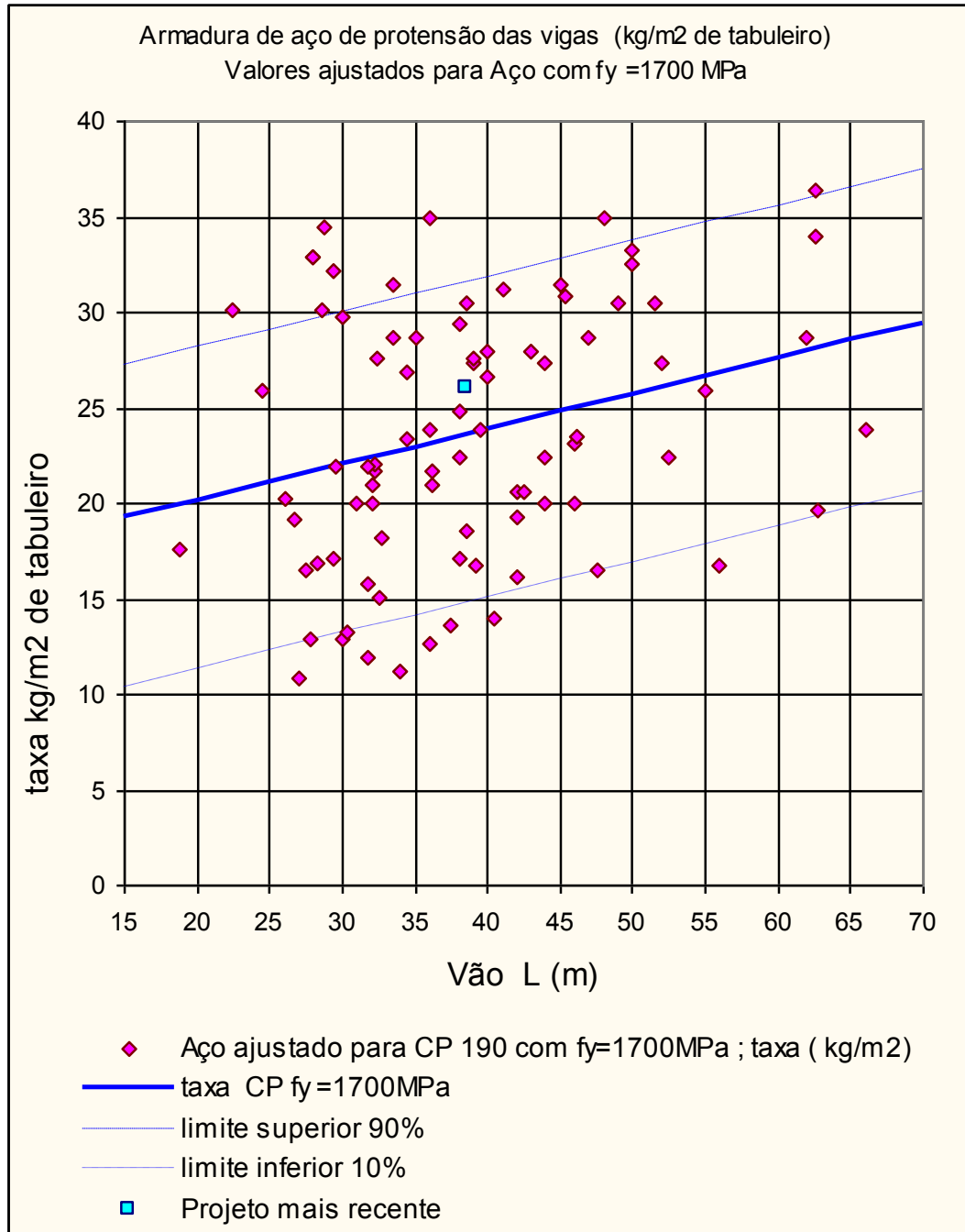


Figura 36 Para concretos com : $(25 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 35 \text{ MPa})$

Os dados das diferentes obras foram ajustados para um aço com $f_y = 1700$ MPa , usado a expressão :

$$\text{Taxa}_{(f_y=1700\text{MPa})} = \text{Taxa}_{(f_y = \text{qualquer})} \times \left[\frac{f_{y \text{ qualquer}} (\text{MPa})}{1700 (\text{MPa})} \right]$$

A taxa de aço de protensão é maior para as pontes com altura menor.



SETRA - *Design guide – Prestressed concrete bridges built using the cantilever method*

http://www.setra.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/US_F0308A_Prestressed_concrete_bridges.pdf

Aço de Protensão longitudinal = 40 to 50 Kg/m³ de concreto

Aço de Protensão transversal da laje = 5 to 7 Kg/m² de laje

Aço da Armadura não protendida :

– Sem protensão transversal na laje = 130 to 170 Kg/m³ (*)

– Com protensão transversal da laje =: 110 to 130 Kg/m³ (*)

No caso de superestrutura pré-fabricada a taxa de armadura de aço comum ($f_y = 400$ MPa a 500 MPa) é um pouco maior, pois as espessuras de concreto são menores do que nas estruturas concretadas no local.

SETRA – Services d'études techniques des routes et autoroutes

http://www.setra.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/pcbridges_cantilevermethod.pdf

Philippe Vion – Emmanuel Bouchon – *Prestressed Concrete Bridges built by the cantilever method - Design and Stability during Erection – New Delhi – fib Symposium on Segmental construction in concrete*

Posição dos cabos superiores

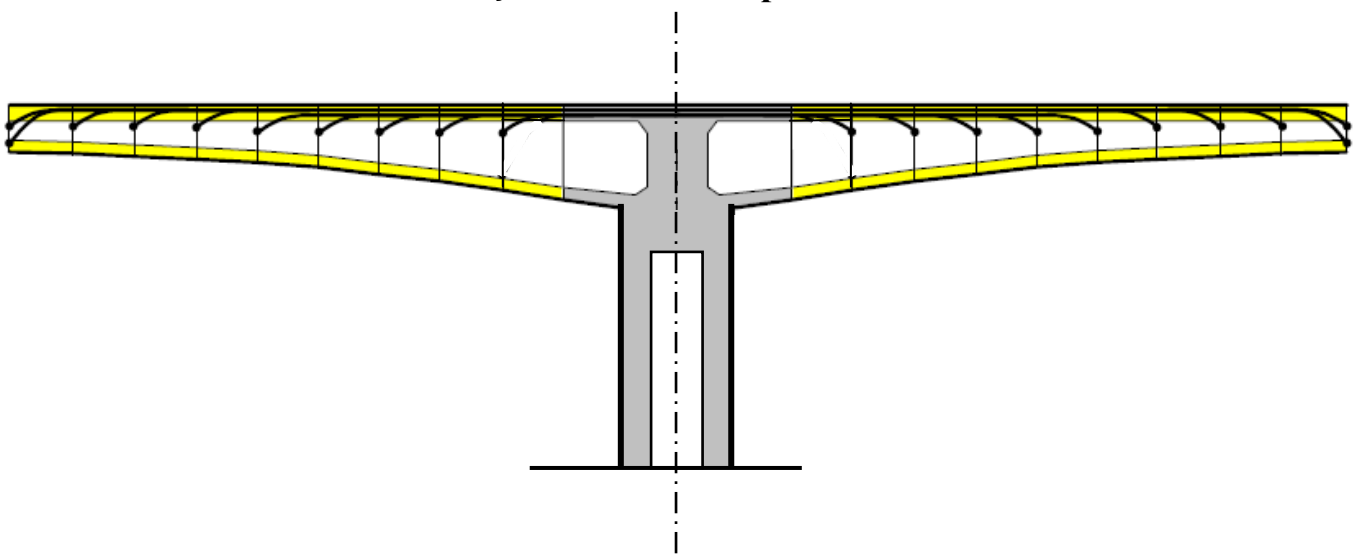
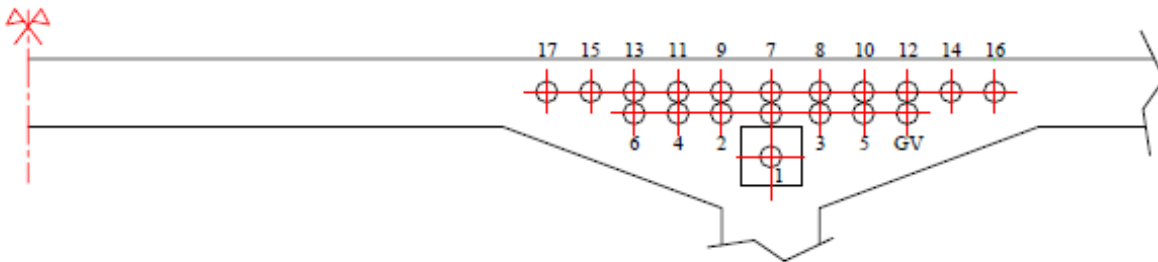


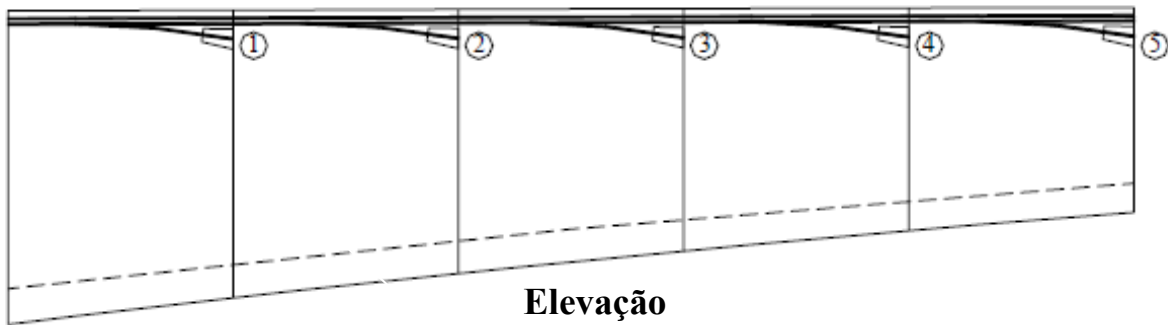
Figura 37



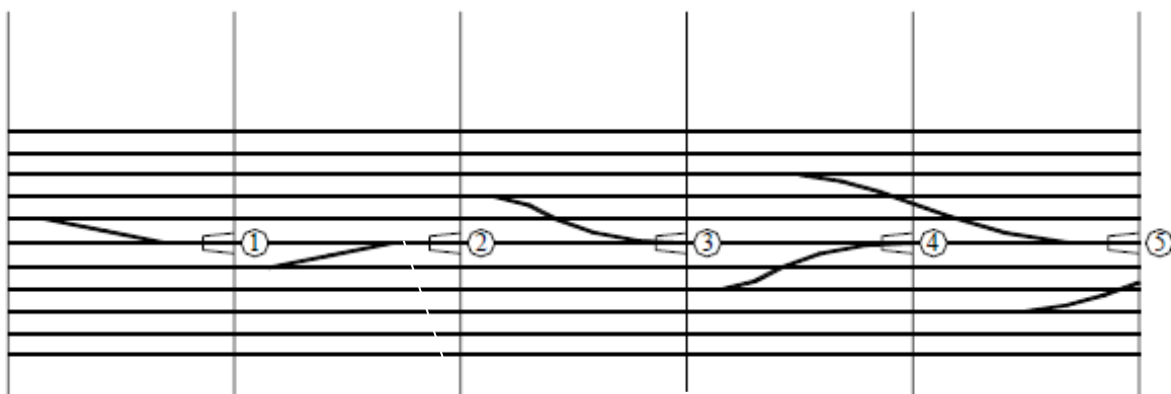
Posição dos cabos superiores



Corte transversal



Elevação



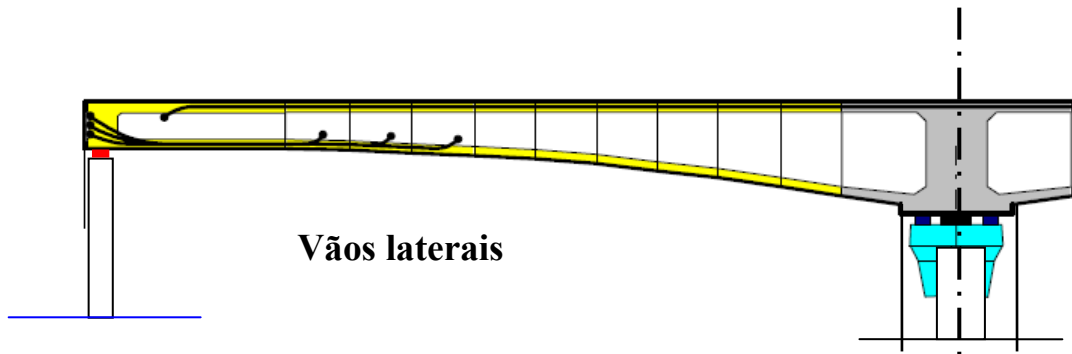
Planta

Figura 38



SETRA – Services d'Études Techniques des Routes et Autoroutes
http://www.setra.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/pcbridges_cantilevermethod.pdf

Posição dos cabos inferiores



Ancoragem dos cabos inferiores

Figura 39



Exemplo: *Estimar as dimensões de uma ponte com os seguintes dados básicos:*

- Tabuleiro celular em concreto protendido.
- Altura variável
- Um vão central de $L = 100\text{m}$
- Uma largura total do tabuleiro $B = 13,6\text{m}$
- *Concretos com $f_{ck} \approx 30\text{MPa}$*

SOLUÇÃO:

1. Altura da viga sobre o pilar : **Figura 22** : Entre 4,7m a 6,5 m .

- Usar $h_{\text{pilar}} = 6,5\text{m}$

2. Altura no meio do vão: **Figura 24** : $h_{\text{pilar}} / h_{\text{vão}} = (1,9 \text{ a } 3,9)$:

$$h_{\text{vão}} = h_{\text{pilar}} / (2,9 \text{ a } 3,9) = 3,4\text{m} \text{ a } 1,7\text{m}$$

- Usar $h_{\text{vão}} = h_{\text{pilar}} / 2,6$; $h_{\text{vão}} = 2,5\text{m}$

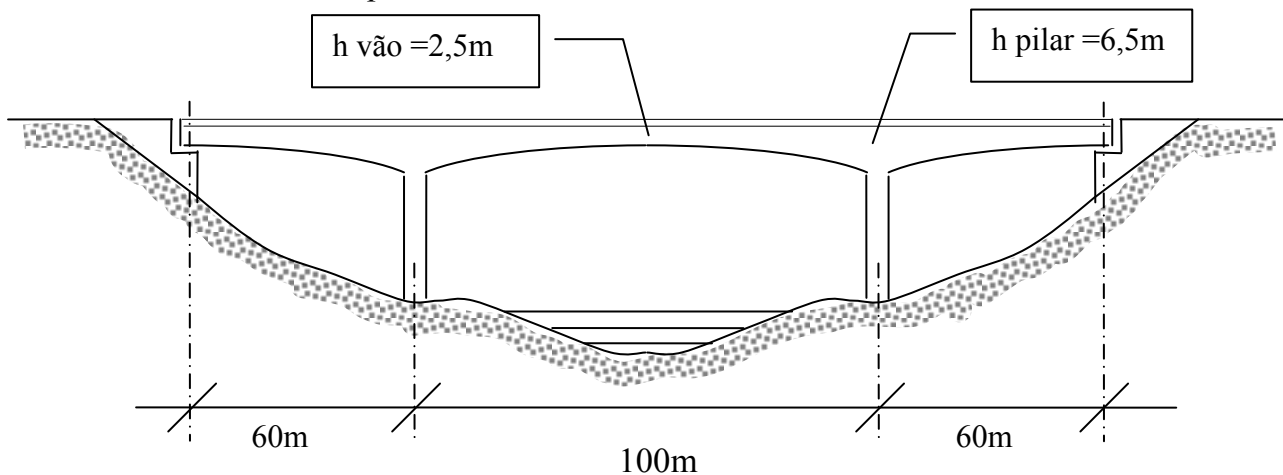


Figura 40

3. Área total das almas das vigas no apoio sobre os pilares: **Figura 32**: $(2bw \cdot h) / B = 0,22 \text{ a } 0,42$

$$\text{Com } B=13,6\text{m} \text{ obtemos: } (2 \times bw) \times h_{\text{pilar}} = 2,99\text{m}^2 \text{ a } 5,71\text{m}^2$$

$$\text{Com } h_{\text{pilar}}=6,5\text{m} \text{ obtemos: } (2 \times bw) = 0,46\text{m} \text{ a } 0,88\text{m} \text{ logo : } bw = 0,23\text{m} \text{ a } 0,44\text{m}$$

$$\text{Usar : } bw = 0,40\text{m}$$

- No meio do vão usar a espessura mínima $\approx 0,20\text{m}$

4. Largura da laje inferior na seção sobre o pilar. $b_{\text{inf.}} = 0,40 B \text{ a } 0,65 B = 5,5\text{m} \text{ a } 8,8\text{m}$

- Usar $b_{\text{inf.}} = 0,50 B = 6,8\text{m}$

5. Espessura da laje inferior na seção do apoio: **Figura 31** : $(b_{\text{inf.}} \cdot h_{\text{inf.}}) / B = 0,38 \text{ a } 0,53$

$$\text{Com } B=13,6\text{m} \text{ e } b_{\text{inf.}}=6,8\text{m} \text{ obtemos: } h_{\text{inf.}} = 0,76\text{m} \text{ a } 1,06\text{m}$$

- Usar $h_{\text{inf.}} = 0,90\text{m}$
- No meio do vão usar a espessura mínima $\approx 0,15\text{m}$

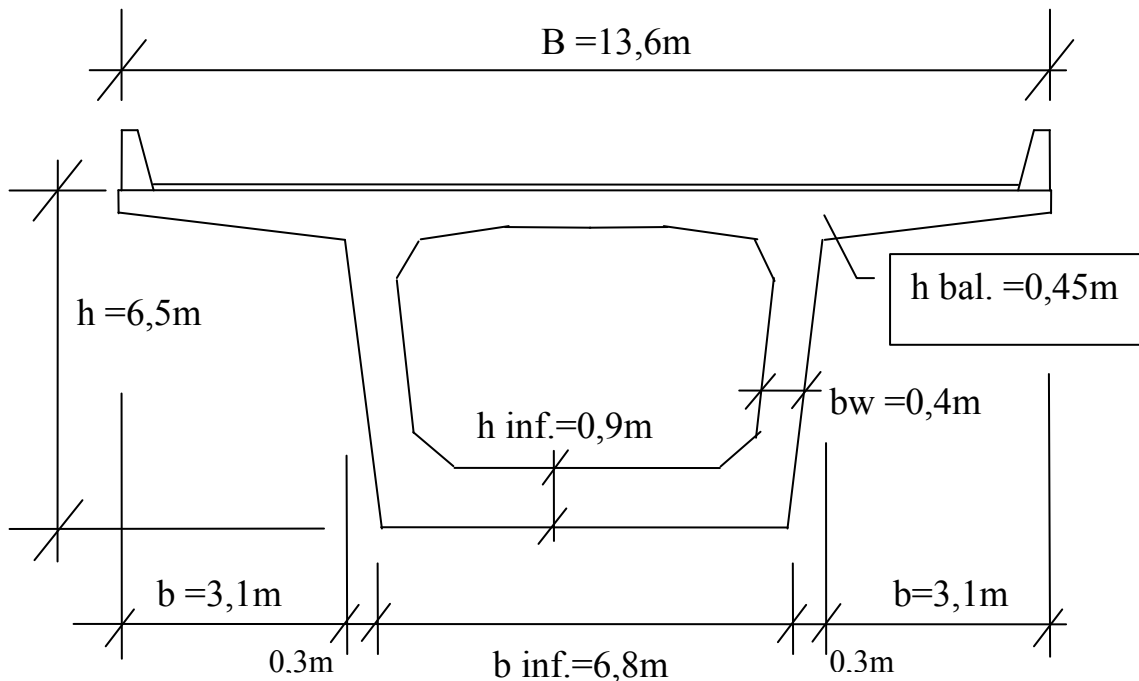
6. Espessura da laje em balanço : Com o comprimento $b = 3,10\text{m}$, obtemos na **Figura 30**:

$$h_{\text{bal.}} = 0,45\text{m} > h_{\text{bal.}} \text{ mínima} = 0,35\text{m}$$

- Usar $h_{\text{bal.}} = 45\text{cm}$

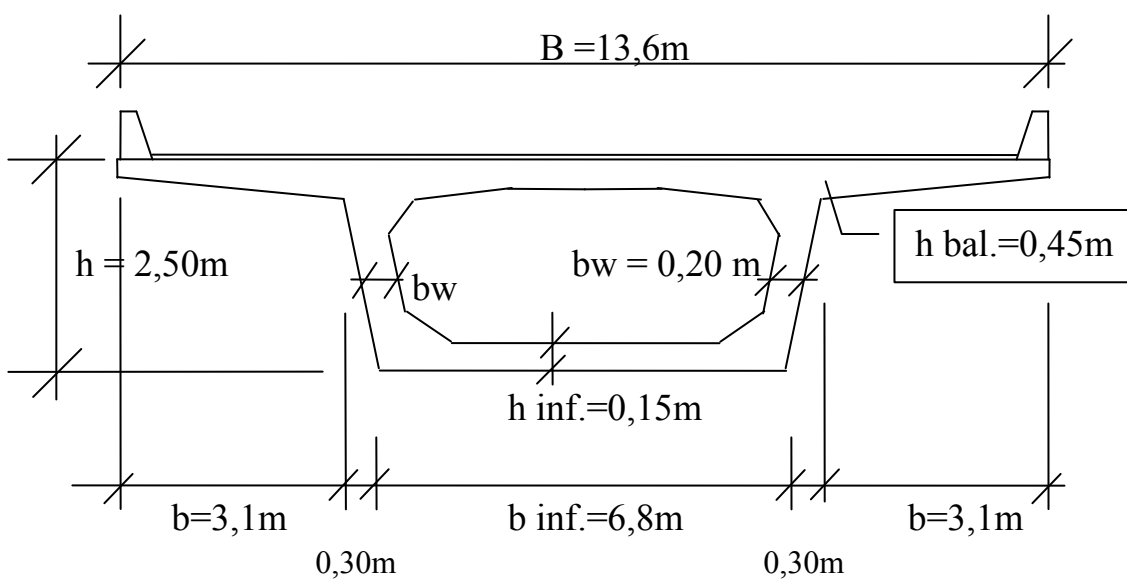


Pré-dimensionamento das Seções transversais



Seção transversal sobre o pilar

Figura 41



Seção transversal no meio do vão

Figura 42



Compatibilizando as seções “pilar” e “meio do vão”.

- A largura da laje inferior varia ao longo da ponte para que seja mantida a inclinação da face lateral. (Varia de 6,8m a 7,2m)

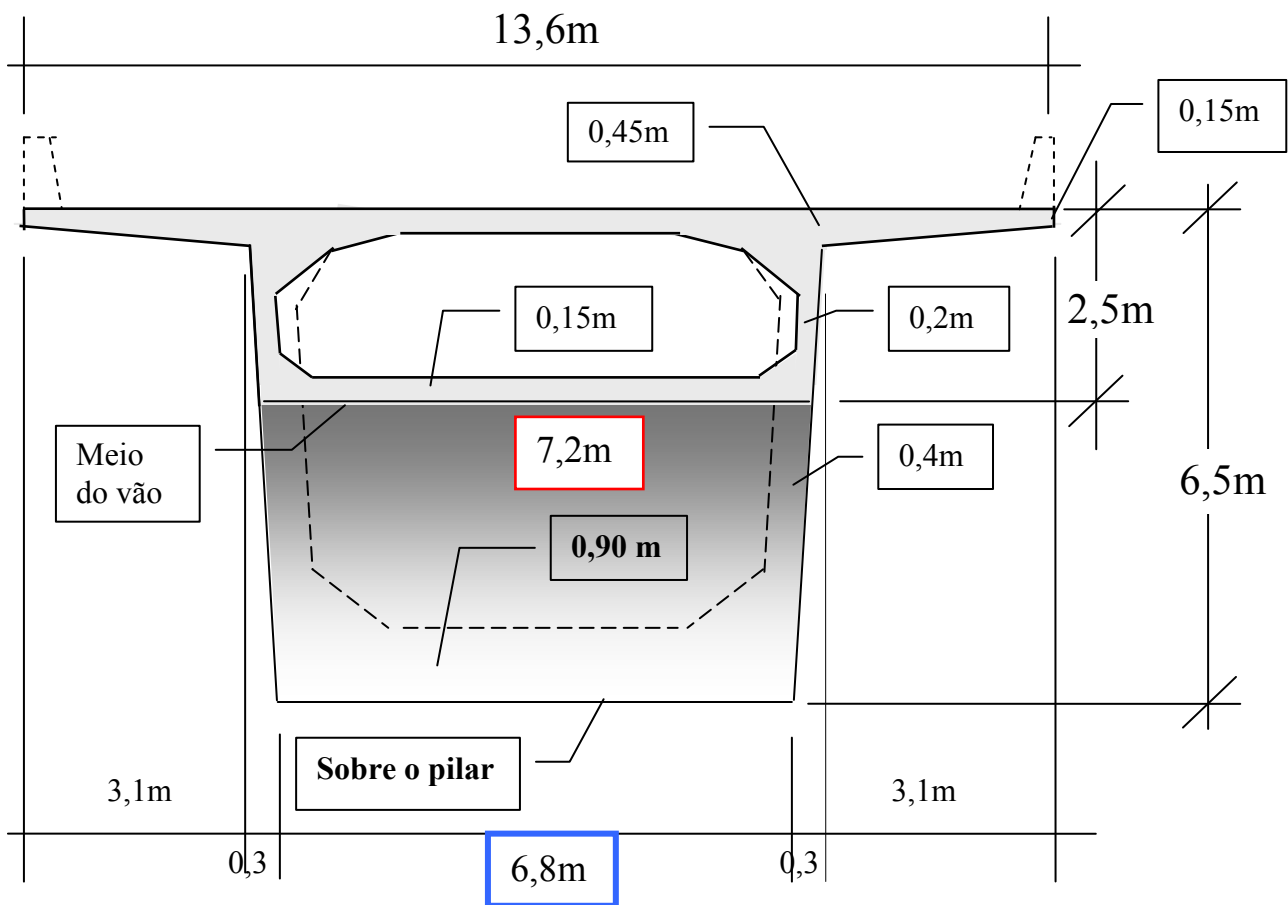


Figura 43

- Essas dimensões estimadas servem apenas para um estudo inicial da obra, inclusive para uma avaliação das fundações.
- É evidente que as dimensões dependerão da resistência do concreto que será usado na obra.
- O cálculo estrutural pode confirmar ou não as dimensões estimadas.



Quantidade de materiais – Estimativas aproximadas :

Área do Tabuleiro = (60m + 100m + 60m) x 13,6m = 2992 m² ≈ 3000 m²

Concreto :

Para um vão de 100m, a espessura média segundo a Figura 33 pode ser estimada em 80cm , na faixa de 70cm a 90cm.

Volume de concreto ≈ Área do Tabuleiro x espessura média = 3000m² x 0,8m ≈ 2400 m³ =
= (2100m³ a 2700 m³) .

Aço comum:

Na Figura 35, no apoio, com altura da viga = 6,5m e largura do tabuleiro = 13,6m obtemos a taxa de 75 kg/m².

No meio do vão, e nos apoios extremos, com altura da viga = 2,5m e largura do tabuleiro = 13,6m obtemos a taxa de 52 kg/m².

Um valor médio para a superestrutura seria = (75 + 52) / 2 = 63,5 kg/m² ≈ 65 kg/m²

O total de aço CA50 seria = 3000 m² × 65 kg/m² ≈ 195 ton

Segundo o SETRA o valor mínimo a considerar é de 130kg/m³ de concreto = 2400 m³ × 130 kg/m³ ≈ 312 ton

Aço de Protensão :

Na Figura 36 , aço de protensão CP 190 RB , com f_y = 1700 MPa ≈ 50 kg/m²

Total = 3000 m² × 50 kg/m² ≈ 150 ton.

Segundo o SETRA o valor mínimo a considerar é de 40kg/m³ de concreto = 2400 m³ × 40 kg/m³ ≈ 96 ton

- *Observa-se que as estimativas de quantidades de aço, comum ou de protensão, têm dispersão muito grande.*



Referências :

- 1- Yves Guyon – Constructions en Béton Précontraint - Volumes 1 e 2 - Classes. États Limites – Cours CHEBAP - Eyrolles 1966
- 2- Fritz Leonhardt – Construções de Concreto – Volume 1 a 6 - Editora Interciência 1979
- 3- Eduardo Thomaz – Levantamento de dimensões de pontes com vigas pré-moldadas protendidas e de pontes com tabuleiro celular– 1975
- 4- Walter Podolny, Jr – Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation – Concrete cable-stayed bridges and the feasibility of standardization of segmental bridges in the United States of America. FIP 90 – Hamburg 1990
- 5- Kulka, F. , Thoman, S.J. and Lin, T.Y. , “ Feasibility of Standard Sections for Segmental Prestressed Concrete Box Girder Bridges” - Report FHWA/RD -82 / 024 (citado em [4]).
- 6- Jörg Schlaich – The design of Structural concrete – IABSE Workshop – New delhi 1993
- 7- Fernando Uchoa Cavalcanti e Flávio Mota Monteiro – Adaptação de Projetos de Obras de Arte Especiais da Ferrovia do Aço. – Empresa de Engenharia Ferroviária – 1982
- 8- Kupfer Hebert – Tests on Prestressing Shear Reinforcement – Spannbetonbau in der Bundesrepublik Deutschland – 1983 -1986 - FIP 10th Congress - New-Delhi 1986.
- 9- Eduardo Thomaz – Notas de aula de Concreto Protendido - Pontes com vigas pré-moldadas protendidas e pontes com tabuleiro celular – IME – 2002 – RJ
- 10- Festschrift Rüsck – Stahlbetonbau – Bericht aus Forschung und Praxis - Editora Wilhelm Ernst & Sohn – Berlin – 1969
- 11- Walter Pfeil – Ponte Rio Niterói – Processos executivos. 1975
- 12- Diaz, Ernani : The technique of glueing precast elements of the Rio-Niteroi bridge. Matériaux et Constructions , Nr. 43 , Jan. / Febr. 1975 , S. 43-50
- 13- Noronha, A.A. und Muller, J. : Les tabliers en béton précontraint préfabrique du pont Rio-Niteroi au Brésil . Travaux , Dez. 1974, S. 52-59.
- 14- Kupfer Hebert – Segmentäre Spannbetonträger im Brückenbau - Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – Heft 311 – Berlin - 1980
- 15- Walter Pfeil - Concreto Protendido – Métodos construtivos - Perdas de protensão – 3^a edição Editora Didática e Científica Ltda -1991
- 16- 10^o B.E.C - 10^o Batalhão de Engenharia e de Construção – E.B - Lajes / S.C. - Nivelamento do tabuleiro da ponte sobre o rio Pelotas. Acompanhamento anual – 1992.
- 17- Projconsult – A ponte sobre o rio São Francisco - Bom Jesus da Lapa – BAHIA–Relatório descritivo do projeto e da obra. – 1990



- 18- Roger Pamponet da Fonseca , José Manoel Morales Sánchez – A razão da Leveza da Ponte de Niemeyer em Brasília - Congresso III - ABPE – 21 Abril 2010- Rio de Janeiro
- 19- Menn, C. (1990). *Prestressed Concrete Bridges*.- Birkhäuser Verlag, Basel, Switzerland.
- 20- S.E.T.R.A. (2007). Prestressed Concrete Bridges built by cantilever method – Design and Stability during Erection www.setra.equipement.gouv.fr/IMG/doc/pap6_22-vion.doc (30.08.2009)
- 21- M. Ebrahim Fazly - Entwurf und Bemessung einer Extradosed-Brücke unter Verwendung von ultra-hochfestem Beton - Technische Universität Hamburg-Harburg - Institut für Baustatik und Stahlbau Oktober 2009

+++