



ESCOLA POLITÉCNICA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS E FUNDAÇÕES

APOSTILA PONTES E GRANDES ESTRUTURAS
PEF 3404

Professores: Kalil Skaf

Rui Oyamada

SÃO PAULO

2021

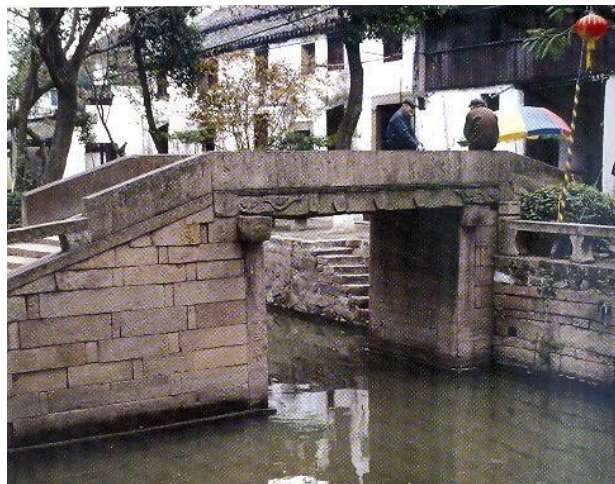
1. INTRODUÇÃO

De maneira geral, uma construção é concebida para atender uma determinada finalidade. No caso das Pontes, a sua implantação envolve a utilização de mais diversos materiais, adequadamente dispostos e convenientemente solidarizados.

O objetivo dos conceitos que se seguem é de desenvolver a sensibilidade dos alunos, de modo a otimizar a concepção estrutural, detectar seus pontos condicionantes e desenvolver o conhecimento na arte do detalhamento, aspectos condicionantes no desempenho das estruturas durante toda a sua vida útil.

A estrutura de uma ponte oferece segurança quando possui condições de suportar sem atingir um estado limite e estar em condições adequadas de funcionalidade a todas as ações, com as intensidades e combinações mais desfavoráveis ao longo da vida útil para a qual foi projetada.

2. EVOLUÇÃO DAS PONTES



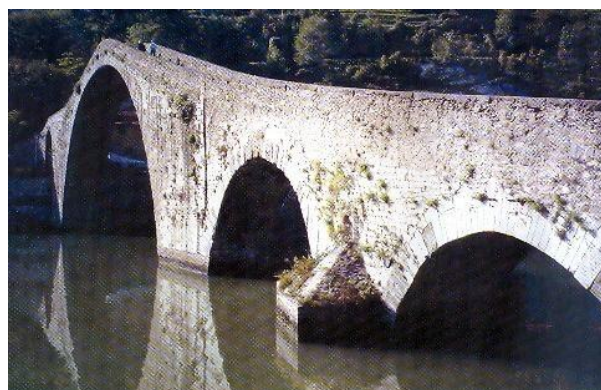
TAIPING BRIDGE – China



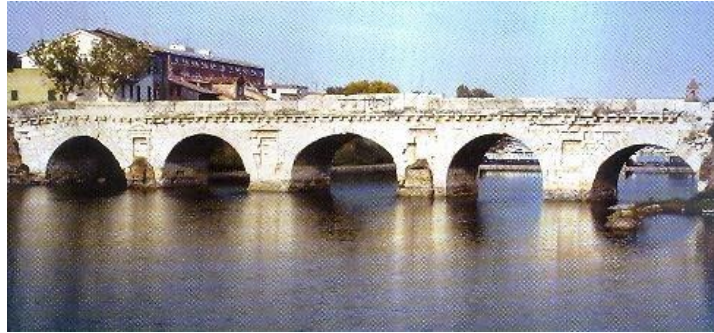
CLAPPER BRIDGE – UK



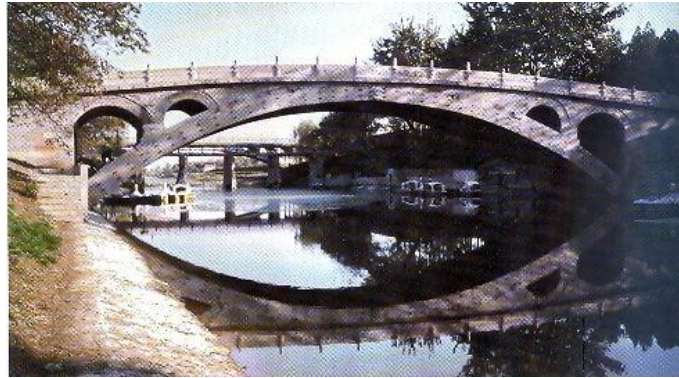
ANPING BRIDGE - CHINA



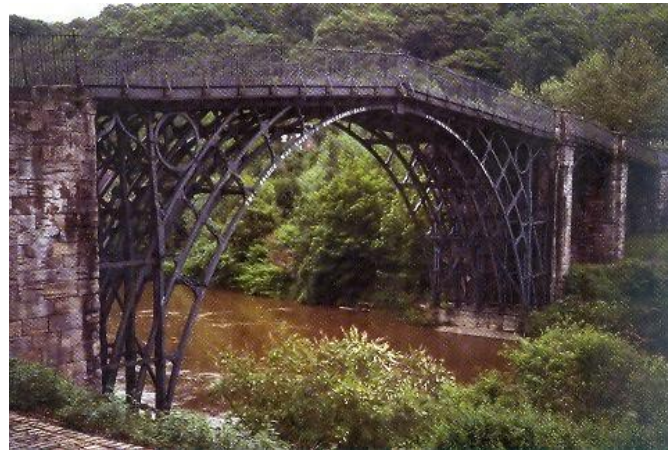
PONTE DELLA MALLALENA – Italia - 1317



PONTE AUGUSTO – Rimini – Italia - 1500



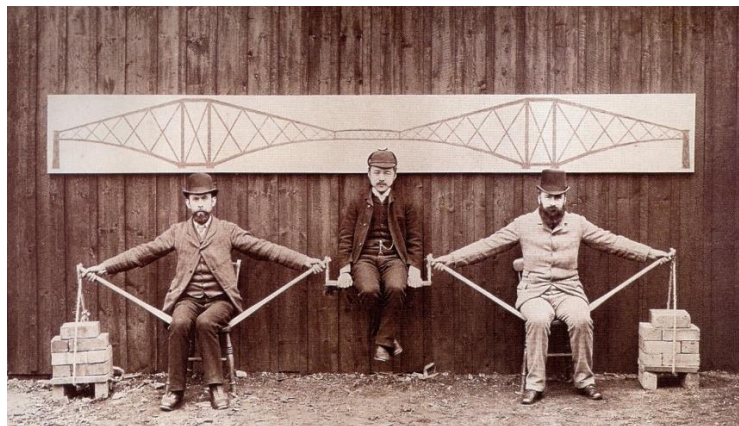
PONTE ANJI – Hebei - China



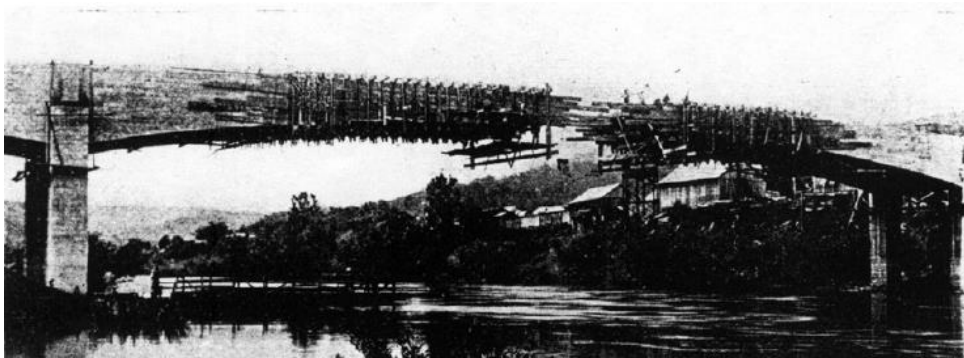
Iron arch bridge – Severn River – Inglaterra - 1799



Ponte Pênsil Menai, País de Gales, 1819
Pênsil– vão 175m



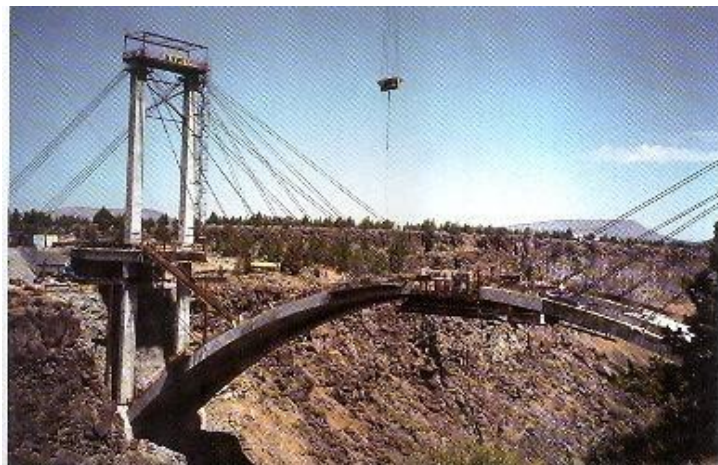
FORTH BRIDGE – Edinburgh – Scotland - 1890



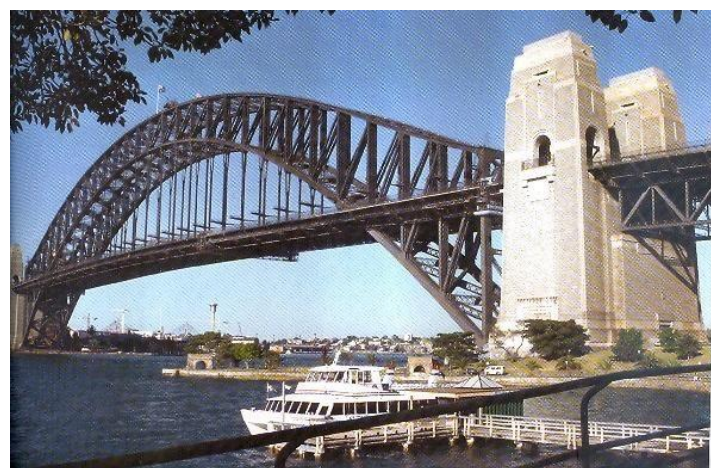
Rio dos Peixes, Brasil, 1930
Viga em concreto armado – vão 68m



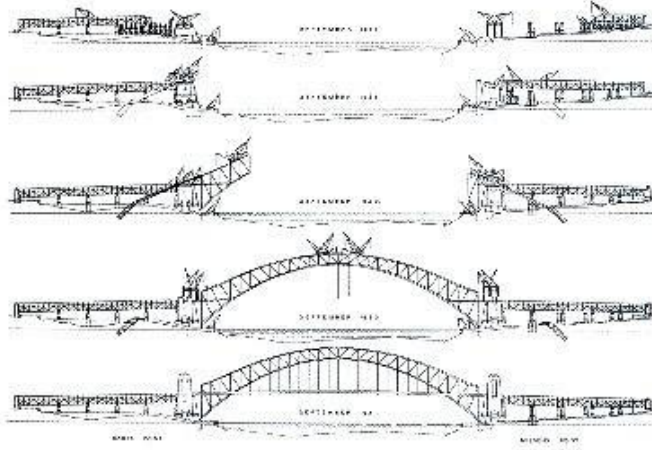
BIXBY CREEK BRIDGE – California – Estados Unidos - 1932



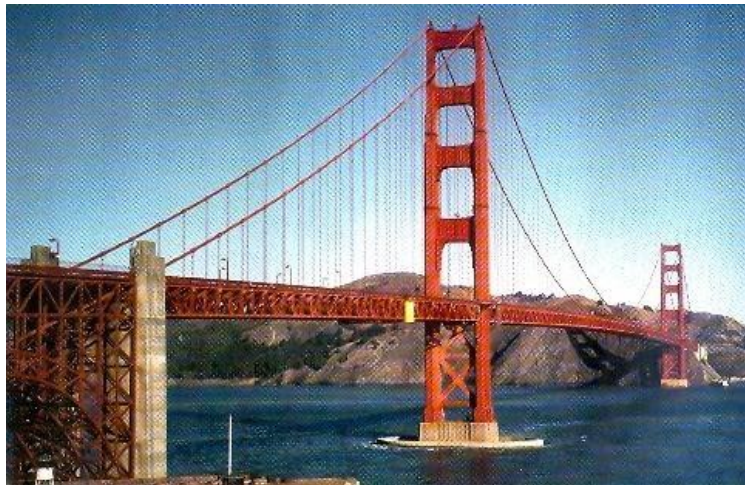
Construção do Arco



SYDNEY HARBOUR BRIDGE - 1932



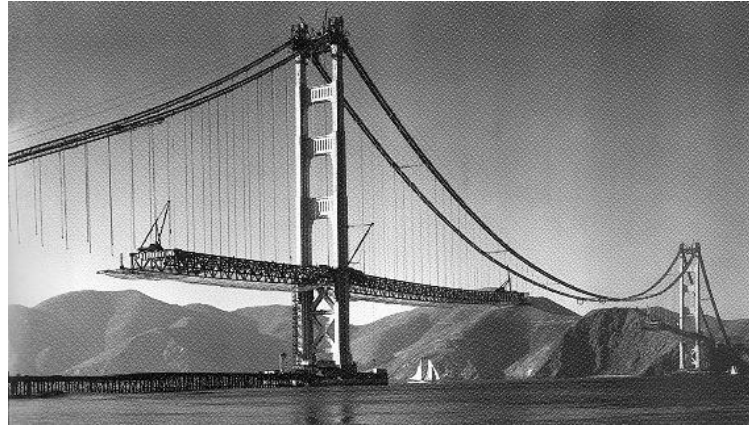
SYDNEY HARBOUR BRIDGE - 1932



GOLDEN GATE BRIDGE – São Francisco - 1937



GOLDEN GATE BRIDGE – São Francisco - 1937

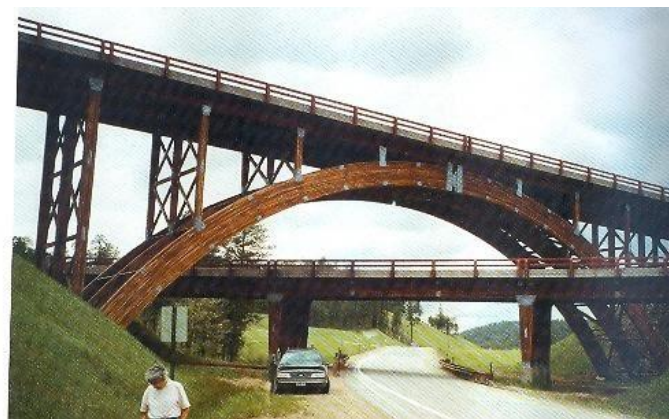


GOLDEN GATE BRIDGE – São Francisco - 1937

Ponte Pensil



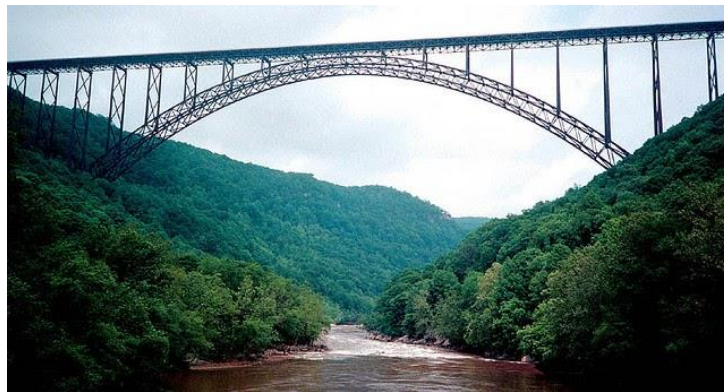
Ponte Donzère, França, 1952
Primeira ponte estaiada moderna – vão 81m



KEYSTONE WYE BRIDGE – Dacota – USA - 1968



Rio-Niterói, Brasil, 1974
Viga de aço – vão 300m



New River Gorge, USA, 1977
Arco de aço – vão 510m



New River Gorge, USA, 1977
Arco de aço – vão 510m



Krk, Croácia, 1980
Arco de concreto – vão 390m



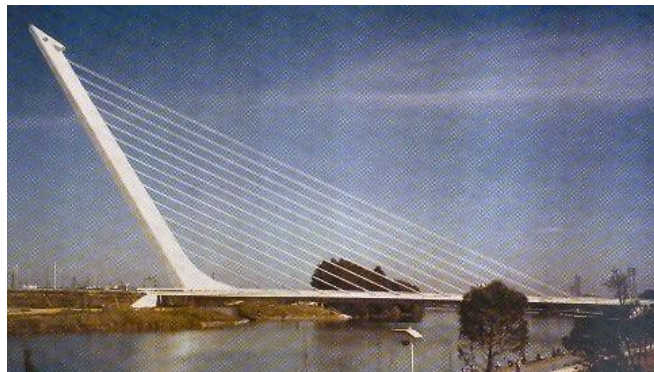
Krk, Croácia, 1980
Arco de concreto – vão 390m



Skarnsund, Noruega, 1991
Estaiada de concreto – vão 530m



Skarnsund, Noruega, 1991
Estaiada de concreto – vão 530m



PONTE DE ALAMILLO – Sevilha - Espanha - 1992



Saint Nazaire, França, 1998
Estaiada aço/concreto – vão 890m



Saint Nazaire, França, 1998
Estaiada aço/concreto – vão 890m



Akashikaiko, Japão, 1998
Pensil de aço – vão 1900m



Akashikaiko, Japão, 1998
Pensil de aço – vão 1900m



Stolmasundet, Noruega, 1998
Viga de concreto – vão 301m



Tatara, Japão, 1999
Estaiada aço/concreto – vão 890m



Tatara, Japão, 1999
Estaiada aço/concreto – vão 890m



GATESHEAD MILLENNIUM BRIDGE – Sidney



PASSARELA – Leonardo da Vinci – Noruega - 2001



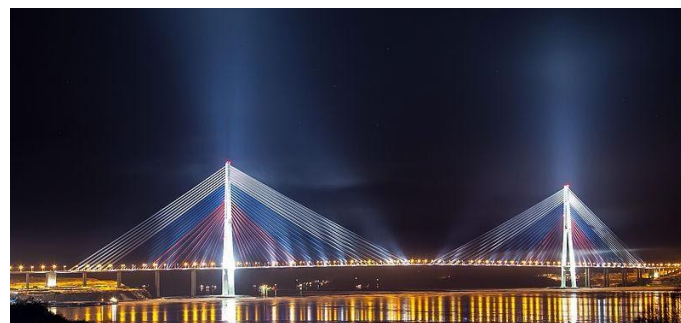
Lupu Bridge, China, 2003
Maior Ponte de Arco – vão550m



Sutong Bridge – China, 2012
Estaiada - Vão de 1088m



Bridge to Russky Island – Russia, 2012
Estaiada – Vão de 1104m



Bridge to Russky Island – Russia, 2013
Estaiada – Vão de 1104m

3 PRINCÍPIOS BÁSICOS DA CONCEPÇÃO

Os princípios que se seguem são baseados na intuição, capacidade de observação do comportamento estrutural e fundamentados na teoria das estruturas.

3.1 PRIMEIRO PRINCÍPIO (CAMINHAMENTO DAS CARGAS)

Nos sistemas estruturais é fundamental acompanhar o caminhamento da carga desde o seu ponto de aplicação até as fundações, identificando seus pontos críticos de modo a controlar os seguintes aspectos:

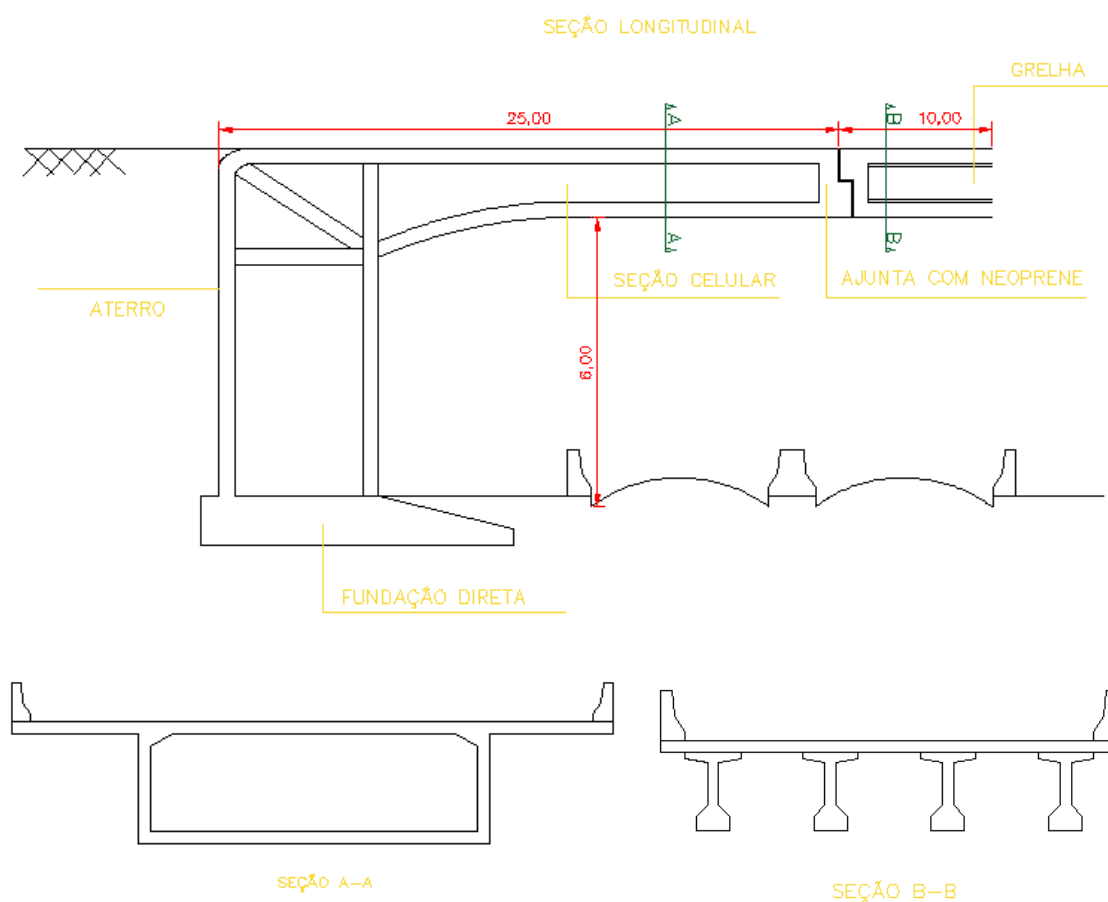
- a) Campo de deslocamentos.
- b) Capacidade resistente compatível com as premissas e Normas afins.
- c) Detalhamento aderente ao estado do conhecimento e compatível com a vida útil prevista.
- e) Nas estruturas submetidas a ações dinâmicas (pontes, portos, torres de transmissão, estruturas em áreas com ação sísmica, etc), proceder análise modal para conhecer as frequências próprias do sistema afim de compará-la com as fontes de excitação.
- f) Funcionalidade e acessibilidade para manutenção.

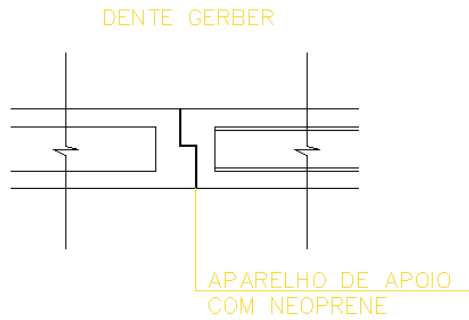
3.2 SEGUNDO PRINCÍPIO (CENTRO DE GRAVIDADE DAS CARGAS E DAS FUNDAÇÕES)

O desempenho dos sistemas estruturais é mais eficiente quando nas fundações o seu centro de gravidade é próximo do centro de gravidade das cargas.

Observar que nas estruturas onde a carga variável é predominante, principalmente onde as cargas horizontais são elevadas com relação as cargas verticais, a concepção para atingir o princípio pode não ser imediata (p.ex dolphins nas áreas portuárias para amarração/atracação de navios, pontes de pequeno vão, muros de arrimo, torres de transmissão, etc).

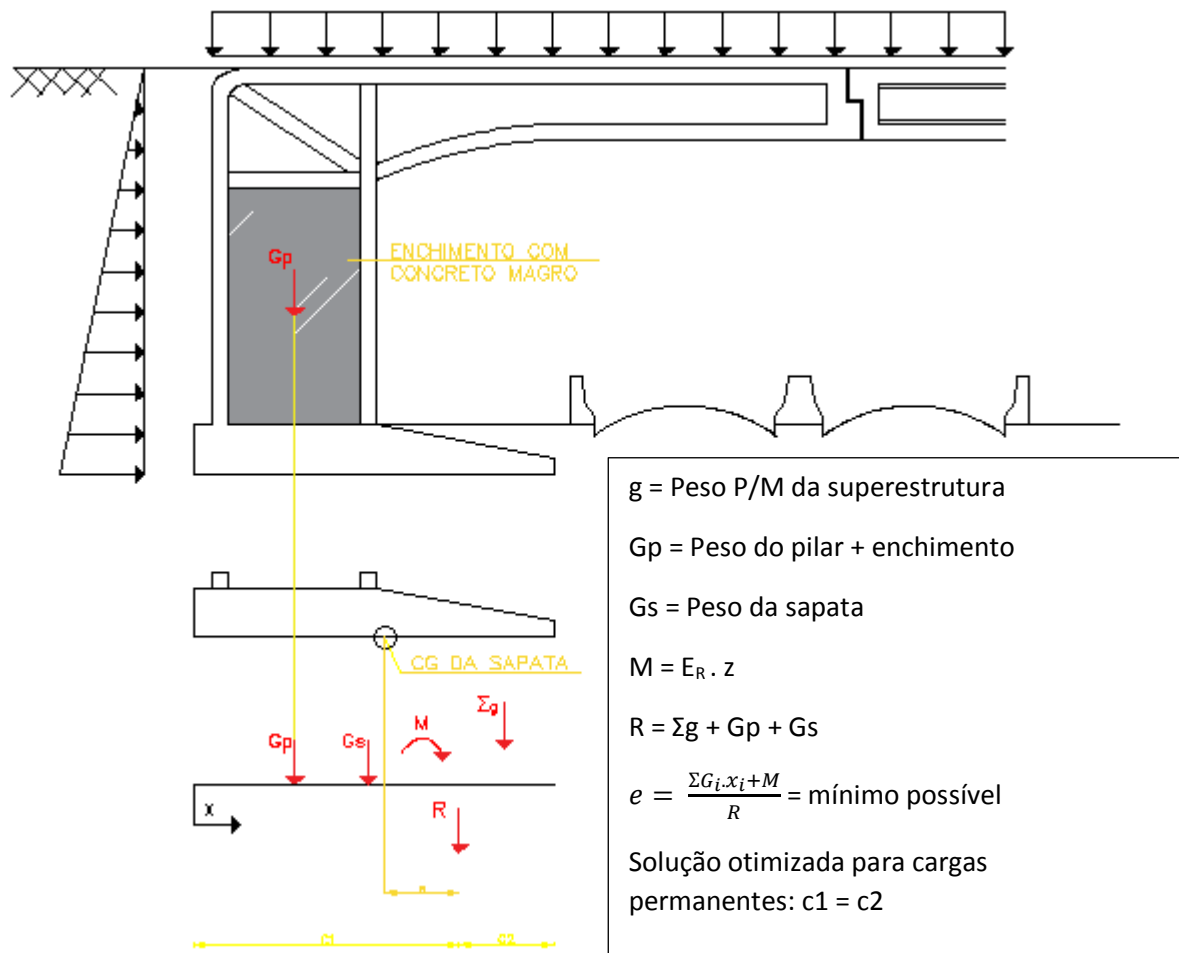
Exemplo: Viaduto sobre a Via Anhanguera no km 39





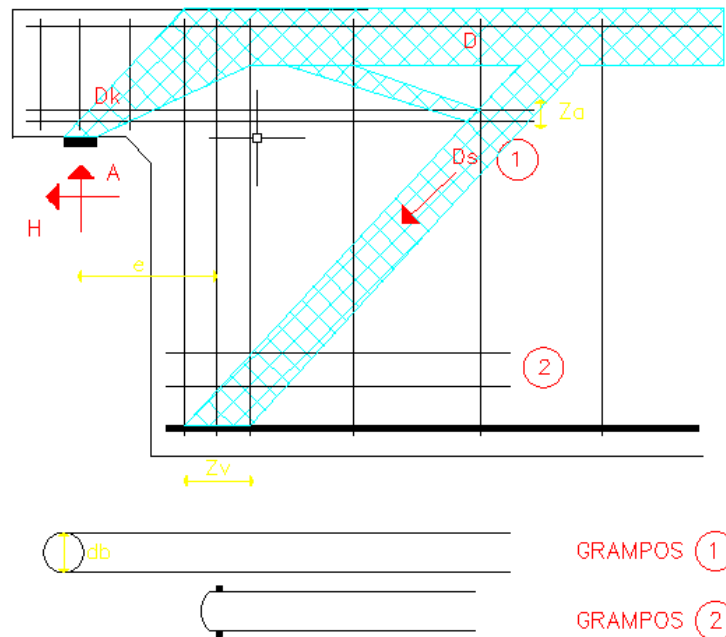
3.2.1 Pontos Críticos no caminhamento das cargas:

- Definição das cargas e do seus pontos de aplicação;
- Dimensionamento e detalhamento da conexão da superestrutura com o pilar;
- Dimensionamento e detalhamento dos aparelhos de apoio;
- Dimensionamento e detalhamento da conexão do pilar com a fundação.



3.2.2 Detalhes de alguns pontos críticos:

a) Dente Gerber:

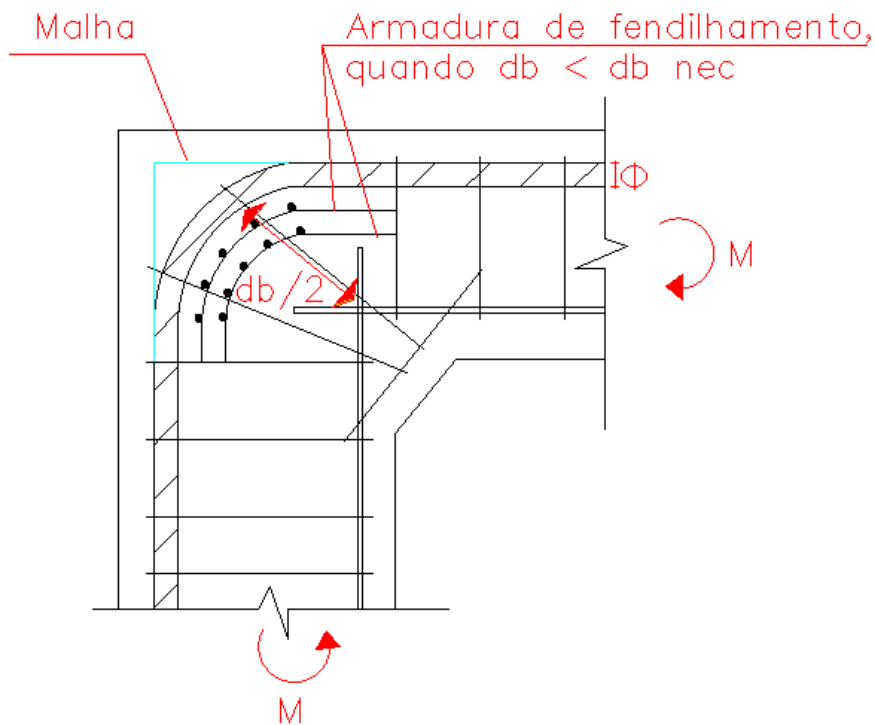


a.1.) Pontos críticos:

- Armadura de suspensão de carga, indicada Z_v no desenho.
- Ancoragem da armadura de tirante, lado direito, indicada por Z_a no desenho.
- Ancoragem da armadura de tirante, lado esquerdo, ver croquis dos grampos.

Verificação da biela de compressão, indicada por D_k no desenho

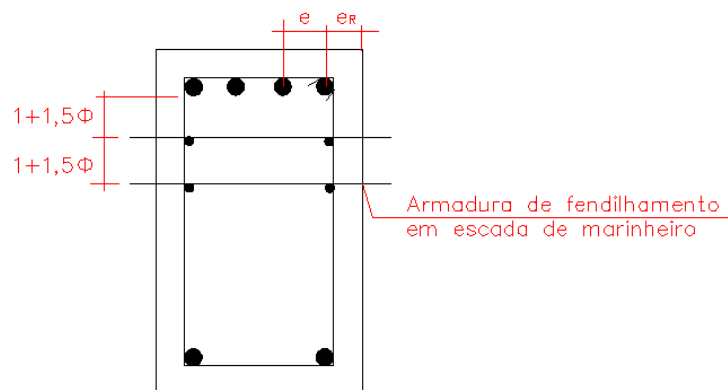
b) Nós de pórticos:



Armadura de nós de pórticos no caso de momento negativo (tração externa).

Armadura de fendilhamento somente quando $db < db_{nec}$

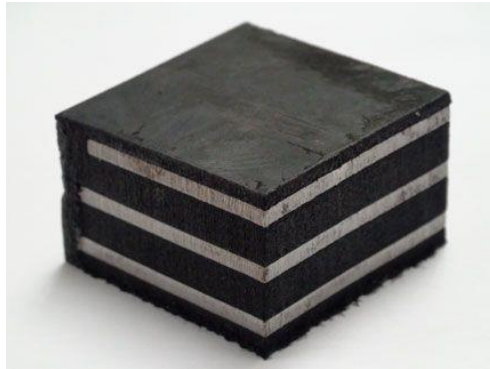
SEÇÃO TRANSVERSAL



b.1.) Pontos críticos:

- Continuidade da armadura negativa.
- Perda de braço de alavanca no nó.
- Emenda das armaduras de flexão.
- Armaduras de controle de fissuração.

c) Aparelho de apoio de Neoprene Fretado



c.1.) Pontos críticos:

-Nivelamento do berço de montagem.

-Verificações relativas ao aparelho (distorção, rotação, tensões normais máxima e mínima, entre outros.)

3.3 TERCEIRO PRINCÍPIO (CAMINHO MAIS CURTO)

A solução que tende a ser a mais econômica na concepção dos sistemas estruturais é a que reduz o caminhamento de carga entre o ponto de aplicação e as fundações.

São fatores condicionantes a serem observados:

- a) A funcionalidade do sistema deve ser mantida, ou seja, o menor caminho de carga é condicionado pela manutenção de gabaritos vertical e horizontal.
- b) A concepção arquitetônica pode ser condicionante ante a economia.
- c) A solução de menor caminho de cargas deve atender as restrições de métodos construtivos.

São exemplos:

As pontes em vigas pré-moldadas, onde os vãos de modo geral não superam 45,00 m, apresentam menor custo que uma obra estaiada de 180,00 m comparada com 4 vãos de 45,00 m, apesar do maior número de pontos de fundação.

Observar que nas obras em viga as cargas têm caminho mais curto, apesar do pior desempenho do sistema que trabalha a flexão, cortante e torção, menos eficiente que na estaiada onde a força normal é condicionante, porém com maior caminhamento de carga até chegar as fundações uma vez que caminha do tabuleiro para o mastro através dos estais, para caminhar para a fundação.

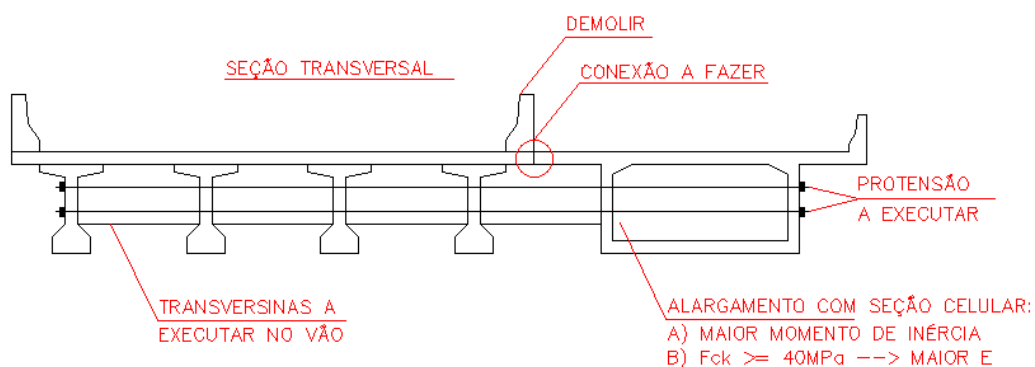
3.4 QUARTO PRINCÍPIO (DA RIGIDEZ)

Nas estruturas isostáticas, o caminhamento de carga fica definido pelas equações de equilíbrio, nas estruturas hiperestáticas, a rigidez relativa entre elementos do sistema estrutural é fator condicionante no caminhamento. Entre dois caminhos possíveis, o caminho de maior rigidez é preferencial, isto é, os elementos estruturais mais rígidos recebem maior parcela das cargas.

Nos sistemas estruturais são possíveis $(g+1)$ caminhos de carga, onde g é o grau de hiperstaticidade do sistema.

Exemplos:

3.4.1 Alargamento de pontes para aumento do número de faixas de rolamento.



<p>Obra existe $F_{ck} \geq 25$ MPa</p> <p>Projetada para veículos com carga para eixo de 120,00 kN</p>	<p>Projetada para veículos com carga para eixo de 150,00 kN, considerando o mesmo eixo na obra existe</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------

Na seção transversal acima, a parte em vigas pré-moldadas representa a obra original que precisa ser alargada devido ao aumento de fluxo de veículos. A obra original

foi projetada com coma cargas variáveis menores que as hoje atuam (carga por eixo dos caminhões), estando já com segurança reduzida ante o requerido por Norma, além do concreto, executado com resistência mais baixa que atuais em função do estado do conhecimento na época da execução.

De modo a transferir mais carga para a região do alargamento, as soluções para o seu aumento transversal de rigidez são:

- a) Maior rigidez da seção geométrica com uso de seção celular (maior momento de inércia por metro transversal com relação a concepção original por possuir laje inferior).
- b) Uso de concreto de maior resistência a compressão para aumentar o módulo de elasticidade (aumento do produto EI).
- c) Uso de protensão transversal em alguns pontos do vão para aumentar a rigidez transversal e facilitar a transferência de carga para a seção celular.

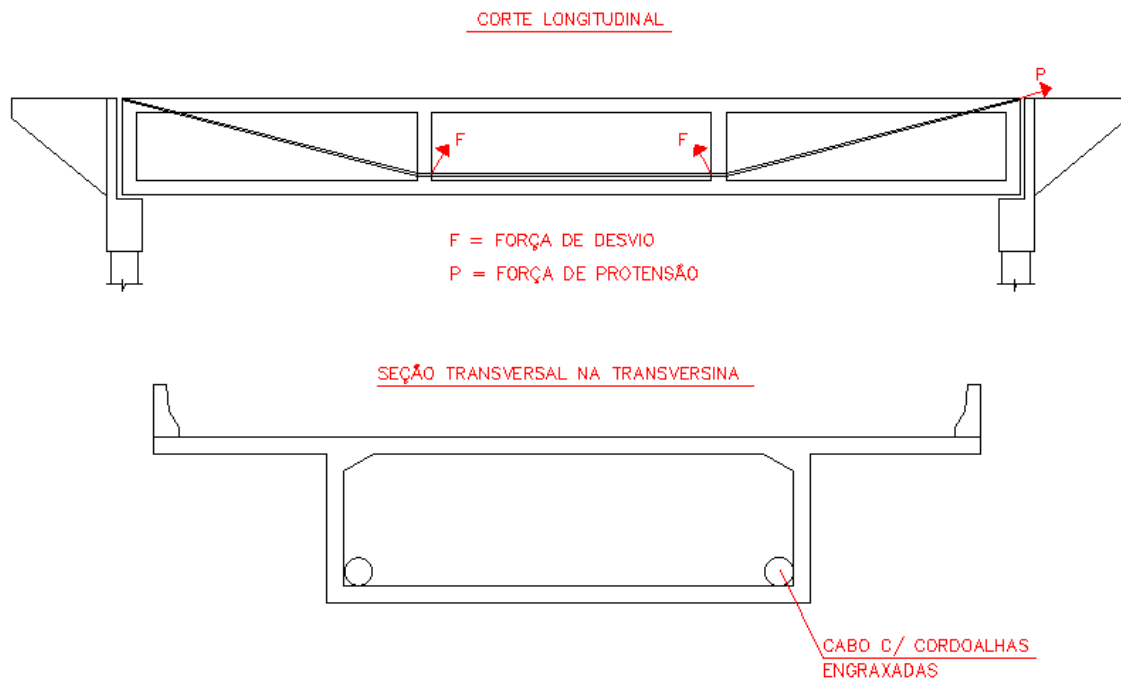
3.4.2 Reforço/recuperação com protensão externa.

A obra abaixo representada foi executada em concreto armado e recuperada e reforçada com os seguintes objetivos:

- a) Aumento da carga de veículos.
- b) Recuperar parte do campo vertical permanente de deslocamentos devido a fluência do concreto.

A ação da protensão traz os seguintes benefícios:

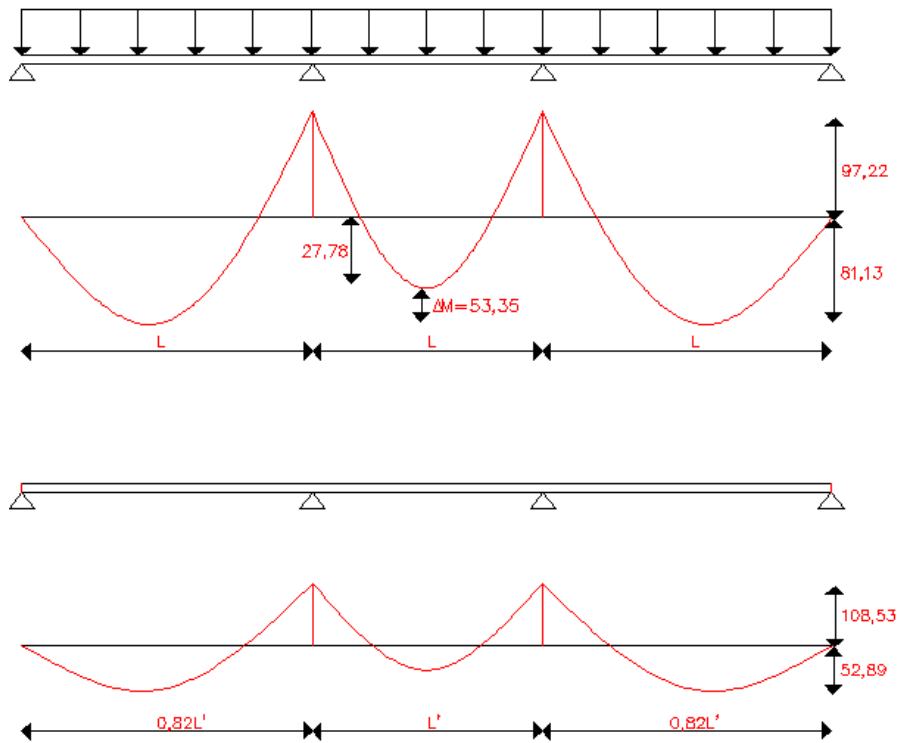
- Incremento de rigidez por redução da fissuração devida a componente horizontal da força de desvio.
- A componente vertical força de desvio nas transversinas intermediárias reduz o campo de deslocamentos.
- Altera a frequência própria na vertical.



3.5 QUINTO PRINCÍPIO (DISTRIBUIÇÃO DOS VÃOS)

A modulação adequada dos vãos de um sistema estrutural hiperestático condiciona a concepção e o desempenho. A figura abaixo mostra o caminho para a modulação otimizada, nem sempre possível de ser obtida pelo que se segue:

- a) A implantação está condicionada as interferências das vias inferiores, por exemplo, modulação das pistas, sendo somente viável colocação de pilares nos canteiros centrais.
- b) Viabilidade de desapropriações nas extremidades das obras.
- c) Aspectos relacionados ao método construtivo.
- d) interações entre os itens acima citados.



Os valores dos momentos são relativos, somente tem o objetivo de comparar o desempenho de solução.

3.6 SEXTO PRINCÍPIO (EFICIÊNCIA DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS EM FUNÇÃO DA SOLICITAÇÃO)

Os modos de solicitação dos elementos estruturais também influem no seu desempenho. Decresce como se segue:

3.7 Força Normal

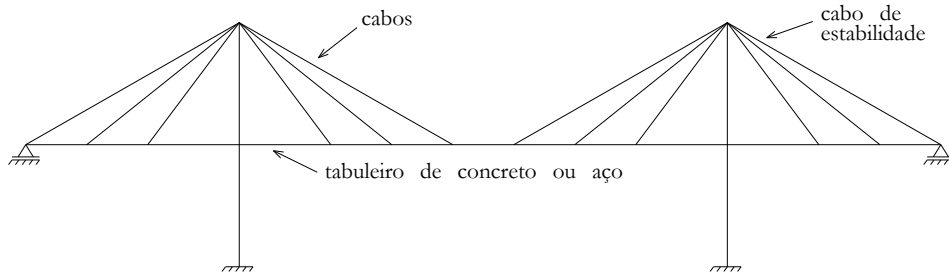
Nos elementos estruturais sujeitos a forças normais, o campo de tensões, na seção transversal, é uniforme, otimizando o uso da mesma.

Os elementos estruturais de concreto com força normal à compressão tendem a ter melhor desempenho pela redução da fissuração e conseqüente aumento de rigidez, por

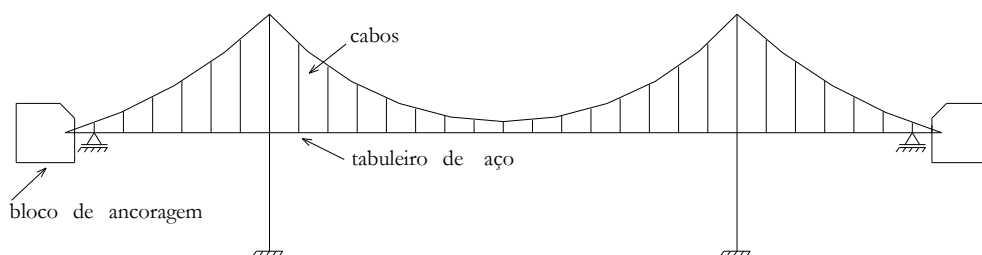
exemplo nas pontes estaiadas (tabuleiro comprimido pela componente horizontal da força nos estais), pilares, estruturas aporcadas, etc. Mas a tensão de compressão deve ser limitada não somente as tensões resistentes como também as tensões de flambagem que podem a levar a perda de estabilidade do elemento estrutural.

O mesmo vale para os elementos estruturais em aço, as regiões comprimidas, tendem a apresentar problemas de estabilidade que devem ser controlados com a concepção de enrijecedores locais (flambagem da mesa, da alma, por flexo-torção, etc), além do controle da fadiga nas obras com carga variável (pontes, pontes rolantes, eixo de máquinas, etc).

Por outro lado, os elementos estruturais em aço sujeitos a esforços de tração, apresentam excelente desempenho, pois tem a utilização plena da seção transversal, e não estão sujeitas a perda de estabilidade por flambagem. Como exemplo de aplicação destes elementos, podemos citar os estais de pontes estaiadas e os tirantes das pontes pênsis, lembrando que verificações adicionais são necessárias como a verificação da fadiga e efeitos dinâmicos devido a atuação das cargas de vento.



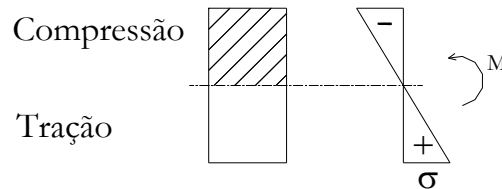
Ponte Estaiada



Ponte Pênsil

3.8 Momento Fletor/Força Cortante.

As seções retangulares têm menor aproveitamento, sendo quando possível, seções tipo I ou seções celulares, casos nos quais a espessura da alma fica condicionada ao controle do cisalhamento, detalhamento adequado e condições favoráveis de concretagem.



3.9 Momento Torçor

As seções maciças apresentam pior desempenho, uma vez que a parte central pouco contribui para o equilíbrio do esforço aplicado. As seções vazadas são de melhor desempenho, principalmente em obras curvas em planta, na qual boa parte dos esforços de torção são decorrentes do peso próprio da superestrutura.

