



Arquibancadas de Estádios:

Análise e Projeto Estrutural com foco no Desempenho Funcional

Eng. Sérgio Stolovas
STO Análise e Soluções Estruturais



**CONFIABILIDADE
E DESEMPENHO**

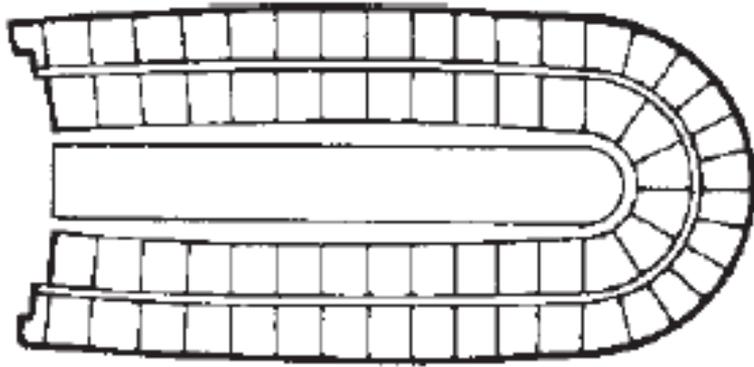


13° ENECE 2010
ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA E CONSULTORIA ESTRUTURAL





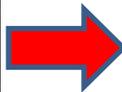
Introdução:



Um estádio construído em 331 AC foi restaurado em 1896 (2200 depois) e usado nos Primeiros Jogos Olímpicos da Era Moderna.



Introdução:



Estádio Olympia, Grécia 776 AC

Estádio Moderno

Concepção Parecida ???



Introdução:

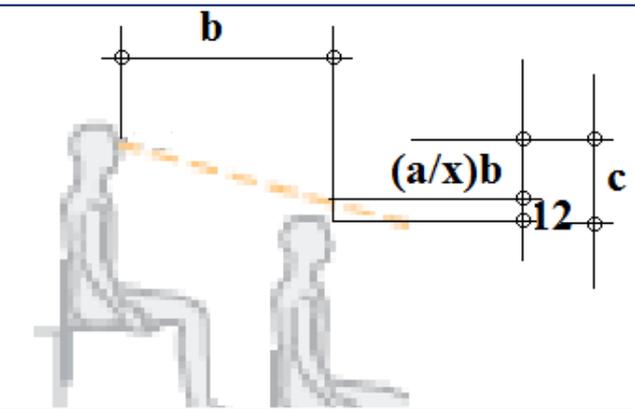
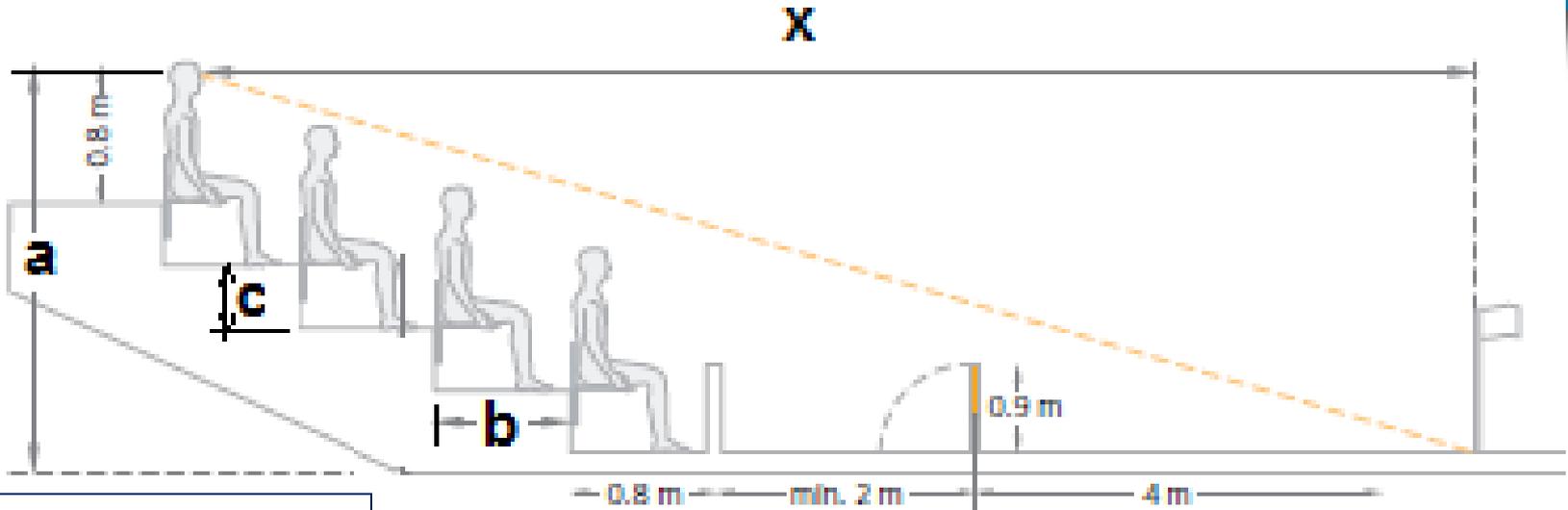


Nos últimos 2800 anos mudaram muitos aspectos relacionados com a natureza dos eventos, as atitudes e as aspirações de conforto.

Porem a concepção geométrica dos estádios continua sendo governada pela necessidade de locar multidões de espectadores cujos campos de visão não devem ser obstaculizados por elementos da estrutura ou pela presença de outros assistentes aos eventos.



Introdução:

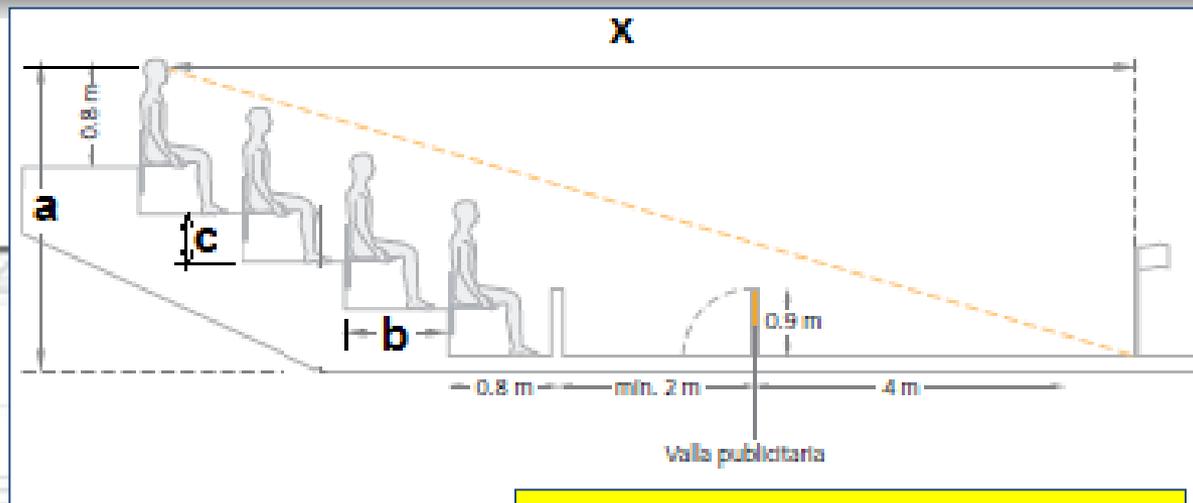


$$c > 12 + b \left(\frac{a}{x} \right) \sim 12 + 80 \left(\frac{a}{x} \right)$$

A escolha da altura dos degraus da arquibancada deve garantir a inclusão de todo o campo de jogo no campo visual dos espectadores.



Introdução:



$$c > 12 + 80 (a/x)$$

Por isso, nos
andares superiores
as alturas dos
degraus são
maiores



Características habituais das estruturas de Arquibancadas



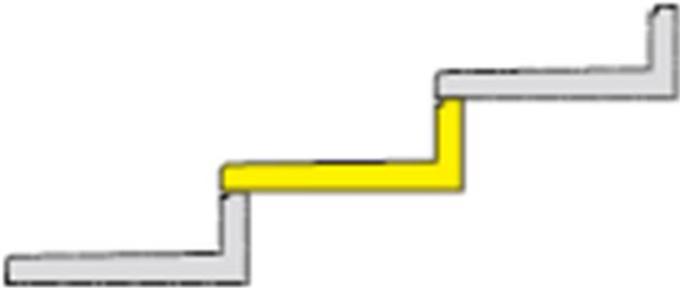
Os **pórticos principais** das arquibancadas estão contidos em planos verticais geralmente radiais e preponderantemente normais aos **degraus**.

Os **degraus** são geralmente **elementos pré-moldados** que se apóiam nos pórticos principais.

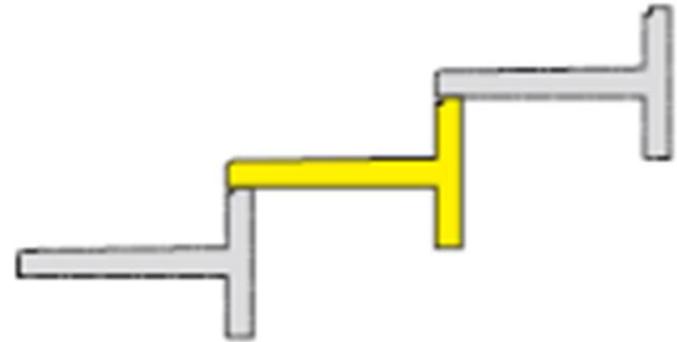


Elementos degrau típicos:

Degraus L:

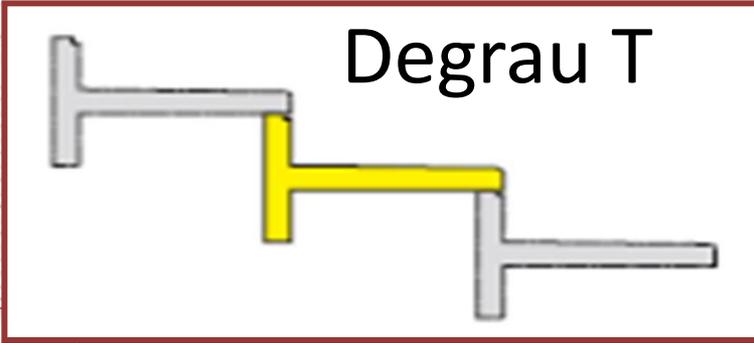
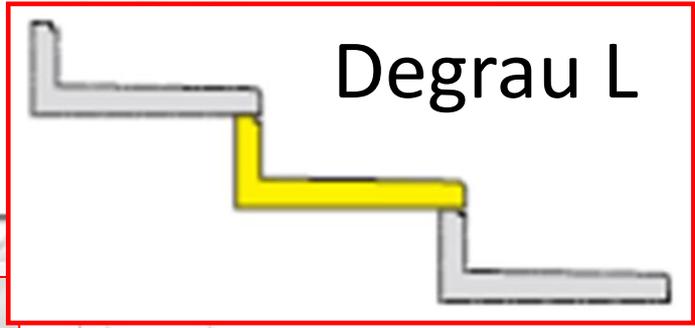
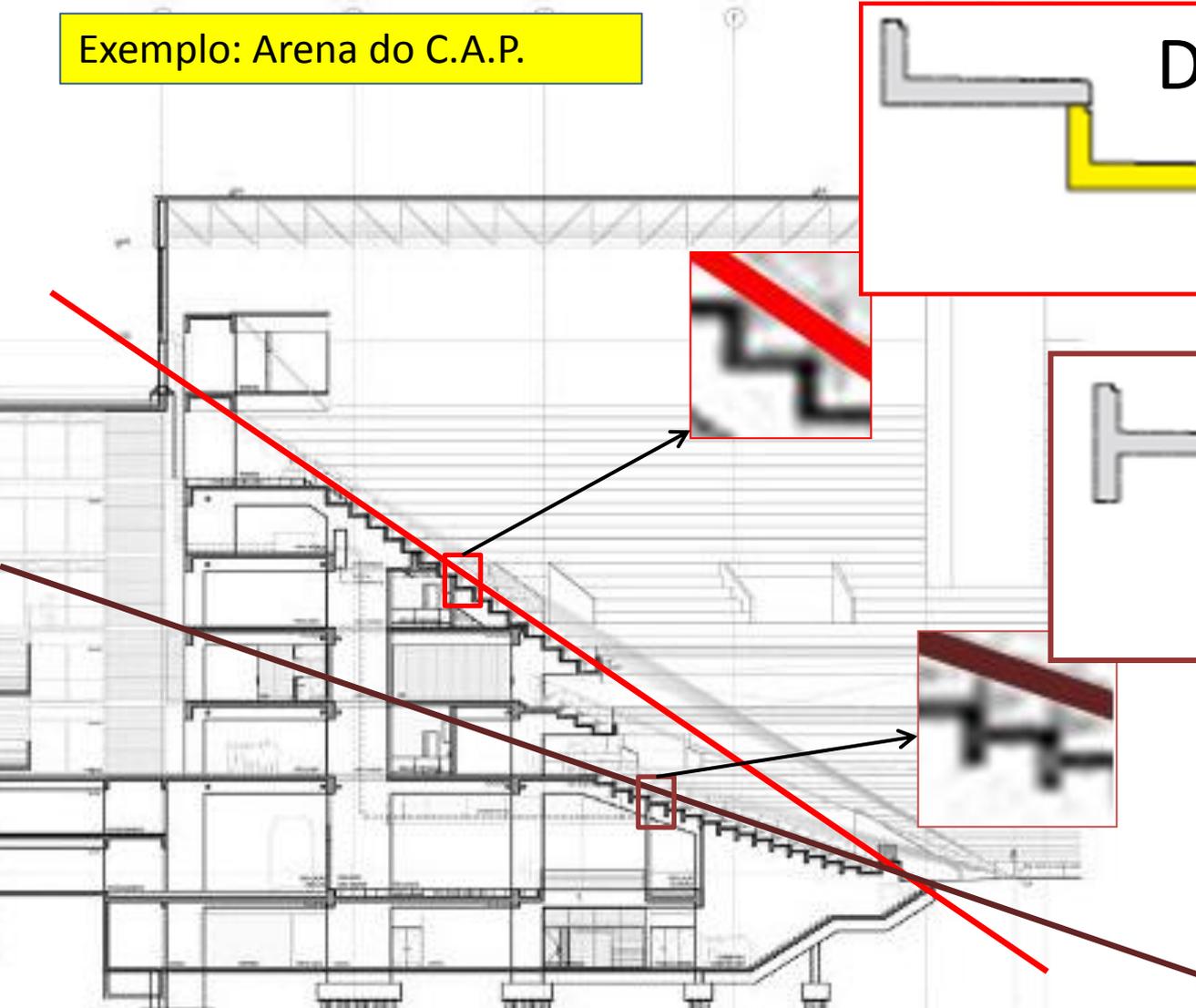


Degraus T:



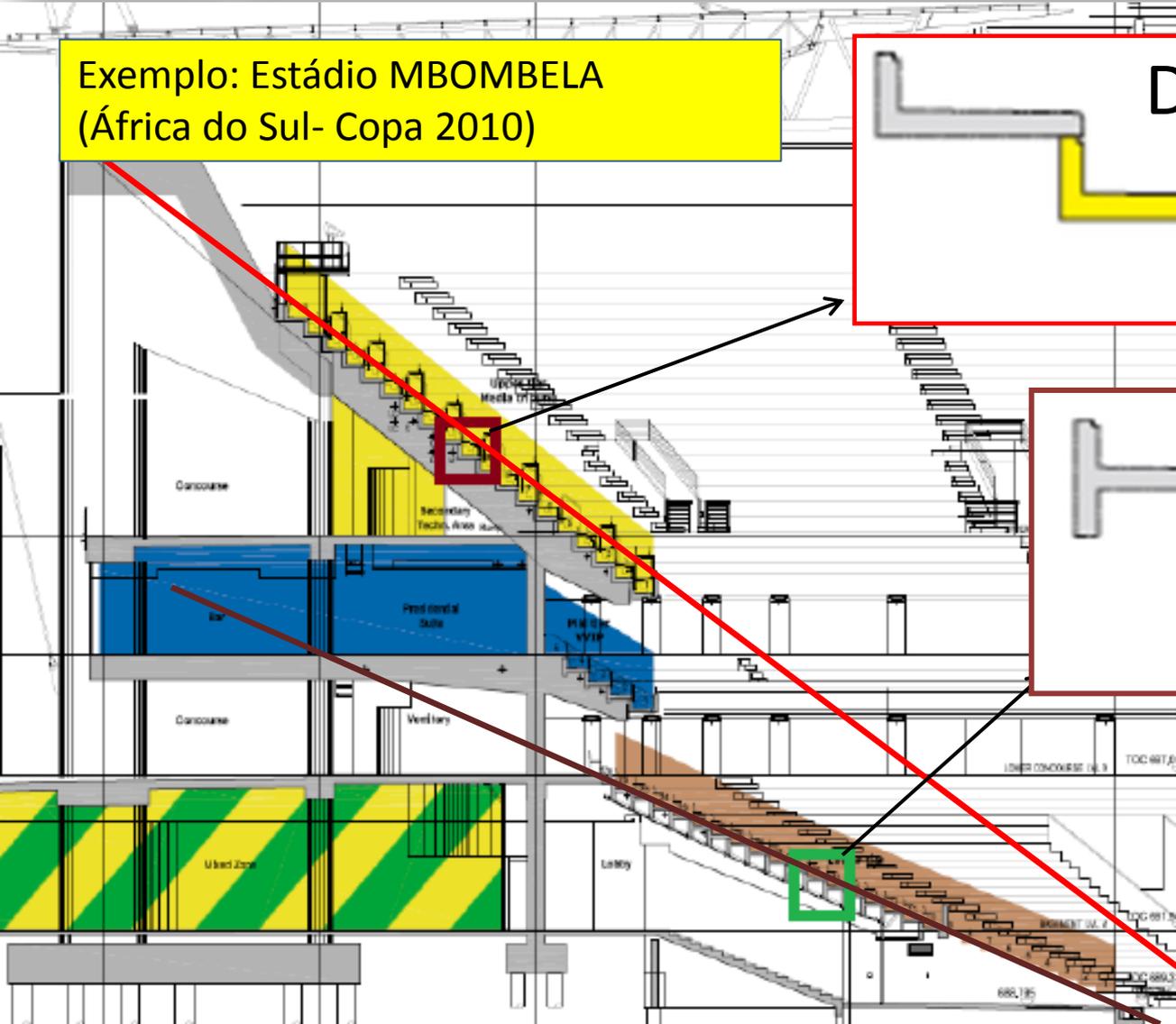
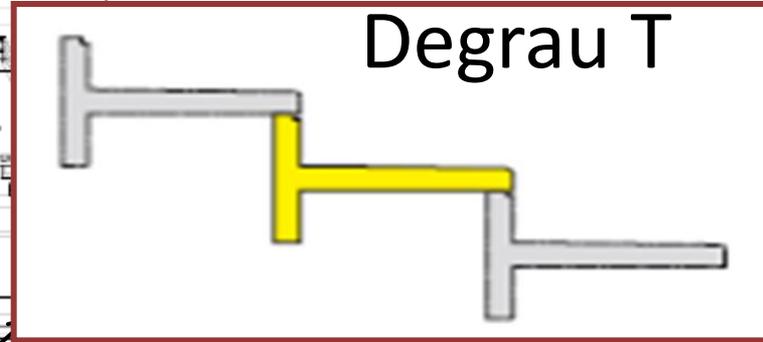
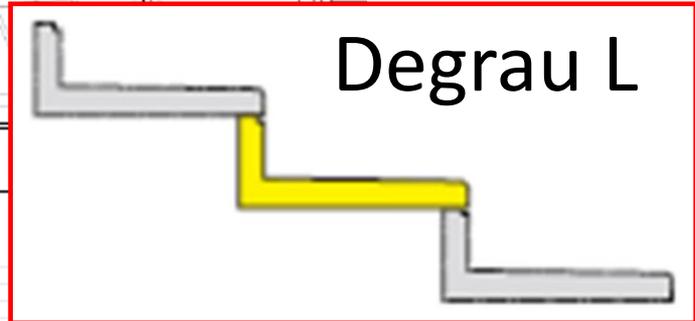


Exemplo: Arena do C.A.P.



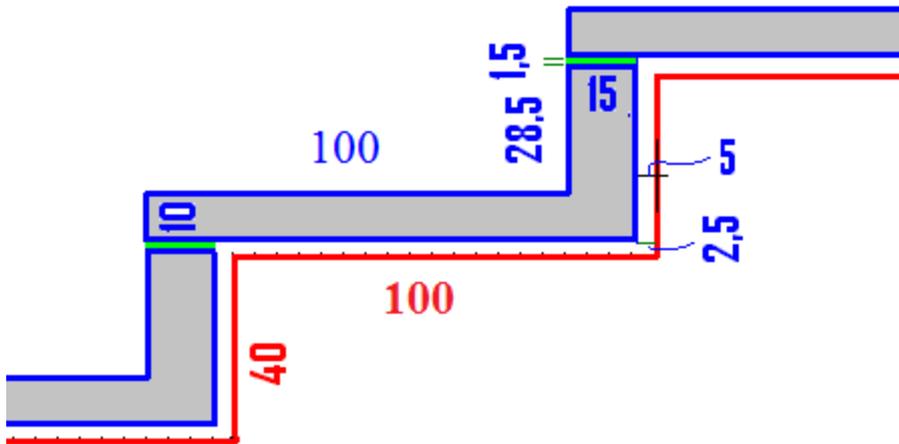


Exemplo: Estádio MBOMBELA
(África do Sul- Copa 2010)



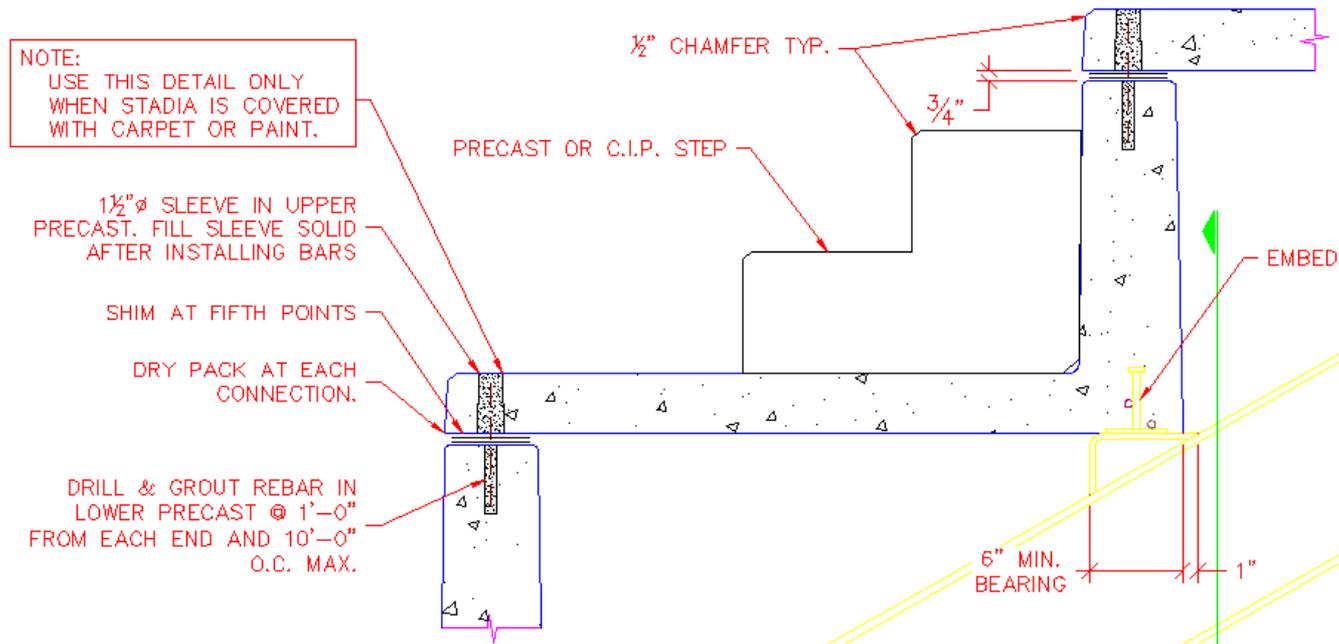


Degrau L:



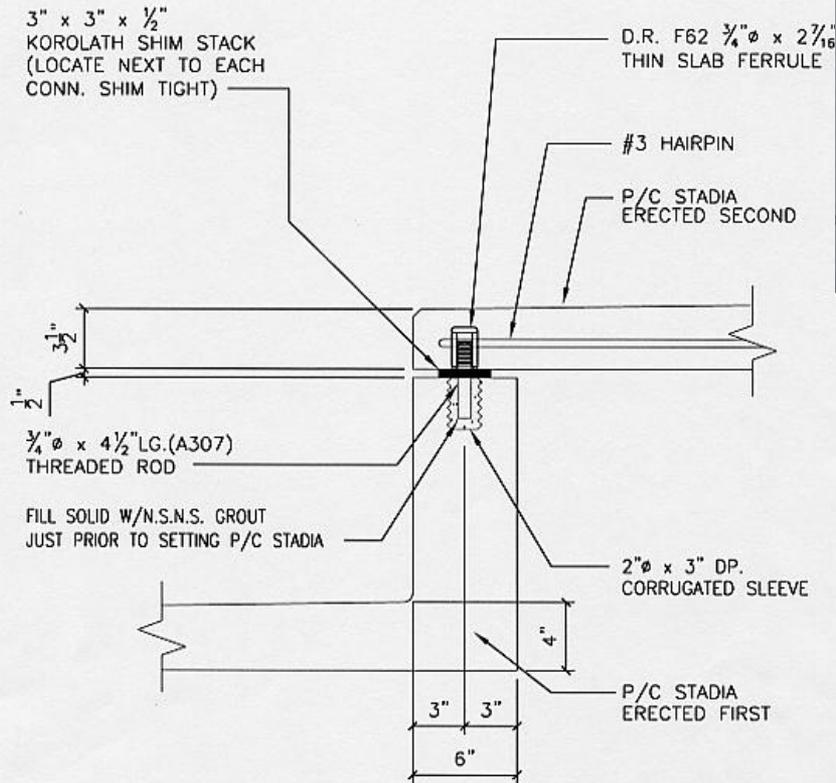


Degrau L:





Degrau L:





Degrau L:





Degrau T:





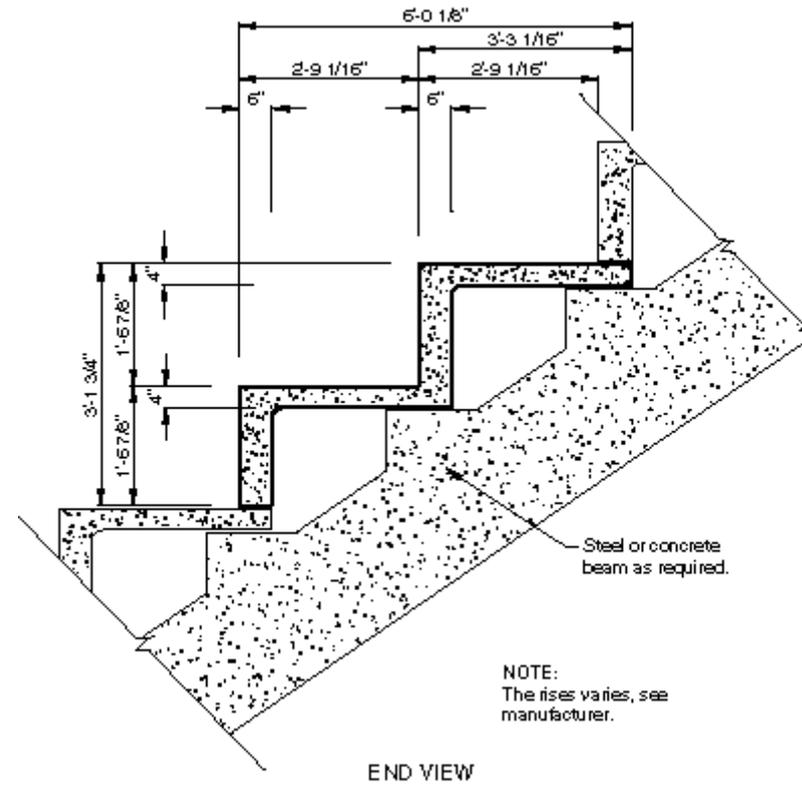
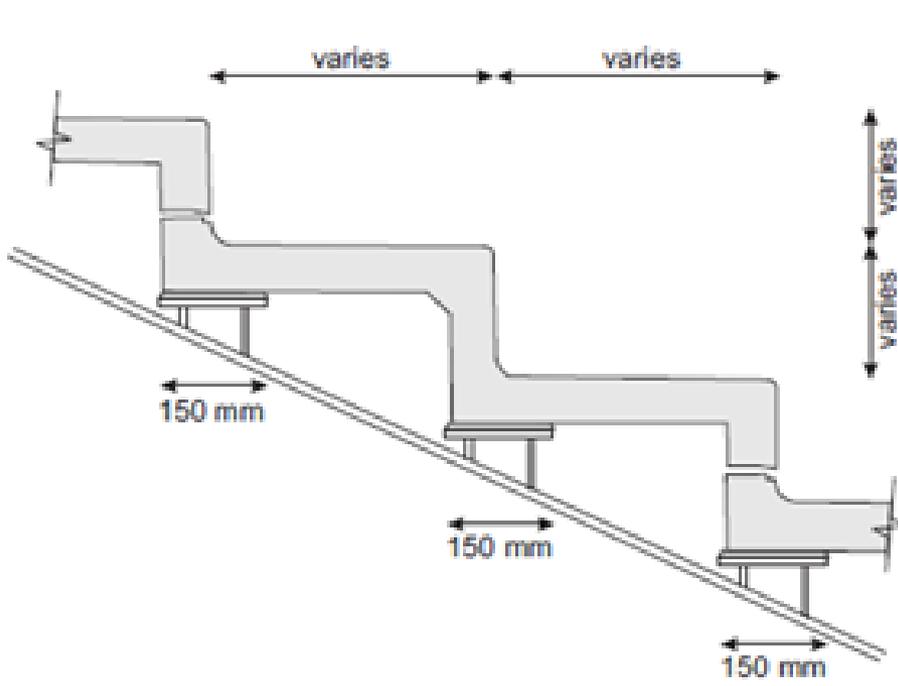
Degrau T:





Outros tipos de Degrau menos habituais:

Degrau duplo





Outros tipos de Degrau menos habituais: Degrau duplo



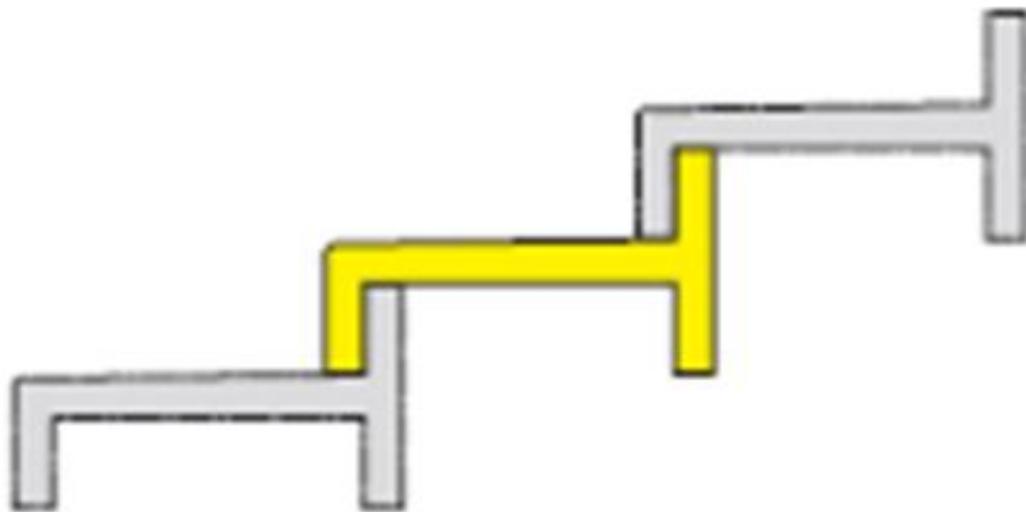


Outros tipos de Degrau menos habituais: Degrau Triplo





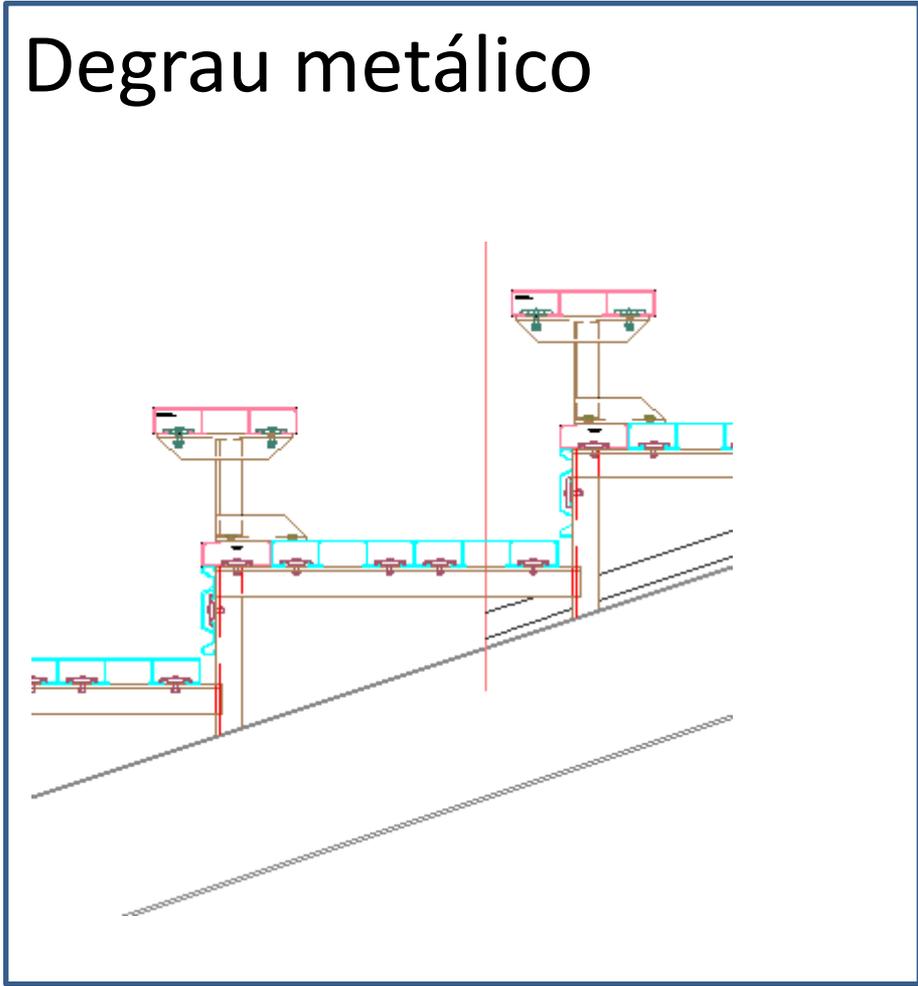
Outros tipos de Degrau menos habituais:
Degrau U (variante do T)





Outros tipos de Degrau menos habituais:

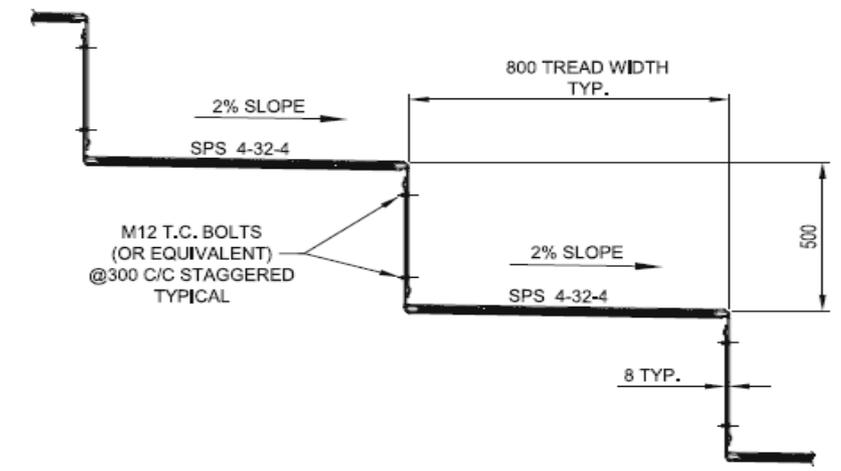
Degrau metálico



Degrau Sanduíche:

SPS= "Sandwich Plate System"

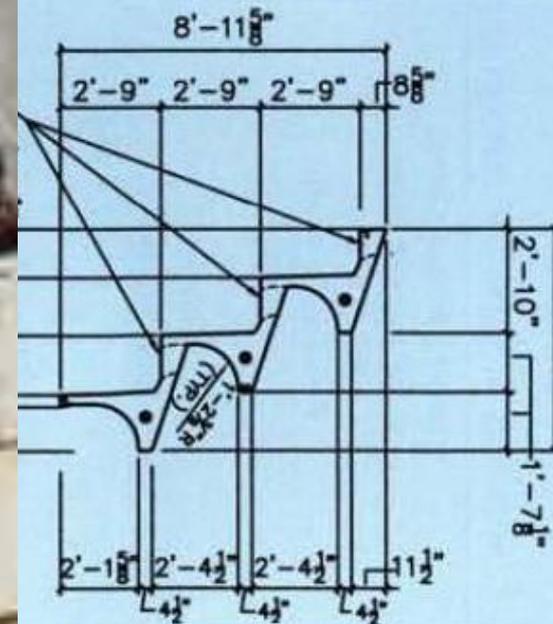
Terrace Designs – 7.65m Span



SPS



Outros tipos de Degrau menos habituais: Degrau “DESIGN”



Arena da Universidade de Princeton



Outros tipos de Degrau menos habituais:
Degrau “DESIGN”

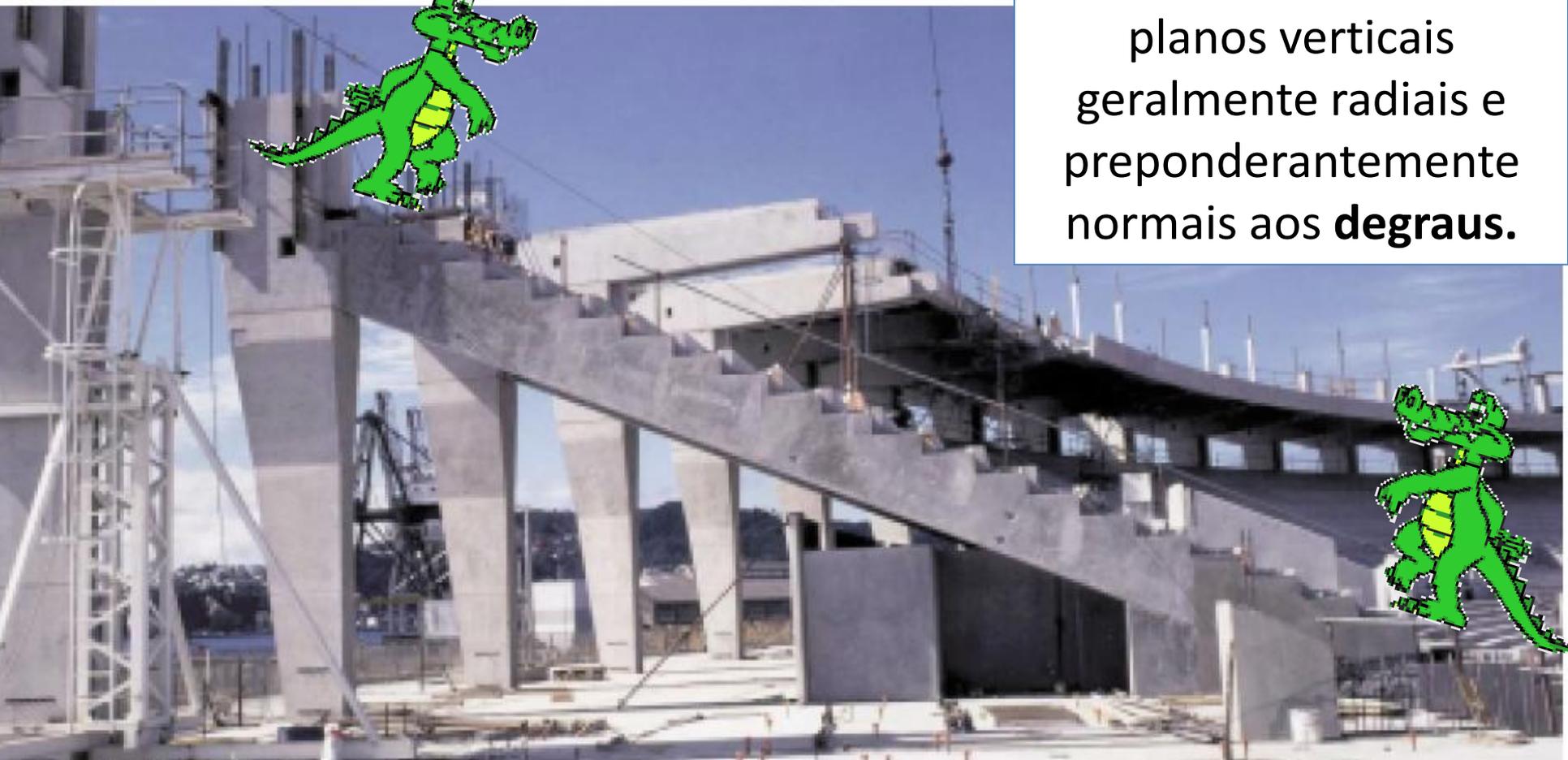


Arena da Universidade de Princeton



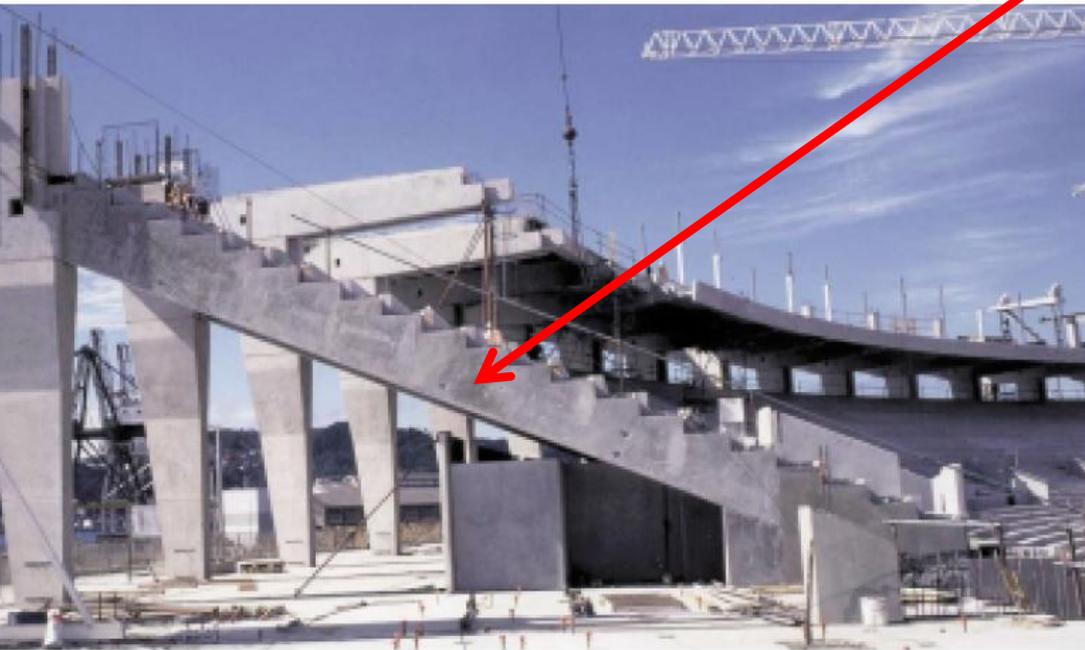
Pórticos

Os pórticos principais sustentam os degraus e estão contidos em planos verticais geralmente radiais e preponderantemente normais aos **degraus**.





Viga Jacaré Pré-moldada





Pórtico Metálicos



NFL's Soldier Field- Chicago

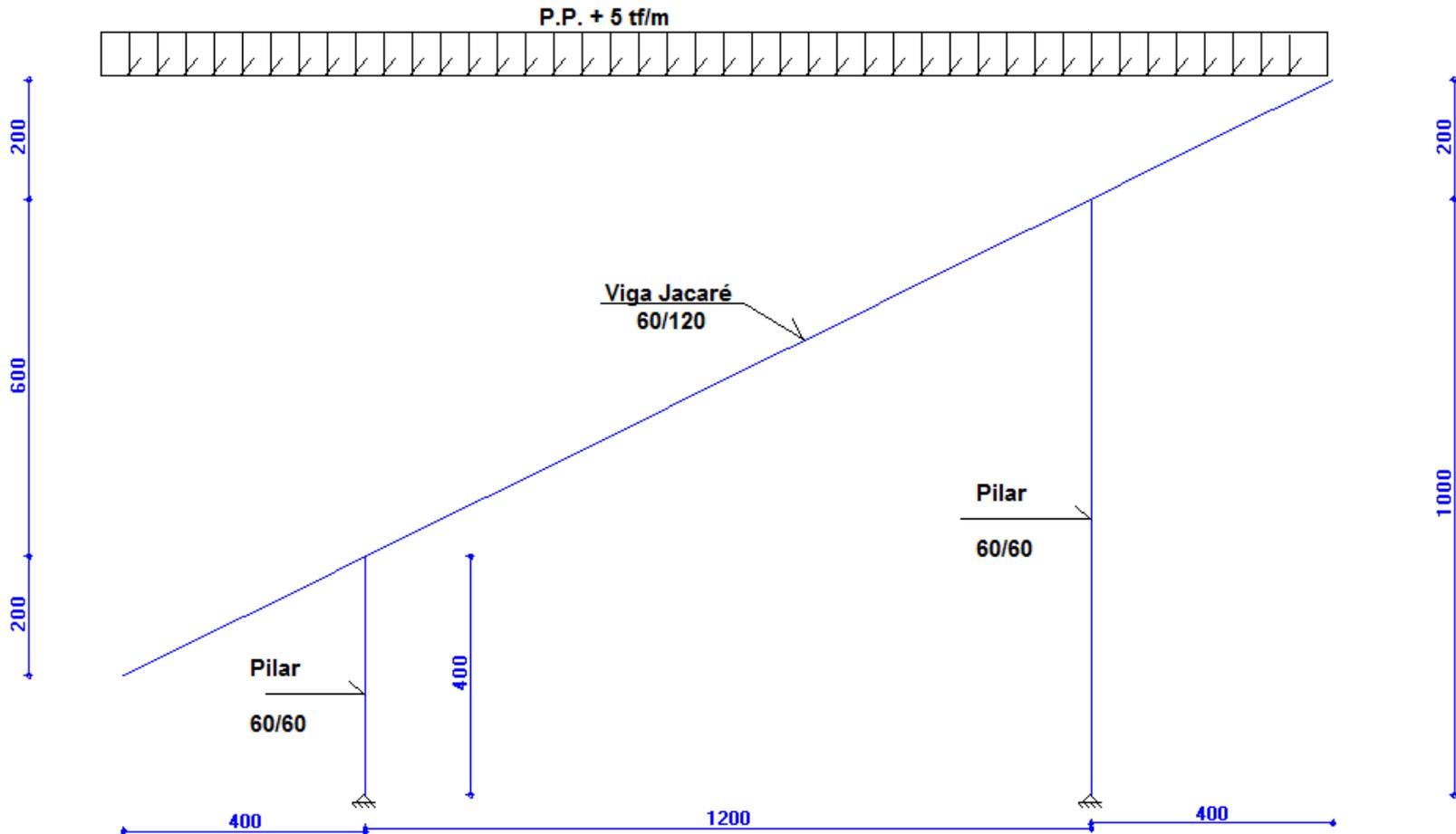


Os PÓRTICOS são geralmente os responsáveis pelo desempenho dinâmico-funcional das Estruturas das Arquibancadas

PÓRTICOS de arquibancadas de grande porte terão frequências naturais baixas associadas a modos de SWAY

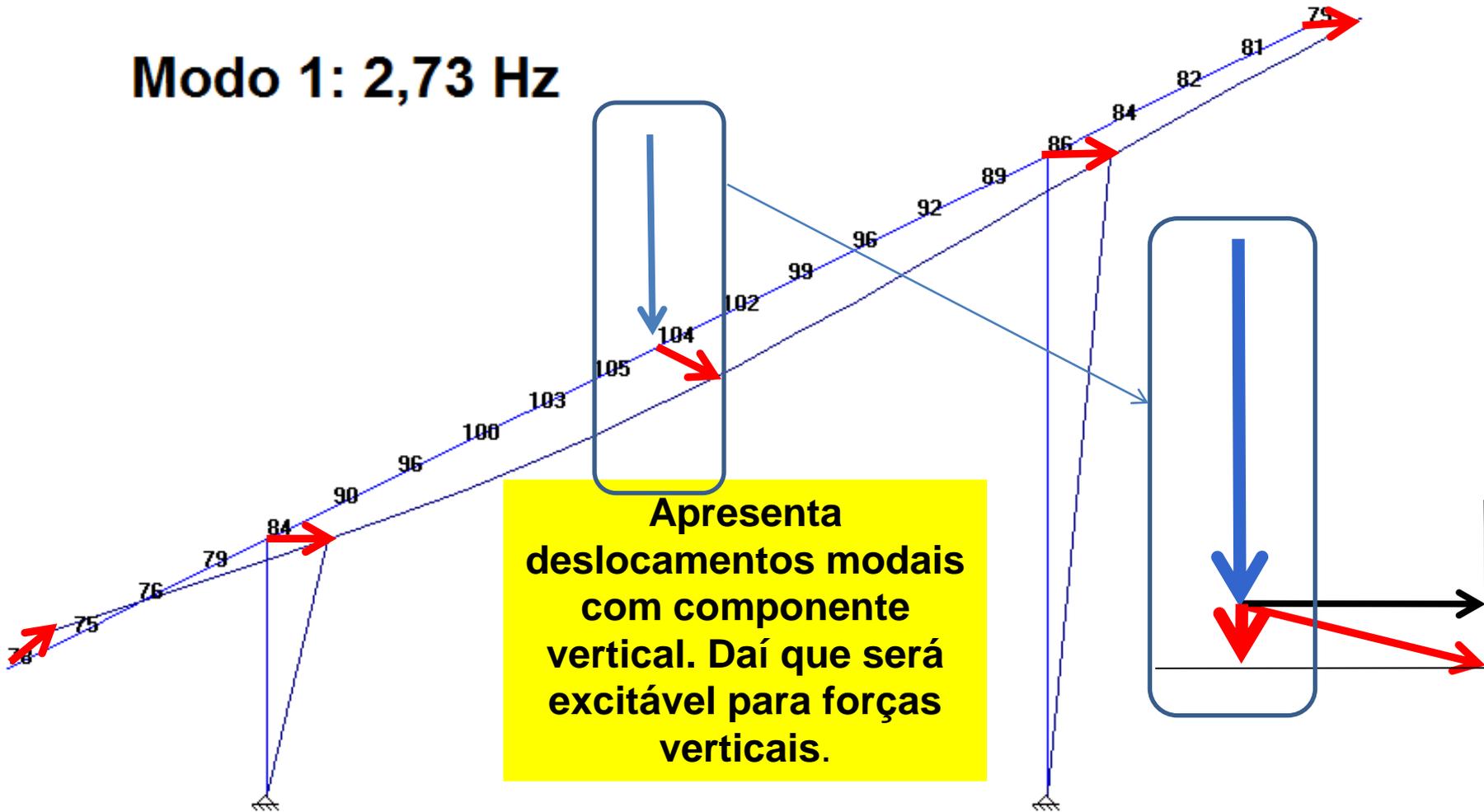


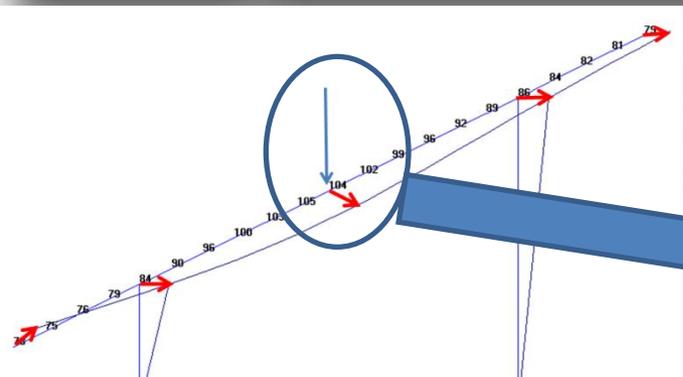
Conceito:





Modo 1: 2,73 Hz





Se a cadência da torcida for parecida à frequência natural haverá Ressonância . Ou seja, deslocamentos amplificados.





**CONFIABILIDADE
E DESEMPENHO**



13^ª ENECE 2010
ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA E CONSULTORIA ESTRUTURAL





Diagramas de Auto-densidade espectral demonstram efetivamente que as acelerações induzidas pelas torcidas possuem sempre componentes horizontais (frontais) importantes

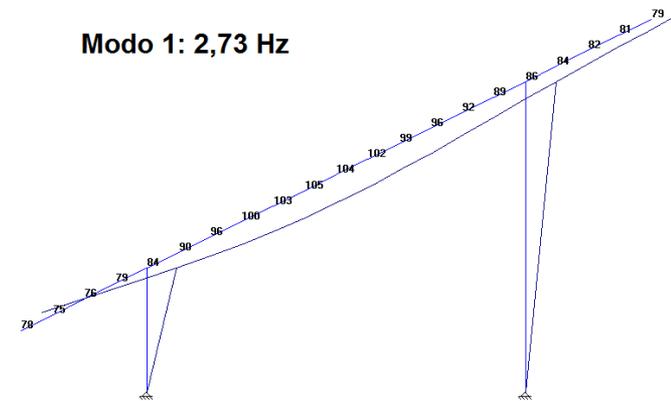
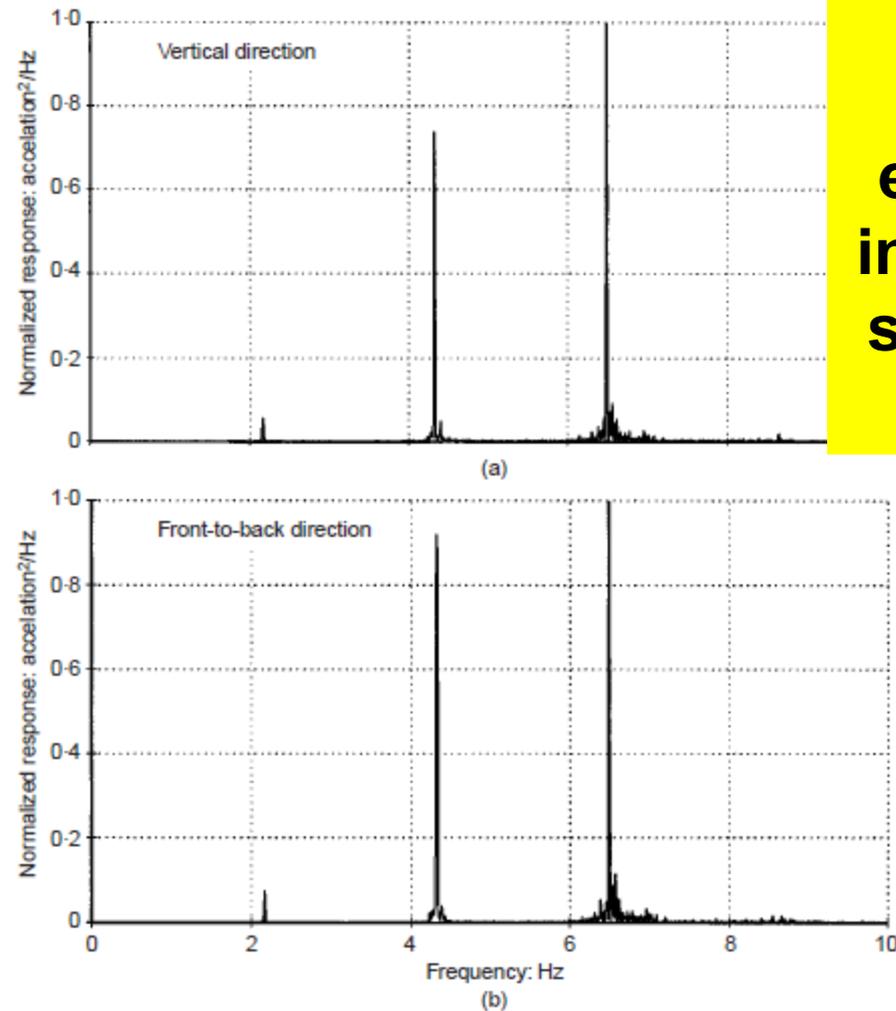
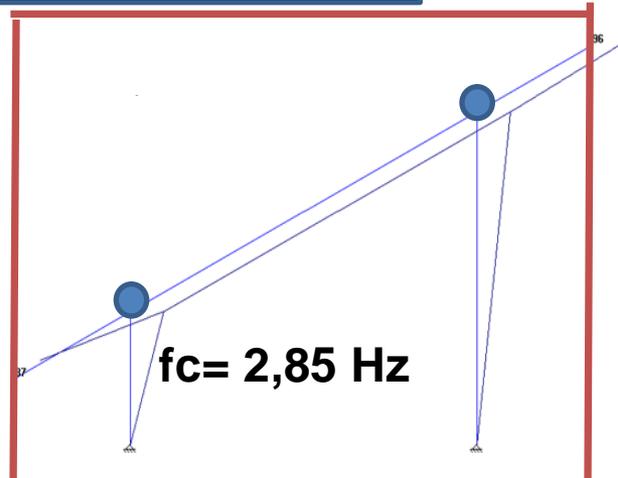
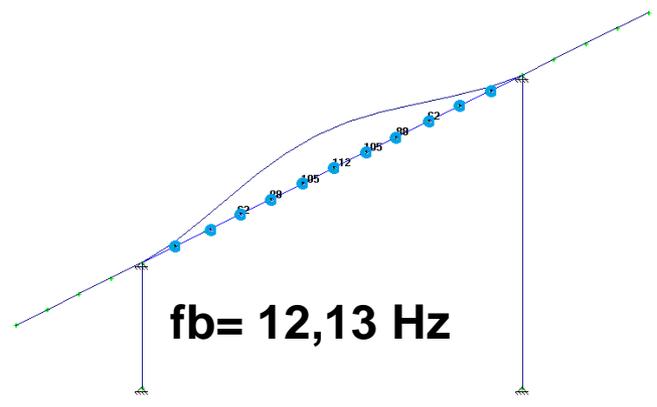
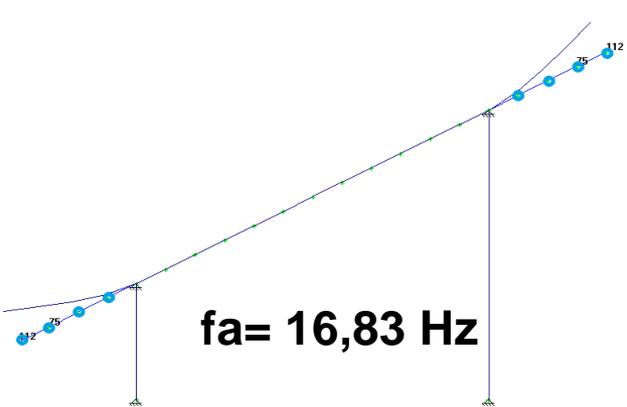
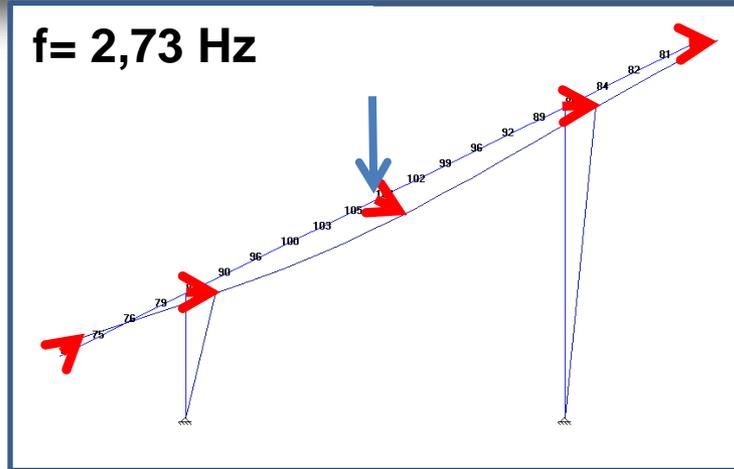


Fig. 7. Autospectra measured on a cantilever grandstand during a pop concert: (a) vertical direction; (b) front-to-back direction

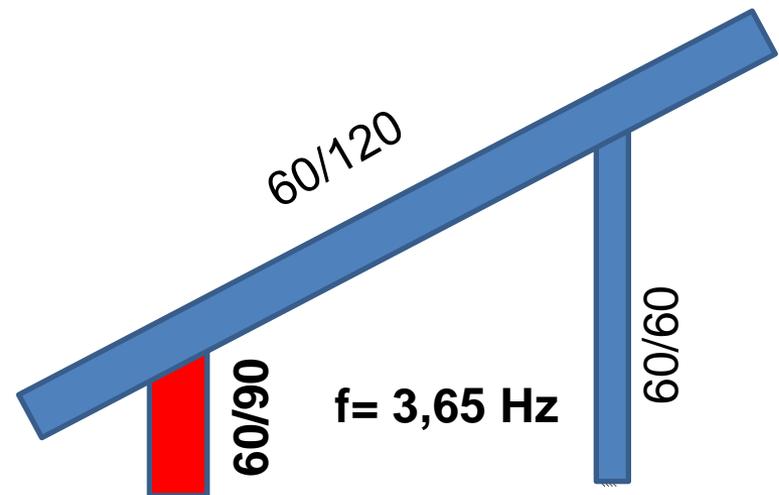
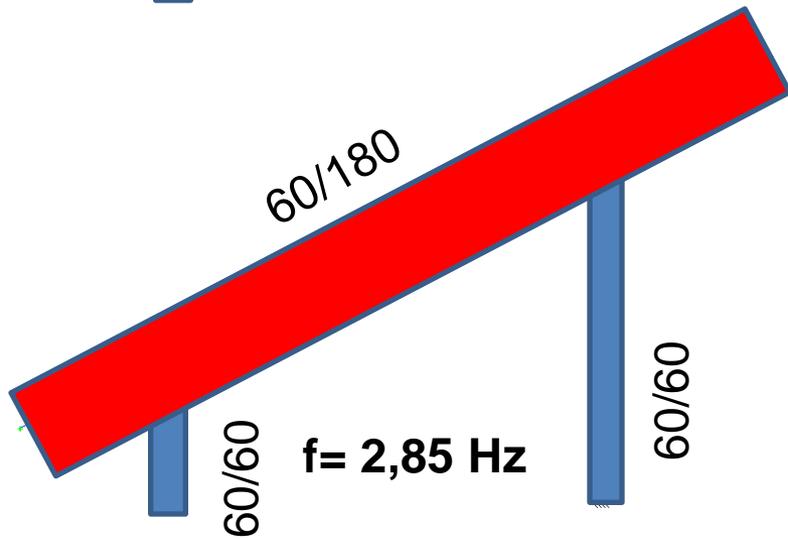
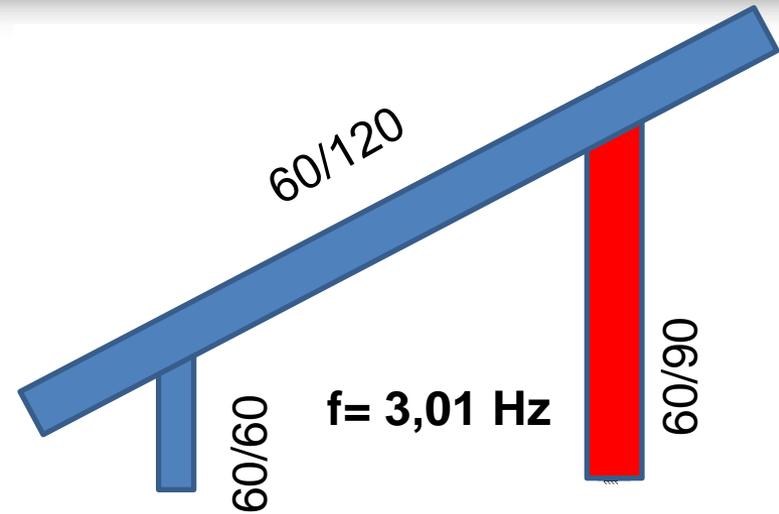
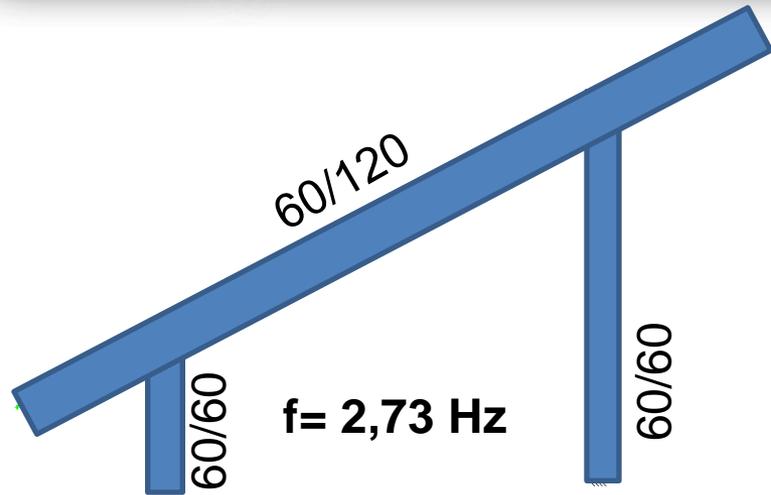


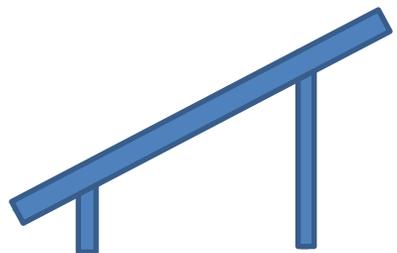
Visualização do comportamento mediante o Método de Dunkerley:

$$\frac{1}{f^2} \approx \frac{1}{f_a^2} + \frac{1}{f_b^2} + \frac{1}{f_c^2}$$



A exposição a Ressonância estará controlada pela rigidez na horizontal do pórtico. Incrementar a inércia da Viga Jacaré é uma estratégia pouco eficiente !!!



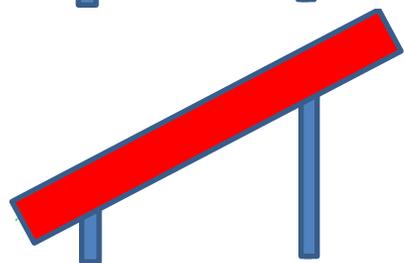


Freqüência
Natural

$$f = 2,73 \text{ Hz}$$

Consumo de
Concreto

$$C = 0,315 \text{ m}^3/\text{m}^2$$

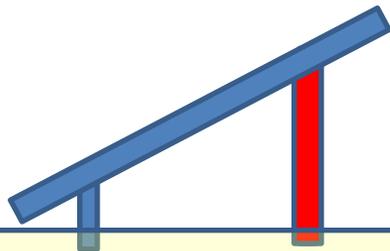


$$f = 2,85 \text{ Hz}$$

$$D = + 4,4 \%$$

$$C = 0,367 \text{ m}^3/\text{m}^2$$

$$D = + 16,5 \%$$

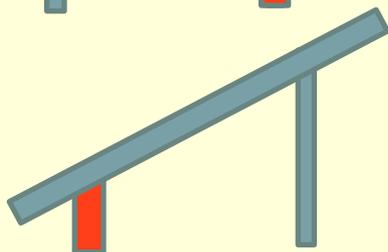


$$f = 3,01 \text{ Hz}$$

$$D = + 10,3 \%$$

$$C = 0,335 \text{ m}^3/\text{m}^2$$

$$D = + 6,3 \%$$



$$f = 3,65 \text{ Hz}$$

$$D = + 33,7 \%$$

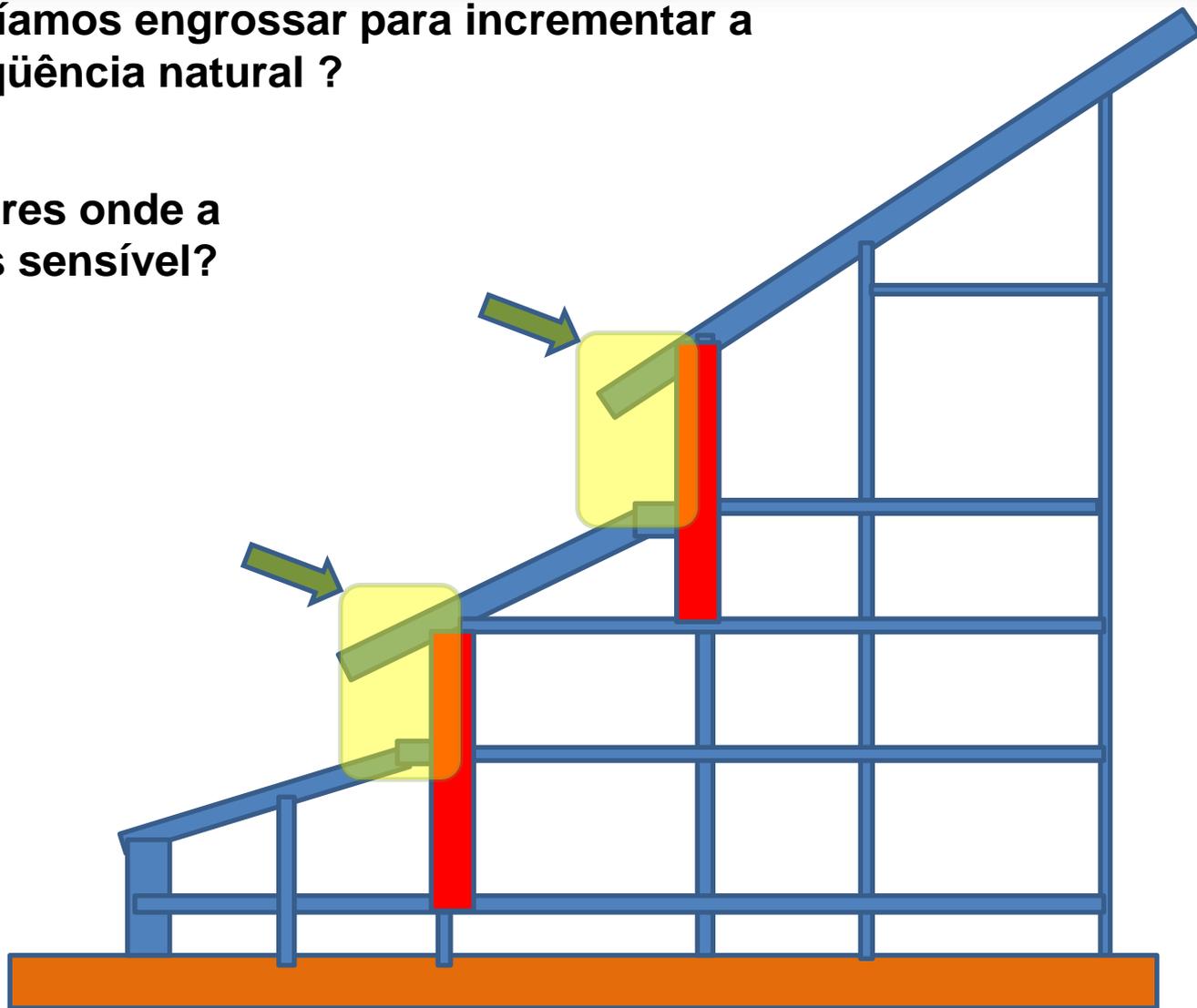
$$C = 0,329 \text{ m}^3/\text{m}^2$$

$$D = + 4,4 \%$$



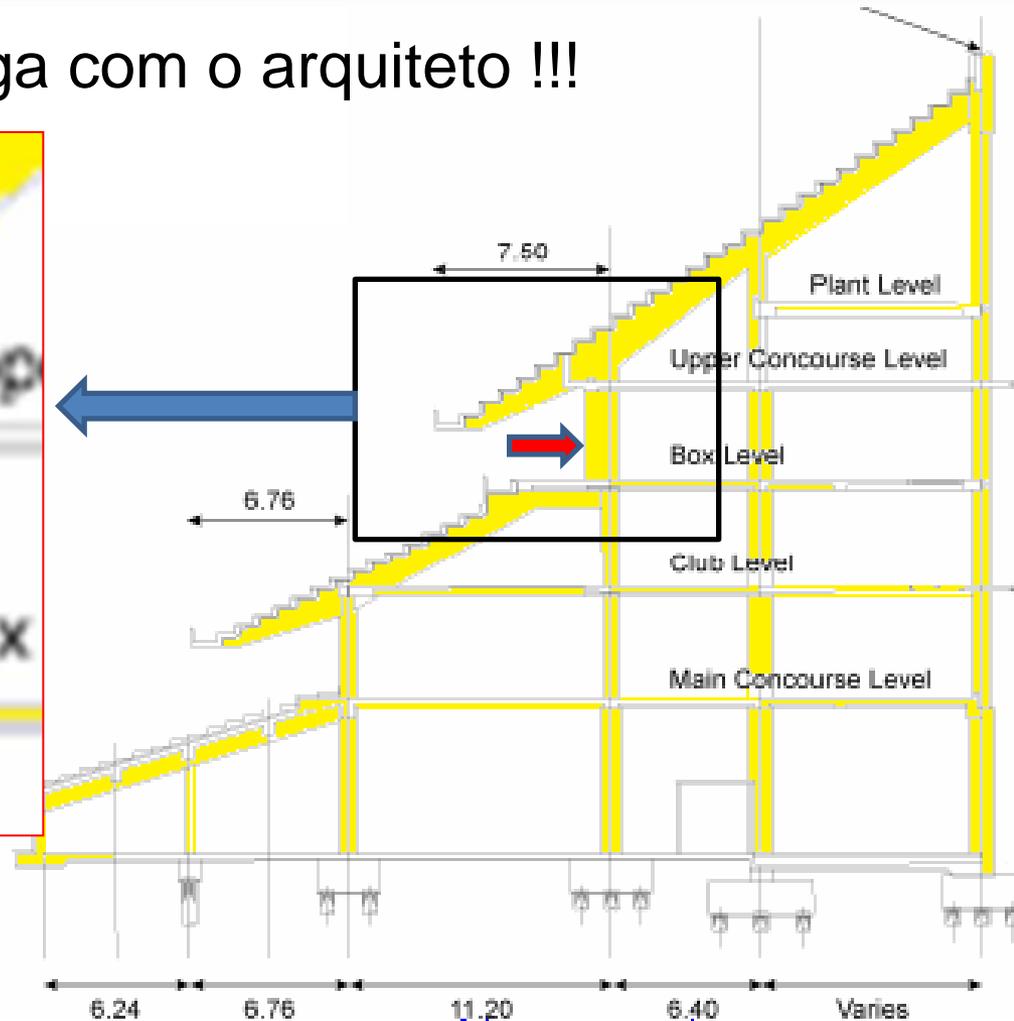
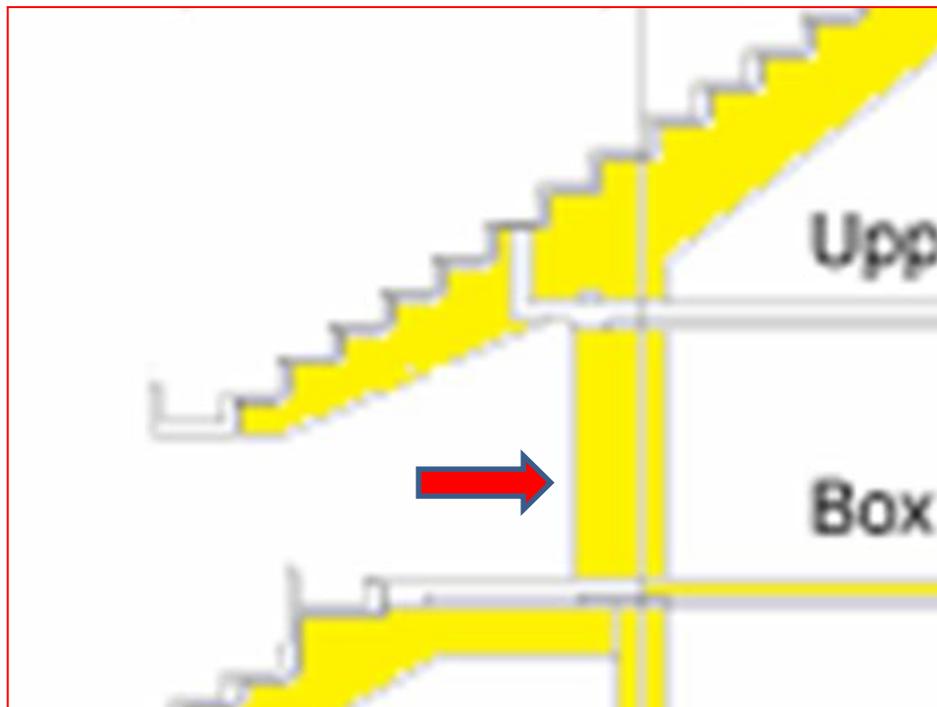
Quais elementos deveríamos engrossar para incrementar a frequência natural ?

Quais são os lugares onde a arquitetura é mais sensível?





Alguém deve ter comprado briga com o arquiteto !!!



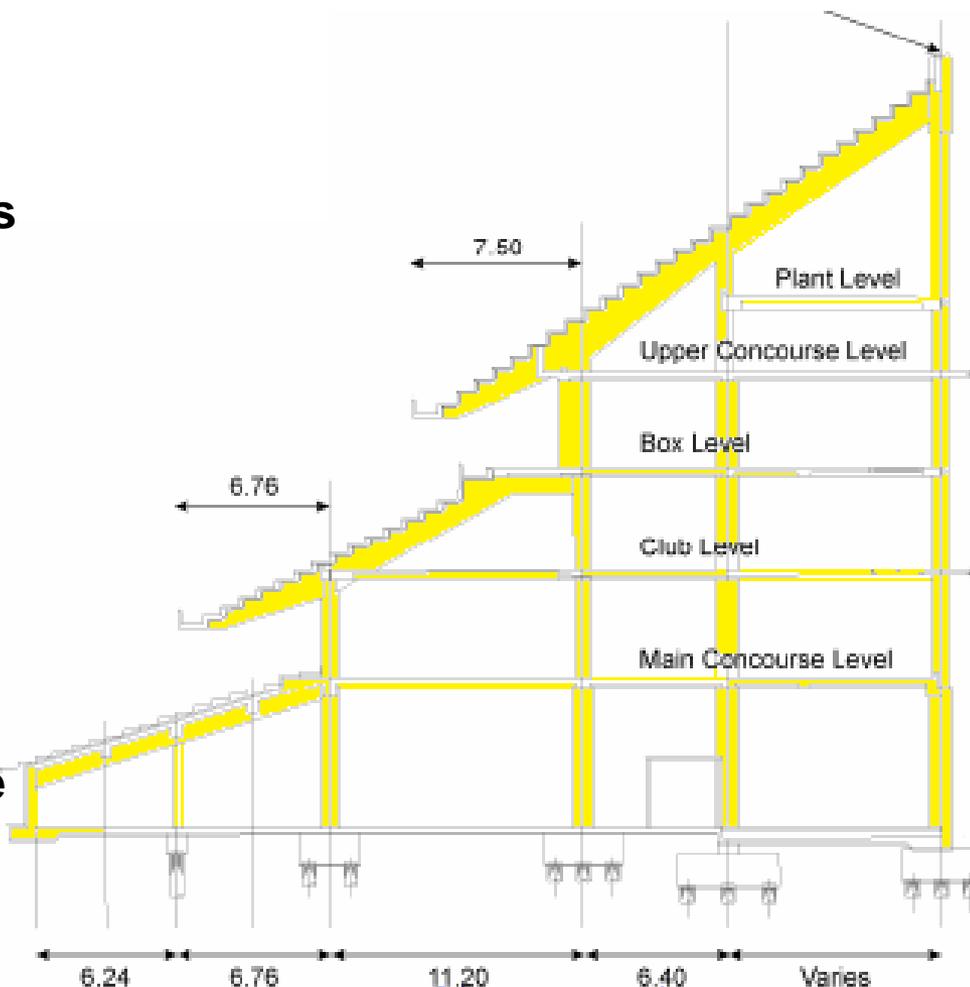
MANCHESTER STADIUM



Devido à geometria dos Pórticos Principais de Arquibancadas de Estádios os modos principais de vibração serão sempre excitados pelos pulos dos torcedores.

Para arquibancadas de grande porte será impossível evitar a exposição à Ressonância com os 2 primeiros harmônicos induzidos pela torcida.

Devemos incorporar na análise estrutural a avaliação das acelerações de resposta amplificada e verificar que as mesmas não excedem os limites de aceitabilidade funcional.



MANCHESTER STADIUM



Metodologia de avaliação analítica da conformidade funcional :



***“Dynamic performance
requirements for
permanent grandstands
subject to crowd action:
Recommendations for
management, design
and assessment”,
December 2008***

(“The IStructE Guide”)



Metodologia de avaliação analítica da conformidade funcional (1):

-No modelo analítico será **desconsiderada a massa associada ao peso dos espectadores.**



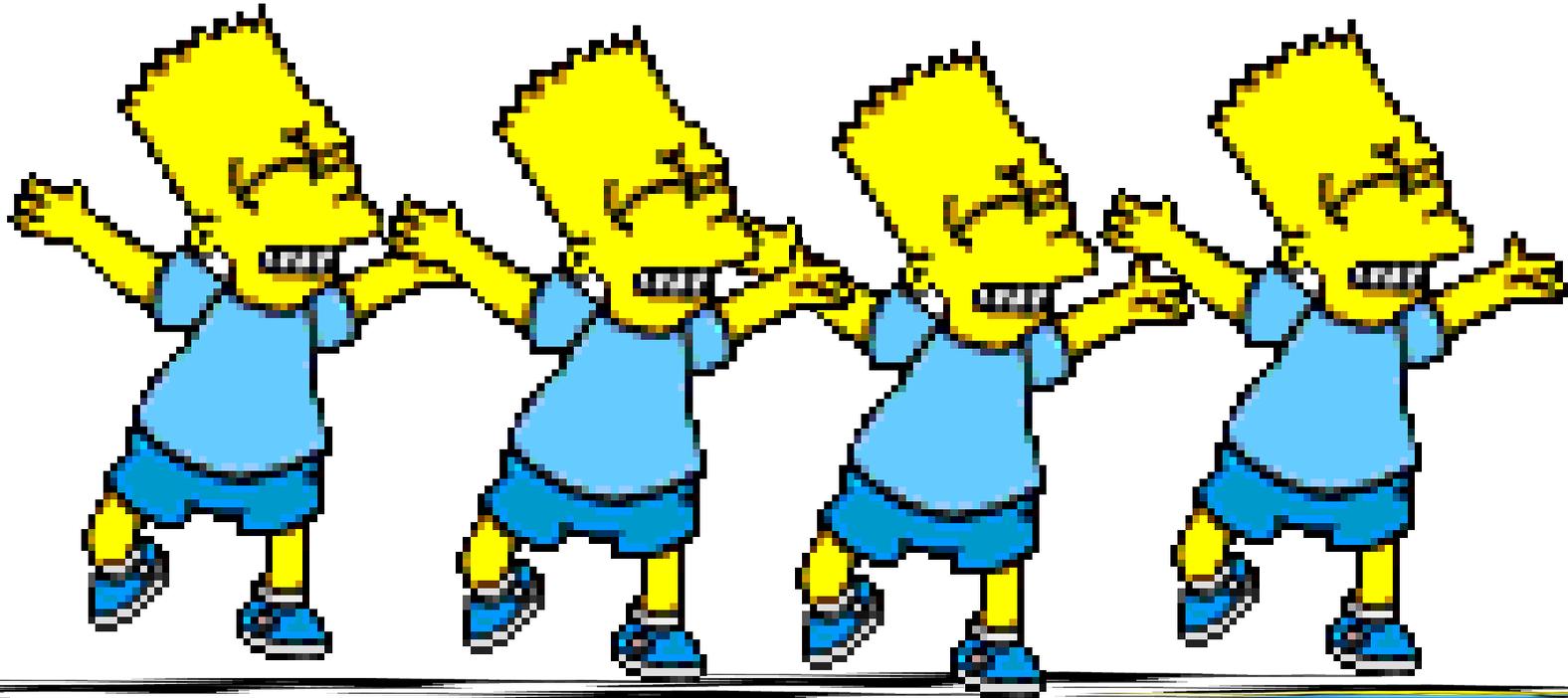
Metodologia de avaliação analítica da conformidade funcional (2) :

-Condição **necessária mas não suficiente**:
Não poderá haver modos próprios **relevantes** de vibração com frequência natural **menor que 1,5 Hz** .

(O objetivo é evitar o LOCK-IN induzido por componentes horizontais de excitação)...



Quando a frequência natural horizontal é menor que 1,5 Hz existe risco de LOCK-IN: Sincronização **involuntária** com a estrutura quando ela começa a oscilar de maneira perceptível.





Problema: Quando temos uma arquibancada de grande porte com muitas áreas de serviço (ou seja, muita massa) será **MUITO DIFÍCIL** fazer que a frequência natural horizontal seja menor que 1,5 Hz.

Solução: Contra-ventamentar até atingir 1,5Hz.

Alternativa: Avaliar mediante um **método alternativo** se pode realmente ser atingido o LOCK-IN.

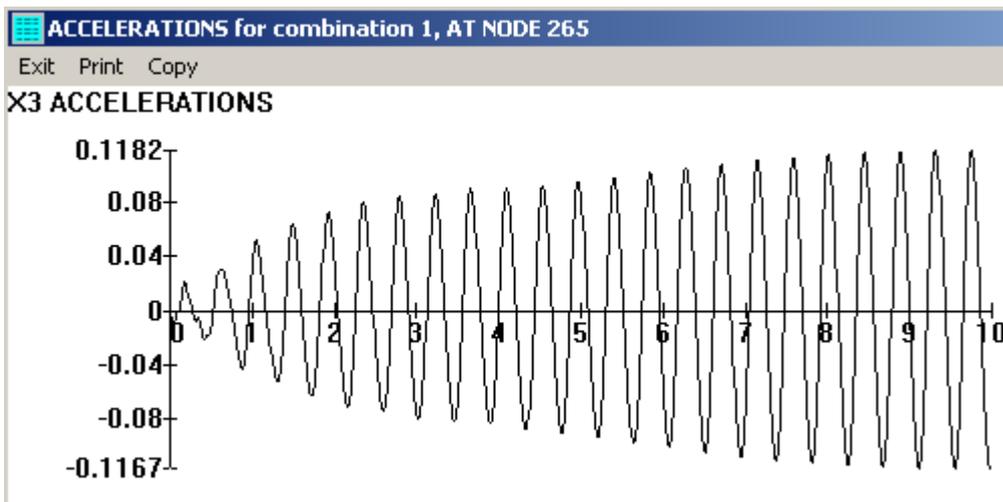




Método de avaliação do potencial de Lock-IN (não incluso no StructE.

Aplicar no modelo analítico uma excitação senoidal horizontal de amplitude 10% do peso da população e frequência IDENTICA à frequência natural .

Se a aceleração horizontal resultar menor que 2%g não haverá LOCK-IN já que a população não conseguirá se sintonizar (critério adotado pela DIN para passarelas estaiadas).



Atenção: É um método
Polemico e não é aceito
por muitos
pesquisadores!!!



Metodologia de avaliação analítica da conformidade funcional (3) :

-Condição **suficiente mas não necessária:**

Consideram-se funcionalmente aceitáveis as estruturas cujas freqüências naturais de todos os modos com componentes verticais de deslocamento sejam **maiores que 6 Hz.**



Metodologia de avaliação analítica da conformidade funcional (4) :

-Deverá ser considerada na análise resistente e de estabilidade da estrutura estados de carga estática equivalente com forças nominais cujo valor será 0,075 do peso real da população de espectadores aplicadas (não simultaneamente) nas direções horizontais.

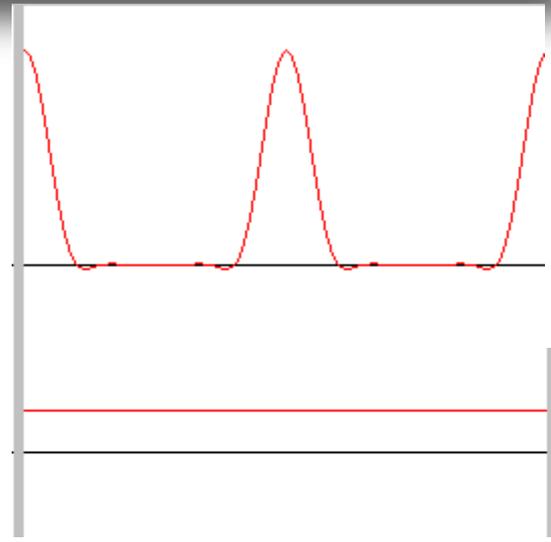
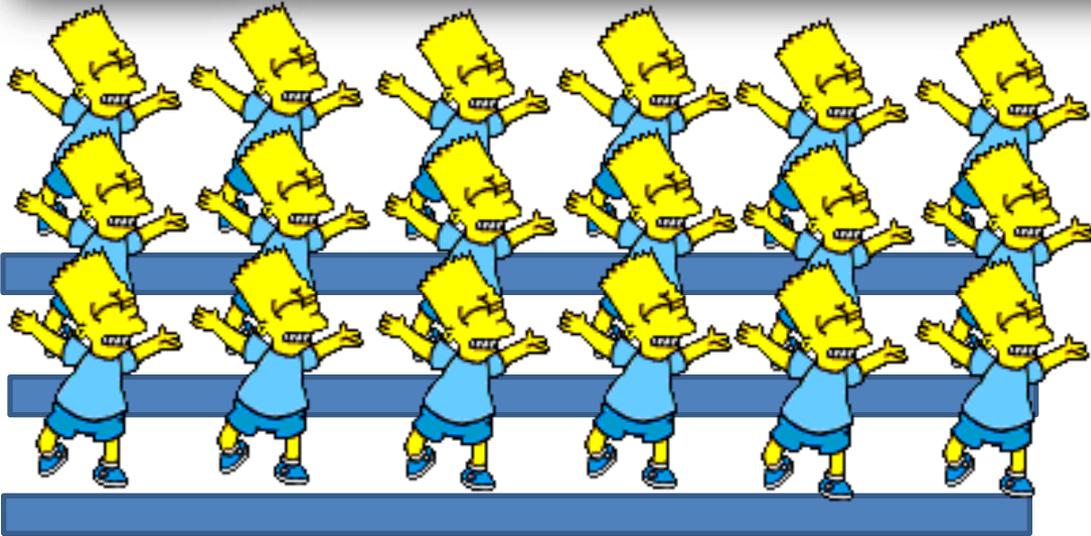
Efeito do “GOL que não foi”



Metodologia de avaliação analítica da conformidade funcional (5) :

- Estruturas com freqüências naturais **menores de 6 Hz** para modos de vibração excitáveis na vertical, deverão ser submetidos à **avaliação analítica** e comprovar que a aceleração de resposta pico não ultrapassa **0,1g (1 m/s²)** de acordo a **excitações padronizadas**:

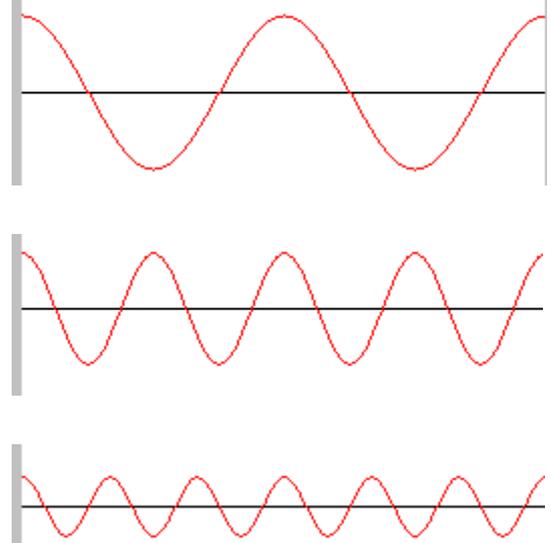
Har.	Freqüência	Amplitude
1°	$f_1 : 1,5 \text{ Hz} < f_1 < 2,7 \text{ Hz}$	0,250 vezes o peso da população
2°	$f_2 = 2f_1$	0,063 vezes o peso da população
3°	$f_3 = 3f_1$	0,018 vezes o peso da população



	Frequência	Amplitude/Peso
1	$f_1 :$ $1,5\text{Hz} < f_1 < 2,7\text{Hz}$	0,250
2	$f_2 = 2f_1$	0,063
3	$f_3 = 3f_1$	0,018



FOURIER

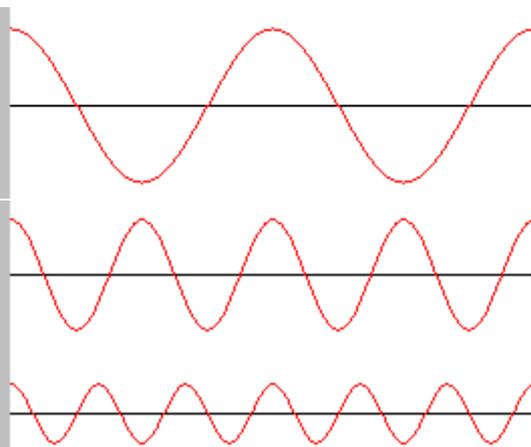




Princípios da Metodologia de avaliação analítica da conformidade funcional (1):

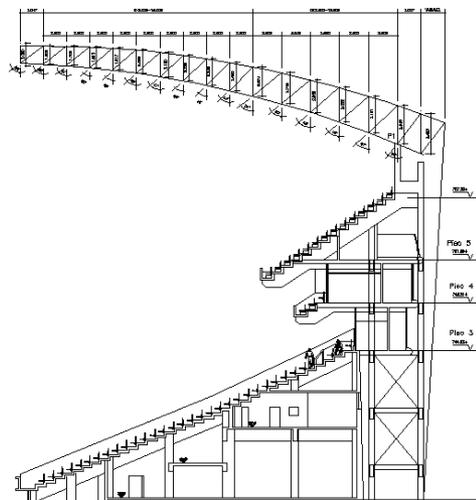
Excitação

“Historia de Forças críticas exercidas pela multidão” (3 Harmônicos)



Estrutura

Idealização matemática



I. S. E.

Resposta

O resultado da análise :
Histórias de Acelerações.

?

$a < 0,1g$

SIM:
OK!!!

NÃO:
então
modificar



Princípios da Metodologia de avaliação analítica da conformidade funcional (2):

- A) O modelo da estrutura não inclui a Massa associada ao peso dos espectadores.
- B) As amplitudes das excitações harmônicas são bem menores das que foram adotadas no passado.

As excitações padronizadas são resultado de Estudos de Retro-análise das respostas medidas em estruturas reais e em eventos reais nos quais a correlação das respostas com as excitações foi efetuada na base de modelos analíticos nos quais não foi incorporada a massa dos espectadores.



Princípios da Metodologia de avaliação analítica da conformidade funcional (2'):

- A) O modelo da estrutura não inclui a Massa associada ao peso dos espectadores.
- B) As amplitudes das excitações harmônicas são bem menores das que foram adotadas no passado.

As amplitudes dos harmônicos da excitação padrão estão calibrados de acordo aos resultados de medições e neles estão embutidos considerações correlacionadas com o “talento” de sincronização da multidão e do amortecimento associado à interação Multidão- Estrutura.



O espectador não é massa solidária da estrutura (ele não está grudado à arquibancada nem é infinitamente rígido)





Aos efeitos da análise, podemos supor que o espectador não está na arquibancada, mas tem lá 3 AVATARES :

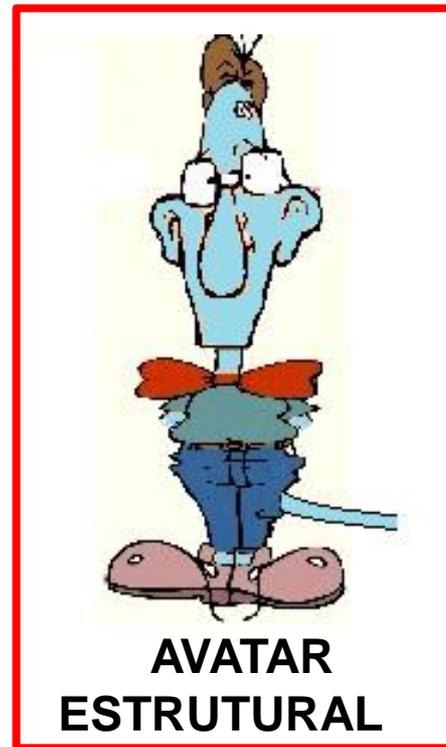
Excitação

Estrutura

Resposta



“exerce os 3
Harmônicos”



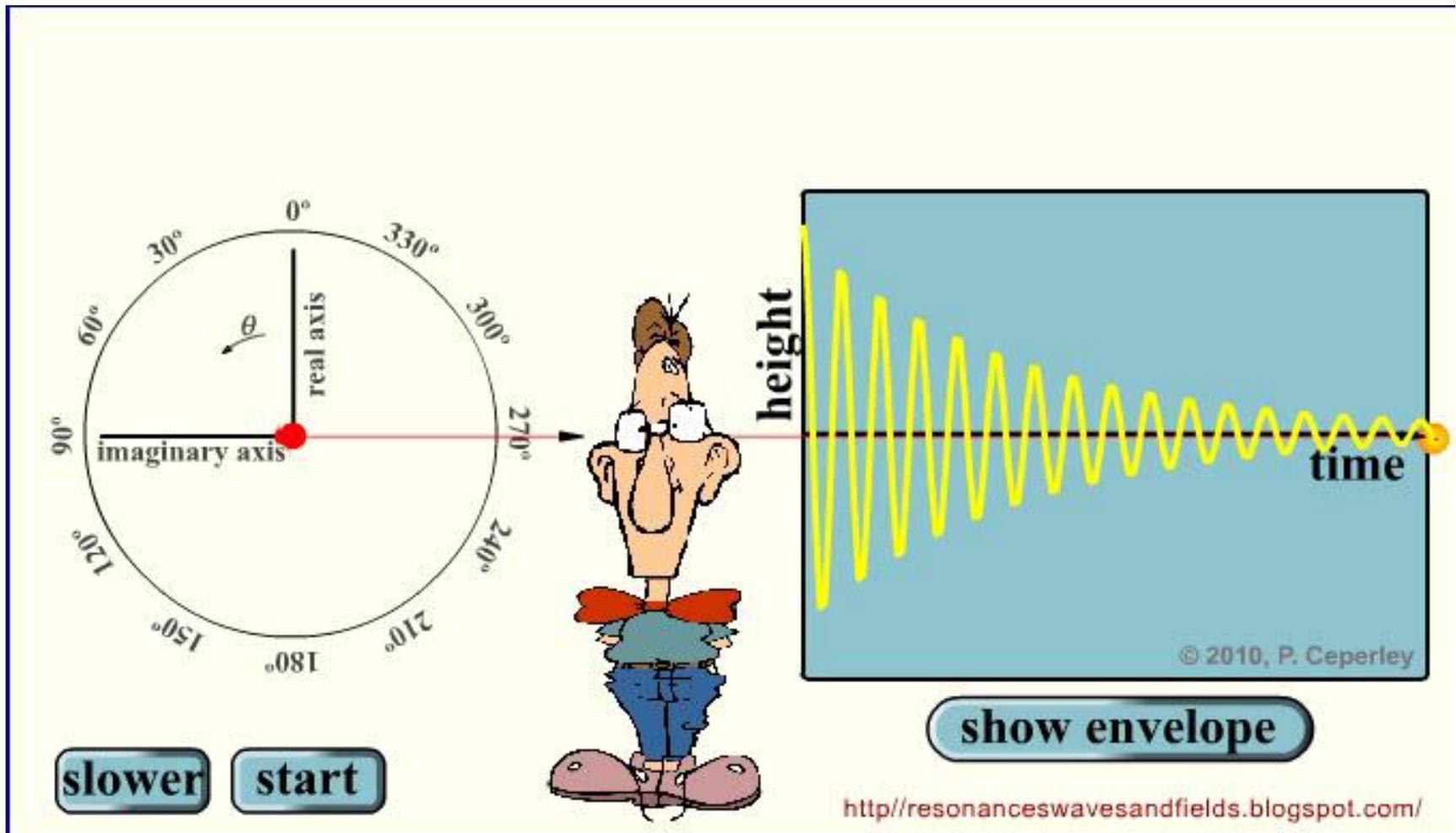
AVATAR
ESTRUTURAL



Não tolera
 $a > 0,1g$

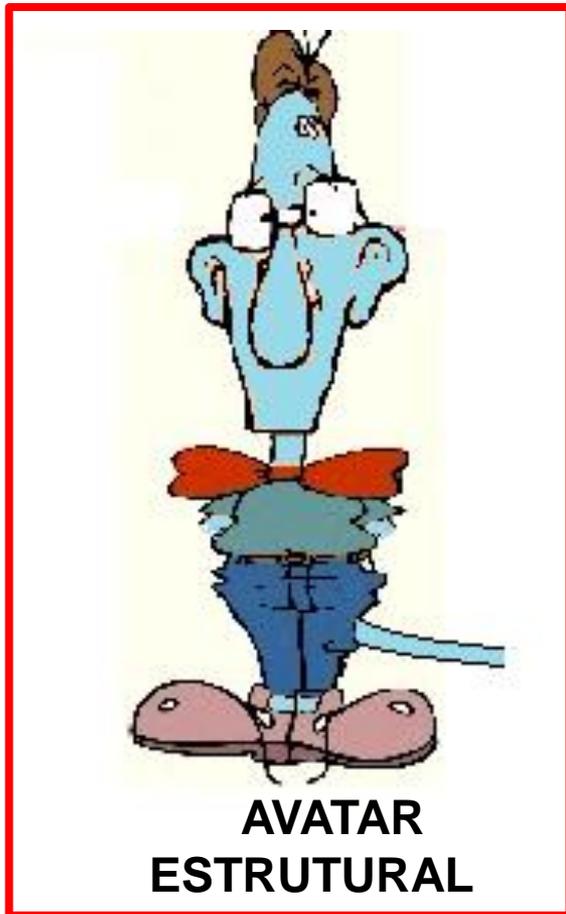


Interação Espectador-Estrutura:

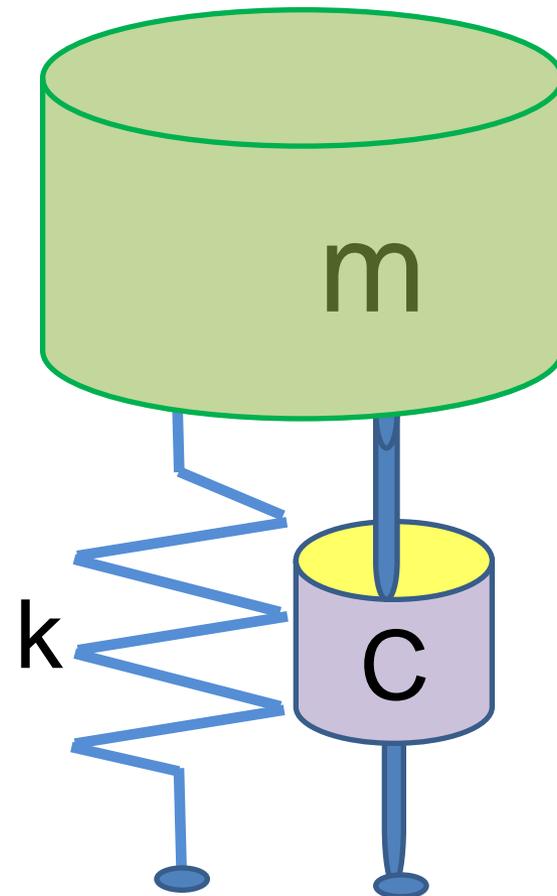




Interação Espectador-Estrutura:

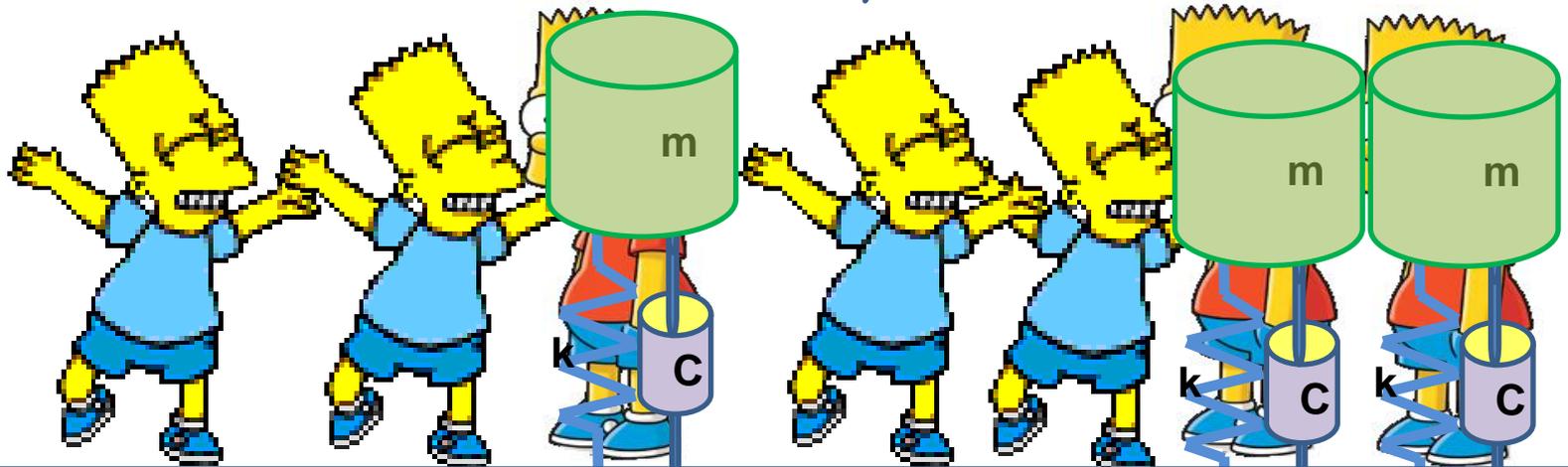


\approx





Quem não pula é amortecedor, La-La-La





- Uma multidão pulando atua somente como excitação e as características modais da estrutura são aquelas da arquibancada vazia.
- Uma multidão passiva interage com a estrutura mudando os parâmetros estruturais, e especialmente os parâmetros modais.

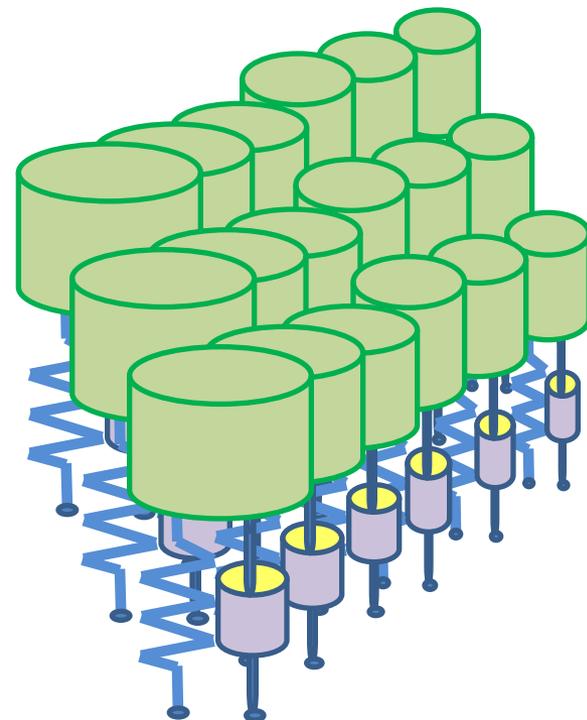


Parâmetros dinâmicos equivalentes médios de um ser humano **SENTADO** :

Freqüência natural: 5 Hz ; Taxa de Amortecimento: 40%



Amortecedor eficiente do
2^º harmônico



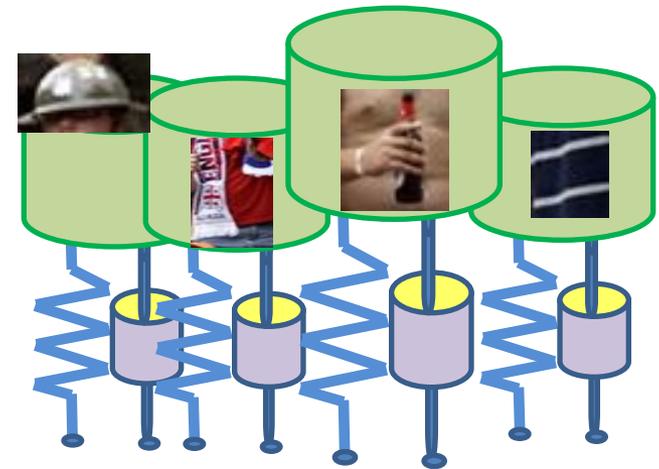


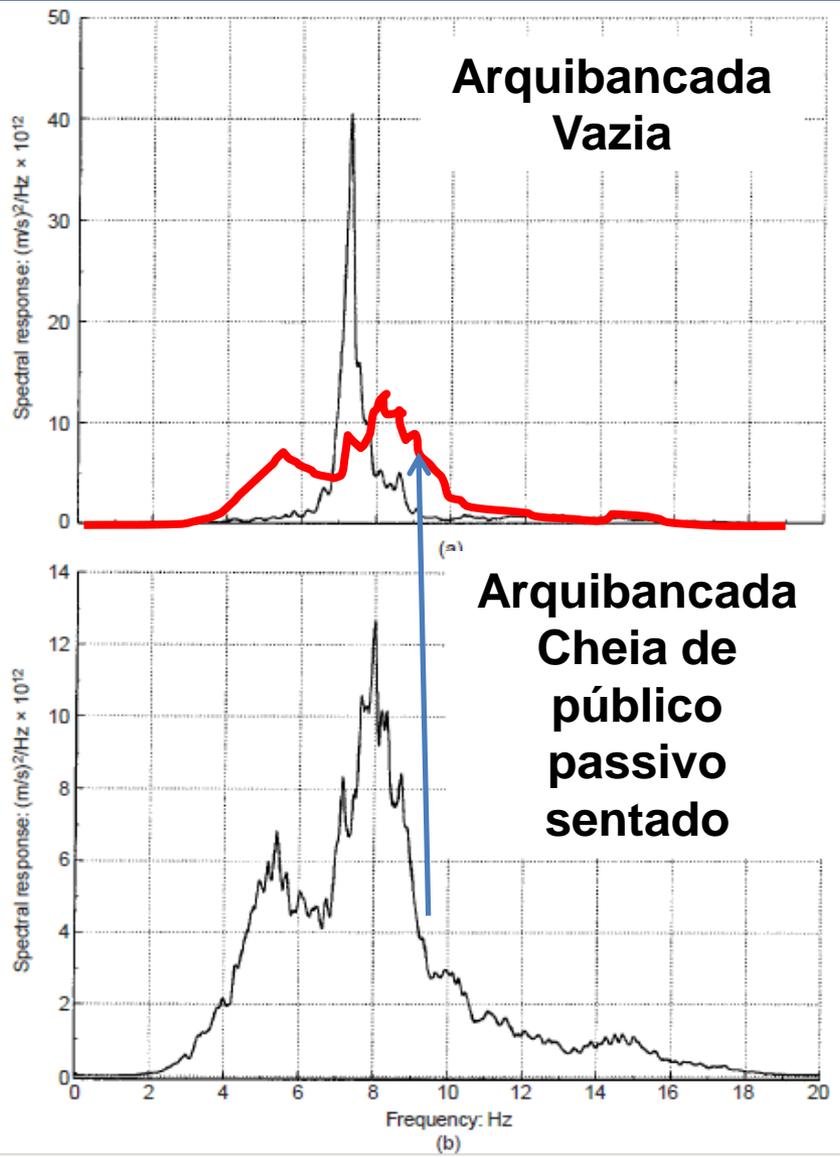
Parâmetros dinâmicos equivalentes médios de um ser humano **PARADO** :

Freqüência natural: 2,3 Hz ; Taxa de Amortecimento: 25%



Amortecedor eficiente do
1^o harmônico

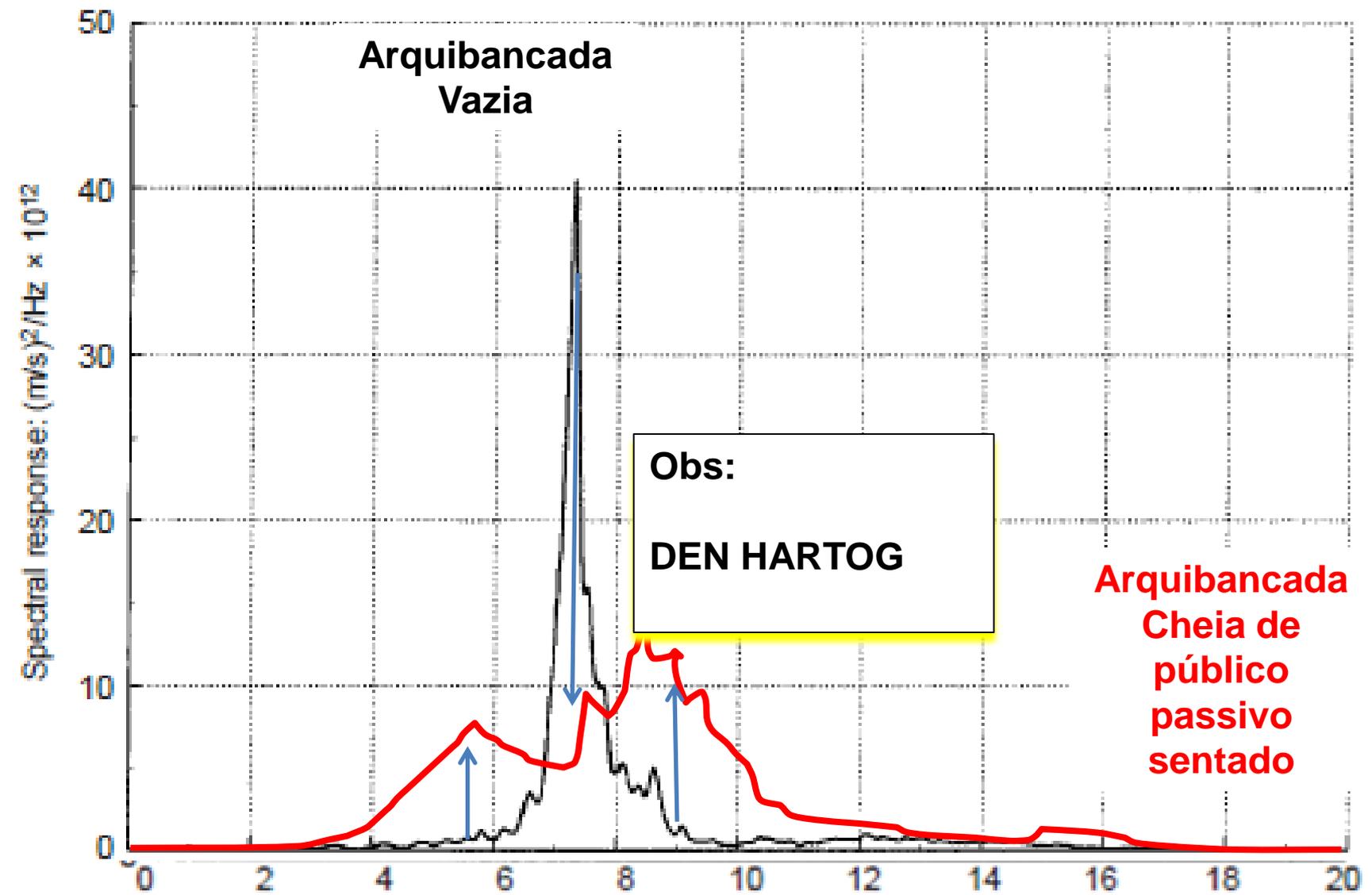




Diagramas de Auto-densidade espectral demonstram a alteração dos parâmetros modais da arquibancada devida à interação Multidão -estrutura.

Os espectadores atuam como atenuadores muito eficientes!!!

A interação Multidão - Estrutura é determinante no desempenho funcional.





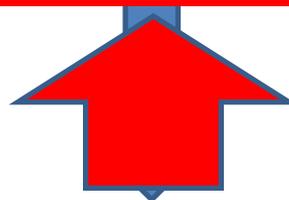
As altas taxas de amortecimento da Multidão fazem que os modos próprios de vibração da Estrutura associados à Interação com a Multidão sejam “Não Clássicos” (não se cumprem as Hipóteses de Rayleigh):.



A análise mediante a metodologia modal clássica que contemple o efeito do amortecimento devido à multidão é inviável.



A adoção das amplitudes de Harmônicos calibrados de acordo à Retro-análise de Eventos Reais correlacionados com Modelos Analíticos Lineares de Arquibancadas Vazias permitem efetuar a análise de resposta clássica de maneira assertiva assumindo taxas de amortecimento modal aparente de 2,5%.

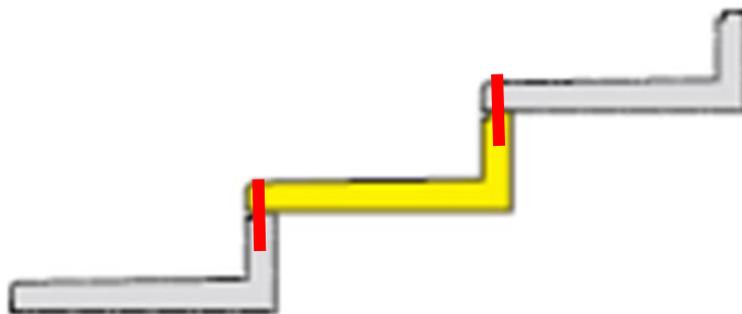


A análise mediante a metodologia modal clássica que contemple o efeito do amortecimento devido à multidão é inviável.



Considerações finais (1) :

Os elementos “DEGRAUS” das arquibancadas geralmente não são os críticos no desempenho dinâmico funcional já que, mediante a adoção de detalhes adequados, consegue-se afastar da exposição a efeitos de ressonância.





Considerações finais (2A) :

Os PÓRTICOS das arquibancadas de grande porte terão freqüência naturais baixas.

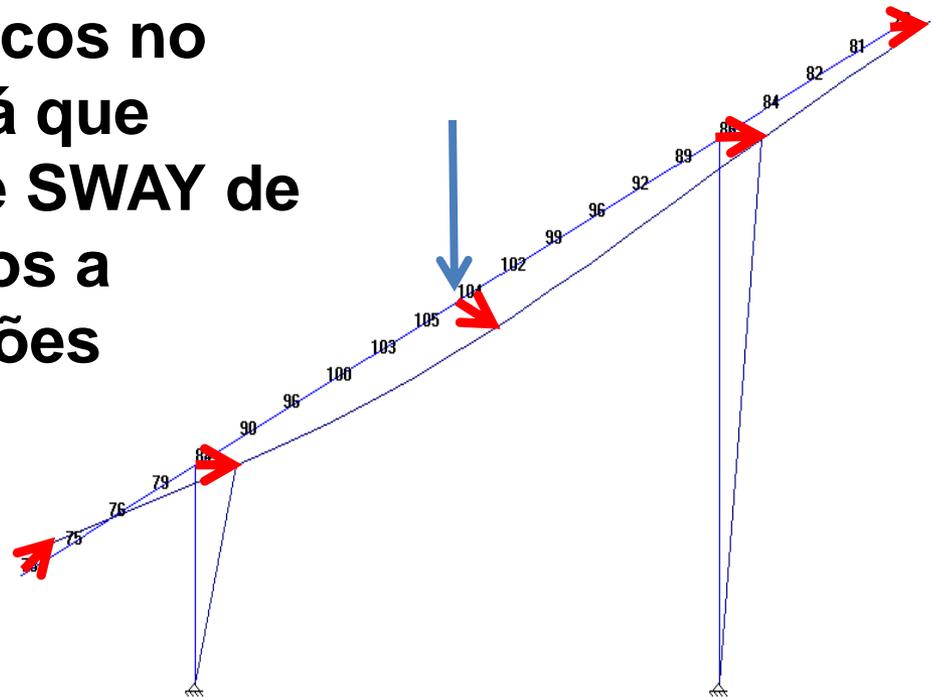
O StructE exige que a freqüência seja maior que 1,5 Hz já que a estrutura ficaria exposta a LOCK-IN .

Porem, sugerimos avaliar o potencial real de exposição a LOCK-IN adotando métodos alternativos (por exemplo critério DIN).



Considerações finais (2B) :

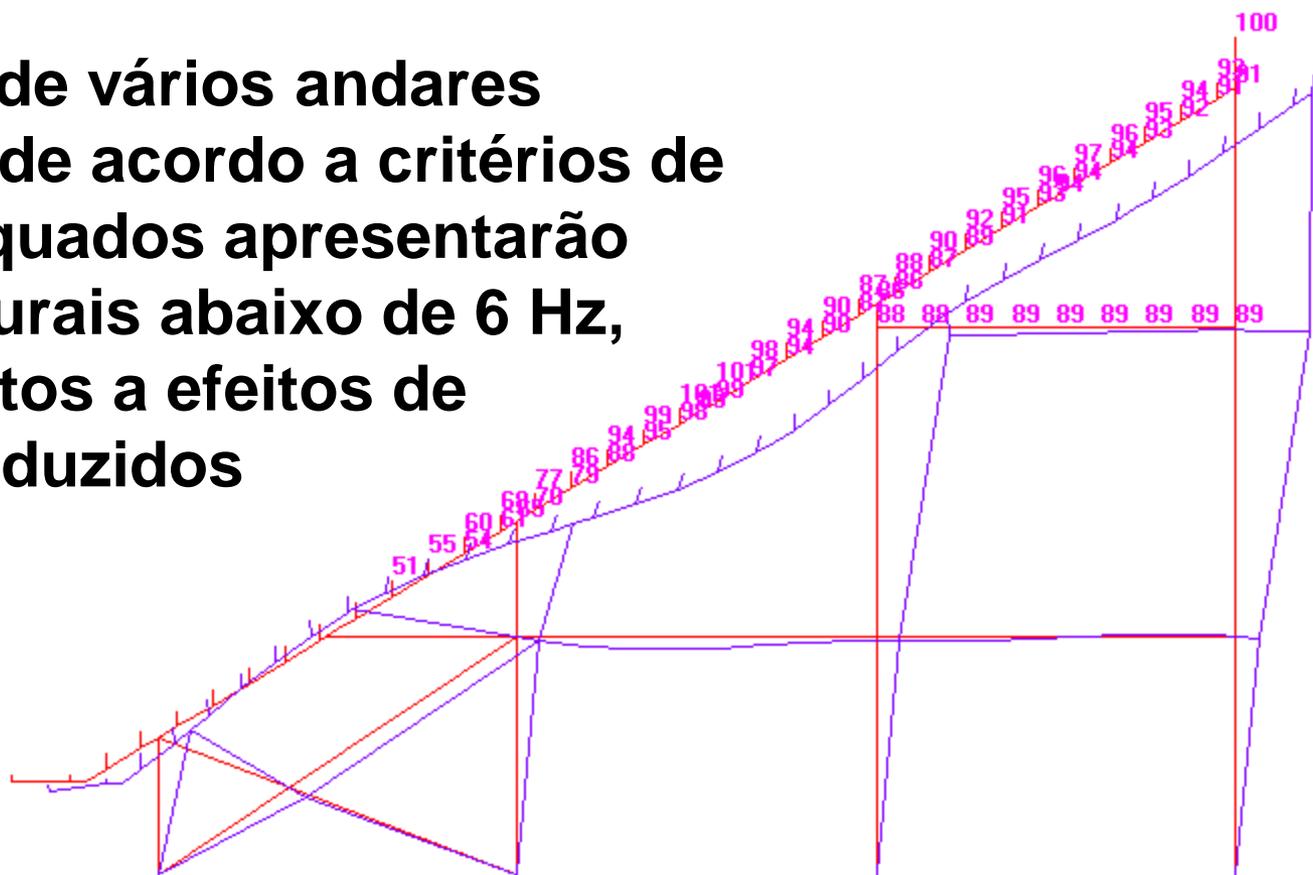
Os PÓRTICOS das arquibancadas de grande porte são críticos no desempenho dinâmico já que apresentarão MODOS de SWAY de baixa frequência expostos a ressonância das excitações verticais induzidas pela Multidão Ativa.





Considerações finais (3) :

Arquibancadas de vários andares dimensionadas de acordo a critérios de resistência adequados apresentarão freqüências naturais abaixo de 6 Hz, e estarão expostos a efeitos de Ressonância induzidos pela multidão.





Considerações finais (4) :

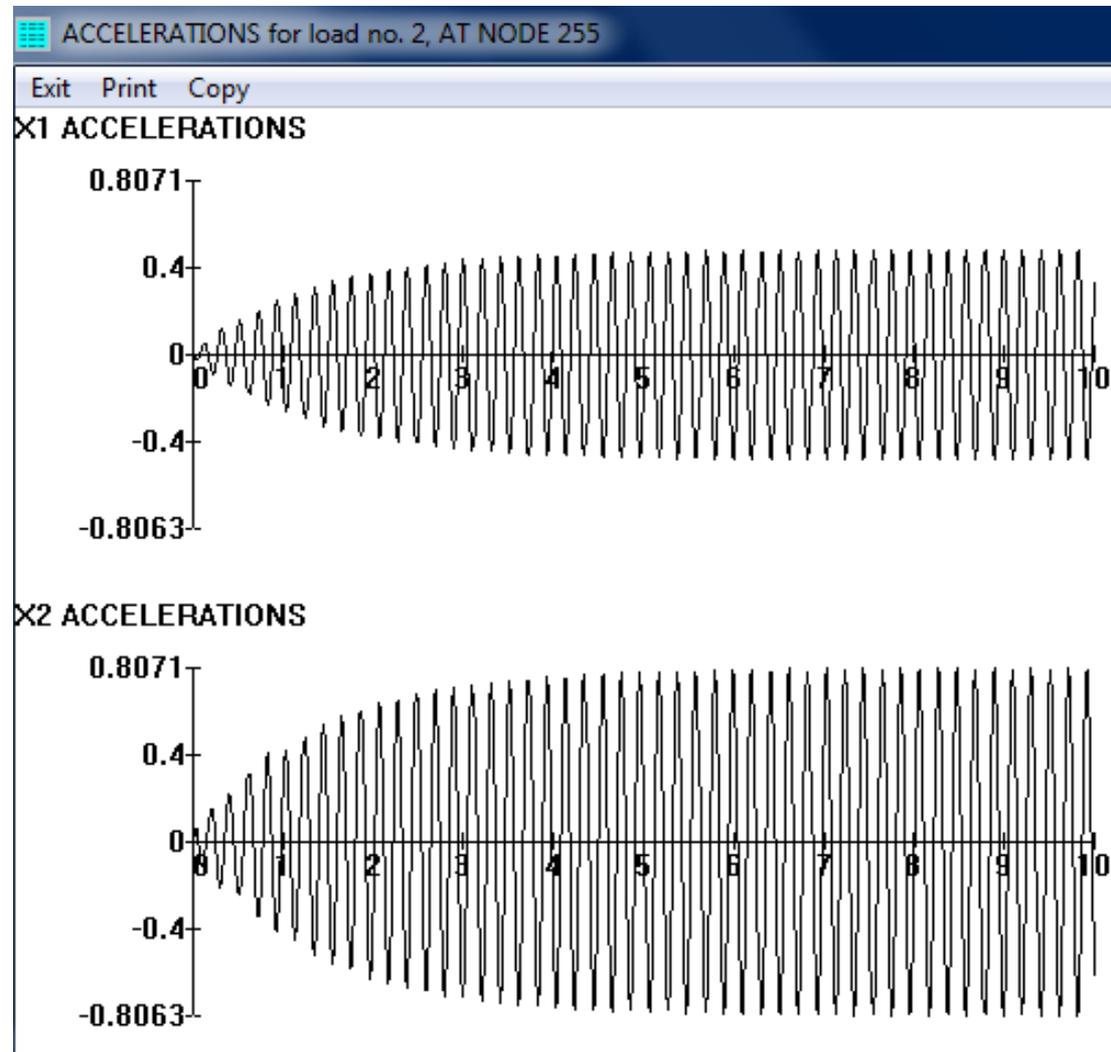
O incremento da rigidez dos pórticos até atingir frequências naturais além das expostas a efeitos de ressonância da Multidão é uma estratégia ineficiente e onerosa.



Considerações finais (5) :

O desempenho deverá ser avaliado analiticamente para garantir que as acelerações de resposta sejam aceitáveis.

Ressonância implica Amplificação, mas não necessariamente desempenho inadequado.





Considerações finais (6) :

A adoção das amplitudes de Harmônicos calibrados de acordo à Retro-análise de Eventos Reais correlacionados com Modelos Analíticos Lineares de Arquibancadas Vazias permitem efetuar a análise de resposta clássica de maneira assertiva assumindo taxas de amortecimento modal aparente de 2,5%.



Considerações finais (7) :

Softwares de projeto estrutural usados no Brasil já incorporaram as ferramentas de Análise de Resposta.

As pesquisas abrangentes desenvolvidas nos últimos anos fornecem parâmetros confiáveis para a avaliação analítica do desempenho das arquibancadas mediante Análise de Resposta do modelo estrutural.



Considerações finais (8) :

A adoção das novas Ferramentas de Análise disponíveis e a atualização constante dos “conceitos, critérios e parâmetros” nos nossos projetos propiciam o desempenho funcional adequado das estruturas no Brasil.



**CONFIABILIDADE
E DESEMPENHO**



13' ENECE 2010
ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA E CONSULTORIA ESTRUTURAL



OBRIGADO