

Análise e Avaliação do Desempenho Funcional no Projeto Estrutural de Arquibancadas

Eng. Sérgio Stolovas

Introdução

O projeto das estruturas foi tradicionalmente inspirado na necessidade de que as mesmas resistam com margens de segurança razoavelmente conservadoras às solicitações extremas às quais estarão submetidas durante a vida útil.

Essa tem sido e seguirá sendo a parte essencial da estratégia e possivelmente o critério dominante na escolha das soluções e no dimensionamento das estruturas: *“Os estados de carga normativos devem ser sempre definidos de acordo com os cenários de carga extrema de maneira a diminuir ao máximo a probabilidade de exceder os limites de resistência em qualquer conjuntura”.*

“...a Engenharia de Estruturas conseguiu desenvolver com sucesso metodologias e critérios nos quais os estados de carga eram definidos como “estáticos”, mesmo para aqueles casos nos quais a natureza intrínseca é predominantemente dinâmica.”

Em geral, a Engenharia de Estruturas conseguiu desenvolver com sucesso metodologias e critérios nos quais os estados de carga eram definidos como “estáticos”, mesmo para aqueles casos nos quais a natureza intrínseca é predominantemente dinâmica (com mudanças de solicitações e deformações).

Quase desde as origens das normativas estruturais, as diretivas de projeto adicionaram “limitações de deslocamento” com o objetivo de controlar efeitos de 2ª ordem e também propiciar (ou talvez apostar) que o desempenho dinâmico seja adequado quando a índole da solicitação não é estática.

Projetos estruturais assim desenvolvidos resultaram, na maioria

dos casos, em desempenhos dinâmicos aceitáveis ou pelo menos sem incidência significativa de reclamações dos usuários. O sucesso parcial das estratégias de “simplificação estática” fez perdurar as mesmas.

“Nas últimas décadas, vem acontecendo mudanças significativas tanto no comportamento das torcidas como nas aspirações de conforto dos usuários das arquibancadas.”

Porém, faz tempo que muitos casos de desempenho inadequado apontam à necessidade de modificar, aprimorar ou pelo menos ajustar as metodologias e as exigências do projeto estrutural de arquibancadas.

Nas últimas décadas, vem acontecendo mudanças significativas tanto no comportamento das torcidas como nas aspirações de conforto dos usuários das arquibancadas. Isso leva a que os critérios de projeto devam se ajustar para poder garantir alvos de desempenho aceitáveis em cenários de excitação que, no passado, não estavam incluídos nos roteiros de avaliação do projeto.

A incorporação de tecnologias de construção modernas e de ferramentas de análise estrutural sofisticadas vem propiciando a realização de estruturas mais arrojadas que resultam geralmente mais flexíveis e leves.

A diminuição da rigidez leva a que as frequências naturais sejam menores, e por isso mais expostas à ressonância para as cadências das excitações induzidas pelas multidões.

A diminuição da massa estrutural aparentemente contribuiria para controlar efeitos de ressonância resultante da diminuição de rigidez.



Porém tal conjectura é errada, já que a diminuição da massa contribui grandemente para a excitabilidade da estrutura. De fato, ao diminuir a massa, “os torcedores precisam entregar menos energia” para imprimir a quantidade de movimento crítica na oscilação da estrutura. Daí que resulta inadequado e ineficiente tentar controlar os níveis de resposta unicamente com a limitação por excesso das frequências naturais fundamentais das estruturas ignorando a incidência associada à quantia da massa solidária.

“Arquibancadas de eventos esportivos não são estruturas que sustentam um grupo de pessoas que assistem passivamente ao jogo. A atividade dos torcedores pode induzir níveis de resposta estrutural muito além do que foi considerado nas normas tradicionais.”

Arquibancadas de eventos esportivos não são estruturas que sustentam um grupo de pessoas que assistem passivamente ao jogo. A atividade dos torcedores pode induzir níveis de resposta estrutural muito além do que foi considerado nas normas tradicionais. Muitas estruturas de estádios de futebol que foram projetadas de acordo com critérios tradicionais apresen-

taram problemas associados ao desempenho dinâmico inadequado das arquibancadas. Podemos destacar três exemplos de desempenho dinâmico inadequado de estádios no Brasil:

- O estádio de Maracanã, no Rio de Janeiro, apresentou acelerações verticais excessivas induzidas pelas torcidas provocando desconforto nos assistentes em repouso. Foram verificadas grandes oscilações verticais que, além de desconforto do usuário, seriam a causa da aparição de fissuras de flexão.
- O estádio do Grêmio de Porto Alegre apresentou problemas de desempenho dinâmico associado às componentes de oscilação predominantemente horizontais.
- O estádio do Morumbi, em São Paulo, apresentou também níveis excessivos de vibração nos setores superiores das arquibancadas.

Princípios da Análise de Resposta

A Análise Dinâmica de uma estrutura começa pela formulação das características da **Excitação**, da **Estrutura** e pela definição da **Resposta** aceitável.

A **Excitação** pode sempre ser representada por uma História de Forças. A **Estrutura** terá associado um modelo analítico (modelo matemático representativo da estrutura real que, por simplicidade, chamamos Estrutura). No processo da análise, a **Estrutura** (ou modelo estrutural) é submetida à **Excitação** (História de Forças) e será obtida a **Resposta** em termos de Histórias de esforços e/ou deslocamentos. Conforme for o nível de Resposta de deslocamentos (geralmente em termos de acelerações), poderá ser decidida a aceitabilidade ou não do desempenho funcional da estrutura.

A **Análise Estática** pode ser também visada mediante uma formulação similar. Em Estática, a excitação limita-se a uma força generalizada supostamente constante no tempo. Mesmo se assumirmos que essa força generalizada possa mudar, na Estática será de interesse considerar exclusivamente valores críticos extremos e não uma

História de Forças. Ou seja, a Estática não considera efeitos de mudança de solicitação; supõe que a mudança é tão devagar que a estrutura pode ser analisada mediante uma sucessão de situações estáticas (ou quase estáticas). O modelo matemático de uma estrutura na **Análise Estática** é baseado no “respeito” do equilíbrio e das condicionantes de rigidez para cada cenário estático possível. A Resposta estrutural para cada cenário na Análise Estática é um vetor de deslocamentos, deformações ou parâmetros de avaliação local (momentos, cortantes, forças axiais, etc.). Sem perder pela generalidade, podemos dizer que a **Resposta Estrutural** na Estática fica totalmente determinada a partir do conhecimento do deslocamento da estrutura, já que a partir do estado de deformação, conhecendo os parâmetros de rigidez, poderemos deduzir o valor de qualquer parâmetro relevante na avaliação de aceitabilidade (resistente ou funcional).

“A Estrutura no modelo de Análise Dinâmica não poderá ser definida unicamente mediante a rigidez, mas será preciso incorporar a massa (distribuição de massas) e os mecanismos existentes capazes de dissipar energia.”

A Estrutura no modelo de **Análise Dinâmica** não poderá ser definida unicamente mediante a rigidez, mas será preciso incorporar a massa (distribuição de massas) e os mecanismos existentes capazes de dissipar energia (por exemplo, a taxa de amortecimento estrutural). Daí que na Dinâmica não será suficiente definir a rigidez da estrutura; será importante considerar as qualidades inércias (associadas às massas) e o “talento” da estrutura em desperdiçar a energia fornecida pela excitação (parâmetros de amortecimento).

A Resposta Dinâmica fica definida a partir da História de deslocamentos resultantes da Análise Dinâmica. Na maioria dos casos, a qualificação do desempenho estará determinada pelas funções derivadas temporais

do deslocamento (velocidades, acelerações). Em particular, para a avaliação da aceitabilidade associada ao conforto humano, o parâmetro relevante será a aceleração extrema no local da estrutura que sustenta o torcedor. Nos aspectos associados à integridade estrutural, as configurações extremas de deformação serão as que determinarão os valores críticos (associados à aceitabilidade resistente).

Teoricamente, definindo adequadamente a **Estrutura** e as **Excitações**, resolveríamos as equações do movimento da **Estrutura** e obteríamos a **Resposta**. Pesquisas desenvolvidas nos últimos anos já convergem a valores confiáveis que permitem definir as características da excitação induzida pela multidão e também definir valores de Resposta correlacionada com Níveis de Conforto.

Alvos de desempenho

A ação da torcida estaria resultando em excitações transientes e cíclicas, ações cujos vetores de amplitude teriam componentes verticais e horizontais. Resultado das pesquisas desenvolvidas na última década indicam que a ação determinante do desconforto estaria associada a excitações cíclicas com frequências diretrizes numa faixa estreita de frequências, mas com componentes harmônicos relevantes em 2,3 e 4 vezes a frequência diretriz.

O cenário de excitação crítica não é independente do evento e a caracterização do que chamaríamos “excitação de projeto” exigiria uma análise mais apurada quando a operação do estádio admite a possibilidade de acolher atividades com diretrizes rítmicas sonoras como shows de música e eventos religiosos. Porém, a tendência atual dos eventos de futebol aponta para a manifestação de coordenação rítmica “arquitetada” de movimentos das torcidas organizadas gerando uma verdadeira coreografia da multidão. Os movimentos têm associada uma matriz sonora acompanhada por movimentos quase idênticos, ensaiados e sincronizados dos integrantes da torcida. É usual que tais cenários induzam vibrações na estrutura que ultrapassam os limites de conforto da audiência passiva.

Os movimentos horizontais e a geração de “ondas” coreografadas são parte expressiva das tendências modernas das torcidas. Porém, manifestações transientes relevantes de respostas estruturais induzidas por esses movimentos horizontais, afetariam essencialmente arquibancadas temporárias e não foram registradas respostas com incidência no conforto em arquibancadas permanentes cuja frequência fundamental dos modos predominantemente horizontais resulta maior que 1,5Hz. Devemos distinguir entre a baixa incidência das componentes horizontais das excitações e as altas respostas horizontais induzidas pelas componentes de excitação verticais. De fato, a maioria das estruturas de arquibancadas apresenta deslocamentos de SWAY muito relevantes associados a ações verticais. Dada a sensibilidade do ser humano a forças inerciais horizontais, essas componentes devem ser controladas especialmente e podem ser os determinantes em certos locais da arquibancada (geralmente nos sectores superiores)

Um cenário de excitação horizontal extrema resulta da expectativa de quando ia se produzir um gol e o mesmo não acontece. É nesse caso que os torcedores que tinham ficado em pé tornam a sentar-se ao mesmo tempo empurrando eficientemente a arquibancada. A regra prescritiva adotada para levar em conta esse cenário e outros de excitação horizontal é verificar (nos aspectos de resistência e estabilidade) a arquibancada para uma força horizontal de +/-5% do valor da sobrecarga acidental normativa. Para arquibancadas destinadas a Shows de música ao vivo, a força horizontal recomendada é +/-7,5%. Cabe ressaltar que se trata de um carregamento estático equivalente.

As normativas modernas orientam à definição de alvos de desempenho em função de cada um dos possíveis cenários. Esses alvos de desempenho (aceitabilidade de níveis de resposta) estão geralmente correlacionados com a probabilidade de o evento extremo acontecer, mas, no caso das arquibancadas, resulta decorrente da aspiração diferenciada de conforto dos usuários presentes em cada cenário de car-

regamento. Admite-se que, nos eventos esportivos com arquibancada lotada, parte dos espectadores (os passivos) experimente certo nível de “desconforto tolerável” associado a uma aceleração RMS combinada de 7,5%g. Para Shows de música ao vivo, admite-se que os participantes estarão propensos a aceitar níveis vibracionais bem mais intensos onde a limitação de aceleração RMS combinada poderá ser de até 20%g.

O ser humano é especialmente sensível a efeitos inerciais horizontais e deve ser cogitado adotar limites de aceitabilidade mais reduzidos quando a componente horizontal resulta preponderante.

Conceito de Interação Torcedor – Estrutura

O aspecto mais problemático na Análise Dinâmica das estruturas de arquibancadas resulta da necessidade de adotar definições adequadas da Estrutura, da Massa estrutural e do Amortecimento.

Os torcedores, que estão sustentados pela estrutura da arquibancada, são os agentes da Excitação, os receptores da resposta, e representam de maneira parcial a massa solidária, ao tempo em que interagem estruturalmente com a estrutura como apêndices da mesma. Pesquisas baseadas no monitoramento de arquibancadas em eventos reais demonstram que considerar a ação dos torcedores unicamente como Histórias de Forças não é suficiente. Considerar a massa dos torcedores como massa solidária com a estrutura resulta inexato, já que excitando ou em atitude passiva eles não estão, jamais, “grudados à estrutura”.

O fato do desconforto devido à oscilação da estrutura, sofrido pelos torcedores, aponta claramente à presença de efeitos de ressonância dessas subestruturas que chamamos “os torcedores passivos”. Daí que esse desconforto pode ser considerado como sintoma e manifestação da incidência da ação passiva dos torcedores como apêndices ressonantes da estrutura (“*Tuned Mass Dampers*”) que estariam interagindo com a mesma e a amortecendo (“roubando energia da estrutura”) de maneira mais ou menos

eficiente. Quanto menor a massa estrutural e quanto maior resulta a massa associada aos torcedores passivos, maior será a incidência da interação “torcedor - estrutura”.

Ao mesmo tempo, a flexibilidade da estrutura potencializa os efeitos do torcedor, não somente propiciando a ressonância, mas também incrementando a energia introduzida ao sistema, devido ao deslocamento maior do ponto de aplicação da força exercida pelo torcedor.

No passado, a excitação exercida pela torcida era assumida como forças externas cujas características seriam independentes da resposta estrutural (do deslocamento da estrutura). Foi essa simplificação que conduziu às recomendações de adoção de estruturas de frequência natural alta. Ou seja, assumia-se como única alternativa de garantia de desempenho adequado o controle dos efeitos de ressonância. Porém, a obediência a recomendações dessa natureza resulta em estruturas caras e até inviáveis para a maioria das configurações modernas de estádios com arquibancadas para público numeroso.

Os avanços nas pesquisas levaram à conclusão de que para estruturas com frequências naturais menores que 7Hz, a resposta estrutural resulta governada (ou grandemente influenciada) pela interação mecânica entre a multidão e a estrutura que a sustenta.

Podem ser desenvolvidos modelos nos quais os torcedores passivos ou ativos são idealizados como osciladores sustentados pelas arquibancadas. Os modelos mais realistas deveriam adotar “torcedores” como subestruturas de 2 ou mais graus de liberdade. Uma simplificação disso pode ser assumir a “unidade torcedor passivo” como um oscilador característico de massa 80 kg, frequência natural 5Hz e taxa de amortecimento linear crítico de 40%. A “unidade torcedor ativo” teria a frequência natural característica 2,3Hz e a taxa de amortecimento linear crítico de 25%. Estes valores, baseados em resultados paramétricos de medições em arquibancadas em eventos reais, põem de manifesto a alta eficiência do “torcedor passivo” em responder como um amortecido-

dor sintonizado com o 2º harmônico da excitação induzida pelo “torcedor ativo”. Daí resulta também razoável a propensão ao desconforto do usuário passivo.

Esta estratégia de modelagem estrutural pode conduzir a resultados realistas que se correlacionam de maneira quase exata com as medições de campo das respostas estruturais. Porém, a adoção dessas hipóteses resulta problemática como estratégia para a análise associada ao projeto estrutural. Nela estaríamos nos afastando das hipóteses de Rayleigh. Ou seja, o alto amortecimento concentrado no elemento “torcedor passivo” obrigaria a processar modos não clássicos (complexos) de oscilação ou adotar métodos de integração direta que conduziriam a respostas realistas, porém com padrões de difícil interpretação.

Estratégia da análise de resposta estrutural para a avaliação funcional de arquibancadas de estádios de futebol

Resulta comum adotar o modelo estrutural dinâmico como adaptação do modelo estático mediante definições de massas a partir de cargas verticais. Deve-se tomar precauções especiais para não definir erroneamente as massas a partir de definições normativas de carregamento que incluem coeficientes de majoração embutidos (seja em ELS ou ELU), já que isso leva a sobre-estimar a massa solidária. Adotar massas além das reais não implica segurança e desvirtua o real comportamento dinâmico reduzindo significativamente as frequências naturais.

Na análise estática são, muitas vezes, definidas cargas concentradas associadas a reações de subsistemas. Ao considerar como massas solidárias concentradas partes que conformam apêndices flexíveis, o desempenho dinâmico também resulta desvirtuado. Especial atenção deve ser dada à interação estrutura-cobertura, cuja massa não deverá jamais ser definida a partir da reação nos pilares da estrutura e será necessário incorporar a mesma de maneira realista no modelo dinâmico. Porém deverá ser evitada a incorporação (no modelo analítico

dinâmico) de elementos de massa irrelevante e frequência natural baixa, já que eles obrigarão a levar em conta a quantidade de modos que dificultam a interpretação dos padrões da estrutura e, em certos casos, podem inviabilizar o desenvolvimento da análise devido ao tempo excessivo do processamento do modelo analítico.

Se não se tiver uma justificativa específica, na adoção do modelo analítico linear espacial recomenda-se assumir a taxa de amortecimento linear crítico modal uniforme na faixa dos 2% (0,02 para todos os modos). A incidência do alto amortecimento associado aos espectadores passivos pode ser assumida em termos de redução da eficiência da excitação induzida e embutida como ajuste dos coeficientes de Fourier da excitação.

“Na hora de analisar o modelo global, aparecerão muitos modos de vibração cujas frequências são próximas umas das outras e que são derivados de um mesmo modo de vibração do pórtico tipo isolado.”

Como já foi mencionado, dispensa-se geralmente a avaliação da resposta dinâmica devida a componentes (projeções) horizontais da excitação, mas devem ser levadas em conta as componentes horizontais da resposta induzidas pela excitação vertical padrão.

Deve ser ressaltada a necessidade de que o modelo estrutural de avaliação final seja global e que inclua todas as massas participantes representadas de maneira realista e de acordo aos vínculos das mesmas com a estrutura.

As etapas de montagem devem ser visadas na avaliação resistente. Por exemplo, os elementos pré-moldados, que geralmente conformam os degraus, devem ser projetados de acordo com as configurações associadas às etapas nas quais o peso próprio é aplicado e isso implica (na maioria dos casos) estar de acordo com as reações transferidas na hora da montagem. Mas, o modelo estru-

tural para a análise dinâmica deverá ser espacial e, nele, pórticos e degraus deverão ser definidos de acordo com os vínculos finais e também de acordo com a rigidez real em serviço dos vínculos.

Em geral, as acelerações extremas serão atingidas nos centros de vãos dos elementos que conformam os degraus. Porém, o desempenho dinâmico do conjunto resulta principalmente ser governado pelos pórticos das “vigas jacarés” que sustentam os degraus.

Na hora de analisar o modelo global, aparecerão muitos modos de vibração cujas frequências são próximas umas das outras e que são derivados de um mesmo modo de vibração do pórtico tipo isolado. Daí que, no modelo global, resulta difícil reconhecer os padrões dos modos próprios de vibração, e será trabalhoso e às vezes confuso agrupá-los de acordo com isomorfismos. Por isso, é importante, na etapa preliminar da análise, pesquisar os modos de vibração do pórtico isolado considerando os elementos que conformam os degraus como infinitamente rígidos.

Esse modelo simplificado inicial torna-se essencial, já que mesmo apresentando um corrimento de frequências naturais a respeito do modelo global, apontará de maneira visualmente clara e explícita os padrões modais que aparecem dissociados no modelo global. Aos efeitos de estimar as frequências dos modos de vibração a partir do modelo simplificado do pórtico isolado da estrutura poderá ser adotada a fórmula de Dunkerley, e prever, de maneira bastante assertiva, quais serão as faixas de frequências naturais reais e os modos excitáveis pelos diferentes harmônicos da excitação.

As excitações exercidas pela multidão podem ser assumidas como cíclicas com frequência diretriz (frequência do 1º harmônico) maior que 1,5 Hz e menor que 2,7 Hz. Estruturas cuja frequência natural modal (cujos deslocamentos modais tenham componentes verticais relevantes) seja menor que 3Hz, estarão expostas a ressonância de 1º harmônico e apresentarão respostas geralmente inadequadas.

A incidência do 3º harmônico resulta relativamente reduzida já que a amplitude é da ordem do 7% da amplitude do 1º harmônico. Daí que dificilmente estruturas cuja frequência natural fundamental seja maior de 6Hz apresentarão níveis de resposta inaceitáveis e poderá se prescindir da análise de resposta detalhada. Deve ser ressaltado que estruturas de arquibancadas de mais de um andar correspondentes às tipologias estruturais modernas para estádios dificilmente apresentarão frequências fundamentais maiores que 4,5 Hz.

Estruturas com frequência fundamental menor que 3Hz poderão ter chances de apresentar desempenhos aceitáveis quando a relação entre o peso dos torcedores e o peso da estrutura resulte significativamente baixa, e isso pode acontecer somente no caso de estruturas que sustentam, além das arquibancadas, áreas auxiliares de massa significativa que não estão submetidas a excitação das torcidas.

As estruturas habituais cuja aceitabilidade funcional estará condicionada pela avaliação mediante análise de resposta serão geralmente aquelas cujo modo fundamental está na faixa entre 3Hz e 6Hz.

As formas modais são essenciais para reconhecer as frequências de excitação diretriz que devem ser avaliadas e a configuração da “região ativa crítica”. Para os casos típicos de frequências naturais entre 3Hz e 6Hz, as frequências diretrizes críticas da excitação deverão ser ajustadas para que a frequência do 2º harmônico coincida com a frequência natural ($2f_d=f_n$, sendo f_d a frequência diretriz e f_n cada frequência natural menor ou igual a 5,4 Hz). A configuração da região com população ativa será a associada entre pontos de deslocamentos modais verticais do mesmo signo onde esteja incluído o maior deslocamento modal. Por isso, é importante avaliar previamente as configurações críticas no modelo de pórtico plano, para depois analisar de maneira exaustiva as respostas no modelo global para todas as frequências ressonantes e de acordo com os modos isomorfos identificados no modelo plano.

Figura 1
Exemplo de Modos fundamentais de vibração relevantes no modelo simplificado

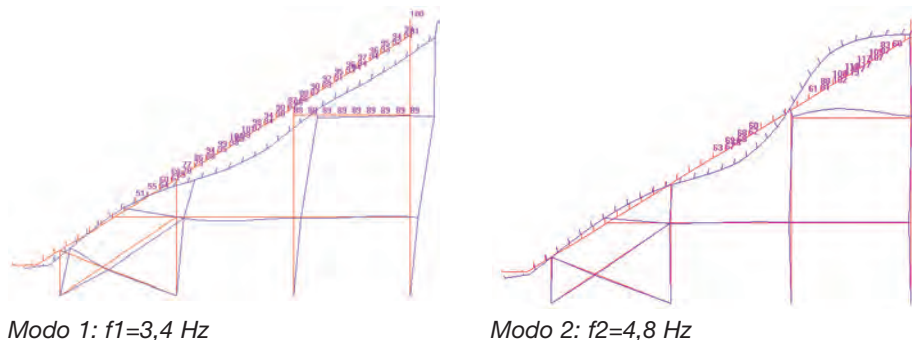


Figura 2
Modelo Global

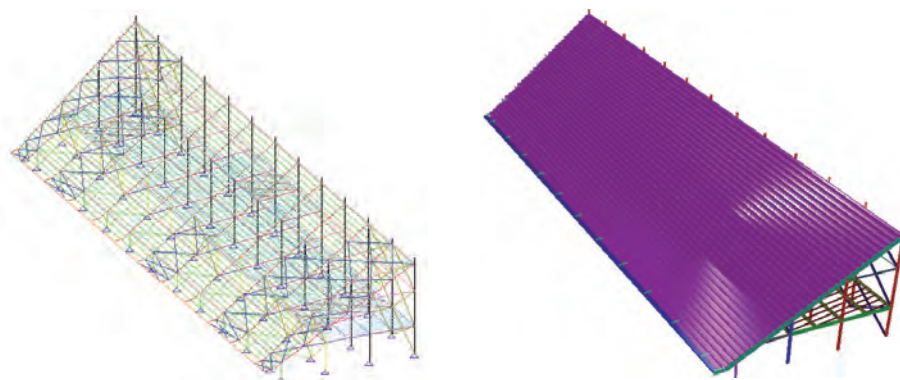


Figura 4
Exemplo de História de Acelerações Verticais de Resposta Estacionária em m/s^2 para um nó de controle

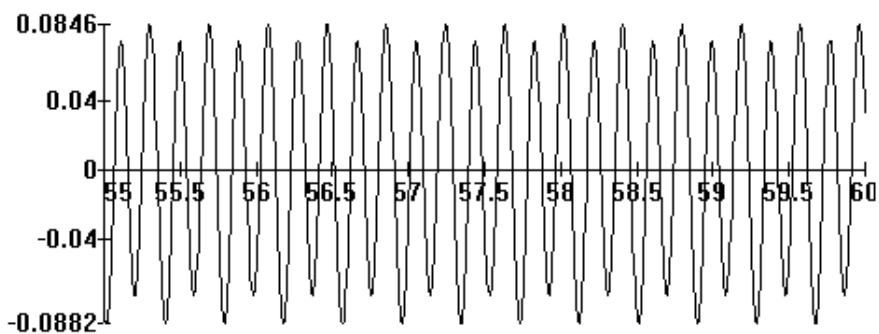


Figura 5
Exemplo de História de Acelerações horizontais de Resposta Estacionária em m/s^2 para o mesmo nó de controle da figura 4

