

## **10**

### **Considerações Finais**

#### **10.1**

##### **Introdução**

Este trabalho teve como objetivo avaliação da resposta dinâmica não-linear geométrica de sistemas estruturais de pisos mistos (aço-concreto), em regime de interação total e parcial, quando submetidos a excitações dinâmicas oriundas de atividades humanas. Essas excitações, na maioria dos casos, provocam vibrações indesejadas em pisos de edificações e as acelerações críticas (acelerações de pico e acelerações rms) desses sistemas estruturais devem ser comparados com os valores admissíveis, recomendados por critérios e normas de projeto disponíveis na literatura técnica, sob o ponto de vista associado ao conforto humano.

Assim sendo, são desenvolvidos modelos de carregamento, de forma a representar de forma mais realista a excitação dinâmica induzida pelos seres humanos, aplicando os mesmos sobre painéis de pisos mistos (aço-concreto) em regime de interação parcial e total com o objetivo de avaliar-se a resposta dinâmica desse tipo de estrutura. Técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos, com base no emprego do programa Ansys [18], foram empregadas para respaldar a presente análise.

#### **10.2**

##### **Conclusões obtidas ao longo do trabalho**

São apresentados nesta seção, os resultados das análises obtidos ao longo de toda a tese, de acordo com a metodologia de análise proposta. As conclusões das análises serão apresentadas, de forma itemizada, como segue:

##### **10.2.1**

###### **Modelagem computacional**

Na modelagem das lajes em concreto armado com forma de aço incorporada (steel deck), o grande desafio consistiu em representar a geometria real do sistema estrutural, devido à forma de aço. Na presente investigação, pelo tipo de elemento sólido, SOLID45 [55], o caráter tridimensional do modelo

estrutural foi efetivamente considerado para o assunto, seguindo-se com rigor a geometria real da laje com steel deck.

A partir dos resultados obtidos ao longo da investigação, objetivando a validação da metodologia de análise proposta, conclui-se que os modelos numéricos computacionais desenvolvidos nesta tese representa o comportamento estrutural da laje com forma de aço incorporada de forma satisfatória.

### **10.2.2 Análise de autovalores e autovetores**

Neste item da tese foi desenvolvida uma análise de vibração livre sobre todos os modelos estruturais investigados, com o intuito de se obter as frequências naturais e os modos de vibração dos mesmos.

Constata-se, que o valor da frequência fundamental dos modelos estruturais diminui na medida em que reduz o numero de conectores na interface laje viga. Com relação ao modo fundamental de vibração dessas lajes com forma de aço incorporada, ressalta-se que em todos os modelos analisados neste trabalho o modo fundamental de vibração é predominantemente de flexão.

### **10.2.3 Modelos de carregamento**

Um fato relevante diz respeito às definições espacial e temporal da função de carregamento. Considerando os sinais de força no tempo para o modelo de carregamento I, os gráficos apresentam vários picos de aceleração na resposta dinâmica estrutural em virtude da aplicação da carga em cada ponto, permitindo descrever as variações espacial e temporal do carregamento. Portanto, os modelos que incluem variações espacial e temporal da carga dinâmica devem ser considerados na análise do conforto humano desta estrutura, haja vista que conduzem a resultados mais próximos da realidade de projeto.

### **10.2.4 Análise do conforto devido ao caminhar humano**

Observou-se que a partir do estudo dos valores encontrados para as acelerações (acelerações de pico e acelerações rms) dos modelos de piso misto (aço-concreto) em regime de interação parcial e total, foi constatado que a

maioria dos valores de aceleração foram superiores aos limites recomendados por manuais e normas internacionais de projeto, ISO [70] e AISC [53].

Os valores das acelerações de pico e em rms (*root mean square*) obtidos no caso da interação parcial foram, em todos os casos, superiores àqueles obtidos quando comparados com a interação total, porém foram da mesma ordem de grandeza. Esse fato demonstra que a variação do número de conectores no piso pode influenciar a resposta dinâmica estrutural.

Esse quadro certamente pode ser um indicativo de que os critérios de projeto (normas de projeto) devem levar em conta o caráter dinâmico da excitação e, especialmente, no caso dos modelos de pisos mistos em regime de interação parcial, a verificação do conforto humano deve ser feita com muita cautela por parte dos projetistas de estruturas.

Finalmente, os resultados alcançados indicam que os modelos estruturais de pisos mistos em regime de interação parcial são mais suscetíveis a problemas de vibrações excessivas quando comparados com o modelo de piso em regime de interação total, pois claramente revelam problemas de desconforto humano.

Assim sendo, essa investigação contribui para chamar a atenção dos projetistas de estruturas, pois têm sido observados e constatados inúmeros casos reais correspondentes a estruturas desta natureza com problemas de vibrações excessivas, certamente causados por problemas específicos apontados e estudados detalhadamente nesta tese.

#### **10.2.4.1 Efeito do número de pessoas sobre o piso**

Com referência a modelagem do carregamento dinâmico, associado ao caminhar humano, foram desenvolvidos quatro casos de carga distintos correspondentes a aplicação desta ação sobre pisos mistos aço-concreto em regime de interação total e parcial. Observa-se que a medida em que o número de pedestres cresce, os níveis de aceleração também crescem de forma significativa. Desta forma, pode-se concluir que o número de pedestres sobre o piso misto investigado neste trabalho é um fator preponderante na resposta dinâmica estrutural.

Os casos de carga 3 (3 pessoas caminhando) e 4 (4 pessoas caminhando) foram realizados para avaliar o efeito de grupo, ou seja, para entender como a estrutura responde à excitação de várias pessoas que caminham ordenadamente sobre a laje. Além disso, com esses ensaios

numéricos, procurou-se obter uma estimativa das amplitudes de vibração, que são induzidas na estrutura por meio da atividade humana normal de ocupação de uma laje de piso em um edifício. As cargas humanas para esses ensaios são, na realidade, frequentes, por isso, devem orientar o projeto, no que diz respeito ao estado-limite de utilização correspondente a vibrações excessivas (conforto humano).

Deve-se ressaltar que a estratégia de modelagem desenvolvida neste trabalho, no que tange a interação existente entre a carga dinâmica, proveniente do caminhar dos pedestres, e a laje de concreto dos pisos mistos aço-concreto, foi considerada sempre com o mesmo faseamento (diferença de fase entre os pedestres), o que certamente contribuiu para elevar ainda mais o nível da resposta dinâmica, investigado nesta tese.

#### **10.2.4.2** **Efeito do impacto do calcanhar humano**

Os resultados obtidos ao longo deste trabalho demonstram que quanto maior for a intensidade do impacto do calcanhar (fmi), maior será o nível de amplificação da resposta dinâmica. Essas observações evidenciam o fato de que, para que se idealizem estruturas que não sejam suscetíveis ao desconforto provocado pelo caminhar de pedestres, é necessária a busca de alternativas como o caso da utilização de revestimentos de piso com materiais que promovam a absorção do impacto do calcanhar.

Deve-se destacar, sobretudo, que os níveis de impacto do calcanhar humano (fmi) considerados na presente análise estão em consonância com a realidade prática do projeto [51]. No entanto, os valores de pico encontrados para os deslocamentos e, principalmente, para as acelerações ocorrem efetivamente nos projetos reais, mesmo que por alguns instantes. Tal fato é relevante, pois o estado-limite de utilização, associado à vibração excessiva, não é atendido quando o efeito do pico transiente do calcanhar humano é considerado na análise do problema.

#### **10.2.5** **Análise do conforto devido a atividades rítmicas**

Observou-se que a partir do estudo dos valores encontrados para as acelerações (acelerações de pico e acelerações rms) dos modelos de piso misto (aço-concreto) em regime de interação parcial e total, foi constatado que a

maioria dos valores de aceleração foram superiores aos limites recomendados por manuais e normas internacionais de projeto, ISO [70] e AISC [53].

Os valores mais elevados de aceleração foram obtidos na atividade associada à ginástica aeróbica. Tal fato ocorreu em todos os casos de carga investigados. Explica-se essa diferença pelo fato de que a ginástica aeróbica é uma atividade mais sincronizada do que a atividade de saltos à vontade.

Os valores das acelerações de pico e em rms (*root mean square*) obtidos no caso da interação parcial foram, em todos os casos, superiores àqueles obtidos quando comparados com a interação total, porém foram da mesma ordem de grandeza. Esse fato demonstra que a variação do número de conectores no piso pode influenciar a resposta dinâmica estrutural.

Esse quadro certamente pode ser um indicativo de que os critérios de projeto (normas de projeto) devem levar em conta o caráter dinâmico da excitação e, especialmente, no caso dos modelos de pisos mistos em regime de interação parcial, a verificação do conforto humano deve ser feita com muita cautela por parte dos projetistas de estruturas.

Finalmente, os resultados alcançados indicam que os modelos estruturais de pisos mistos em regime de interação parcial são os mais suscetíveis a problemas de vibrações excessivas quando comparados com o modelo de piso em regime de interação total, pois claramente revelam problemas de desconforto humano.

Assim sendo, esta investigação contribui para chamar a atenção dos projetistas de estruturas, pois têm sido observados e constatados inúmeros casos reais correspondentes a estruturas desta natureza com problemas de vibrações excessivas, certamente causados por problemas específicos apontados e estudados detalhadamente nesta tese.

#### **10.2.5.1 Efeito do número de pessoas sobre o piso**

Os resultados obtidos ao longo deste trabalho demonstram que pisos mistos (aço-concreto) em regime de interação parcial e total, quando submetidos a atividades rítmicas, são levados a níveis de acelerações bastante altos na medida em que aumenta o número de pessoas sobre o piso. Com base em limites estabelecidos pela ISO [70], esses resultados apontam que os limites de conforto humano são ultrapassados em muitos casos e podem, de fato, comprometer a aceitabilidades desses pisos.

Convém destacar que os valores da aceleração de pico, obtidos a partir da atuação de nove pessoas sobre os pisos e representativos de ações dinâmicas oriundas de atividades de ginástica aeróbica e saltos à vontade, são superiores àqueles obtidos com base no emprego de doze pessoas. Tal fato ocorreu em virtude da superposição dos modos de vibração, pois, no caso associado a doze pessoas, as ações dinâmicas estão mais distribuídas ao longo de todo o piso, conforme a relação de 0,25 pessoas/m<sup>2</sup> [30]. Já no caso de nove pessoas, somente um lado do piso é ocupado. Dessa forma, existe uma interação maior entre a excitação dinâmica proveniente do caso de carregamento associado a nove pessoas.

Outro ponto importante das análises é o número de pessoas atuando sobre a estrutura. Sabe-se que o número de pessoas praticando atividades aeróbicas pode ser maior que 12 pessoas. Um número maior de pessoas pode levar a níveis de acelerações ainda maiores, podendo não só comprometer os critérios de conforto, como também a segurança da estrutura. Além disso, a relação de distribuição das pessoas sobre o piso adotada neste trabalho foi de 0,25 pessoas/m<sup>2</sup>, que significa 1 pessoa em 4,0 metros quadrados. Numa situação real essa distribuição de pessoas pode ser maior podendo inclusive gerar níveis de acelerações mais críticos.

#### **10.2.5.2** **Efeito da variação do período de contato**

De acordo com os resultados obtidos ao longo deste trabalho, as acelerações máximas (aceleração de pico e RMS) foram obtidas para os casos de período de contato igual a 0,25 ( $T_c = 0,25s$ ), conforme esperado, o que se refere a atividades aeróbicas mais intensas.

#### **10.2.5.3** **Efeito da variação do coeficiente de impacto**

Os resultados obtidos ao longo deste trabalho demonstram que quanto maior for a intensidade do coeficiente de impacto no piso, maior será o nível de amplificação da resposta dinâmica. Essas observações evidenciam o fato de que, para que se idealizem estruturas que não sejam suscetíveis ao desconforto provocado pelo caminhar de pedestres, é necessária a busca de alternativas como o caso da utilização de revestimentos de piso com materiais que promovam a absorção do impacto do calcanhar.

### 10.3

#### Contribuições do presente trabalho

- Apresentar uma estratégia simples para a modelagem numérico computacional de sistemas de pisos mistos aço-concreto em regime de interação total e parcial.
- Avaliar a interação aço-concreto na resposta dinâmica não linear;
- Demonstrar que a partir dos valores das acelerações de pico e em rms obtidos na interação parcial que os valores obtidos são superiores quando comparados com a interação total. Esse fato demonstra que a variação do número de conectores no piso pode vir a influenciar a resposta dinâmica estrutural.
- Demonstrar que de forma geral, tanto as acelerações de pico como as acelerações em RMS (*Root Mean Square*) conduziram a resultados acima do limite permitido pelas normas, ISO 2631 [70] e AISC [53]. Tal fato deve servir de alerta para os projetistas de estruturas metálicas e mistas (aço-concreto), no que tange a relevância de verificação dos estados limites de utilização (conforto humano).
- Concluir que modelos de carregamento que incluem variações espacial e temporal da carga dinâmica devem ser considerados na análise do conforto humano, haja vista que conduzem a resultados mais próximos da realidade de projeto.
- Concluir que o número de pedestres tem influência direta na amplificação da resposta dinâmica estrutural.
- Concluir que o impacto do calcanhar assim como o impacto provocado por pessoas em atividade rítmica tem influência direta na amplificação da resposta dinâmica estrutural.
- Concluir que os efeitos causados por atividades mais sincronizadas tendem a causar mais perturbação do ponto de vista associado ao conforto humano.
- Demonstrar que a posição ocupada pelas pessoas sobre o piso tem influência direta nos modos de vibração e que podem vir a influenciar a resposta dinâmica estrutural, reduzindo as amplitudes de vibração dos pisos.
- Concluir que quanto maior for o período de contato ( $T_c$ ) da pessoa com a estrutura, maiores serão as perturbações do ponto de vista associado ao conforto humano.

## 10.4 Sugestões para trabalhos futuros

As principais sugestões para a continuação do presente trabalho são:

Realizar análises experimentais de pisos mistos aço-concreto em regime de interação total e parcial com o intuito de obter as respostas dinâmicas em termos de deslocamentos, velocidades ou acelerações procurando validar as respostas obtidas neste trabalho;

Avaliar outros modelos estruturais de pisos mistos aço-concreto em regime de interação total e parcial, compostos por outros materiais, diferentes condições de apoio e com outras formas de geometria para a forma de aço incorporada (steel deck);

Realizar uma investigação a cerca da influência da variação da inércia das vigas e colunas na resposta dinâmica estrutural de pisos mistos aço-concreto em regime de interação total e parcial;

Avaliar o comportamento dinâmico de pisos mistos aço-concreto em regime de interação total e parcial segundo trajetórias aleatórias utilizadas pelo ser humano para caminhar sobre o piso;

Na modelagem do carregamento dinâmico considerar uma diferença de fase entre os pedestres, de forma a avaliar se existe efetivamente uma influência significativa deste parâmetro (faseamento da carga dinâmica) na resposta dinâmica estrutural de pisos mistos aço-concreto em regime de interação total e parcial;

Verificar a influência da resposta dinâmica estrutural com a consideração de um modelo massa-mola para representação da interação ser-humano-estrutura no que tange a estruturas mistas de pisos em regime de interação total e parcial;

Verificar a influência da resposta dinâmica estrutural com a utilização de outras curvas força versus deslizamento representativas de outros tipos de conectores de cisalhamento.