

11

Considerações finais

11.1

Introdução

Este trabalho de pesquisa tem por objetivo o desenvolvimento de uma metodologia de análise para avaliação da resposta dinâmica não linear geométrica de sistemas estruturais de pisos mistos (aço-concreto), submetidos a ações dinâmicas humanas rítmicas (ginástica aeróbica e saltos à vontade), em regime de interação total e parcial e com base na consideração do efeito das ligações viga-coluna e viga-viga.

Ações de caráter dinâmico podem provocar vibrações excessivas em pisos de edificações e, desta forma, as acelerações críticas (acelerações de pico) destes sistemas estruturais devem ser obtidas e comparadas com os valores admissíveis, recomendados por critérios e normas de projeto disponíveis na literatura técnica, sob o ponto de vista associado ao conforto humano.

Para tal, ao longo deste trabalho, desenvolve-se uma extensa análise paramétrica, baseada no emprego do método dos elementos finitos, por meio do emprego do programa Ansys (2009), com a finalidade de gerar conclusões e recomendações acerca do comportamento estrutural estático e dinâmico de pisos mistos (aço-concreto) de edificações, respaldadas por uma modelagem mais realista da excitação dinâmica induzida pelos seres humanos, da interação aço-concreto e, bem como, da influência do caráter semirrígido das ligações.

11.2

Principais conclusões

São apresentadas a seguir as principais conclusões obtidas ao longo do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, no que diz respeito à análise dinâmica não linear de pisos mistos (aço-concreto), quando submetidos a excitações dinâmicas oriundas de atividades humanas rítmicas (saltos à vontade e ginástica aeróbica).

11.2.1

Metodologia de análise e modelagem computacional

A metodologia de análise desenvolvida considerou o estudo do comportamento dinâmico não linear em regime de serviço de pisos mistos (aço-concreto). Assim sendo, foi possível avaliar o nível de vibração dos pisos, quando submetidos a ações dinâmicas associadas a saltos à vontade e ginástica aeróbica.

O modelo numérico-computacional desenvolvido neste trabalho de pesquisa permitiu a modelagem de sistemas de pisos mistos de acordo com o nível de interação aço-concreto (interação total ou parcial) e, também, incorporou o efeito das ligações estruturais viga-coluna e viga-viga (ligações rígidas, semirrígidas e flexíveis).

Com base nos resultados obtidos ao longo da investigação e objetivando a validação da metodologia de análise proposta, pode-se concluir que os modelos numéricos desenvolvidos nesta tese representam o comportamento estrutural estático e dinâmico dos pisos mistos (aço-concreto) de forma satisfatória.

11.2.2

Análise estática

No que concerne à análise estática, percebe-se uma tendência de aumento dos valores de deslocamentos translacionais verticais e dos momentos fletores, quando se considera a interação parcial (50%) aço-concreto em conjunto com as ligações viga-coluna semirrígidas e, também, com base no aumento da flexibilidade das ligações viga-viga. Por outro lado, para os esforços cortantes percebe-se alguma modificação nos resultados apenas quando são considerados os modelos com ligações viga-coluna semirrígidas, ocorrendo uma diminuição desses valores.

Constata-se que a influência dos níveis de interação aço-concreto (total e parcial) e da semi-rigidez das ligações viga-coluna e viga-viga é relativamente pequena, no que tange aos esforços estáticos. Ou seja, a consideração (ou não) da interação total ou parcial e da semi-rigidez das ligações estruturais não foi relevante para modificar significativamente o valor máximo dos esforços (momentos fletores e esforços cortantes), no que diz respeito à análise estática.

Convém ressaltar que quando são utilizados os conectores de cisalhamento do tipo perfobonds na modelagem da interação aço-concreto (total

e parcial), a estrutura apresenta uma maior rigidez em relação aos modelos em que se utilizam os studs.

11.2.3 Análise harmônica

Verificou-se que a maior transmissão de energia na resposta do sistema de todos os modelos investigados se dá no primeiro modo de vibração, isto é, o primeiro modo de vibração é o mais significativo para a transmissão de energia do sistema. Na maioria dos casos, o segundo pico mais importante da resposta do sistema está associado ao segundo e terceiro modos de vibração, respectivamente. Os outros picos se referem aos modos mais elevados, que participam de forma menos significativa na resposta dinâmica dos modelos.

11.2.4 Análise das frequências e dos modos de vibração

Com relação à análise das frequências e dos modos de vibração, foi desenvolvida uma análise de vibração livre sobre todos os modelos estruturais investigados.

Constata-se, que o valor da frequência fundamental dos modelos estruturais diminui na medida em que reduz o número de conectores na interface laje viga, ou seja, quando se compara o modelo com interação total em relação ao modelo com interação parcial.

Verifica-se, ainda, uma diminuição das frequências em todos os casos analisados quando se compara o modelo estrutural com ligação viga-coluna rígida com o modelo com ligação viga-coluna semirrígida. Tal fato indica coerência, no que tange aos modelos numéricos desenvolvidos, uma vez que a diminuição da rigidez global da estrutura acarreta em uma redução das frequências naturais dos pisos, em especial da frequência fundamental da estrutura.

Percebe-se também uma redução nos valores destas frequências quando os modelos compostos por ligações estruturais viga-viga flexíveis e semirrígidas são comparadas com os modelos rígidos (ligações viga-viga rígidas).

Foi constatado que a variação da frequência fundamental dos modelos investigados apresenta um comportamento altamente não linear até a rigidez da ligação viga-viga considerada igual a $10S_j$ (rigidez inicial), e a partir desse valor é

verificado um comportamento com pouca variação, quase constante em todos os modelos.

Foi verificada, também, uma variação máxima da ordem de 15% quando são comparados os valores da frequência fundamental dos modelos rígidos, semirrígidos e flexíveis. Tal fato pode vir a ser relevante para condições de ressonância.

Com relação ao modo fundamental de vibração dos modelos estruturais analisados, ressalta-se que em todos os modelos analisados neste trabalho o modo fundamental de vibração é predominantemente de flexão.

11.2.5 Modelos de carregamento dinâmico

Comparando-se os três modelos de carregamento dinâmico utilizados neste trabalho de pesquisa, percebe-se que, em todos os casos analisados, o modelo de carregamento II (MC-II) gerou os maiores valores para as acelerações máximas, sendo que esses valores foram sempre superiores aos resultados obtidos com base no emprego dos modelos de carregamento I (MC-I) e III (MC-III).

Observando-se os valores das acelerações de pico obtidos ao longo da análise, considerando-se 32 pessoas praticando ginástica aeróbica sobre o piso, foi verificado que o valor máximo encontrado no presente estudo foi da ordem de $1,77\text{m/s}^2$, ($a_p = 1,77\text{m/s}^2$, Tabela 10.13, Nó B), no que diz respeito ao modelo com interação parcial, considerando as ligações viga-viga como sendo flexíveis e as ligações viga-coluna como sendo semirrígidas, no que diz respeito ao modelo de carregamento MC-II.

Foi verificado, também, que quando se utiliza o modelo de carregamento MC-I, o máximo valor de aceleração obtido no Nó B (Figura 5.14), foi da ordem de $0,64\text{ m/s}^2$ ($a_p = 0,64\text{m/s}^2$, Tabela 10.13, Nó B). Esses valores de aceleração de pico diminuem ainda mais quando o modelo de carregamento MC-III é considerado na análise, pois, para o mesmo nó analisado (Nó B) o valor máximo de aceleração foi da ordem de $0,46\text{m/s}^2$ ($a_p = 0,46\text{m/s}^2$, Tabela 10.13, Nó B).

Verifica-se assim uma diferença percentual em torno dos 30% entre os modelos de carregamento dinâmico empregados nesta tese de doutorado (MC-I, MC-II e MCIII). Convém ressaltar o caráter mais conservador do modelo proposto por Murray *et al* (2003), pois esse modelo conduziu a valores de acelerações de pico muito superiores aos resultados alcançados com os

modelos de carregamento I e III. Ressalta-se, ainda, que esse modelo de carregamento não considera a defasagem existente entre as cargas dinâmicas atuantes sobre a estrutura.

Por outro lado, o modelo de carregamento III (MC-III) proposto pelo CEB (1993), conduz a valores de acelerações muito baixos, isto é, trata-se de um modelo que subestima o efeito das cargas dinâmicas sobre esse tipo de estrutura. Tal fato provavelmente está associado aos valores das frequências dos harmônicos oriundos da excitação dinâmica e dos coeficientes dinâmicos adotados para a definição da carga dinâmica, com base no emprego do modelo do CEB (1993).

Pode-se afirmar que, o modelo de carregamento I (MC-I), definido com base em testes experimentais nos quais os indivíduos praticam atividades rítmicas sincronizadas e não sincronizadas, e representado matematicamente pela função Hanning, Faisca (2003), conduz a um quadro mais realista e mais econômico, no que diz respeito a avaliação do conforto humano da estrutura.

11.2.6 Análise de conforto humano

Neste trabalho de pesquisa foram realizadas 216 (duzentos e dezesseis) análises de vibração forçada. Ao longo das análises foi considerada a influência da interação aço-concreto (total e parcial), no que se refere à interface da laje de concreto e da viga de aço. O tipo de conector de cisalhamento (stud e perfobond) foi modificado ao longo das análises. A influência das ligações estruturais viga-coluna e viga-viga (ligações rígidas, semirrígidas e flexíveis) também foi alvo de investigação ao longo deste estudo.

11.2.6.1 Efeito da interação aço-concreto (total e parcial)

O valor máximo de aceleração encontrado no presente estudo, considerando-se 32 pessoas praticando ginástica aeróbica sobre o piso, foi da ordem de $0,65\text{m/s}^2$, ($a_p = 0,65\text{m/s}^2$, Tabela 10.13, Nó B), no que diz respeito ao modelo estrutural investigado com base na interação parcial aço-concreto (50%). Quando essa a interação foi considerada como sendo total, o valor máximo de aceleração no referido painel (Nó B, Figura 5.14) foi reduzido para $0,50\text{m/s}^2$ ($a_p = 0,50\text{m/s}^2$, Tabela 10.13), uma diferença percentual de aproximadamente 22%,

constatando-se a influência da interação aço-concreto sobre a resposta dinâmica não linear geométrica do piso.

As acelerações de pico obtidas com o piso em regime de interação parcial foram sempre superiores quando comparadas ao modelo de piso misto aço-concreto em regime de interação total. Isto demonstra que a variação do número de conectores na interface laje e viga influenciam diretamente a resposta dinâmica estrutural, o que deve ser considerado no projeto de estruturas desta natureza.

11.2.6.2

Efeito do tipo de conector de cisalhamento (Stud e Perfobond)

No que diz respeito ao tipo de conector de cisalhamento (studs e perfobonds) utilizado para a modelagem da interação aço-concreto (total e parcial), o valor máximo de aceleração encontrado no presente estudo, considerando-se 32 pessoas praticando ginástica aeróbica sobre o piso, foi da ordem de $0,65\text{m/s}^2$, ($a_p = 0,65\text{m/s}^2$, Tabela 10.13, Nó B), com base no emprego dos studs (studs de 19mm).

Por outro lado, quando os perfobonds são utilizados na modelagem, este o valor da aceleração diminui para $0,54\text{m/s}^2$ ($a_p = 0,54\text{m/s}^2$, Tabela 10.13, Nó B), ocorrendo portanto uma diferença percentual em torno dos 17%. Constata-se uma redução das acelerações de pico do piso quando são utilizados os conectores de cisalhamento do tipo perfobonds em relação aos studs, o que é bastante favorável para a avaliação do conforto humano da estrutura.

11.2.6.3

Efeito das ligações estruturais (ligações viga-coluna e viga-viga)

Observa-se que os valores das acelerações de pico são mais elevados quando são consideradas as ligações viga-coluna como sendo semirrígidas em comparação com os modelos de piso nos quais as ligações viga-coluna são consideradas como sendo rígidas.

O máximo valor de aceleração obtido foi da ordem de $0,65\text{ m/s}^2$ ($a_p = 0,65\text{m/s}^2$, Tabela 10.13, Nó B) para o modelo com ligações viga-coluna semirrígidas e igual a $0,60\text{ m/s}^2$ ($a_p = 0,60\text{m/s}^2$, Tabela 10.5, Nó B) para o modelo com ligações viga-coluna rígidas, onde foi verificada uma diferença percentual da ordem de 8%. Em ambos os casos, as ligações viga-viga do piso são do tipo flexíveis.

Considerando-se, agora, as ligações viga-viga do tipo semirrígidas, o máximo valor de aceleração obtido foi igual a $0,50 \text{ m/s}^2$ ($a_p = 0,50 \text{ m/s}^2$, Tabela 10.13, Nó B) para o modelo com ligações viga-coluna semirrígidas e igual a $0,47 \text{ m/s}^2$ ($a_p = 0,47 \text{ m/s}^2$, Tabela 10.5, Nó B) para o modelo com ligações viga-coluna rígidas. Nesta situação observa-se uma diferença percentual da ordem de 6%.

Portanto, pode-se verificar que as ligações viga-coluna apresentam influência sobre os valores máximos de aceleração. Evidentemente, estas diferenças percentuais de 8% e 6%, respectivamente, podem ser consideradas pequenas, mas devem ser observadas com cuidado, pois em situações de ressonância pode vir a agravar ainda mais o problema associado a vibrações excessivas e desconforto humano.

Para o caso em que as ligações viga-viga do modelo estrutural foram modeladas como sendo flexíveis, o máximo valor de aceleração no referido painel (Nó B, Figura 5.14), foi da ordem de $0,65 \text{ m/s}^2$ ($a_p = 0,65 \text{ m/s}^2$, Tabela 10.13). Por outro lado há uma redução no valor desta aceleração de pico para $0,50 \text{ m/s}^2$ ($a_p = 0,50 \text{ m/s}^2$, Tabela 10.13), quando as ligações viga-viga são consideradas como semirrígidas, observando-se uma diferença percentual em torno de 23%. Em ambos os casos, as ligações viga-coluna são do tipo semirrígidas. Deste modo, pode-se verificar, com clareza, a influência positiva das ligações viga-viga semirrígidas sobre a resposta dinâmica não linear do piso misto (aço-concreto).

11.2.6.4

Efeito das atividades humanas rítmicas (ginástica aeróbica e saltos à vontade)

Verifica-se que os valores mais elevados de aceleração (acelerações de pico) foram obtidos na atividade humana rítmica associada à ginástica aeróbica, de acordo com as Tabelas 10.10 e 10.13. Tal fato ocorreu em todos os casos de carregamento investigados neste trabalho de pesquisa.

Essa situação pode ser explicada pela maior proximidade existente entre os harmônicos da excitação associada à ginástica aeróbica em relação às frequências naturais do modelo estrutural investigado, do que na atividade de saltos à vontade. Por outro lado, a ginástica aeróbica também está relacionada a uma atividade mais sincronizada do que a atividade de saltos à vontade, o que conduz a um nível maior de impacto sobre a estrutura.

11.2.7 Recomendações de projeto

Verifica-se, que para os casos de carregamento dinâmicos considerados ao longo desta investigação (ginástica aeróbica e saltos à vontade) as ações dinâmicas possuem valores elevados. Portanto, para o projeto estrutural, uma situação ideal seria a de afastar a frequência fundamental do piso das frequências inerentes às excitações humanas rítmicas.

Deve-se ressaltar que, em várias situações investigadas nesta tese de doutorado, os valores das acelerações de pico obtidos encontram-se em patamares bem acima do limite estabelecido em normas e recomendações de projeto ($a_{lim} = 0,50m/s^2$), (ISO 2631-2 1989; Murray *et al.* 2003), o que acarreta em violação dos critérios de conforto humano, no que tange, especialmente, as atividades de ginástica aeróbica.

Considerando-se o piso investigado neste trabalho de pesquisa, foi verificado que o nível de interação aço-concreto (total e parcial), entre a viga de aço e a laje de concreto e, ainda, o tipo de ligação viga-coluna e viga-viga (rígidas, semirrígidas e flexíveis) em diversas situações práticas de projeto, podem vir a alterar de forma significativa os valores finais das acelerações de pico do sistema.

Diante do exposto, o quadro global investigado ao longo do desenvolvimento deste trabalho demonstra, claramente, um indicativo de que os critérios de projeto devem levar em conta o caráter dinâmico da excitação, e, especialmente, a influência da interação aço-concreto e das ligações estruturais (viga-viga e viga-coluna), no que tange a verificação dos estados limites de utilização (conforto humano), associados ao comportamento estrutural de pisos mistos de edificações.

11.3 Principais contribuições do presente trabalho

Dentre as contribuições do presente trabalho de pesquisa, no que diz respeito à análise dinâmica não linear de pisos mistos (aço-concreto), quando submetidos a excitações dinâmicas oriundas de atividades humanas destacam-se as seguintes:

- 1) Desenvolvimento de uma metodologia de análise para a modelagem numérico-computacional de sistemas de pisos mistos aço-concreto, com base na consideração da interação aço-concreto (total e parcial) e

- do efeito das ligações estruturais do sistema (ligações viga-coluna e ligações viga-viga);
- 2) Avaliação qualitativa e quantitativa acerca do efeito da interação aço-concreto sobre a resposta dinâmica não linear de pisos mistos de edificações;
 - 3) Avaliação qualitativa e quantitativa acerca da influência das ligações estruturais (viga-coluna e viga-viga) sobre a resposta dinâmica de pisos mistos;
 - 4) Estudo sobre as características de cada modelo de carregamento dinâmico, no que diz respeito a uma definição adequada do modelo de carregamento dinâmico representativo das ações humanas rítmicas;
 - 5) Desenvolvimento de uma extensa análise paramétrica com base na modelagem dos conectores do tipo stud e perfobond, no que diz respeito a variações na resposta estática e dinâmica dos pisos.

11.4

Sugestões para trabalhos futuros

A seguir, são relacionadas algumas sugestões para a continuidade e desenvolvimento de trabalhos futuros sobre os temas aqui tratados e outros correlatos.

- 1) Realizar análises experimentais sobre de pisos mistos aço-concreto (lajes e vigas), em regime de interação total e parcial, objetivando a obtenção da resposta estática e dinâmica do sistema;
- 2) Realizar testes experimentais sobre sistemas estruturais (lajes, vigas e colunas), associados a pisos mistos aço-concreto, em regime de interação total e parcial, com o intuito de avaliar a influência das ligações viga-coluna e viga-viga sobre o comportamento estrutural estático e dinâmico do sistema;
- 3) Verificar possíveis variações da resposta dinâmica estrutural, com base na consideração de um modelo massa-mola-amortecedor para representação da interação indivíduo-estrutura, objetivando refinar os modelos de carregamento dinâmico;
- 4) Incorporar na metodologia de análise a modelagem numérica associada à representação de dispositivos para controle das vibrações

estruturais, objetivando analisar o desempenho desses dispositivos, no que diz respeito aos valores finais das acelerações de pico;

- 5) Realizar uma investigação acerca da influência da variação da inércia das vigas e colunas na resposta dinâmica estrutural de pisos mistos aço-concreto;
- 6) Variar outros parâmetros associados à geometria dos modelos estruturais investigados, tais como o vão das vigas de aço ou mesmo a espessura das lajes de concreto.