

# 1 Introdução

## 1.1. Generalidades

Atualmente no Brasil, apesar do crescimento econômico verificado nos últimos anos, o emprego de estruturas metálicas e mistas (aço-concreto) na construção civil ainda é pequeno. Faz-se necessário que uma proposta que envolva sistemas estruturais em aço e mistos (aço-concreto) seja competitiva economicamente, em face de outras soluções estruturais em concreto armado e protendido. Acredita-se que um dos caminhos para o desenvolvimento das estruturas de aço e mistas (aço-concreto) no Brasil esteja associado à elaboração de projetos de estruturas arquitetonicamente arrojadas.

Por outro lado, cabe destacar que as técnicas para utilização da interação aço-concreto têm obtido um lugar de destaque sob o ponto de vista estrutural, objetivando ampliar a gama de soluções em aço e concreto armado e aço, permitindo que as novas concepções arquitetônicas e, as exigências impostas pelo mercado sejam atendidas.

Novas pesquisas realizadas no campo dos materiais como nas áreas tecnológicas têm permitido o surgimento de sistemas estruturais com um comportamento estrutural misto, dentre os quais podemos destacar as lajes mistas, os pilares mistos, as vigas mistas e as ligações mistas.

O comportamento de estruturas mistas (aço-concreto) é baseado na ação conjunta entre o perfil de aço e o concreto armado. Para tal, é necessário que, na interface aço-concreto, desenvolvam-se forças longitudinais de cisalhamento. Nesse contexto, a avaliação do comportamento estrutural de conectores de cisalhamento apresenta grande importância.

Diante do exposto, Vianna, (2009) realizou um estudo comparativo foi desenvolvido sobre os custos dos conectores Studs e Perfobond. Sob o ponto de vista econômico, concluiu-se que os conectores Perfobond são mais econômicos que os conectores Studs em até 33% (Vianna, 2009). Dentre as vantagens estruturais e construtivas de se utilizar os tipos de conectores Perfobond

destacam-se: alta resistência, fácil produção, fácil instalação no perfil de aço através de solda corrente e bom comportamento à fadiga (Vianna, 2009).

Nos dias atuais, considerando-se o arrojo dos projetos arquitetônicos, as características dos sistemas mistos aço-concreto têm conduzido a sistemas estruturais de pisos mistos (aço-concreto) com frequências naturais cada vez mais próximas da faixa de frequência de excitações associada às atividades humanas rítmicas. Atividades como, por exemplo, andar, pular, dançar, dentre outras, podem vir a causar vibrações excessivas nas estruturas. Esta tese destaca aquelas relativas às atividades humanas rítmicas mais frequentes, associadas à ocupação normal em lajes de pisos de academias de ginástica.

Situações de projeto em que a ação de carregamentos dinâmicos humanos gera problemas referentes ao conforto humano dos usuários da edificação e bem como às partes constituintes do sistema estrutural têm sido comum na engenharia civil. Assim sendo, diversos trabalhos de pesquisa desenvolvidos nos últimos anos, sob os mais variados enfoques, objetivando o estudo do comportamento dinâmico de estruturas, tem procurado contribuir nesta direção. Faisca (2003), Murray *et al.* (2003), Moreira (2004), Varela (2004), Mello *et al.* (2008) Langer (2009), Lopes (2010), Lopes (2011), Gonçalves (2011), Lopes (2012).

De acordo com este contexto, este trabalho de pesquisa objetiva contribuir com o desenvolvimento de uma metodologia de análise para estudo do comportamento dinâmico não linear de pisos mistos (aço-concreto), submetidos a ações dinâmicas rítmicas. Deste modo, a modelagem da interação aço-concreto (total e parcial) em pisos de edificações submetidos a ações dinâmicas humanas rítmicas possui um destaque especial neste trabalho de pesquisa. A modelagem das ligações estruturais viga-coluna e viga-viga (rígidas, semirrígidas e flexíveis) também representa um foco desta tese de doutorado. A simulação numérica dos sistemas de pisos investigados neste trabalho, com base na inclusão e avaliação dos efeitos da interação aço-concreto (total e parcial) e das ligações viga-coluna e viga-viga, certamente são contribuições de destaque desta investigação e conduzirão a resultados mais próximos da realidade de projeto.

Finalmente, a definição das ações dinâmicas atuantes sobre os modelos estruturais foi feita com base em resultados experimentais Faisca (2003), os quais levam em conta os efeitos de multidão. A análise realizada aqui fundamenta-se na modelagem computacional de sistemas estruturais de pisos mistos (aço-concreto), através do Método dos Elementos Finitos (MEF). Para tal,

são empregadas técnicas usuais de discretização, por meio do programa Ansys (2009).

A resposta dinâmica não linear geométrica dos modelos investigados contempla uma análise crítica acerca dos valores das acelerações máximas (acelerações de pico). Os resultados obtidos, em termos das acelerações de pico, são confrontados e comparados com os limites propostos por recomendações internacionais (ISO 2631-2,1989; Murray *et al.* 2003), sob o ponto de vista do conforto humano, para diferentes tipos de ocupação.

## **1.2. Interação aço-concreto**

Para o estudo das estruturas mistas de aço e concreto, foi realizada uma análise numérica empregando o programa Ansys. Os conectores presentes nas vigas foram modelados de forma discreta, utilizando elemento de mola rotacional não linear, usando para isso a relação força *versus* deslizamento, encontrada nos ensaios experimentais de cisalhamento direto por (Tristão, 2002; Ellobady, 2005; Lam *et al.* 2007; Vianna 2009). Visando analisar o comportamento desse tipo de estrutura, alguns parâmetros foram avaliados. Destaca-se neste o nível de interação aço-concreto (total e parcial), a influência da rigidez nas ligações (ligações viga-viga e viga-coluna), a variação do número de conectores de cisalhamento no modelo e a sua influência na rigidez da estrutura.

O benefício de se usar o aço estrutural com o concreto é de se aproveitar ao máximo o desempenho de cada material: a tração do aço, e a compressão do concreto, formando assim um sistema mais eficiente se comparado à viga somente de aço. Algumas vantagens da consideração da ação mista em vigas de aço e lajes de concreto são:

- redução do peso global da estrutura e conseqüente alívio nas fundações;
- diminuição da altura dos perfis;
- possibilidade de vencer maiores vãos;
- redução de flechas;
- redução de custos.

As vigas podem ser simplesmente apoiadas ou contínuas. As simplesmente apoiadas contribuem para maior eficiência do sistema misto, pois a viga de aço trabalha predominantemente à tração e a laje de concreto à compressão, embora não seja muitas vezes a solução mais econômica. A Figura 1.1 ilustra um modelo de uma estrutura mista (aço-concreto).

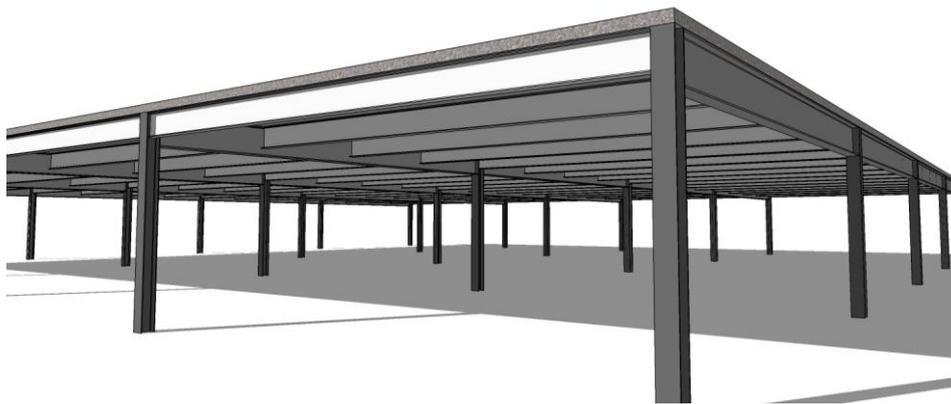


Figura 1.1 – Modelo de uma estrutura mista (Aço-concreto)

A ação mista é desenvolvida quando dois elementos estruturais são interconectados de tal forma a se deformarem como um único elemento. Essa conexão é viabilizada por conectores de cisalhamento mecânicos, que permitem a transferência de forças longitudinais do aço para o concreto e vice-versa, além de resistir às forças transversais ao eixo do elemento, que tendem a causar a separação dos materiais na interface entre ambos. Os conectores de cisalhamento são instalados no perfil de aço, usualmente por solda, antes da concretagem.

Uma variedade de dispositivos e configurações tem sido utilizada como conectores de cisalhamento, e diversos aspectos econômicos e técnicos continuam a motivar o desenvolvimento de novos produtos. Entre estes, destaca-se o stud bolt, que é um conector tipo pino com cabeça, desenvolvido nos EUA na década de 40, o conector perfobond, desenvolvido na década de 80 por Leonhardt *et. al.* (1987), buscando uma alternativa ao baixo desempenho dos studs à fadiga para aplicação em pontes mistas, e o conector em perfil U laminado, que é indicado para sistemas com laje maciça (ver Figura 1.1).

Assim pretende-se avaliar aqui a influência dos conectores de cisalhamento (os stud bolts e os perfobond), considerando uma interação total e parcial na resposta dinâmica não linear de pisos mistos.

Lembrando que o índice que permite avaliar o grau de interação entre laje de concreto e perfil de aço,  $\eta_i$ , é determinado pela relação entre o somatório das resistências individuais dos conectores situados entre uma seção de momento fletor máximo e a seção adjacente de momento nulo. Já a resultante do fluxo de cisalhamento, tem valor igual a menor resistência oferecida pela laje ou pelo perfil. Quando  $\eta_i \geq 1$  a interação é completa e quando  $\eta_i < 1$  a interação é

parcial. A Figura 1.2 apresenta alguns tipos de conectores usualmente utilizados na construção civil.

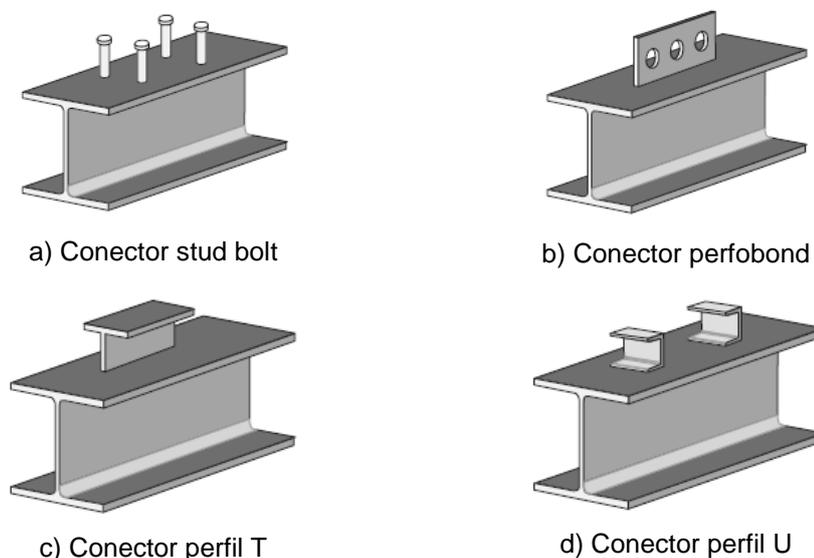


Figura 1.2 – Conectores de cisalhamento.

### 1.2.1 Histórico

O conceito e a utilização de estruturas mistas são objetos de estudos desde os meados do século XIX, onde as concepções estruturais consideravam que esses dois componentes trabalhavam independentemente, ou seja, ora o aço suportava as cargas transmitidas pela estrutura de concreto, ora a estrutura de concreto suportava o carregamento transmitido pela estrutura de aço. Com o passar dos anos, as concepções estruturais começaram a focar a ação mista aço-concreto, de modo que a combinação desses dois materiais formasse um único sistema estrutural em que a capacidade portante de cada elemento pudesse ser explorada ao máximo. Assim, aproveitava-se a grande capacidade de o concreto resistir a esforços de compressão, e o aço, à de tração.

Para que haja o comportamento misto é necessário, certa aderência entre a viga de aço e a laje de concreto. Lembrando que a aderência entre esses dois materiais não é considerada para o efeito de cálculo, o que leva a utilização dos conectores de cisalhamento para transmitir as forças longitudinais na interface aço-concreto. Várias contribuições ao longo dos últimos anos originaram a publicação, elaboração de tabelas e de códigos normativos, devido ao grande interesse manifestado por alguns pesquisadores no comportamento misto estrutural.

Seguindo essa linha de pesquisa, Oehlers *et al.* (2000), desenvolveram um procedimento simples a fim de avaliar o efeito benéfico do atrito na interface da força máxima de projeto e a resistência dos conectores de cisalhamento em vigas mistas sujeitas a fadiga.

Em Seracino, Oehlers e Yeo (2001) foi desenvolvido o conceito de ponto focal de interação parcial, eles estenderam a teoria clássica linear elástica para interação parcial desenvolvida por Newmark em 1951. O modelo foi deduzido para uma viga mista com conectores uniformemente distribuídos e uma carga concentrada, considerando o aço e o concreto elástico linear. Através dos pontos focais onde as deformações considerando a interação total e nula se cruzam, pode-se traçar o diagrama de deformações de uma seção transversal com interação parcial. A partir das deformações podem ser obtidas as tensões e, portanto, o momento resistente da viga mista. A resistência da viga, neste caso, é diretamente influenciada pela rigidez da ligação e pelo deslizamento na interface.

Kim *et al.* (2001) apresentaram um estudo sobre o comportamento de conectores de cisalhamento, tipo pino com cabeça, embutidos em laje com fôrma de aço incorporada, por meio da utilização de um programa de cálculo LUSAS, que é baseado no método dos elementos finitos. Os modelos foram analisados com elementos finitos bidimensionais e tridimensionais. Na primeira análise, a viga metálica, a laje de concreto e o conector foram modelados usando elementos planos de tensão e a fôrma de aço, usando elementos de barra. As condições de contorno foram as restrições nos deslocamentos horizontal no perfil e vertical na laje, como ilustra a Figura 1.3.

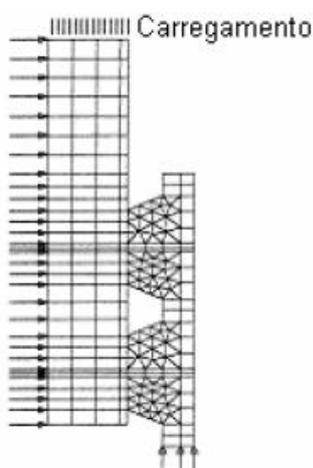


Figura 1.3 – Discretização dos modelos bidimensionais, Kim *et al.* (2001).



Ainda no mesmo ano, Marecek, *et al.* (2005) desenvolveram modelos numéricos para a simulação de conectores perfobond por meio do programa Ansys. Os elementos utilizados foram: para a laje de concreto, Solid 65; para a armadura, Link 8; e para a viga e conector, Shell 41. Para o comportamento do concreto adotou-se o modelo e, para o aço adotou-se uma curva tensão-deformação multilinear. Não foram utilizados elementos de contato, e para garantir apenas o deslocamento vertical, na direção  $y$ , os nós coincidentes da laje e da viga foram acoplados nas demais direções.

No mesmo ano, Tristão (2005) realizou uma simulação numérica dos conectores tipo stud e tipo U por meio de uma modelagem do ensaio experimental tipo push-out, cujos resultados foram confrontados com valores experimentais obtidos em ensaios realizados em laboratório, (ver Figura 1.5). Ele utilizou o Método dos Elementos Finitos (MEF), cujas ferramentas disponibilizadas permitiram análises dos modelos em regime de não linearidade física e geométrica. Os modelos numéricos apresentaram como variáveis de interesse o número de conectores na laje de concreto, a quantidade de armadura inserida no concreto, o diâmetro do conector tipo pino com cabeça (stud), a resistência do concreto, a espessura e posição de soldagem do conector tipo perfil “U” formado a frio. A variação desses parâmetros teve a finalidade de determinar a resistência última e a relação força-deslocamento dos conectores, bem como avaliar a concentração de esforços de tensão e deformação nas partes constituintes dos modelos.

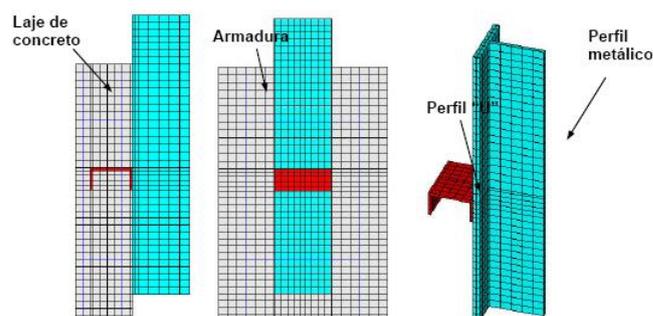


Figura 1.5 – Visão geral da discretização para os modelos com conector perfil “U” formado a frio, Tristão (2005).

Kotinda (2006) apresentou no seu trabalho modelos numéricos tridimensionais de vigas mistas com vistas a simular o seu comportamento estrutural, principalmente no referente à interface entre viga de aço e laje de concreto. Os modelos foram constituídos por vigas mistas simplesmente

apoiadas com laje de faces planas e conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça (Stud). As simulações foram realizadas por meio do programa Ansys versão 8.0. Os resultados obtidos foram comparados com valores experimentais, extraídos de trabalhos apresentados por outros pesquisadores.

Veríssimo *et al.* (2006) apresentaram resultados de ensaios de cisalhamento direto em um conector formado por uma chapa endentada, denominado CR, que se constitui em uma alternativa ao perfobond, pois permite a passagem com facilidade das barras de armadura da laje. A Figura 1.6 ilustra esses dois tipos de conectores.

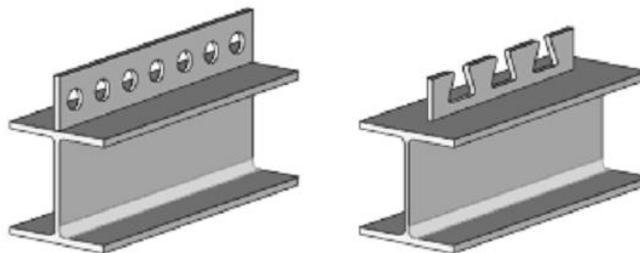


Figura 1.6 – Conector perfobond e conector em chapa estendida, Veríssimo *et al.* (2006).

Queiroz *et al.* (2007) apresentaram uma investigação sobre a avaliação da conexão parcial e total de vigas mistas aço-concreto, utilizando modernas técnicas de discretização por meio do método dos elementos finitos, bem como o programa comercial Ansys (2009). Foi proposto um modelo de elemento finito tridimensional capaz de simular o comportamento da flexão de vigas mistas simplesmente apoiadas, sujeitas a cargas concentradas e cargas uniformemente distribuídas. Foi também analisado o comportamento carga-deflexão, escorregamento longitudinal na interface entre a viga de aço e a laje de concreto e a distribuição da força cisalhante nos conectores, assim como as possíveis falhas. O comportamento da interface é representado por meio de elementos de mola, com relação força-deslizamento obtida com o ensaio do tipo push-out. A validação do modelo foi realizada por meio da comparação com dados experimentais e com algumas análises numéricas alternativas. Também foram realizados estudos paramétricos a partir do modelo calibrado, em que são discutidos vários detalhes sobre modelagens numéricas relacionadas ao problema de convergência, estratégias de carregamentos e eficiência computacional.

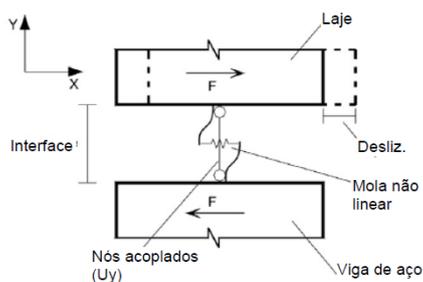


Figura 1.7 - Modelagem dos conectores, Queiroz et al. (2007).

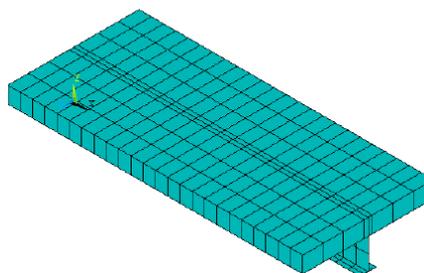


Figura 1.8 - Modelo tridimensional em elementos finitos, Ansys (2009).

Valente (2007) realizou uma série de ensaios experimentais em vigas mistas de aço e concreto leve, submetidas a carregamentos monotônicos e cíclicos. Durante os ensaios, avaliou a evolução da carga aplicada, a deformação vertical, o deslizamento na interface aço-concreto e as deformações em algumas seções pré-definidas. Esses parâmetros permitiram avaliar a perda de interação entre as seções de aço e concreto leve. Para obter informação útil para a caracterização da ligação aço-concreto leve e para avaliação do comportamento de vigas mistas, realizou ensaios do tipo push-out com carregamentos monotônicos e cíclicos. No seu trabalho, foram estudados conectores tipo Stud, Perfobond e tipo T.

David (2007) desenvolveu um estudo teórico e experimental sobre conectores em perfil U formado a frio e vigas mistas constituídas de perfis formados a frio e laje de vigotas pré-moldadas. Da análise das vigas mistas simplesmente apoiadas, por meio de simulações numéricas e ensaios experimentais, verificou-se a influência da armadura de costura, do posicionamento dos conectores, do deslizamento na interface e suas implicações na determinação do deslocamento vertical.

Mello (2007) investigou as diferenças existentes entre a modelagem isotrópica e a ortotrópica, com base na obtenção das frequências naturais e dos modos de vibração correspondentes a um piso misto existente. Os valores obtidos numericamente foram comparados com os resultados experimentais de Vecci *et al.* (1999). Aspectos relevantes para a modelagem computacional do comportamento dinâmico desse tipo de estrutura foram estudados mediante uma análise paramétrica extensa, tais como: efeito das condições de contorno empregadas na modelagem, posição da linha neutra do sistema misto (aço-concreto), geometria do deck metálico e inclusão da rigidez real das colunas de aço.

Machacek *et al.* (2008) investigaram os conectores Perfobond em vigas mistas treliçadas em ensaio em escala real, adotando interação total. Os resultados experimentais serviram para calibrar o modelo de elemento finito em 3-D no programa Ansys (2009), que foi utilizado para um extensivo estudo paramétrico da distribuição do fluxo de cisalhamento na interface entre o aço e o concreto.

Jeong *et al.* (2009) avaliaram os conectores Perfobond em ensaios tipo push-out e escala real. Foram realizados dezesseis ensaios em escala real. Nesse estudo, a resistência ao cisalhamento das lajes mistas para pontes sujeitas a cargas superficiais, foi avaliada pelo método m-k. A resistência ao cisalhamento da laje, resultante das cargas superficiais corresponderam com a resistência ao cisalhamento puro obtido dos push-out. No entanto, quando o comprimento do vão de cisalhamento diminuiu, esse valor foi superestimado. Supõe-se que isto foi causado pela força de atrito entre a chapa de aço e o concreto, a qual aumenta conforme aumenta a força normal na interface. Para eliminar esse problema, recomenda-se adotar um vão de cisalhamento de forma que os efeitos da força normal na interface sejam insignificantes.

Vianna (2009) avaliou o comportamento estrutural de conectores Perfobond e T-Perfobond em vigas mistas. Para tal, realizou-se um programa experimental envolvendo cinquenta e dois ensaios do tipo push-out com conectores Perfobond, T-Perfobond e T, um ensaio em escala real e uma modelagem numérica. Os resultados indicaram que o modelo de plastificação total pode ser adotado para a determinação do momento fletor resistente em vigas mistas bi-apoiadas com conectores T-Perfobond. Concluiu-se também que os conectores Perfobond e T-Perfobond são mais econômicos em até 33% que os conectores Studs. Dentre as vantagens estruturais e construtivas de utilizar os tipos de conectores alternativos destacam-se: a alta resistência, a fácil produção e instalação no perfil de aço através de solda corrente, e bom comportamento à fadiga.

Em Lopes (2012) estudou-se o efeito da interação aço-concreto sobre a resposta dinâmica não linear de pisos submetidos a cargas dinâmicas rítmicas. Tendo como objetivo principal estudar a influência do nível de interação aço-concreto (total e parcial) sobre a resposta dinâmica não linear de pisos mistos, foram considerados dois tipos de conectores de cisalhamento diferentes do tipo stud e perfobond. Comparando desta forma o desempenho dos mesmos, no que diz respeito à resposta dinâmica da estrutura quando submetida a ações dinâmicas humanas rítmicas.

### 1.3 Ligações semirrígidas

O conceito de ligações semirrígidas é remoto e mesmo assim, os nós estruturais na grande maioria dos projetos têm sido tratados como rígidos ou flexíveis, isto é, tendo a capacidade de transferir todo o momento fletor aos elementos conectados sem que estes experimentem quaisquer rotações relativas, ou de permitir livremente as rotações sem qualquer transferência de momentos. Este conceito leva muitas vezes a interpretações equivocadas do comportamento estrutural, apesar de simplificarem bastante o processo de análise. É nesse contexto que se pretende fazer uma variação da semi-rigidez de forma a avaliar o comportamento da estrutura quando as ligações são consideradas como sendo semirrígidas.

Para simular o comportamento das ligações semirrígidas, o conhecimento da curva momento *versus* rotação de uma ligação é imprescindível para que sua influência possa ser considerada na análise estrutural. Para tal, foi adotado um elemento finito de mola rotacional, COMBIN39, Ansys (2009), que incorpora os efeitos da não linearidade geométrica. As curvas momento *versus* rotação das ligações viga-viga e viga-coluna implementadas através de uma curva de característica linear, conforme exemplifica a Figura 1.9.

As ligações representam uma parcela pouco significativa do peso total da estrutura, porém, possuem preços de fabricação e montagem elevados. Avaliando-se esses fatores, soluções que considerem a economia representada pelo uso de ligações semirrígidas, merecem uma análise mais refinada. Uma das razões para essa economia provém do fato de que as ligações rígidas aparafusadas são caras e difíceis de serem montadas quando comparadas com a solução semirrígida. Por outro lado, as ligações flexíveis não consideram uma parcela significativa de resistência, que ao ser considerada, pode minimizar o custo global da estrutura.

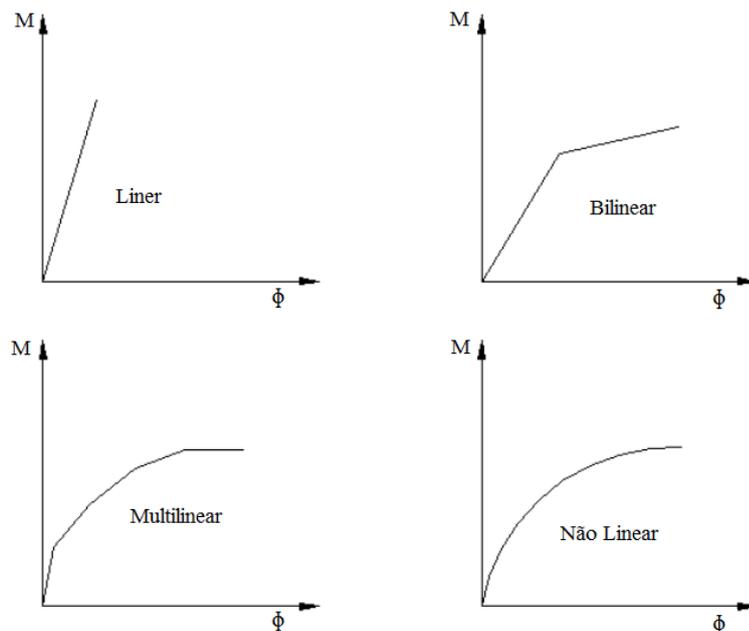


Figura 1.9 – Algumas representações matemáticas da curva momento versus rotação.

Os modelos simplificados utilizados na prática de projeto (rígidos e flexíveis) são eficientes para algumas estruturas com poucos elementos estruturais e sob o efeito de cargas de pequena magnitude. Em outros casos, a correta avaliação das ligações da estrutura requer que o comportamento semirrígido da ligação seja considerado, pois o comportamento real semirrígido das ligações permite um dimensionamento mais correto e pode conduzir a economias significativas.

Ao considerar esse comportamento real, os projetos executados inicialmente com ligações flexíveis permitirão uma redução significativa nas flechas das vigas e uma diminuição do comprimento de flambagem das colunas, além de diminuir os deslocamentos laterais da estrutura. Entretanto, ao se admitir que as ligações sejam infinitamente rígidas, introduzem-se erros no cálculo das estruturas, em geral contra a segurança. Aliado a esse fato, o controle de rigidez de uma ligação semirrígida permite a melhor distribuição de momentos na viga, gerando, por conseguinte, uma economia significativa no custo global da estrutura.

### 1.3.1 Histórico

Apresente-se a seguir, resumos de alguns trabalhos científicos relacionados com o assunto em estudo, ilustrando desse modo ao leitor a

importância do tema verificada por diversos pesquisadores quanto à determinação de parâmetros adequados ao comportamento real das estruturas.

Kim e Choi, (2001) publicaram um trabalho onde se propõe uma análise avançada do comportamento de pórticos de aço espaciais semirrígidos utilizando o conceito de rótula plástica. As ligações semirrígidas têm comportamento não linear e verificou-se a influência da combinação dos efeitos da não linearidade geométrica e do material no comportamento e na resistência dos pórticos do estudo.

Brito Jr. (2002) propôs o dimensionamento de pórticos planos de aço considerando a adoção de ligações viga-coluna semirrígidas segundo o Eurocode 3. Verificou-se que a consideração do comportamento semirrígido da ligação influencia significativamente na distribuição de esforços na estrutura, deslocamentos e estabilidade da mesma, conduzindo a soluções estruturais bastante distintas de acordo com a rigidez considerada.

Sophianopoulos (2003) trata da determinação do efeito da flexibilidade das ligações nas características de vibração livre de pórticos de aço planos, no regime elástico. As ligações semirrígidas foram modeladas conforme prescrito pelo Eurocode 3 e foi adotada uma fórmula simples para o equilíbrio dos momentos na ligação.

Van Keulen *et al.* (2003) investigou a aplicação das aproximações da curva momento-rotação da ligação recomendadas pelo Eurocode 3, utilizando o método da metade da rigidez secante inicial. O método de modelagem simplificado, estudado, substitui as características não lineares típicas, da curva momento-rotação, por uma aproximação bi-linear. Foram feitas comparações com resultados de análises de segunda ordem de pórticos de aço e verificou-se que a aproximação proposta pode ser aplicada a estruturas regulares, de poucos pavimentos, obtendo resultados satisfatórios. Para edifícios altos, com arranjo arquitetônico mais complexo, a análise deve adotar modelos mais refinados para a representação do comportamento das ligações.

Ainda no mesmo ano, Lima (2003) estudou o comportamento de ligações com placa de extremidade em estruturas submetidas às ações de momento fletor e força axial, quando o esforço normal extrapola o limite empírico de 5% da resistência plástica da viga proposto pelo Eurocode 3. Foram realizados quinze ensaios experimentais e desenvolvido um modelo mecânico para avaliação da resistência à flexão, rigidez inicial e capacidade de rotação da ligação. Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com os definidos pela metodologia de cálculo proposta pelo Eurocode 3. Concluiu-se que o limite

empírico de 5% da resistência plástica da viga para o esforço normal máximo permitido, proposto pelo Eurocode 3, pode fornecer valores contra a segurança, uma vez que não se faz distinção entre tração e compressão para a aplicação desse esforço normal.

Ashraf *et al.* (2004) publicaram uma investigação a respeito dos parâmetros que influenciam no deslocamento lateral de pórticos de aço regulares e não contraventados. Propuseram uma equação para determinar o deslocamento lateral de pórticos semirrígidos, sem a necessidade de recorrer a métodos numéricos. Foi estabelecida uma relação entre o deslocamento de pórticos semirrígidos e o seu correspondente rígido. As análises foram realizadas utilizando um programa computacional de elementos finitos, representando as ligações através de molas rotacionais.

Cabrero e Bayo (2005) publicaram um método para análise elástica e plástica de estruturas de aço com ligações do tipo placas de extremidade estendida. Propõem o desenvolvimento, na prática diária de projeto, de soluções com a consideração do comportamento semirrígido da ligação, possibilitando projetos mais econômicos quando da utilização de valores ótimos de rigidez.

Velasco *et al.* (2006) publicaram uma investigação com base no uso de ligações semirrígidas em um edifício residencial de quatro pavimentos. Os resultados da análise paramétrica indicam uma mudança significativa na distribuição dos momentos fletores nas vigas, quando comparadas às soluções com ligações rígidas e rotuladas. A análise ainda leva em consideração a influência da rigidez da ligação na estabilidade lateral dos pórticos contraventados e não contra ventados, propiciando uma redução na quantidade de elementos de contraventamento. Verificou-se que a adoção de ligações semirrígidas pode proporcionar uma economia de 15% em termos de peso de aço na estrutura, uma vez que se observa uma distribuição mais homogênea dos esforços, inclusive com diminuição dos valores máximos.

Uma importante contribuição foi apresentada por Oliveira (2007) na avaliação do comportamento de pisos mistos semi-contínuos com adoção de ligações semirrígidas metálicas. Entretanto, o sistema estrutural em estudo exigiu um esforço muito grande por parte do pesquisador, na tentativa de avaliar corretamente as repostas obtidas a partir das análises realizadas. Isso decorre do fato de a consideração da plasticidade em vigas e ligações conduzir o estado-limite último a ser governado por mecanismos de colapso plástico. Para tanto, o conhecimento da curva momento versus rotação das ligações, a formação da

rótula plástica nas vigas metálicas e ou mistas, assim como a previsão da fissuração nos elementos de concreto, exigiram análises numéricas sofisticadas.

Lopes (2008) estudou a influência do comportamento semirrígido de placas de base e de ligações viga-coluna na resposta dinâmica de pórticos de aço. Teve como principal objetivo o de propor uma metodologia de análise que represente de forma apropriada a influência do comportamento semirrígido de placas de base e de ligações viga-coluna, sobre a resposta dinâmica (linear e não linear) de estruturas de aço. Outra contribuição foi à investigação do comportamento dinâmico (linear e não linear) de pórticos de aço, a partir da consideração de ligações viga-coluna simétricas e não simétricas e especialmente das placas de base.

Lopes (2010) estudou a influência das ligações sobre o comportamento dinâmico não linear de pisos mistos submetidos a atividades humanas rítmicas. A metodologia de análise proposta adota técnicas usuais de discretização presentes no método dos elementos finitos, com base no emprego do programa Ansys. A modelagem do sistema contempla ligações estruturais rígidas, semirrígidas e flexíveis.

Lopes (2012) estudou a influência das ligações sobre o comportamento dinâmico não linear de pisos mistos submetidos a atividades humanas rítmicas. No trabalho estudou-se a influência das ligações viga-coluna e viga-viga, bem como o nível de interação aço-concreto. A metodologia de análise proposta adota técnicas usuais de discretização presentes no método dos elementos finitos, com base no emprego do programa Ansys. A modelagem do sistema contempla ligações estruturais rígidas, semirrígidas e flexíveis.

#### 1.4

#### **Análise de vibrações e carregamentos dinâmicos**

Considerava-se que o efeito da carga dinâmica que pode ser substituído pela majoração da carga estática. Entretanto, sabe-se, através de vários estudos e testes experimentais desenvolvidos no decorrer dos anos, que essa simples majoração dos esforços está incorreta, pois a análise dos efeitos causados pela carga dinâmica é muito diferente da análise da carga estática. Sem contar a singularidade de cada tipo de atividade geradora de excitação, pois, as vibrações em pisos induzidas por atividades humanas, tais como correr, saltar, fazer exercícios aeróbicos ou até mesmo caminhar, constituem um problema bastante complexo, uma vez que as características da excitação dinâmica geradas

durante a execução dessas atividades encontram-se associadas às diferenças corporais de cada indivíduo que possui sua frequência, amplitude e forma de carregamento própria, levando o sistema estrutural a diferentes perturbações.

#### **1.4.1 Histórico**

Após os colapsos que envolveram cargas dinâmicas induzidas por seres humanos, que a preocupação com os problemas ocasionados por vibrações induzidas pelas atividades humanas aumentou, e passou a ser assunto de estudo por vários autores ao longo dos últimos anos. Pode citar-se o colapso de várias arquibancadas e estádios, o colapso da passarela na Carolina do Norte, EUA, durante a saída de uma multidão em um evento esportivo, e o colapso durante a inauguração de uma estrutura inglesa, que marcaria a entrada do novo milênio, a Millennium Footbridge.

É nesse contexto que Design Guide on the Vibration of Floors (1989), publicou um registro experimental típico da variação no tempo da força de contato com a superfície rígida produzida por um passo expresso pela correspondente medição da reação resultante do piso. A representação matemática da reação do piso é aproximada por uma série de Fourier com três termos, em que se consideram a parcela estática associada ao peso da pessoa e três ou quatro componentes harmônicos da excitação. Esses harmônicos surgem devido à interação entre a carga crescente representada por um pé e o simultâneo descarregamento do outro pé.

Para análise de uma estrutura mista (aço-concreto) já existente que passaria a receber, além de cargas estáticas, cargas dinâmicas provenientes de atividades rítmicas, os pesquisadores De Paula e Queiroz (1998) utilizaram um programa computacional baseado no método dos elementos finitos e simularam o carregamento dinâmico através de carregamentos harmônicos. Os resultados obtidos para as frequências naturais da estrutura, utilizando o modelo computacional, foram comparados com valores experimentais obtidos na estrutura real e foi apresentado um reforço para adequar a estrutura a sua nova ocupação, com base na avaliação dos níveis finais de esforços e acelerações.

Através de investigações experimentais, Batista e Varela (2002) constatam que os problemas envolvendo excitações dinâmicas produzidas por atividades humanas são mais agudos e frequentes em painéis contínuos que apresentam

multímodos de vibração, tais como os painéis contínuos de lajes mistas, lajes em grelha, lajes nervuradas e lajes pré-moldadas em concreto armado.

Moreira (2004) realizou diversas análises em painéis típicos, modelados com o método dos elementos finitos, utilizando o programa Ansys (2009), visando um melhor entendimento da influência de parâmetros estruturais como variação do vão e rigidez das vigas. Os resultados, em termos de acelerações induzidas por cargas impulsivas e decorrentes do caminhar de pessoas, foram examinados segundo Normas e Recomendações Internacionais.

Outra investigação feita por Varela (2004) tem base nas respostas dinâmicas, semi-determinísticas e aleatórias, obtidas por meio de modelos teóricos e de ensaios experimentais de estruturas reais. As cargas aleatórias produzidas por pessoas e os sistemas estruturais são descritos e avaliadas com auxílio de ferramentas computacionais. São apresentadas modelagens mais adequadas e as mais simplificadas das cargas dinâmicas, produzidas por uma ou por várias pessoas. A conclusão que se chegou foi que uma nova filosofia de projeto deve ser empregada, na qual sejam considerados os necessários dispositivos de controle de vibrações.

Mello (2005) na dissertação de mestrado, desenvolveu diversos modelos de carregamento representativos do caminhar das pessoas, considerando a variação espacial e temporal da carga dinâmica ao longo da análise e também o efeito transiente do impacto do calcanhar humano nos pisos. Os pisos mistos em aço-concreto foram discretizados com base no emprego do Método dos Elementos Finitos (MEF), variando alguns parâmetros como o comprimento do vão, a taxa de amortecimento, a espessura das lajes e rigidez das ligações viga coluna. Os resultados dessa pesquisa indicam que níveis de acelerações elevados são alcançados, podendo gerar desconforto aos usuários.

Para Gama (2007), percepção e desconforto não devem ser confundidos, uma vez que o segundo geralmente possui valores mais altos que o primeiro. Mas ele afirma que a repetição de eventos simplesmente perceptíveis também pode levar ao desconforto. Sendo assim é importante que a condição de conforto seja considerada na análise de sistemas estruturais, pois afeta diretamente no bem-estar, na eficiência do trabalho ou de quaisquer outras atividades, e até mesmo na saúde dos usuários.

Para análise do comportamento de pisos mistos (aço-concreto), quando submetidos às atividades rítmicas correspondentes a ginástica aeróbica e saltos à vontade, Loose (2007) obteve resultados em termos das acelerações máximas (acelerações de pico) e os comparou com os limites propostos por

recomendações internacionais, sob o ponto de vista do conforto humano, para diferentes tipos de ocupação. Os pisos mistos analisados ao longo de seu trabalho de pesquisa foram submetidos a níveis de aceleração elevados e ultrapassam critérios de conforto humano.

Almeida (2008) investigou o comportamento dinâmico de pisos mistos (aço-concreto) sujeito às atividades rítmicas provocadas pelas pessoas. O piso estudado era suportado por treliças metálicas e apoiado diretamente sobre paredes compostas. Ao realizar um estudo paramétrico entre os resultados numéricos e analíticos verificou-se que as acelerações de pico são superiores aos limites recomendados por normas de projeto.

Mello (2008) apresentou uma metodologia de análise para avaliar o conforto humano nos pisos mistos. Esse procedimento leva em conta um modelo de carga mais realista desenvolvido para incorporar os efeitos dinâmicos induzidos pelo caminhar humano. Os modelos estruturais foram investigados com base em vários pisos mistos, com vãos principais variando de 5 a 10 m. Essa estratégia foi adotada para proporcionar uma avaliação mais realista para este tipo de estrutura, quando submetida à vibração devido ao andar humanos.

Ao desenvolver um estudo sobre o comportamento estrutural de lajes nervuradas de concreto armado, Silva (2008) realizou uma modelagem numérica computacional do sistema estrutural e um estudo da resposta estática e dinâmica, no que tange deslocamentos translacionais verticais e tensões, confrontando-as quanto aos limites do conforto humano. Foi utilizado modelos de carregamento que representem as ações inerentes à ginástica aeróbica, com base em resultados de testes experimentais que levam em conta os efeitos de multidão. Inúmeros picos de aceleração foram bem superiores aos limites recomendados por manuais e normas internacionais de projeto.

Silva (2008) em seu trabalho de pesquisa avaliou a solução ortotrópica para pisos mistos, quando submetidas a ações dinâmicas, tais como atividades rítmicas resultantes de ginástica, eventos musicais, esportes e danças de salão. A metodologia de análise proposta considera o comportamento dinâmico de um piso de um edifício feito com um sistema de lajes em concreto armado com forma de aço incorporada (steel deck). Os resultados indicaram que o piso misto investigado viola estado limite de serviço, mas satisfaz os critérios de conforto humano.

Langer (2009) investigou o comportamento dinâmico de pisos mistos (aço-concreto), em edificações de andares múltiplos, sob o ponto de vista de conforto humano, quando essas estruturas encontram-se submetidas às atividades

rítmicas provenientes dos seres humanos. Os modelos estruturais investigados baseiam-se em edificações mistas de andares múltiplos. O sistema estrutural é do tipo misto (aço-concreto), composto por vigas de aço em seção do tipo “I” e laje de concreto armado. A análise fundamenta-se na modelagem computacional dos sistemas estruturais, através do Método dos Elementos Finitos (MEF).

Mello (2009) em seu trabalho de pesquisa, correlacionou as análises teórico-experimentais de vibrações de estruturas mistas aço-concreto sob ação de atividades humanas, na qual são consideradas a ortotropia, a interação parcial e as ligações semirrígidas, contribuindo na investigação do efeito da interação aço-concreto sobre a resposta dinâmica de sistemas de pisos mistos (aço-concreto) submetidos a ações dinâmicas rítmicas.

Gonçalves (2011) fez uma análise dinâmica não linear de pisos mistos (aço-concreto) submetidos a ações humanas rítmicas. Investigou a influência das ligações estruturais (ligações viga-viga), sobre a resposta dinâmica não linear de pisos mistos de edificações a fim de verificar os problemas de vibrações excessivas sobre pisos mistos (aço-concreto) de edificações. O carregamento dinâmico foi obtido através de testes experimentais com indivíduos praticando atividades rítmicas e não rítmicas.

Lopes (2012), em seu trabalho de pesquisa, analisou o comportamento dinâmico não linear de pisos mistos de edificações submetidos a atividades humanas rítmicas. Considerou o efeito da interação parcial (aço-concreto) e da semi-rigidez das ligações estruturais através de conectores de cisalhamento a fim de verificar os problemas de vibração excessiva dos pisos quando submetidos a ações dinâmicas rítmicas. Em suas análises foram desenvolvidas estratégias de análise que consideram modelos com interação total e parcial.

Setareh (2012), em seu trabalho de pesquisa procedeu ao monitoramento das vibrações de grandes estruturas em balanço, quando submetidas a shows de rock. Os resultados desse monitoramento foram comparados com diferentes valores oferecidos por normas e diretrizes de projeto no que se refere às atividades humanas rítmicas. Novos parâmetros de projeto foram propostos nesta investigação.

## 1.5

### Objetivos e Motivação

Apesar do crescimento verificado nos últimos anos, o emprego das estruturas mistas (aço-concreto) ainda é relativamente pequeno no Brasil.

Portanto, faz-se necessário que uma proposta estrutural em aço seja competitiva, em termos econômicos, em face de outras soluções estruturais existentes na construção civil em concreto armado e protendido.

Diante desse contexto, acredita-se que um dos caminhos a ser seguido seja a elaboração de projetos em estruturas mistas (aço-concreto), mais especificamente, o projeto de pisos mistos de aço-concreto, com base na utilização de soluções estruturais que considerem efetivamente o emprego da interação aço-concreto (total e parcial) e, também, o efeito da semi-rigidez das ligações estruturais (ligações viga-coluna e viga-viga).

De forma geral, a influência da interação aço-concreto (total e parcial) e das ligações estruturais sobre a resposta dinâmica de pisos mistos (aço-concreto), pode conduzir a uma redução nas frequências naturais, tornando o piso suscetível às excitações dinâmicas induzidas pelos seres humanos e, portanto, este é um aspecto que deve merecer atenção especial por parte dos projetistas de estruturas metálicas.

Considerando-se a dificuldade de se encontrar literatura técnica específica sobre o assunto, esta tese de doutorado apresenta como objetivo principal o estudo do comportamento dinâmico de sistemas estruturais de pisos mistos (aço-concreto), em regime de serviço, consonantes com a prática real de projeto. Para tal, uma das contribuições relevantes deste trabalho de pesquisa diz respeito à modelagem numérica da interação aço-concreto (total e parcial) existente entre as vigas de aço e as lajes de concreto e, a consideração do caráter semirrígido das ligações viga-coluna e viga-viga.

Destaca-se, ainda, que a interação aço-concreto é considerada ao longo desta investigação, através do emprego de diferentes tipos de conectores de cisalhamento utilizados na modelagem numérica, do tipo studs e perfobonds. A variação do número de conectores de cisalhamento e a sua influência sobre a resposta dinâmica dos modelos analisados é alvo de estudo nesta tese. O efeito das ligações viga-coluna e viga-viga é avaliado a partir da consideração de ligações rígidas, semirrígidas e flexíveis. As curvas representativas do comportamento estrutural dos conectores de cisalhamento e das ligações estruturais são baseadas em testes experimentais.

A presente investigação é realizada mediante o emprego do Método dos Elementos Finitos (MEF), através da utilização do programa Ansys (2009). A metodologia de análise considera três tipos distintos de modelagem para simulação das excitações dinâmicas humanas rítmicas, tais como, ginástica aeróbica e saltos à vontade. Os modelos de carregamento são respaldados por

testes experimentais, levando-se em conta, em um destes modelos, inclusive, a defasagem existente entre as ações de cada indivíduo sobre o piso.

Com o objetivo de avaliar os limites de vibração toleráveis em termos de conforto humano, a resposta dinâmica não linear geométrica dos modelos estruturais dos pisos mistos (aço-concreto) investigados é estudada a partir dos valores das acelerações (acelerações de pico) encontradas ao longo do estudo. Deste modo, pretende-se fornecer subsídios aos projetistas de estruturas de aço e mistas (aço-concreto), no que diz respeito às comparações feitas entre os resultados obtidos nesta tese de doutorado, no que tange a modelagem do comportamento dinâmico não linear de pisos mistos aço-concreto, com base na consideração da interação aço-concreto e da semi-rigidez das ligações. Ressalta-se, ainda, que para a avaliação das acelerações máximas (acelerações de pico), critérios estabelecidos por normas e recomendações internacionais de projeto são efetivamente utilizados.

## **1.6**

### **Estrutura do documento**

Esta tese começa com o presente capítulo, onde é feita uma breve revisão bibliográfica sobre assuntos referentes a sistemas mistos, ligações semirrígidas e cargas dinâmicas. Aborda-se, também, a influência das novas concepções estruturais no agravamento do problema das vibrações em pisos decorrentes de atividades humanas. Por fim, são apresentados a motivação e os objetivos da pesquisa, e o escopo do trabalho é estabelecido.

No Capítulo 2, apresentam-se os aspectos relevantes para o dimensionamento de estruturas mistas, em especial, os pisos mistos aço-concreto. Atenção é dada ao comportamento de sistemas mistos na interação parcial e/ou total, as forças que se desenvolvem na interface laje-viga. São apresentados também alguns tipos de conectores de cisalhamento, classificação e aspectos relevantes sobre os mesmos.

No Capítulo 3 são apresentados critérios e recomendações de análise propostos por algumas normas, nacionais e internacionais. Também são descritas as medidas corretivas utilizadas para minimizar os efeitos de vibrações em pisos, além de algumas recomendações vigentes adotadas para análises de estrutura sujeitas a vibração.

O Capítulo 4 descreve as metodologias adotadas na modelagem dos carregamentos dinâmicos, assim como as respectivas formulações matemáticas

que descrevem as atividades estudadas. O enfoque desse estudo são os carregamentos humanos rítmicos correspondentes à ginástica aeróbica e aos saltos à vontade.

O modelo estrutural utilizado neste trabalho é apresentado no Capítulo 5. São apresentadas as características quanto à geometria do painel do piso, às disposições das peças estruturais, à espessura da laje, aos materiais utilizados e às propriedades físicas dos elementos empregados.

No Capítulo 6 apresentam-se os modelos numéricos computacionais desenvolvidos por meio do método dos elementos finitos. Onde se apresentam os tipos de elementos finitos empregados na modelagem numérica, o refinamento da malha para validar a resposta dinâmica estrutural e os procedimentos utilizados para a definição do amortecimento estrutural.

No Capítulo 7 é realizado um estudo de caso para avaliar o comportamento dinâmico estrutural de sistemas de pisos mistos (aço-concreto), trabalhando em regime de interação parcial e total. A avaliação desse comportamento contempla análises de vibração livre, com base na obtenção das frequências naturais e nos modos de vibração correspondentes aos modelos estruturais em estudo.

No Capítulo 8 são apresentadas as análises estáticas em termos de deslocamentos dos pontos de análise do piso, comparando-os com os limites recomendados por norma e são apresentados os momentos fletores e esforços cortantes das vigas, observando-se a diferença entre os tipos de ligações consideradas.

No Capítulo 9 é feita uma análise harmônica, com o objetivo de avaliar os modos de vibração que mais contribuem na resposta dinâmica estrutural.

No capítulo 10, realizam-se análises de vibração forçada no domínio do tempo. Investiga-se o comportamento dinâmico de sistemas de pisos mistos, mediante a realização de uma análise paramétrica, tal como: variação do número de pessoas executando atividades rítmicas (ginástica aeróbica e saltos à vontade) sobre pisos mistos.

A discussão dos resultados é apresentada no Capítulo 11. Destacam-se as principais conclusões obtidas ao longo deste trabalho, buscando-se fornecer informações importantes aos projetistas de estruturas de aço e mistas (aço-concreto). Serão apresentadas, ainda, algumas sugestões para futuros trabalhos.