

# 1

## Introdução

### 1.1

#### Generalidades

Pode-se dizer que o termo ação mista tem sua origem no ano de 1855 com Lambot [1] na França, quando a introdução de barras de aço na parte tracionada de peças feitas em argamassa de cimento permitiu a construção de diversas embarcações.

Mais tarde, em 1867, Monier [1] a partir de alguns métodos puramente empíricos, conseguiu patentear o denominado concreto armado, que fora utilizado na construção de tubos, lajes e pontes. Com isso, Monier [1] alcançou bastante êxito em suas obras, apesar de não ter qualquer base científica.

Posteriormente, com o surgimento dos perfis metálicos, novas concepções estruturais foram surgindo, e o emprego dessas matérias-primas, concreto armado e aços estruturais, foi se tornando cada vez mais comum nos sistemas construtivos.

Entretanto, 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, os arranjos 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 tração.

Esse comportamento é facilmente observado em lajes maciças de concreto armado, cujas barras de aço, na parte inferior da laje, resistem aos esforços de tração devido à flexão do painel de laje, e cujo concreto resiste aos esforços de compressão que surgem na face superior do painel.

Vale ressaltar que a técnica de interação aço-concreto tem obtido um lugar de destaque sob o ponto de vista estrutural, com vistas a ampliar a gama de soluções em concreto armado e aço e permitindo que as novas concepções arquitetônicas e as exigências que o mercado impõe sejam atendidas.

Aliada a essa técnica, novas pesquisas, tanto no campo dos materiais como no alcance de novas tecnologias, permitiram o surgimento de sistemas estruturais de comportamento misto, entre os quais pode-se destacar as lajes mistas, os pilares mistos, as vigas mistas e as ligações mistas.

Não obstante os sistemas estruturais supracitados já serem objeto de estudo desde 1847 por Henry Fiedler, conforme Jayachandran [2], o comportamento desses sistemas vem sendo analisado sob os mais variados enfoques nos últimos anos. Adicionalmente, estudos dessa natureza recorrem à utilização de modernas ferramentas computacionais de análise estrutural.

As novas características de sistemas mistos aço-concreto conduzem, em especial, a sistemas estruturais de pisos mistos aço concreto com frequências naturais cada vez mais próximas à faixa de frequência de excitações associada às atividades humanas. Atividades, como, por exemplo, andar, pular, dançar, entre outras, podem causar vibrações excessivas nas estruturas. A presente tese destaca aquelas relativas às atividades humanas mais frequentes da ocupação normal em lajes de pisos de edifícios residenciais, públicos e comerciais: o caminhar e as atividades rítmicas.

Assim, os sistemas estruturais de pisos mistos aço-concreto tornam-se vulneráveis aos efeitos de vibrações induzidos por pequenos impactos, como o caminhar de pessoas sobre o piso, e por excitações mais intensas, como as atividades rítmicas. As vibrações resultam em desconforto para os usuários e, em casos menos comuns, no comprometimento da estrutura.

As considerações relacionadas ao projeto obrigam os engenheiros a verificar a resistência e a estabilidade de sistemas estruturais que têm atendido aos estados limites últimos. Entretanto, os problemas relacionados ao estado limite de utilização desses sistemas devem ser analisados de forma mais cuidadosa.

Embora a observação, a medição e a análise de vibrações em lajes de edifícios induzidas por atividades humanas permaneçam como forte interesse de estudo para pesquisadores e engenheiros ao longo dos últimos dois séculos (1828-2009), inexistente na literatura técnica, até onde o autor tem conhecimento, análise de correlações teórico-experimentais de vibrações de estruturas mistas aço-concreto sob ação de atividades humanas, em especial o caminhar de pessoas e atividades rítmicas sobre pisos mistos aço-concreto, em que se considera a influência da ortotropia, da interação parcial e da interação total.

Com o objetivo de contribuir nessa direção, o presente trabalho investiga o comportamento dinâmico de pisos mistos (aço-concreto) ortotrópicos, quando se

submetem a ações dinâmicas induzidas por seres humanos. Para tanto, consideram-se a interação parcial e a total entre laje e vigas de apoio, bem como a presença de ligações semirrígidas nas conexões estruturais.

Portanto, na elaboração de um modelo teórico para a análise, o projeto e a verificação de uma estrutura de lajes de edifícios sob ação de cargas dinâmicas induzidas por seres humanos, torna-se necessário que esse modelo seja validado por meio de correlações teórico-experimentais das respostas dinâmicas da estrutura. As correlações devem ser feitas para o histórico de respostas no tempo, em termos de deslocamentos e, principalmente, em termos de acelerações, já que esta grandeza é utilizada na avaliação dos níveis aceitáveis de vibração de uma certa edificação, sob o enfoque do conforto humano.

### 1.1.1

#### **Interação aço-concreto**

Pode-se dizer que estruturas mistas tiveram sua primeira aplicação com a utilização de componentes como chapas, cantoneiras, ferro fundido e rebites de conexão para compor o sistema misto. O pionerismo em estruturas mistas foi realizado pelo pesquisador Henry Fiedler, em 1847, de acordo com Jayachandran [2].

Logo após, em 1912, com Andrews [2], surgiu a primeira teoria fundamentada na análise elástica de sistemas mistos. Essa teoria foi publicada na Inglaterra e apresentou equações para o cálculo das tensões na seção de aço e na seção de concreto, considerando apenas as tensões referentes à flexão. As equações eram fundamentadas na teoria da seção transformada, admitindo que o concreto não resistia aos esforços de tração. Essa teoria foi desenvolvida com base na distribuição linear de tensões na seção mista e na desconsideração do deslizamento relativo entre aço e concreto.

Posteriormente, em 1914, também na Inglaterra, a empresa *Redpath Brown and Company* iniciou uma série de ensaios sobre sistemas mistos para pisos. Já em 1922, a *Dominium Bridge Company of Canada* realizou testes experimentais de painéis de pisos constituídos por vigas de aço de seção "I" embutidas ou parcialmente embutidas na laje de concreto.

Várias dessas contribuições, mesmo naquela época, originaram a publicação de tabelas e de códigos normativos, devido ao grande interesse manifestado por parte dos pesquisadores britânicos no comportamento misto estrutural misto.

A partir de 1922, foram construídos edifícios e pontes que adotavam os sistemas de vigas compostas. Segundo Crisinel & O'leary [3], os primeiros sistemas de lajes mistas surgiram no final da década de 1930.

Em 1932, com os trabalhos de pesquisa realizados por Stussi [2], foram desenvolvidas teorias referentes à resistência última, tanto para o concreto como para as vigas mistas. Essas teorias foram classificadas em duas categorias: aquelas com base unicamente no equilíbrio estático das forças internas e aquelas que consideravam, além do equilíbrio estático das forças internas, a distribuição de deformações.

Viest [2] comenta que estudos teóricos sobre o comportamento e a resistência de vigas mistas aço-concreto foram desenvolvidos de acordo com, basicamente, as teorias aplicadas ao concreto armado. Após os estudos experimentais indicarem a ausência de interação completa entre laje de concreto e viga de aço, novas teorias foram apresentadas considerando o escorregamento relativo entre os dois materiais.

No entanto, pesquisas referentes às vigas mistas passaram a dar maior ênfase à conexão mecânica entre viga de aço e laje de concreto, uma vez que se buscava uma nova configuração para esse sistema, como, por exemplo, a laje de concreto apoiada na mesa superior da viga de aço. Por isso, iniciaram-se os estudos sistemáticos de espécimes com conectores de cisalhamento. As primeiras vigas mistas estudadas eram constituídas por um perfil de aço embutido no concreto, nas quais a interação decorria da força de adesão natural entre os materiais.

Menciona-se que o primeiro estudo sistemático com conectores mecânicos foi desenvolvido na Suíça, em 1933, em parceria com o projeto chamado *Sistema Alpha*. Nesse método de construção, a transferência de cisalhamento horizontal da laje de concreto para a viga de aço era garantida por meio de barras redondas com formato de hélice. A hélice, denominada "conector espiral", era soldada no topo da mesa superior da viga de aço em pontos de contato ao longo do comprimento da viga, conforme ilustra a Figura 1.1.

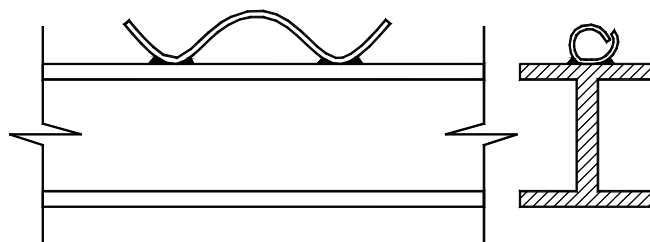


Figura 1.1 – Conector espiral, Tristão [4]

Após as primeiras investigações desenvolvidas com conectores espirais, pesquisadores europeus atentaram a dois novos tipos de conectores: (a) conectores de vergalhões na forma de ganchos ou presilhas e (b) conectores rígidos de barras retangulares de aço soldadas à viga de aço. Geralmente, esses dois tipos de conectores eram utilizados conjuntamente, a fim de restringir o deslizamento horizontal na interface aço-concreto, bem como impedir o afastamento vertical entre viga e laje (*uplift*). A Figura 1.2 ilustra os conectores rígidos utilizados na época.

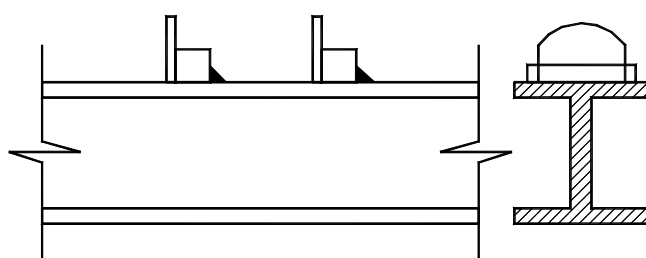


Figura 1.2 – Conectores rígidos, Chapman [6]

Como consequência, após 1940, praticamente todas as investigações utilizavam conectores de cisalhamento.

Em 1944, os sistemas mistos passaram a fazer parte das normas da *American Association of Highway Officials* (AASHO), a qual hoje é denominada AASHTO.

Após a execução de testes em vigas mistas com conectores de cisalhamento, concluiu-se que o deslizamento na interface aço-concreto era uma característica inerente ao comportamento do sistema, ou seja, a interação entre os materiais era classificada como incompleta ou parcial. Consequentemente, várias teorias elásticas foram desenvolvidas e publicadas, como, por exemplo, em Granholm [2] e em Jaeger [2], levando-se em conta o efeito do escorregamento na distribuição de tensões e de deformações.

Em 1950, a *American Standards Association* (ASA, atual ANSI – *American National Standards Institute*) [5] novamente reuniu o comitê para reavaliar as padronizações de segurança para determinados tipos de estrutura definida no ano 1920. As reavaliações consideradas pelo comitê não modificaram os valores das cargas dinâmicas induzidas pelos seres humanos. Valores esses que foram definidos anteriormente.

Na década de 1950 no Brasil, as primeiras construções mistas restringiram-se a alguns edifícios e pequenas pontes. Com o aumento da

produção de aço estrutural no Brasil e com a busca de novas soluções arquitetônicas e estruturais, foram construídos vários edifícios no sistema misto nos últimos anos. As estruturas mistas foram normatizadas pela primeira vez em 1986 pela NBR-8800: "Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios", a qual aborda o dimensionamento e a execução somente dos elementos mistos submetidos à flexão (vigas mistas).

Enquanto na Europa as pesquisas estavam voltadas para os conectores rígidos combinados com ganchos ou presilhas, os engenheiros americanos mostraram preferência em estudar os conectores flexíveis. As investigações experimentais incluíam conectores flexíveis de aço laminado (a maioria dos testes eram realizados com perfis "U") e conectores flexíveis do tipo stud. É importante salientar que estudos referentes aos conectores flexíveis do tipo stud (conector mais utilizado atualmente) iniciaram-se em 1954 nas Universidades de Illinois e Lehigh, respectivamente. Nesse ano, muitos testes experimentais estáticos e de fadiga foram executados em espécimes utilizados em ensaios do tipo *push-out*, em vigas duplo "T", entre outros.

Na Europa, o sistema de lajes mistas foi adotado primeiramente no final da década de 1950, utilizando formas de aço corrugadas, apoiadas em vigas de aço. A interação entre a forma de aço e o concreto, nessa ocasião, realizava-se unicamente por atrito. Na metade da década de 1960, as formas de aço perfiladas foram levadas dos Estados Unidos para a Europa.

Em 1964, Chapman & Balakrishnan [6] realizaram estudos experimentais na tentativa de entender o comportamento de sistemas mistos a partir de cargas concentradas e uniformemente distribuídas, como demonstrado na Figura 1.3. Nesses ensaios foi possível variar as quantidades de conectores de cisalhamento, as alturas e os diâmetros, a fim de estudar o comportamento da interface laje e viga quanto ao escorregamento e à obtenção da carga última de colapso. Para tanto, foram ensaiadas dezessete vigas mistas simplesmente apoiadas.

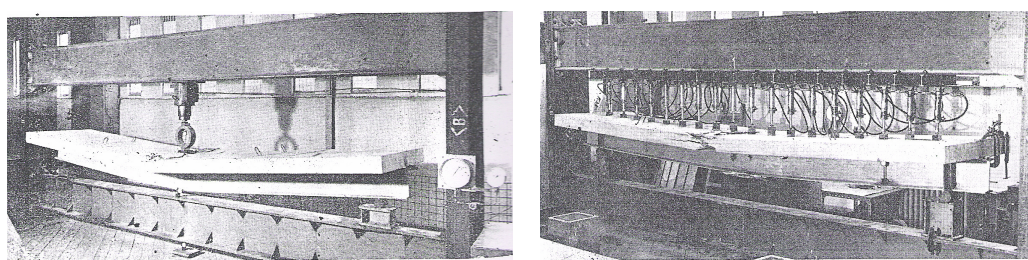


Figura 1.3 – Ensaios experimentais com aplicação de cargas concentradas e distribuídas [6]

Em 1965, Slutter e Driscoll [7] apresentaram resultados experimentais visando a verificação da resistência última à flexão, assim como ao desenvolvimento de um critério para determinação do número mínimo de conectores requeridos em vigas mistas.

No mesmo ano, Bamard e Jonhson [4] apresentaram resultados obtidos nos ensaios de quatro vigas mistas contínuas com três vãos, a fim de validar um método de previsão do comportamento da seção transversal da viga, anteriormente publicado pelos mesmos autores.

Em 1968, análises numéricas que consideravam o comportamento inelástico do aço, do concreto e da conexão entre a laje de concreto e a viga de aço foram apresentadas por Yam & Chapman [8], com o intuito de avaliar o comportamento de sistemas mistos.

Para a análise elastoplástica, a curva tensão deformação do aço e do concreto foram tomadas como bilineares, como pode ser visto nas Figura 1.4 e Figura 1.5, respectivamente.

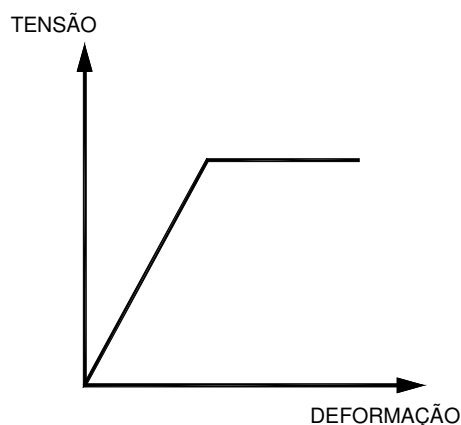


Figura 1.4 – Representação para a curva tensão deformação do concreto [8]

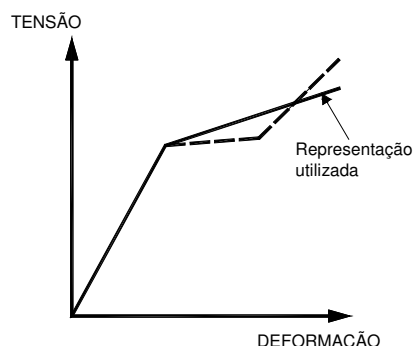


Figura 1.5 – Representação adotada para a curva tensão deformação do aço [8]

A representação da curva força deslocamento definida para o conector foi representada pela seguinte função demonstrada na Figura 1.6.

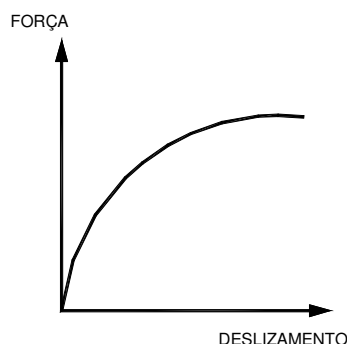


Figura 1.6 – Representação adotada para a curva força *versus* deslizamento dos conectores de cisalhamento [8]

Em 1969, Davies [9] propôs a análise do comportamento de vigas mistas simplesmente apoiadas sob duas situações. Na primeira, variou-se o espaçamento entre conectores, porém mantiveram-se a seção transversal da viga e a taxa de armadura transversal constantes. Na segunda, variou-se a taxa de armadura transversal, porém mantiveram-se constantes a seção transversal, o vão e o espaçamento entre os conectores.

Em 1979, a partir de um programa computacional para realizar análises numéricas desenvolvido pela Universidade de Adelaide e a partir de modificações nas propriedades dos elementos encontrados nesse programa, um extenso trabalho de pesquisa para avaliar o comportamento de sistemas mistos, levando-se em consideração a região de contato entre a laje de concreto e a viga de aço, foi desenvolvido pelos pesquisadores Hirst e Yeo [10].

Os elementos utilizados na interface laje-concreto representam o comportamento de conectores de cisalhamento a partir do emprego de curvas força deslocamento obtidas a partir de ensaios experimentais realizados por Yam & Chapman [8].

Em 1994, uma modelagem numérica foi apresentada para prever tensões e deformações em estruturas mistas aço-concreto. O modelo discretizado em elementos finitos leva em consideração tanto os efeitos de fissuração, devido à tensão no concreto tracionado, como o deslizamento longitudinal entre o aço da viga e a laje de concreto, devido à interação parcial na interface laje-viga. Esses trabalhos foram desenvolvidos por Porco, Spadea e Zinno [11].

A Figura 1.7 apresenta a curva experimental obtida para o comportamento da conexão que foi substituída por uma curva de comportamento bilinear.

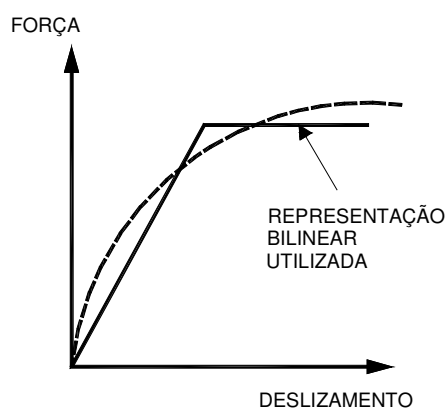


Figura 1.7 – Curva experimental e curva bilinear representativas da conexão laje-viga, Porco, Spadea e Zinno [11]

Em 1997, um modelo de elemento finito não linear e bidimensional foi desenvolvido e analisado pelo programa Instaf [4]. Com esse modelo, foram incorporadas as considerações referentes ao escorregamento entre a laje de concreto e o perfil de aço da viga, a não linearidade do material do aço, a não linearidade geométrica devido a grandes deslocamentos e a não linearidade na relação deslocamento *versus* deformação. Além de contemplar as hipóteses relacionadas anteriormente, em pesquisas desenvolvidas por Oven [87], deve-se também considerar a utilização de conectores flexíveis com representação trilinear para a relação força-deslizamento conforme Figura 1.8.

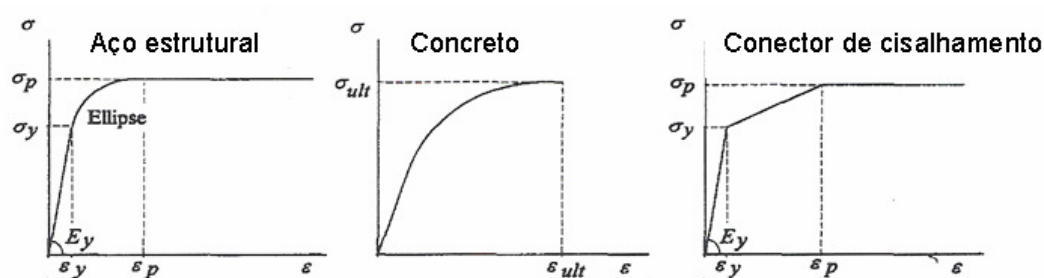


Figura 1.8 – Modelagem das propriedades dos materiais [12]

Gattesco [13], em 1999, apresentou um modelo numérico para análise do sistema misto com laje em concreto e viga de aço, em que considerava o comportamento não-linear do concreto, do aço e dos conectores de cisalhamento. Para os conectores de cisalhamento, uma relação não-linear empírica entre carga e deslocamento foi utilizada, e a modelagem numérica foi realizada a partir de molas translacionais, as quais permitiram avaliar o grau de interação entre a laje de concreto e as vigas de aço, Figura 1.9. Comparações entre os resultados obtidos pelo modelo proposto e os dados experimentais

concluíram que o procedimento foi capaz de obter uma resposta detalhada do comportamento de vigas mistas até sua situação última de colapso.

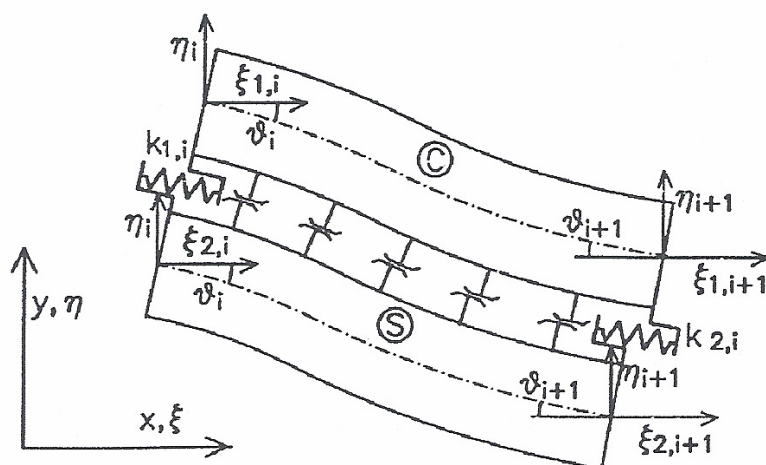


Figura 1.9 – Elemento proposto por Gattesco [13]

Em Tristão [14], são apresentadas simulações numéricas de conectores tipo pino com cabeça (stud) e perfil “U” formado a frio, por meio de uma modelagem do ensaio experimental tipo “push-out”, cujos resultados são confrontados com valores experimentais obtidos de ensaios realizados em laboratório. Os elementos estruturais cumprem a função de transmitir o fluxo de cisalhamento longitudinal que se gera na interface aço-concreto, bem como a de impedir o afastamento vertical entre viga e laje. Esse fenômeno é conhecido como *up-lift* e influencia diretamente os valores de resistência ao momento fletor e os deslocamentos verticais (flechas).

Análises em regime de não-linearidade física e geométrica foram consideradas. A variação do número de conectores, as taxas de armaduras inseridas nos modelos, o diâmetro dos conectores, a resistência característica à compressão do concreto, a espessura e a posição de soldagem dos conectores tipo perfil “U” formado a frio tiveram como finalidade a determinação da resistência última e da relação força-deslocamento dos conectores, bem como a avaliação da concentração de tensões e deformações nas partes constituintes do modelo.

Em estruturas mistas aço-concreto, quando se considera uma interação parcial entre o concreto da laje e a viga de aço, nota-se um apreciável incremento nas deflexões que ocorrem nas vigas de aço, as quais não acontecem na interação total.

Para tanto, em 2003, Faella, Martinelli e Nigro [12] apresentam um procedimento para análise não-linear de vigas mistas simplesmente apoiadas,

considerando a não linearidade da relação carga-deslocamento para conectores de cisalhamento.

Esse procedimento postula considerar a laje de concreto fissurada e os resultados de rigidez efetiva à tração, pois nas regiões de fissuração do concreto, a relação carga-deslocamento assume um comportamento diferente. Foi empregado o método dos elementos finitos para análise de vigas mistas, e a validação dos modelos foi feita a partir de dados experimentais. Realizou-se, também, um estudo paramétrico para avaliar as deflexões de vigas mistas simplesmente apoiadas.

Em 2006 Kotinda [15] apresenta um modelo numérico tridimensional de viga mista, com vistas a simular o comportamento estrutural, principalmente no que tange à interface entre viga de aço e laje de concreto. Os modelos estruturais foram constituídos por vigas mistas simplesmente apoiadas com lajes de faces planas e conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça. Já os modelos numéricos foram constituídos por quatro conjuntos de elementos: a laje de concreto, a viga de aço, os conectores de cisalhamento e o par de contato na interface laje-viga conforme mostra a Figura 1.10.

No grupo referente à laje de concreto, estão incluídas as armaduras, inseridas sob a forma de taxa nos elementos pertencentes às faces inferior e superior da laje. Cada conjunto foi discretizado separadamente, mas de forma a coincidir com os nós de cada um na interface entre eles, possibilitando o acoplamento entre tais conjuntos, realizado por meio desses nós. Os resultados obtidos foram comparados com os valores experimentais apresentados por outros pesquisadores.

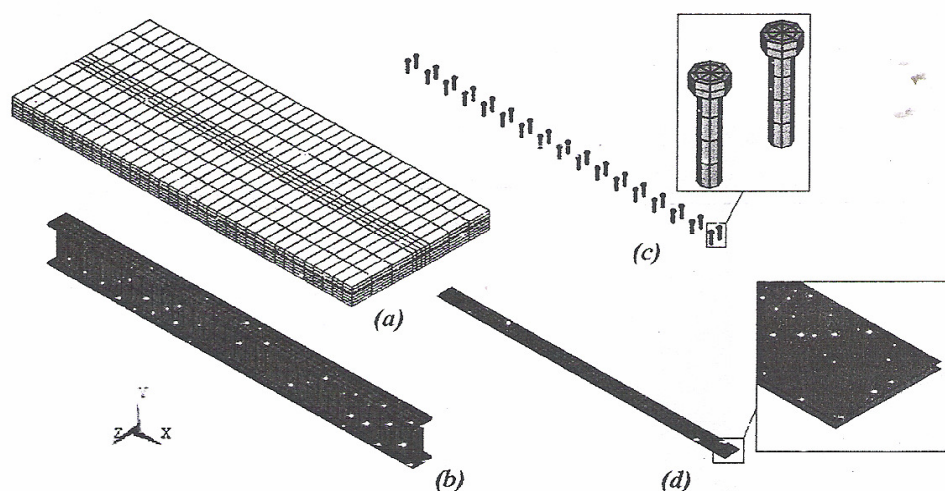


Figura 1.10 – Grupos de elementos finitos: (a) laje de concreto, (b) perfil de aço, (c) conectores de cisalhamento e (d) par de contatos entre a laje e a viga [15]

Em 2007, Queiroz, Vellasco e Nethercot [16] apresentam 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 [55]. 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. Foram também analisados 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, Figura 1.11, foi realizada por meio da comparação com dados experimentais e com algumas análises numéricas alternativas. Foram também 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.

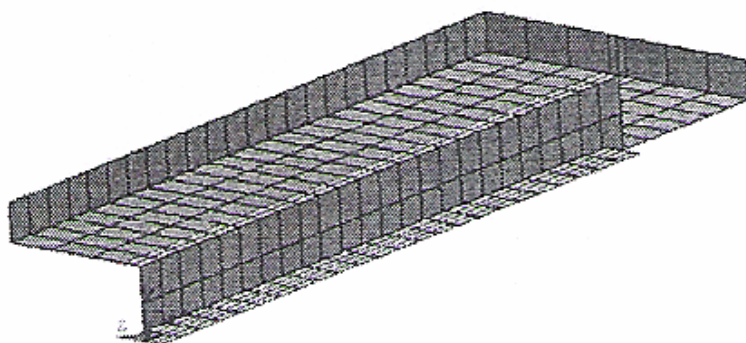


Figura 1.11 – Modelo tridimensional em elementos finitos [16]

### 1.1.2 Ortotropia

No que tange à análise dinâmica de pisos mistos (aço-concreto), o uso indiscriminado de um modelo estrutural isotrópico deve ser, no mínimo, questionado. Uma estratégia mais apropriada para analisar a resposta dinâmica desse tipo de estrutura consiste em uma solução ortotrópica para o modelo, a fim de postular a geometria específica desse tipo de sistema estrutural.

Em 1993, Daniels e Crisinel [17] propuseram um novo procedimento de cálculo, apresentando uma alternativa para testes em escala real para lajes mistas com *deck* metálico usado em edifícios. O procedimento consiste na

combinação de resultados de testes de ligação cisalhante com a análise numérica de lajes mistas simplesmente apoiadas e lajes mistas contínuas. O procedimento incorpora algumas simplificações e assume uma razão ainda conservativa para prever tanto o comportamento quanto a resistência das lajes mistas. Os ensaios utilizados foram o *pull-out-test*, escolhido para investigar o comportamento e a resistência da ligação na interface entre a forma de aço e o concreto. O teste *push-out* foi adotado para investigar o comportamento e a resistência da ancoragem de extremidade entre o perfil de aço, a forma de aço e a laje de concreto nos apoios. A vantagem na utilização desse procedimento, que utiliza resultados de testes em escala real, é a versatilidade e a redução de custos, a estimativa da deformação pelas cargas de trabalho, a inclusão de variáveis adicionais, tal como ancoragem de extremidades nos apoios e o adicional reforço para os momentos positivo e negativo proporcionados pelas armaduras. Esse procedimento deve também ser utilizado para o desenvolvimento de novos sistemas de *steel decks* e improvisar o desempenho da laje com o *deck* existente. Os autores apresentam, outrossim, exemplos de cálculo para vãos simples e múltiplos.

Também em 1993, em uma segunda etapa, Daniels e Crisinel [17] utilizaram os mesmos modelos de lajes mistas simplesmente apoiadas e contínuas em escala real para avaliar a influência da variação de parâmetros, tais como: número de vãos, presença das nervuras no *deck* metálico, ancoragem e momento negativo resistente próximo aos suportes interiores. Uma análise paramétrica baseada na metodologia de cálculo descrita foi realizada para três geometrias de *deck*, utilizando uma limitação na razão de esbeltez. Alguns modelos de *deck* metálico foram escolhidos para representar as características da conexão cisalhante. A razão da esbeltez foi definida para o comprimento do vão dividido pelo total da profundidade da laje mista. Os efeitos desses parâmetros foram investigados para cada *deck* e esbeltez, incluindo os limites de deflexão para cargas de serviço ( $L/250$ ), limites últimos de deflexão ( $L/50$ ) e máxima capacidade de carga.

Em 1999, Mello [18] apresenta um trabalho de pesquisa, Figura 1.12, em que o comportamento e a resistência do sistema de lajes mistas incorporada à forma de aço são investigados durante todas as fases de carregamento e após a cura do concreto. Foram ensaiados doze protótipos de laboratório de vãos simples em uma direção. A partir desses ensaios, as análises de resultados foram realizadas a partir das curvas carga *versus* deslocamento relativo de extremidade, carga *versus* flecha no meio do vão e carga *versus* deformação no

aço. Assim, possibilitou-se conhecer o comportamento do sistema misto e definir precisamente o modo de colapso do sistema, a saber, o colapso por cisalhamento longitudinal. Procurou-se, então, estabelecer critérios e determinar expressões analíticas para o cálculo do carregamento último desse modo de colapso por meio do método semi-empírico “m e k” e do método de interação parcial.

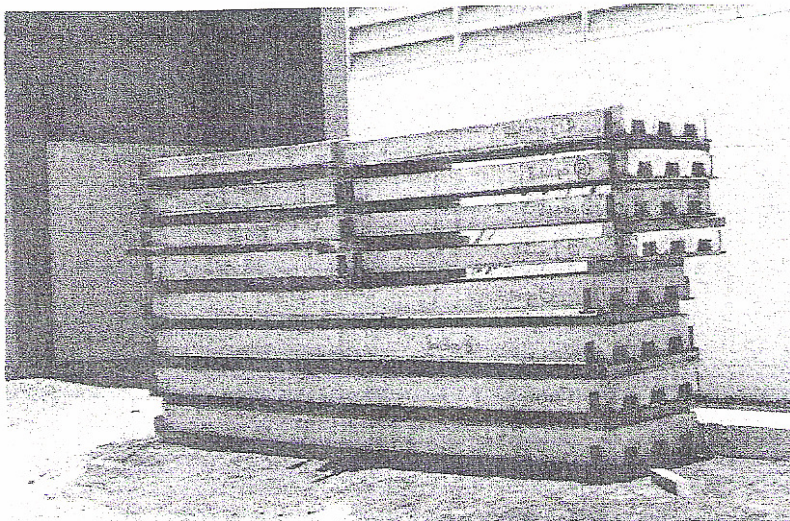


Figura 1.12 – Modelos dos protótipos ensaiados [18]

Em 2001, Takey [19] estudou o comportamento de lajes mistas formadas por perfis de chapa dobrada e EPS (isopor) sequencialmente dispostas lado a lado e cobertas por uma camada de concreto armado. Seguindo a mesma linha de pesquisa, Beltrão [20], em 2003, estudou o comportamento estrutural de lajes mistas com corrugações na alma de perfis de chapa dobrada. Para tanto, diversos sistemas estruturais foram investigados por ambos os autores. Procurou-se variar a configuração biapoiada para três apoios com vão de 1,5 a 5m, e executaram-se comparações do vão máximo para a flecha máxima da seção, da carga máxima suportada em função do momento máximo positivo, de cargas após a construção, da inércia e do peso do perfil por vão. Analisadas e comparadas todas essas características, chegou-se a um perfil ideal para ser utilizado como modelo. Porém, a sua fabricação induziu a modificações no perfil ideal, melhorando seu desempenho estrutural. Ambas as pesquisas realizadas por Takey [19] e Beltrão [20] pretendiam aumentar a produtividade em tempo e material, assim como investigar a aplicabilidade em setores diversos, tais como residências, ambientes onde os escoramentos são inviáveis e locais onde a rapidez de execução é imprescindível.

Em 2005, Vianna [21] apresenta um novo protótipo de *deck* metálico, como ilustrado na Figura 1.13, visando obter uma forma que apresentasse boa aderência mecânica entre a laje de concreto e a forma de aço (*steel deck*), assim como um comportamento dúctil para essa ligação. Para isso, várias formas de seções transversais foram estudadas, e variáveis como peso, altura, espessura, tensão de escoamento, vão máximos e capacidade suporte da carga foram consideradas. Após a definição e a otimização do perfil metálico, foi efetuado um estudo experimental composto por uma série de ensaios. Foram executados dois ensaios de arrancamento (*pull-out*), nove ensaios de flexão do perfil metálico e um ensaio em escala real da laje mista. Os ensaios tipo *pull-out* foram realizados para estabelecer a carga última de deslizamento na interface aço-concreto. Os ensaios do perfil metálico serviram para verificar a rigidez do piso durante a fase de concretagem. Procurou-se, com o ensaio em escala real, determinar a resistência última da estrutura, o modo de ruína, as deflexões e as deformações. Em uma última etapa, o ensaio estendeu-se pela comparação dos resultados experimentais com os trabalhos desenvolvidos por Takey [19] e Beltrão [20] e com os resultados teóricos para validação dos resultados do novo sistema de laje mista.

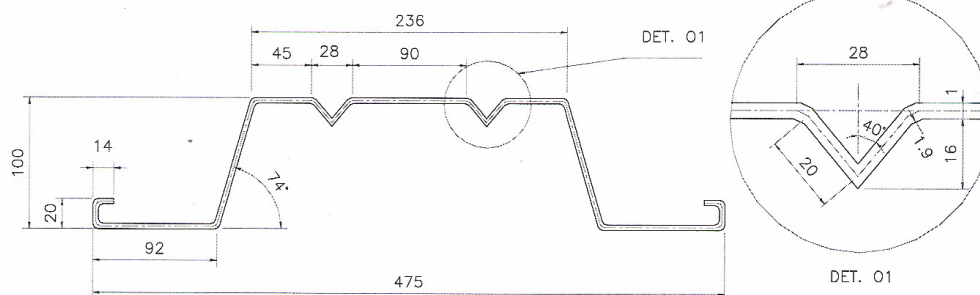


Figura 1.13 – Modelo proposto para a forma de aço (*steel deck*) [21]

Em 2006, Emad El-Dardiry e Tianjian Ji [22] desenvolveram modelos isotrópicos e ortotrópicos na tentativa de avaliar o comportamento dinâmico de estruturas mistas aço-concreto. Para o desenvolvimento dos dois modelos de pisos, foram utilizadas técnicas de discretização em elementos finitos, incorporando um modelo sólido que contempla a forma de aço do *steel deck* e a laje de concreto. A estratégia utilizada para a definição das características do modelo ortotrópico foi calcular a inércia do modelo em uma dada direção a partir do valor da deflexão do piso, obtida do modelo tridimensional. A diferença entre as razões de inércias do piso nas duas direções também permitiu corrigir o valor

do módulo de elasticidade do piso em uma direção e na outra. Nesse ponto, deve-se observar que a forma de aço do *deck* metálico possui diferentes alturas ao longo do comprimento (nervuras), as quais, por sua vez, garantem valores de rigidez diferentes em um e em outro sentido do plano do piso, Figura 1.14 e Figura 1.15.

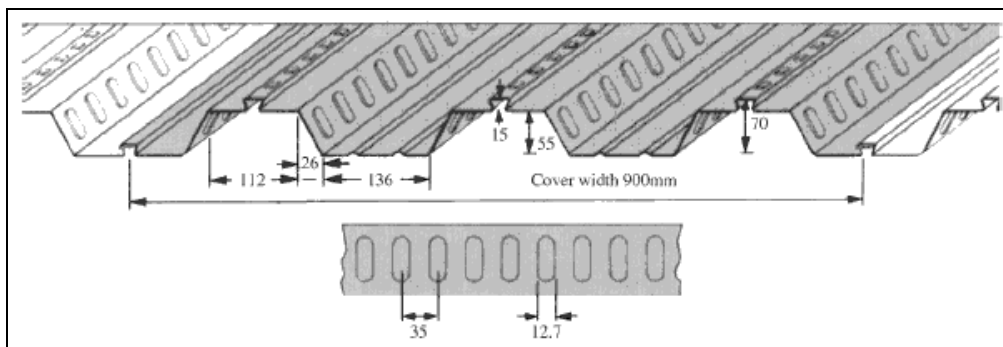


Figura 1.14 – Modelo do *steel deck* [22]

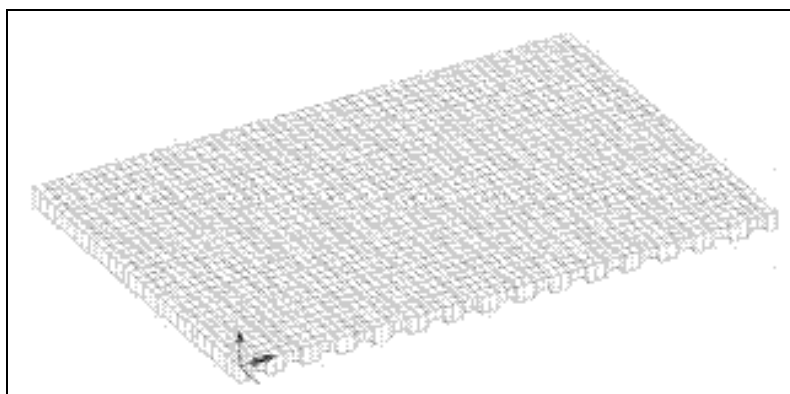


Figura 1.15 – Modelo tridimensional em elementos finitos [22]

Em 2007, Mello [23] objetivou investigar as diferenças existentes entre a modelagem isotrópica e a ortotrópica, com base na obtenção das frequências naturais e nos modos de vibração correspondentes a um piso misto existente. Os valores obtidos numericamente foram comparados com os resultados experimentais de Vecchi e cols. [24] (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.

### 1.1.3 Ligações semirrígidas

As ligações de estruturas de aço apresentam um comportamento tradicional, ou seja, flexível ou rígido. Com essas hipóteses, a análise torna-se mais simples, porém o modelo estrutural não é capaz de refletir a realidade da prática, tendo em vista que as ligações influenciam diretamente o comportamento global da estrutura. Os modelos simplificados utilizados na prática de projeto são eficientes para algumas estruturas com poucos elementos estruturais e sob o efeito de cargas de pequena magnitude. Contudo, em outros casos, a correta avaliação das ligações da estrutura requer que o comportamento semirrígido da ligação seja considerado. 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. Por outro lado, ao se admitir que as ligações são 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.

Com a avaliação de novos conceitos de projetos semirrígidos, é possível dimensionar as estruturas de aço de forma mais racional e diminuir os custos, pois há grande liberdade de detalhamento de ligações dentro dos limites extremos: rígida e flexível. Em geral, qualquer rigidez para uma determinada ligação pode ser conseguida a fim de atender o comportamento estrutural desejado.

Um resumo do estado da arte de ligações estruturais em aço foi realizado por Chan e Chui [25], em que são citados diversos trabalhos efetuados nessa área. Desde os primeiros estudos de Wilson e Moore [26], em 1917, que avaliaram a rigidez rotacional de ligações viga-coluna com rebites, centenas de ensaios têm sido realizados na tentativa de se investigar o real comportamento das ligações viga-coluna.

As ligações soldadas e rebitadas com cantoneiras foram testadas por Young e Jackson [27], em 1934, e por Rathbun [28], em 1936. Um pouco mais

tarde, Bell e cols. [29] realizaram alguns ensaios com o mesmo tipo de ligações, mas com parafusos de alta resistência.

Subsequentemente, o comportamento de ligações com placa de extremidade soldada verticalmente à mesa da coluna (*header plate*) foi investigado em dezesseis ensaios realizados por Sommer [30], em 1969. Esse autor realizou quatro ensaios de ligações aparafusadas com cantoneiras.

Ligações com placa de extremidade estendida e/ou ajustada à altura da viga começaram a ser utilizadas por volta de 1960, sendo projetadas para transferir predominantemente momentos fletores da viga para a coluna. Essas ligações começaram a ser estudadas na década de 1970, em que o objetivo de diversos autores era avaliar a influência da utilização de enrijecedores na coluna de ligações com placa de extremidade. A partir de meados da década de 1980, muitos pesquisadores realizaram ensaios de ligações semirrígidas conforme a revisão bibliográfica realizada por Mesquita [31], que cita um banco de dados denominado SERICON 11 [32], no qual os ensaios estão catalogados.

A partir da década de 1990, alguns ensaios de ligações metálicas começaram a ser efetuados por pesquisadores brasileiros. Alguns dos principais trabalhos encontrados na literatura serão citados a seguir.

Queiroz [33] realizou, em 1994, em Innsbruck, uma série de ensaios de ligações soldadas no âmbito de sua tese de doutorado. Carvalho [34], em 1997, fez três ensaios de ligações com cantoneiras de alma, cantoneiras de topo e apoio no eixo de maior inércia da coluna. Já Lima [35], em 1998, seguindo a metodologia utilizada por Carvalho, também realizou três ensaios com o mesmo tipo de ligação, mas conforme o eixo de menor inércia da coluna.

A maioria das ligações transfere algum momento fletor com um nível de rotação associado, as quais se denominam semirrígidas, cujo dimensionamento deve ser executado de acordo com o comportamento estrutural real. Todavia, algumas ligações viga-coluna estão sujeitas a uma combinação de momento fletor e esforço axial. O nível de esforço axial pode ser significativo, principalmente, em ligações de pórticos metálicos com vigas inclinadas, em pórticos não contraventados ou em pórticos com pavimentos incompletos. As normas atuais de dimensionamento de ligações estruturais em aço não consideram a presença de esforço axial (tração e/ou compressão) nas ligações. Uma limitação empírica de 5% da resistência plástica da viga é a única condição imposta no EUROCODE 3 [204]. Em 2003, Lima [36], em seu trabalho de pesquisa, descreve alguns resultados experimentais e numéricos para estender a filosofia do método das componentes para ligações com ações combinadas de

momento fletor e esforço axial. Para cumprir esse objetivo, quinze ensaios foram realizados, e um modelo mecânico foi apresentado para ser utilizado na avaliação das propriedades da ligação: resistência à flexão, rigidez inicial e capacidade de rotação.

Em 2006, Castro [37] apresentou uma extensa investigação numérica a respeito da avaliação da resposta dinâmica de estruturas de aço com a consideração pertinente do efeito das ligações, especialmente, no que tange as semirrígidas. Castro [37] propôs o emprego de elementos que representassem fielmente os efeitos das ligações estruturais na análise dinâmica de estruturas de aço, evidentemente, com a consideração do efeito de semirrigidez dessas ligações. Para tanto, um modelo mecânico com elementos de mola rotacionais não lineares foi apresentado, objetivando simular adequadamente o efeito das ligações viga-coluna especificamente em pórticos de aço. Foram estudados pórticos de aço com e sem contraventamento. Assim, a partir da calibração de um modelo computacional desenvolvido, os resultados foram então comparados com os dados obtidos na literatura técnica sobre o assunto.

Uma importante contribuição foi apresentada por Oliveira [38], em 2007, na avaliação do comportamento de pisos mistos semicontínuos com adoção de ligações semirrígidas metálicas. Entretanto, o sistema estrutural em estudo exigiu um esforço muito grande por parte dos pesquisadores, 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.

#### **1.1.4**

### **Carregamentos dinâmicos**

As vibrações em pisos induzidas por atividades humanas, tais como correr, saltar, fazer exercícios aeróbicos ou até mesmo caminhar, constituem um problema bastante complexo, pois as características da excitação dinâmica geradas durante a execução dessas atividades encontram-se associadas às diferenças corporais de cada indivíduo e à maneira pela qual cada um realiza uma determinada atividade, não contribuindo, portanto, para a caracterização no campo físico e no campo matemático.

Os seres humanos sempre analisaram as distinções mais aparentes entre as várias atividades que realizam, porém a análise de sua mecânica fundamental não era possível antes do desenvolvimento da ciência física.

Inicialmente, a locomoção dos seres humanos recebeu atenção esporádica por parte de pesquisadores pioneiros, como Borelli [110], em 1679, e os irmãos Weber [110], em 1836. No entanto, o verdadeiro criador do estudo científico da locomoção foi o pesquisador Otto Fischer [110], matemático alemão que foi o primeiro a calcular as forças envolvidas na locomoção, em 1895.

O passo seguinte foi a introdução da plataforma de força, conforme Elftman [110], que permitia registrar as forças de reação do solo transmitidas pelo pé no caminhar humano. A plataforma de força típica é formada por uma placa de metal de, aproximadamente,  $1\text{m}^2$ , apoiada sobre quatro pilares pequenos, os quais, por sua vez, a suportam a meio caminho da extensão de cada lado. Medidores de pressão fixados a cada um dos pilares detectam as alterações nas cargas sustentadas por eles. Os sinais emitidos pelos medidores são amplificados e registrados, tornando-se possível determinar a magnitude e a direção das forças transmitidas à superfície de suporte, denominadas força de reação do solo.

As cargas rítmicas foram investigadas por Tilden [39], em 1913, realizando ensaios com atividades humanas sobre uma plataforma, chegando à conclusão de que o movimento de multidões poderia ser aleatório ou sincronizado e de que o alcance da sincronia perfeita entre os indivíduos era impossível.

Desde o início do século XX, existe a preocupação com as cargas geradas por atividades humanas. Por esse motivo, alguns autores, tais como JOHNSON [40], em 1905, tentaram representar os efeitos dinâmicos por meio da majoração da carga estática.

Em 1920, com o colapso de várias arquibancadas e estádios onde a preocupação com os problemas ocasionados por atividades humanas aumentou. Assim, solicitou-se à *American Standards Association* (ASA, atual ANSI – *American National Standards Institute*) [5] a formação de um comitê para padronizações de segurança de determinados tipos de estrutura.

Dos colapsos que envolveram cargas dinâmicas induzidas por seres humanos, podem citar-se o colapso de uma Passarela na Carolina do Norte, EUA, a *Millennium Footbridge*, durante a saída de uma multidão em um evento esportivo, deixando mais de 100 pessoas feridas, Figura 1.16. No dia da inauguração, a passarela começou a apresentar oscilações laterais, com

amplitude da ordem de 20 cm, ao longo de seus 345 m de comprimento, devido à ação do movimento de pessoas sobre a ponte.



Figura 1.16 – Desabamento de uma passarela na Carolina do Norte, EUA [51]



Figura 1.17 – *Millennium Footbridge* sobre o Rio Tâmesa [51]

Em 1968, outros tipos de carregamento utilizados para representar as forças geradas durante a caminhada foram expressos em função de testes que registraram a carga do impacto do calcanhar sobre o piso. Esse carregamento, considerado a maior fonte de excitação acarretada durante a caminhada, produz uma resposta transiente, quando o sistema é excitado pela aplicação súbita de uma força de excitação. Sua representação gráfica foi apresentada por Ohmart [41] na realização de ensaios denominados *heel drop test*, em que se projeta o calcanhar sobre o piso após levantar o pé a uma altura correspondente a peso da pessoa. A representação pode ser visualizada na Figura 1.18 a seguir.

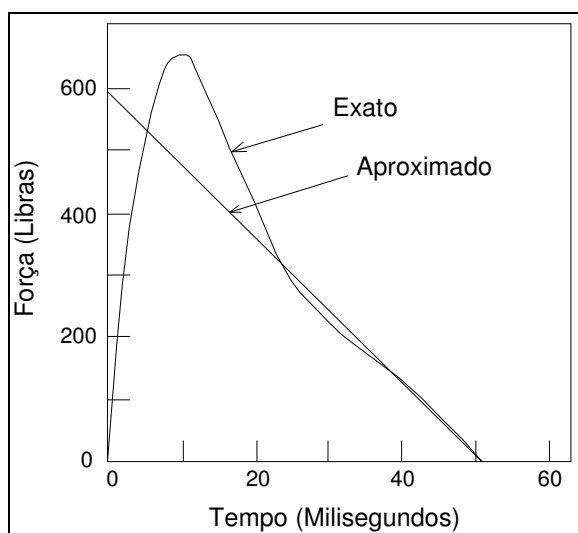


Figura 1.18 – Medida aproximada do impacto do *Hell Drop Test* [41]

Em 1974, a partir de algumas funções de carregamento propostas, investigações também foram realizadas com o intuito de avaliar a percepção humana das vibrações que ocorrem em pisos comuns de edificações. Wiss e Parmalee [42] apresentam estudos em que um grupo de 40 pessoas foi submetido a um tipo de onda projetada para simular a vibração normal encontrada em sistemas estruturais de pisos. O objetivo dessa pesquisa foi estudar, experimentalmente, a reação humana às vibrações transientes verticais em termos de frequência, deslocamento máximo e amortecimento.

Outro trabalho foi desenvolvido por Murray [43], que classificou a percepção humana das vibrações em quatro categorias: quando a vibração não é percebida pelos ocupantes; quando é percebida, mas não causa danos; quando é percebida e incomoda; e quando provoca sérios danos à saúde das pessoas.

De acordo com Murray, [43] as conclusões foram obtidas com base nas análises dos resultados de laboratório de 100 sistemas de pisos mistos compostos por vigas em aço e lajes em concreto submetidas ao *heel drop test*, como anteriormente mencionado.

Em 1977, o ensaio do *heel drop test* foi realizado por Murray e Hendrick [44] em diferentes edificações. Um impacto de 0,84kN foi medido por um sismógrafo em nove salões de igrejas, em três pisos localizados no último andar de um shopping, em dois pisos da varanda no segundo andar de um hotel e em um piso no segundo andar de um prédio comercial. A partir das respostas, obtiveram-se os valores das amplitudes, frequências e amortecimentos dos sistemas analisados.

Em 1987, Rainer, Pernica e Allen [45] apresentaram sua contribuição, permitindo registrar as forças de reação do solo, transmitidas pelo pé durante a caminhada, por meio de plataformas (ou placa) de força mais sofisticadas, conforme mostra a Figura 1.19.

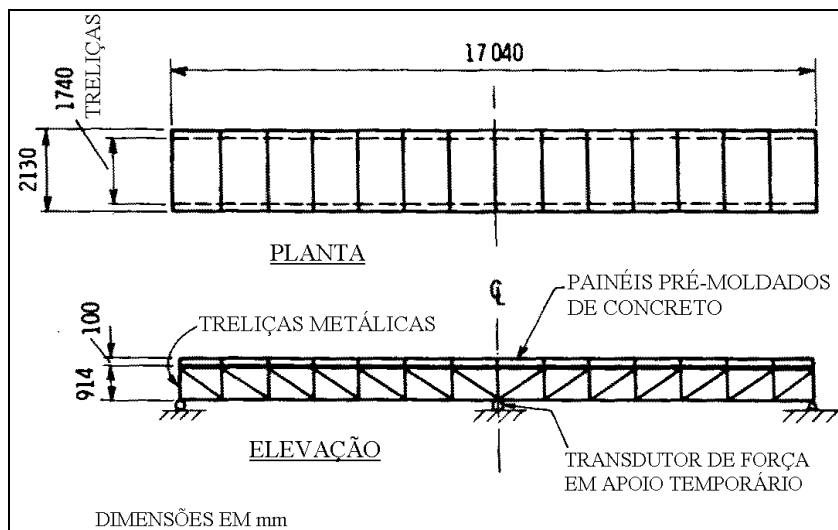


Figura 1.19 – Plataforma de força utilizada por Rainer, Pernica e Allen [45]

Em 1989, foi publicado, no *Design Guide on the Vibration of Floors* [46], 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, Figura 1.20. 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. A Figura 1.20 e Figura 1.21 demonstram graficamente a função representativa do caminhar.

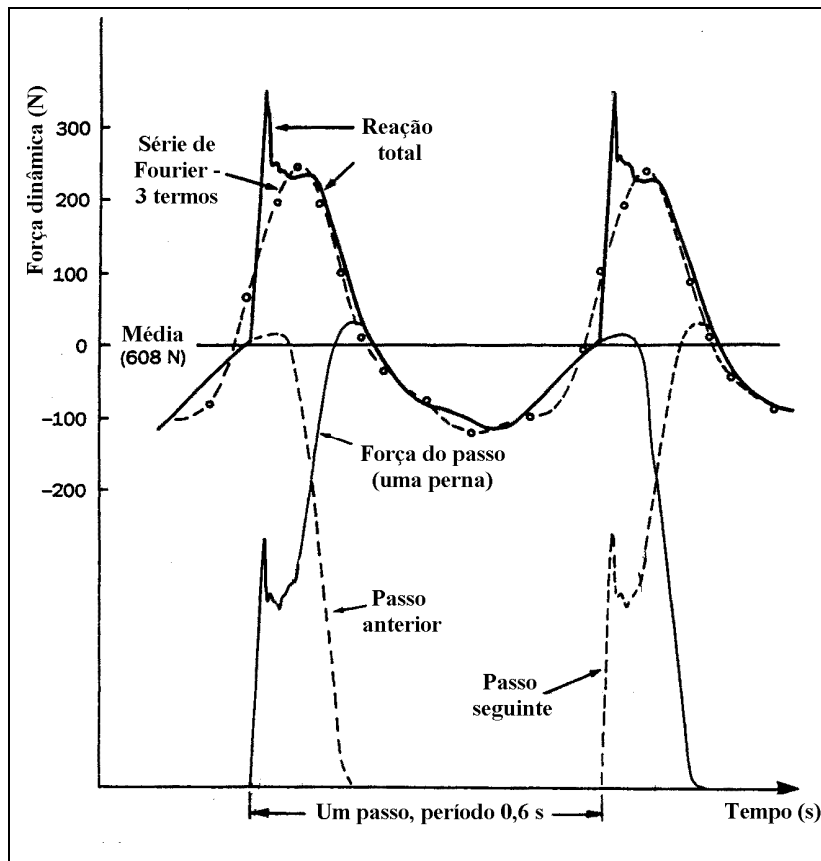


Figura 1.20 – Força de contato do passo e reação do piso devido à caminhada [46]

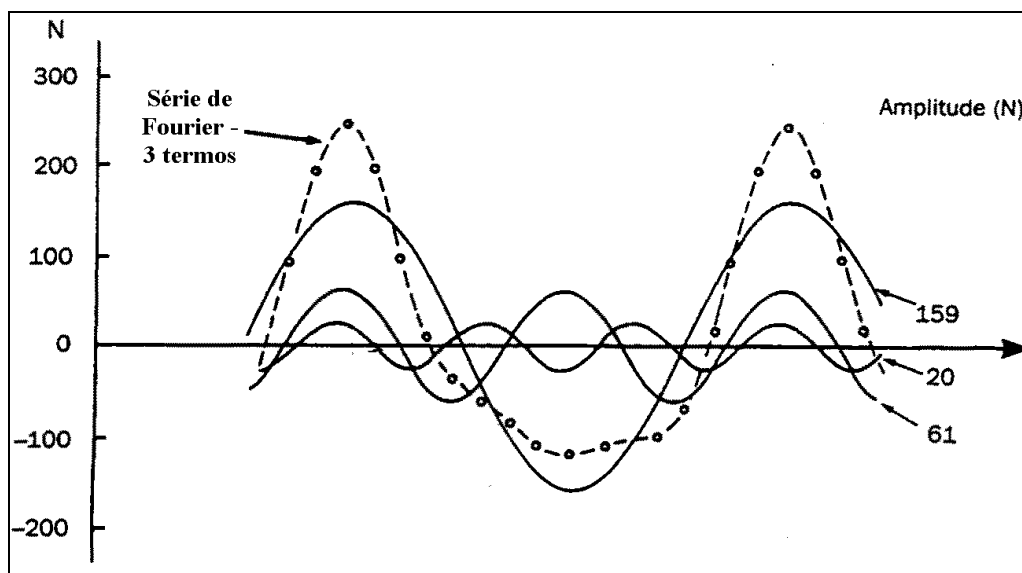


Figura 1.21 – Componentes da série de Fourier da função representativa da reação do piso [46]

O impacto do calcanhar foi medido por Naein [47], com base em testes realizados com uma pessoa de 77kg, que suportava seu peso na ponta dos pés

a uma altura de, aproximadamente, 6,35cm. Subtamente, ela lança seu peso sobre o piso, deixando seu calcanhar tocar o solo. Esse carregamento, considerado a maior fonte de excitação formada durante a caminhada, gera uma resposta transiente, ou seja, quando o sistema é excitado pela aplicação súbita de uma excitação. A Figura 1.22 demonstra a resposta em termos de aceleração no momento do impacto do calcanhar sobre o piso.

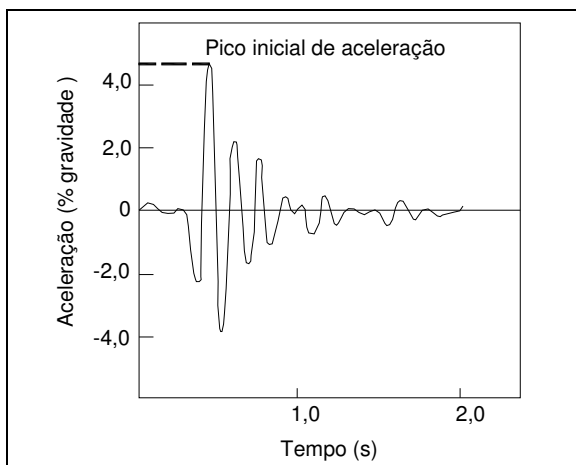


Figura 1.22 – Resposta do impacto do calcanhar no piso [47]

Em 1996, outro estudo desenvolvido por Ebrahimpur, Haman, Sack e Patten [48] apresentou uma plataforma de 14,2m de comprimento e de 2,0m de largura (Figura 1.23), a qual foi projetada para medir o registro de pessoas caminhando sozinhas e de grupos de duas e de quatro pessoas caminhando juntas.

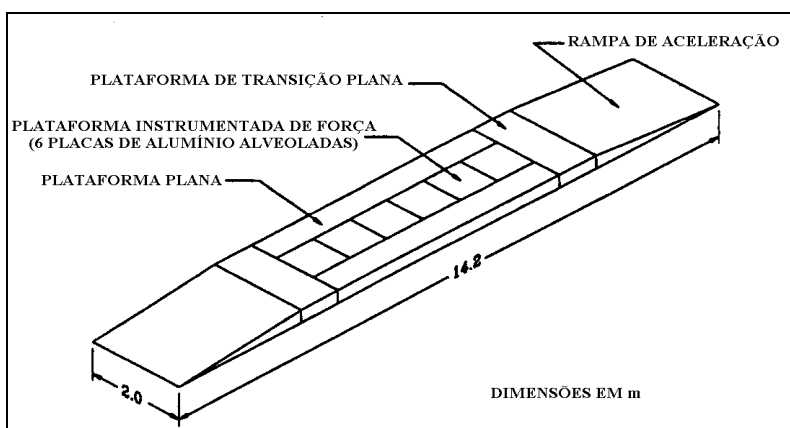


Figura 1.23 – Plataforma de força utilizada por Ebrahimpur, Sack e Patten [48]

No Brasil, em 1997, uma importante contribuição foi apresentada por Alves [49], que define, com base em resultados experimentais e em estudos realizados com um grupo de voluntários em uma plataforma rígida, as descrições aproximadas das cargas geradas pelas atividades humanas.

Em 2003, dando sequência ao trabalho de pesquisa de Alves [49], Faisca [50] descrevem em detalhes o carregamento dinâmico gerado por atividades humanas, tais como saltos com ou sem estímulo, ginástica aeróbica, torcidas de futebol e platéias de shows. Esses carregamentos foram obtidos por meio de testes experimentais com indivíduos que realizaram tais atividades em duas plataformas de concreto, uma rígida e a outra flexível, ambas sobre apoios móveis. Com esse apoio, pode-se variar a rigidez da estrutura, possibilitando, assim, o estudo do carregamento humano em estruturas rígidas e flexíveis. Para análise dos resultados experimentais e de ajustes de um modelo analítico, foram propostas funções de carregamento associadas às atividades com e sem sincronismo, permitindo que essas funções possam ser aplicadas em projetos de estruturas que contemplem grandes multidões.

Em 2004, Varela [51], baseado em relatórios técnicos que permitiram registrar a reação total do piso gerada durante uma caminhada sobre plataformas rígidas, propôs uma equação matemática que pudesse representar a magnitude dessa reação. A metodologia desenvolvida por Varela [51] permitiu progredir nas estratégias de modelagem da carga humana gerada durante a caminhada. A sua representação matemática era acompanhada de um fator importante e geralmente ignorado nas estratégias de modelagem de cargas humanas. Nesse modelo matemático considera-se o pico transiente representativo do impacto do calcanhar sobre o piso, o qual gera respostas bem significativas em termos de análise dinâmica.

Em 2005, Mello [52], com base na formulação matemática proposta por Varela [51], avaliou o comportamento dinâmico de sistemas de pisos mistos (aço-concreto) a partir de um modelo numérico desenvolvido segundo as características geométricas de um piso estrutural investigado no Guia de Vibrações para Pisos (*Floor Vibrations Due To Human Activities* – AISC) [53]. A partir do modelo numérico calibrado, investigações na resposta dinâmica de pisos foram realizadas a partir da influência de parâmetros como, por exemplo, variação do vão de vigas secundárias, variação do amortecimento, variação da espessura da laje e variação da rigidez da ligação viga-coluna. As respostas dinâmicas foram então, confrontadas com os limites impostos por guias de

projeto, e algumas medidas para a minimização dos efeitos de vibração foram apresentadas.

Em 2006, Loose [54] investigou o comportamento dinâmico de sistemas estruturais de pisos, quando submetidos a excitações dinâmicas oriundas de atividades humanas rítmicas. Para isso, foram realizadas análises numéricas em sistemas mistos idealizados em aço e concreto, submetendo-os a excitações dinâmicas decorrentes de atividades rítmicas, tais como a ginástica aeróbica e saltos à vontade. Foram também propostas duas metodologias diferentes para a modelagem dos carregamentos, representadas matematicamente por diferentes funções e parâmetros. A partir das duas metodologias, foi realizada a variação do número de pessoas sobre a estrutura. As respostas dinâmicas foram obtidas em termos de deslocamentos e acelerações.

## 1.2

### **Objetivos e motivação**

As estruturas mistas (aço-concreto) têm sido bastante utilizadas na prática corrente de projeto, especialmente no que tange à solução estrutural que considera a interação total entre o aço e o concreto. Contudo, quando o comportamento dinâmico de estruturas mistas é investigado, mediante a consideração da interação parcial entre os materiais aço e concreto, inexistente, na literatura técnica disponível sobre o assunto, pesquisas que investiguem esse tema.

Assim, esta tese apresenta como objetivo principal o estudo do comportamento dinâmico de sistemas estruturais de pisos mistos (aço-concreto), a partir de análises de conforto humano. Uma contribuição relevante e inédita deste estudo diz respeito à modelagem numérica desse comportamento, enfatizando a interação parcial existente entre as vigas de aço e as lajes de concreto. Deve destacar-se que a interação total entre esses dois elementos estruturais também é considerada ao longo da investigação. Os modelos numérico-computacionais desenvolvidos ao longo deste trabalho consideram, ainda, o caráter semirrígido das ligações estruturais viga-viga.

A presente investigação é realizada mediante o emprego de técnicas usuais de discretização, por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), com a utilização do programa ANSYS [55]. A modelagem numérica considera as vigas de aço como simuladas por meio do uso de elementos finitos de viga tridimensionais, em que os efeitos de flexão e de torção são efetivamente considerados. A laje de concreto é simulada, inicialmente, com base em

elementos de casca. Já em outro modelo numérico mais refinado, a laje é simulada por meio de elementos sólidos. Os conectores de cisalhamento e as ligações viga-coluna semirrígidas são modelados por meio de elementos de mola não lineares, em que são consideradas, respectivamente, as curvas experimentais de carga *versus* deslizamento, assim como momento *versus* rotação.

A metodologia de análise desenvolvida considera as ações dinâmicas provenientes do caminhar das pessoas e aquelas referentes a atividades humanas rítmicas. Os modelos matemáticos representativos das ações dinâmicas humanas são respaldados por testes experimentais.

Com o objetivo de avaliar os limites de vibração toleráveis em termos de conforto humano, a resposta dinâmica não linear dos modelos estruturais dos pisos mistos (aço-concreto) investigados é estudada a partir dos valores das acelerações (acelerações de pico e rms – root mean square) encontradas. Os valores das acelerações são comparados com os limites propostos por normas e recomendações de projeto, de modo a fornecer subsídios para os projetistas de estruturas.

### 1.3

#### **Escopo do trabalho**

Com o intuito de atender aos objetivos e à metodologia descritos anteriormente, este trabalho está subdividido em dez capítulos.

O Capítulo 1 trata de uma breve revisão bibliográfica sobre assuntos referentes a sistemas mistos, ortotropia, cargas dinâmicas e ligações semirrígidas. Aborda-se, também, a influência das novas concepções estruturais no agravamento do problema das vibrações em pisos decorrentes de atividades humanas. São apresentados os procedimentos utilizados na tentativa de assimilar o carregamento humano gerado durante a caminhada, bem como são apontadas algumas alternativas obtidas por meio de modelagens computacionais, com o intuito de obter respostas dinâmicas estruturais e avaliação do comportamento dinâmico dos pisos. Por fim, são apresentados a motivação e os objetivos da pesquisa.

No Capítulo 2, apresentam-se os aspectos relevantes para o dimensionamento de estruturas mistas, em especial, os pisos mistos aço-concreto. O comportamento de sistemas mistos na interação parcial e/ou total, as forças que se desenvolvem na interface laje-viga e o comportamento dos conectores de cisalhamento são os principais objetivos deste capítulo.

No Capítulo 3, 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. Essas recomendações são detalhadas a fim de apresentar os processos de análise utilizados para avaliar, reduzir e controlar o problema das vibrações em pisos. Por derradeiro, apresentam-se vários códigos de projeto para minimizar os efeitos das vibrações indesejáveis.

No Capítulo 4, são demonstradas as equações utilizadas para representar os modelos de carregamentos idealizados nesta tese, que procuram simular o carregamento humano gerado durante a caminhada e a realização de atividades rítmicas. Os modelos de carregamento são descritos segundo a metodologia de aplicação sobre os painéis de piso e a respectiva modelagem matemática.

O Capítulo 5 descreve os modelos estruturais utilizados nesta tese. 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, descreve-se a estratégia utilizada para desenvolvimento dos modelos numéricos computacionais desenvolvidos por meio do método dos elementos finitos. São também apresentados 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/ou 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. Os valores obtidos numericamente são comparados com resultados experimentais obtidos por Oliveira [38] e Chapman e Balakrishnan [6].

No capítulo 8, realiza-se análises de vibração forçada tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência utilizando as metodologias de carregamento apresentadas no capítulo 4. O comportamento dos pisos é avaliado ao longo das análises, mediante a realização de uma análise paramétrica, tal como: variação da quantidade de pessoas caminhando sobre pisos mistos; variação de parâmetros inerentes ao caminhar humano, como o coeficiente de impacto do calcanhar. Ao final, os resultados das duas

metodologias de carregamento são comparados e confrontados com a literatura técnica disponível quanto aos critérios de conforto humano.

No capítulo 9, realiza-se análises de vibração forçada tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência. 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; variação de parâmetros inerentes ao carregamento rítmico, como o coeficiente de defasagem entre as pessoas, período de contato e coeficiente de impacto.

No Capítulo 10 são apresentadas as conclusões obtidas ao longo deste trabalho, buscando-se fornecer informações que possam sugerir a reavaliação de recomendações e premissas de projeto. Serão apresentadas, ainda, algumas sugestões para futuros trabalhos nessa linha de pesquisa.