

Márcio Santos Gonçalves

**Lajes de Escritórios: Revisão dos Atuais Critérios de
Projeto Contra Vibrações Excessivas Devido a
Movimentação de Pessoas**

**João Pessoa - PB, Brasil
Fevereiro de 2015**

Márcio Santos Gonçalves

**Lajes de Escritórios: Revisão dos Atuais Critérios de
Projeto Contra Vibrações Excessivas Devido a
Movimentação de Pessoas**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como pré-requisito para obtenção de grau de
bacharel em engenharia civil.

Universidade Federal da Paraíba – UFPB
Centro de Tecnologia – CT
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – DECA
Graduação em Engenharia Civil

Orientador: Roberto Leal Pimentel

João Pessoa - PB, Brasil

Fevereiro de 2015

G635I

Gonçalves, Márcio Santos

Lajes de escritórios: revisão dos atuais critérios de projeto contra vibrações excessivas devido a movimentação de pessoas./ Márcio Santos Gonçalves - João Pessoa, 2015.

69f. il.:

Orientador: Prof. PhD. Roberto Leal Pimentel

Monografia (Graduação em Engenharia Civil) / Centro de Tecnologia / Campus I / Universidade Federal da Paraíba - UFPB.

1. Lajes 2. Estados Limites de Serviço a Vibrações 3. Layout de Escritórios 4. Monitoramento de Pessoas 5. Modelagem Computacional I. Título.

BS/UFPB

CDU: 624.072.2 (043)

Aos meus pais.

Agradecimentos

Sinto-me grato pelo constante apoio de minha família, pela atenciosa orientação do professor Roberto Leal Pimentel, pela disponibilidade da banca examinadora para avaliar este trabalho e pelas oportunidades educacionais concedidas pelo governo do Brasil.

*“A mente que se abre a uma
nova ideia jamais voltará ao
seu tamanho original.”
(Albert Einstein)*

RESUMO

Os estados limites de serviço de lajes em face de vibrações mecânicas têm sido extensivamente estudados por décadas. Isso se deve ao fato de que estruturas mecânicas da engenharia civil (lajes, especialmente) estão sendo projetadas com dimensões cada vez menores ou empregando materiais de baixa densidade. Como resultado, a probabilidade de edifícios estarem mais expostos a efeitos de vibrações excessivas é significativa. Por outro lado, diretrizes correntes, nacionais e internacionais, apresentam modelos muito simplificados/conservativos para prever o comportamento dinâmico de lajes – as funções matemáticas que descrevem a excitação dessas estruturas consideram, até o momento, apenas um único indivíduo em caminhada ao longo da laje (o que não parece ser realístico). Muitas vezes, tais procedimentos de modelagem computacional (desenvolvidas para um único caminhante sobre a estrutura), na fase de projeto, não são representativos em relação às cargas dinâmicas cotidianamente aplicadas em lajes de escritórios. Dado este cenário, este trabalho apresenta uma revisão sobre os estados limites de serviço das principais diretrizes para projeto estrutural de lajes de escritórios submetidas a cargas dinâmicas provenientes da movimentação de pessoas. Procedimentos para o projeto estrutural de lajes também são apresentados enfatizando-se a relação entre o layout de um escritório e sua relação com os padrões de caminhada de pessoas. Além disso, tecnologias para monitoramento da movimentação de pessoas são comparativamente discutidas. Ainda, alguns inconvenientes das atuais diretrizes são destacados. Finalmente, recomendações são propostas de modo a tornar as atuais normas mais eficientes, oferecendo a pesquisadores e projetistas padrões fidedignos de avaliação de projeto.

Palavras-chaves: Vibrações, Lajes, Estados Limites de Serviço, Layout de Escritórios, Monitoramento de Pessoas, Modelagem Computacional.

ABSTRACT

Vibration serviceability of slabs has been extensively studied for decades. This is due to the fact that civil engineering structures (slabs, specially) are being progressively designed and built with slender dimensions or being composed of low-density construction materials. As a result, the likelihood of buildings to be exposed to excessive vibration effects is significant. On the other hand, current national and international codes and guidelines present too simplified/conservative models for previewing the dynamic behaviour of floors _ mathematical functions (that describe the excitation of such structures) consider, up to date, a single walking individual along the slab span (which seems not to be realistic). Frequently, such computational modeling procedures (developed for representing a single walker onto the structure), in design phase, are not representative for office in-service conditions, in terms of dynamic loading. Given this scenario, this paper presents a literature review on principal standards on vibration serviceability of office floors under human-induced loads due to walkers' movements. Procedures on structural design of office floors are presented as to explore the relation between furniture arrangement and people walking patterns. Human tracking technologies that can be employed to identify such walking patterns are also comparatively discussed. Moreover, guideline drawbacks are pointed out and comparatively discussed. Finally, recommendations are proposed in order to turn current guidelines into more efficient standards, providing reliable parameters of evaluation of designs for both researchers and designers.

Key-Words: Vibrations, Slabs, Service limit states, Office design, Human tracking, Computational Modeling.

Lista de Ilustrações

Figura 1. Fluxograma para descrever a escolha de rotas por pedestres.	24
Figura 2. Planta baixa do térreo de uma empresa de construção civil, localizada em Londres, Inglaterra. À direita, a área de circulação (corredores) de um escritório é destacada.	25
Figura 3. Esquema do layout com complexa distribuição de trajetórias.	25
Figura 4. Projeto arquitetônico de um escritório de pequeno porte com área aberta para circulação de pessoas.	26
Figura 5. Padrões de trajetória de uma pessoa monitorada num escritório: identificação das salas (esquerda) e, trajetórias realizadas num expediente (direita).	27
Figura 6. Vista do local do qual o conjunto de dados foi obtido (esquerda); Conjunto de todas as trajetórias (sobrepostas) obtidas nas observações (centro); Classificação das trajetórias em cores (direita).	28
Figura 7. Visão geral sobre o papel da simulação na otimização de projetos arquitetônicos. .	29
Figura 8. Representação das três perspectivas de modelagem de pedestres: macroscópica (esquerda), mesoscópica (meio) e microscópica (direita).	30
Figura 9. Detalhamento do algoritmo de detecção de pessoas e posterior identificação de atividades destas do sistema visual utilizado.	36
Figura 10. Localização de indivíduos e estimativa de percursos a serem realizados.	36
Figura 11. Visualização da edificação estudada: visão tridimensional (à esquerda) e planta baixa (à direita).	38
Figura 12. Componentes usados nos sistemas RFID.	39
Figura 13. Labirinto projetado para aplicação do sistema WLAN.	40
Figura 14. Transmissor do sistema GPS indoor (a); Processo de triangulação (b).	42
Figura 15. Funções de forças da movimentação de um indivíduo: para dois passos (a); Pessoa caminhando ao longo de uma plataforma instrumentada com 3 metros de comprimento (b). .	50
Figura 16. À esquerda, gráficos sobrepostos de cargas de passos para diferentes frequências de passos (a); à direita, modelo de função que descreve uma caminhada (b).	51
Figura 17. Relação entre fator de acumulação da ressonância e comprimento da trajetória de uma caminhada.	56
Figura 18. Configurações de trajetórias em layouts de escritórios: (a) escritório com espaços abertos para circulação; presença de corredores entre áreas de trabalho (b).	61

Lista de Tabelas

Tabela 1. Alguns softwares comerciais disponíveis para simulação de pedestres.	31
Tabela 2. Comparação entre alguns sistemas de monitoramento.	42
Tabela 3. Comportamento dinâmico de acordo com dimensões de lajes.	47
Tabela 4. Parâmetros de projeto para cargas dinâmicas atuantes sobre uma estrutura.	49
Tabela 5. Coeficientes K de acordo com a frequência de passos numa caminhada (fs).	51
Tabela 6. Intervalo de frequência e fatores de carregamento dinâmico para cada harmônico.	53
Tabela 7. Valores recomendados para parâmetros da Equação 7. Os limites do fator de aceleração também são mostrados.	54
Tabela 8. Coeficientes de amortecimento para tipos distintos de lajes.	55
Tabela 9. Frequências críticas de acordo com o uso de uma laje.	58

Sumário

1. Introdução.....	19
1.1. Conceitos preliminares	19
1.2. Objetivos do trabalho.....	20
1.3. Organização do trabalho	20
2. Movimentação de pessoas em escritórios.....	23
2.1. Comportamento de pedestres em três níveis	23
2.2. Tipos de Layouts.....	24
2.3. Padrões de trajetória de indivíduos e de grupos de pessoas.....	26
2.4. Simulação de Movimentos de Usuários.....	28
2.4.1. Abordagens de modelagem: microscópica, macroscópica e mesoscópica	29
2.4.2. Softwares disponíveis para simulação de pedestres	31
3. Sistemas de monitoramento de pessoas em escritórios	33
3.1. Técnicas: manual, automática e semiautomática.....	33
3.1.1. Sistemas visuais.....	35
3.1.2. Sistemas com uso de marcadores	37
3.1.3. Unidades de monitoramento inerciais.....	37
3.1.4. Identificação por frequência de rádio	39
3.1.5. Sistema de monitoramento de usuários WLAN	40
3.1.6. Sistemas de Ultra Banda Larga (UWB).....	41
3.1.7. Sistemas de GPS (Global Positioning System) para ambientes internos (indoor)	41
3.1.8. Comparação e avaliação de sistemas de monitoramento	42
3.2. Desafios enfrentados na operação de sistemas de monitoramento.....	43
4. Projetos estruturais de lajes: estados limites de serviço a vibrações.....	45
4.1. Características gerais sobre estados limites de serviço a vibrações	46

4.2.	Lajes de alta e de baixa frequência	47
4.3.	Normas para projeto estrutural de lajes.....	48
4.3.1.	International Organization for Standardization (ISO)	48
4.3.2.	Human-Induced Vibrations of Steel Structures (HIVOSS)	50
4.3.3.	Institutos Americano e Canadense de Construção em Aço	52
4.3.4.	Instituto de Construção em Aço	54
4.3.5.	Sociedade do Concreto do Reino Unido	57
4.3.6.	Normas Britânicas	57
4.3.7.	Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)	58
4.3.8.	Outras Diretrizes	58
5.	Discussão sobre normas atuais.....	61
6.	Conclusões.....	65
	Referências	67

1. Introdução

1.1. Conceitos preliminares

O crescimento econômico gerou grande influência na elaboração de projetos de desenvolvimento urbano compatíveis com sua posterior utilização, principalmente no tocante à execução de atividades cotidianas em espaços fechados (ambientes de trabalho, especialmente), considerando a segurança e o conforto dos ocupantes destes espaços. Vale salientar que o bem estar das pessoas em ambientes de trabalho também abrangem aspectos ligados à saúde (conforto, ergonomia) e à arquitetura (adequação do ambiente ao usuário), resultando no contínuo aperfeiçoamento das normas de projetos de engenharia.

A estrutura de uma laje está geralmente submetida a carregamentos dinâmicos ao longo de sua vida útil. Nesse contexto, forças dinâmicas induzidas por pessoas são comumente aplicadas a lajes de prédios comerciais e residenciais. Para BLOOMFIELD (1990), tem existido um aumento significativo de investigações sobre problemas em dois tipos de lajes: as lajes que são destinadas ao acesso público em centros comerciais (shopping centers, por exemplo) e aquelas em ambientes de trabalho fechados (ex.: escritórios). Aqui, dar-se-á ênfase ao último grupo de lajes, tratando-se especificamente de escritórios.

As cargas dinâmicas devidas ao trânsito de pessoas podem ser classificadas em duas categorias: cargas *in situ* e em movimento. Tanto movimentos aleatórios quanto movimentos verticais abruptos (situação em que uma pessoa ficar de pé, repentinamente) são exemplos de cargas dinâmicas *in situ*.

Ao longo dos anos, os projetos de edificações têm assumido características específicas. Esta mudança é devida ao surgimento de critérios voltados à busca de melhores custos-benefícios na etapa de execução dessas estruturas, à eficiência e à produtividade. Por exemplo, sistemas estruturais de lajes têm sido fabricados com concreto de baixa densidade média, que é aproximadamente tão resistente quanto concretos de densidade normal, no que concerne à capacidade resistente à compressão axial.

De acordo com o Instituto do Xisto, Argila e Ardósia Expandida (Expanded Shale, Clay & Slate Institute – ESCSI, em inglês), o emprego de materiais de menor massa específica em elementos estruturais é uma tendência dos projetos estruturais contemporâneos e, considerando o fato de que vãos mais longos são comumente encontrados em edificações

da atualidade, tem-se uma combinação de fatores que resulta em recorrentes situações de vibrações excessivas em lajes (ESCSI, 2003). Dentre muitos efeitos negativos de vibrações excessivas, a sensação de incômodo (ou até de insegurança) dos usuários de uma edificação é notável. Uma consequência disso é a perda de produtividade em ambientes de trabalho. Um dos obstáculos sobre o aperfeiçoamento de critérios contra vibrações excessivas é a insuficiência de conhecimento sobre a movimentação de pessoas (no tempo e no espaço) em lajes de escritórios.

Nesse contexto, este trabalho apresenta uma revisão do estado da arte sobre diversos estudos sobre modelagem computacional de pessoas em lajes de ambientes fechados e as correntes considerações das normas sobre a movimentação de pessoas (com seus potenciais problemas de representação de situações reais). Além disso, é realizada uma análise comparativa sobre tecnologias de monitoramento – enquanto ferramentas indispensáveis para a obtenção de dados reais sobre os movimentos de pessoas em ambientes fechados – bem como características sobre a interação do layout do ambiente com as trajetórias performadas por indivíduos.

1.2. Objetivos do trabalho

Este trabalho de revisão possui dois objetivos principais, a saber:

- Análise dos critérios para os estados limites de serviço em face de vibrações excessivas em lajes de escritórios, indicando potenciais deficiências destas diretrizes;
- Ressaltar a importância dos sistemas de monitoramento e de simulação computacional na elaboração dos referidos critérios.

1.3. Organização do trabalho

O presente trabalho foi dividido em quatro Seções principais, de modo a fornecer subsídio à investigação deste tema.

O Capítulo 2 deste trabalho trata sobre aspectos relacionados à movimentação das pessoas em escritórios. Primeiramente, são discutidas as características do comportamento das pessoas em relação à ação de caminhar. Em segundo lugar, é mostrada a importância da

obtenção de dados experimentais sobre a movimentação de pessoas para traçar padrões de trajetória de indivíduos, em menor ou maior número, bem como são demonstrados resultados de estudos anteriores sobre este tema. Posteriormente, a modelagem computacional dos movimentos de pessoas em escritórios é introduzida como uma etapa subsequente à obtenção de dados, de modo a utilizar estes dados para simular indivíduos em locomoção sobre lajes. Diferentes abordagens para modelagem computacional são listadas e os principais softwares comerciais afins disponíveis são indicados.

No capítulo 3, maior detalhamento é dado à obtenção de dados experimentais sobre a movimentação de pessoas, brevemente mencionada no Capítulo 2. Técnicas distintas de monitoramento são apresentadas, identificando-se, na sequência, os principais sistemas de monitoramento de pessoas. Finalmente, esses sistemas são cotejados levando-se em consideração fatores como *custo*, *adequação ao ambiente de estudo*, *precisão*, dentre outros.

Sob os esclarecimentos realizados sobre a movimentação de pessoas, os métodos disponíveis para captura de dados sobre locomoção e as ferramentas disponíveis para simulação computacional desta, o Capítulo 4 dá sequência a esse estudo apresentando as considerações feitas pelas principais normas na elaboração dos critérios de projeto para os estados limites de serviço a vibrações, devido à movimentação de pessoas em lajes (já discutida nos Capítulos 2 e 3).

No Capítulo 5, uma discussão sobre os inconvenientes presentes em normas anteriormente citadas são indicados, sugerindo-se modificações apropriadas para futuras atualizações daquelas ou elaboração de novas diretrizes. Posteriormente, no Capítulo 6, são feitas conclusões gerais sobre as principais impressões desta revisão bibliográfica.

2. Movimentação de pessoas em escritórios

Em FUKUTE *et al.* (2013), é reconhecido que a coleta de dados sobre o fluxo de pessoas é indispensável em diversas áreas de estudo, tais como análises do comportamento de clientes de uma empresa, finalidades relativas à área de publicidade e estudos sobre eficiência operacional. Portanto, este capítulo objetiva dar mais ênfase aos padrões de caminhada às trajetórias realizadas pelos ocupantes de um ambiente de trabalho fechado, enquanto característica intrínseca ao comportamento das pessoas, mas condicionada pelas características do ambiente no qual se deslocam. Os efeitos dos movimentos das pessoas em escritórios também são apresentados e relacionados à determinação de cargas de projeto.

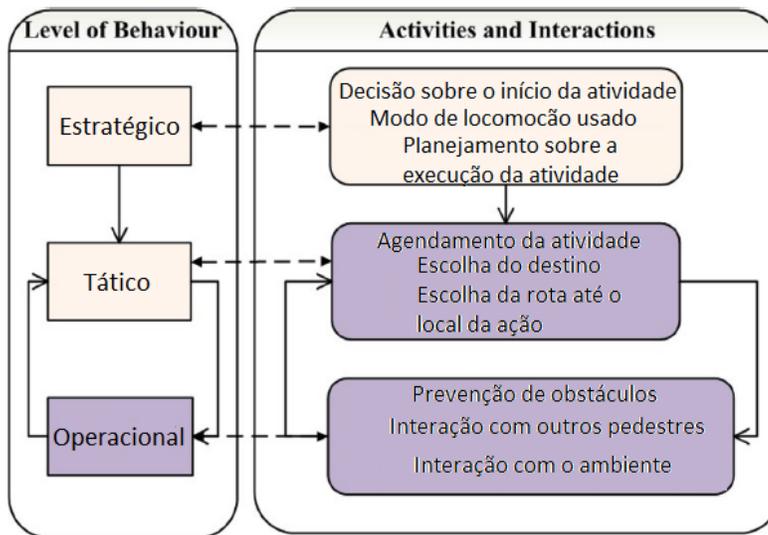
2.1. Comportamento de pedestres em três níveis

Tratando-se de comportamento individual e social em espaços fechados, as teorias sobre o comportamento de pedestres afirmam que as escolhas das pessoas - enquanto caminham ao longo de uma rota - são baseadas em três níveis: estratégico, tático e operacional (HOOGENDOORN *et al.*, 2002):

- Nível Estratégico: trata das escolhas a serem feitas antes que um indivíduo execute uma atividade. Isso inclui decisões sobre o padrão de atividade que é executado no ambiente de trabalho;
- Nível Tático: está principalmente relacionado ao modo no qual as atividades são realizadas (envolvendo cronogramas, escolha do local da atividade e as escolhas de rotas para alcançá-las);
- Nível Operacional: é o comportamento de uma pessoa (propriamente dito) durante uma atividade (exemplo: ato de caminhar).

A Figura 1 apresenta um fluxograma no qual a cor bege significa decisões tomadas antes da movimentação de um indivíduo, enquanto que a cor roxa representa ações tomadas durante a locomoção da pessoa.

Figura 1. Fluxograma para descrever a escolha de rotas por pedestres.



Fonte: Adaptado de HOOGENDOORN *et al.* (2002) e NASIR *et al.* (2014).

2.2. Tipos de Layouts

Uma vez discutido o processo de decisões e ações que ocorrem antes e durante a movimentação de pessoas, se faz necessário caracterizar o ambiente no qual esses movimentos ocorrem: os escritórios. Isso pode ser justificado pelo fato do layout de um escritório possuir considerável influência na maneira como as pessoas se deslocam nesses ambientes.

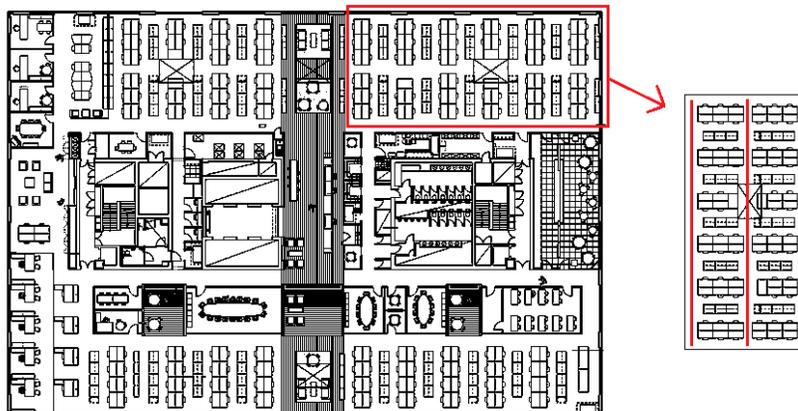
Nesse contexto, em estudos futuros, será possível estabelecer uma situação de estudo crítica selecionada a partir de um conjunto de combinações de *trajetórias de pessoas e modos de vibração*. Em mais detalhes, essa situação crítica seria o pior caso de ocorrência de deslocamentos modais excessivos, num determinado ambiente, para trajetórias específicas de caminhantes. Uma vez que haja um aperfeiçoamento dos atuais estados limites de serviço em face de vibrações, a partir desta situação crítica, as normas (já aperfeiçoadas) poderão ser suficientemente aplicadas às demais situações de projeto.

Portanto, essa Subseção é dedicada à apresentação e descrição de alguns layouts recorrentes em escritórios.

- Modelo de layout 1: neste modelo, pode ser visto que a área de circulação de pessoas consiste de três corredores principais, localizados nas laterais do ambiente,

para acesso aos postos de trabalho (Figura 16). Em termos estruturais, esta disposição de corredores implica numa distribuição de cargas dinâmicas próxima aos apoios da estrutura.

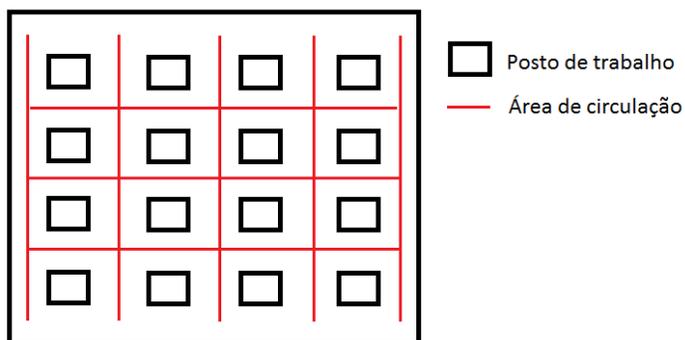
Figura 2. Planta baixa do térreo de uma empresa de construção civil, localizada em Londres, Inglaterra. À direita, a área de circulação (corredores) de um escritório é destacada.



Fonte: Adaptado de LITTLEFIELD, 2009.

- Modelo de layout 2: para este modelo de layout, a área de trânsito de pessoas assume a forma similar a uma rede de caminhos que se ligados uns aos outros. Dessa maneira, as trajetórias realizadas pelas pessoas é mais complexa. A Figura 17 apresenta um esquema de tal layout.

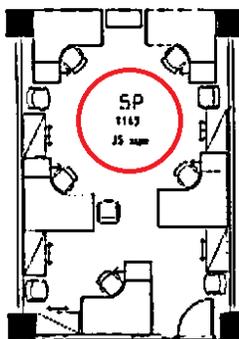
Figura 3. Esquema do layout com complexa distribuição de trajetórias.



Fonte: Autoria própria.

- Modelo de layout 3: de modo contrário ao modelo 1 tipo de layout apresentado, este tipo de ambiente possui uma área aberta para circulação de pessoas. Trata-se de um escritório destinado a comportar até cinco pessoas (Figura 18).

Figura 4. Projeto arquitetônico de um escritório de pequeno porte com área aberta para circulação de pessoas.



Fonte: SMG, 2006.

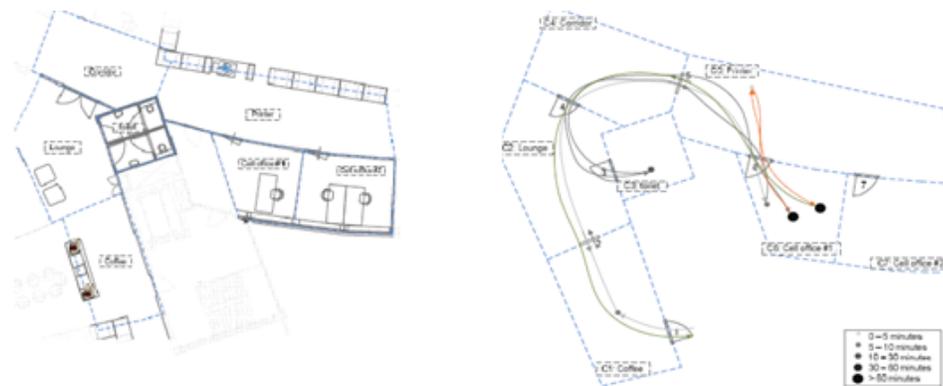
2.3. Padrões de trajetória de indivíduos e de grupos de pessoas

Como uma etapa subsequente à análise do comportamento anterior à locomoção e durante a movimentação, vários estudos (HOOGENDOORN *et al.*, 2002; ANTONINI *et al.*, 2006; SEER *et al.*, 2014) investigaram características de padrões de trajetórias através do emprego de simulações computacionais.

De acordo com um estudo sobre a detecção de anomalias nas trajetórias de caminhada de indivíduos (CALDERARA *et al.*, 2011), através de sistema de monitoramento de pessoas, foi enfatizado que modelos para identificação de trajetórias anormais e medição de similaridade entre trajetórias não estão disponíveis na literatura.

Outro exemplo de implementação de tecnologia de monitoramento é o estudo de caso experimental, no qual ZEILER *et al.* (2014) monitorou os movimentos de ocupantes de um dos andares numa edificação, durante seis semanas. Os resultados do estudo mostraram que é possível localizar a posição do usuário da edificação, embora representem parcialmente o perfil de ocupação do ambiente estudado.

Figura 5. Padrões de trajetória de uma pessoa monitorada num escritório: identificação das salas (esquerda) e, trajetórias realizadas num expediente (direita).



Fonte: ZEILER *et al.*, 2014.

Uma técnica diferente monitoramento de pessoas é explorada por FUKUTE *et al.* (2013). O método consiste na visualização simultânea de trajetórias e fluxo temporal de pessoas, compreendendo basicamente três etapas: agrupamento e visualização de trajetórias, agregação de trajetórias e visualização de sua quantidade.

Na prática, o estudo de FUKUTE *et al.* (2013) analisou um conjunto de dados sobre o fluxo de pessoas nas instalações de um edifício comercial, num local aberto e próximo a duas escadas rolantes, em Tóquio (Japão). Para intervalos de tempo distintos (de um simples dia ao intervalo de vários meses), trajetórias foram observadas. Então, padrões dessas trajetórias foram reconhecidos e classificados em grupos maiores (denotados por cores, na Figura 17). Portanto, padrões principais de movimentos de pedestres podem ser claramente analisados. Além disso, uma variação temporal da quantidade de pessoas nos fluxos foi observada, de modo que o aumento no número de pessoas em movimentação pôde ser visto.

Numa análise geral, FUKUTE *et al.* (2013) realizou dois tipos de análise (observação de trajetórias e quantidade de pessoas), de modo a permitir uma melhor análise do comportamento das pessoas. Assim, a tecnologia de monitoramento empregada poderia também ser aplicada dentro em ambientes fechados de modo a executar observações similares, oferecendo dados mais precisos sobre a caracterização de movimentos de pessoas. Esta técnica é diferente de outras já utilizadas em estudos prévios, tais como aqueles desenvolvidos por ANDRIENKO G. & ANDRIENKO N. (2008), YABUSHITA & ITOH (2011) e MCARDLE *et al.* (2011).

Figura 6. Vista do local do qual o conjunto de dados foi obtido (esquerda); Conjunto de todas as trajetórias (sobrepostas) obtidas nas observações (centro); Classificação das trajetórias em cores (direita).



Fonte: FUKUTE *et al.*, 2013.

2.4. Simulação de Movimentos de Usuários

Atualmente, existe uma variedade de técnicas para simulação de ocupação e movimentação de pessoas em espaços fechados. Geralmente, isso requer conjuntos de dados experimentais - não apenas com respeito à presença de pessoas em edificações, mas também monitoramento dos movimentos delas (identificação de trajetórias). Estas técnicas também são comumente relacionadas a pesquisas sobre eficiência energética em edificações. De acordo com MAHDAVI & TAHMASEBI (2014), modelos de simulação de ocupação são considerados de bom desempenho, se os resultados gerados por essas simulações estiverem em consonância com os dados reais obtidos de um prévio monitoramento. Dessa maneira, os dados resultantes do monitoramento de pessoas em escritórios funcionam como uma ferramenta de validação de modelos de simulação.

Modelos de simulação diferem entre si em relação aos métodos de simulação nos quais eles são baseados. Existem dois métodos principais de simulação: *probabilístico* e *não probabilístico*. Contribuições científicas têm sido realizadas para explorar as vantagens e limitações de cada método. Por exemplo, NEWSHAM *et al.* (1995) estudou a performance de um modelo estocástico para ocupação humana através do uso de um modelo probabilístico para prever perfis de iluminação num escritório.

MAHDAVI & TAHMASEBI (2014) realizaram um estudo comparativo entre três modelos de ocupação: dois probabilísticos e outro não probabilístico. Seus desempenhos quanto à previsão de perfis de ocupação foram cotejados com dados provenientes de monitoramento. Ocorreu que todos os modelos apresentaram um nível mínimo de previsão (principalmente os modelos probabilísticos). Comparações envolvendo maiores conjuntos de

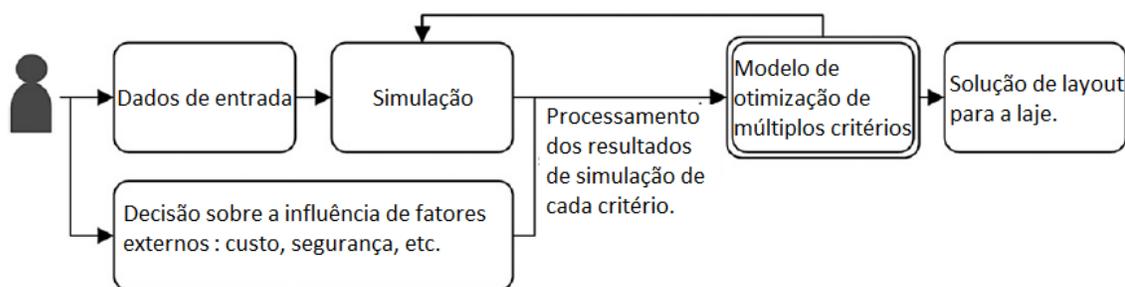
dados foram recomendadas pelos autores da pesquisa para avaliação do potencial de previsão destes modelos.

Este fato foi previamente explicado por MAHDAVI & TAHMASEBI (2014), sendo reconhecido que interações entre o comportamento de uma pessoas durante a atividade de caminhada e o ambiente construído são de difícil determinação por processos de simulação. Nesse contexto, dados do monitoramento em tempo real sobre o comportamento de transeuntes surgem como ferramenta necessária nessa situação.

2.4.1. Abordagens de modelagem: microscópica, macroscópica e mesoscópica

Numa macroanálise, a etapa de simulação da atividade de caminhada de uma pessoa tem um papel importante na otimização de lajes, uma vez que isso é uma ferramenta indispensável para avaliar se um projeto satisfaz determinadas características em situações reais (tais como eficiência no tempo de caminhada de pessoas em ambientes fechados). Também, a simulação oferece uma ponderação no processo avaliativo, permitindo a um projeto ser modificado de maneira mais eficiente (Figura 18).

Figura 7. Visão geral sobre o papel da simulação na otimização de projetos arquitetônicos.



Fonte: Adaptado de LEE *et al.*, 2012.

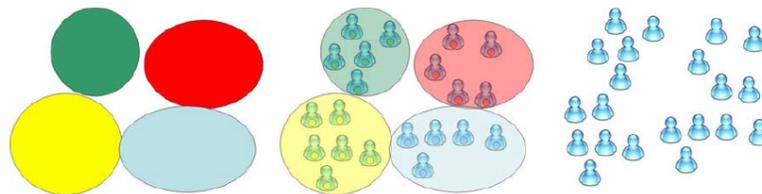
Em termos de representação de modelagem, o comportamento de pessoas durante a atividade de caminhada pode ser discutido em três perspectivas: Microscópica, Mesoscópica e Macroscópica (Figura 19).

- **Microscópica:** Esta abordagem é a mais realística, devido ao fato de descrever precisamente o movimento de indivíduos. Isso é obtido porque tal método foca no comportamento de cada ocupante, sendo, portanto, mais exato. Entretanto, essa

abordagem não é adequada para estudos que procuram obter uma visão geral do fluxo de pessoas. *Modelos baseados em agentes (agent-based models, em inglês)* pertencem à abordagem microscópica;

- Macroscópica: No trabalho de NASIR *et al.* (2014), a escala macroscópica de modelagem é definida como aquela que não leva em consideração interações específicas nas quais pedestres participam. Portanto, nesta perspectiva, o fluxo de pessoas parece ser um fluido em movimento;
- Mesoscópica: Métodos nos quais características de abordagens (micro e macroanálise) são consideradas juntas de maneira a alcançar modelos aptos a satisfazer uma necessidade específica de modelagem. ZHAN *et al.* (2008) explica que modelos mesoscópicos são aqueles que representam uma multidão como uma massa homogênea (abordagem macroscópica) tanto quanto as “forças internas” que geram movimentos de cada partícula dessa massa (i.e. pedestres).

Figura 8. Representação das três perspectivas de modelagem de pedestres: macroscópica (esquerda), mesoscópica (meio) e microscópica (direita).



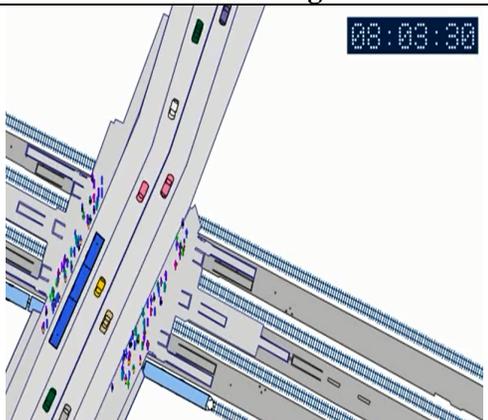
Fonte: ZHAN *et al.* 2008.

A modelagem microscópica é mais voltada ao uso em simulações de configurações heterogêneas de fluxo de ocupantes em edificações. Na medida em que a abordagem microscópica descreve o comportamento de participantes numa ação de locomoção, mais tempo de processamento computacional é demandado. Ainda, a computação de dados, nesse caso, requer um significativo período de tempo para ser completada. Em outras palavras, modelos macroscópicos podem satisfazer melhor parâmetros do fluxo de pessoas (tais como velocidade, densidade e fluxo), embora a modelagem macroscópica não seja altamente precisa (HOOGENDOORN *et al.*, 2014).

2.4.2. Softwares disponíveis para simulação de pedestres

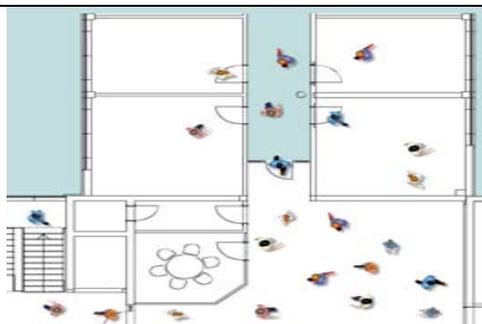
Há uma variedade de softwares para simulação de pedestres. De maneira geral, estes softwares objetivam realizar análises realísticas através das quais a previsão dos movimentos de pessoas possa ser executada num ambiente virtual, de modo que a eficiência, o conforto e a segurança das pessoas sejam aperfeiçoados em infraestruturas reais. Os principais programas computacionais disponíveis para este tipo de simulação são apresentados, como segue (Tabela 1):

Tabela 1. Alguns softwares comerciais disponíveis para simulação de pedestres.

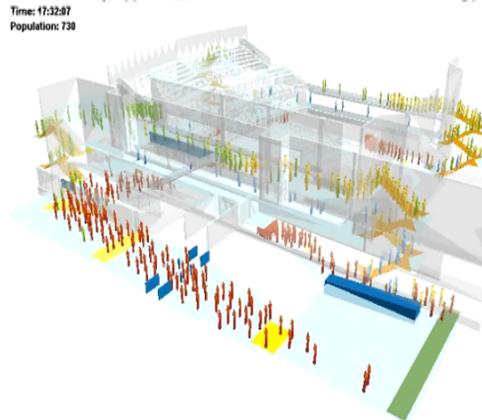
Software	Detalhamento	Interface do Programa
SimWalk	Trata-se de uma tecnologia de computador baseada na simulação de interações entre diferentes modais de transporte (análise intermodal). A ilustração mostra a presença de carros, ônibus, trens e passageiros num mesmo cenário. SimWalk é baseado na abordagem microscópica. Embora seja uma ferramenta de utilidade, parece ser mais adequada para análise da simulação de pedestres em ambientes abertos (por exemplo, estradas) do que em espaços fechados.	
PeTrack	PeTrack extrai dados experimentais automaticamente, baseando-se em imagens de câmera de vídeo. Somando dados do comportamento de vários pedestres, parâmetros adicionais podem ser obtidos (velocidade, densidade, distâncias, etc.).	
STEPS	STEPS é um software para simulação em 3D, através de abordagem microscópica que pode similar dinâmica de pedestres sob condições normais e em ocasiões de emergência. Em suma, o programa permite a simulação de pessoas se movendo, simulação de situações de evacuação, e análise de características de situações normais (exemplo: escolha de rotas pelos pedestres).	

VISWALK

Este software pode simular e analisar o comportamento tanto em public (exemplo: praças) quanto em espaços fechados (exemplo: escritórios). As principais características oferecidas pelo VISWALK são roteamento dinâmico, resultados analíticos, animações em 2D e 3D.

**Oasys
MassMotion**

Este software foi desenvolvido para simulação de pedestres e análise dos movimentos de multidões. Este programa pode reduzir o tempo de simulação de modo que milhares de pessoas possam ser representadas num intervalo de algumas horas. As principais características do programa são: representação de movimentação de pessoas em edificações com vários pavimentos, ferramentas eficientes para modelagem de multidões, compatibilidade de dados com dados CAD e 3D, ferramentas de estatística.



Fonte: Autoria própria.

3. Sistemas de monitoramento de pessoas em escritórios

Como discutido anteriormente, o monitoramento de pessoas em ambientes fechados (escritórios, especificamente) traz consigo muitas vantagens em termos de informações adicionais para a elaboração de critérios de estados limites de serviço a vibrações no projeto de lajes, de maneira a gerar projetos de estruturas que apresentem boas condições de serviço.

Conseqüentemente, isso pode resultar em economia financeira devido ao fato de surgirem construções mais inteligentes, evitando perda de valor comercial de edificações e prevenindo futura perda de produtividade em ambientes de trabalho devido a vibrações excessivas. Neste contexto, as tecnologias de monitoramento de movimentos surgem como ferramentas imprescindíveis que proporcionam a obtenção de dados experimentais *in loco*.

Em geral, decisões sobre o uso de um sistema de monitoramento em detrimento de outro devem ser baseadas em critérios técnicos (procedimento de calibração, nível de sensibilidade, relação custo-benefício, etc.), dentre outras questões logísticas (KHOURY & KAMAT, 2009).

3.1. Técnicas: manual, automática e semiautomática

A coleta de dados quantitativos é fundamental para construir modelos de pedestres. Além disso, a extração de informações atualizadas também é relevante na calibração de modelos computacionais.

Basicamente, dados do ambiente investigado podem ser extraídos por meio de três técnicas diferentes: manualmente, automaticamente e de maneira semiautomática. As principais características de cada maneira são explicadas em mais detalhes, como segue:

- Monitoramento manual:

Técnicas de monitoramento manual são primariamente baseadas na intervenção do usuário dessa técnica na identificação de uma pessoa (ou objeto monitorado). Em outras palavras, o operador deve inserir informações ou estabelecer parâmetros para

análise de dados, num dado momento. Por exemplo, em YIN *et al.* (1995), pedestres foram manualmente indicados através da análise de quadros de imagens de vídeo (ou *frames*, em inglês) com a finalidade de definir a densidade de pessoas numa multidão.

Com vistas a executar uma calibração de modelo computacional de simulação de pedestres, ANTONINI *et al.* (2006) extraiu dados referentes a movimentos reais de pedestres usando uma técnica de monitoramento manual em imagens de vídeo. Para cada intervalo de tempo de 0,3 segundo (no qual há 3 frames), um conjunto de coordenadas foi projetado do plano de imagem para o plano em que a atividade de caminhada ocorreu, definindo-se, dessa maneira, trajetórias correspondentes. Tal processo foi executado com o auxílio de uma câmera calibrada.

- Monitoramento automático:

As principais características dos movimentos de pedestres (como os locais do escritório no qual ocorrem e a velocidade dos transeuntes, por exemplo) também são automaticamente monitoradas por técnicas de computação visual. Tais técnicas não requerem a intervenção dos usuários na coleta e nem no processamento de dados. Isso significa que o sistema se mantém monitorando objetos sem a necessidade de informações adicionais de um operador.

- Monitoramento semiautomático:

Frequentemente, modelos de pedestres devem representar comportamentos relativos à interação do ser humano com as condições do ambiente (exemplo: o ato de evitar colisões com outras pessoas). Para este propósito, dados com alta precisão sobre os movimentos de pessoas, no ambiente estudado, se fazem necessários. Geralmente, tais dados são obtidos de imagens de vídeo gravadas através de verificação manual. Entretanto, esta técnica manual é um procedimento exaustivo; o operador que está obtendo dados pode não executar seu trabalho com eficiência (principalmente devido ao cansaço), o que afeta resultados futuros. Além disso, este fato representa uma limitação da qualidade e a quantidade de dados que podem ser extraídos.

Nesse contexto, métodos semiautomáticos emergem como ferramentas úteis que permitem o levantamento de dados, através da combinação de previsões

automáticas de posições e verificação manual (daí o carácter semiautomático do processo) (PLAUE *et al.*, 2011).

Segundo LABEODAN *et al.* (2013) principais critérios a serem considerados por projetistas para empregar sistemas de detecção são os seguintes:

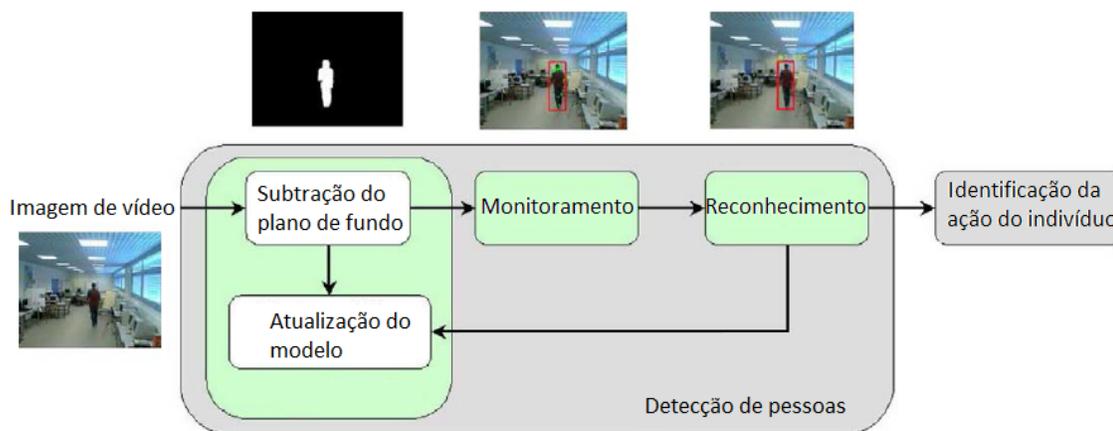
- Custo de implantação;
- Nível de precisão desejado;
- Quantidade necessária de recursos (hardware, software, etc.);
- Complexidade do processamento computacional envolvido;
- Privacidade das pessoas monitoradas;
- Tipo de ambiente investigado (espaço aberto ou fechado, por exemplo).

3.1.1. Sistemas visuais

No trabalho de BENEZETH *et al.* (2011), um sistema de monitoramento foi proposto com base em análise de vídeo. Imagens de pessoas em movimentação, incluindo caminhada, foram obtidas. Entretanto, elas foram interpretadas de modo a selecionar apenas informações úteis sobre o sistema de gestão da edificação. A identificação de objetos (leia-se pedestres) foi realizada por métodos estatísticos sem que suposições sejam realizadas sobre a natureza do que está sendo gravado.

Basicamente, o método proposto por BENEZETH *et al.* (2011) compreende três etapas: *sistema de detecção* através do uso de atualização do plano de fundo de uma imagem, *monitoramento de objetos em movimento* por meio da visualização de pontos de interesse e a *classificação de objetos* (mais detalhes na Figura 20).

Figura 9. Detalhamento do algoritmo de detecção de pessoas e posterior identificação de atividades destas do sistema visual utilizado.

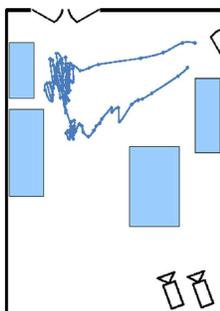


Fonte: Adaptado de LABEODAN *et al.*, 2013.

Acerca das ferramentas de monitoramento deste sistema, dois sensores podem ser combinados e instalados num mesmo local. Através deste algoritmo (Figura 20), as imagens são processadas e confrontadas. A correspondência entre as imagens das câmeras de vídeo (duas câmeras, como apresentadas na Figura 21) pode ser feita matematicamente através de matrizes que descrevem as imagens.

Consequentemente, a localização tridimensional pode ser executada como também a estimativa de percurso dos indivíduos observados. A taxa de detecção destes sensores, em muitos cenários, é de 97%. Erros residuais podem ocorrer quando pessoas não são detectadas, a configuração de não movimento (isto é, quando indivíduos permanecem estáticos) não é reconhecida ou acontecem falhas na etapa de comparação do plano de fundo com a imagem observada. Esta tecnologia também pode incluir monitoramento no espaço e no tempo de modo a tornar a coleta de dados mais precisa (BENEZETH *et al.*, 2011).

Figura 10. Localização de indivíduos e estimativa de percursos a serem realizados.



Fonte: BENEZETH *et al.*, 2011.

Em última análise, a maioria das tecnologias de sistemas visuais tem as principais desvantagens: questões de privacidade de pessoas monitoradas, custo e manutenção dos software/hardware e oclusões (obstáculos que impedem a visualização dos ambientes e que podem comprometer a precisão dos dados obtidos) (ZEILER *et al.*, 2013).

3.1.2. Sistemas com uso de marcadores

Alguns programas computacionais possuem ferramentas de medições baseadas no uso de marcadores. Marcadores são dispositivos que enviam sinais (eletromagnéticos, por exemplo) para outros aparelhos, sendo desenvolvidos para serem instalados no corpo do objeto (ou da pessoa) a ser monitorado (a). O número de marcadores a ser usado depende do sistema de captura de dados do software. Por exemplo, o sistema Codamotion pode ser usado com até 56 marcadores para monitorar um objeto, fato que apresenta uma vantagem outros sistemas (Codamotion Technologies' Manual, 2013).

3.1.3. Unidades de monitoramento inerciais

Outros sistemas de monitoramento de ocupação em edificações são considerados onipresentes uma vez que seus sensores de captura de movimento são instalados ao longo de todo o ambiente da laje. Esse tipo de monitoramento utiliza equipamento de menor custo (além disso, os mesmos são menos intrusivos – são instalados no ambiente em vez dos corpos das pessoas). É importante enfatizar que, embora estes sistemas sejam projetados para coleta de dados de ocupação de ambientes, existe uma dependência da observação dos movimentos dos ocupantes (BENEZETH *et al.*, 2011).

Por outro lado, sensores também podem ser instalados em partes do corpo das pessoas, de modo a enviar informações sobre localização para um processador central. Nesse contexto, surgem as chamadas Unidades de Monitoramento Inerciais (Inertial Measurement Movement Unit – IMU, em inglês). O sistema IMU é uma tecnologia com sensores designados ao monitoramento em tempo real. É composto por giroscópios e acelerômetros, que mantêm a detecção de movimentos translacionais e rotacionais de um objeto em movimento, nos seis graus de liberdade envolvidos (translações ao longo dos eixos cartesianos x, y e z rotações em torno destes eixos).

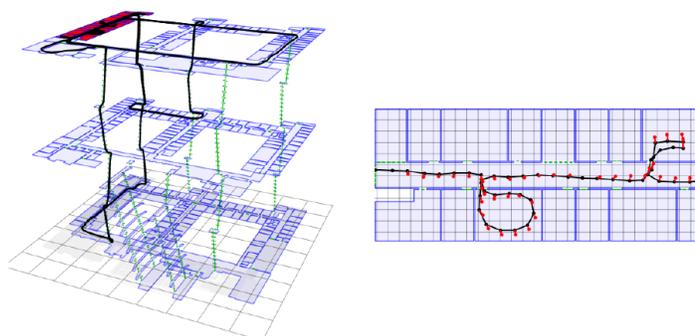
Tal tecnologia é aplicada em muitos sistemas de posicionamento (exemplo: sistemas de navegação para robôs móveis). De acordo com WOODMAN & HARLE (2008), a despeito do erro inerente na aquisição do posicionamento através do sistema IMU, os mesmos podem ser significativamente reduzidos a um nível razoável, mantendo a fidelidade e precisão dos dados nas fases de processamento.

No trabalho de WOODMAN & HARLE (2008), testes experimentais foram realizados para avaliação do sistema IMU. Novamente, sensores foram instalados no piso do ambiente e um modelo de edificação para detecção de pessoas num raio de 1 m foi utilizado (o modelo da edificação estudada é apresentado na Figura 21). Os resultados da pesquisa mostraram que o sistema apresenta erro aceitável na maior parte do intervalo de tempo dos testes. Os resultados experimentais também demonstraram que o sistema inercial IMU é adequado ao monitoramento em edificações (uso em construções de grandes dimensões, como uma alternativa de baixo custo).

Resultados de pesquisas recentes têm apresentado avanços nos sistemas de monitoramento para localização em ambientes fechados, pelo uso de sistemas IMU. Para ROBERTSON *et al.* (2009), estudos experimentais foram feitos usando sistemas de sensores IMU como uma tecnologia para posicionamento *indoor* (em ambiente fechado) em situações nas quais a planta baixa do ambiente não é conhecida. O objetivo desse estudo foi usar dados do monitoramento do movimento de pessoas, por meio de sensores IMU instalados nos seus calçados, para estimar automaticamente a configuração espacial da planta baixa do ambiente (Figura 22).

A representação de mapas probabilísticos bidimensionais foi utilizada. Os mapas resultantes, também podem ser combinados com outros, oferecendo recursos de orientação para indivíduos (em locais turísticos, por exemplo) (ROBERTSON *et al.*, 2009).

Figura 11. Visualização da edificação estudada: visão tridimensional (à esquerda) e planta baixa (à direita).



Fonte: Adaptado de WOODMAN & HARLE., 2008].

3.1.4. Identificação por frequência de rádio

RFID é um sistema com tecnologia wireless para transferência de dados, tanto baseado em frequência de rádio como em campos eletromagnéticos. É usado para identificar e monitorar indivíduos automaticamente. Existem duas razões para usar estes dispositivos em ambientes de escritório. Primeiramente, este sistema usa dispositivos que são amplamente empregados em ambientes fechados e, em segundo lugar, monitoramento por sistemas RFID têm alta precisão (ZEILER *et al.*, 2014).

De acordo com RUIZ-GARCIA *et al.* (2009) e VISHWAKARMA & SHUKLA (2013), RFID é sensor de baixo custo. Em resumo, a tecnologia RFID pode ser um potencial localizador em tempo real através de transferência de dados entre sensores fixos, instalados no piso, e os móveis, carregados pelos ocupantes.

ZEILER *et al.* (2014) executou uma série de testes para incorporar medidas de ocupação em edificações, com fins de aperfeiçoamento da eficiência energética - em termos de sistema de aquecimento, ventilação e refrigeração (Heating, Ventilating and Air-Conditioning control – HVAC, em inglês) (ZEILER *et al.*, 2014). Nessa aplicação, foram utilizados sensores fixos em pontos estratégicos da laje de um escritório, de modo a receber sinais de sensores móveis, instalados nos crachás das pessoas monitoradas. Detalhes sobre a aplicação do sistema na obtenção de dados, bem como a identificação dos componentes eletrônicos de um sensor móvel, são apresentados na Figura 23.

Figura 12. Componentes usados nos sistemas RFID.



Fonte ZEILER *et al.* 2014.

Num estudo comparativo entre seis sistemas de monitoramento, ZEILER *et al.* (2013) concluiu que a tecnologia RFID é a mais promissora para processos de monitoramento. O principal desafio para o emprego deste tipo de sistema é a necessidade de aquisição de vários recursos de hardware, o que demanda conhecimento para operação, tempo e recursos financeiros (ZEILER *et al.*, 2013).

3.1.5. Sistema de monitoramento de usuários WLAN

A sigla WLAN significa, em inglês, Wireless Local Area Network. Este sistema é economicamente competitiva, nos últimos anos.

A razão pela qual tal sistema tem se tornado abrangente são as características de *conectividade* e *rápida transmissão de dados*, sendo facilmente implementado. Sistemas WLAN também têm um sistema mais robusto de captura (um maior número de sensores pode ser simultaneamente utilizado). Outra vantagem do sistema é cobertura significativa deste sistema. Distâncias de até 100 metros, em comprimento, podem ser rastreadas sem perda de conexão entre o ponto de coleta de dados e o sensor do objeto monitorado. Portanto, isso implica em mais liberdade de movimento para um indivíduo ser monitorado, durante um experimento. Além disso, esta tecnologia oferece mais benefícios em termos de acesso móvel e flexibilidade/portabilidade dos dados obtidos. Uma utilização desse sistema é mostrada na Figura 24. Os pontos de obtenção de sinais para monitoramento de um robô são destacados na imagem (KHOURY & KAMAT, 2009).

A desvantagem dessa tecnologia baseia-se nas características do ambiente a ser estudado. Por exemplo, paredes, portas, dentre outros obstáculos, podem afetar sensivelmente a propagação dos sinais dos sensores. Como esse sistema também faz uso de sinal infravermelho, que pode ser facilmente bloqueado por objetos sólidos, a maioria dos dispositivos desse sistema são projetados para transferência de sinais de rádio (KHOURY & KAMAT, 2009).

Figura 13. Labirinto projetado para aplicação do sistema WLAN.



Fonte: KHOURY & KAMAT, 2009.

3.1.6. Sistemas de Ultra Banda Larga (UWB)

O desempenho do sistema de monitoramento DART (sigla em inglês para Digital Active Real Time) é composto por uma unidade de processamento, com quatro (ou mais) receptores, um (ou mais) sensor de referência, e múltiplos sensores móveis para indivíduos. Faz parte dos sistemas UWB (sigla em inglês para Ultra Wide Band). Quando em operação, o sistema usa pulsos curtos que são capturados por sensíveis detectores que são carregados pelos usuários para determinar suas respectivas posições. Esta técnica de monitoramento é facilmente aplicável e possui boa precisão, mas é de elevado custo de aquisição e instalação (KHOURY & KAMAT, 2009; LABEODAN *et al.*, 2013).

3.1.7. Sistemas de GPS (Global Positioning System) para ambientes internos (indoor)

Este sistema, por sua vez, é definido por quatro (ou mais) transmissores e um receptor (Figuras 25 e 26). Dados sobre o posicionamento são emitidos por uma bateria operada por transmissor através de sinais infravermelhos que são capturados por sensores localizados no receptor. Um segundo receptor (de localização e orientação conhecidas) ajuda a calcular a posição de uma pessoa em movimento, num sistema de coordenadas. Transmissores adicionais (cerca de dois ou mais) podem maximizar a eficiência do sistema. Uma vez que este sistema trabalha num padrão de transferência de dados, ele também permite maior mobilidade de os usuários monitorados.

Os dispositivos receptores apenas podem ser monitorados quando, no mínimo, dois transmissores podem ser localizados simultaneamente. A posição do receptor óptico é então calculada por processo de triangulação. A principal desvantagem é que este sistema pode ser consideravelmente caro (KHOURY & KAMAT, 2009). Usualmente, este sistema oferece pouca incerteza na determinação da posição de um objeto monitorado (LABEODAN *et al.*, 2013).

Figura 14. Transmissor do sistema GPS indoor (a); Processo de triangulação (b).



Fonte: KHOURY & KAMAT, 2009.

3.1.8. Comparação e avaliação de sistemas de monitoramento

Diferentes técnicas para monitoramento especial e roteamento de movimentos podem ser avaliadas e comparadas pelo método Kesselring. Tal processo de avaliação é baseado em critérios de funcionamento do sistema (MELFI *et al.*, 2011). Em outras palavras, o método Kesselring é uma ferramenta que auxilia pesquisadores e projetistas na etapa de decisão sobre o sistema circunstancialmente mais adequado (ZEILER *et al.*, 2013).

No trabalho de LABEODAN *et al.* (2013), uma tabela comparativa é apresentada (Tabela 2), contendo características relevantes as quais pesquisadores/projetistas levam em consideração na escolha de um sistema, segundo as finalidades a serem alcançadas

Tabela 2. Comparação entre alguns sistemas de monitoramento.

Sistema	Custo	Precisão	Adequação ao ambiente	Consumo de energia
GPS	XX	VV	V	VX
RFID	V	V	VV	VV
WLAN	V	V	VV	V
UWB	XX	VV	VV	V

Legenda: VV – Bom; V – Moderado; VX – Regular; XX - Ruim

Fonte: LABEODAN *et al.*, 2013.

3.2. Desafios enfrentados na operação de sistemas de monitoramento

Dentre as fontes de obstáculos para sistemas de monitoramento, as condições ambientais frequentemente possuem um papel relevante na aquisição de dados, representando mais (ou menos) restrições para o processo de obtenção de dados, tais como ocorrências de tumultos, oclusões, luminosidade, etc.

É importante notar que os métodos de monitoramento manual são usualmente sujeitos a erros sistemáticos durante processos de obtenção de dados. Este fenômeno é devido a alguns fatos (ANTONINI *et al.*, 2006):

- Dificuldade de manutenção de monitoramento: é particularmente difícil monitorar determinado ponto (isto é, um objeto ou pessoa) entre quadros de imagens (ou *frames*, em inglês) porque oclusões podem surgir nessas ocasiões;
- Erros de projeção: uma vez que a calibração de câmeras é uma aproximação numérica, erros de projeção são continuamente acumulados.

Sistemas visuais de monitoramento podem apresentar problemas comuns relacionados à coleta de dados, tais como distorções em lentes e limitações na resolução de imagens. Além disso, câmeras geralmente usam uma pequena parte de sua capacidade sensorial com a finalidade de capturar a posição de um objeto. Isso é devido ao fato de câmeras não se destinarem a registrar pontos específicos em cenários. Porém, FUKUTE *et al.* (2013) afirma que câmeras ainda são mais precisas que outras tecnologias baseadas no sistema GPS.

Nos sistemas IMU, as medições provenientes de giroscópios não são precisas, desde que ocorre considerável acumulação de erros, comprometendo parcialmente a performance do sistema. Similarmente, acelerômetros estão mais expostos a altos níveis de interferências externas (ruídos).

Sistemas de monitoramento com tecnologia GPS requerem registro das pessoas monitoradas para poder ser utilizado. Portanto, surgem algumas questões ligadas à privacidade de usuários em edificações (FUKUTE *et al.*, 2013).

4. Projetos estruturais de lajes: estados limites de serviço a vibrações

Os estados limites de serviço a vibrações são critérios que objetivam evitar desconforto e sensação de insegurança aos ocupantes de uma edificação. Além disso, procuram oferecer maior durabilidade à estrutura projetada.

Na teoria de vibrações mecânicas, a expressão da equação que expressa o movimento de um sistema estrutural linear é dada pela Equação 1:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (1)$$

Onde:

m – massa da estrutura em movimento;

c – coeficiente de amortecimento da estrutura;

k – rigidez do sistema estrutural

$F(t)$ – Força de excitação;

\ddot{x} , \dot{x} e x – aceleração, velocidade e posição, respectivamente.

Com respeito ao lado direito da Equação 1, algumas particularidades são dignas de nota. Os estados limites de serviço a vibrações são destinados a permitir que projetistas estimem respostas de uma estrutura em face de ações de carregamentos dinâmicos. Então, considerações e expressões matemáticas para a estimativa de excitação e resposta são desenvolvidas.

Nesse contexto, este capítulo trata faz uma análise comparativa e crítica sobre normas vigentes que lidam com propriedades modais de lajes, focando na discussão sobre as cargas dinâmicas de projeto (considerações sobre o número de pessoas em caminhada, relações entre os padrões de ocupação e as prováveis trajetórias das pessoas em escritórios, etc.).

4.1. Características gerais sobre estados limites de serviço a vibrações

Estruturas de edificações (ou partes constituintes destas) podem estar sob três situações acidentais, durante sua vida útil. Tais casos são abaixo listados:

- Deslocamentos translacionais ou rotacionais excessivos que venham a comprometer o desempenho de um sistema estrutural, sua aparência estética ou finalidade à qual se destina;
- Deterioração devido a intempéries (ventos fortes, agressão águas pluviais, etc.);
- Vibrações acidentais (geradas por pessoas em seus locais de trabalho e/ou equipamentos de destes locais) que possam causar desconforto, diminuição da produtividade no ambiente de trabalho e/ou sensação de insegurança dos ocupantes.

No caso de alguma ocorrência da última condição (vibrações acidentais), DOSSING (1988) afirma que a causa de tal fenômeno pode se originar num desses locais:

- Fonte: corresponde à origem das forças dinâmicas envolvidas;
- Caminho: meio pelo qual a energia de vibração é transmitida da origem ao possível receptor;
- Receptor: ponto que os efeitos dinâmicos alcançam (pessoas, elementos estruturais, etc.).

A reação dos ocupantes de uma estrutura numa situação de vibrações excessivas varia tanto com as características da fonte quanto com as características de receptor. Ou seja, a magnitude das vibrações (fonte) e as atividades que estão sendo realizadas pelos potenciais receptores, no momento em que a energia de vibração é transmitida, são relevantes.

Em muitos casos, ocorrências de problemas de vibrações excessivas têm emergido em lajes que possuem determinadas características estruturais. Estes aspectos são listados na Tabela 3.

Tabela 3. Comportamento dinâmico de acordo com dimensões de lajes.

Tipo de Laje	Comprimento de vão	Características
Curta	Menos de três metros	Amortecimento e rigidez usualmente contribuem para a mitigação das vibrações de alta magnitude propagadas pelo sistema estrutural
Longa	Mais do que 20 metros	A massa total do sistema estrutural é menos propensa a ser excitada de modo que vibrações de laje geralmente são evitadas.
Intermediária	Entre 3 e 20 metros	A combinação das propriedades modais do sistema (amortecimento, rigidez e massa) permite a ocorrência de grandes amplitudes de vibração.

Fonte: International Organisation for Standardization – ISO 10137, 2012.

Em publicação realizada pelos Institutos Americano e Canadense de Construção em Aço (AISC e CISC, respectivamente), MURRAY *et al.* (2003) esclarecem que a resposta humana a movimentos da laje depende de aspectos subjetivos e circunstâncias ambientais. Portanto, um indivíduo também pode ser mais sensível a vibrações do que outros, um fato que reforça a ideia de complexidade na discussão sobre resposta humana a vibrações. Por exemplo, num edifício, uma pessoa que está assistindo televisão dois andares acima de uma fonte de vibração pode ser mais afetada do que uma pessoa que está de pé na laje onde a fonte de vibração se encontra.

4.2. Lajes de alta e de baixa frequência

Para a Norma Britânica 6472 (British Standard – BS 6472), uma laje que possui frequência natural abaixo de um valor entre 7 e 10 Hz é considerada uma *laje de baixa frequência*. Frequências naturais além desse intervalo (de 10 Hz acima) são denominadas *laje de alta frequência* (BS 6472, 2008).

Para a Organização ISO (sigla em inglês para International Organization for Standardization), tal classificação é direcionada ao cálculo de respostas dinâmicas e avaliação de vibrações em lajes. A norma ISO 10137 (2012) estabelece, similarmente, que as lajes de alta frequência comumente possuem frequências naturais abaixo de 10 Hz. Similarmente à BS 6472 (2008), as lajes de alta frequência são assim classificadas para frequências acima de 10 Hz.

4.3. Normas para projeto estrutural de lajes

Nas próximas Subseções, as considerações feitas pelas principais normas nacionais e internacionais são discutidas e comparadas.

4.3.1. International Organization for Standardization (ISO)

A norma ISO 10137 (2012) trouxe duas classes de problemas de vibração: Classes A e B:

- Classe A: a fonte de vibrações gera excitações com variação no tempo e no espaço (exemplo: movimento de um carro sobre uma ponte). Atividades de caminhada também são classificadas como Classe A;
- Classe B: as ações da fonte de vibrações mudam ao longo do tempo, mas isso é tratado como um efeito estacionário no espaço (exemplo: vibrações oriundas de um maquinário ou um indivíduo pulando sobre o mesmo ponto de uma laje).

Como os problemas de vibrações abrangidos na Classe A são significativamente complexos para serem resolvidos analiticamente, simplificações são feitas de modo a lidar adequadamente com a variável *espaço*. Este fato é uma das razões pelas quais diversas normas oficiais (e guias normativos) têm tratado estes fenômenos (da Classe A) através de métodos experimentais ou através do uso de dados prévios de sistemas estruturais similares pré-existentes (ISO 10137, 2012).

Para a ISO 10137 (2012), forças dinâmicas produzidas por uma pessoa caminhando também dependem do comportamento individual dessa pessoa e da taxa de passo (o tipo de calçado usado e da laje tem menor influência na produção dessas forças).

De acordo com a ISO 10137, as ações dinâmicas de um único indivíduo ou grupo de pessoas podem ser analisadas num determinado intervalo de tempo ou de frequência. Tal carregamento varia no espaço e no tempo, na medida em que as pessoas atravessam a estrutura (ISO 10137, 2012). Embora a norma ISO 10137 faça menções para múltiplas pedestres em caminhada, equações e tabelas de parâmetros são apresentadas para um único indivíduo em caminhada.

A excitação dinâmica provocada por uma pessoa em caminhada pode ser analiticamente expressa por meio da Equação 2. Trata-se de uma série de Fourier no domínio

do tempo. Duas equações são apresentadas, na ISO 10137, para estimar excitações nas direções vertical e horizontal (porém apenas a direção vertical é discutida neste trabalho) (ISO 10137, 2012).

$$F(t) = Q \left[1 + \sum_{n=1}^k \alpha_n \sin(2\pi n f_p t + \phi_n) \right] \quad (2)$$

Na Equação 2, Q é a carga estática (peso) média de uma única pessoa em caminhada; α_i é um coeficiente numérico correspondendo ao i -ésimo harmônico (fator de carga dinâmica ou Dynamic Load Factor – DLF, em inglês); f_p é o componente da frequência de carregamento repetitivo (taxa de passos de uma pessoa); k é o número de harmônicos que caracterizam a função de força no intervalo de frequência de interesse.

A norma ISO 10137 não expressas claramente o número de harmônicos a serem considerados, mas afirma que uma quantidade adequada de harmônicos para modelar pessoas em caminhada para determinado período de tempo pode variar se a carga sob consideração sofre complexas variações no tempo. Parâmetros de projeto são mostrados na Tabela 4 como dados de entrada da Equação 2. Abaixo, dois gráficos de frequências de passos são apresentados: a Figura 27 demonstra um período de repetição de passos numa caminhada, enquanto que a Figura 28 mostra um intervalo de tempo de caminhada mais prolongado.

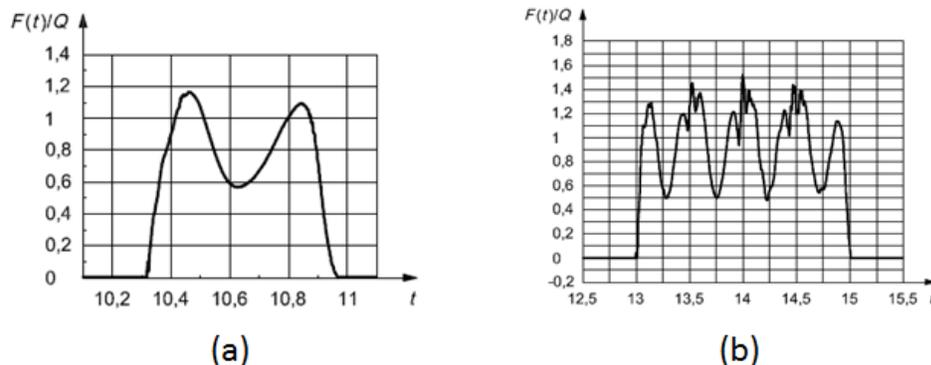
Tabela 4. Parâmetros de projeto para cargas dinâmicas atuantes sobre uma estrutura.

Atividade	Número do harmônico n	Intervalo médio de frequência nf (HZ)	Coefficiente numérico para direção vertical $\alpha_{n,v}$
Caminhada	1	1.2-2.4	0.37($f - 1.0$)
	2	2.4-4.8	0.1
	3	3.6-7.2	0.06
	4	4.8-9.6	0.06
	5	6.0-12.0	0.06

^a Estes harmônicos são relevantes apenas para situações em que o nível de ocupação de um edificação é mais influente.

Fonte: ISO 10137, 2012.

Figura 15. Funções de forças da movimentação de um indivíduo: para dois passos (a); Pessoa caminhando ao longo de uma plataforma instrumentada com 3 metros de comprimento (b).



Fonte: ISO 10137, 2012.

4.3.2. Human-Induced Vibrations of Steel Structures (HIVOSS)

Um grupo de pesquisa europeu intitulado Human-Induced Vibrations of Steel Structures (HIVOSS), que desenvolve estudos sobre cargas dinâmicas provenientes da movimentação de pessoas, fez uma publicação que apresenta o método OS-RMS, que é baseado em outros trabalhos científicos prévios. Este documento também inclui recomendações para avaliação de vibrações estruturais de acordo com o tipo de uso da laje considerada (European Commission, 2007).

De acordo com as diretrizes do HIVOSS, dois principais fatores são requeridos para análise de vibrações em lajes: dados experimentais ou simulados de vibrações mecânicas e uma função para cargas de caminhada (para uma pessoa com peso e taxa de passos específicos) (European Commission, 2007).

A *função de caminhada padrão* é definida como uma somatória, matematicamente descrita como um polinômio. Cada coeficiente K , por sua vez, depende da frequência de passos (Tabela 5). A carga proveniente de uma frequência padrão de passos é mostrada na Equação 3 (European Commission, 2007).

$$\frac{F(t)}{G} = K_1 t + K_2 t^2 + K_3 t^3 + K_4 t^4 + K_5 t^5 + K_6 t^6 + K_7 t^7 + K_8 t^8 \quad (3)$$

Onde G é a peso de uma pessoa caminhando. A duração do carregamento t_s é dado pela Equação 4. No caso em que $t > t_s$, a magnitude da força de excitação é nula. Ou seja, $F(t)=0$.

$$t_s = 2.6606 - 1.757 \cdot f_s + 0.3844 \cdot f_s^2 \quad (4)$$

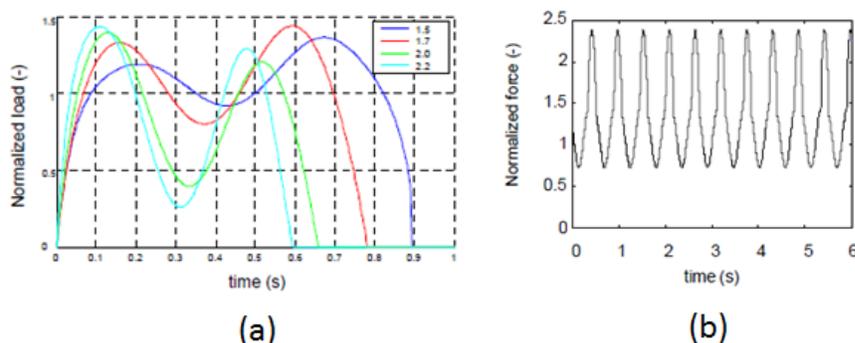
Tabela 5. Coeficientes K de acordo com a frequência de passos numa caminhada (f_s).

	$f_s \leq 1.75$	$1.75 \leq f_s < 2.0$	$f_s \geq 2.0$
K1	$-8 f_s + 38$	$24 f_s - 18$	$75 f_s - 120.4$
K2	$376 f_s - 844$	$-404 f_s + 521$	$-1720 f_s + 3153$
K3	$-2804 f_s + 6025$	$4224 f_s - 6274$	$17055 f_s - 31936$
K4	$6308 f_s - 16573$	$-29144 f_s + 45468$	$-94265 f_s + 175710$
K5	$1732 f_s + 13619$	$109976 f_s - 175808$	$298940 f_s - 553736$
K6	$-24648 f_s + 16045$	$-217424 f_s + 353403$	$-529390 f_s + 977335$
K7	$31836 f_s - 33614$	$212776 f_s - 350259$	$481665 f_s - 888037$
K8	$-12948 f_s + 15532$	$-81572 f_s + 135624$	$-174265 f_s + 321008$

Fonte: European Commission, 2007.

Finalmente, a função de caminhada padrão é formada pela soma repetitiva de funções de cargas oriundas dos passos das pessoas, para diversas frequências de passos, em intervalos de $1/f_s$ (Figuras 29 e 30) (European Commission, 2007). De fato, esta abordagem é a mesma considerada nas normativas da Convenção Europeia para Estruturas Metálicas (European Convention for Constructional Steelworks – ECCS, 2009).

Figura 16. À esquerda, gráficos sobrepostos de cargas de passos para diferentes frequências de passos (a); à direita, modelo de função que descreve uma caminhada (b).



Fonte: European Commission, 2007.

A excitação e a resposta não necessariamente se localizam na mesma posição, num sistema estrutural. Os pontos em que se dão a excitação e a resposta são estabelecidos nas posições em que as amplitudes de vibração são (supostamente) máximas. É importante notar que a posição para medição de dados de resposta depende do tipo de laje. Por exemplo, para a maioria das lajes, assume-se que o meio do vão (ou centro da laje) seja o ponto do qual os dados experimentais devem ser obtidos sobre o comportamento dinâmico da estrutura (European Commission, 2007).

Como estratégia para as etapas de teste e avaliação, o valor da raiz quadrada da média dos quadrados dos dados de aceleração (ou Root Mean Square - RMS, em inglês) é calculado considerando diferentes intensidades de passos de pessoas, em condições normais de caminhada. Este parâmetro é denominado OS-RMS₉₀ (European Commission, 2007).

4.3.3. Institutos Americano e Canadense de Construção em Aço

As normativas internacionais do American Institute of Steel Construction (AISC) e Canadian Institute of Steel Construction (CISC) emprega o critério proposto por MURRAY & ALLEN (1993). Tanto a função de carga quanto a função matemática que expressa a resposta são discutidas, a seguir.

A função de carregamento emprega uma série de Fourier para representar as forças dinâmicas devidas a atividades de caminhada (Equação 5) (MURRAY & ALLEN, 1993).

$$F(t) = P \cdot (1 + \sum \alpha_i \cos 2\pi i f t) \quad (5)$$

Nesta equação, P corresponde ao peso de uma pessoa e é tomado igual a 700 N para fins de projeto. A variável f é a frequência de passo da pessoa, i é a identificação do harmônico (1º, 2º, 3º harmônicos, etc.) e α_i é o fator de carregamento dinâmico para o harmônico considerado e i corresponde ao harmônico considerado, cuja influência no intervalo de frequência e no fator de carregamento dinâmico mostrados na Tabela 6 (MURRAY & ALLEN, 1993).

Tabela 6. Intervalo de frequência e fatores de carregamento dinâmico para cada harmônico.

Harmônico	Intervalo de frequência (HZ) – $i.f$	Fator de carregamento dinâmico
1	1,6 – 2,2	0,5
2	3,2 – 4,4	0,2
3	4,8 – 6,6	0,1
4	6,4 – 8,8	0,05

Fonte: MURRAY & ALLEN, 1993.

Por outro lado, a função de resposta estima as características do movimento do sistema estrutural em estudo. A resposta à força de excitação é calculada como uma parcela aceleração da gravidade. O pico de aceleração estimada é então avaliado pela comparação com os valores limites para o tipo de ocupação da estrutura (MURRAY & ALLEN, 1993).

O fator de aceleração contém um fator de redução (R). De acordo com MURRAY & ALLEN (1993), o fator de redução leva em conta o fato de que uma resposta em estado constante (*steady-state response*, em inglês) talvez não seja alcançada na movimentação de uma pessoa e que o caminhante e as demais pessoas que se sentem incomodadas pelas vibrações de passos não se encontrem na mesma localidade onde o deslocamento modal máximo ocorre MURRAY & ALLEN (1993).

$$\frac{a_0}{g} = \frac{R\alpha_i P}{\beta W} \cdot \cos(2\pi i f t) \quad (6)$$

Neste contexto MURRAY & ALLEN (1993) propuseram que o fator R seja tomado igual a 0,5 para as estruturas que apresentam formas modais em duas direções. O fator de aceleração simplificado é, derivado da Equação 6, é apresentado na Equação 7 MURRAY & ALLEN (1993).

$$\frac{a_0}{g} = \frac{P_0 \exp(-0.35 f_n)}{\beta W} \quad (7)$$

Os valores para P_0 , β e $\frac{a_0}{g}$ são mostrados na Tabela 7. É importante notar que o parâmetro β varia de acordo com o tipo de laje e a presença de partições e outros componentes não estruturais.

Tabela 7. Valores recomendados para parâmetros da Equação 7. Os limites do fator de aceleração também são mostrados.

	Força constante P_0	Coefficiente de amortecimento β	Limite de aceleração (a_0/g x 100%)
Escritórios, residências, igrejas.	0,29 kN (65 lb)	0,02 – 0,05*	0,5 %
Shopping centers	0,29 kN (65 lb)	0,02	1,5 %

*0,02 para lajes com poucos componentes não estruturais (partições, por exemplo) como pode ocorrer em áreas abertas em ambientes de trabalho e igrejas.
0,03 para lajes sem componentes não estruturais e demais acabamentos, mas apenas com pequenas partições,
0,05 para partições façam vedação do piso ao teto (entre lajes).

Fonte: Adaptado de MURRAY *et al.*, 2003.

Depois de um rearranjo algébrico, a Equação 7 toma formato diferente, onde a frequência natural mínima recomendada f_0 é proposta (Equação 8) (MURRAY & ALLEN,, 1993).

$$f_0 \geq 2.86 \cdot \ln\left[\frac{K}{\beta W}\right] \quad (8)$$

4.3.4. Instituto de Construção em Aço

O Instituto de Construção em Aço (Steel Construction Institute – SCI, em inglês) propôs, em 2007, um guia para projeto de lajes intitulado ‘Projeto de lajes contra Vibrações: Uma Nova Abordagem’ (Design of Floors for Vibration: A new Approach, em inglês). Neste documento um novo método é discutido para permitir aos projetistas a realização do cálculo da resposta a excitações dinâmicas com maior precisão em comparação com as normas BS

6472 e ISO 10137. As principais características estabelecidas na norma são discutidas, a seguir (SMITH *et al.*, 2009).

- Coeficiente de amortecimento: Similarmente aos guias do AISC e CISC, o coeficiente de amortecimento crítico da laje também é apresentado como uma variável dependente do tipo de utilização do piso (SMITH *et al.*, 2009). A Tabela 8 contém valores de coeficientes de amortecimento segundo o tipo de uso da estrutura;

Tabela 8. Coeficientes de amortecimento para tipos distintos de lajes.

ζ	Tipo de laje
0,5 %	Para estruturas totalmente soldadas (exemplo: escadas).
1,1 %	Para lajes com pouca ou nenhuma quantidade de mobílias.
3,0 %	Para lajes com mobília e em condições normais de serviço.
4,5 %	Para uma laje na qual o projetista tem confiança sobre os locais exatos onde as partições serão instaladas (as partições aumentam o amortecimento sobre locais com grandes magnitudes de vibração na forma modal da laje).

Fonte: SCI, 2009.

- Layout arquitetônico/Trajétórias de caminhada/Modos de vibração: as diretrizes da norma recomendam que os projetistas estabeleçam locais de circulação próximos a elementos estruturais (vigas, pilares, etc.), uma vez que menores amplitudes de vibração devem ocorrer nesses pontos. Um segundo aspecto está diretamente relacionado com as dimensões de tais layouts: o tempo de exposição a cargas dinâmicas. Por exemplo, quanto mais longo for um corredor, maior será a exposição da laje a cargas dinâmicas induzidas pela movimentação de pessoas (como previamente mencionado no Capítulo 2);

- Fator de Acumulação de Ressonância: em contrapartida, se uma trajetória de caminhada é muito curta, o estado constante de excitação provavelmente não será alcançado. Assim, quando o layout das partições de um escritório e o comprimento de suas áreas de circulação são conhecidos, o fator de acumulação da resposta pode ser multiplicado pelo valor RMS da aceleração (Equação 9) (SMITH *et al.*, 2009). Esta variável é similar ao Fator de Redução R proposto por MURRAY & ALLEN (1993).

$$\rho = 1 - e^{\left(\frac{-2\pi\zeta L_p f_p}{v}\right)} \quad (9)$$

Onde:

f_p é a frequência de passo;

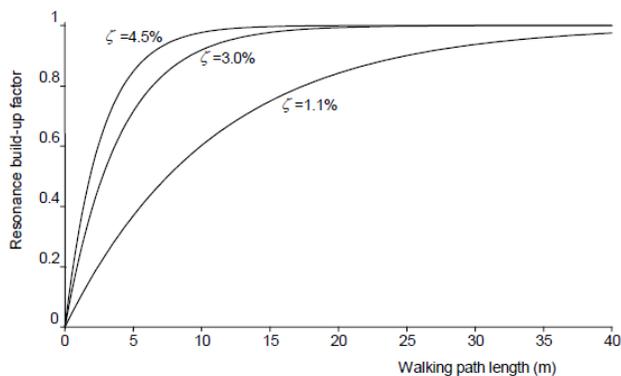
ζ é o coeficiente de amortecimento crítico;

L_p é o comprimento da área de circulação de pessoas.

v é a velocidade de caminhada.

O gráfico seguinte representa a Fator de Acumulação de Ressonância para três valores comuns de coeficiente de amortecimento crítico, na frequência de passos de 2 HZ (comprimento de cada passo igual a 75 cm).

Figura 17. Relação entre fator de acumulação da ressonância e comprimento da trajetória de uma caminhada.



Fonte: SCI p354, 2007.

4.3.5. Sociedade do Concreto do Reino Unido

A segunda edição Relatório Técnico n. 43 da Sociedade do Concreto do Reino Unido (Concrete Society Technical Report 43 - CSTR 43, em inglês) foi publicado em 2005. Este manual foi desenvolvido para abordar potenciais impasses com respeito ao projeto de lajes a serem executadas sob efeito de tensão, na perspectiva dos estados limites de serviço (UKCS, 2005).

Em geral, a descrição do método abordado no CSTR 43 não inclui dados específicos sobre o desempenho de lajes em face de vibrações mecânicas. Consequentemente, a excitação devido à movimentação de pessoas leva, indiretamente, à suposição do modelo em que uma única pessoa caminha sobre a laje (PAVIC *et al.*, 2001). Este fato reforça o argumento da lacuna existente sobre a consideração de modelos mais realísticos sobre a utilização dessas estruturas.

4.3.6. Normas Britânicas

Para as diretrizes britânicas (BS 6472, 2008), o comportamento estrutural de uma laje em face de cargas dinâmicas depende de dois fatores:

- Tipo de excitação: interna (exemplo: movimentação de pessoas) ou externa (exemplo: movimento de um maciço de solo, terremoto);
- Tipo de laje: laje de alta ou baixa frequência.

Para carregamentos dinâmicos, a resposta de uma estrutura é influenciada pelas suas propriedades modais (frequência natural, modos de vibração e amortecimento). Nesse contexto, as diretrizes britânicas recomendam que a obtenção de dados sobre o comportamento estrutural da laje seja realizada no ponto onde as principais queixas sobre vibrações excessivas ocorrerem, juntamente com uma identificação da trajetória de caminhada envolvida e frequência de passos das pessoas (BS 6472, 2008).

4.3.7. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)

A norma brasileira para projeto de estruturas de concreto, através da norma regulamentadora NBR 6118/2014, estabelece que lajes de concreto armado devam ser desenvolvidas de maneira a apresentar frequência natural superior em 20%, no mínimo, a uma frequência crítica ($f_{natural} \geq 1,2 f_{crítica}$). Esta frequência crítica, por sua vez, é estabelecida por esta norma, segundo a finalidade à qual a laje se destina (Tabela 9).

Nesse contexto, a norma prevê que as propriedades modais da laje possam ser modificadas (massa estrutural, amortecimento, rigidez), de modo a satisfazer essa condição (ABNT, 2014). É válido notar que a frequência crítica se enquadra na classificação de lajes de baixa frequência (abaixo de 10 HZ), usualmente proposta por normas internacionais.

Tabela 9. Frequências críticas de acordo com o uso de uma laje.

Caso	$f_{crítica}$ (HZ)
Ginásio de esportes	8,0
Salas de dança ou de concerto sem cadeiras fixas	7,0
Escritórios	3,0 – 4,0
Salas de concerto com cadeiras fixas	3,4
Passarelas de pedestres ou ciclistas	1,6 – 4,5

Fonte: ABNT, 2014.

4.3.8. Outras Diretrizes

Um trabalho de pesquisa realizado por NGUYEN *et al.* (2011), também fez um estudo de caso para avaliação de lajes devido a excitação destas proveniente da movimentação de pessoas. A função de carregamento usada nesse estudo é expressa na Equação 12. Os quatro primeiros harmônicos da excitação foram incluídos na função $F(t)$.

$$F(t) = P \sum \alpha_i \cos(2\pi f_p t + \phi_i) u \quad (12)$$

Onde P é o peso de um indivíduo em caminhada, α_i é o coeficiente de Fourier (variando para cada harmônico), f_p é a frequência de passo, ϕ_i é o ângulo de fase (considerado

igual a 0 para o primeiro harmônico e como $\pi/2$, em módulo, para os outros harmônicos), u é o valor da forma modal da laje (incorporada na Equação 12 para modelar uma caminhada individual ao longo do vão da laje). A forma modal u é uma função senoidal do comprimento do vão (L).

Um conjunto de frequências de passos foi gerado com vistas a simular a variabilidade da forma de caminhar para uma amostra diversos usuários de uma edificação, oferecendo significância estatística ao estudo. Entretanto, nos testes experimentais, NGYUEN *et al.* (2011) empregou um único indivíduo em caminhada ao longo a laje em vez de múltiplas pessoas (grupos ou multidões).

HICKS & SMITH (2011) enfatizaram que a diferença entre lajes de alta e de baixa frequência, através da descrição do método geral de projeto de ambos os tipos de laje. Para lajes de baixa frequência natural, se espera que movimentações de pessoas resultem em forças de excitação representadas pelos quatro primeiros harmônicos da série de Fourier. A magnitude da força, em seu h -ésimo harmônico pode ser calculada pelo uso da Equação 13 (HICKS & SMITH, 2011).

$$F_h = \alpha_h Q \quad (13)$$

Onde α_h é o coeficiente de Fourier do h -ésimo harmônico e Q é a média de peso médio da pessoa que está caminhando (considerado igual a 748 N). Novamente, a movimentação de apenas uma pessoa é analisada.

Em se tratando de lajes de alta frequência, a resposta de uma laje é significativa quando a excitação se dá por um impacto súbito dos calcanhares de uma pessoa sobre a laje (*heel drop*, em inglês). Frequências naturais num intervalo de zero até duas vezes a magnitude da primeira frequência modal da laje devem ser consideradas na avaliação da resposta da estrutura. A função de excitação F_l , que representa um único passo de numa caminhada, é expresso pela Equação 14.

$$F_l = 60 \frac{f_p^{1.43}}{f_n^{1.3}} \cdot \frac{Q}{700} \quad (14)$$

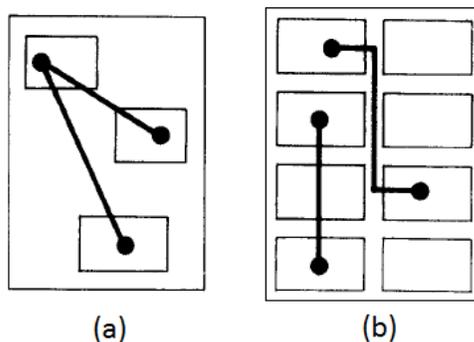
Onde f_p é a frequência de passo, f_n corresponde à frequência ou modo sob consideração e Q é a força estática média (peso) de uma pessoa. Para estas situações de

projeto, a excitação pode ser estabelecida nos antinós (onde as amplitudes máximas se apresentam) ou ao longo de trajetórias já testadas experimentalmente. Vale salientar que o primeiro procedimento (dos antinós) é recomendado sempre que as localizações das áreas de circulação dos escritórios ainda são desconhecidas HICKS & SMITH (2011).

5. Discussão sobre normas atuais

Primeiramente, guias para planejamento de espaços para escritório frequentemente enfatizam a importância na concepção de dimensões viáveis para atingir máxima eficiência no ambiente de trabalho. Por exemplo, LIGGETT & MITCHELL (1981) chamam atenção para o fato das movimentações de pessoas ocorrerem diferentemente em cada tipo de escritório – ou seja, a movimentação de pessoas também depende de restrições presentes no layout do escritório (Figura 32).

Figura 18. Configurações de trajetórias em layouts de escritórios: (a) escritório com espaços abertos para circulação; presença de corredores entre áreas de trabalho (b).



Fonte: LIGGETT & MITCHELL, 1981.

Como discutido na Seção 4.3.3, MURRAY & ALLEN (1993) estabeleceram um Fator de Redução igual a 0,5 (para lajes). Tal assunção é também feita no guia da AICS/CISC. Porém, este valor foi estabelecido circunstancialmente, necessitando de revisão que se baseie em carregamentos dinâmicos reais.

Com o fator de redução é relacionado à trajetória de caminhada sobre uma laje (que, por sua vez depende dos movimentos dos usuários e do arranjo das partições e mobília de um escritório), os seguintes comentários se aplicam:

- Movimentação de pessoas: o monitoramento da movimentação de pessoas oferece conhecimento as posições dos indivíduos que trafegam e aqueles que permanecem estáticos em escritórios. Através do uso de tecnologias para o monitoramento de pessoas, padrões de trajetórias podem ser identificados (como

também suas características: frequência média de passos, comprimento total de uma trajetória, os lugares com maior circulação de pessoas num andar de uma edificação durante um dia de trabalho) e o número de pessoas caminhando simultaneamente;

- Disposição de partições/Arranjo do mobiliário: essas características interferem no caminho que uma pessoa percorre num escritório. Móveis e partições modificam (ou mesmo limitam) a maneira pela qual as pessoas caminham em ambientes fechados.

Similarmente, a variável que considera a redução da resposta dinâmica de uma laje (devido a excitações mecânicas que atuam sobre esta) é explicitada na norma do SCI. O Fator de Acumulação de Ressonância é concebido de uma maneira similar ao Fator de Redução: quando uma resposta em estado constante não é alcançada, a estimativa da aceleração da laje é ponderada pelo Fator de Acumulação (Figura 31) (SCI p354, 2007).

Outro parâmetro merece observação: o W_{RMS} . OHLSSON (1998) explica que valores limites gerais para a *velocidade de vibração vertical* (W_{RMS}) não podem ser estabelecidos porque o carregamento contínuo devido a condições de caminhada não é bem conhecido. Também é proposto que tais valores sejam comparados com aqueles correspondentes a construções de lajes com bom desempenho em termos de estados limites de serviço a vibrações (OHLSSON, 1988). Nesse contexto, relações entre padrões de caminhada e layouts de escritórios são pertinentes a essa discussão.

Finalmente, a característica que é o principal foco deste trabalho é digna de avaliação: o número de pessoas considerado nos atuais critérios de estados limites de serviço para determinação de cargas dinâmicas de projeto. Como mostrado nos Capítulos 2 e 4 deste trabalho, as áreas de ambientes de escritório são mais sujeitas a ter grupos de usuários se movimentando, em vez de simples indivíduos. Isso se torna ainda mais evidente em determinadas horas do dia (no período entre expedientes – horário para refeição - mais pessoas tendem a caminhar juntas nos escritórios).

Por outro lado, normas sobre estados limites de serviço de lajes a vibrações não abordam este aspecto e comumente consideram um único indivíduo como fonte de cargas dinâmicas, como foi apresentado anteriormente (LIGGETT & MITCHELL, 1981). Este fato representa um inconveniente existente nessas diretrizes, de modo que atualizações destas se fazem necessárias.

Ainda na discussão sobre o número de pessoas em movimentação simultânea, ZIVANOVIC *et al.* (2012) comparou cargas devidas a indivíduos sozinhos ou em grupo. Os resultados apontaram que os usuários da edificação estão mais sujeitos a vibrações excessivas devido à movimentação simultânea de múltiplas pessoas do que de para indivíduos caminhando sozinhos. De acordo com os autores, modelos que simulam um único indivíduo em trânsito numa frequência de passo pré-estabelecida, como é usualmente concebido nas diretrizes atuais, se mostram parcialmente realísticos e não representam o comportamento real de lajes em situações de serviço.

No que diz respeito a lajes de concreto pós-tensionadas, PAVIC *et al.* (2001) afirma que diretrizes internacionalmente reconhecidas para este tipo de estrutura não mencionam critérios de estados limites de serviço a vibrações. Em outras palavras, parâmetros não são mostrados para permitir a concepção de projetos que proporcionem bom desempenho na ocorrência de vibrações excessivas. Além disso, a verificação e a avaliação de lajes de concreto pós-tensionadas não são atividades recorrentes desempenhadas por projetistas (PAVIC *et al.*, 2001).

6. Conclusões

Este trabalho realizou uma revisão sobre o estado da arte das atuais normas da engenharia estrutural voltadas aos estados limites de serviço de lajes de escritórios em face de vibrações mecânicas. O principal objetivo foi investigar uma crescente necessidade de critérios mais adequados para os estados limites de serviço a vibrações, de maneira a representar as situações recorrentes de carregamentos dinâmicos a que estas estruturas estão cotidianamente submetidas.

O trabalho foi iniciado com uma análise sobre o tipo de uso, layouts de ambientes de trabalho e padrões de ocupação de lajes enquanto fatores de influência sobre os padrões de trajetórias realizadas por ocupantes de edificações, em condições normais de serviço. Estudos sobre a otimização sobre o uso de espaços também foram apresentados.

Com respeito a trajetórias realizadas por pessoas, mostrou-se uma relação de dependência entre cargas dinâmicas de projeto e o layout do ambiente, enfatizando-se que a maneira pela qual os projetos de lajes de escritório são concebidos afeta os potenciais padrões de caminhada, não apenas no número de ocupantes que trafegam simultaneamente, mas também nos locais da estrutura mais expostos a cargas dinâmicas induzidas por pessoas.

Posteriormente, foi discutida a relevância da obtenção de dados experimentais sobre a movimentação de pessoas em escritórios enquanto processo indispensável para determinação de padrões de trajetória e quantidade de pessoas em movimentação simultânea. Portanto, características subjetivas relevantes sobre a movimentação das pessoas foram analisadas. Na sequência, sistemas de monitoramento comercialmente disponíveis foram descritos e comparados. Ademais, softwares para simulação computacional de pedestres foram listados.

Com esta revisão bibliográfica, almeja-se ressaltar que as atuais normas não apresentam estados limites de serviço representativos para lajes sujeitas a vibrações, principalmente no que concerne ao número de pessoas em movimentação sobre lajes, sugerindo-se mudanças necessárias nestas diretrizes para que se tornem mais realísticas e eficientes, objetivando-se a boa performance e durabilidade dessas estruturas.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento, NBR 6118, ABNT, Rio de Janeiro, 170p, 2014.
- ANDRIENKO G. & ANDRIENKO N. Spatio-Temporal Aggregation for Visual Analysis of Movements, IEEE Symposium on Visual Analytics Science and Technology, pp. 51-58, 2008.
- ANTONINI *et al.* Discrete choice models of pedestrian walking behavior [online]. Transportation Research Part B: Methodological, 40, 667-87, 2006.
- BENEZETH *et al.* Towards a sensor for detecting human presence and characterizing activity. Energy and Buildings, 43, 305-314, 2011.
- BLOOMFIELD, R. Hard public access floors: A problem for the industry – Part 1", Structural Survey, 8, 146-156, 1990.
- BRITISH STANDARD 6472. Guide to Evaluation of Human Exposure to Vibration in Buildings – Part 1: Vibrations Sources Other than Blasting. British Standard Institute (BSI), UK, 2008.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTE (BSI). UK National Annex to Eurocode 1: Actions on structures – Part 2: Traffic loads on bridges. British Standards, 2008.
- CALDERARA *et al.* Detecting Anomalies in People's Trajectories Using Spectral Graph Analysis. Computer Vision and Image Understanding. 115, 1099-1111, 2011.
- CONCRETE SOCIETY TECHNICAL REPORT N° 43, Post - tensioned Concrete Floors Design Handbook, Concrete Society, London, 2005.
- DOSSING O. Structural Testing – Part 1: Mechanical Mobility Measurements. Brüel & Kjær, Denmark, 1988.
- EUROPEAN COMMISSION. Generalisation of Criteria for Floor Vibrations for Industrial, Office, Residential and Public Building and Gymnastic Halls, RFCS Report EUR 21972 EN, Luxembourg, 2006.
- EXPANDED SHALE, CLAY & SLATE INSTITUTE (ESCSI). Finishing Lightweight Concrete Floors [Online]. Available: http://www.escsi.org/uploadedFiles/Technical_Docs/Structural_Lightweight_Concrete/4640.0%20Finishing%20Lightweight%20Floors.pdf [Accessed 24 November 2014].
- FELDMANN *et al.* Design of Floor Structures for Human-Induced Vibrations. European Convention for Constructional Steelworks (ECCS), 2009.

FUKUTE, A. *et al.* A Linked Visualization of Trajectory and Flow Quantity to Support Analysis of People Flow. Information Visualisation (IV) 17th International Conference, pp. 561 – 567, 2013.

GABRIEL, P. *et al.* The State of the Art in Multiple Object Tracking Under Occlusion in Video Sequences [online]. Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems, pp. 166–173, 2003.

GARBER, G. Design and construction of concrete floors, 2nd edition. Kentucky, USA, Elsevier, 2006.

GOVERNMENT OF CANADA, Workplace 2.0 Fit-Up Standard. [e-book] Canada: Public Works and Government Services. Available: <http://www.tpsgc-pwgsc.gc.ca/biens-property/amng-ftp/index-eng.html> [Accessed 11 November 2014], 2012.

GOVERNMENT OF NORTHWESTERN TERRITORIES (GNWT), Office Space Standards and Guidelines. Public Works and Services [online]. Available: <http://www.pws.gov.nt.ca/publications/index.htm> [Accessed 11 November 2014], 2012.

HICKS, S. J. & ANDREW, L. S. Design of Floor Structures Against Human-Induced Vibrations. Steel Construction 4, No. 2, 114-120, 2011.

HOLMAN *et al.* The Global Call Center Report: International Perspectives on Management and Employment. Holman, Batt, and Holtgrewe, USA, 2007.

HOOGENDOORN, S.P. & BOVY, P. H. L. Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models. Transportation Research Part B: Methodological, 38, 169–190, 2002.

HUMAN INDUCED VIBRATIONS OF STEEL STRUCTURES (HIVOSS). Human-Induced Vibration of Steel Structures – Vibration Design of Floors: Guideline, European Commission, 2007.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 10137 - Bases for Design of Structures – Serviceability of Buildings and Walkways Against Vibration. Ethiopian Standards Agency, 2012.

KHOURY H. M. & KAMAT V. R. Evaluation of position tracking technologies for user localization in indoor construction environments. Automation in Construction, 18, 444-457, 2009.

LABEODAN *et al.* The Human Behavior: A Tracking System to Follow the Human Occupancy. 2013 CISBAT International Conference, 513-518, 2013.

LIGGETT R. S. & MITCHELL W. J. Optimal Space Planning in Practice. Computer-Aided Design, 13, Issue 5, 277-288, 1981.

LITTLEFIELD, D. Good Office Design. RIBA Publishing, UK, 2009.

- MAHDAVI A. & TAHMASEBI F. Predicting people's Presence in Buildings: An Empirically Based Model Performance Analysis. *Energy and Buildings*, 86, 349-355, 2014.
- MCARDLE G. & DEMSAR U. Investigating Similarity of Trajectories through Physical Decomposition of Movement in Space-Time Cube. 14th AGILE International Conference on Geographic Information Science, 2011.
- MELFI R. *et al.* Measuring Building Occupancy Using Existing Network Infrastructure. Proceedings IGCC'11, 2011.
- MURRAY T. M. *et al.* Design Guide 11: Floor Vibrations Due to Human Activity, 2nd Edition . American Institute of Steel Construction (AISC), Canadian Institute of Steel Construction (CISC), 2003.
- MURRAY, T. M., ALLEN, D. E. Floor Vibrations: A New Design Approach. International Colloquium on Structural Serviceability of Buildings, Goteborg, Sweden. Reports vol. 69, 1993.
- NEWSHAM *et al.* Lightswitch: a Stochastic Model for Predicting Office Lighting Energy Consumption. Proceedings of Right Light Three, the 3rd European Conference on Energy Efficient Lighting, Newcastle, UK, pp. 59–66, 1995.
- NGUYEN, T. *et al.* Evaluation of footfall induced vibration in building floor. Australian Earthquake Engineering Society 2011 Conference, 2011.
- OHLSSON, S. Springiness and Human Induced Floor Vibrations — A Design Guide. Swedish Council for Building Research, Stockholm, Sweden, 139 pp. (Document D12), 1998.
- ROBERTSON *et al.* Simultaneous Localization and Mapping for Pedestrians Using only Foot-Mounted Inertial Sensors. UbiComp 2009, ACM, 93-96, 2009.
- SEER *et al.* Kinects and human kinetics: A new approach for studying pedestrian behavior. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 48, 212-228, 2014.
- HICKS, S. J. and ANDREW, L. S. Design of Floor Structures Against Human-Induced Vibrations. *Steel Construction* 4, No. 2, 114-120, 2011.
- SMITH A. L. *et al.* Design of Floors for Vibration: A New Approach. Revised Edition. The Steel Construction Institute (SCI), SCI Publication P354, Ascot, UK, 2009.
- Space Management Group (SMG). Promoting Space Efficiency in Building Design. UK Higher Education Space Management Project, 2006.
- WOODMAN, O. & HARLE, R. Pedestrian Localization for Indoor Environments, UbiComp 2008, ACM, 114-123, 2008.

YABUSHITA H. & ITOH T. Summarization and Visualization of Pedestrian Tracking Data. Conference on Information Visualization (IV 2011), pp. 537-542, 2011.

ZEILER *et al.* Towards Building Occupants Positioning: Track and Trace for Optimal Process Control. Proceedings of the 13th International Conference for Enhanced Building Operations, 2013.

ZEILER *et al.* Detecting and Tracing Building Occupants to Optimize Process Control. Proceedings of the 14th International Conference for Enhanced Building Operations, Beijing, China, 2014.

ZHAN *et al.* Crowd analysis: a survey. Machine Vision and Applications, 19, 345-357, 2008.

ZIVANOVIC S. *et al.* Towards Modeling In-Service Pedestrian Loading of Floor Structures. Topics on the Dynamics of Civil Structures, 1 Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series 2012, pp 85-94, 2012.