



Tema: Estruturas de aço e mistas de aço e concreto

**DIMENSIONAMENTO DE PISOS MISTOS DE AÇO E CONCRETO SUBMETIDOS À VIBRAÇÃO
DEVIDA AO CAMINHAR HUMANO**

Carlos Eduardo Wolkartt Vago¹

Hiago Fernando Vagmaker Golçalves²

Luis Augusto Lancellotti Zapparolli Pupin³

Lucas Fadini Favarato⁴

Adenilcia Fernanda Grobério Calenzani⁵

Resumo

Além dos tradicionais sistemas em concreto armado e aço, a combinação destes materiais em lajes e vigas mistas de aço e concreto vem ganhando espaço no mercado da construção civil. O aço estrutural possibilita eliminar fôrmas e escoramentos, reduzindo o cronograma de obra e garantindo maior precisão dimensional ao projeto, enquanto o concreto, corrobora com a proteção do aço contra incêndio e corrosão e garante maior rigidez aos elementos. Embora o dimensionamento de sistemas mistos seja difundido, sobretudo no tocante à determinação de suas resistências nos estados-limites últimos, a avaliação do desempenho dinâmico do piso quando submetido ao caminhar humano ainda constitui uma lacuna técnica no mercado. Neste contexto, este trabalho visa desenvolver uma ferramenta computacional para dimensionamento de pisos mistos produzida no software Microsoft Office Excel e implementada em Microsoft Office Visual Basic for Application 2016 (VBA). Além do dimensionamento aos estados-limites conforme a NBR 8800, o programa contempla a verificação de vibrações conforme os procedimentos analíticos do Anexo I do Projeto de Revisão NBR 8800:2022 e do *Steel Design Guide 11* da AISC. A ferramenta foi validada com exemplos encontrados na literatura e apresentou resultados consistentes, tornando-a apta para uso em projetos estruturais de pisos.

Palavras-chave: Lajes mistas; Dimensionamento; Vibração; Pisos mistos.

DESIGN OF STEEL AND CONCRETE COMPOSITE FLOORS SUBJECTED TO VIBRATION DUE TO HUMAN WALKING

Abstract

Besides the traditional reinforced concrete and steel systems, the combination of these materials in composite steel and concrete slabs and beams has been gaining space in the construction market. Structural steel allows for the elimination of formwork and shoring, reducing the construction schedule and ensuring greater dimensional accuracy of the project, while concrete contributes to the fire and corrosion protection of steel and provides greater stiffness to the elements. Although the design of composite systems is well-established, especially regarding the determination of their ultimate limit state resistances, the assessment of the dynamic performance of the floor when subjected to human walking still represents a technical gap in the market. In this context, this study aims to develop a computational tool for the design of composite floors produced in Microsoft Office Excel software and implemented in Microsoft Office Visual Basic for Application 2016 (VBA). In addition to the design for ultimate limit states according to NBR 8800:2022, the program includes vibration verification according to the analytical procedures of Annex I of the Draft Revision of NBR 8800 and AISC Steel Design Guide 11. The tool was validated with examples found in the literature and presented consistent results, making it suitable for use in structural floor projects.

Keywords: Composite slabs; Design; Vibration; Composite floors.

¹ Engenheiro Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, Espírito Santo, Brasil.

² Graduando em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Espírito Santo, Brasil.

³ Engenheiro Mecânico, Pesquisador, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da ArcelorMittal, São Paulo, Brasil.

⁴ Engenheiro Civil, Mestre em Engenharia Civil, Pesquisador colaborador, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, Espírito Santo, Brasil.

⁵ Engenheira Civil, Doutora em Engenharia de Estruturas, Professora Associada, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, Espírito Santo, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Uma construção de concreto armado utiliza como sistema estrutural de lajes, vigas e pilares, todos com armação de aço e preenchimento com concreto, o que ocorre sobretudo por não necessitar de mão de obra especializada. Porém, esse sistema consome muito cimento para sua fabricação, aumentando os custos de execução. Além disso, esse sistema construtivo necessita da utilização de formas para o concreto no estado fresco, demandando tempo para a fabricação desses moldes e custo com a compra ou aluguel desse material.

Com a grande utilização de cimento, há também o aumento da emissão de CO₂. Segundo o instituto de pesquisa britânico Chatham House, o cimento é fonte de aproximadamente 8% das emissões mundiais de CO₂. Se sua indústria fosse um país, seria o terceiro maior emissor desse gás, no mundo, atrás apenas de China e Estados Unidos [1].

Na etapa de estado fresco do concreto, as vigas, pilares e lajes não possuem nenhuma resistência e rigidez, sendo necessária a utilização de escoras para segurar as fôrmas e a estrutura enquanto o concreto não atinge a resistência necessária para a desforma. Após alguns dias, quando o concreto atinge a cura e resistência mínima para sua sustentação, é preciso fazer a desforma, que demanda de mão de obra para retirar as escoras, as formas e limpá-las para reutilização, que também demandará de custo com transporte e estocagem.

Tendo em vista que existem pontos negativos e perda de produção na execução de edificações em concreto armado, fez-se necessário buscar por melhorias nos sistemas construtivos, visando obter maior rapidez de execução, economia de materiais e empreendimentos de menor custo, utilizando de mão de obra especializada para proporcionar agilidade e aumento da produção.

Um modelo construtivo que surgiu no final do século passado e desde então vem cada vez mais sendo utilizado em construções de pontes e edifícios são as estruturas mistas de aço e concreto. Esse sistema estrutural possui diversas vantagens econômicas e construtivas, quando comparados com os demais sistemas. Como notado por Monier em 1875 (apud [2]) ao conceber a primeira construção em concreto armado, o concreto apresenta ótima resistência à compressão, além de resistência ao fogo e à corrosão. Por outro lado, o aço resiste muito bem a esforços de tração e cisalhamento até mesmo em pequenas seções, resultando em redução do peso próprio da estrutura, principalmente quando comparado às estruturas de concreto. Dessa forma, o sistema de estruturas mistas traz grandes benefícios na execução de uma estrutura por possuir velocidade, qualidade e redução do desperdício de materiais.

Formalmente, sistemas mistos de aço e concreto são aqueles em que um perfil de aço trabalha em conjunto com concreto (geralmente armado) na resistência aos esforços, reduzindo o consumo de concreto quando comparado às estruturas puramente de concreto.

Os elementos mistos podem vencer grandes vãos, sendo possível construir a estrutura sem a necessidade de escoramento para diversas condições de geometria e carregamento, diminuindo assim o custo, tempo e mão de obra para essa construção. Esse tipo de construção também possui outras vantagens, como mão de obra reduzida, menor prazo de execução e redução de resíduos. Dessa forma, a perda se torna menor e o canteiro de obras fica mais limpo, o que pode ser uma excelente saída para obras em pequenos terrenos.

Pelo fato de as fôrmas de uma laje mista do tipo *Steel Deck* serem de aço, elas assumem funções distintas no processo de construção e ao longo da vida útil da estrutura. Na etapa de construção, funcionam como fôrmas para o concreto e na etapa de utilização, entram no cálculo da resistência da estrutura como armadura positiva da laje, possibilitando a eliminação ou redução das barras de aço de armadura. Geralmente, somente as fôrmas de aço trabalhando como armadura positiva são suficientes para resistir os esforços de tração.

Nota-se uma tendência no mercado da engenharia pela utilização de métodos de construção que proporcionem diminuição no custo, tempo e emissão de CO₂ dos empreendimentos. Além disso, tem sido comprovado que as estruturas mistas são eficientes, sem perder a resistência, segurança e tempo de vida útil. Essa técnica de construção se mostrou compatível com o mercado, podendo ser utilizada em pequenas, médias e grandes obras. Porém, o dimensionamento e validação dessas estruturas necessita de uma série de verificações, sendo necessário efetuar cálculos para as fases de construção e de serviço, ou seja, antes e após a cura do concreto.

Por ser um tipo de construção pouco utilizado no Brasil, há um número menor de especialistas e projetistas nessa área, além do fato de *softwares* voltados para o dimensionamento estrutural não estarem totalmente preparados para o dimensionamento de elementos mistos.

Neste trabalho, uma ferramenta computacional foi elaborada para cálculo de pisos mistos de aço e concreto, contemplando as verificações dos estados limites últimos e de serviço, com ênfase no estado-limite de vibração excessiva devido à atividade do caminhar humano, visando automatizar o processo de verificação estrutural. A implementação de ferramentas computacionais de uso acadêmico e profissional que auxiliem no cálculo e dimensionamento de pisos mistos é importante porque contribui para a difusão do uso de sistemas estruturais mais eficientes.

Adicionalmente, abordagens sobre a verificação de vibrações em pisos mistos devido à atividade humana do caminhar são escassas na literatura nacional, porém recentemente o Projeto de Revisão NBR 8800 [3] incorporou um anexo detalhado para essa verificação, e este foi utilizado neste trabalho. Assim, o presente trabalho serve também como instrumento importante para divulgação e emprego das normas nacionais.

2 PISO MISTO DE AÇO E CONCRETO

“Denomina-se sistema misto aço-concreto àquele no qual um perfil de aço (laminado, soldado ou formado a frio) trabalha em conjunto com o concreto (geralmente armado), formando um pilar misto, uma viga mista, uma laje mista ou uma ligação mista” [4].

O surgimento das estruturas mistas está estritamente relacionado ao desenvolvimento econômico, técnico e científico. Com a intenção de aproveitamento de propriedades específicas de cada material, tanto no quesito estrutural, quanto no quesito construtivo, a combinação de perfis metálicos com concreto tornou-se prática comum nos países europeus e cresce no Brasil de modo modesto [5].

Os pisos mistos são compostos pelos seguintes elementos (Figura 1).

- Viga de aço;
- Conector de cisalhamento;
- Forma de aço (*steel deck*);
- Armadura em malha soldada;
- Concreto.

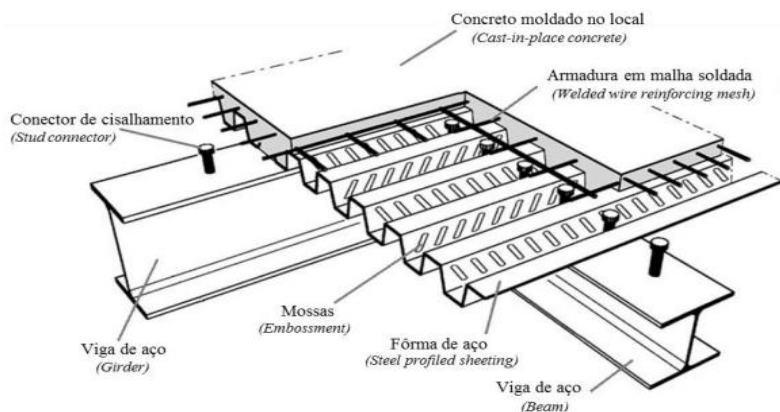


Figura 1. Laje mista de aço e concreto.

Fonte: Crisinel e O'leary [6].

Os conectores de cisalhamentos são extremamente importantes para haver a interação entre a laje mista e o perfil de aço. Na interface é preciso haver conectores, como os conectores tipo pino com cabeça (stud bolts).

As fôrmas de aço são compostas por aço galvanizado com espessuras de 0,80 mm a 1,25 mm e comprimento de até 12 metros. Possuem dupla funcionalidade, pois atuam como formas antes da concretagem e como parte do sistema estrutural como armadura positiva após a concretagem. A NBR 16421 [7] ressalta que as chapas de aço devem ser revestidas com uma massa de revestimento zincada, com e sem pintura, de no mínimo 275 g/m².

Segundo a NBR 6118 [8], estruturas de concreto armado devem possuir um revestimento de espessura mínima de 20 a 50 mm, a depender do tipo de agressividade do ambiente onde a estrutura se encontra, para a proteção de armaduras contra ataques físicos e químicos. Nas estruturas construídas em laje mista, as fôrmas de aço ficam expostas na parte inferior da laje. Por isso a importância do revestimento preconizado na NBR 16421 [7], para suprir a falta do revestimento de concreto nesse tipo de estrutura.

As fôrmas de aço devem conter mossas para melhorar a aderência do concreto com a chapa. As mossas desempenham um papel importante na estrutura, pois elas, assim como os conectores, contribuem na aderência do concreto e transmitem os esforços de cisalhamento devido à flexão. O sistema estrutural de laje mista ainda possui uma malha de tela soldada que previne a aparição de trincas na superfície da laje. Além disso, pode atuar como parte da armadura positiva da estrutura, junto às fôrmas de aço, garantindo uma maior resistência do piso. Para certos casos, onde houver esforços de momento negativo, pode ser empregado o uso de armadura negativa para absorvê-los.

Para o concreto, pode-se utilizar o produto convencional, não há a necessidade de nenhuma alteração, tendo apenas que trazer resistência mínima calculada pelo projetista. Para maior facilidade, pode-se utilizar concretos autoadensáveis para melhorar a fluidez e por consequência, o preenchimento das formas.

2.1 Dimensionamento de lajes mistas

O dimensionamento das lajes mistas deve envolver obrigatoriamente as fases de construção (inicial) e de utilização (final). Desta forma, na fase inicial, ou seja, antes do concreto atingir 75% de sua resistência à compressão, a fôrma de aço deve resistir isoladamente às ações permanentes e a sobrecarga de construção [9].

O dimensionamento deve partir da premissa básica que não haja um deslizamento do concreto em relação à fôrma de aço, a qual deve transmitir o esforço cisalhante longitudinal na interface entre os dois materiais estruturais. Desta forma, a simples aderência entre aço e concreto não deve ser considerada efetiva para garantir o comportamento misto da laje. Assim, a transmissão de esforço de cisalhamento longitudinal entre as partes fica atrelada às mossas e conectores de cisalhamentos citados anteriormente.

Para balizar o dimensionamento e funcionamento das lajes mistas, a NBR 8800 [9] preconiza uma série de disposições construtivas a serem obedecidas, bem como a NBR 16421 [7] lista requisitos mínimos de fabricação das fôrmas de aço, como espessura e galvanização, entre outros requisitos.

Quanto ao dimensionamento na etapa (fase) de construção, segundo a NBR 8800 [9], durante a fase inicial, deve-se levar em consideração as solicitações de peso próprio dos componentes da construção, sobrecarga de construção e efeito de empoçamento do concreto fresco, caso exista, e utilizar as combinações últimas de construção seguindo os coeficientes de majoração e ponderação adequados com base na NBR 14762 [10] para verificar os estados limites últimos referentes a momento fletor e a força cortante de cálculo.

Quanto ao estado limite de serviço, o Anexo Q da NBR 8800 [9] solicita a verificação do deslocamento máximo da fôrma de aço sob a ação dos pesos próprios e o peso do concreto (excluindo-se a sobrecarga de construção).

Para o dimensionamento na etapa (fase) de utilização, que abrange o comportamento misto da estrutura, a NBR 8800 [9] descreve em seu Anexo Q os cálculos necessários para a determinação dos esforços resistentes de cálculo. Quanto aos estados limites últimos, a norma prevê a verificação da laje mista devido o momento fletor positivo e negativo (em caso de continuidade sobre apoios intermediários) devido às solicitações verticais, quanto ao cisalhamento longitudinal causado pela tendência do deslizamento do concreto em relação à fôrma de aço, quanto ao cisalhamento vertical da seção mista, além do efeito de punção proveniente de cargas concentradas no vão. No tocante aos estados limites de serviço, a norma preconiza que devem ser verificados a fissuração do concreto nas regiões de momento negativo, além do deslocamento vertical.

Quanto as combinações de ações, deve-se considerar todo carregamento possível sustentado pelo sistema de aço e concreto. As combinações últimas de ação devem ser calculadas considerando os valores dos coeficientes de ponderação das ações e os fatores de combinação e de redução para as ações variáveis de acordo NBR 14762 [10].

Geralmente, as verificações contidas neste item são realizadas pelos fabricantes das fôrmas de aço, que apresentam um catálogo técnico de dimensionamento do produto. Devido à necessidade de abranger as normas vigentes, entende-se que tais catálogos englobam todas as verificações e requisitos mencionados anteriormente.

2.2 Dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto

O dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto é regido pela NBR 8800 [9], especificamente o Anexo O (Vigas mistas de aço e concreto). A referida norma salienta que as vigas podem ser biapoiadas, contínuas ou semicontínuas.

Além disso, conforme o comprimento do vão e o carregamento, as vigas mistas podem receber ou não escoramento, já que a seção mista só é acionada após a cura do concreto. Tanto antes quanto depois da cura do concreto, as vigas devem ser verificadas quanto aos estados limites últimos relativos a momentos fletores e força cortante e quanto ao estado limite de serviço de flecha excessiva.

Na fase anterior a cura do concreto, as verificações ocorrem considerando os perfis metálicos resistindo a todos os esforços solicitantes, se a viga não for escorada. Na fase após a cura do concreto, considera-se o comportamento misto da estrutura. Todas as verificações devem ser realizadas de acordo com a NBR 8800 [9].

Para o dimensionamento, é necessário compreender de qual maneira a viga mista se comportará em relação ao grau de interação da ligação aço e concreto. É possível dimensioná-las por dois tipos de análises: método elástico simplificado e método plástico. O método plástico leva em conta a última resistência dos materiais, sendo esse o método utilizado para o dimensionamento das vigas mistas de alma compacta. O método elástico simplificado é recomendado nos casos em que as tensões devem ser limitadas para não ocorrer a flambagem da alma como nas vigas de alma semi-compacta.

2.3 Vibrações devidas à atividade humana

Segundo Murray *et al.* [11] a verificação do estado limite de serviço de vibrações excessivas é uma etapa importante no projeto de estruturas de piso em aço, escadas, pontes de pedestres (passarelas), estádios e ocupações projetadas em piso misto.

As especificações de projeto modernas, juntamente com a fabricação de aços e concretos cada vez mais resistentes, permitem a execução de estruturas cada vez mais leves. A utilização de tais estruturas viabilizam a execução de passarelas mais longas e esbeltas, arquibancadas de estádio com balanços mais longos. Esses avanços são de grande importância para a concepção de estruturas, visto a diminuição da parcela referente ao peso próprio das estruturas em relação às cargas solicitantes. Por outro lado, segundo Murray *et al.* [11], pisos mais leves resultam em

um aumento das vibrações do piso e como resultado, a verificação da vibração devida à atividade humana passa a ser essencial no projeto estrutural.

Atualmente, a NBR 8800 [9] apresenta em seu Anexo M denominado “Vibrações em pisos” informações sobre o tema. São apresentados apenas critérios de aceitabilidade da vibração em pisos devido às atividades humanas normais, bem como uma avaliação baseada em uma simples análise do deslocamento vertical dos pisos. Essa simples avaliação não se mostra ideal para um tema complexo e importante como a verificação de vibração de pisos para a concepção de estruturas.

Entretanto, o Anexo I do Projeto de Revisão NBR 8800 [3] apresenta um método para avaliação da resposta de pisos à excitação provocada pelo caminhar de pessoas para pisos com geometria regular e carregamento que possa ser considerado uniformemente distribuído.

Além disso, o *Steel Design Guide 11* [11] também apresenta um método de cálculo para a verificação da vibração de pisos mistos devido às ações humanas normais. Se comparados, os métodos de cálculo apresentados no Anexo I do Projeto de Revisão NBR 8800 [3] e no *Steel Design Guide 11* [11] mostram-se semelhantes, sendo ambos devidamente elucidados a seguir.

2.3.1 Critérios de aceitabilidade da resposta da estrutura

Segundo o *Steel Design Guide 11* [11], a reação das pessoas que sentem a vibração depende muito do que estão fazendo. Pessoas em escritórios ou residências se incomodam com uma vibração “minimamente perceptível” (aceleração de pico acima de 0,5% da aceleração da gravidade), enquanto pessoas que participam de qualquer atividade aceitam vibrações 10 a 30 vezes maiores (5% a 15% da gravidade).

A sensibilidade dentro de cada ocupação também varia com a duração da vibração e o afastamento da fonte. Nota-se que esses limites são para frequências de vibração entre 4 e 8 Hz, que é a faixa de frequências de ressonância dos órgãos internos humanos. Fora dessa faixa de frequência, as pessoas aceitam acelerações mais altas, assim como mostra a Figura 2 a seguir.

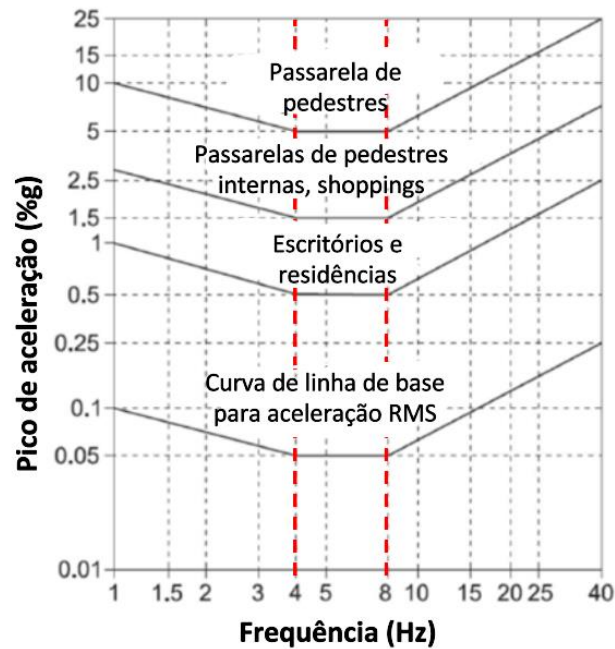


Figura 2. Limites de tolerância recomendada para o conforto humano
Fonte: Murray *et al.* [11]

Os limites de aceleração recomendados pelo *Steel Design Guide 11* [11] são de 0,5% da aceleração da gravidade para pisos mistos de escritórios, residências, escolas, igrejas e similares. Já para shoppings e passarelas a tolerância é 1,5% da aceleração da gravidade.

Segundo o Projeto de Revisão NBR 8800 [3], a estrutura do piso é considerada adequada ao estado-limite de conforto dos usuários relativamente ao caminhar de pessoas, se a resposta da estrutura, medida em termos da aceleração de pico ou do valor eficaz da aceleração, for igual ou inferior aos limites apresentados na Tabela 1, em função da ocupação do piso.

Tabela 1. Critério de aceitabilidade para diferentes tipos de ocupação

Critérios de aceitabilidade		
Ocupação	Aceleração de pico limite (m/s ²)	Fator de resposta limite
Escritórios	0,05	8
Escolas ^a	0,05	8
Área de circulação de público de centros comerciais (“mall”), de aeroportos, rodoviárias e assemelhados	0,15	24
Centros comerciais e lojas em geral	0,05	8
Garagens e escadas externas	0,15	24
Passarelas e escadas externas	0,2	32
Residências e hotéis	0,05	8
Hospitais – Salas de atendimento, internação e apartamentos	0,025 a 0,05 ^b	4 a 8 ^b
Hospitais – Salas de cirurgia e laboratórios ^c	0,006 a 0,012 ^d	1 a 2 ^d

^a Salas de aula e áreas comuns;

^b A ser avaliada conforme a sensibilidade dos pacientes; para locais onde são internados pacientes cuja condição ou tratamento conduz a uma maior sensibilidade a movimentos, utilizar o menor valor limite;

^c Salas de cirurgia e laboratórios convencionais; para outras situações, como centros cirúrgicos especializados ou com equipamentos eletrônicos sensíveis e laboratórios de precisão;

^d A ser avaliada conforme o tipo de cirurgia e exames; salas de cirurgia e laboratórios onde são realizados procedimentos que requerem maior precisão, utilizar o menor valor limite.

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas [3]

Nota-se que o Projeto de Revisão NBR 8800 [3] apresenta limites para uma vasta lista de ocupações, se comparado com o *Steel Design Guide* 11 [11].

2.3.2 Cálculo da frequência fundamental ou natural dos pisos mistos

Para Murray *et al.* [11], pisos mistos são tipicamente sistemas bidirecionais que podem ter vários modos de vibração com frequências estreitamente espaçadas que são difíceis de prever com precisão usando qualquer método atual. Alguns fatores que são difíceis de incorporar na análise são a ação mista, as condições de contorno e descontinuidade, as repartições, os componentes não estruturais e a rigidez das extremidades dos membros. No entanto, o modo fundamental que geralmente fornece a maior parte da resposta total e a frequência natural fundamental podem ser calculados com bastante precisão.

O *Steel Design Guide* 11 [11] indica que a frequência natural (f_0), dada em Hz, do modo fundamental é estimada considerando o piso misto composto por vigas secundárias e vigas

primárias separadamente e depois combinando-os, como apresentado na equação a seguir (Equação 1).

$$f_0 = 0,18 \sqrt{\frac{g}{\delta_b + \delta_p}} \quad (1)$$

Onde g é a aceleração da gravidade (m/s^2), δ_b a flecha máxima das vigas secundárias (m) e δ_p a flecha máxima das vigas principais (m).

Analogamente, o Projeto de Revisão NBR 8800 [3] prevê a Equação 2 para o cálculo da frequência fundamental dos pisos mistos, considerando δ como a flecha máxima do piso, usada em milímetros na equação.

$$f_0 = \frac{18}{\sqrt{\delta}} \quad (2)$$

O *Steel Design Guide 11* [11] e o Projeto de Revisão NBR 8800 [3] limitam a frequência natural como um critério de aceitabilidade dos cálculos entre 3 e 9 Hz. Além disso, a determinação da frequência natural do piso é importante para o cálculo da aceleração de pico do mesmo, conforme explicado a seguir.

2.3.3 Cálculo da massa modal dos pisos mistos

Outro fator importante para a determinação da aceleração de pico dos pisos mistos é a determinação da sua massa modal. O *Steel Design Guide 11* [11] divide o cálculo da massa modal (M) no cálculo da massa modal suportada pelas vigas secundárias (M_b) e pelas vigas principais (M_p). A massa modal suportada pelas vigas secundárias é dada pela Equação 3 a seguir.

$$M_b = 1,5w_b B_b L_b \quad (3)$$

Sendo w_b o peso suportado pela viga secundária, incluindo seu peso próprio, dado em força por unidade de área, L_b como o comprimento das vigas secundárias e B_b como a largura colaborante ou efetiva das vigas secundárias.

Para a determinação do peso suportado pelas vigas e conseqüentemente pelos pisos, o *Steel Design Guide 11* [11] recomenda a adição de uma sobrecarga devido ao caminhar humano sobre o piso. O valor dessa sobrecarga depende do tipo de ocupação para qual a edificação será destinada, sendo igual a 0,53 kN/m² para escritórios com papéis, de 0,29 a 0,38 kN/m² para escritórios com computadores e 0,29 kN/m² para residência. Não são previstas sobrecarga adicional devido ao caminhar humano para outras ocupações abordadas pela análise de verificação de vibração do *Steel Design Guide 11* [11].

A largura colaborante ou efetiva das vigas secundárias (B_b) pode ser calculada utilizando a Equação 4.

$$B_b \leq \begin{cases} k_b \left(\frac{I_s}{D_b}\right)^{0,25} L_b = k_b \left(\frac{I_s b}{I_b}\right)^{0,25} L_b \\ \frac{2}{3} n_p L_p \end{cases} \quad (4)$$

Onde k_b é igual a 2,0 para vigas secundárias internas ou 1,0 para vigas secundárias de borda; I_s é o momento de inércia por unidade de largura da laje, dividido pela razão modular $\alpha_E = E_a/1,35E_c$; $D_b = I_b/b$, onde I_b é o momento de inércia da viga mista secundária e b é o espaçamento entre elas; n_p é a quantidade de vãos entre vigas principais; e L_p é o comprimento das vigas principais.

Analogamente, a massa modal ou peso efetivo suportado pelas vigas principais (M_p) é dada pela Equação 5 a seguir.

$$M_p = 1,5w_p B_p L_p \quad (5)$$

Sendo w_p o peso suportado pela viga principal, incluindo o peso próprio (Força por unidade de área); L_p é o comprimento das vigas principais; e B_p a largura colaborante ou efetiva das vigas principais.

Para o caso das vigas principais, a determinação do peso suportado pode se dar simplificada somando o peso próprio das vigas principais com as cargas atuantes referentes as vigas secundárias. Já a determinação da largura colaborante ou efetiva das vigas principais (B_p) é realizada utilizando a Equação 6.

$$B_p \leq \begin{cases} k_p \left(\frac{I_s}{D_p}\right)^{0,25} L_p = k_p \left(\frac{I_s L_b}{I_p}\right)^{0,25} L_p \\ \frac{2}{3} n_b L_b \end{cases} \quad (6)$$

Onde k_p é igual a 1,8 em caso de utilização de conectores de cisalhamento e 1,6 se não; I_s é o momento de inércia por unidade de largura da laje, dividido pela razão modular $\alpha_E = E_a/1,35E_c$ (E_a é o modulo de elasticidade do aço e E_c o modulo de elasticidade do concreto); $D_p = I_p/L_b$, onde I_p é o momento de inércia da viga mista principal e L_b o comprimento das vigas secundárias; e n_b é a quantidade de vãos entre vigas secundárias.

Por fim, a massa modal do piso misto como um todo pode ser calculada combinando as massas modais determinadas para as vigas secundárias e principais. A combinação deve ser realizada de acordo com a Equação 7.

$$M = \frac{\delta_b}{\delta_b + \delta_p} M_b + \frac{\delta_p}{\delta_b + \delta_p} M_p \quad (7)$$

Onde as flechas máximas das vigas secundárias e principais podem ser calculadas pelas Equações 8 e 9.

$$\delta_b = \frac{5w_b L_b^4}{384E_a I_b} \quad (8)$$

$$\delta_p = \frac{5w_p L_p^4}{384E_a I_p} \quad (9)$$

Caso a largura colaborante ou efetiva das vigas secundárias (B_b) seja maior que o comprimento das vigas principais (L_p), deve-se reduzir a flecha máxima da viga secundárias pelo maior valor entre 0,5 e L_p/B_b .

A NBR 8800 (ABNT, 2022) apresenta uma metodologia um tanto quanto similar ao *Steel Design Guide* 11 [11] para a determinação da massa modal, porém com suas peculiaridades. No Projeto de Revisão NBR 8800 [3], a massa modal pode ser avaliada a partir de uma área efetiva de participação do piso de acordo com dois modos. O Modo A, onde o piso é controlado pela rigidez das vigas secundárias e o Modo B, onde o piso é controlado pela rigidez conjunta das vigas secundárias e principais, conforme apresentado na Figura 3.

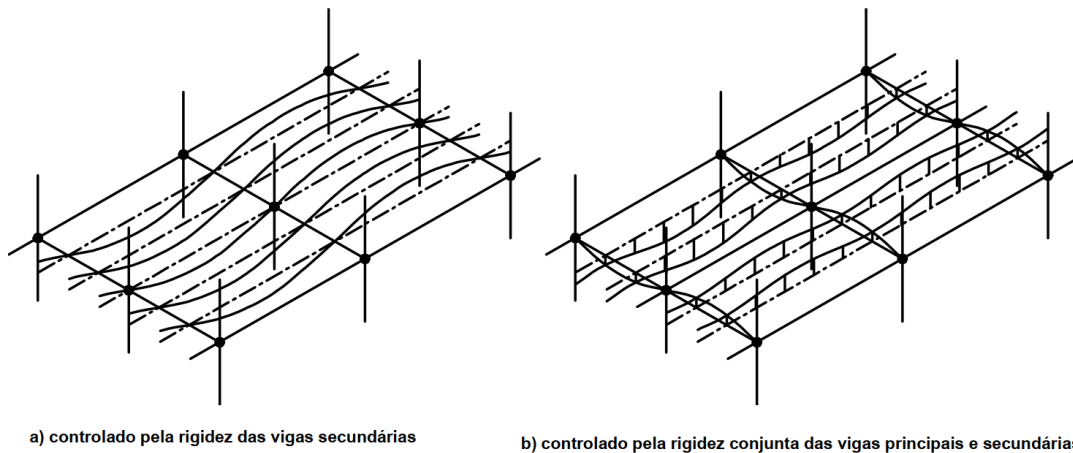


Figura 3. Modos de vibração do piso segundo o Projeto de Revisão ABNT NBR 8800:2022
Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas [3]

A massa modal do piso, partindo-se do Modo A onde piso é controlado pela rigidez das vigas secundárias, pode ser calculada a partir da Equação 10.

$$M = M_A = M_b = 0,5mL_b B_b \quad (10)$$

Onde m é a massa uniformemente distribuída sobre o piso em força por unidade de área.

O cálculo da massa uniformemente distribuída sobre o piso, segundo a metodologia do Projeto de Revisão NBR 8800 [3], não considera qualquer sobrecarga adicional devido ao caminhar humano sobre o piso. Entretanto, deve-se utilizar a combinação frequente de serviço. No caso específico de análise de vibrações decorrentes do caminhar de pessoas, devem-se tomar os fatores de redução ψ_1 e ψ_2 iguais a 0,1. Em alguns casos, entretanto, esses valores devem ser tomados iguais a zero, como no caso de garagens, escadas, passarelas e áreas de circulação de público de centros comerciais, de aeroportos, rodoviárias e assemelhados.

A largura colaborante ou efetiva das vigas secundárias (B_b) pode ser calculada utilizando a Equação 4 demonstrada anteriormente, sendo k_b igual a 1,0 para vigas de borda de laje não

conectadas à fachada, e 2,0, nos demais casos. Além disso, I_s é o momento de inércia por unidade de largura da laje dividido pela razão modular $\alpha_E = E_a/E_c$, sendo o módulo de elasticidade do concreto tomado igual a 38 GPa para concretos de densidade normal, e 22 GPa para concretos de baixa densidade, segundo o Projeto de Revisão NBR 8800 [3].

Para o cálculo da massa modal do piso misto seguindo o Modo B, controlado pela rigidez conjunta das vigas secundárias e principais, calcula-se primeiramente a massa modal suportado pelas vigas secundárias (M_b) de acordo com o Modo A, explicado anteriormente, e segue-se com o cálculo da massa modal suportado pelas vigas principais (M_p), a partir da Equação 11 apresentada a seguir.

$$M_p = 0,5mL_pB_p \quad (11)$$

A largura colaborante ou efetiva das vigas principais internas (B_p) é dada pela Equação 12.

$$B_p \leq \begin{cases} 1,8L_p \left(\frac{I_bL_b}{I_p b} \right)^{0,25} \\ \frac{2}{3}n_bL_b \end{cases} \quad (12)$$

Enfim, a massa modal do piso no Modo B é dada pela Equação 13.

$$M = M_B = \frac{\delta_b}{\delta_b + \delta_p} M_b + \frac{\delta_p}{\delta_b + \delta_p} M_p \quad (13)$$

Sendo a flecha máxima referente a viga secundária (δ_b) e a flecha máxima referente a viga principal (δ_p) dadas pelas Equações 14 e 15.

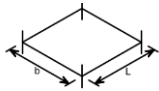
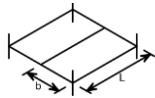

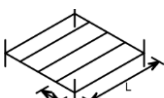
$$\delta_b = \frac{mgbL_b^4}{384E_aI_b} \quad (14)$$

$$\delta_p = \begin{cases} k \frac{mgbL_bL_p^3}{48E_aI_p}, & \text{para } n_e = 2 \\ k \frac{23mgbL_bL_p^3}{648E_aI_p}, & \text{para } n_e = 3 \\ k \frac{5mgbL_bL_p^4}{384E_aI_p}, & \text{para } n_e \geq 4 \end{cases} \quad (15)$$

Onde g é a aceleração da gravidade em m/s^2 ; n_e é o número de espaçamentos das vigas secundárias em relação à viga principal; e k dado por $0,5 \leq k = L_p/B_p \leq 1,0$.

Ademais, o deslocamento total do piso (δ), importante para a definição da frequência fundamental do sistema, pode ser determinado seguindo as Equações 16 a 22 presentes na Tabela 2 de acordo com cada modo considerado, sendo n_e o número de espaçamentos das vigas secundárias em relação à viga principal.

Tabela 2. Cálculo dos deslocamentos do piso

Arranjo das lajes de piso	n_e	Modo A	Modo B
	1	$\delta = \frac{mgb}{384E} \left(\frac{5L_b^4}{I_b} + \frac{b^3}{I_s} \right)$ (16)	---
	2	$\delta = \frac{mgb}{384E} \left(\frac{5L_b^4}{I_b} + \frac{b^3}{I_s} \right)$ (17)	$\delta = \frac{mgb}{384E} \left(\frac{8n_e^3 b^3 L_b}{I_p} + \frac{L_b^4}{I_b} + \frac{b^3}{I_s} \right)$ (20)
	3	$\delta = \frac{mgb}{384E} \left(\frac{5L_b^4}{I_b} + \frac{b^3}{I_s} \right)$ (18)	$\delta = \frac{mgb}{384E} \left(\frac{368n_e^2 b^3 L_b}{27I_p} + \frac{L_b^4}{I_b} + \frac{b^3}{I_s} \right)$ (21)
	4 ou mais	$\delta = \frac{mgb}{384E} \left(\frac{5L_b^4}{I_b} + \frac{b^3}{I_s} \right)$ (19)	$\delta = \frac{mgb}{384E} \left(\frac{5n_e^4 b^3 L_b}{I_p} + \frac{L_b^4}{I_b} + \frac{b^3}{I_s} \right)$ (22)

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas [3]

2.3.4 Determinação da aceleração de pico dos pisos e fator de resposta

Conforme citado anteriormente, a aceleração de pico dos pisos causada pela ação normal humana é um fator importante para a verificação de vibração dos pisos mistos. A determinação da aceleração de pico, dada em porcentagem da aceleração da gravidade, de acordo com o *Steel Design Guide 11* [11], pode ser determinada pela Equação 23.

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_0 e^{-0,35f_0}}{\beta M} \quad (23)$$

Onde β é a razão de amortecimento crítico do piso e P_0 é o força motriz, ambos definidos de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3. Valores de razão de amortecimento e força motriz de acordo com o tipo de ocupação

Tipo de edificação	β	P_0 (kN)
Igrejas	0,02	0,29
Shoppings	0,02	0,29
Escritórios c/ divisórias baixas	0,03	0,29
Escritórios c/ divisórias até teto	0,05	0,29
Residências	0,05	0,29
Passarelas	0,01	0,40

Fonte: Murray *et al.* [11]

A aceleração de pico encontrada deve ser igual ou inferior à aceleração de pico limite para o tipo de ocupação analisada, conforme citado no Item 2.3.1.

Analogamente, o Projeto de Revisão NBR 8800 [3] indica que a determinação da aceleração de pico dos pisos mistos deve ser realizada seguindo a Equação 24.

$$a_p = 0,55 \frac{P_0 e^{-0,35f_0}}{2M\beta} \quad (24)$$

Onde P_0 é indicado como o peso de uma pessoa, tomado igual a 750 N e M a massa modal do piso calculado pelo Modo A ou Modo B. Enquanto a razão de amortecimento crítico do piso (β) deve ser igual a 0,01 para escritórios convencionais, escolas, centros comerciais, lojas em geral, residências, hotéis e hospitais; 0,005 para escritórios corporativos, garagens, passarelas e escadas; e zero para área de circulação de público de centros comerciais (“mall”), de aeroportos, rodoviárias e assemelhados.

A aceleração de pico encontrada deve ser igual ou inferior à aceleração de pico limite para o tipo de ocupação analisada, conforme Tabela 1. Segundo o Projeto de Revisão NBR 8800 [3], a verificação também pode ser feita por meio da aceleração ponderada ($a_{w,rms}$) de acordo com a Equação 25.

$$a_{w,rms} = \frac{\zeta P_0}{2\sqrt{2}M\beta} W \quad (25)$$

Onde ζ é o coeficiente dinâmico que deve ser tomado igual a 0,15 para frequência fundamental igual ou inferior a 5,0 Hz e igual a 0,10 nos demais casos; W é o fator de ponderação da aceleração (adimensional), em função da frequência fundamental, que deve ser tomado igual a 1,0 para frequência $4 \text{ Hz} \leq f_0 \leq 8 \text{ Hz}$; Igual a $0,5\sqrt{f_0}$ para $f_0 < 4 \text{ Hz}$; E igual a $8/f_0$ para $f_0 > 8 \text{ Hz}$.

A partir da aceleração ponderada, calcula-se o Fator de resposta (R) pela Equação 26.

$$R = \frac{a_{w,rms}}{0,005} \quad (26)$$

O fator de resposta encontrado deve ser igual ou inferior ao fator de resposta limite para o tipo de ocupação analisada, conforme Tabela 1.

3. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Com o objetivo de criar uma ferramenta prática e versátil para dimensionar pisos construídos em lajes e vigas mistas de aço e concreto, elaborou-se uma planilha de cálculo que, além da verificação dos estados limites últimos de momento fletor e esforço cortante e verificação do estado limite de serviço de flecha conforme a NBR 8800 [9], também verifica o estado limite de vibração excessiva em pisos mistos devido ao caminhar humano pelos critérios do Projeto de Revisão NBR 8800 [3] e do *Steel Design Guide 11* [11].

3.1 Dados de entrada

Para a utilização da planilha de cálculo, o usuário deve fornecer os seguintes dados de entrada:

A. Geometria da laje (módulo)

Neste campo da planilha, o usuário define a geometria da laje mista que ele deseja dimensionar. Para isso ele deve fornecer o comprimento e largura do piso, ambos em metros; a quantidade de vigas secundárias e primárias presentes no piso; a altura da laje mista em centímetros e a flecha limite desejada, como mostra a Figura 4.

A. DADOS DE ENTRADA		
A.1) Geometria do módulo		
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	VALOR
Comprimento	L_M	7,50 m
Largura	B_M	7,50 m
Quantidade de vigas secundárias	N_{vs}	2
Quantidade de vigas principais (Considerando todo o sistema)	N_{vp}	3
Espessura da chapa de aço do Polydeck 59S	t_F	0,95 mm
Altura da laje mista	h_{LM}	15 cm
Flecha limite	δ_{lm}/L	1/350
Tipo de construção para análise de vibração (Steel Design Guide 11 - 2ª Edition)		Caso 4 - ESCRITÓRIOS C/ DIVISÓRIAS ATÉ TETO
Tipo de construção para análise de vibração (ABNT 8800:2022 - Anexo I)		Caso 1 - ESCRITÓRIOS CONVENCIONAIS E ESCOLAS

Figura 4. Dados de entrada quanto a geometria da laje (contorno em verde).

Fonte: Autores (2023)

O usuário deve escolher ainda a espessura da forma de aço Polydeck 59S [12] dentre as opções de espessura disponibilizadas no catálogo técnico da Perfilar ArcelorMittal (0,8 mm, 0,95 mm ou 1,25 mm) e o tipo de construção para análise de vibração de acordo com o *Steel Design Guide* 11 [11] e de acordo com o Anexo I do Projeto de Revisão NBR 8800 [3].

B. Propriedades dos materiais

Como o nome já diz, neste campo da planilha, o usuário deve fornecer os dados referente as propriedades mecânicas dos materiais que compõem a laje mista (Figura 5), como a resistência ao escoamento dos aços das vigas (primárias e secundárias), das formas Polydeck 59S [12], das telas antifissuração e dos conectores de cisalhamento. A resistência à ruptura do aço do conector de cisalhamento e a resistência característica do concreto à compressão também deve ser informadas. Todos os dados são inseridos na unidade kN/cm^2 (Quilonewton por centímetro quadrado).

Além disso, o usuário deve determinar o tipo de agregado utilizado na fabricação do concreto, sendo as opções: basalto/diabásio, granito/gnaiss, calcário e arenito. Por fim, o usuário deve inserir o coeficiente dos efeitos de longa duração para o cálculo das flechas nas vigas mistas, de acordo com a Figura 5.

A.2) Propriedades dos materiais		
DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	VALOR
Tensão de escoamento das vigas (primárias e secundárias)	f_y	35,0 kN/cm ²
Tensão de escoamento da forma do Polydeck 59S	f_{yF}	28,0 kN/cm ²
Tensão de escoamento do aço das telas	f_{yT}	60,0 kN/cm ²
Tensão de escoamento do conector de cisalhamento	f_{ych}	41,5 kN/cm ²
Tensão de ruptura do conector de cisalhamento	f_{uch}	60,0 kN/cm ²
Resistência característica do concreto à compressão	f_{ck}	2,5 kN/cm ²
Agregado utilizado na fabricação do concreto	AG	Granito/gnaiss
Efeitos de longa duração - flecha nas vigas mistas	ELD	3

Figura 5. Dados de entrada das propriedades dos materiais (contorno em verde).

Fonte: Autores (2023)

C. Dimensões, propriedades e características das vigas de aço

Nesta etapa de dados de entrada da planilha de cálculo, devem ser fornecidos pelo usuário as dimensões geométricas, propriedades e características das seções dos perfis I utilizados como vigas primárias e secundárias, além de outras informações quanto ao processo de construção. Devem ser fornecidos: a altura da seção, a altura limite da viga mista, a espessura da alma do perfil, as larguras e espessuras das mesas inferior e superior.

Ademais, o usuário deve apontar o processo de execução do piso, se durante a construção as vigas serão escoradas ou não; o tipo de perfil de aço, entre soldado e laminado; e o grau de interação da viga mista, que deve ser obrigatoriamente maior que o grau de interação mínimo calculado para a viga mista.

Vale ressaltar que assim como o grau de interação mínimo da viga mista, os vãos das vigas primárias e secundárias e a altura da alma dos perfis utilizados já são calculados pela planilha.

D. Cargas distribuídas e coeficientes de ponderação

Na etapa de cargas distribuídas e coeficientes de ponderação, o usuário da planilha de cálculo deve inserir as cargas características que estão previstas para agir sobre a laje mista na etapa de construção e na etapa de utilização. as cargas distribuídas por área dos pesos próprios do Polydeck 59S [12] e da laje de concreto já são calculadas automaticamente pela planilha de cálculo, portanto, não é necessário que o usuário insira esses valores. Os cálculos dos pesos próprios são efetuados com base nas informações do peso próprio da fôrma do Polydeck 59S [12] e do consumo de concreto da laje mista, advindas do catálogo técnico do Polydeck 59S [12]. Além disso, a planilha também calcula automaticamente o peso próprio dos perfis de aço.

3.2 Dados de saída

Após a entrada de todos os dados necessários para a utilização da planilha de cálculo, explicitada no Item anterior 3.1, a planilha de cálculo retorna todos os resultados das verificações executadas.

A. Verificação do Polydeck 59S

A primeira verificação realizada pela planilha de cálculo é quanto à resistência da fôrma de aço utilizada no piso misto que está sendo dimensionado.

Logo após a apresentação da carga resistida pela fôrma de aço, calcula-se o índice de aproveitamento do Polydeck 59S [12], razão entre o valor do carregamento no piso (carga solicitante) pelo carregamento característico resistente suportado pelo Polydeck 59S [12]. Para que a estrutura seja segura, o índice de aproveitamento deve menor ou igual a 1,0 (um).

O índice de aproveitamento calculado indica o quão otimizado está o dimensionamento realizado. Quanto mais próximo de 1,0 (um), mais otimizado está o dimensionamento, e quanto mais perto de zero, menos otimizado está o dimensionamento. A partir daqui os índices de aproveitamento citados no texto e contidos na planilha de cálculo seguem a mesma lógica descrita acima.

Essa etapa de verificação da planilha de cálculo toma como base os valores de sobrecargas admissíveis úteis apresentados no catálogo técnico do Polydeck 59S [12], levando em consideração as diferentes espessuras do produto fornecidas ao mercado, os sistemas de apoios, a distância entre os vãos e a informação se a construção é escorada ou não.

B. Verificação das vigas secundárias (antes da cura)

Após a verificação do Polydeck 59S [12], é executada pela planilha de cálculo DIMENSIONAMENTO DE PISOS MISTOS_v.1.0 a verificação das vigas secundárias na fase de construção, ou seja, antes da cura do concreto.

A planilha de cálculo determina todas as propriedades geométricas do perfil de aço das vigas secundárias que serão necessárias para o desenvolvimento dos cálculos, a saber, área bruta da seção, momento de inércia em relação ao eixo X e Y, raio de giração em relação ao eixo X e Y, módulo de resistência elástico superior e inferior em relação ao eixo X, módulo de resistência plástico em relação ao eixo X e a constante de torção.

Posteriormente calculam-se as cargas uniformemente distribuídas que agem sobre a viga na fase de construção. A partir desses valores, determina-se o momento fletor solicitante máximo de cálculo sobre a viga secundária e a força cortante solicitante máxima de cálculo. Calculando-se o momento fletor resistente e a força cortante resistente, ambos de cálculo, fazem-se as verificações estruturais quanto ao momento fletor e força cortante. Para isso, calculam-se os índices de aproveitamento, que devem ser menores ou iguais a 1,0 (um).

C. Verificação das vigas secundárias (após a cura)

No próximo item da planilha de cálculo, faz-se a verificação das vigas secundárias na etapa de utilização da construção, ou seja, após a cura do concreto.

A verificação das vigas secundárias após a cura do concreto segue basicamente a mesma estrutura de cálculo da verificação das mesmas vigas na fase de construção, com exceção dos cálculos das propriedades geométricas do perfil de aço, que já são calculadas durante a verificação na fase de construção, e do cálculo das flechas das vigas, que não são calculadas para a fase de construção.

D. Verificação das vigas principais antes da cura e após a cura

A verificação das vigas principais na fase de construção (antes da cura do concreto) e na fase de utilização (após a cura do concreto) segue as mesmas premissas e formato das verificações das vigas secundárias. A única diferença é que as cargas solicitantes de cálculo sobre as vigas principais são cargas pontuais referentes aos apoios das vigas secundárias sobre as principais, somadas a carga uniformemente distribuída de cálculo referente ao peso próprio das vigas principais.

E. Verificação da vibração do piso misto segundo o *Steel Design Guide 11*

A verificação do estado de limite de vibrações excessivas devido ao caminhar humano no piso misto de acordo com o *Steel Design Guide 11* [11] se deu no piso como um todo em um único item na planilha de cálculo, diferente das verificações dos estados limites, que foram divididas em vigas secundárias e principais.

Primeiramente, para as vigas secundárias, determinou-se a sobrecarga recomendada para vibração devido ao caminhar de acordo com o tipo de edificação escolhida durante a entrada dos dados na planilha de cálculo e somaram-se as cargas atuantes sobre a viga secundária na fase de utilização. Posteriormente, determinou-se a razão modular dinâmica entre os módulos de elasticidade do aço do perfil e do concreto da laje, que serve para a continuação dos cálculos das vigas secundárias e primárias. Definida a razão modular, prosseguiu-se com o cálculo da flecha e frequência natural das vigas secundárias e do peso efetivo do painel sobre elas.

Para as vigas principais, assim como nas vigas secundárias, determina-se a flecha da viga, a frequência fundamental e seu peso efetivo. Nesse caso, as cargas que agem sobre as vigas principais são as cargas pontuais devido ao apoio das vigas secundárias somadas ao peso próprio das vigas principais.

A partir das flechas calculadas para as vigas secundárias e principais, é possível calcular a frequência natural do piso misto. Segundo Murray *et al.* [11], para o conforto humano, é ideal que a frequência natural da laje mista fique entre 3,0 e 9,0 Hz (Hertz). Caso a frequência natural do piso seja inferior a 3,0 Hz, o mesmo deve ser avaliado a partir de outras metodologias de cálculo.

As flechas das vigas secundárias e primárias, bem como o peso efetivo calculado para ambas as vigas são utilizados no cálculo do peso efetivo do piso misto. De posse dos valores de peso efetivo e da frequência natural do piso misto, é possível determinar a aceleração da vibração devido ao caminhar humano como uma fração da aceleração da gravidade. Tal valor deve ser menor que a aceleração máxima permitida para o tipo de edificação escolhida como fração da aceleração da gravidade. Por fim, calcula-se o índice de aproveitamento, dividindo-se a

aceleração da vibração encontrada pela aceleração da vibração máxima permitida. Nesse caso, o índice de aproveitamento deve ser menor ou igual a 1,0 (um).

F. Verificação da vibração do piso misto segundo o Anexo I do Projeto de Revisão NBR 8800 [3]

Assim como na verificação de vibração excessiva considerando o *Steel Design Guide 11* [11], a análise da vibração em pisos segundo o Anexo I do Projeto de Revisão NBR 8800 [3] também segue apresentado em um único item da planilha de cálculo.

Antes de iniciar de fato a verificação de vibração excessiva em piso mistos, seguindo o Projeto de Revisão NBR 8800 [3], calculou-se alguns dados importantes para a continuação da verificação. Primeiramente, definiu-se as cargas de projeto sobre a viga secundária, considerando as cargas permanentes e sobrecarga que agem sobre o piso misto por meio da combinação frequente de ações. Posteriormente, calculou-se a razão modular dinâmica entre os módulos de elasticidade do aço do perfil e do concreto da laje.

A seguir, procedeu-se o cálculo do momento de inércia da viga mista secundária, do momento de inércia da viga mista principal e do momento de inércia da laje por unidade de largura.

O Projeto de Revisão NBR 8800 [3] diz que a análise de vibrações excessivas em pisos mistos pode ser realizada a partir de dois modos, o Modo A (Piso controlado pela rigidez das vigas secundárias) e o Modo B (Piso controlado pela rigidez conjunta das vigas principais e secundárias).

Ambos os modos permitem calcular a carga modal do piso, o deslocamento, a frequência fundamental, a aceleração de pico do piso, o valor eficaz da aceleração ponderada e o seu fator de resposta.

O Anexo I do Projeto de Revisão NBR 8800 [3] é aplicado a pisos mistos com frequência fundamental entre 3 Hz e 9 Hz. Além disso, a norma diz que “para evitar que a estrutura de piso entre em ressonância com o primeiro harmônico do caminhar de pessoas, sua frequência natural não deve ser inferior a 3 Hz”. Portanto, a frequência fundamental do piso fica limitada a esses valores.

A aceleração de pico do piso e o seu fator de resposta são comparados com os valores máximos para cada tipo de edificação, dispostos no Anexo I do Projeto de revisão NBR 8800 [3].

3.3 Aplicabilidade e limitações da planilha

A planilha de cálculo permite que o usuário efetue o dimensionamento de lajes mistas com formas de aço do tipo Polydeck 59S [12], por meio de catálogos técnicos. O dimensionamento das vigas do piso é realizado considerando as verificações dos estados limites últimos de momento fletor e esforço cortante e do estado limite de serviço de flechas. Além disso, utilizando a ferramenta, verificam-se as vibrações excessivas no piso misto com base nos critérios de conforto humano.

Devido todas as complexidades que envolvem o dimensionamento de pisos mistos e a análise de vibração excessiva, é comum que considerações sejam feitas e condições de contorno sejam tomadas para possibilitar a automação dos cálculos. Tal fator causa limitações a planilha de cálculo, fazendo com que ela não possa se adequar a todas as situações possíveis. Na presente situação, as limitações são:

- Conforme explicitado no Item 3.2.A, a verificação da fôrma de aço realizada no item B da aba de dimensionamento da planilha de cálculo utiliza valores retirados do Catálogo Técnico do produto Polydeck 59S [12]. Por esse motivo a planilha se limita ao dimensionamento de pisos mistos construídos utilizando o Polydeck 59S [12]. Outros tipos de fôrmas metálicas disponíveis no mercado podem ser facilmente implementados à planilha de cálculo futuramente, desde que sejam implementados também os catálogos técnicos de dimensionamento dessas fôrmas metálicas, assim como feito com o catálogo do Polydeck 59S [12].
- Devido a fatores relacionados a implementação do cálculo de momento fletor máximo atuante e flecha máxima para vigas solicitadas por cargas pontuais, a quantidade de vigas secundárias é limitada a sete.
- Pensando sempre em dimensionar o caso mais crítico possível, as vigas são sempre consideradas internas. No caso das vigas secundárias isso acontece, pois, para o cálculo da largura de influência é sempre tomada a distância entre vigas adjacentes e não a metade dessa distância, como seria nos casos de vigas secundárias de borda. Para as vigas primárias, considera-se que as vigas secundárias apoiam sobre as primárias de ambos os lados. Isso faz com que as reações de apoio sejam multiplicadas por dois ao serem transmitidas às vigas principais.
- Considera somente cargas uniformemente distribuídas na superfície da laje para as verificações de cálculo dos estados limites últimos de momento fletor e esforço cortante, do estado limite de serviço de flecha e do estado limite de serviço de vibração excessiva.
- A altura da nervura da fôrma é fixada em 5,9 cm, de acordo com o padrão do Polydeck 59S [12] da Perfilar ArcelorMittal, utilizado na planilha de cálculo.
- A vibração excessiva nos pisos mistos fica restrita aos tipos de edificações previstas no Guia de Projeto de Murray *et al.* [11] e no Anexo I do Projeto de Revisão NBR 8800 [3].

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Devido à falta de exemplos numéricos na literatura, que contemplem a verificação de lajes mistas e vigas mistas secundárias e primárias, antes e depois da cura do concreto e ainda contenham a verificação de vibração excessiva em pisos mistos, fez necessário a elaboração e resolução manual de um exemplo numérico com todas essas verificações para realizar a validação da planilha de cálculo. Para a criação do exemplo, tomou-se como base o exemplo de aplicação de Fakury, Silva e Caldas [13]. Esse exemplo requer a verificação aos estados-limites

últimos causados pelo momento fletor e pela força cortante e ao deslocamento vertical (flecha). A partir do exemplo de aplicação citado, confeccionou-se o enunciado apresentado abaixo.

4.1 Exemplo de validação

O piso esquematizado da Figura 6 pertence a um edifício comercial de escritórios constituído por vigas mistas biapoiadas. A laje é mista, com fôrma Polydeck 59S [12] (aço galvanizado Z 275 estrutural ZAR 280) de 0,95 mm de espessura, altura total de 150 mm e concreto com resistência característica à compressão igual a 25 MPa e agregado graúdo de gnaisse.

Nessa laje, utilizou-se tela soldada Q-92 (barras com diâmetro de 4,2 mm, espaçadas de 150 mm) para evitar fissuras causadas por retração ou por variações de temperatura. Propôs-se para as vigas mistas secundárias internas V1 o perfil laminado W 310 x 28,3, em aço ASTM A 572 – Grau 50. E para as vigas principais V3 o perfil laminado W 410 x 85,0, em aço ASTM A 572 – Grau 50. Essas vigas são verificadas aos estados-limites últimos causados pelo momento fletor e pela força cortante e aos estados-limite de serviço de deslocamento vertical e vibração do piso. A construção não é escorada e pede-se para utilizar interação parcial, se possível. A flecha máxima admissível para vigas de piso é $L/350$ de acordo com a ABNT NBR 8800:2008.

Além dos pesos próprios, o piso deverá suportar um revestimento impermeabilizante com peso de $1,35 \text{ kN/m}^2$ e uma ação variável total de 5 kN/m^2 . Deve ser considerada, ainda, uma sobrecarga de construção de $1,0 \text{ kN/m}^2$.

Para a entrada de dados na planilha, considera-se:

- Peso específico do aço: $\gamma_a = 79,0 \text{ kN/m}^3$
- Peso específico do concreto armado: $\gamma_{conc,a} = 25 \text{ kN/m}^3$
- Peso do Polydeck 59S de 0,95 mm de espessura: $10,86 \text{ kgf/m}^2$
- Consumo de concreto para laje com 15,0 cm de espessura: $0,117 \text{ m}^3/\text{m}^2$

Mais informações sobre as lajes mistas podem ser obtidas do catálogo técnico do Polydeck 59S [12].

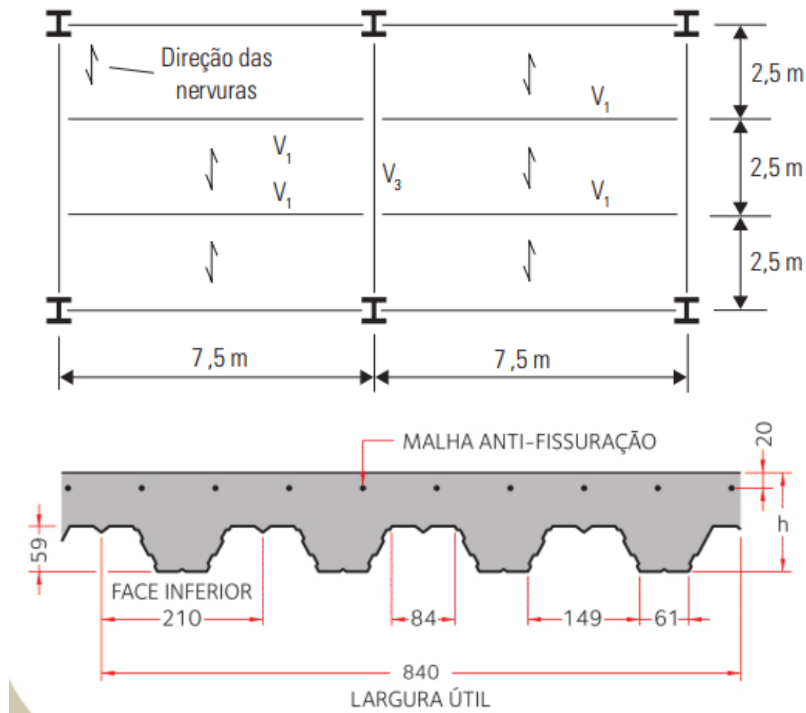


Figura 6. Dimensões da estrutura

Fonte: Autores (2023)

4.2 Comparação entre os resultados da planilha de cálculo e do exemplo de validação

Após a resolução manual do exemplo de validação e a sua implementação na planilha, tornou-se possível comparar os valores encontrados na planilha de cálculo com os resultados obtidos na resolução do exemplo. As diferenças em porcentagem obtidas com a comparação dos valores seguem apresentadas nas Tabelas 4 a 10.

Tabela 4. Comparação dos valores do Item B da planilha de cálculo DIMENSIONAMENTO DE PISOS MISTOS_v.1.0 com os do exemplo de validação

B. VERIFICAÇÃO DO POLYDECK 59S				
Descrição	Unidade	Planilha criada	Exemplo de validação	Diferença
Carga solicitante característica total sobreposta ao Polydeck 59S	kN/m ²	6,35	6,35	0,00%
Carga resistente característica total sobreposta ao Polydeck 59S	kN/m ²	12,76	12,76	0,00%
Área de aço - controle da fissuração do concreto (CA-60)	cm ² /m	0,91	0,91	0,00%

Fonte: Autores (2023)

Tabela 5. Comparação dos valores do Item C da planilha de cálculo DIMENSIONAMENTO DE PISOS MISTOS_v.1.0 com os do exemplo de validação

C. VERIFICAÇÃO DAS VIGAS SECUNDÁRIAS (ANTES DA CURA)				
Descrição	Unidade	Planilha criada	Exemplo de validação	Diferença
Momento fletor solicitante de cálculo	kN.m	91,59	91,55	0,05%
Momento fletor resistente de cálculo	kN.m	127,15	125,33	1,44%
Força cortante solicitante de cálculo	kN	48,85	48,83	0,04%
Força cortante resistente de cálculo	kN	353,95	348,89	1,43%

Fonte: Autores (2023)

Tabela 6. Comparação dos valores do Item D da planilha de cálculo DIMENSIONAMENTO DE PISOS MISTOS_v.1.0 com os do exemplo de validação

D. VERIFICAÇÃO DAS VIGAS SECUNDÁRIAS (APÓS A CURA)				
Descrição	Unidade	Planilha criada	Exemplo de validação	Diferença
Momento fletor solicitante de cálculo	kN.m	241,70	241,66	0,02%
Momento fletor resistente de cálculo	kN.m	249,19	244,06	2,06%
Força cortante solicitante de cálculo	kN	128,91	128,88	0,02%
Força cortante resistente de cálculo	kN	353,95	348,89	1,43%
Momento fletor solicitante de cálculo devido às ações atuantes antes da cura	kN.cm	5530,40	5530,40	0,00%
Momento fletor solicitante de cálculo devido às ações atuantes após a cura	kN.cm	11162,11	11162,11	0,00%
Flecha - Perfil de aço isolado	cm	3,04	3,04	0,00%
Flecha - Ações permanentes	cm	0,42	0,42	0,39%
Flecha - Ações variáveis de curta duração	cm	0,76	0,744	1,50%
Flecha - Ações variáveis de longa duração	cm	0,62	0,62	0,43%
Flecha máxima	cm	4,84	4,83	0,22%
Flecha limite	cm	2,14	2,14	0,00%
Contra flecha indicada	cm	3,00	3,00	0,00%

Fonte: Autores (2023)

Tabela 7. Comparação dos valores do Item E da planilha de cálculo DIMENSIONAMENTO DE PISOS MISTOS_v.1.0 com os do exemplo de validação

E. VERIFICAÇÃO DAS VIGAS PRINCIPAIS (ANTES DA CURA)				
Descrição	Unidade	Planilha criada	Exemplo de validação	Diferença
Momento fletor solicitante de cálculo	kN.m	251,11	251,10	0,00%
Momento fletor resistente de cálculo	kN.m	500,80	494,89	1,18%
Força cortante solicitante de cálculo	kN	101,36	101,40	0,04%
Força cortante resistente de cálculo	kN	867,74	855,34	1,43%

Fonte: Autores (2023)

Tabela 8. Comparação dos valores do Item F da planilha de cálculo DIMENSIONAMENTO DE PISOS MISTOS_v.1.0 com os do exemplo de validação

F. VERIFICAÇÃO DAS VIGAS PRINCIPAIS (APÓS A CURA)				
Descrição	Unidade	Planilha criada	Exemplo de validação	Diferença
Momento fletor solicitante de cálculo	kN.m	652,00	651,20	0,12%
Momento fletor resistente de cálculo	kN.m	851,42	839,02	1,46%
Força cortante solicitante de cálculo	kN	261,79	261,40	0,15%
Força cortante resistente de cálculo	kN	867,74	855,34	1,43%
Momento fletor solicitante de cálculo devido às ações atuantes antes da cura	kN.cm	15344,14	15344,14	0,00%
Momento fletor solicitante de cálculo devido às ações atuantes após a cura	kN.cm	29765,63	29765,63	0,00%
Flecha - Perfil de aço isolado	cm	1,47	1,47	0,00%
Flecha - Ações permanentes	cm	0,32	0,32	0,11%
Flecha - Ações variáveis de curta duração	cm	0,52	0,53	0,00%
Flecha - Ações variáveis de longa duração	cm	0,47	0,47	0,08%
Flecha máxima	cm	2,78	2,77	0,21%
Flecha limite	cm	2,14	2,14	0,00%
Contra flecha indicada	cm	1,00	1,00	0,00%

Fonte: Autores (2023)

Tabela 9. Comparação dos valores do Item G da planilha de cálculo DIMENSIONAMENTO DE PISOS MISTOS_v.1.0 com os do exemplo de validação

G. VERIFICAÇÃO DA VIBRAÇÃO DA LAJE MISTA (Steel Design Guide 11 - 2ª Edition)				
G.1) Vigas secundárias				
Descrição	Unidade	Planilha criada	Exemplo de validação	Diferença
Deflexão no meio do vão da viga devido à carga distribuída	cm	1,75	1,75	0,21%
Frequência natural fundamental	Hz	4,26	4,26	0,09%
Peso efetivo sobre a viga	kN	563,79	564,75	0,17%
G.2) Vigas principais				
Descrição	Unidade	Planilha criada	Exemplo de validação	Diferença
Deflexão no meio do vão da viga devido à carga distribuída	cm	0,88	0,88	0,00%
Frequência natural fundamental	Hz	6,00	6,01	0,00%
Peso efetivo sobre a viga	kN	382,22	381,75	0,00%
G.3) Efeitos combinados para a verificação da laje mista				
Descrição	Unidade	Planilha criada	Exemplo de validação	Diferença
Frequência natural fundamental da laje	Hz	3,47	3,47	0,04%
Peso efetivo combinado da laje	kN	502,95	503,56	0,12%
Aceleração da vibração devido ao caminhar como uma fração da aceleração da gravidade	-	0,00	0,00	0,23%

Fonte: Autores (2023)

Tabela 10. Comparação dos valores do Item H da planilha de cálculo DIMENSIONAMENTO DE PISOS MISTOS_v.1.0 com os do exemplo de validação

H. VERIFICAÇÃO DA VIBRAÇÃO DA LAJE MISTA (Projeto de Revisão ABNT 8800:2022 - Anexo I)				
H.1) Modo A - Piso controlado pela rigidez das vigas secundárias				
Descrição	Unidade	Planilha criada	Exemplo de validação	Diferença
Carga modal do piso relativo à viga secundária	kN	368,83	368,67	0,04%
Deslocamento do piso	cm	1,75	1,75	0,01%
Frequência fundamental	Hz	4,31	4,31	0,01%
Aceleração de pico	m/s ²	0,01	0,01	0,07%
Valor eficaz da aceleração ponderada	m/s ²	0,01	0,01	2,65%
Fator de resposta	-	2,16	2,16	0,01%
H.2) Modo B – Piso controlado pela rigidez conjunta das vigas principais e secundárias				
Descrição	Unidade	Planilha criada	Exemplo de validação	Diferença
Carga modal do piso relativo às vigas conjuntas	kN	368,83	368,67	0,04%
Deslocamento do piso	cm	1,58	1,58	0,08%
Frequência fundamental	Hz	4,53	4,63	2,24%
Aceleração de pico	m/s ²	0,01	0,01	3,89%
Valor eficaz da aceleração ponderada	m/s ²	0,01	0,01	0,15%
Fator de resposta	-	2,16	2,16	0,06%

Fonte: Autores (2023)

Analisando as diferenças encontradas, é possível notar que os resultados do exemplo de validação se aproximam bastante dos resultados da planilha de cálculo, sendo que em alguns casos, os valores comparados são iguais. Dos 58 valores comparados nas tabelas apresentadas acima, 46 deles apresentaram diferença menor do que 1,00%, o que representa 79,31% dos valores comparados.

Também é possível notar que as maiores diferenças percentuais são referentes a valores muito pequenos, para os quais qualquer variação no valor resultaria em uma diferença percentual mais elevada. Tal fato pode ser explicado pelas aproximações feitas na resolução manual do exemplo de validação. Apesar disso, a maior variação foi de 3,89%, onde o valor passa a divergir na terceira casa decimal. Todos os outros deram valores menores que 2,66%.

A Figura 7 resume visualmente as estatísticas das comparações realizadas entre os resultados da planilha e do exemplo de validação.

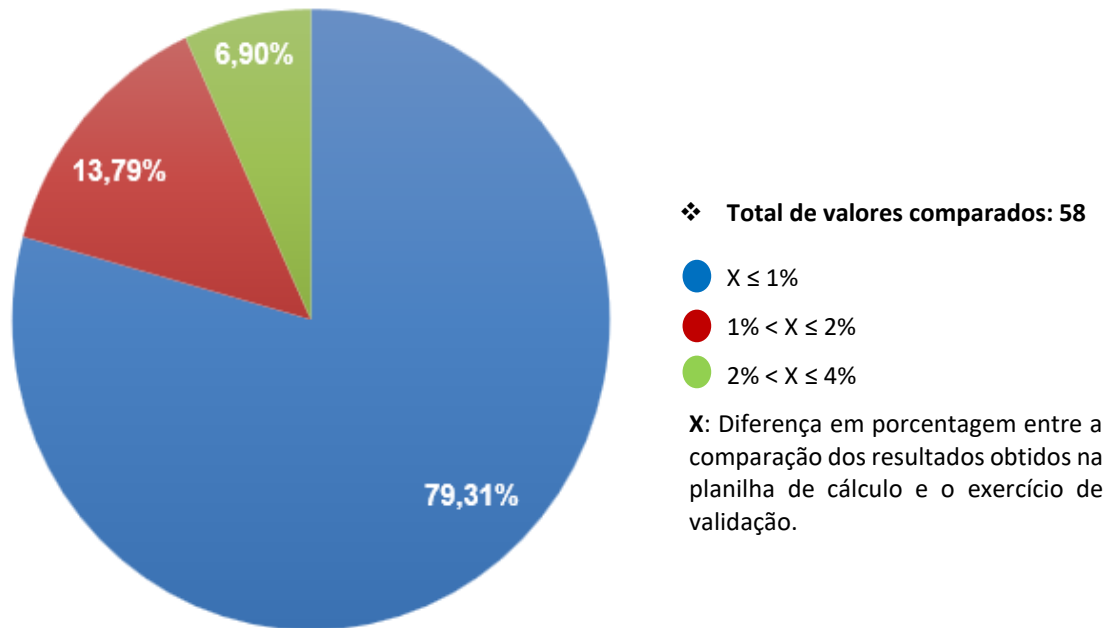


Figura 7. Análise percentual comparativa da planilha de cálculo com o exemplo de validação.
Fonte: Autores (2023)

5. CONCLUSÃO

Ao longo desse trabalho foi desenvolvida uma ferramenta de cálculo que inclui a verificação de pisos mistos quanto à vibração devida ao caminhar humano, de acordo com o Projeto de Revisão NBR 8800 [3] e o *Steel Design Guide 11 – 2ª Edition* [11]. Essa verificação é realizada por ambas as normas, trazendo assim maior precisão e segurança no cálculo da estrutura, além de proporcionar agilidade e automatização no procedimento de dimensionamento de pisos mistos.

Toda a etapa de cálculo é feita de forma automática, a partir da entrada de dados dos parâmetros na planilha, com isso o processo acaba se tornando mais dinâmico e de simples compreensão. Para validação dos cálculos feitos pela planilha, um exemplo teórico foi resolvido manualmente, fazendo-se assim uma verificação dos cálculos de cada etapa da planilha. Além disso, adicionou-se uma extensão para essa ferramenta, a etapa de análise de vibração.

É notável a importância dessa ferramenta computacional, já que devido a sua abrangência quanto aos dados de entrada e capacidade de calcular diversas estruturas diferentes com diferentes carregamentos, a planilha é capaz de avaliar de forma automatizada melhores alternativas para a estrutura, gerando assim maior velocidade na etapa de planejamento e projeto de pisos mistos.

Cabe ressaltar que hoje, não existe *software* nacional, disponibilizado à comunidade, que realize o dimensionamento completo de estruturas de pisos mistos. Por isso, ter uma ferramenta precisa e completa como a planilha aqui desenvolvida é de extrema importância e contribuirá para a difusão e uso da tecnologia de estruturas mistas em projetos estruturais no Brasil, seja no ensino, seja em projetos.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal do Espírito Santo e a empresa ArcelorMittal pelo apoio financeiro fornecido durante o desenvolvimento desse trabalho. A quarta autora agradece ao CNPq pela sua bolsa de produtividade nº 309741/2020-3.

REFERÊNCIAS

- 1 Rodgers L. Aquecimento Global: a gigantesca fonte de CO2 que está por toda parte, mas você talvez não saiba. BBC News Brasil. 2018 Dec 17. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-46591753>.
- 2 RESENDE, N. Uma Breve História do Concreto Armado. Clube do Concreto. 2013 July 31. Disponível em: <http://www.clubedoconcreto.com.br/2013/09/uma-breve-historia-do-concreto-armado.html>.
- 3 Associação Brasileira de Normas Técnicas. Projeto de Revisão ABNT NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. 277 p.
- 4 Queiroz G, Pimenta RJ, Martins AG. Estruturas Mistas. 2ª ed. Rio de Janeiro: INSTITUTO AÇO BRASIL / CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO; 2012.
- 5 Alva GMS, Malite M. Comportamento estrutural e dimensionamento de elementos mistos aço-concreto. Cadernos de Engenharia de Estruturas. 2005; 7(25): 49-82.[citado 2023 maio 31]
- 6 Crisinel M, O'Leary D. Composite Floor Slab Design and Construction. Structural Engineering International. 1996 Feb;6(1):41-46. Informa UK Limited. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2749/101686696780495923>.
- 7 Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 16421: Telha-fôrma de aço colaborante para laje mista de aço e concreto - requisitos e ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 10 p.
- 8 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 238 p.
- 9 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 247 p.
- 10 Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 87 p.
- 11 MURRAY TM. *et al.* *Steel Design Guide* 11: vibrations of steel-framed structural systems due to human activity. 2. ed. Washington: American Institute of Steel Construction; 2016.
- 12 Perfilor ArcelorMittal. Catálogo Técnico Polydeck 59S. São Paulo: Perfilor ArcelorMittal, 2016. 3 p.
- 13 FAKURY RH; SILVA, ALRC; CALDAS RB. Dimensionamento básico de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2017.