

Comportamento dinâmico de lajes maciças de concreto leve com pérolas de EPS

Dynamic behavior of lightweight concrete solid slabs with EPS beads

Artur Lenz Sartorti¹, Libânio Miranda Pinheiro², Ricardo Carrazedo² , Iuri Fazolin Fraga³ ,
Lucas da Silva Barboza¹, Leandro Dias Küster¹, André Luis Christoforo³ 

¹Centro Universitário Adventista de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil. Engenheiro Coelho, SP, Brasil.

²Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas. São Carlos, SP, Brasil.

³Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Civil. São Carlos, SP, Brasil.

e-mail: artur.sartorti@unasp.edu.br, libanio.pinheiro@gmail.com, carrazedo@sc.usp.br, iurifraga@outlook.com, lucas.barboza@ucb.org.br, leandro.kuster@ucb.org.br, christoforoal@yahoo.com.br

RESUMO

O uso de Concreto Leve com Pérolas de EPS (CLEPE) em lajes estruturais surge como uma alternativa economicamente atrativa para reduzir o peso próprio das estruturas de concreto armado. Contudo, a modificação da massa estrutural e a substituição do agregado graúdo convencional pelo EPS impactam diretamente as propriedades dinâmicas da estrutura. Neste contexto, o objetivo deste estudo é investigar a influência da substituição do Concreto Convencional (CC) pelo CLEPE nas propriedades dinâmicas da estrutura, considerando o impacto da diminuição significativa de massa e rigidez do material. Para a determinação dos parâmetros dinâmicos, como frequências naturais, deformações modais e fatores de amortecimento, foram realizados experimentos em corpos de prova cilíndricos e lajes retangulares, empregando métodos de análise modal estocástica e ensaio dinâmico de resposta acústica. Os resultados revelam clareza nas deformações modais e uma aproximação satisfatória entre as frequências naturais experimentais e numéricas. Em relação ao fator de amortecimento, observou-se que para o CLEPE, este parâmetro é ligeiramente superior ao do CC, sugerindo uma integridade estrutural adequada das lajes. Com base nos resultados obtidos, conclui-se que, para análises individuais de elementos de CLEPE sem fissuras, é recomendável adotar um valor médio para o fator de amortecimento de 0,5%, que se mostrou superior ao valor médio correspondente ao CC ensaiado, sem fissuras, de 0,4%. No entanto, para análises estruturais globais, os valores teóricos convencionais são mais apropriados. Embora a pesquisa forneça resultados sobre o comportamento dinâmico de lajes de CLEPE, ressalta-se a necessidade de estudos adicionais em condições de fissuração para uma compreensão mais abrangente do material em situações realistas.

Palavras-chave: análise dinâmica; concreto com EPS; análise modal; frequências naturais; amortecimento.

ABSTRACT

The use of Lightweight Concrete with EPS Beads (LCBE) in structural slabs emerges as an economically attractive alternative to reduce the self-weight of reinforced concrete structures. However, the modification of the structural mass and the substitution of conventional coarse aggregate by EPS directly impact the dynamic properties of the structure. In this context, the objective of this study is to investigate the influence of replacing Conventional Concrete (CC) with LCBE on the dynamic properties of the structure, considering the significant decrease in mass and stiffness of the material. For the determination of dynamic parameters such as natural frequencies, modal deformations, and damping factors, experiments were conducted on cylindrical specimens and rectangular slabs using stochastic modal analysis methods and dynamic acoustic response tests. The results reveal clarity in modal deformations and a satisfactory approximation between experimental and numerical natural frequencies. Regarding the damping factor, it was observed that for LCBE, this parameter is slightly higher than that of CC, suggesting adequate structural integrity of the slabs. Based on the obtained results, it is concluded that for individual analyses of crack-free LCBE elements, it is recommended to adopt an average

value for the damping factor of 0.5%, which proved to be higher than the corresponding average value for crack-free CC tested, of 0.4%. However, for global structural analyses, conventional theoretical values are more appropriate. Although the research provides results on the dynamic behavior of LCBE slabs, the need for additional studies under cracking conditions is emphasized for a more comprehensive understanding of the material in realistic situations.

Keywords: Dynamic analysis; Concrete with EPS; Modal analysis; Natural frequencies; Damping.

1. INTRODUÇÃO

O concreto armado destaca-se em sistemas estruturais devido às suas vantagens, tais como durabilidade, resistência, trabalhabilidade e versatilidade [1–3]. No entanto, assim como qualquer material utilizado em estruturas, apresenta algumas poucas desvantagens, sendo o peso próprio elevado uma das principais. Ao analisar uma edificação em concreto armado, é observável que uma parcela significativa dos carregamentos provém desse tipo de solicitação [4–6]. Dentre os elementos estruturais que frequentemente contribuem de maneira substancial para o peso próprio total estão as lajes.

Em contraste com vigas e pilares, que possuem uma dimensão significativamente maior em relação às outras duas, as lajes apresentam duas dimensões significativas, e especialmente quando maciças, adicionam considerável peso próprio à estrutura. Para se ter uma ideia, o peso próprio das lajes estruturais de piso normalmente representa aproximadamente 40–60% de toda a massa da estrutura, conforme cálculos simples para cargas em um edifício residencial alto [7, 8]. Vale ressaltar que uma redução de 10% no peso próprio da laje pode resultar em uma diminuição de 5% no peso próprio total do edifício [7, 8].

Nesse contexto, a viabilidade de substituir o Concreto Convencional (CC) por um concreto leve nas lajes emerge como uma opção economicamente atrativa [4, 5]. A introdução de pérolas de Poliestireno Expandido (EPS, do inglês “*Expanded Polystyrene*”) na matriz do concreto pode atender à necessidade de redução do peso próprio das lajes, uma vez que esse material possui capacidade de enchimento com baixa densidade, além de apresentar vantagens térmicas e acústicas significativas [9].

O Concreto Leve com Pérolas de EPS (CLEPE) destaca-se pela expansão da matéria, promovendo um aumento no volume da mistura e, simultaneamente, conferindo qualidades adicionais, como a significativa redução do peso próprio dos elementos [10]. Dessa forma, a densidade seca do CLEPE pode variar entre 300 e 1.840 kg/m³, resultando em uma redução de peso de 87 a 23% em comparação ao CC [11]. Se esse concreto, além de proporcionar um peso próprio reduzido, oferecer resistência estrutural adequada, poderá ser considerado de maneira favorável. Entretanto, é crucial observar que as propriedades mecânicas de concretos leves são substancialmente modificadas em comparação com o Concreto Convencional (CC) [12, 13].

Diante do exposto, cabe destacar que a modificação da massa estrutural e a substituição do agregado graúdo convencional pelo EPS, composto em 98% por ar [14, 15], impactam diretamente as propriedades dinâmicas da estrutura. Essas alterações afetam tanto o comportamento dinâmico global, relacionado a elementos de apoio, vedação e acabamento, quanto as propriedades dinâmicas intrínsecas do concreto. LI *et al.* [16] e CAO *et al.* [8] indicam que o menor peso próprio da laje estrutural piora a resposta sísmica, resultando em menores demandas de capacidade de suporte para os principais componentes estruturais, como paredes de cisalhamento, pilares e vigas.

Diversas investigações na literatura se dedicam ao estudo das propriedades de resistência, elasticidade e reologia de argamassas e concretos com EPS [17–24]. CATOIA [19], por exemplo, conduziu uma análise abrangente das propriedades de resistência, elasticidade e reologia após o endurecimento do Concreto Leve com Pérolas de EPS (CLEPE). Contudo, a avaliação dinâmica do CLEPE quando aplicado em lajes não havia sido abordada até a pesquisa conduzida por SARTORTI [25], destacando-se a importância do estudo aqui desenvolvido.

A teoria geral das vibrações mecânicas estabelece uma relação fundamental entre a rigidez e a massa das estruturas para a determinação de suas frequências naturais. A redução da massa resulta, conforme esperado, em um aumento correspondente da frequência natural. Contudo, segundo METHA & MONTEIRO [26], um dos principais influenciadores do módulo de elasticidade e, por conseguinte, da rigidez estrutural, é a qualidade e quantidade dos agregados graúdos.

No contexto do Concreto Leve com Pérolas de EPS (CLEPE), observa-se a ausência de agregados graúdos, levando a significativas diminuições na rigidez estrutural. Diante desse cenário, surge a indagação sobre o comportamento do CLEPE frente às solicitações dinâmicas, especialmente considerando a substancial redução de massa e rigidez no material.

Diante desse questionamento e reconhecendo a importância do entendimento dinâmico do material para garantir o desempenho adequado conforme normas estabelecidas, esta pesquisa visa contribuir para o

conhecimento do comportamento dinâmico do CLEPE. Portanto, o principal objetivo deste estudo é investigar a influência da substituição do Concreto Convencional (CC) pelo Concreto Leve com Pérolas de EPS (CLEPE) nas propriedades dinâmicas da estrutura, considerando o impacto da diminuição significativa de massa e rigidez do material. Para atingir esse objetivo, descrevem-se experimentos realizados com corpos de prova cilíndricos em ensaios dinâmicos de resposta acústica, além de dois ensaios modais estocásticos em placas retangulares de concreto apoiadas sobre molas, sempre comparando os resultados com o Concreto Convencional (CC).

A análise dinâmica experimental adota os métodos da análise modal estocástica, justificada pela sua aplicabilidade na Engenharia Civil, especialmente para estruturas de grandes dimensões e de difícil excitação forçada, conforme mencionado por RODRIGUES [27].

A caracterização dinâmica do concreto nos ensaios é realizada por meio da técnica de ensaio dinâmico de resposta acústica em corpos de prova. Essa técnica baseia-se na captação do sinal sonoro emitido pelo corpo quando sujeito a impacto por uma massa previamente calibrada. O sinal sonoro é processado por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT), revelando as frequências naturais do corpo de prova, que são então utilizadas para determinar parâmetros físicos como módulo de elasticidade, módulo de elasticidade transversal e coeficiente de Poisson. As equações apresentadas pela ASTM E1876-22 [28] são empregadas para tal finalidade. Além disso, a curva de decaimento do sinal sonoro permite a determinação do fator de amortecimento do material.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental foi concebido com o propósito de determinar três parâmetros essenciais em análises dinâmicas, a saber: frequências naturais, deformadas modais e fatores de amortecimento. Essas informações foram derivadas de ensaios dinâmicos realizados em lajes maciças de concreto apoiadas sobre molas, conforme detalhado no item 2.1 do presente estudo. Além disso, o parâmetro de fator de amortecimento foi também estimado por meio de ensaios dinâmicos de resposta acústica em corpos de prova cilíndricos, utilizando o equipamento Sonelastic®, conforme exposto no item 2.2.

2.1. Configurações dos ensaios dinâmicos das lajes

Duas lajes maciças retangulares foram confeccionadas com dimensões de 5 cm × 55 cm × 155 cm (espessura × largura × comprimento), sendo submetidas a ensaios com a condição de bordo livre em todos os quatro lados. Para simular essa condição, as lajes foram apoiadas em quatro molas deformáveis, estrategicamente posicionadas nas peças. Tal recurso foi utilizado com o intuito de replicar o comportamento de uma estrutura livre de vinculações.

A armadura adotada nas lajes consistiu em uma malha quadrada com espaçamentos de 15 cm × 15 cm, composta por fios de aço com diâmetro de 5 mm e resistência característica ao escoamento (f_{yk}) de 600 MPa (CA-60). Essa escolha atende de maneira adequada à armadura mínima recomendada pela ABNT NBR 6118 [29] para as dimensões específicas dessas peças.

A Figura 1 oferece uma representação visual do processo de moldagem e cura do concreto utilizado nas duas lajes. Para a caracterização do material, foram moldados nove corpos de prova cilíndricos para cada tipo de concreto (Concreto Convencional – CC e Concreto Leve com Pérolas de EPS – CLEPE), cada um possuindo dimensões de 10 cm × 20 cm (diâmetro × altura).

O traço empregado para a produção do Concreto Leve com Pérolas de EPS (CLEPE) consistiu em uma proporção de 1:1:0,03:0,28:0,0084 (cimento em massa: areia grossa em massa: volume de EPS em m³: água em massa: superplastificante em massa). Já o traço em massa adotado para o Concreto Convencional (CC) foi de 1:1,88:2:0,66 (cimento: areia grossa: brita basáltica: água). Tais dosagens foram definidas conforme os dados da pesquisa de CATOIA [19].



Figura 1: (a) Detalhe da forma, das (b) lajes concretadas juntamente com os corpos de prova e do (c) processo de cura sob lona plástica.

Os ensaios de caracterização dos corpos de prova, tanto em termos dinâmicos quanto estáticos, foram conduzidos no mesmo dia em que foram realizados os ensaios dinâmicos nas lajes. A idade do concreto (tanto para o Concreto Convencional – CC quanto para o Concreto Leve com Pérolas de EPS – CLEPE) na realização dos ensaios foi de 21 dias. Essa decisão justifica-se pela utilização de cimento CP V-ARI (ARI – alta resistência inicial), permitindo uma antecipação em relação ao padrão convencional de 28 dias.

Antes da realização dos ensaios dinâmicos, foram elaborados dois modelos no *software* SAP2000® com o propósito de identificar os pontos nodais nos primeiros modos de vibração. Isso permitiu evitar a inserção de acelerômetros nesses pontos durante o posicionamento para os ensaios e conduziu a escolha dos pontos de apoio sobre as molas. Posteriormente, após a conclusão dos ensaios, os modelos no *software* SAP2000® foram ajustados com base nos resultados obtidos nos ensaios de caracterização dinâmica e estática dos corpos de prova, conforme detalhado no item 2.2.

Para o Concreto Convencional (CC), foi empregado um material com resistência característica à compressão (f_{ck}) de 35,60 MPa, módulo de elasticidade (E_c) de 40,00 GPa e peso específico (γ) de 24,05 kN/m³ (com uma massa da laje de CC igual a 102,50 kg). Por outro lado, o Concreto Leve com Pérolas de EPS (CLEPE) foi modelado com uma resistência característica à compressão (f_{ck}) de 10,00 MPa, módulo de elasticidade (E_c) de 10,00 GPa e peso específico (γ) de 11,00 kN/m³ (com uma massa da laje de CLEPE equivalente a 46,85 kg). A Tabela 1 apresenta numericamente os seis primeiros modos de vibração para cada uma das lajes, obtidos por meio dos modelos numéricos após a calibração dos materiais com os dados experimentais. Cabe destacar que a modelagem numérica considerou a peça como livre nos quatro bordos e uma malha de 5 cm × 5 cm.

Ao analisar os resultados apresentados na Tabela 1, observa-se que as deformadas modais exibem a mesma configuração nos dois tipos de concreto, embora apresentem frequências naturais distintas. A Figura 2 ilustra a disposição estratégica dos acelerômetros durante os ensaios, buscando posicioná-los distantes das linhas que contêm os pontos nodais.

Os ensaios foram conduzidos por meio de excitação com um martelo equipado com uma esfera de aço em sua extremidade. A frequência de captação do sinal dinâmico foi fixada em 2 kHz. Oito acelerômetros foram empregados, sendo o posicionado no ponto 1 (Figura 2) designado como referência. Todos os acelerômetros utilizados pertencem à linha de produtos da empresa Brüel & Kjaer. A Figura 3 proporciona uma visualização das peças preparadas para o ensaio dinâmico.

Tabela 1: Modos de vibração teóricos das lajes.

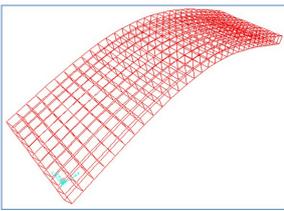
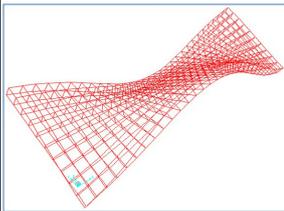
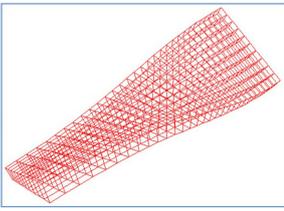
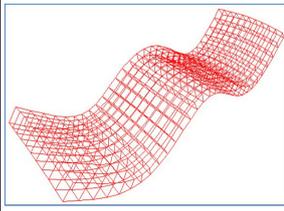
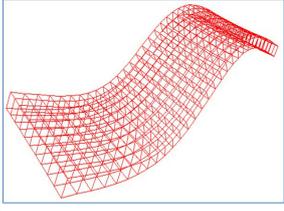
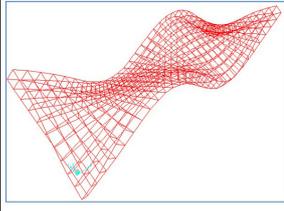
MODO	FREQUÊNCIA NATURAL (Hz)		FORMA DA DEFORMADA MODAL	MODO	FREQUÊNCIA NATURAL (Hz)		FORMA DA DEFORMADA MODAL
	CC	CLEPE			CC	CLEPE	
1°	91,41	67,58		4°	351,70	260,01	
2°	168,59	124,64		5°	482,48	356,70	
3°	249,64	184,57		6°	562,41	415,80	



Figura 4: Apoios nas molas.

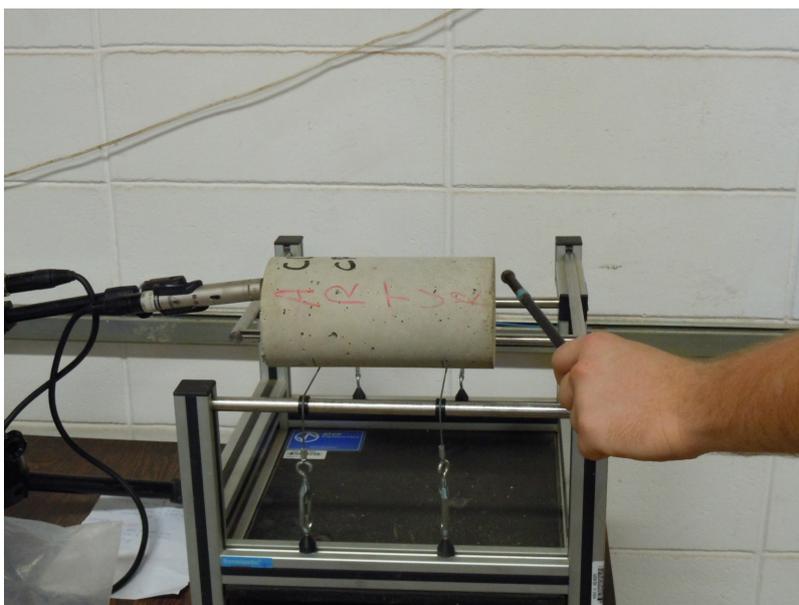


Figura 5: Ensaio do corpo de prova, dimensões 10 cm × 20 cm, no Sonelastic®.

Por outro lado, o sistema Sonelastic®, destaca-se como uma abordagem não destrutiva para a caracterização dos módulos de elasticidade e do amortecimento de materiais. Esse método utiliza as frequências naturais obtidas pela técnica de excitação por impulso, respeitando as recomendações da ASTM C215-19 [30]. O sistema Sonelastic® adquire informações sobre o módulo de elasticidade e o amortecimento a partir do som emitido pelo corpo de prova quando submetido a um impacto. Essa resposta acústica é composta pela frequência natural do corpo de prova, a qual é proporcional ao módulo de elasticidade na direção da vibração.

Na análise dinâmica, é apropriado utilizar o módulo de elasticidade dinâmico do material em vez de seu valor estático. Isso se deve ao fato de que as ações dinâmicas geralmente não introduzem níveis de tensões tão elevados a ponto de alterar significativamente a microestrutura do material. Dessa forma, o módulo de elasticidade estático, obtido em condições de tensões mais elevadas, não reflete com precisão a verdadeira rigidez da estrutura quando submetida a ações dinâmicas de baixa intensidade.

O Sonelastic® se destaca pela captura da resposta acústica do corpo de prova usando um captador acústico, como um microfone simples, ao invés da utilização de um acelerômetro fixado ao corpo de prova, como é comum na maioria dos sistemas de aquisição convencionais para ensaios não destrutivos. Uma característica adicional importante desse sistema é a ausência da necessidade de *hardwares* adicionais, uma vez que faz uso das placas de áudio já disponíveis nos computadores atuais.

Após a captura do sinal, realiza-se a FFT (*Fast Fourier Transform* – Transformada Rápida de Fourier). Com as frequências naturais identificadas pela FFT, o sistema Sonelastic® emprega as equações definidas na norma ASTM E1876-22 [28] para calcular os módulos de elasticidade dinâmicos flexional, longitudinal e transversal. A Figura 5 oferece uma representação visual de um ensaio conduzido no Sonelastic® utilizando um corpo de prova de dimensões 10 cm × 20 cm (diâmetro × altura).

Ressalta-se que foram conduzidos ensaios de caracterização dinâmica utilizando nove corpos de prova cilíndricos de dimensões 10 cm × 20 cm (diâmetro × altura), tanto para o Concreto Convencional (CC) quanto para o Concreto Leve com Pérolas de EPS (CLEPE).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão expostos os resultados derivados dos ensaios de caracterização dinâmica dos corpos de prova cilíndricos, utilizando o Sonelastic®, além dos resultados obtidos nos ensaios dinâmicos realizados nas lajes.

3.1. Ensaios de caracterização do concreto

Os resultados dos ensaios de caracterização dinâmica do concreto nos 18 corpos de prova estão listados na Tabela 2.

Observa-se que as médias das características dos corpos de prova associados ao Concreto Leve com Pérolas de EPS (CLEPE) demonstraram valores de massa específica e módulo de elasticidade conforme as expectativas, ou seja, inferiores à média dos corpos de prova de Concreto Convencional (CC). Os resultados dos

Tabela 2: Resultados da caracterização dinâmica.

CP (10 × 20 cm)	MASSA (g)	ALTURA DO CP (cm)	MASSA ESPECÍFICA (kg/m³)	FATOR DE AMORTECIMENTO (×10 ⁻⁶)		MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	
				FLEXURAL	LONGITUDINAL	FLEXURAL	LONGITUDINAL
CC							
1	3783,1	19,85	2426,60	4451,4	4948,9	39,62	40,31
2	3758,9	19,70	2429,43	4100,9	4732,8	39,19	39,78
3	3712,4	19,70	2399,38	4157,5	3993,7	38,42	39,10
4	3740,8	19,80	2405,52	4709,7	3251,5	38,46	39,32
5	3753,4	19,60	2438,25	4382,0	4342,5	40,11	40,99
6	3725,7	19,60	2420,26	3199,6	3697,0	40,22	41,51
7	3704,0	19,65	2400,04	4189,3	3921,1	39,75	40,03
8	3765,9	19,80	2421,66	3395,3	3973,0	39,90	40,31
9	3695,8	19,50	2413,15	4172,1	4638,7	39,12	40,26
MÉDIA	3737,78	–	2417,14	4084,2	4166,6	39,42	40,18
CLEPE							
1	1790,4	19,15	1190,60	4732,5	4249,9	9,69	9,71
2	1826,9	19,80	1174,79	4465,0	3714,4	9,92	9,76
3	1852,3	20,20	1167,54	4262,5	4243,6	9,69	9,24
4	1963,0	20,00	1249,68	5207,9	4511,9	11,42	11,36
5	1910,6	19,80	1228,61	4549,7	4518,8	11,10	11,18
6	1859,1	19,90	1189,49	3861,8	3853,7	10,36	9,96
7	1887,2	20,35	1180,77	4458,8	4371,9	9,54	9,41
8	1830,2	20,15	1156,47	4233,1	4048,6	9,26	8,97
9	1918,1	20,05	1218,06	3924,6	4269,8	10,47	10,70
MÉDIA	1870,87	–	1195,11	4410,7	4198,1	10,16	10,03

Tabela 3: Valores dos fatores de amortecimento modais do ensaio da laje de CC.

FREQUÊNCIA NATURAL (Hz)	x_0	x_p	p	δ	ξ	
PRIMEIRO ξ						
92,213	0,100892	0,059659	18	0,029189	0,004645	
172,131	0,033972	0,015086	30	0,027059	0,004307	
250,000	0,075440	0,046360	21	0,023186	0,003690	
SEGUNDO ξ						
92,213	0,102551	0,047827	26	0,029337	0,004669	
172,131	0,198367	0,084174	32	0,026786	0,004264	
250,000	0,197005	0,018915	84	0,027896	0,004440	
TERCEIRO ξ						ξ MÉDIO
92,213	0,125015	0,090996	13	0,024432	0,003888	0,004401
172,131	0,207038	0,136082	16	0,026228	0,004174	0,004248
250,000	0,125811	0,103947	9	0,212100	0,003376	0,003835

Tabela 4: Valores dos fatores de amortecimento modais do ensaio da laje de CLEPE.

FREQUÊNCIA NATURAL (Hz)	x_0	x_p	p	δ	ξ	
PRIMEIRO ξ						
47,131	0,056956	0,020255	13	0,079529	0,012656	
108,607	0,185186	0,045456	40	0,035115	0,005589	
159,836	0,170449	0,030574	55	0,031242	0,004972	
SEGUNDO ξ						
47,131	0,104833	0,009002	34	0,072203	0,011491	
108,607	0,025768	0,005513	45	0,034268	0,005454	
159,836	0,254804	0,042613	59	0,030311	0,004824	
TERCEIRO ξ						ξ MÉDIO
47,131	0,149784	0,012588	30	0,082548	0,013137	0,012428
108,607	0,176516	0,126137	10	0,033604	0,005348	0,005464
159,836	0,234083	0,106506	23	0,034238	0,005449	0,005082

seis ensaios de compressão simples, tanto no CC quanto no CLEPE, culminaram em resistências características à compressão de 35,58 MPa e 10,14 MPa, respectivamente. Destaca-se que a resistência característica do CLEPE à compressão está em conformidade com as previsões estabelecidas, evidenciando a eficácia do material em questão. Já a discussão sobre o fator de amortecimento será abordada no item 3.3, pois além de dispor dos resultados do Sonelastic® são necessários os resultados de ensaios modais para comparação com a referência teórica e entre os valores experimentais obtidos, os quais, além de constarem uma parcela na Tabela 2, serão apresentados também nas Tabelas 3 e 4 subsequentes.

3.2. Resultados dos ensaios dinâmicos nas lajes

Na Figura 6 e na Figura 7, são apresentados, respectivamente, os diagramas de PSD (Densidade Espectral de Potência) e de coerência referentes ao ensaio dinâmico da laje de Concreto Convencional (CC).

É perceptível que a coerência permanece próxima da unidade nos pontos correspondentes às frequências naturais, o que está em conformidade com as expectativas. As deformadas modais correspondentes a essas frequências são apresentadas na Figura 8.

Observa-se na Figura 8 que as frequências de 483,607 Hz e 831,967 Hz possivelmente representam modos que não foram bem capturados, devido ao posicionamento dos acelerômetros. Por exemplo, o modo

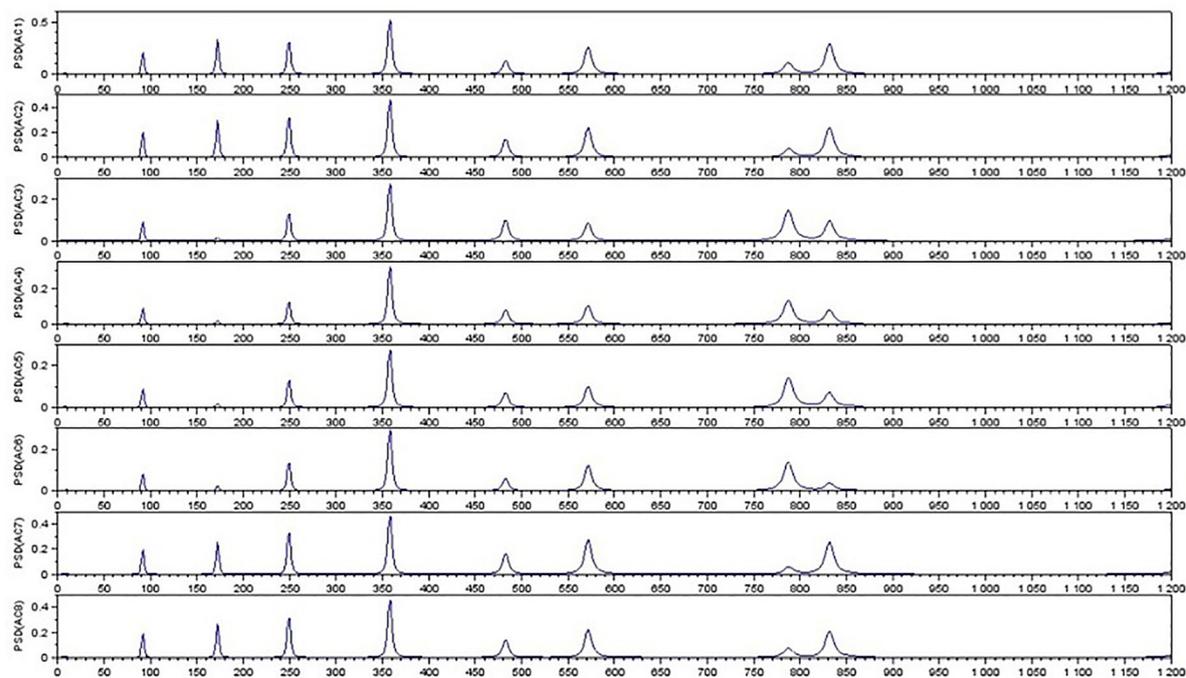


Figura 6: Diagrama de PSD do ensaio da laje de CC (unidade no eixo das abscissas: Hz).

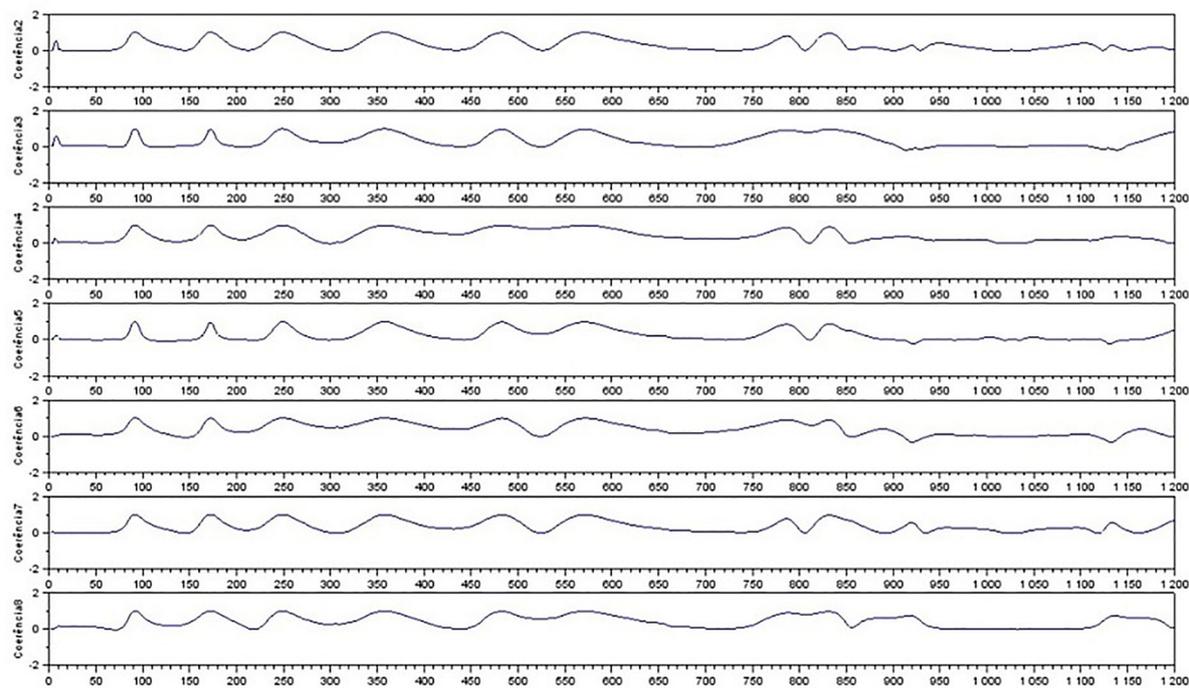


Figura 7: Diagrama de coerência para o ensaio da laje de CC (unidade no eixo das abscissas: Hz).

associado à frequência de 483,607 Hz, com um refinamento na disposição dos acelerômetros, poderia ser correlacionado ao quinto modo mencionado na Tabela 1.

Os amortecimentos dos modos mencionados foram estimados por meio do método do decaimento logarítmico. Inicialmente, aplicou-se um filtro no sinal adquirido para isolar o componente associado à frequência natural de interesse. O filtro utilizado no Scilab® foi a função “iir”.

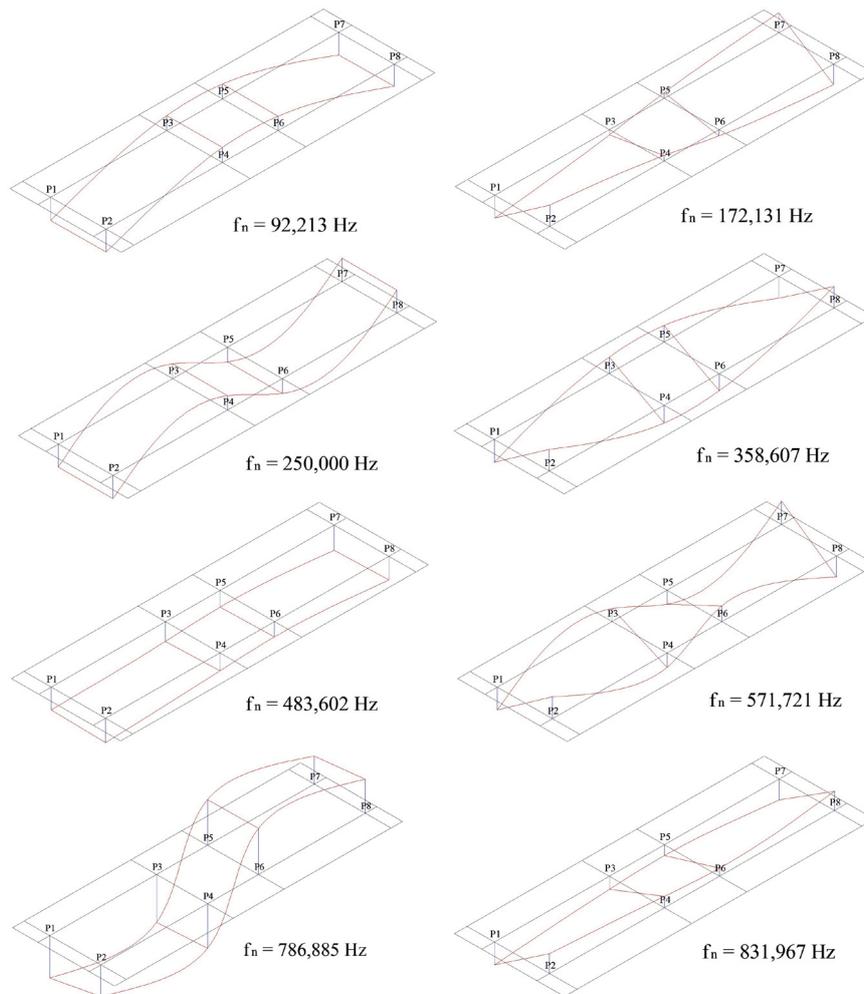


Figura 8: Frequências naturais (f_n) e suas respectivas deformadas modais do ensaio da laje de CC.

Observou-se que o método do decaimento logarítmico, além de ser simples, proporciona resultados bastante precisos. Em virtude disso, optou-se por esse método para determinar os fatores de amortecimento modais nesta pesquisa.

Para garantir resultados mais confiáveis, o cálculo do decaimento logarítmico foi realizado em três intervalos de sinal para a frequência natural considerada, obtendo-se a média dos três cálculos como resultado final.

Os fatores de amortecimento modais para os três primeiros modos apresentados na Figura 8 estão listados na Tabela 3, onde x_0 é a amplitude do movimento vibratório no primeiro ponto do intervalo considerado; x_p é a amplitude do movimento vibratório no último ponto do intervalo considerado; p é o número de ciclos (períodos) considerados no intervalo; δ é o decaimento logarítmico e ξ é o fator de amortecimento.

Já na Figura 9 e na Figura 10, são apresentados, respectivamente, os diagramas de PSD (Densidade Espectral de Potência) e de coerência referentes ao ensaio dinâmico da laje de Concreto Leve com Pérolas de EPS (CLEPE).

Observando-se ambas as Figuras, nota-se que a coerência permanece próxima da unidade nos pontos correspondentes às frequências naturais, conforme o esperado. As deformadas modais associadas a essas frequências são apresentadas na Figura 11.

Observa-se novamente que as frequências de 280,738 Hz e 530,737 Hz possivelmente representam modos que não foram bem capturados, devido ao posicionamento dos acelerômetros. Por exemplo, o modo associado à frequência de 280,738 Hz, com um refinamento na disposição dos acelerômetros, poderia ser correlacionado ao quinto modo mencionado na Tabela 1.

Os fatores de amortecimento modais para os três primeiros modos apresentados na Figura 11 estão listados na Tabela 4, onde x_0 é a amplitude do movimento vibratório no primeiro ponto do intervalo considerado;

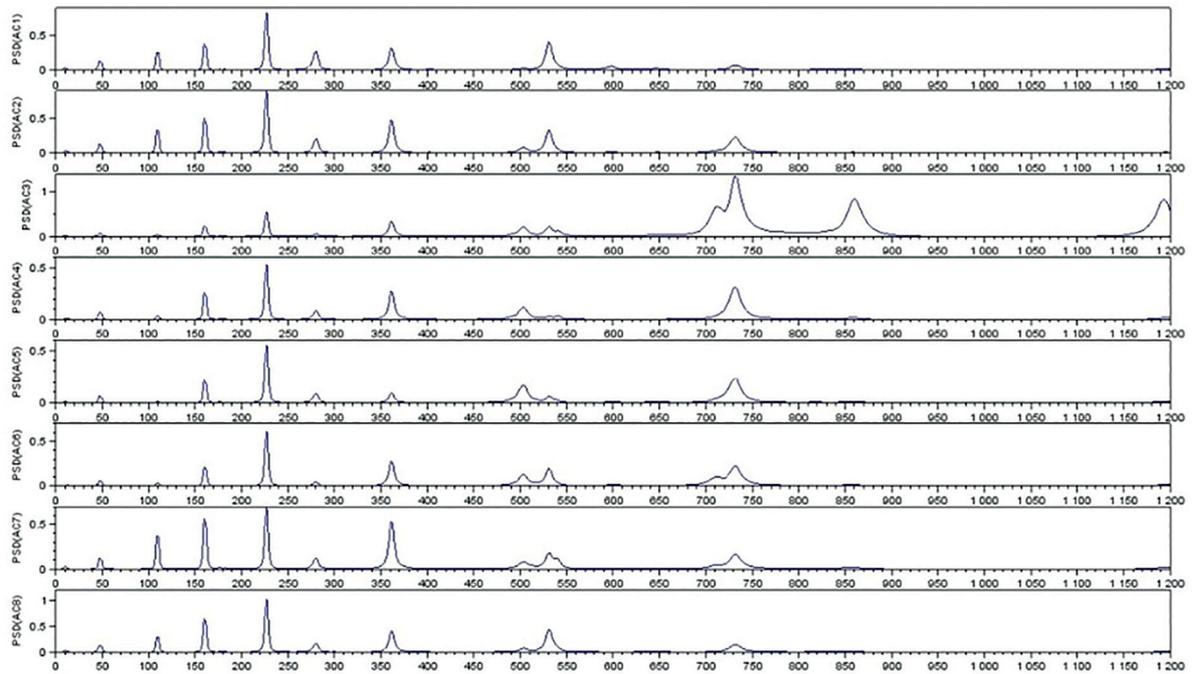


Figura 9: Diagrama de PSD do ensaio da laje de CLEPE (unidade no eixo das abscissas: Hz).

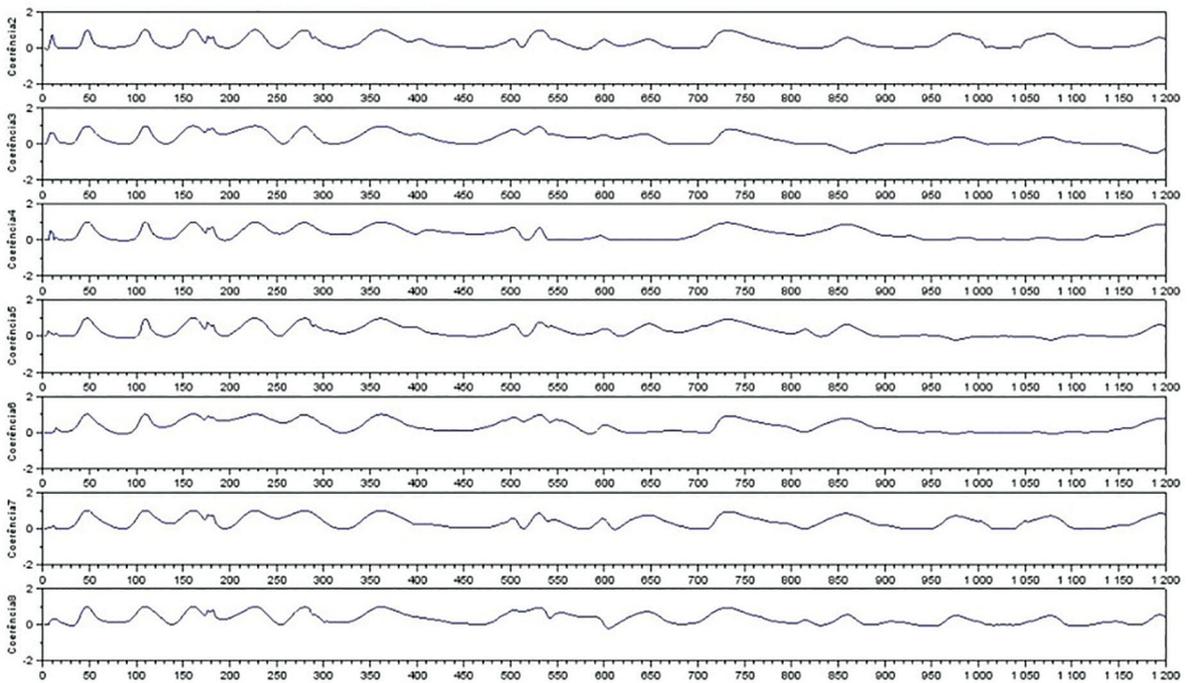


Figura 10: Diagrama de coerência para o ensaio da laje de CLEPE (unidade no eixo das abscissas: Hz).

x_p é a amplitude do movimento vibratório no último ponto do intervalo considerado; p é o número de ciclos (períodos) considerados no intervalo; δ é o decremento logarítmico e ξ é o fator de amortecimento.

3.3. Discussão

Ao analisar os resultados dos ensaios, torna-se evidente que as deformadas modais apresentam clareza e identificação facilitada quando comparadas às deformadas modais teóricas obtidas numericamente. Possíveis desafios

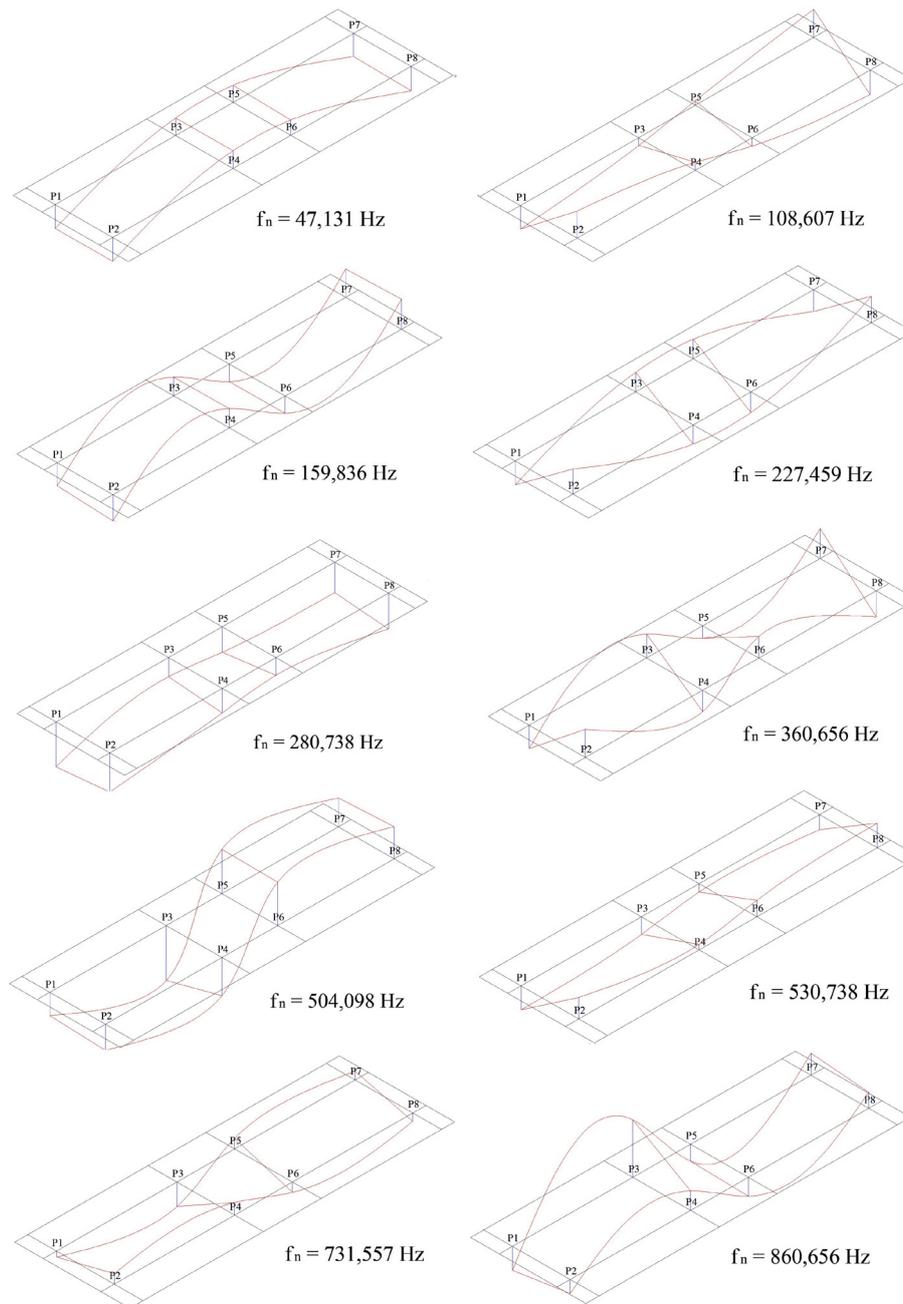


Figura 11: Frequências naturais (f_n) e suas respectivas deformadas modais do ensaio da laje de CLEPE.

na correlação entre as deformadas experimentais e as teóricas surgem da ausência de acelerômetros em pontos específicos. Ao contrastar as frequências naturais provenientes dos ensaios experimentais com aquelas derivadas numericamente, constata-se uma proximidade relativa. A variação identificada pode ser atribuída às perturbações nas molas de apoio e à não homogeneidade do material concreto.

Os coeficientes de amortecimento derivados dos ensaios dinâmicos das lajes de CC e CLEPE, apresentados respectivamente nas Tabelas 3 e 4, demonstram uma proximidade notável com os valores obtidos no Sonelastic®, conforme apresentado na Tabela 2. Tal proximidade indica uma coerência significativa e sugere a integridade estrutural das peças, sem evidências de fissuras. Esses valores de amortecimento alinham-se aos parâmetros teóricos delineados por BACHMANN *et al.* [31] para peças de concreto armado não fissurado, conforme apresentado na Tabela 5.

O fator de amortecimento associado ao primeiro modo do CLEPE (conforme apresentado na Tabela 3) destaca-se por ser significativamente superior aos dois modos subsequentes. Essa discrepância pode ser atribuída à interação complexa entre as molas de apoio e a laje. A menor massa da laje do CLEPE, em comparação com a

Tabela 5: Fator de amortecimento viscoso equivalente para diferentes materiais.

MATERIAL	ξ
Concreto armado não fissurado	0,007–0,010
Concreto armado com fissuração completa, porém com baixo nível de tensão	0,010–0,040
Concreto armado com fissuração completa, alto nível de tensão, porém sem escoamento do aço	0,005–0,008

Fonte: BACHMANN *et al.* [31], p. 166.

do CC, induz um comportamento distintivo na interação com as molas, resultando na absorção de parte da energia por esses elementos. Recomenda-se, portanto, a não consideração desse fator de amortecimento específico.

Os fatores de amortecimento do CLEPE revelam uma ligeira elevação em relação aos valores do CC, conforme antecipado no início da pesquisa. No entanto, essa diferença é mínima. Os ensaios dinâmicos indicaram que o amortecimento é fortemente influenciado pelas condições de contorno, elementos estruturais adicionais e componentes construtivos fixados na estrutura em análise.

Diante das considerações anteriores sobre os fatores de amortecimento, sugere-se a adoção dos valores aqui apresentados ao avaliar o material isoladamente. Entretanto, ao analisar a estrutura como um todo, não se limitando às peças de CLEPE, recomenda-se a utilização dos valores teóricos listados na Tabela 5, considerados mais representativos para a variabilidade inerente às estruturas.

As discrepâncias identificadas nas frequências naturais entre a Tabela 1, Figura 8 e Figura 11 não estão relacionadas à rigidez da mola. A análise, que incluiu a calibração de um modelo numérico com molas de rigidez equivalente, revelou a presença de movimentos de corpo rígido em frequências baixas (8 Hz a 10 Hz) no modelo calibrado, correspondendo aos movimentos captados experimentalmente e visíveis no gráfico de PSD da Figura 6 e da Figura 9. A suspeita de diferença recai sobre a possível variação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto da laje de CLEPE em relação aos corpos de prova correspondentes, apesar da mesma betonada inicial. Diferenças nos processos de moldagem e cura podem explicar essa alteração no módulo de elasticidade.

É crucial ressaltar que a determinação do amortecimento em estruturas é uma tarefa complexa, dada a sensibilidade desse parâmetro às condições de contorno. Os resultados das resistências características dos concretos à compressão e seus módulos de elasticidade, correlacionados à massa específica, foram considerados satisfatórios para os propósitos desta pesquisa.

4. CONCLUSÕES

Esta pesquisa apresenta os resultados de dois ensaios dinâmicos conduzidos em lajes maciças, uma de Concreto Convencional (CC) e outra de Concreto Leve com Pérolas de EPS (CLEPE), ambas suportadas por molas nos quatro lados para consideração de bordos livres. Os resultados experimentais corroboram a validação do modelo numérico, evidenciada pela estreita concordância entre as frequências naturais e modos de vibração derivados numericamente e obtidos experimentalmente. Observou-se, adicionalmente, que a capacidade de amortecimento do CLEPE é ligeiramente superior à do CC. No entanto, essa diferença é mínima. Em análises dinâmicas que levam em consideração a interação entre diversos elementos estruturais, como vigas, lajes, vedações, revestimentos e outros componentes da edificação, recomenda-se a adoção dos valores de referência fornecidos na Tabela 5 do presente artigo. Entretanto, para análises isoladas de peças de CLEPE sem fissuração, sugere-se o uso de um valor médio para o fator de amortecimento de 0,5%, o qual se revelou superior ao valor médio correspondente ao CC ensaiado, sem fissuração, que foi de 0,4%. Importante ressaltar que a pesquisa carece de uma ampliação na mensuração do fator de amortecimento para o CLEPE em situações de média e grande fissuração. Esta extensão permitirá uma compreensão mais abrangente do comportamento dinâmico do material em condições mais representativas.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] CARVALHO, R.C., FIGUEIREDO FILHO, J.R., *Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado segundo a NBR 6118:2014*, 4 ed., v. 1. São Carlos, EdUFSCar, 2014.
- [2] MAGHFOURI, M., ALIMOHAMMADI, V., GUPTA, R., *et al.*, “Drying shrinkage properties of expanded polystyrene (EPS) lightweight aggregate concrete: a review”, *Case Studies in Construction Materials*, v. 16, pp. e00919, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00919>.

- [3] WILKENING, M., SCHACK, T., HAIST, M., *et al.*, “UHPFRC-Fertigteilesegmente für einen nachhaltigen und ressourcenschonenden Betonbrückenbau”, *Beton-und Stahlbetonbau*, v. 118, n. 11, pp. 788–802, 2023. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/best.202300054>.
- [4] RODRIGUES, H.K.S., OLIVEIRA, H.A., MELO, F.M.C., *et al.*, “Propriedades de um concreto leve estrutural com incorporação de argila expandida e resíduo de granito”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 27, n. 1, pp. e13153, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620220001.1353>.
- [5] ABREU, F.S., RIBEIRO, C.C., PINTO, J.D.S., *et al.*, “Análise da eficiência da tinta de base epoxídica na proteção do concreto leve com argila expandida contra o ataque por ácido sulfúrico”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 25, n. 3, pp. e12834, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200003.1134>.
- [6] QI, J., YANG, H.-C., “Improvement of a truss-reinforced, half-concrete slab floor system for construction sustainability”, *Sustainability (Basel)*, v. 13, n. 7, pp. 3731, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/su13073731>.
- [7] YARDIM, Y., WALEED, A.M.T., JAAFAR, M.S., *et al.*, “AAC-concrete light weight precast composite floor slab”, *Construction & Building Materials*, v. 40, pp. 405–410, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.10.011>.
- [8] CAO, T.-A., NGUYEN, M.-T., PHAM, T.-H., *et al.*, “Experimental study on flexural behavior of RC-UHPC slabs with EPS lightweight concrete core”, *Buildings*, v. 13, n. 6, pp. 1372, 2023. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/buildings13061372>.
- [9] PRASITTISOPIN, L., TERMKHAJORNKIT, P., KIM, Y.H., “Review of concrete with expanded polystyrene (EPS): Performance and environmental aspects”, *Journal of Cleaner Production*, v. 366, pp. 132919, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132919>.
- [10] KADHIM, F.J., ATTAEE, M.H., ALMUSAWI, J.K., *et al.*, “A study of characteristics of man-made lightweight aggregate and lightweight concrete made from expanded polystyrene (EPS) and cement mortar”, *Open Engineering*, v. 13, n. 1, pp. 20220432, 2023. doi: <http://dx.doi.org/10.1515/eng-2022-0432>.
- [11] ISMAIL, K.M., FATHI, M.S., MANAF, M., *Study of lightweight concrete behaviour*, 1 ed. Malaysia, Universiti Teknologi Malaysia, 2004.
- [12] ANGELIN, A.F., LINTZ, R.C.C., BARBOSA, L.A.G., “Uso da argila expandida e sílica ativa no melhoramento dos desempenhos mecânicos, físicos e térmicos de concretos leves estruturais”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 22, pp. e11938, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170005.0274>.
- [13] SACHT, H.M., ROSSIGNOLO, J.A., SANTOS, W.N., “Avaliação da condutividade térmica de concretos leves com argila expandida”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 15, n. 1, pp. 31–39, 2010. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-70762010000100005>.
- [14] KAYA, B.A., KAR, F., “Thermal and mechanical properties of concretes with styropor”, *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Physik*, v. 2, n. 6, pp. 310–315, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.4236/jamp.2014.26037>.
- [15] KAYA, A., KAR, F., “Properties of concrete containing waste expanded polystyrene and natural resin”, *Construction & Building Materials*, v. 105, pp. 572–578, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.177>.
- [16] LI, S., CHEN, W., ZHANG, Y., “Flexural behavior of precast, prestressed, lightweight aggregate concrete-conventional concrete composite beams”, *Construction & Building Materials*, v. 274, pp. 121926, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121926>.
- [17] BABU, D.S., BABU, K.G., WEE, T.H., “Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash”, *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 6, pp. 1218–1223, 2005. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.11.015>.
- [18] ROY, R.L., PARANT, E., BOULAY, C., “Taking into account the inclusions’ size in lightweight concrete compressive strength prediction”, *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 4, pp. 770–775, 2005. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.002>.
- [19] CATOIA, T., “*Concreto ultraleve® estrutural com pérolas de EPS: caracterização do material e estudo de sua aplicação em lajes*”, Tese de D.Sc., Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2012.
- [20] NIKBIN, I.M., GOLSHEKAN, M., “The effect of expanded polystyrene synthetic particles on the fracture parameters, brittleness and mechanical properties of concrete”, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, v. 94, pp. 160–172, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.02.002>.

- [21] VAKHSHOURI, B., “Structural lightweight concrete containing expanded poly-styrene beads; Engineering properties”, *Steel and Composite Structures*, v. 34, n. 4, pp. 4, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.12989/scs.2020.34.4.581>.
- [22] LI, Z., CHEN, W., HAO, H., *et al.*, “Physical and mechanical properties of new lightweight ambient-cured EPS geopolymer composites”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 33, n. 6, pp. 04021094, 2021. doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003705](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003705).
- [23] SHABBAR, R., AL-TAMEEMI, A.A., ALHASSANI, A.M.J., “The effect of expanded polystyrene beads (EPS) on the physical and mechanical properties of aerated concrete”, *Open Engineering*, v. 12, n. 1, pp. 424–430, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1515/eng-2022-0020>.
- [24] GYAWALI, T.R., “Effect of the mixing procedure on the properties of lightweight EPS mortar”, *Journal of Building Engineering*, v. 68, pp. 106012, 2023. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.job.2023.106012>.
- [25] SARTORTI, A.L., “*Comportamento dinâmico de lajes maciças de concreto leve com pérolas de EPS*”, Tese de D.Sc., Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.11606/T.18.2015.tde-14082015-093624>.
- [26] MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M., *Concrete: microstructure, properties and materials*, 3 ed. New York, McGraw-Hill, 2006.
- [27] RODRIGUES, J., “*Identificação modal estocástica: métodos de análise e aplicações em estruturas de Engenharia Civil*”, Tese de D.Sc., Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2004.
- [28] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *E1876-22 Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration*, Philadelphia, ASTM, 2022.
- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 6118 Projeto de Estruturas de Concreto*, Rio de Janeiro, ABNT, 2023.
- [30] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *C215-19 Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal and Torsional Frequencies of Concrete Specimens*, Philadelphia, ASTM, 2019.
- [31] BACHMANN, H., AMMANN, W.J., DEISCHL, F., *et al.*, *Vibration problems in structures: practical guidelines*, 2 ed. Berlin, Birkhäuser Verlag, 1995. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-0348-9231-5>.