



MODELOS APRIMORADOS DE SHEAR BUILDING COM RIGIDEZ EQUIVALENTE OBTIDA POR ANÁLISE ESTÁTICA PARA AVALIAÇÃO DINÂMICA DE EDIFÍCIOS

*Tiago Tadeu Amaral de Oliveira*¹, *Luiz Antonio Farani de Souza*²

¹Doutorando em Estruturas pela Universidade Estadual de Maringá, email: tiagotadeu03@gmail.com,

²Doutor em Métodos Numéricos em Engenharia pela UFPR e Docente da UTFPR - Campus Apucarana, email: lasouza@utfpr.edu.br

RESUMO

Este trabalho propõe modelos aprimorados do tipo shear building com o objetivo de representar com maior precisão o comportamento dinâmico de edifícios estruturados em pórticos planos. A principal limitação dos modelos clássicos reside na subestimação da rigidez lateral e, conseqüentemente, na superestimação dos deslocamentos e subestimação das frequências naturais. Para contornar esse problema, são desenvolvidas duas abordagens baseadas em análise estática: (i) a determinação da rigidez equivalente de um pavimento isolado por meio da aplicação de uma força horizontal unitária sobre um pórtico típico, e (ii) a obtenção da rigidez individual de cada pavimento a partir dos deslocamentos resultantes da aplicação de forças unitárias em cada nível de um pórtico completo. Ambos os modelos foram comparados ao modelo tradicional de shear building e a um modelo de referência obtido via elementos finitos com formulação corrotacional. Os resultados mostram que os modelos propostos reduzem significativamente os erros nas frequências naturais e nos deslocamentos máximos em análises transientes, aproximando-se do comportamento real com maior eficiência computacional. A abordagem baseada no pórtico completo demonstrou melhor desempenho, sendo indicada para análises preliminares em que se busca maior realismo estrutural com baixo custo computacional.

PALAVRAS-CHAVE: Análise dinâmica; Análise transiente; MEF; Shear building.

1 INTRODUÇÃO

A análise dinâmica de estruturas civis é uma ferramenta essencial para a compreensão e previsão do comportamento de edificações submetidas a ações transitórias, como sismos, ventos, tráfego veicular e vibrações induzidas por máquinas. Essas excitações podem gerar respostas vibratórias amplificadas quando coincidem com as frequências naturais da estrutura, resultando em deslocamentos excessivos, esforços internos elevados e, em casos críticos, comprometimento da integridade estrutural e do conforto dos usuários (Santos, 2019).

O estudo de modelos simplificados para análise dinâmica de edifícios, especialmente os do tipo shear building, tem sido amplamente discutido na literatura, tanto em abordagens clássicas quanto em propostas contemporâneas que buscam superar suas limitações.

Clough e Penzien (1993) constituem um marco fundamental ao formalizar a representação de edifícios por sistemas com múltiplos graus de liberdade e massas concentradas por pavimento, conectadas por elementos verticais com rigidez lateral idealizada. Essa modelagem simples viabilizou análises eficientes no contexto da engenharia sísmica, sendo incorporada em inúmeros softwares e metodologias acadêmicas.

Chopra (2012) complementa essa base ao aprofundar a relação entre propriedades dinâmicas (frequências naturais, modos de vibração e amortecimento) e a modelagem simplificada de sistemas estruturais. Em particular, ele destaca as limitações da idealização de vigas infinitamente rígidas e a necessidade de ajustes nos modelos para capturar melhor a resposta real de edifícios altos e complexos.

Reinoso e Miranda (2005) foram além ao analisar a distribuição de acelerações em pavimentos e seus efeitos cumulativos, salientando a importância de se incorporar as



variações de rigidez ao longo da altura da edificação e o acoplamento entre modos. Tais aspectos, muitas vezes negligenciados em modelos clássicos, são cruciais para análises de desempenho sísmico e controle estrutural.

Kappos et al. (2012) propuseram uma abordagem híbrida para retrofit sísmico, utilizando modelos simplificados calibrados com análises modais e pushover. Seu trabalho mostra que é possível equilibrar fidelidade estrutural com economia computacional, desde que as distribuições de rigidez e massa sejam corretamente representadas.

Diversas contribuições técnicas propuseram ajustes ao modelo shear building. Wang e Wang (2016) incluíram a rigidez rotacional dos nós para melhorar a resposta modal, enquanto Cosenza e Manfredi (1997) incorporaram rigidez das vigas e avaliaram o impacto da fissuração nos elementos verticais. Ambas as propostas reduziram discrepâncias entre modelos simplificados e análises de Elementos Finitos.

Wang, Li e Xu (2020) utilizaram uma abordagem baseada em pushover para atualizar modelos equivalentes de rigidez lateral, com destaque para a aplicação de dados obtidos de modelos não lineares na calibração de sistemas MDOF simplificados. Essa técnica mostra-se promissora para integração com etapas iniciais de projeto.

Outros autores têm avançado na modelagem tridimensional e nos efeitos de torção. Alhan (2011) apontou que a idealização bidimensional ignora efeitos importantes em edifícios assimétricos, especialmente sob ação sísmica. Já Anagnostopoulos et al. (2015) fizeram uma extensa revisão sobre torção induzida por sismos, evidenciando que simplificações excessivas levam a erros significativos em estruturas reais.

O trabalho de Caliò et al. (2022) também se destaca ao apresentar uma revisão das principais propostas de modelos do tipo viga-coluna equivalentes aplicados a edifícios altos, com foco na precisão computacional e na incorporação de danos estruturais. Os autores ressaltam a importância de expressar a rigidez lateral não apenas como um valor isolado, mas como uma função da altura e da interação entre pavimentos.

Ainda no contexto sísmico, Saatcioglu e Humar (2003) exploraram a adaptação de modelos com rigidez ajustável para edifícios de médio porte em zonas de baixa sismicidade, sugerindo critérios para correção de rigidez e amortecimento com base em ensaios modais e registros reais de aceleração.

Por fim, Raka, Spacone e Sepe (2015) propuseram um modelo de elemento de pórtico avançado, integrando flexão e cisalhamento com não linearidades materiais, o que permitiu a análise precisa de estruturas em alvenaria e concreto armado sem os elevados custos de Elementos Finitos tridimensionais.

Dessa forma, a literatura revela não apenas o amplo uso do modelo shear building, mas também sua contínua evolução. Existe um consenso crescente de que simplificações excessivas comprometem a representatividade física do modelo, especialmente em análises dinâmicas preliminares. Daí a importância do desenvolvimento de modelos intermediários que combinam realismo estrutural com eficiência computacional, constituindo ferramentas eficazes para etapas iniciais de projeto e avaliações de segurança sísmica.

Nesse contexto, estratégias de controle estrutural tornam-se fundamentais para mitigar os efeitos dessas ações dinâmicas. Essas estratégias consistem na modificação ou ajuste de parâmetros do sistema estrutural de forma a reduzir as vibrações induzidas (Kaveh, Farzam & Maroofiazar, 2020; Salimi, Kamgar & Heidarzadeh, 2021). A efetividade desses mecanismos depende diretamente da caracterização precisa das propriedades dinâmicas da estrutura, como as frequências naturais, as razões de amortecimento e as formas modais, que são indispensáveis para a formulação de modelos confiáveis (Feng & Zhouquan, 2024).

Entre os modelos simplificados utilizados na representação do comportamento dinâmico de edifícios, o modelo do tipo shear building destaca-se pela sua simplicidade e



eficiência computacional. Neste modelo, os pavimentos são representados por massas concentradas conectadas por elementos verticais com rigidez lateral equivalente, usualmente definida com base em pilares isolados (Ribeiro, 2017). Sua formulação matemática permite a aplicação de métodos diretos de integração, como o método de Newmark (Simon, 2016), e é amplamente implementável em plataformas computacionais de código aberto, como o Scilab (Cruz, 2022). Contudo, simplificações como a consideração de vigas infinitamente rígidas e a exclusão da interação entre elementos estruturais limitam a acurácia do modelo, especialmente em situações onde o comportamento tridimensional e não linear da estrutura se torna relevante (Cardozo et al., 2024; Alhan, 2011).

1.1 OBJETIVOS E JUSTIFICAVAS

O objetivo geral deste trabalho é propor modelos simplificados do tipo shear building (SB) que representem com maior fidelidade o comportamento dinâmico de edifícios estruturados em pórticos planos, com ênfase na estimativa precisa da rigidez lateral dos pavimentos. Para isso, são desenvolvidas duas abordagens complementares baseadas em análises estáticas preliminares, tradicionalmente utilizadas na estimativa do parâmetro de estabilidade α da NBR 6118:2023. A primeira abordagem considera um pavimento isolado, modelado como um pórtico submetido a uma carga horizontal unitária, com engastamento na base. A segunda considera o edifício completo como um sistema interligado, submetido a forças horizontais unitárias aplicadas em cada pavimento, de forma a capturar os efeitos de interação estrutural ao longo da altura.

A motivação para esta proposta decorre das limitações conhecidas do modelo shear building clássico, cuja simplificação leva à superestimação das frequências naturais e à subestimação dos deslocamentos laterais. Como apontado por Clough e Penzien (1993) e Chopra (2012), essas imprecisões podem comprometer a precisão de análises modais e influenciar negativamente decisões de projeto nas fases iniciais. Trabalhos subsequentes também ressaltam que a distribuição realista da rigidez ao longo da altura e o acoplamento modal exercem influência significativa sobre a resposta dinâmica global da estrutura (Kappos et al., 2012; Reinoso & Miranda, 2005).

Nesse contexto, este estudo busca desenvolver ferramentas analíticas e numéricas de maior precisão, mantendo simplicidade formal e baixo custo computacional, de modo a fornecer suporte técnico confiável em etapas preliminares de projeto estrutural.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. MODELOS DE SHEAR BUILDING

O presente estudo tem como objetivo propor e avaliar modelos modificados de shear building que representem com maior fidelidade o comportamento dinâmico de estruturas em pórtico. Para isso, foram comparadas três configurações distintas de modelos simplificados com um modelo de referência de viga de Euler-Bernoulli detalhado por elementos finitos na formulação corrotacional.

Inicialmente, adotou-se o modelo tradicional de shear building (denominado SB_Habitual), no qual cada pavimento é representado por uma massa concentrada conectada por elementos verticais cuja rigidez lateral é determinada com base em pilares isolados. Em seguida, foram propostas duas novas estratégias de modelagem para obtenção da rigidez equivalente dos pavimentos, conforme ilustrado na Figura 1.

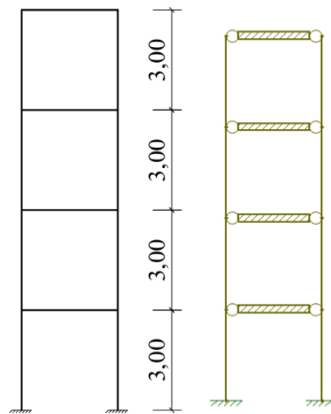


Figura 1 – Modelo Shear Building (a) e modelo de Pórtico Plano de Referência (b)

A estrutura considerada possui três pavimentos, com vigas e pilares de comprimento $L=3\text{m}$ e seção transversal retangular de $0,15 \times 0,50\text{ m}$. O material utilizado é concreto armado, com módulo de elasticidade longitudinal $E=21\text{GPa}$. Para o modelo tradicional, a rigidez lateral k_i de cada pavimento foi calculada por meio da equação clássica da rigidez de um pilar engastado na base e livre no topo:

$$k_i = \frac{12EI}{L^3} \quad (1)$$

Onde I é o momento de inércia da seção transversal da coluna.

As propostas de melhoria dos modelos de shear building consistem em duas abordagens para estimar a rigidez equivalente dos pavimentos, ambas as propostas são baseadas em modelos estáticos e tiveram a inspiração no modelo de estabilidade α da norma brasileira de concreto NBR6118(2023).

2.1.1 Proposta de SB Considerando Rigidez de um Pavimento (SB_P1PAV)

Foi considerado um pórtico plano isolado representando um único pavimento. Aplica-se uma força horizontal unitária na parte superior da viga, com a base dos pilares engastada. A rigidez equivalente dos pilares é então determinada a partir da relação força-deslocamento horizontal, considerando a contribuição das vigas e da restrição imposta pelos apoios em cada pavimento.

Considera-se a implementação de um pórtico tipo para cada pavimento (Figura 2). Com isso é possível determinar uma rigidez a flexão equivalente (EI_{eq}) para os pilares do pórtico comparando-o com um pilar simples engastado na base. Note que neste modelo é considerado a influência do espaçamento entre os pilares e também que as vigas irão contribuir na rigidez da estrutura de contraventamento, pois os pilares estarão engastados nas vigas.

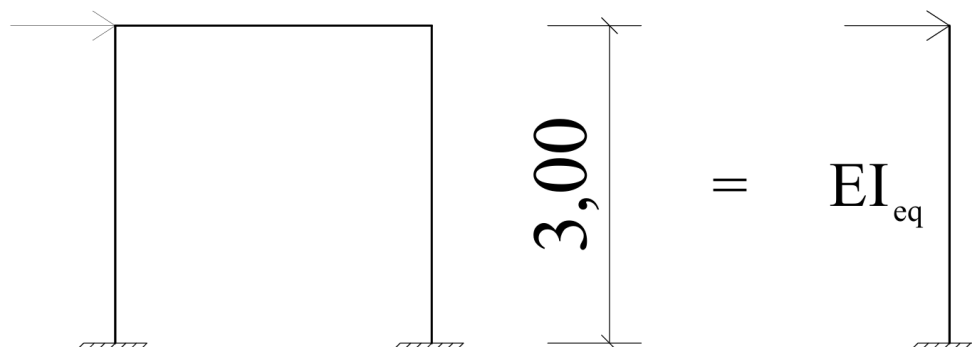


Figura 2 – Rigidez Equivalente a de um Pórtico de um pavimento



2.1.2 Proposta de SB Considerando Rigidez do Edifício (SB_PC)

Foi considerado um pórtico completo da estrutura, com aplicação de cargas horizontais unitárias independentes em cada nível. A partir dos deslocamentos no nível do pavimento, foi calculado a rigidez lateral individual de cada pavimento, considerando as interações estruturais globais. Note que neste caso existe uma contribuição do quadro fechado para aumentar a rigidez da estrutura de contraventamento, tornando a estrutura ainda mais rígida.

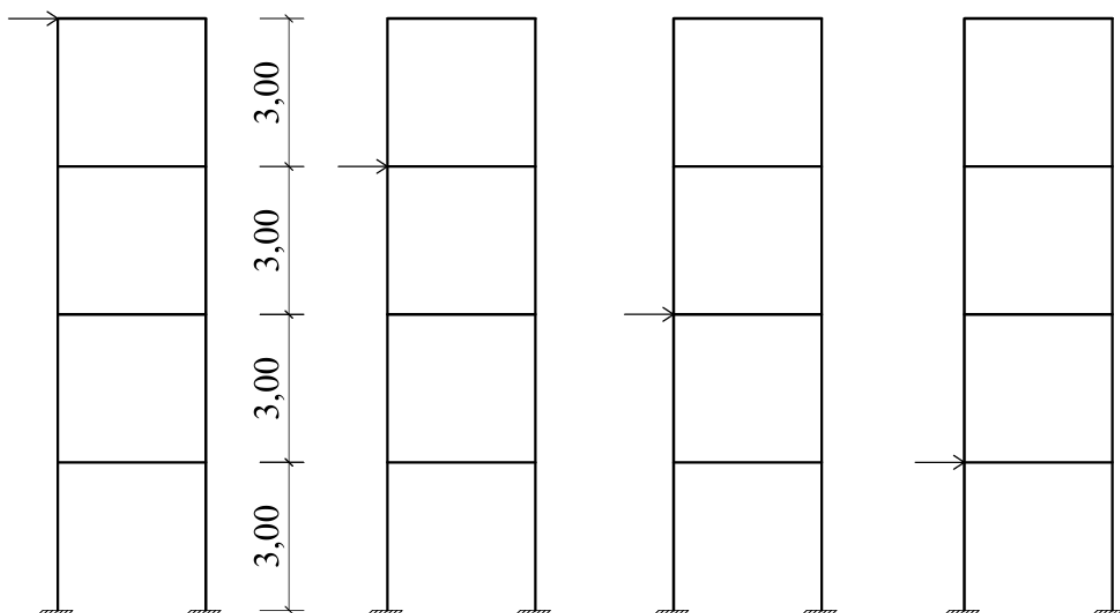


Figura 3 – Rigidez Equivalente do pavimento considerando pórtico completo

2.2 ANÁLISE DINÂMICA MODAL

O uso de métodos computacionais para análise modal tem se mostrado essencial na prática de engenharia, reduzindo significativamente o tempo de cálculo e aumentando a precisão na identificação de modos significativos para análise dinâmica e controle estrutural (Meirovitch, 2001).

No software Scilab, a função `spec` é empregada para determinar os autovalores e autovetores de uma matriz, sendo especialmente indicada para a análise modal de sistemas dinâmicos, tais como estruturas e modelos tipo shear building. Essa função fornece diretamente as frequências naturais e os modos de vibração da estrutura a partir das matrizes de massa e rigidez.

Na análise dinâmica estrutural, os autovalores calculados estão diretamente associados aos quadrados das frequências naturais do sistema em rad/s^2 , enquanto os autovetores descrevem os padrões de deslocamento relativo entre os graus de liberdade durante cada modo de vibração (Chopra, 2017). O cálculo das frequências naturais pode ser realizado a partir da Equação (2).

$$K\phi = \lambda M\phi \quad (2)$$

em que λ representa os autovalores, e ϕ os autovetores normalizados. Em ambiente computacional, essa equação é frequentemente rearranjada para a sua forma padrão dada pela Equação 3.

$$A = M^{-1}K \quad (3)$$

Podemos calcular dentro do Scilab as frequências naturais (ω) pela Equação (4) fornecendo os valores em rad/s . Tal abordagem corresponde à resolução do problema de



autovalores para sistemas lineares com amortecimento desprezível (Clough & Penzien, 2003).

$$\omega = \sqrt{\text{spec}(A)} \quad (4)$$

Essa metodologia é amplamente aceita em engenharia estrutural por sua simplicidade e eficiência computacional, especialmente para estruturas discretizadas com poucos graus de liberdade (Craig & Kurdila, 2006).

2.3 Análise Dinâmica Transiente

A equação diferencial ordinária de segunda ordem que descreve um sistema estrutural em termos dos deslocamentos nodais é dada pela Equação (5) sendo eficaz para simular a resposta de estruturas com múltiplos graus de liberdade (Cook; Malkus; Plesha, 1989).

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku - F_{ext} = 0 \quad (5)$$

onde, **K** representa a matriz de rigidez, **C** é a matriz de amortecimento, **M** é a matriz de massa, **u** é o vetor de deslocamento horizontal, \dot{u} é o vetor de velocidade, \ddot{u} é o vetor de aceleração, e **F_{ext}** é o vetor de forças externas aplicadas em função do tempo t.

A matriz de amortecimento C foi modelada por meio da matriz proporcional de Rayleigh dada pela Equação 6.

$$C = \alpha M + \beta K \quad (6)$$

onde α e β são coeficientes selecionados para especificar a razão de amortecimento modal em dois modos. Esses coeficientes são dados pelas Equações (7) e (8) (Ryan; Polanco, 2008).

$$\alpha = 2\zeta \frac{\omega_i \omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad (7)$$

$$\beta = 2\zeta \frac{1}{\omega_i + \omega_j} \quad (8)$$

onde ζ é a taxa de amortecimento, e ω_i e ω_j são as duas menores frequências naturais da estrutura.

A principal vantagem do amortecimento de Rayleigh está associada à simplicidade e à obtenção de uma matriz global de amortecimento esparsa, com estrutura semelhante à da matriz de rigidez (Soriano, 2014). Existem versões simplificadas desse método, como o amortecimento proporcional à rigidez ($\alpha=0$) e o amortecimento proporcional à massa ($\beta=0$), que permitem definir diretamente a razão de amortecimento a partir de um único modo de vibração (Ryan; Polanco, 2008).

A matriz de massa M foi definida considerando que a massa de cada pavimento está concentrada nos nós de ligação entre pilares e vigas, desconsiderando o peso próprio dos pilares e é dada pela Equação (9).

$$M = \text{diag}[m_1, m_2, m_3, m_4] \quad (9)$$

A rigidez da estrutura de tipo Shear Building é dada, pela Equação (10)

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_3 + k_4 \\ -k_4 & k_4 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

O método de Newmark, criado em 1959, é um dos métodos de integração numérica mais amplamente utilizados para resolver a equação do movimento em análises dinâmicas estruturais. Um de seus casos mais consagrados é o método da aceleração constante ($\beta = 1/4$ e $\gamma = 1/2$), que assume uma aceleração média constante no intervalo de tempo Δt , proporcionando estabilidade incondicional em sistemas lineares (Rosero & Farfan, 2017).



Devido a isso foi realizada a integração temporal do problema dinâmico com o método da família de Newmark da aceleração média constante. Foram adotados um passo de tempo $\Delta t=10^{-4}$ s, e uma duração total de simulação de 5 segundos. A excitação externa consistiu em uma carga harmônica aplicada no primeiro pavimento, com expressão dada pela Equação (11).

$$P(t) = 66560 \cdot \sin \sin (16t) \quad (11)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 ANÁLISE MODAL

Inicialmente foi gerado uma análise modal das estruturas de modelo shear Building habitual (SB_Habitual), do shear building com um pórtico simulando um pavimento (SB_P1PAV), do shear building simulando o pórtico completo (SB_PC) e do modelo de Pórtico. A análise modal resultou nas frequências naturais apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1- Frequências Naturais das Estruturas

SB_Habitual	SB_P1PAV	SB_PC	Pórtico (MEF)
37,996748	44,958172	114,75684	381,88131
13,252244	15,680202	28,601312	132,62599

A comparação das frequências naturais evidência que os modelos baseados em Shear Building subestimam de forma significativa a rigidez estrutural da edificação em relação ao modelo de referência obtido por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF). Embora essas simplificações sejam capazes de representar parcialmente a tendência geral do comportamento dinâmico, apresentam erros consideráveis na estimativa da rigidez global, especialmente nos modos superiores de vibração, o que compromete sua aplicação em análises modais mais detalhadas.

3.2 ANÁLISE TRANSIENTE

Na sequência foram realizadas as análises transientes. Traçando gráficos de deslocamento horizontal no topo da estrutura ao longo do tempo. Os modelos de Shear Building apresentaram o seguinte comportamento.

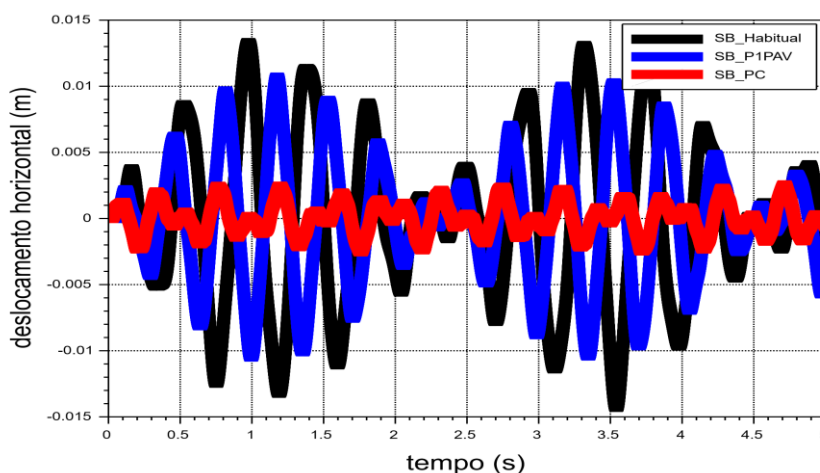


Figura 4 – Análise Transiente dos Modelos de Shear Building sem amortecimento



Pode-se observar que os modelos propostos (SB_P1PAV e SB_PC) apresentam uma redução significativa na amplitude das vibrações em comparação ao modelo clássico SB_Habitual. Esse comportamento está diretamente relacionado ao aumento da rigidez lateral introduzido nos novos modelos. À medida que a rigidez estrutural é elevada, a estrutura se torna menos suscetível à deformação sob excitações dinâmicas, o que resulta na redução da amplitude dos deslocamentos. Além disso, o aumento da rigidez também implica em elevação das frequências naturais da estrutura, o que é evidenciado pelo encurtamento dos períodos de oscilação nos modelos aprimorados, especialmente no SB_PC. Essa alteração na frequência é benéfica do ponto de vista do controle dinâmico, pois afasta o sistema de possíveis ressonâncias com fontes excitadoras típicas, aumentando a estabilidade e o desempenho dinâmico da edificação.

Considerando uma taxa de amortecimento de 2% obteve-se a análise dos modelos com amortecimento (Figura 5).

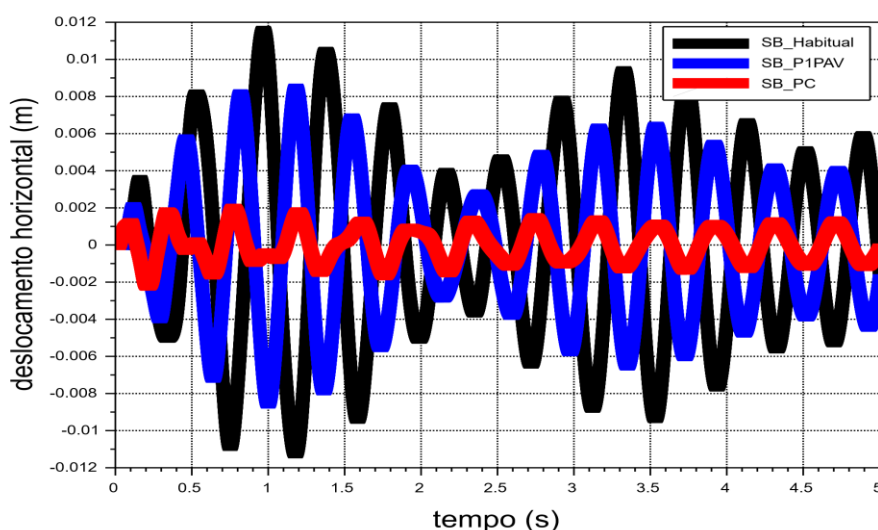


Figura 5 - Análise Transiente dos Modelos de Shear Building com amortecimento

A análise transiente realizada com consideração de amortecimento revela resultados importantes quanto ao comportamento dinâmico dos modelos shear building propostos. Observa-se, no gráfico de deslocamento horizontal no topo da estrutura, que todos os modelos apresentaram uma redução gradual da amplitude de vibração ao longo do tempo, o que demonstra a efetividade da modelagem do amortecimento viscoelástico adotada, baseada na formulação de Rayleigh.

O modelo SB_Habitual, por possuir a menor rigidez lateral entre os analisados, exibiu os maiores deslocamentos iniciais, com picos superiores a 10 mm. Sua taxa de atenuação das vibrações foi também a mais lenta, indicando que, mesmo com amortecimento, uma estrutura modelada dessa forma continua a apresentar resposta vibratória intensa e prolongada.

Já o modelo SB_P1PAV apresentou uma resposta dinâmica intermediária, com deslocamentos máximos menores que os do modelo habitual e uma taxa de amortecimento mais eficiente. Isso reflete o ganho de rigidez ao se considerar o efeito de um pórtico plano típico em cada pavimento, representando uma melhoria significativa em relação à formulação tradicional.

O destaque, no entanto, foi o modelo SB_PC, que simula o comportamento de um pórtico completo, incluindo os efeitos de interação entre pavimentos. Este modelo



demonstrou os menores deslocamentos máximos, com amplitudes da ordem de apenas 2 a 3 mm, e uma rápida dissipação da energia vibratória.

Esse comportamento dos modelos confirma que a maior rigidez lateral global conferida pela modelagem integrada tem um impacto direto e positivo sobre a resposta dinâmica da estrutura, mesmo quando submetida a excitações harmônicas.

Outro ponto importante observado no gráfico é a diferença de frequência entre os modelos. O aumento da rigidez está associado a um aumento das frequências naturais, ou seja, quanto mais rígido o modelo, mais rápida é sua oscilação. Isso é visível pela maior densidade de ciclos nos modelos aprimorados, em especial no SB_PC, em comparação com o modelo habitual.

Na sequência foi realizada uma análise do modelo mais próxima da estrutura real com o modelo de pórtico com e sem amortecimento (Figura 6).

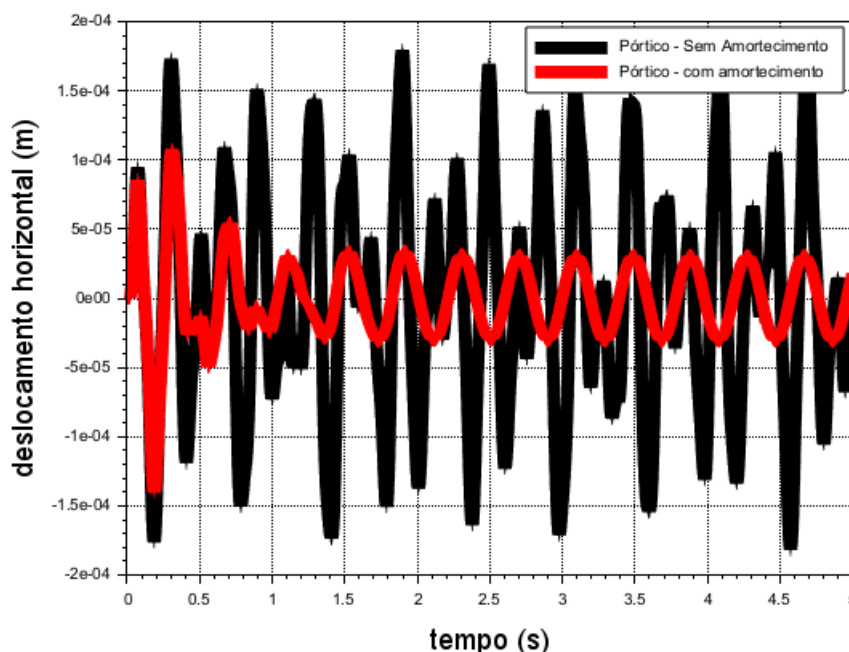


Figura 6 - Modelo de Pórtico 2D com e sem amortecimento

A comparação entre a resposta dinâmica do pórtico modelado via Método dos Elementos Finitos e os modelos simplificados do tipo Shear Building evidencia diferenças marcantes, especialmente em relação aos deslocamentos horizontais. O modelo de pórtico apresentou deslocamentos significativamente menores ao longo do tempo, resultado da consideração mais precisa da rigidez global da estrutura e da distribuição real das massas e ligações. Em contraste, os modelos Shear Building, por adotarem simplificações como pavimentos rígidos e colunas idealizadas, tendem a superestimar os deslocamentos, subestimando a rigidez efetiva do sistema estrutural. Essa discrepância reforça as limitações dos modelos simplificados para análises dinâmicas quantitativas.

A utilização do modelo de amortecimento de Rayleigh na análise do pórtico contribuiu diretamente para a redução das amplitudes vibratórias, como evidenciado na curva vermelha do gráfico. Esse modelo, ao considerar termos proporcionais à massa e à rigidez, permite uma representação eficiente da dissipação de energia em múltiplos modos de vibração. A resposta amortecida apresentou atenuação progressiva das oscilações e estabilização mais rápida em comparação ao caso sem amortecimento, demonstrando a importância desse recurso na contenção de vibrações excessivas. Assim, a inclusão do amortecimento de Rayleigh resultou em uma resposta mais realista, aproximando-se do comportamento esperado em estruturas reais submetidas a excitações transitórias.



Pode-se constatar também os valores de amplitude máxima o topo do edifício para realizarmos uma comparação (Tabela 2).

Tabela 2 - Amplitude Máxima de Deslocamento
Máximo Deslocamento sem Amortecimento

Pórtico	SB original	SB P1PAV	SB PC
0,0001838	0,0140117	0,0106786	0,002539
Comparação	76,23341	58,09902	13,81393

A tabela apresentada mostra o deslocamento horizontal máximo obtido para diferentes modelos estruturais na ausência de amortecimento. O modelo de pórtico, considerado como referência por incorporar a rigidez e inércia distribuídas de forma mais precisa, apresentou o menor deslocamento máximo. Em contraste, os modelos simplificados do tipo Shear Building superestimaram significativamente esse valor: o SB_original apresentou um deslocamento 76 vezes maior, o SB_P1PAV foi 58 vezes superior e, mesmo o modelo mais refinado, SB_PC, ainda superou o deslocamento do pórtico em cerca de 14 vezes. Esses resultados evidenciam que, apesar das melhorias progressivas nas propostas SB, as simplificações adotadas nesses modelos comprometem substancialmente a precisão da resposta dinâmica, tornando-os inadequados para análises quantitativas em que a previsão de deslocamentos seja crítica.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que os modelos propostos de shear building representam avanços significativos na aproximação do comportamento dinâmico global de estruturas, quando comparados ao modelo tradicional. As versões ajustadas, especialmente a proposta baseada na modelagem do pórtico completo (Proposta 2), demonstraram maior capacidade de capturar a distribuição de deslocamentos ao longo dos pavimentos e forneceram estimativas mais próximas da rigidez global da estrutura de referência.

Apesar dessas melhorias, os deslocamentos previstos pelos modelos simplificados ainda permanecem substancialmente superiores aos obtidos no modelo de pórtico plano, o que evidencia limitações inerentes à idealização. A Proposta 2 apresentou o melhor desempenho entre as alternativas analisadas, mas ainda se mostra inadequada para substituir análises estruturais detalhadas, especialmente em casos com irregularidades geométricas, efeitos de segunda ordem ou acoplamentos modais significativos.

Dessa forma, os modelos de shear building propostos são recomendados para análises preliminares, estudos conceituais ou avaliações iniciais de desempenho global, onde se busca eficiência computacional e estimativas de ordem de grandeza. Reforça-se, no entanto, a necessidade do uso de modelos completos (como o pórtico plano com elementos finitos) nas etapas avançadas de projeto, sobretudo para verificações normativas, avaliação de segurança e dimensionamento preciso.

Ainda assim, os modelos aprimorados demonstraram vantagens sobre a formulação tradicional ao refletirem melhor o efeito da rigidez global do sistema, podendo auxiliar de forma mais eficaz na definição preliminar da distribuição dos pilares e na otimização estrutural em fases iniciais de projeto.



REFERÊNCIAS

ALHAN, C.; SÜRMELE, M. **Shear building representations of seismically isolated buildings**. Bulletin of Earthquake Engineering, v. 9, p. 1643–1671, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/S10518-011-9293-Z>.

ANAGNOSTOPOULOS, S. A.; KYRKOS, M. T.; STATHOPOULOS, K. G. **Earthquake-induced torsion in buildings: critical review and state of the art**. Earthquakes and Structures, v. 8, n. 2, p. 305–377, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.12989/eas.2015.8.2.305>.

BATHE, K. J. **Finite Element Procedures**. Prentice-Hall, 2006.

CARDOZO, M.; SOUZA, L. A. F. de; MARTINS, C. H.; ROSSI, A. **Análise transiente e modal de edificações tipo shear building com consideração da deformação por cisalhamento e do efeito P-Delta**. Revista Principia, João Pessoa, 2024.

CALIÒ, I.; FIORE, I.; CADDEMI, S. **A review of simplified numerical beam-like models of multi-storey framed buildings**. Buildings, v. 12, n. 9, p. 1397, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings12091397>.

CHOPRA, A. K. **Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering**. 4. ed. Prentice Hall, 2012.

CHOPRA, A. K. **Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering**. 5. ed. Pearson, 2017.

CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. **Dynamics of Structures**. 3. ed. Computers & Structures Inc., 2003.

CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. **Dynamics of Structures**. McGraw-Hill, 1993.

COOK, R. D.; MALKUS, D. S.; PLESHA, M. E. **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**. 3. ed. New York: Wiley, 1989.

CRAIG, R. R.; KURDILA, A. J. **Fundamentals of Structural Dynamics**. 2. ed. Wiley, 2006.

CRUZ, S. C. F. O. **Análise dinâmica de estruturas modeladas como shear building**. Jataí: Instituto Federal de Goiás, 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil).

COSENZA, E.; MANFREDI, G. **Seismic response of multistorey RC frames: influence of modelling assumptions**. Engineering Structures, v. 19, n. 7, p. 565–576, 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(96\)00123-0](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(96)00123-0).

FENG, Z. et al. **Bayesian spectral decomposition for efficient modal identification using ambient vibration**. Structural Control and Health Monitoring, v. 2024, n. 1, p. 5137641, 2024.

HUGHES, T. J. R. **The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis**. Dover Publications, 2000.

KAPPOS, A. J. et al. **A hybrid method for seismic retrofitting of buildings**. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, v. 41, n. 4, p. 693–715, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/eqe.1145>.



- KAVEH, A.; FARZAM, H.; MAROOFIAZAR, R. **Comparative evaluation of structural vibration control methods using metaheuristic optimization**. Structural Engineering and Mechanics, v. 74, n. 4, p. 439–455, 2020.
- MEIROVITCH, L. **Fundamentals of Vibrations**. McGraw-Hill, 2001.
- MOHEBBI, M.; ATEF, A.; SHIRAZI, S. M. H. **The effect of lateral stiffness on the performance of tall buildings under seismic loads**. International Journal of Civil Engineering, v. 10, n. 1, p. 35–48, 2012.
- RAKA, E.; SPACONE, E.; SEPE, V. **Advanced frame element for seismic analysis of masonry structures: model formulation and validation**. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, v. 44, n. 8, p. 1271–1290, 2015.
- REINOSO, E.; MIRANDA, E. **Estimation of floor acceleration demands in regular buildings**. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, v. 34, n. 12, p. 1561–1578, 2005.
- RIBEIRO, F. **Análise modal de um modelo shear building sob carregamento senoidal**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil).
- ROSERO, J. A.; FARFAN, H. F. **Implementación del método de Newmark en la simulación numérica de sistemas estructurales bajo cargas dinámicas**. Revista Ingeniería y Competitividad, v. 19, n. 2, p. 85–94, 2017.
- SALIMI, M.; KAMGAR, R.; HEIDARZADEH, H. **An evaluation of the advantages of friction TMD over conventional TMD**. Innovative Infrastructure Solutions, v. 6, p. 1–12, 2021.
- SANTOS, J. P. dos. **Análise modal de edifício em pórtico plano utilizando amortecimento de Rayleigh**. 2019.
- SILVA, M. A. G.; RANGEL, R. G. **Análise Estrutural Moderna**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, 2023.
- SIMON, A. C. **Estudo da aplicabilidade de múltiplos absorvedores de massa sintonizados para redução de vibração em estruturas sob eventos sísmicos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica).
- SOUZA, L. R. de; FRANCO, G. B.; MIGUEL, L. F. F. **Modelo numérico-computacional para a análise modal e transiente de shear building utilizando o programa Scilab**. Maringá: UEM, 2024.
- SAATCIOGLU, M.; HUMAR, J. **Dynamic analysis of buildings for earthquake-resistant design**. Canadian Journal of Civil Engineering, v. 30, n. 2, p. 255–271, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/I02-108>.
- WANG, D.; LI, H.; XU, H. **Model updating of shear building using lateral stiffness distribution based on static pushover analysis**. Journal of Structural Engineering, v. 146, n. 6, p. 04020084, 2020.
- WANG, W.; WANG, Y. **Improved shear building models considering flexural and shear deformations**. Engineering Structures, v. 128, p. 307–317, 2016.
- XU, Y. L. **Analytical study on the dynamic characteristics of tall buildings with tuned mass dampers**. Engineering Structures, v. 14, n. 3, p. 198–206, 1992.