

Estudo Do Desempenho Sísmico De Um Pórtico Espacial Via Método De Hirosawa Adaptado

Philippe Queiroz Rodrigues¹, João da Costa Pantoja², Paulo de Souza Tavares Miranda³

¹ Universidade de Brasília/ Departamento de Tecnologia /engcivil.philip@gmail.com

² Universidade de Brasília/ Departamento de Tecnologia /joaocpantoja@gmail.com

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará /paulofilho@paulofilho.eng.br

Resumo

Terremotos recentes como da Turquia (2023) com efeitos devastadores reacendem a discussão sobre a atividade sísmica no Brasil e a susceptibilidade ao dano do parque edificado brasileiro face a um abalo sísmico. Apesar das baixas magnitudes, os registros nacionais não devem ser negligenciados visto que terremotos inferiores a magnitude cinco pode causar perda de vidas e danos materiais. Dada a escassez de pesquisas acerca da vulnerabilidade sísmica de estruturas existentes, o objetivo principal deste artigo é comparar o comportamento sísmico de um pórtico espacial de concreto armado submetido a diferentes acelerações sísmicas horizontais com variação da quantidade de pavimentos pelo Método de Hirosawa Adaptado. A estrutura modelo extraída da literatura possui irregularidade vertical e assimetria em uma das direções. As análises conduzidas mostraram a influência da deterioração estrutural e quantidade de pavimentos adicionais no desempenho sísmico da edificação. Não obstante, o acréscimo de quatro novos pavimentos reduziu o índice de desempenho sísmico global significativamente (28,87%) tornando incerta a segurança da estrutura nas zonas 3 e 4 para qualquer classe de terreno definida pela NBR 15421. Apenas na zona 0 e estrutura hipoteticamente isenta de deterioração o acréscimo de pavimentos não impactaria na resistência sísmica da edificação.

Palavras-chave

Vulnerabilidade sísmica; Método de Hirosawa Adaptado; concreto armado; análise sísmica.

Introdução

Em fevereiro de 2010, o Chile sofreu um dos maiores terremotos já registrados com valor de 8,8 de magnitude e confirmadas 795 mortes. Aproximadamente treze anos depois, no sul da Turquia e norte da Síria efeitos do terremoto principal de 7.8 acompanhado de outros secundários tem vitimado fatalmente 47.095 pessoas, outras 115.626 com ferimentos não fatais e ainda pelo menos 2,4 milhões de pessoas desalojadas. Até a data da redação deste artigo (março/2023) ao menos 6589 edifícios colapsaram total ou parcialmente. Os danos à propriedade estão estimados entre 50 a 85 bilhões de dólares (Reuters, 2023). Claramente destes eventos apreende-se o imprescindível papel da engenharia, seja no projeto ou execução, a fim de preservar vidas e minimizar os danos. A figura 1 registrada pela British Broadcasting Corporation (BBC, 2023) compara um edifício recém-inaugurado na Turquia após o terremoto.

No contexto nacional eventos catastróficos como na Turquia reacendem discussões sobre atividades sísmicas no Brasil e seus efeitos na realidade do parque edificado brasileiro. O território brasileiro está situado no centro da placa Sul-Americana conferindo certa estabilidade se comparado com os países andinos como Chile, Peru Equador e Colômbia situados na borda da mesma placa. Enquanto no Brasil sismos de magnitude 5 ocorrem a cada 5 anos, aproximadamente, a mesma magnitude é registrada duas vezes por semana na região Andina. No entanto, a percepção que o Brasil é assísmico está incorreta uma vez que sismos pequenos a moderados não são raros. Sismos intraplaca de grande

intensidade podem ocorrer, apesar de raros, visto que as tensões liberadas podem ser maiores que aquelas registradas na borda (ASSUMPCÃO et al., 2016).

Ainda que incipiente, alguns pesquisadores tem se desdobrado no estudo de normativos sísmicos como Lima e Santos (2008) e sua vasta contribuição para elaboração na primeira norma sísmica brasileira NBR 15421 publicada em 2006 e atualmente em fase de revisão, Miranda (2013) com adaptação do método de avaliação da vulnerabilidade sísmica de estruturas existentes para a realidade brasileira. Peña (2012) aborda a influência da configuração estrutural na resposta sísmica de uma estrutura de concreto armado. Filho (2021) efetuou análise sísmica de dois edifícios típicos de seis pavimentos em Brasília. Propôs ainda a utilização de superfícies para demonstrar o comportamento do índice de desempenho em função do fator de deterioração e configuração estrutural e, da mesma forma, para o índice de solitação sísmica em função da zona sísmica e fator de importância da edificação. Miranda (2021) desenvolveu também exaustivo estudo da influência das ações sísmicas em estruturas modelo do parque edificado de fortaleza, capital do estado do Ceará e cidade com elevado risco sísmico no Brasil. Rodrigues et al (2022) examinaram a estrutura do Palacio do Planalto frente a um terremoto considerando diferentes acelerações sísmicas horizontais e localizado em variadas classes de terreno.

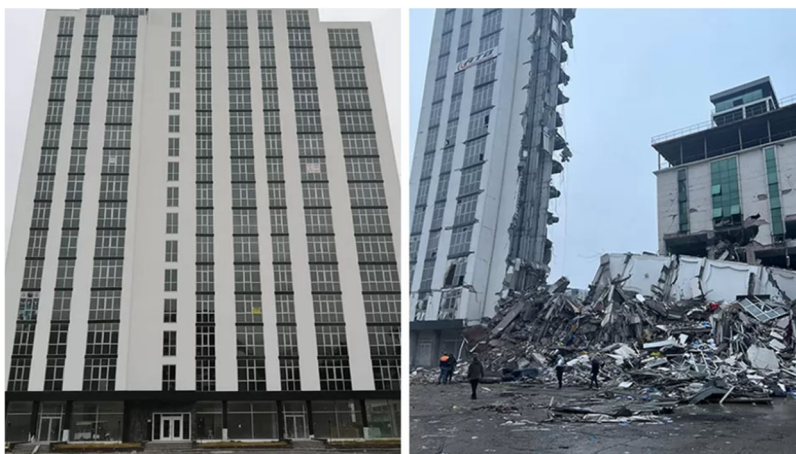


Figura 1 - Edifício residencial na Turquia inaugurado em 2019 - Fonte: (BBC, 2023)

O presente estudo busca dar continuidade às pesquisas pela verificação da contribuição da variável número de pavimentos na avaliação da vulnerabilidade sísmica pelo método de Hirosawa Adaptado. Para isto, a estrutura modelo sugerida por Miranda (2013) será novamente examinada, contudo, com incremento paulatino de pavimentos, ou seja, adicionará um pavimento e com isto calculará o índice de desempenho sísmico no primeiro pavimento. Após quatro incrementos, será comparado os índices a fim de averiguar o impacto das modificações no nível de segurança da estrutura modelo. A fim de otimizar as análises, empregou-se pacote computacional com método de Hirosawa implementado (RODRIGUES et al, 2022)

Método de Hirosawa Adaptado

O Método de Hirosawa, base das diretrizes do Japan Building Disaster Prevention Association, e adaptado por Miranda (2013) figura como método de rápida aplicação, baixo custo e triagem inicial. Baseia-se em três camadas de procedimentos: triagem visual rápida da edificação, avaliação preliminar e exame detalhado (SIDDHARTH ET AL, 2022). A resistência do edifício às cargas laterais é estimada baseado somente nos elementos verticais (pilares, pilares curtos e paredes de concreto) (FIB BULLETIN 24, 2003). O índice sísmico I_s da estrutura indica a capacidade resistente total de um pavimento é composto pelo produto de três índices: desempenho sísmico básico (E_0), índice de configuração estrutural (S_D) e índice de deterioração da estrutura (T_D) (Eq. 1).

$$I_S = E_0 \cdot S_D \cdot T_D \quad (1)$$

O subíndice de desempenho básico estrutural E_0 considera o número total de pavimentos, número de pavimentos sob avaliação, tensão última cisalhante e a ductilidade dos elementos estruturais e também o tipo de falha (Eq. 2). Todos os elementos verticais como pilares devem ser incluídos e também definidos se curtos ou não. O subíndice S_D leva em consideração a influência da irregularidade da estrutura ou rigidez, distribuição de massa e é estimado considerando; irregularidade do plano, razão entre o comprimento e largura da planta, existência de subsolos, irregularidade das alturas dos pavimentos, razão da área do átrio e a área total do pavimento. O desempenho estrutural é influenciado pela deterioração estimada pelo subíndice T. Este índice é ajustado através de pesquisa em in loco, observando as fissuras nas paredes, pilares bem como deformações. Outras considerações ponderam o subíndice como a ocorrência de incêndio, a idade da edificação e o seu uso.

$$E_0 = \left\{ \left(\frac{n+1}{n+i} \right) \right\} \cdot a_1 \left[\frac{f_c}{20} \cdot \frac{(\tau_{c1} \cdot A_{c1} + \tau_{c2} \cdot A_{c2})}{W} \right] \cdot F_c \quad (2)$$

Para estabelecer as condições que a estrutura está inserida, o método determina o índice de solicitação sísmica (Eq. 3) onde $E_S = 0,8$ para o primeiro nível, Z é o índice de zona atribuído à aceleração horizontal do solo conforme mapa de aceleração sísmica horizontal característica da ABNT NBR 15421 e o fator G corresponde ao coeficiente dos efeitos topográficos. O índice U considera a importância da edificação onde $U = 1,0$ para edifícios em gerais, $U = 1,5$ para hospitais, quartéis general ou ainda edifícios com componentes químicos como Usinas Nucleares. O desempenho sísmico da estrutura é dado pela comparação entre o índice sísmico e o índice de solicitação sísmica. Se $I_S > I_{S0}$, o edifício possui resistência suficiente face ao terremoto assumido e é classificado como seguro. Caso contrário, $I_S \leq I_{S0}$, o edifício possui desempenho incerto face ao terremoto assumido.

$$I_{S0} = E_S \cdot Z \cdot G \cdot U \quad (3)$$

Dados do Edifício

A estrutura modelo possui resistência do concreto a compressão de 20 MPa. A altura entre pavimentos é de 2.8 m. As vigas possuem seção transversal de 15×40 cm² e os pilares seção transversal 20×40 cm². Considerou-se carregamento permanente de revestimento na ordem de 1,0 kN/m² e carga linear de parede sobre as vigas com peso específico da alvenaria de 13,0 kN/m³. O peso específico do concreto armado adotado é 25 kN/m³. As figuras 3 e 4 apresentam as plantas de forma dos pavimentos.

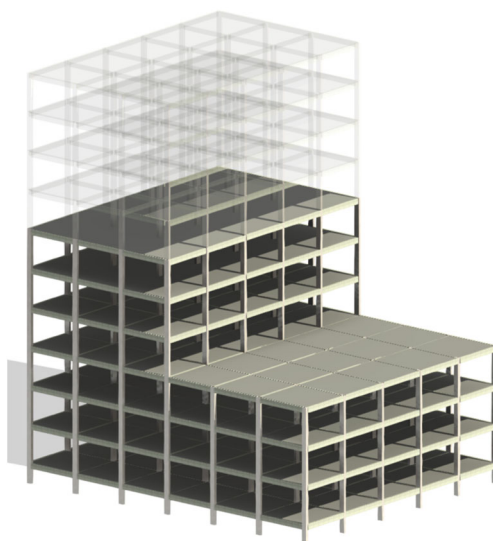


Figura 2 - Pórtico espacial da estrutura modelo

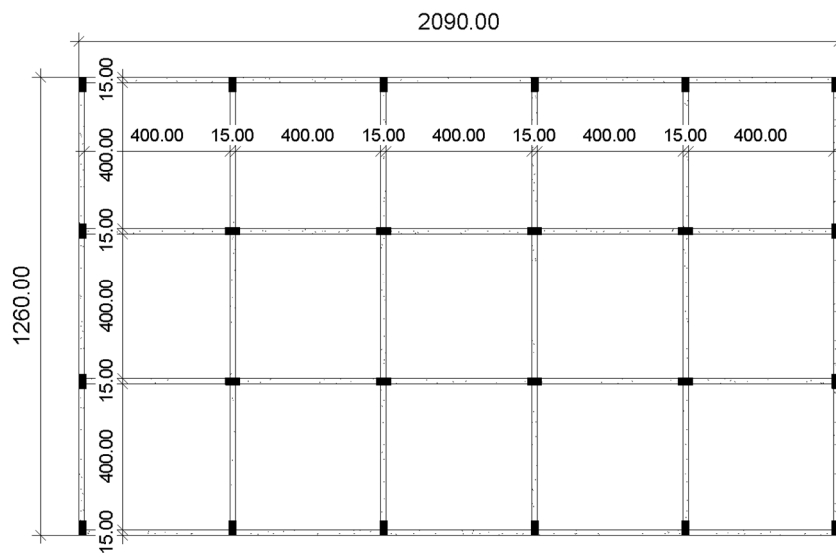


Figura 3 - Planta de forma do nível +11,20

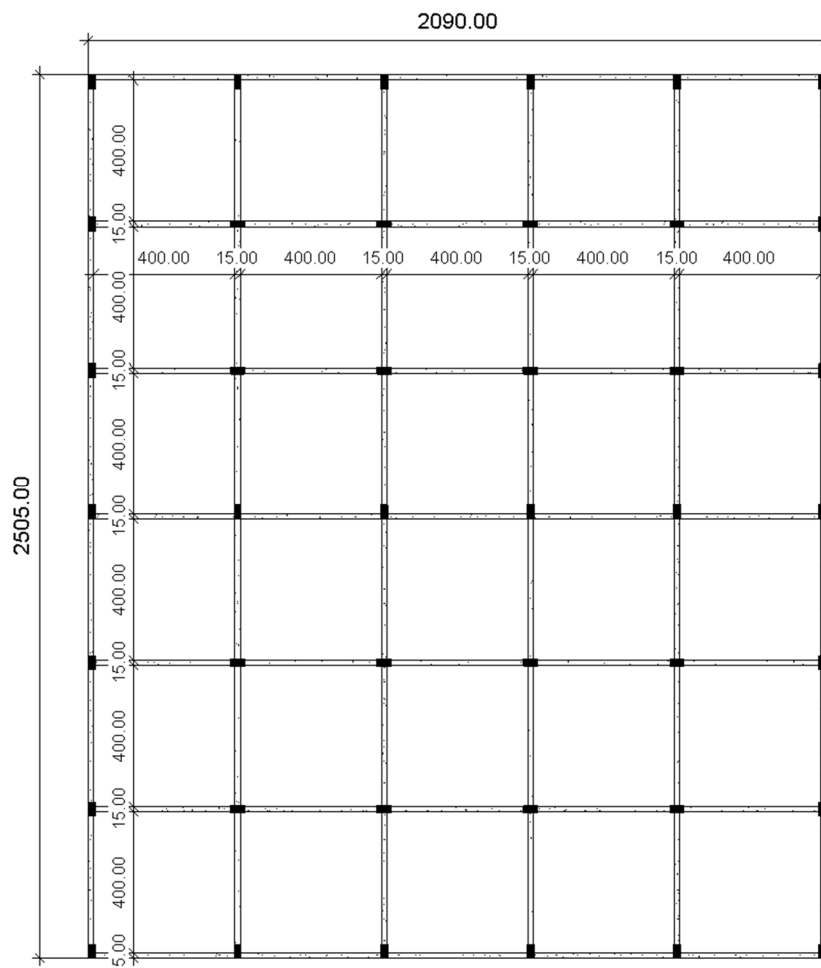


Figura 4 - Planta de forma do nível +2,80

Resultados

A partir da estrutura modelo de Miranda (2013) acrescentou-se quatro novos pavimentos diferenciados na figura 2 pela transparência esmaecida. As dimensões dos elementos estruturais mantiveram-se constantes ainda nos pavimentos adicionais e, para cada incremento de pavimento registrou-se o valor do índice de desempenho sísmico no primeiro pavimento. As tabelas 1 e 2 apresentam as características dos pavimentos e seus respectivos índices de desempenho sísmico.

Tabela 1 - Índice de desempenho sísmico (I_s) dos pavimentos 1 ao 6

	Pavimento 1	Pavimento 2	Pavimento 3	Pavimento 4	Pavimento 5	Pavimento 6
Nível da laje (m)	+ 2,80	+5,60	+8,40	+11,20	+14,00	+16,80
Soma da Área da Seção Transversal (cm ²)	33.600,00	33.600,00	33.600,00	19.200,00	19.200,00	19.200,00
Peso total acima do nível considerado (W) em kgf	2.743.227,23	2.170.059,54	1778057,06	1.386.054,56	1.188.046,76	990.038,97
Área do pavimento (m ²)	523,55	523,55	523,55	263,34	263,34	263,34
Período Natural (s)	0,935	0,935	0,935	0,935	0,935	0,935
Subíndice de desempenho sísmico básico estrutural E_0	0,0857	0,0994	0,1119	0,0762	0,083	0,0933
Subíndice de configuração estrutural S_D	1	1	1	1	1	1
Subíndice de deterioração estrutural T_D	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Índice de desempenho I_s	0,0771	0,0895	0,1007	0,0686	0,0747	0,084

Tabela 2 - Índice de desempenho sísmico (I_s) dos pavimentos 7 ao 10

	Pavimento 7 (adicional)	Pavimento 8 (adicional)	Pavimento 9 (adicional)	Pavimento 10 (adicional)
Nível da laje (m)	+ 19,60	+22,40	+25,20	+28,00
Soma da Área da Seção Transversal (cm ²)	19.200,00	19.200,00	19.200,00	19.200,00
Peso total acima do nível considerado (W) em kgf	792.031,19	594.023,38	396.015,57	198.007,8
Área do pavimento (m ²)	263,34	263,34	263,34	263,34
Período Natural (s)	0,935	0,935	0,935	0,935
Subíndice de desempenho sísmico básico estrutural E_0	0,1098	0,1383	0,1965	0,3733
Subíndice de configuração estrutural S_D	1	1	1	1
Subíndice de deterioração estrutural T_D	0,9	0,9	0,9	0,9
Índice de desempenho I_s	0,0988	0,1245	0,1768	0,336

A tabela 3 sumariza os valores do índice de desempenho sísmico considerando total de pavimentos entre seis e dez. Cada coluna informa o índice em função da deterioração estrutural sendo 0,7 alto grau de deterioração e 1,0 indicando uma estrutura nova, recém construída, e, em tese, isenta de deterioração. O subíndice de desempenho sísmico básico estrutural para cada configuração de pavimentos é também registrado na última coluna.

Tabela 3 - Índice de desempenho sísmico com variação da deterioração estrutural

Nº. pavimentos	Deterioração Estrutural (T_D)				
	$T_D = 0,7$	$T_D = 0,8$	$T_D = 0,9$	$T_D = 1,0$	E_o
6	0,0844	0,0964	0,1084	0,1205	0,1205
7	0,0766	0,0875	0,0985	0,1094	0,1094
8	0,0701	0,0802	0,0902	0,1002	0,1002
9	0,0647	0,0739	0,0832	0,0924	0,0924
10	0,06	0,0686	0,0771	0,0857	0,0857

Evidencia-se que o acréscimo de um pavimento tipo reduz o índice de desempenho sísmico em 10% se comparado ao mesmo índice na edificação de 6 pavimentos e cenário de $T_D = 0,9$. Assim, respectivamente, 8 pavimentos I_s decresce 16,78%, para 9 pavimentos 23,24% e, por último, dez pavimentos ocorre redução de 28,87% no índice de desempenho sísmico quando comparado com a literatura de seis pavimentos proposta por Miranda (2013). A figura 5 representa os índices de desempenho sísmico de cada pavimento em escala de cores variando de 0.06 até 0.33.

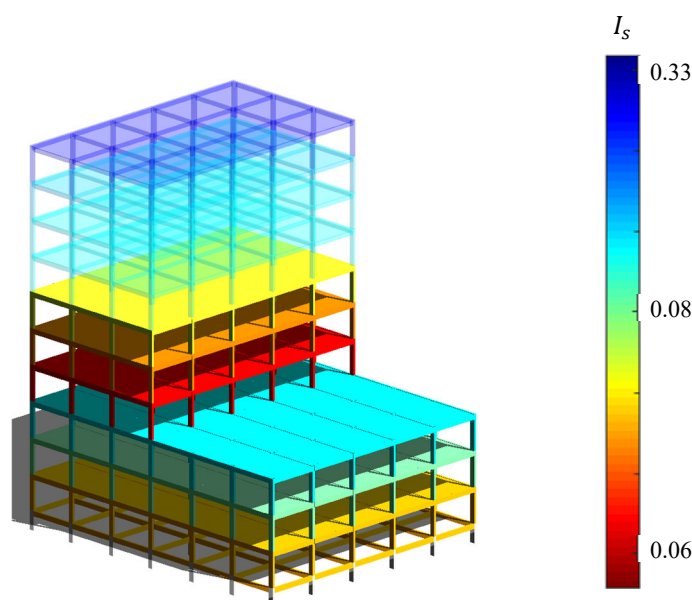


Figura 5 - Índice de desempenho sísmico de cada pavimento

Conhecida a resistência sísmica da edificação, a tabela 4 trás os valores de solicitação sísmica abrangendo a variação da zona sísmica e classe do terreno. A categoria de utilização da estrutura fixou-se $U = 1,5$, relativo a estruturas de uso essencial.

Tabela 4 - Índice de Solicitação Sísmica I_{so}

Zona Sísmica	Classe de Terreno				
	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D	Classe E
0	0,0249	0,0311	0,0374	0,0498	0,0778
1	0,0498	0,0622	0,0747	0,0996	0,1556
2	0,0996	0,1245	0,1494	0,1992	0,3113
3 e 4	0,1494	0,1868	0,2241	0,2801	0,3922

Uma análise cuidadosa das tabelas 3 e 4 expõe que o acréscimo de 1 ou 4 pavimentos retira a edificação de comportamento sísmico seguro e a torna com comportamento incerto para estruturas com alto grau de deterioração ($T_D = 0,7$). Isto se explica pois o índice de solicitação Sísmica nas Zonas 0 a 4, Classe de terreno E, é superior ao Índice de desempenho sísmico das estruturas com 7

até 10 pavimentos. Agora, considerando a edificação recém construída e, teoricamente, isenta de deterioração ($T_D = 1,0$) apenas na Zona 0 para todas as classes de terreno, o acréscimo de pavimentos não impactaria na resistência sísmica da edificação. Outra verificação indica que a edificação com incremento de pisos teria comportamento inseguro nas zonas 3 e 4 para qualquer classe de terreno definida pela NBR 15421 (Figura 6).

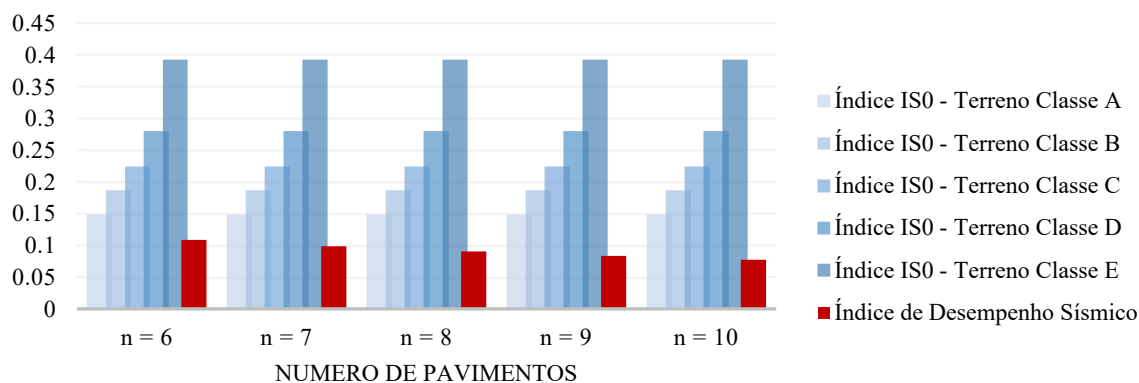


Figura 6 - Gráfico comparativo da Estrutura em zona sísmica 3 e 4

Na proposta original Miranda (2013) adotou $T_D = 0,9$ em seus exemplos e seguiu-se aqui também para fins de estudo. Em terrenos de classe A (Rocha sã), a adição de até dois pavimentos não afetaria a resistência sísmica da edificação nas zonas sísmicas 0 e 1. Entretanto, não se pode afirmar para a zona 2 onde $I_{S0} > I_S$. Pode-se demonstrar isto traçando um plano de ruptura cujos pontos acima representam $I_S > I_{S0}$ e, de igual modo, abaixo do plano equivale a $I_S < I_{S0}$ (Figura 7). Da combinação entre os valores do Índice de desempenho Sísmico de 6 a 10 pavimentos e terrenos da classe A, em nove casos a solicitação supera a resistência, ou seja, valores negativos, portanto, abaixo do plano.

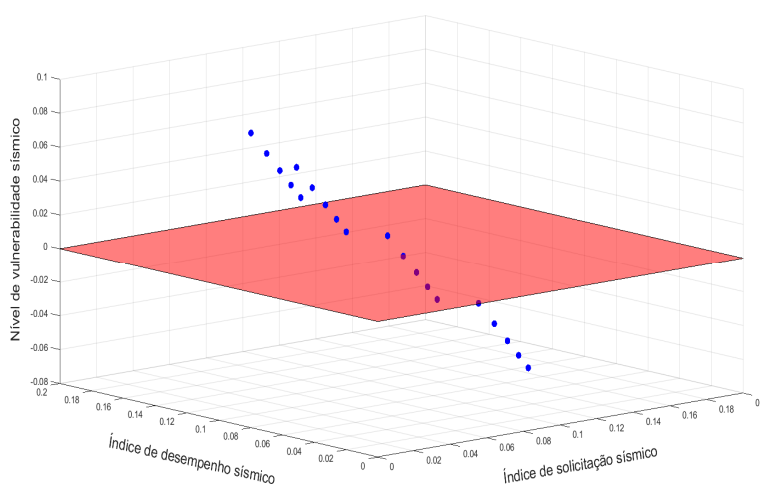


Figura 7 - Vulnerabilidade sísmica da edificação com variação do número de pavimentos

Os valores da tabela 3 podem ser representados por superfície de desempenho sísmico (Figura 8) onde a variável deterioração estrutural está no eixo X, a variável desempenho sísmico estrutural E_o no eixo Y e por fim o índice de desempenho sísmico I_S no eixo Z. Observa-se que tonalidade de cores mais escuras representa baixo índice sísmico, baixo desempenho estrutural e alta deterioração. É importante destacar que a redução do subíndice de desempenho estrutural está diretamente relacionada ao aumento no número de pavimentos.

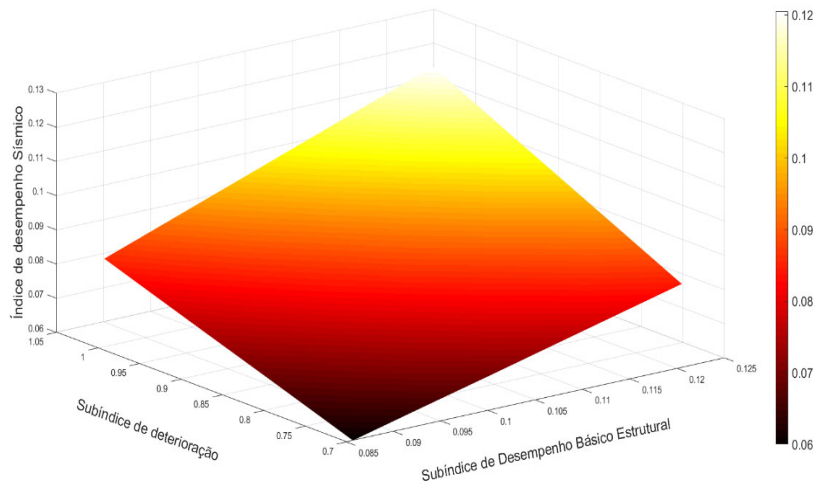


Figura 8 - Superfície de desempenho sísmico da estrutura model

Conclusões

Acerca dos estudos desenvolvidos, ficou comprovada a redução significativa da resistência sísmica da edificação quando alterações não previstas em projetos como adição de novos pavimentos são realizadas, isto porque nem sempre ocorre a manutenção/reforço da estrutura existente. Isto foi considerado na análise quando a estrutura modelo permaneceu com a mesma área de seção transversal dos pilares original da literatura. As análises conduzidas indicaram um decréscimo de 28,87% no índice de desempenho sísmico global caso quatro novos pavimentos fossem inseridos. Em relação ao comportamento sísmico da edificação recém-construída, este não é afetado na zona 0 para qualquer classe de terreno. Todavia, ao simular a mesma edificação com modificações nas zonas 3 e 4, a solicitação supera a resistência comprometendo o nível de segurança estrutural. Salienta-se ainda que a irregularidade vertical existente na estrutura modelo, isto é, alteração das plantas em níveis diferentes foi capturado pelo método de Hirosawa adaptado quando na tabela 1, o quarto pavimento apresenta índice de desempenho sísmico inferior ao primeiro pavimento. As irregularidades permitem a concentração de esforços em regiões específicas bem como gera descontinuidades. O exame isolado de cada incremento de pavimento possibilitou identificar ainda que em terrenos de classe A (Rocha sã), a adição de até dois pavimentos não impactaria no comportamento sísmica da edificação nas zonas sísmicas 0 e 1.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15421: Projeto de estruturas resistentes a sismos – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- ASSUMPCÃO, M.; PIRCHINER, M.; DOURADO, J.; BARROS, L. Terremotos no Brasil: Preparando-se para eventos raros. Sociedade Brasileira de Geofísica, Boletim SBGf, n. 96, p.25–29, 2016.
- BBC, 2023. Página inicial. Disponível em: <https://www.bbc.com/news/64568826>>. Acesso em: 03 de mar. de 2023
- CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. Dynamics of structures. United States of America: McGraw-Hill, 1975.
- FIB BULLETIN N24 - Seismic assessment and retrofit of reinforced concrete buildings - State-of-art report (312 pages, ISBN 978-2-88394-064-2, August 2003)
- FILHO, J. C. DE C. F. Análise Sísmica E De Degradação Para Avaliação De Reabilitação Em Edificações Tipológicas Das Superquadras Do Plano Piloto Em Brasília/DF. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de Brasília, Brasília, 2021.
- HIROSAWA, M. Retrofitting and Restoration of Buildings in Japan. International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Lecture Note of Seminar Course, 1992.
- LIMA, S. S.; SANTOS, S. H. C. Análise Dinâmica das Estruturas. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda, 2008.

- MIRANDA, P. S. T., A influência das ações sísmicas nas edificações brasileiras em concreto armado. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Universidade do Porto, Porto.
- MIRANDA, P. S. T., Avaliação da Vulnerabilidade Sísmica na realidade predial brasileira. Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2013.
- PEÑA, L. A. P. Análise dos efeitos provocados por abalos sísmicos em estruturas irregulares. 2012. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) -Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- REUTERS, 2023. Página inicial. Disponível em: <<https://www.reuters.com/>>. Acesso em: 22 de fev. de 2023
- RODRIGUES, P. Q.; PANTOJA, J. C. ; MIRANDA, P. S. T. . Computational Implementation for Seismic Assessment of Existing Structures. In: e XLIII Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, 2022, Foz do Iguaçu. Numerical Methods applied to structural design of civil construction. Foz do Iguaçu, 2022.
- RODRIGUES, P. Q.; PANTOJA, J. C.; MIRANDA, P. S. T., Avaliação da vulnerabilidade sísmica do Palácio do Planalto. CONCRETO & CONTRUÇÃO, v. L, p. 55-61, 2022.
- SIDDHARTH, AJAY KUMAR SINHA. Rapid visual screening vulnerability assessment method of buildings: a review. International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration, Vol 9(88) ISSN (Print): 2394-5443 ISSN (Online): 2394-7454, 2022.