

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E**  
**URBANISMO**

**ANÁLISE SÍSMICA E DE DEGRADAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DE**  
**REABILITAÇÃO EM EDIFICAÇÕES TIPOLOGICAS DAS**  
**SUPERQUADRAS DO PLANO PILOTO EM BRASÍLIA/DF**

**JOSÉ CARLOS DE CARVALHO FONTES FILHO**

**ORIENTADOR: JOÃO DA COSTA PANTOJA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ARQUITETURA E**  
**URBANISMO**

**BRASÍLIA/DF: JANEIRO – 2022**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E  
URBANISMO**

**ANÁLISE SÍSMICA E DE DEGRADAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DE  
REABILITAÇÃO EM EDIFICAÇÕES TIPOLOGICAS DAS  
SUPERQUADRAS DO PLANO PILOTO EM BRASÍLIA/DF**

**ENG.º JOSÉ CARLOS DE CARVALHO FONTES FILHO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO DA FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ARQUITETURA E URBANISMO.

APROVADA POR:

---

**Prof. JOÃO DA COSTA PANTOJA, Dr. (FAU/UnB)**  
(Orientador)

---

**Prof. PAULO DE SOUZA TAVARES MIRANDA, Dr. (IFCE)**  
(Examinador Externo)

---

**Prof. JOSE LUIS VITAL DE BRITO, Dr. (PECC/UnB)**  
(Examinador Interno)

**BRASÍLIA/DF, 03 DE JANEIRO DE 2022**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

FILHO, JOSÉ CARLOS DE CARVALHO FONTES	
Análise Sísmica e de Degradação para Avaliação de Reabilitação em Patrimônio Arquitetônico.	
[Distrito Federal] 2021.	
xvii, 91p., 210 x 297 mm (PPG-FAU/UnB, Mestre, Arquitetura e Urbanismo, 2021).	
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.	
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo.	
1.Sismo	2.Concreto
3.Racionalização Construtiva	4.Pré-Fabricados
I. FAU/UnB	II. Título (série)

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

SILVA, A. J. da (2017). Título do trabalho. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 91p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

AUTOR: José Carlos de Carvalho Fontes Filho

TÍTULO: Análise Sísmica e de Degradação para Avaliação de Reabilitação em Patrimônio Arquitetônico.

GRAU: Mestre ANO: 2021

É concedida, à Universidade de Brasília, permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado, assim como está autorizado o empréstimo e a venda tais cópias, somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem sua autorização por escrito.

---

José Carlos de Carvalho Fontes Filho  
CEJB conjunto G casa 175  
71.680-365 Jardim Botânico – DF - Brasil  
e-mail: jcarlosfilho02@gmail.com

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à minha família pelo apoio e pela ajuda para que eu chegasse até aqui. Agradeço aos meus pais por estarem sempre ao meu lado, com todo carinho e amor, e à minha irmã por ser minha grande amiga e confidente.

Aos meus amigos, que durante esses últimos anos me ouviram falar muito sobre a área de estudo, minhas dificuldades e triunfos, também agradeço.

Agradeço ao PPG-FAU/UnB por me proporcionar uma infraestrutura adequada, com ótimos equipamentos; graças a eles pude conhecer não só meu sócio e amigo Yago Martinatti, mas também outras pessoas, ao longo desses últimos anos de minha jornada. Agradeço aos professores que me despertaram um ainda maior interesse na área da engenharia civil e me apresentaram suas experiências e os caminhos a serem seguidos para que seja possível que eu me torne um ótimo profissional nessa nova caminhada que estou a trilhar.

Agradecimento especial ao meu orientador, João da Costa Pantoja, pela paciência, ensinamento e pelo apoio para concluir esta pesquisa e gostaria de agradecer ao meu examinador externo Paulo de Souza Tavares Miranda pelas explicações e compartilhamento de conhecimento acerca dos sismos.

Por último, e não com menos importância, agradeço a todos que estiveram comigo nesses dois anos – agradeço principalmente a Deus por sempre estar presente em minha vida e em minhas conquistas.

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar a influência dos sismos nas edificações da cidade de Brasília. Grande parte das edificações existentes foram dimensionadas e construídas numa época em que o dimensionamento sísmico não possuía tanta relevância quanto atualmente, sendo assim, faz-se necessário avaliar se estas edificações possuem resistência sísmica. Para esta avaliação, foram escolhidas duas edificações típicas do Plano Piloto em Brasília com pilotis e seis pavimentos, sendo uma localizada na Asa Sul e a outra na Asa Norte. Realizou-se o estudo do solo de ambas e posteriormente aplicou-se o método de Hirosawa adaptado para a realidade brasileira, em seguida, foi também aplicado o método do Grau de Deterioração dos Elementos parametrizado com a intenção de verificar se o grau de dano na estrutura interfere na resistência da edificação à sismos. Através dos resultados, constatou-se que para a Zona 0 de sismos, sendo está a Zona em que Brasília está inserida, ambas as edificações avaliadas apresentaram resistência a sismos, mesmo apresentando solo de baixa resistência mecânica, entretanto, caso as edificações apresentassem as mesmas características de solo e estrutura inseridas em Zona sísmica 2 ou 3 e 4, as edificações não seriam classificadas como sismo resistentes.

**Palavras-Chave:** Sismo; Concreto; Hirosawa; GDE.

## **ABSTRACT**

This study aims to analyze the influence of earthquakes on buildings in the city of Brasília. Most of the existing buildings were designed and built at a time when seismic design was not as relevant as it is today, so it is necessary to assess whether these buildings have seismic resistance. For this evaluation, two typical buildings of the Plano Piloto in Brasília with stilts and six floors were chosen, one located in Asa Sul and the other in Asa Norte. Both buildings had its soils tested out and subsequently the Hirosawa method adapted to the Brazilian reality was applied. Afterwards, the parameterized Degree of Deterioration of Elements method was also applied with the intention of verifying whether the degree of damage to the structure interferes with the resistance of the building to earthquakes. Through the results, it was found that for Zone 0 of earthquakes, which is the Zone in which Brasília is located, both buildings evaluated presented earthquake resistance, even with low mechanical resistance soil, however, if the buildings presented the same characteristics of soil and structure inserted in Seismic Zone 2 or 3 and 4, the buildings would not be classified as earthquake resistant.

**Keywords:** Seism; Concrete; Hirosawa; GDE.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Apresentação do Tema.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>2</b>
1.2.1	Objetivos gerais .....	2
1.2.2	Objetivos específicos .....	2
<b>1.3</b>	<b>Metodologia.....</b>	<b>2</b>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura do trabalho .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>As atividades Sísmicas.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2</b>	<b>Estruturas de concreto armado com sismo .....</b>	<b>8</b>
<b>2.3</b>	<b>Patrimônio.....</b>	<b>10</b>
<b>2.4</b>	<b>Plano Piloto – Patrimônio histórico e cultural da humanidade .....</b>	<b>15</b>
<b>2.5</b>	<b>Sismo.....</b>	<b>20</b>
2.5.1	Histórico das atividades sísmicas no Brasil.....	22
2.5.2	Histórico das atividades sísmicas em Brasília.....	24
2.5.3	Método de Hirosawa.....	31
2.5.3.1	Generalidades .....	31
2.5.4	Índice de desempenho sísmico <i>I<sub>s</sub></i> .....	32
2.5.4.2	Subíndice E0.....	33
2.5.5	Adaptação do método de Hirosawa.....	33
2.5.5.3	Índice de desempenho sísmico – adaptado.....	34
2.5.6	Índice de solicitação sísmica – adaptado.....	35
<b>2.6</b>	<b>Metodologia para avaliação de processo de degradação em estrutura de concreto armado .....</b>	<b>39</b>
2.6.1	Grau de Deterioração do elemento – GDE.....	39
2.6.2	GDE parametrizado .....	45
2.6.2.4	Metodologia GDE parametrizada .....	45
2.6.2.5	Fatores de ponderação, intensidade e relevância estrutural parametrizados ..	46
2.6.2.6	Parâmetros parametrizados.....	46
2.6.2.7	Avaliação do nível de segurança via confiabilidade .....	48
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA .....</b>	<b>49</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>53</b>
<b>4.1</b>	<b>CASO DE ESTUDO 1 - SQS 112 Bloco H .....</b>	<b>54</b>
<b>4.2</b>	<b>CASO DE ESTUDO 2 - SQN 216 Bloco H.....</b>	<b>65</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>76</b>
<b>5.1</b>	<b>SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>77</b>
<b>6</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>78</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Leitura de amplitude em sismômetro (adaptada Lindeburg e McMullin:2008). .....	4
Figura 2 – Estrutura de concreto após abalo sísmico. ....	8
Figura 3 – Estrutura de concreto após abalo sísmico (Rodrigues: 2006). ....	9
Figura 4 – Brasília, tombada como Patrimônio Cultural da Humanidade em 1987, pela UNESCO – Vista da cúpula do Senado. ....	11
Figura 5 – Vista exterior da Catedral de Brasília/DF .....	11
Figura 6 – Exemplo de intervenção em patrimônio histórico e cultural: Elizabeth Tower em Londres, Reino Unido – Agosto de 2017. ....	14
Figura 7 – Croquis de Lúcio Costa para o Plano Piloto de Brasília .....	16
Figura 8 – Estudantes desfilam na solenidade de inauguração da nova capital do país. ....	17
Figura 9 - Croqui de Lúcio Costa –Vista e Perspectiva Superquadras.....	19
Figura 10 – Terremotos mais devastadores .....	21
Figura 11 – Proposta de alteração no mapa de sismicidade brasileira de F. V. Alves. ...	22
Figura 12 – Terremotos mais sentidos no Brasil .....	24
Figura 13 – Terremoto que foi sentido em Brasília. ....	25
Figura 14 – Ensaio de sondagem 1 – Brasília. ....	26
Figura 15 – Continuação do ensaio de sondagem 1 – Brasília. ....	27
Figura 16 – Ensaio de sondagem 2 – Brasília. ....	28
Figura 17 – Continuação do ensaio de sondagem 2 – Brasília. ....	29
Figura 18 – Fluxograma de investigação de diagnóstico sísmico. ....	32
Figura 19 – Fluxograma da metodologia GDE (adaptado de Kraus-94).....	39
Figura 20 – Fluxograma da metodologia GDE (adaptado de Kraus-94).....	40
Figura 21 – Parametrização dos fatores da metodologia GDE-UnB.....	46
Figura 22 – Modelo de Integridade Cúbico de Heideck-Pantoja. ....	47
Figura 23 – Cargas adotadas para a parte interna da estrutura. ....	49
Figura 24 – Carga adotadas para as lajes em balanço das varandas.....	50
Figura 25 – Superfície de Desempenho Sísmico.....	51
Figura 26 – Superfície de solicitação sísmica. ....	52
Figura 27 – Fluxograma. ....	53
Figura 28 – Planta de forma e detalhes do piso do 1º pavimento – projeto original. ....	54
Figura 29 – Vista do modelo 3D da edificação. ....	55
Figura 30 – Superfície de desempenho sísmico da SQS 112 bloco H .....	56
Figura 31 – Superfície de solicitação sísmica – classe C da SQS 112 bloco H .....	57
Figura 32 – Superfície de solicitação sísmica – classe D da SQS 112 bloco H .....	57
Figura 33 – Superfície de solicitação sísmica – classe E da SQS 112 bloco H.....	57
Figura 34 – Vulnerabilidade Sísmica da edificação – Fator de Importancia (U = 1.00). .....	58
Figura 35 – Vulnerabilidade Sísmica da edificação – Fator de Importancia (U = 1.25). .....	59
Figura 36 – Vulnerabilidade Sísmica da edificação – Fator de Importancia (U = 1.50). .....	60
Figura 37 – Gráfico de porcentagem de falha. ....	61
Figura 38 – Gráfico comparativo em zona sísmica. ....	61
Figura 39 – Gráfico comparativo em zona sísmica. ....	62
Figura 40 – Gráfico comparativo em zona sísmica. ....	62
Figura 41 – Gráfico comparativo em zona sísmica. ....	63

Figura 42 – Gráfico comparativo em zona sísmica. ....	63
Figura 43 – Gráfico comparativo em zona sísmica. ....	64
Figura 44 – Cálculo do GDE parametrizado. ....	64
Figura 45 – Índice de solicitação sísmica. ....	65
Figura 46 – Vista do modelo 3D da edificação. ....	65
Figura 47 – Superfície de desempenho sísmico da SQN 216 bloco H.....	66
Figura 48 – Superfície de solicitação sísmica – classe C da SQS 216 bloco H .....	67
Figura 49 – Superfície de solicitação sísmica – classe D da SQS 216 bloco H.....	68
Figura 50 – Superfície de solicitação sísmica – classe E da SQS 216 bloco H.....	68
Figura 51 – Vulnerabilidade Sísmica da edificação – Fator de Importancia (U = 1.00). .....	69
Figura 52 – Vulnerabilidade Sísmica da edificação – Fator de Importancia (U = 1.25). .....	70
Figura 53 – Vulnerabilidade Sísmica da edificação – Fator de Importancia (U = 1.50). .....	70
Figura 54 – Gráfico de porcentagem de falha. ....	71
Figura 55 – Gráfico comparativo em zona sísmica. ....	72
Figura 56 – Gráfico comparativo em zona sísmica. ....	72
Figura 57 – Gráfico comparativo em zona sísmica. ....	73
Figura 58 – Gráfico comparativo em zona sísmica. ....	73
Figura 59 – Gráfico comparativo em zona sísmica. ....	74
Figura 60 – Gráfico comparativo em zona sísmica. ....	74
Figura 61 – Cálculo do GDE parametrizado. ....	75
Figura 62 – Índice de solicitação sísmica. ....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Escala de Mercalli Modificada .....	6
Tabela 2 – Classes do terreno .....	30
Tabela 3 – Ensaios SPT dos Casos de estudo.....	30
Tabela 4 – Subíndices de sismicidade do método de Hirosawa adaptado ao Brasil. ....	37
Tabela 5 - Subíndice topográfico e geotécnico do método de Hirosawa adaptado ao Brasil.....	37
Tabela 6 - Subíndice de importância da edificação do método de Hirosawa adaptado ao Brasil.....	37
Tabela 7 - Subíndice Gs do método de Hirosawa adaptado ao Brasil.....	38
Tabela 8 – Índice de Fiabilidade de referencia (Fib Bulletin 62 – volume 5).....	48

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos níveis de deterioração do elemento (adaptado de Kraus-94).....	41
Quadro 2 – Valores de Gd (adaptado de Kraus-94) .....	42
Quadro 3 – Fatores de ponderação (Fp) .....	43
Quadro 4 – Fatores de Ponderação (Fp) para fissuras decorrentes de projeto/execução ou de carga excessivas.....	44
Quadro 5 – Valores de Gd adaptado (adaptado de Kraus-94).....	45
Quadro 6 – Modelo de Tabela para o índice de desempenho sísmico. ....	50
Quadro 7 – Reserva de capacidade resistente ( $R_{cr}$ ) da SQS 112 Bloco H. ....	52
Quadro 8 – Índice de desempenho sísmico da SQS 112 bloco H.....	55
Quadro 9 – Índice de solicitação sísmica ( $I_s0$ ) da SQS 112 Bloco H. ....	56
Quadro 10 – Reserva de capacidade resistente ( $R_{cr}$ ) da SQS 112 Bloco H. ....	58
Quadro 11 – Índice de desempenho sísmico da SQN 216 bloco H.....	66
Quadro 12 - Índice de solicitação sísmica ( $I_s0$ ) da SQN 216 Bloco H. ....	67
Quadro 13 – Reserva de capacidade resistente ( $R_{cr}$ ) da SQN 216 Bloco H.....	69

## **LISTA DE ABREVIACÕES**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

EUA – Estados Unidos da América;

GB 50011 – Chinese Code for Seismic Desing of Buildings;

ISO – International Organization for Standardizattion;

NBR – Norma brasileira;

ONU – Organização das Nações Unidas;

SPT – Standard Penetration Test;

UnB – Universidade de Brasília;

DF – Distrito Federal;

GO – Goiás;

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;

IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto

GDE – Grau de Deterioração do Elemento

## LISTA DE SÍMBOLOS

- A- Máxima amplitude de uma onda sísmica;
- $A_0$  – Leitura da amplitude de referência produzida por um terremoto padrão;
- $A_b$  - Área bruta;
- $A_1$  - Área líquida;
- $a_1$  - Fator de redução da capacidade resistente dos pilares de acordo com o deslocamento das paredes verificado no momento da ruptura das paredes;
- $a_2$  - Fator de redução da capacidade resistente das paredes de acordo com o deslocamento dos pilares curtos verificado no momento da ruptura dos pilares curtos;
- $a_3$  - Fator de redução da capacidade resistente dos pilares de acordo com o deslocamento dos pilares curtos verificado no momento da ruptura dos pilares curtos;
- $f_c$  - Resistência à compressão (kgf/cm<sup>2</sup>);
- $f_{ck}$  – Resistência característica da resistência à compressão;
- $f_{cm}$  - Resistência média à compressão;
- $F_u$  - Carga de ruptura;
- $I_{s0}$  - Índice de sollicitação sísmica;
- $I_{s0,sup}$  - Limite superior do índice de sollicitação sísmica;
- $I_{s0,inf}$  - Limite inferior do índice de sollicitação sísmica;
- $E_s$  - Subíndice de sollicitação sísmica básica, sendo  $E_s = 0,8$  para o primeiro nível de avaliação e  $E_s = 0,6$  para os segundo e terceiro níveis;
- $Z$  - Subíndice de sismicidade cujos valores dependem da atividade sísmica local, situando-se no intervalo  $0,7 \leq Z \leq 1,0$ ;
- $G$  - Subíndice topográfico e geotécnico, sendo  $G=1,0$  para terrenos em geral e  $G=1,1$  para outras situações (aclives, declives);
- $U$  - Subíndice de importância da edificação, sendo  $U=1,0$  para edificações em geral;
- $C_w$  - Índice de resistência das paredes de concreto armado (paredes de concreto armado);
- $C_c$  - Índice de resistência dos pilares de concreto armado;
- $C_{sc}$  - Índice de resistência dos pilares curtos de concreto armado;
- $C_{al}$  - Índice de resistência das paredes de alvenaria de tijolo não reforçada ou parcialmente confinada (com pilar de concreto em apenas uma extremidade);
- $C_{ma}$  - Índice de resistência das paredes de alvenaria de tijolo confinada (com pilares de concreto nas duas extremidades);

$C_{mar}$  - Índice de resistência de paredes de enchimento de alvenaria de tijolo;

$\tau_0$  - Resistência média ao cisalhamento da alvenaria (kgf/cm<sup>2</sup>);

$\sigma_0$  - Tensão normal devido ao esforço axial resultante das cargas verticais do peso próprio e das sobrecargas de utilização (kgf/cm<sup>2</sup>);

$A_{c1}$  - Somatório das áreas de seção transversal dos pilares cuja altura livre dividida pela base da seção do pilar é menor que 6,0 (cm<sup>2</sup>);

$A_{c2}$  - Somatório das áreas de seção transversal dos pilares cuja altura livre dividida pela base da seção do pilar é maior ou igual a 6,0 (cm<sup>2</sup>);

$A_{sc}$  - Somatório das áreas de seção transversal dos pilares curtos (cm<sup>2</sup>);

$A_{m1}$  - Somatório das áreas das paredes de concreto armado na direção analisada do pavimento em estudo (cm<sup>2</sup>) com pilares nas duas extremidades, com porcentagem de armadura horizontal igual ou superior a 1,2% e uma esbeltez ( $H'/L$ ) maior que 2;

$A_{m2}$  - Somatório das áreas das paredes de concreto armado na direção analisada do pavimento em estudo (cm<sup>2</sup>) com pilares nas duas extremidades e porcentagem mínima de armadura horizontal;

$A_{m3}$  - Somatório das áreas das paredes de concreto armado na direção analisada do pavimento em estudo (cm<sup>2</sup>) sem pilares ou com somente um pilar na extremidade, com esbeltez igual ou menor que 2 e uma porcentagem mínima de armadura horizontal;

$A_{m4}$  - Somatório das áreas das paredes de concreto armado na direção analisada do pavimento em estudo (cm<sup>2</sup>) sem pilares ou com somente um pilar na extremidade, com esbeltez maior que 2;

$A_{mar}$  - Somatório das áreas das paredes de enchimento de alvenaria de tijolo na direção analisada do pavimento em estudo (cm<sup>2</sup>);

$A_{ma}$  - Somatório das paredes de alvenaria de tijolo confinada na direção analisada do pavimento em estudo (cm<sup>2</sup>);

$W$  – Peso da estrutura acima do pavimento analisado (kgf);

$L$  – Comprimento da parede;

$H'$  – Altura do pavimento se  $L$  for maior ou igual a 3 metros ou a altura do painel de alvenaria se  $L$  for menor que 3 metros.

$m$  – Massa da estrutura;

$S_a$  - Aceleração espectral;

$g$  – Aceleração da gravidade:

## LETRAS GREGAS

$\rho$  - Massa específica;

$\rho_m$  - Massa específica média;

$\sigma_u$  - Resistência à compressão, em MPa;

$\sigma_{um}$  - Resistência média à compressão, em Mpa:

# **1 INTRODUÇÃO**

## **1.1 Apresentação do Tema**

Grande parte das edificações existentes foram dimensionadas e construídas numa época em que o dimensionamento sísmico não possuía tanta relevância quanto atualmente. Com um elevado grau de incerteza quanto à resistência das estruturas às solicitações horizontais, surgem, então, normas, para atender e resistir à ação sísmica. Considerando a ameaça, é de grande importância o levantamento das condições estruturais das edificações existentes em zonas de elevado risco de ocorrência de sismos e que se proceda a intervenção de reforço sísmico, se necessário.

É comum que atividades sísmicas acarretem acidentes letais e dispêndios financeiros para a sociedade. O que acontece, na verdade, é um colapso parcial ou total de infraestruturas que não estão preparadas para os esforços gerados pelos abalos sísmicos.

Embora seus efeitos quase não sejam sentidos pela população, vários pequenos terremotos com magnitude de, no máximo, 2,0 graus na Escala Richter, são registrados todos os dias nos sismógrafos de todo o mundo, segundo Lindeburg e McMullin (2008). Já os milhares de terremotos com magnitude em torno de 4,5 graus, registrados anualmente, têm efeitos que, apesar de serem percebidos pelas pessoas, são irrisórios com relação às edificações. Em compensação, grandes terremotos, como o acontecido em Tohoku, no Leste do Japão em 2011, acontecem, em média, uma vez por ano e são responsáveis por graves catástrofes.

Existe uma forte preocupação quanto à qualidade e ao desempenho das estruturas com certo tempo de uso. As estruturas de concreto, tanto as recém-criadas quanto as mais antigas, começaram a manifestar problemas construtivos que não só representam incômodo ao conforto de seus usuários como também comprometem o seu próprio desempenho.

A metodologia GDE/UnB pode ser utilizada como ferramenta para gerir atividades de manutenção corretiva, indicando as falhas e os elementos que possuem maior gravidade e/ou urgência. Uma grande vantagem dessa abordagem é sua simplicidade e a possibilidade de acoplamento a softwares estruturais existentes após algumas modificações que ela traz. A decomposição da estrutura em elementos e famílias é ideal para essa finalidade.

Portanto, essa análise permite determinar as degradações de forma antecipada, permitindo um planejamento das manutenções preventivas e reduzindo gastos.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivos gerais**

Este estudo tem como objetivo geral analisar a influência dos sismos na cidade de Brasília, tendo em vista que este é um assunto pouco explorado. Para isto, será aplicado o modelo proposto pelo Dr. Eng. Paulo de Souza Tavares Miranda, que por sua vez adaptou o método de Hirosawa para a realidade brasileira.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Aplicar o método de Hirosawa adaptado para a realidade brasileira em edificação com tipologia típica do Plano Piloto em Brasília;
- Integrar o método de Grau de Deterioração do Elemento parametrizado com o método do Hirosawa adaptado;
- Simular a mesma edificação em diversos cenários afim de analisar o comportamento e o impacto da resistência mecânica do solo na capacidade resistiva ao sismo da edificação.

## **1.3 Metodologia**

Para atingir os objetivos, serão vistoriados por especialistas dois imóveis residenciais das superquadras com tipologia típica do Plano Piloto em Brasília, neles, serão analisados os aspectos gerais da construção.

A metodologia empregada nesta pesquisa:

- Revisar a bibliografia de autores, normas nacionais e internacionais sobre estudos nos temas de vulnerabilidade sísmica e Grau de Deterioração do Elemento;
- Selecionar edifícios típicos da arquitetura das superquadras, no Plano Piloto em Brasília;
- Analisar os dados do estudo de solo da região;
- Calcular o a resistência sísmica da estrutura;

- Calcular a mesma estrutura em diversos tipos de zona sísmica e diversos tipos de terrenos;
- Aplicação do Grau de Deterioração do Elemento nos pilares;
- Analisar os resultados obtidos através da aplicação dos métodos em conjunto;

## **1.4 Estrutura do trabalho**

### **CAPÍTULO 1 – Introdução**

A introdução apresenta a contextualização da pesquisa, seguida de seus objetivos gerais, específicos e apresentação da metodologia empregada.

### **CAPÍTULO 2 – Revisão Bibliográfica**

É a apresentação da base teórica deste estudo. A teoria abrange a necessidade e importância de conservação de patrimônios, além de contextualizar o Plano Piloto em Brasília, de onde serão analisadas as edificações estudo de caso. Fala-se também sobre a incidência de sismos, o método de Hirosawa, a proposta de adaptação do método de Hirosawa para aplicação nas edificações do Brasil e sobre o método de Grau de Deterioração dos Elementos e sua parametrização.

### **CAPÍTULO 3 – Estudos de caso e resultados**

É realizada a apresentação das edificações avaliadas, nas quais são aplicadas a metodologia proposta, onde são apresentados e discutidos os resultados obtidos.

### **CAPÍTULO 4 – Conclusões**

Com base nos resultados obtidos, são apresentadas as conclusões acerca da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

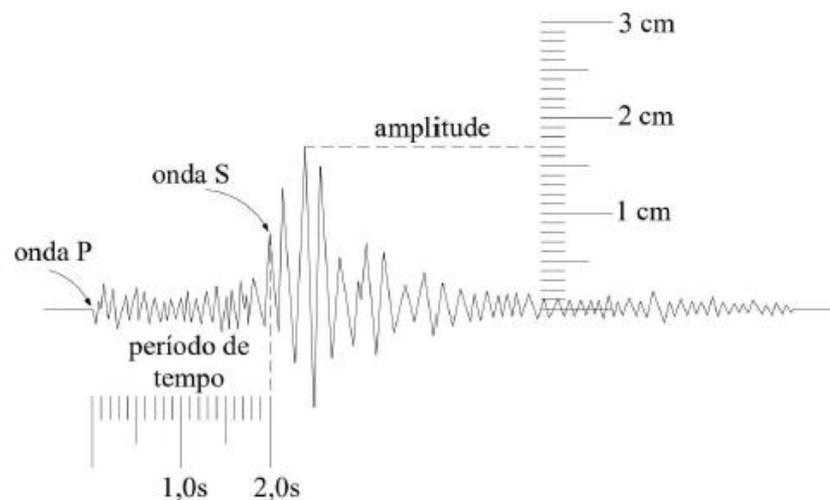
### 2.1 As atividades Sísmicas

A energia liberada quando ocorre um terremoto está ligada à magnitude ( $M$ ), medida na Escala Richter. Ela é estipulada desde o logaritmo de base dez da máxima amplitude ( $A$ ), como mostra a equação (1), e é registrada no sismômetro da maneira retratada na Figura 1.

$$M = \log_{10} \frac{A}{A_0} \quad (1)$$

Na equação acima,  $A_0$  é a leitura feita pelo sismômetro, a partir de um terremoto padrão (amplitude de referência). Habitualmente, seu valor é de 0,001 mm.

Figura 1 – Leitura de amplitude em sismômetro (adaptada Lindeburg e McMullin:2008).



Fonte: MIRANDA, P. S. T.; (2013, p. 23)

A magnitude é definida por uma função logarítmica de base dez, desta forma, a amplitude apresenta um aumento de dez vezes para cada aumento unitário da magnitude. Para Lindeburg e McMullin (2008), há relação entre a energia liberada em um terremoto ( $E_L$ ) e sua magnitude, sendo assim, quando há um acréscimo unitário na magnitude do terremoto, o aumento da energia liberada é de cerca de trinta e duas vezes, conforme demonstrado na seguinte equação:

$$\Delta E_L = (10^{\Delta M})^{3/2} \quad (2)$$

Onde:

$\Delta EL$  é o aumento na energia liberada pelo terremoto;

$\Delta M$  é o aumento na magnitude do terremoto na escala Richter.

Por conta da perda energia por produção de calor e outros efeitos, a quantidade de energia liberada ( $E_L$ ) é maior que a quantidade de energia radiada ( $ER$ ) no terremoto.

A equação a seguir demonstra a relação estabelecida por Gutenberg e Richter (1956 apud Lindeburg e McMullin, 2008) entre a energia radiada (em ergs) e a magnitude do terremoto:

$$\log_{10} E_R = 11,8 + 1,5 \cdot M \quad (3)$$

Os locais onde se sente o abalo sísmico são fatores fundamentais para que se possa compreender as possíveis consequências de um terremoto. Isto é, ainda que ele seja de grande magnitude, há a possibilidade de não haver consequências graves, como destruição de meio ambiente, danos estruturais e perda de vidas humanas. A essa possibilidade variável está ligado o conceito de intensidade sísmica.

O meio técnico utiliza diferentes escalas para medir a intensidade sísmica de um terremoto. Dentre elas, estão as escalas MSK, Mercalli Modificada e EMS98. A segunda conta com 12 níveis de intensidade – que representam desde movimentos indistintos pelo corpo humano até aqueles que resultam em destruições catastróficas, como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 – Escala de Mercalli Modificada

Intensidade	Efeitos observados no terremoto	Intensidade	Efeitos observados no terremoto
I	Nenhum movimento é percebido. Apenas registrado pelos aparelhos de precisão ou sismógrafos	VII	Imperceptíveis danos em construções bem projetadas e construídas; danos leves a moderados em edificações de padrão de construção usual; danos consideráveis em edificações mal construídas. Algumas chaminés quebram.
II	Algumas pessoas podem sentir o movimento se estiverem em repouso e/ou em andares elevados de edifícios. Objetos suspenso podem vir a balançar	VIII	Danos leves em estruturas bem projetadas; danos consideráveis em edificações usuais, com colapso parcial. Grandes danos em estruturas mal executadas. Chaminés, colunas, monumentos e muros caem. Moveis pesados saem do lugar.
III	Diversas pessoas sentem um movimento leve no interior de prédios especialmente em andares superiores. Muitos não reconhecem o movimento como sendo um terremoto. Veículos parados podem balançar levemente. Vibração parecida com a passagem de um caminhão.	IX	Danos consideráveis em estruturas bem projetadas, estruturas em pórtico bem projetadas saem de prumo. Grandes danos em estruturas usuais, com colapso parcial. Edificações com fundações deslocadas.
IV	Durante o dia, no interior de prédios a maior parte das pessoas sente o movimento. Durante a noite, algumas pessoas podem acordar. Pratos, janelas e portas vibram. Veículos parados balançam notoriamente.	X	Algumas construções em madeira são destruídas; a maioria das estruturas em pórtico e de alvenaria estrutural tem suas fundações destruídas trilhos entortam.
V	A maior parte das pessoas sente o movimento. Muitas das pessoas dormindo podem acordar. Pratos e janelas quebram. Objetos pequenos deslocam-se. Relógios de pêndulo param.	XI	A grande maioria das edificações em alvenaria estrutural desmorona. Pontes Destruídas.
VI	O terremoto é sentido por todas as pessoas. As pessoas caminham com dificuldade. Revestimentos dos muros podem soltar. Danos leves podem acontecer.	XII	Destruição total. Modificação da topografia.

Fonte: Traduzida de Lindeburg e McMullin (2008 apud Miranda, 2013).

Outra medida utilizada como ferramenta para caracterizar um terremoto é a máxima aceleração do solo, ou PGA (*peak ground acceleration*), que corresponde ao valor máximo de aceleração absoluta para um sistema de um grau de liberdade com rigidez infinita. Para determinar essa medida, que costuma ser expressa por meio de frações ou porcentagem de aceleração da gravidade (g), são utilizados sismômetros. A máxima aceleração do solo é também um parâmetro utilizado pelas normas de ações sísmicas em estruturas, para a definição das ações sísmicas.

A seguir, expõe-se, como exemplo, equações que representam um tipo de relação: da magnitude sísmica (M) com a PGA no epicentro, ponto na superfície logo acima do

cerne do terremoto. A aceleração do solo decorrerá tanto de sua própria característica quanto de sua distância do epicentro. Utilizadas nos terremotos na Califórnia, estas são as equações propostas por Gutenberg e Richter (1956 apud Lindeburg e McMullin, 2008):

$$PGA = \frac{y_0}{1 + \left(\frac{R'}{h}\right)^2} \quad (4)$$

$$\log_{y_0} = -(b + 3) + 0,21M - 0,027M^2 \quad (5)$$

Onde:

$R'$  é a distância entre o ponto de medição da aceleração e o epicentro, em quilômetros;

$h$  é a profundidade local em quilômetros;

$b$  é um fator específico do solo.

Também segundo Lindeburg e McMullin (2008), ainda que existam diversas relações práticas entre intensidade, magnitude e aceleração do solo, nenhuma delas pode ser classificada como exata.

Cabe ressaltar que a forma como são tratadas as fases de projeto e construção das edificações está intrinsecamente relacionada com os danos estruturais. Por exemplo, terremotos de uma mesma magnitude podem gerar diferentes consequências em construções maiores ou menores, em países desenvolvidos ou subdesenvolvidos. Apesar disso, quando há métodos de projeto e de construção bem desenvolvidos, é provável que existam associações altamente confiáveis entre aceleração do solo e desempenho estrutural.

As pesquisas acerca das consequências dos terremotos em construções já obtiveram avanço em países nos quais a atividade sísmica é acentuada. Essas pesquisas possibilitaram a publicação e a criação de documentos e normas que levam à consideração dos efeitos sísmicos nos projetos de novas edificações, bem como à verificação da suscetibilidade de estruturas efetivas. O desempenho das infraestruturas submetidas às ações sísmicas é de suma importância para a redução das perdas materiais e dos desastres que envolvem vidas humanas.

## 2.2 Estruturas de concreto armado com sismo

O desempenho das estruturas em circunstâncias em que ocorrem abalos sísmicos está relacionado, de forma fundamental, aos dimensionamentos considerados em fase de projeto, aos sistemas construtivos adotados e à qualidade tanto desses serviços quanto dos materiais utilizados.

Em estruturas de concreto armado sujeitas a ações sísmicas, segundo Rodrigues (2006), os danos e colapsos mais comuns tem a ver com: estribos em quantidade insuficiente e com detalhamentos inadequados; aderência, ancoragem e traspasse impróprios; capacidade de resistência ao cisalhamento e à flexão inadequadas; resistência dos nós inadequada; desconsideração da influência das paredes de alvenaria no comportamento sísmico das estruturas; modificação brusca das propriedades e características geométricas da estrutura ou de alguns componentes; mecanismo tipo viga forte – pilar fraco; e problemas estruturais em razão das exigências de arquitetura. A Figura 2 e a Figura 3 apresentam estruturas (ou parte delas) atingidas por abalos sísmicos.

Figura 2 – Estrutura de concreto após abalo sísmico.



Fonte: Revista Exame<sup>1</sup> – Mundo - 2011

---

<sup>1</sup> Disponível <https://exame.com/mundo/terremoto-no-nepal-e-um-dos-piores-do-seculo-21-veja-lista/> acesso em 3 de mai. 2021

Figura 3 – Estrutura de concreto apos abalo sísmico (Rodrigues: 2006).



Fonte: MIRANDA, P. S. T.; (2013, p. 70)

Lindeburg e McMullin (2008) afirmam que, na fase de projeto, a escolha da configuração do edifício, em termos de atributos geométricos, é uma decisão muito importante. O desempenho do edifício sofre a influência desse tipo de escolha quando fica exposto a ações sísmicas. A observação dos danos sofridos por estruturas após terremotos leva a uma constatação – mesmo em iguais condições de aceleração do solo e de qualidade dos materiais, as construções mais simples manifestam um desempenho sísmico superior. As estruturas podem ser consideradas como regulares e irregulares conforme a SEI7 (ASCE, 2005).

São classificadas como regulares as estruturas que não expressam descontinuidades físicas significativas e que, por outro lado, manifestam distribuição contínua de massa, resistência, rigidez e ductilidade. Já as estruturas irregulares demonstram descontinuidades físicas relevantes e distribuição descontínua do sistema resistente. As descontinuidades em projeto são tomadas como irregularidades horizontais, enquanto as irregularidades em elevação são tidas como irregularidades verticais. Tais irregularidades, apesar de acrescentarem valor estético às construções, caracterizam-se como fatores de redução de desempenho sísmico.

### 2.3 Patrimônio

Para Guichen (1995), a conservação preventiva é um conjunto de ações que têm a finalidade de salvaguardar ou de estender a vida útil de uma coleção ou objeto. Sua aplicação prática é moldada através de seis qualidades humanas que, ao serem aplicadas de forma adstrita à experiência profissional e ao conhecimento científico, permitem agir corretamente. As qualidades são: imaginação, intuição, memória, razão, senso comum e ética.

Segundo Jorge (2000), tendo em vista que o seu conceito ao longo do tempo se torna mais abrangente, a conservação do patrimônio é cada vez menos percebida como uma forma de defesa exclusiva do espaço vital natural e passa a acolher também o espaço vital coletivo, desenhado pelo homem no decorrer de sua existência.

No Brasil, o Serviço do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (SPHAN), criado no ano de 1937 pelo ex-ministro da Educação Gustavo Capanema, conforme observado no Decreto Lei nº 25 (Presidência da República, 1937), tinha o objetivo de promover a proteção, o enriquecimento e a informação acerca dos patrimônios naturais, de maneira nacional e permanente. Diferentemente do que acontece nos países norteamericanos e europeus, essa legislação não requer uma distância temporal mínima desde a construção do edifício para que ele possa ser considerado como um monumento histórico.

Em 1947, a Igreja de São Francisco de Assis da Pampulha, projeto de Oscar Niemeyer construído em Belo Horizonte (MG), foi inscrita no Livro de Tombo das Belas Artes do IPHAN, após aproximadamente quatro anos de sua inauguração. Posteriormente, outros exemplares da arquitetura moderna também foram registrados, tais como: a Estação de Hidroaviões e o Parque do Flamengo, no Rio de Janeiro; o Catetinho e a Catedral Metropolitana de Brasília; e o edifício do Ministério de Educação e Saúde, atual Palácio Capanema, no Rio de Janeiro. Desta forma, o Brasil se tornou o primeiro país no mundo a implementar ações legais em prol da salvaguarda da arquitetura moderna (ANDRADE et al, 2009).

A capital brasileira, Brasília, é considerada a maior cidade do mundo a ser construída no século XX e foi erguida no centro do país, entre 1956 e 1960, pelo urbanista Lúcio Costa e o arquiteto Oscar Niemeyer. Tombada como Patrimônio Cultural da Humanidade em 1987, a cidade é, segundo a Unesco, um divisor de águas na história do planejamento urbano.

Figura 4 – Brasília, tombada como Patrimônio Cultural da Humanidade em 1987, pela UNESCO – Vista da cúpula do Senado.



Fonte: Acervo do Iphan, foto de Filipe Frazão<sup>2</sup>

Figura 5 – Vista exterior da Catedral de Brasília/DF



Fonte: Arquivo do site da prefeitura de Brasília, foto de Acácio Pinheiro/Agência Brasília<sup>3</sup>.

O *International Council on Monuments and Sites (ICOMOS)* é uma organização internacional não-governamental que se dedica à proteção e à conservação de locais que são patrimônios culturais, promovendo pesquisas e aplicação de teorias, metodologias e

<sup>2</sup> Disponível em: <<https://www.istockphoto.com/br/foto/congresso-nacional-brasileira-em-bras%C3%ADlia-brasil-gm482371780-70098215>>. Acesso em 13 de mai. 2021.

<sup>3</sup> Disponível em: <<https://www.agenciabrasilia.df.gov.br/2020/09/09/aos-50-anos-catedral-de-brasilia-ganha-banho-de-conservacao>>. Acesso em 16 de mai. 2021.

técnicas científicas de conservação de patrimônios arquitetônicos e arqueológicos, desde 1965.

No ano de 1964, foi redigido um documento para o II Congresso Internacional de Arquitetos e Técnicos dos Monumentos Históricos pelo que viria a ser o ICOMOS. O documento defendia a conservação e a manutenção constante dos patrimônios históricos. Esse documento ficou conhecido como a Carta de Veneza, e nele defende-se o seguinte:

Artigo 2º - A conservação e a restauração dos monumentos constituem uma disciplina que reclama a colaboração de todas as ciências e técnicas que possam contribuir para o estudo e a salvaguarda do patrimônio monumental.

Artigo 3º - A conservação e a restauração dos monumentos visam a salvaguardar tanto a obra de arte quanto o testemunho histórico.

Artigo 4º - A conservação dos monumentos exige, antes de tudo, manutenção permanente. (ICOMOS, 1964).

Ao longo dos anos, além da Carta de Veneza, surgiram outras cartas patrimoniais, como a Carta de Burra, redigida no ano de 1980. De acordo com o ICOMOS australiano (1999), essa carta possui instruções quanto à gestão e à conservação de todos os sítios que possuam importância cultural, assim como sítios indígenas, naturais e de valores históricos, baseados nas experiências e conhecimentos de seus membros. Ambas as cartas são documentos que traçam diretrizes para preservação, conceitos de planos de conservação, e mesmo de restauro, de patrimônios históricos, culturais e artísticos.

De acordo com o Artigo 2º da Carta de Burra (ICOMOS, 1980), “o objetivo da conservação é preservar a significação cultural de um bem; ela deve implicar medidas de segurança e manutenção”. Desta forma, entende-se que a conservação é resultado de ações e procedimentos que visam proteger e/ou retardar o processo de deterioração ou de perda de valor de um bem. Quando se trata de um patrimônio histórico, as técnicas, procedimentos e ações de conservação são de fundamental importância para estender a sua vida útil.

Fundada por dois professores, no ano de 1988, na Universidade de Eindhoven, na Holanda, surgiu a organização sem fins lucrativos DOCOMOMO, cujo objetivo é estudar e preservar obras, no campo da arquitetura, que façam parte do movimento moderno. Atualmente, a organização possui mais de 2000 membros ao redor do mundo, além de escritórios em pelo menos 45 países.

A organização planeja, a cada dois anos, conferências internacionais, com a finalidade de discutir temas relacionados ao movimento moderno. No ano de 2000, além de Brasília comemorar seu quadragésimo aniversário, sediava a sexta conferência DOCOMOMO, denominada “*Modern city facing the future*” (A cidade moderna encarando o futuro). Com o objetivo de classificar a importância de um espaço construído, a organização listou seis critérios pelos quais se pudesse avaliar se o espaço deveria ser preservado, de que forma e em que grau. São eles:

- I. Mérito tecnológico: quando o espaço goza de tecnologias inovadoras para resolver problemas estruturais, estéticos ou do programa;
- II. Mérito social: quando as mudanças nos padrões sociais do século XX são refletidas no desenho;
- III. Mérito artístico e estético: quando o espaço contém proporção, escala, composição, material ou detalhes que deveriam ser preservados;
- IV. Mérito canônico: quando a obra e/ou o arquiteto são afamados;
- V. Valor referencial: quando os atributos do espaço influenciam outros artistas ou arquitetos;
- VI. Integridade: quando a intenção original do desenho está aparente e desprovida de reformas que comprometam sua integridade arquitetônica ou do local;

Desta forma, quanto maior a quantidade de critérios correspondentes à uma obra, maior seria sua importância. Para Cantacuzino (1990), tanto a proteção como a preservação são termos que se enquadram em um conteúdo mais abrangente: a conservação. Essa, por sua vez, na arquitetura moderna, significa manter algo vivo – seja uma casa, um bairro ou mesmo uma cidade inteira, tal como o Plano Piloto.

Assim, o que é significativo é a preservação das características importantes e, para isso, deve-se realizar extensa pesquisa e análise a respeito do item ou obra e das razões pelas quais ela deveria ser preservada. Um dos patrimônios mundiais da UNESCO é o palácio de Westminster, comumente chamado de Casas do Parlamento, o lar do parlamento britânico. A torre noroeste do palácio, nomeada Elizabeth Tower, é a torre que abriga o grande sino mundialmente conhecido como Big Ben, em Londres, no Reino Unido.

A Elizabeth Tower é o exemplo de patrimônio que passa atualmente por reformas e manutenções. A torre foi concluída no ano de 1858. Em 2017, foi iniciado um extenso trabalho de manutenção, que tinha previsão de duração de três anos. Entretanto, ainda em 2021, a torre encontra-se sob reforma e sem previsão de data para reinauguração.

Figura 6 – Exemplo de intervenção em patrimônio histórico e cultural: Elizabeth Tower em Londres, Reino Unido – Agosto de 2017.



Fonte: Foto Mark Duffy<sup>4</sup> - UK Parliament.

A torre tinha diversas anomalias, dentre elas: rachaduras, vazamentos e corrosão no telhado e na estrutura que suporta o icônico sino Big Ben. A Elizabeth Tower não passava por uma grande intervenção há aproximadamente trinta anos, e estima-se que, após as reformas, deverá manter-se intocada por intervalo superior. Ao fim dessas reformas e manutenções corretivas, a edificação terá um aumento considerável em sua vida útil, demonstrando a necessidade de tais ações, assim como sua importância para o prolongamento do desempenho das edificações, especialmente dos patrimônios históricos.

O processo da conservação deve começar com uma extensa avaliação sobre que aspectos realmente valem a pena preservar. Significa que outros poderiam sofrer mudanças quando estas sejam necessárias para manter a obra em uso. Acredita-se que em longo prazo esta é a melhor maneira de preservação e normalmente o

---

<sup>4</sup> Disponível em < <https://abcnews.go.com/International/big-ben-turns-blue/story?id=61837416>> acesso 17 de mai. de 2021.

melhor uso é aquele para a qual a obra foi projetada inicialmente. (BRAGA, 2006, p. 20)

A Itália, no ano de 2008, sofreu um abalo sísmico que resultou na destruição parcial de diversos vilarejos, o que expôs, de certa maneira, a vulnerabilidade de grande parte do patrimônio histórico do país, diferentemente do que acontece no Brasil. A vulnerabilidade brasileira do patrimônio brasileiro é pequena se comparada à italiana.

Devido ao ocorrido no ano de 2008, o país realizou uma modificação do Código de Obras e Edificações, no qual estipulou especificamente o fortalecimento de estruturas pré-existentes, especialmente as de patrimônio histórico. No entanto, edifícios menores ainda não estão sujeitos à nova regulação.

O patrimônio cultural tem um valor incalculável, e sua avaliação de risco é difícil, sendo incontestável que qualquer perda não pode ser restabelecida por medidas pós-desastre. Não é viável considerar um grande sismo de magnitude inesperada, nem impor uma ausência total de danos, mas sim estar preparado para os desastres e para a recuperação posterior a eles.

#### **2.4 Plano Piloto – Patrimônio histórico e cultural da humanidade**

Foi por volta do ano de 1750 que surgiu a ideia da mudança da capital do Brasil, com o propósito de ocupação do interior e garantia de sua conquista, além da circunstância de aspectos de segurança e estratégias políticas. Após 133 anos é relatado, como um presságio, a região na qual seria erguida a nova capital do país: “entre os graus 15 e 20 havia uma enseada bastante longa e bastante larga, que partia de um ponto onde se formava um lago”, diz o italiano e sacerdote da igreja católica Dom Bosco. Em 1891 essa região é então incluída na primeira Constituição da República Brasileira, vindo a ser explorada no próximo ano por diversos cientistas e ficando conhecida por “Quadrilátero Cruls”, denominação dada devido ao nome da expedição “Missão Cruls”. Em 1946, essa região foi novamente estudada pela equipe do general Djalma Poli Coelho, confirmando um posicionamento propício à mudança.

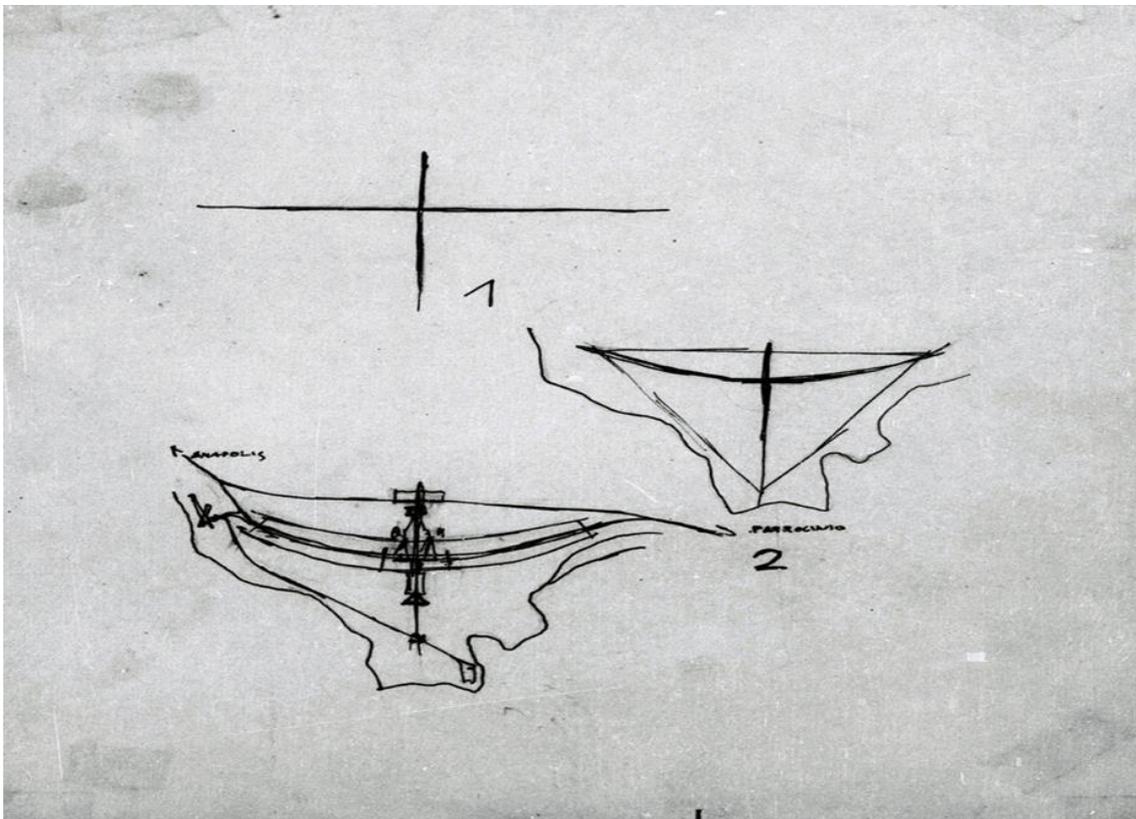
Com a promessa da construção da Nova Capital do Brasil, Juscelino Kubitschek inicia sua campanha política para se eleger como presidente. Sendo empossado em 1956, ele inicia o processo para a construção da Nova Capital.

“Dêste Planalto Central, desta solidão que em breve se transformará em cérebro das altas decisões nacionais, lanço os olhos mais uma vez sobre o

amanhã do meu país e antevejo esta alvorada com fé inquebrável e uma confiança sem limites no seu grande Destino”. (Juscelino Kubitschek, 1956)<sup>5</sup>

Incumbida para planejar e coordenar a obra da capital, a Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil – NOVACAP – é criada. No Diário Oficial da união é apresentado o Concurso Nacional do Plano Piloto da Nova Capital do Brasil, com o objetivo de promover a concepção do projeto para implantação da capital do Brasil. A proposta campeã se destacou pela simplicidade e modernismo, em que dois eixos perpendiculares podiam ser identificados como o sinal da cruz ou como o desenho de um avião.

Figura 7 – Croquis de Lúcio Costa para o Plano Piloto de Brasília



Fonte: Arquivo Público do Distrito Federal<sup>6</sup>.

Ao final, o plano urbanístico escolhido para a capital foi o do urbanista, professor e arquiteto Lúcio Marçal Ferreira Ribeiro de Lima Costa. Após definir o vencedor, era

<sup>5</sup> Frase retirada da Revista Brasília, nº 39 (3/1960) p. 46. Disponível em: <<https://www.arquivopublico.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/07/NOV-D-4-2-Z-0001-40d-menor.pdf>> Acesso em 23 de nov. de 2021.

<sup>6</sup> Disponível em: <<https://www.arquivopublico.df.gov.br/nucleos-de-apoio/>>. Acesso em 23 de nov. de 2021.

necessário começar o planejamento da nova cidade. Foi quando os arquitetos Oscar Niemeyer, Lúcio Costa e o engenheiro Joaquim Cardozo se reuniram e iniciaram a construção. A jornada foi rápida e em abril de 1960, mais precisamente no dia 21 do mês citado, realizava-se a inauguração de Brasília, uma cidade de características únicas e com a promessa de encantar o mundo pela sua estrutura de organização.

Figura 8 – Estudantes desfilam na solenidade de inauguração da nova capital do país.



Fonte: Arquivo Público do Distrito Federal<sup>7</sup>.

O projeto do Plano Piloto foi tão inovador que, em 1987, foi reconhecido como Patrimônio Mundial pela Organização das Nações Unidas Para Educação, Ciência e Cultura – UNESCO. Além disso, ficou conhecido por ser o primeiro plano urbano reconhecido pela instituição no século XX e foi registrado no Livro de Tombo Histórico pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional - IPHAN.

A qualificação de Brasília como Patrimônio da Humanidade pressupõe que o significado do desenho transcende os objetivos particulares imediatos – práticos e programáticos – e ganha foro universal. Das inúmeras razões do reconhecimento, distinguimos aqui a Superquadra, contribuição inédita para a configuração dos espaços do cotidiano na cidade contemporânea. (FERREIRA e GOROVITZ, 2008 p.12)

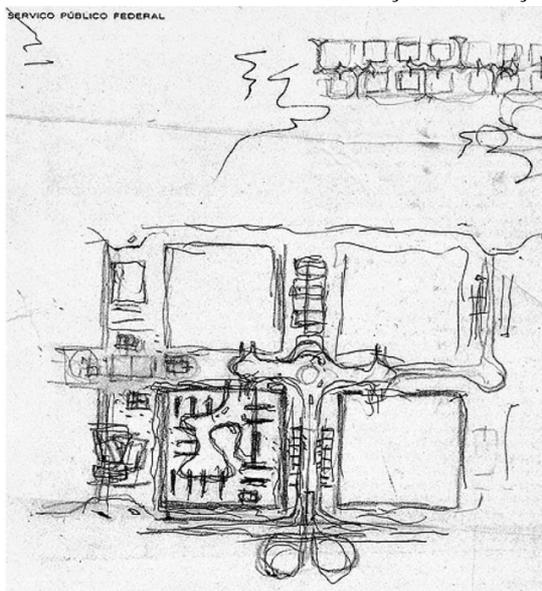
Dentro do projeto foram idealizadas as superquadras. Elas traziam o conceito de Unidades de Vizinhança, ou seja, eram modelos desenhados para oportunizar a convivência social. Para promover essa socialização, foram criadas praças, áreas verdes, comércios etc.

---

<sup>7</sup> Disponível em: <<http://memorialdademocracia.com.br/card/construcao-de-brasilia/9>>. Acesso em 23 de nov. 2021.

Lúcio Costa fazia referência a seu projeto urbanístico como Áreas de Vizinhança. Os modelos de superquadras planejados por ele eram definidos por instrumentos habitacionais situados nos contornos do sistema viário, tendo suas praças esportivas, cinemas e galerias comerciais acessíveis pelas vias principais, eixos Leste e Oeste. Já os comércios das próprias entrequadras e clube de vizinhança, por exemplo, eram acessíveis pelas vias secundárias, denominadas W-1 e L-1. Apenas as escolas e jardins eram dispostos de forma central.

Figura 9 - Croqui de Lúcio Costa - Áreas de Vizinhança com solução das superquadras



Fonte: GIMENEZ<sup>8</sup>

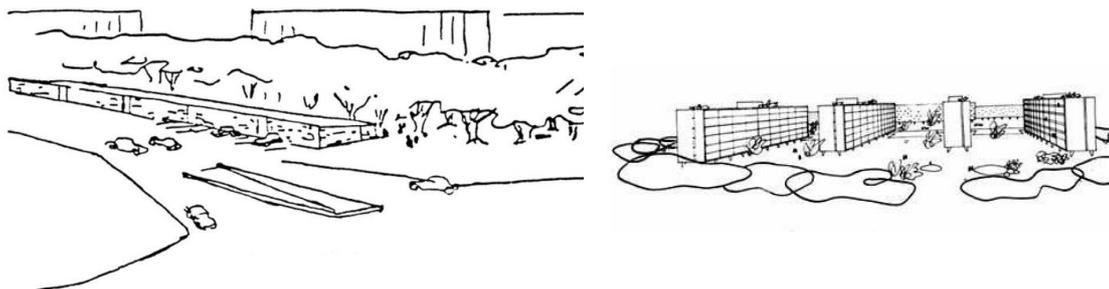
Como forma de definir a cidade, Lúcio Costa (1967) determina três escalas “a escala coletiva ou monumental, a escala cotidiana ou residencial e a escala concentrada ou gregária”.

As superquadras, na escala residencial, contêm uma área verde de 250m x 250m, com os edifícios situados na parte interna, sem cercas ou muros, devido ao solo ser público. O uso de pilotis traz um espaço de consonância do domínio público e privado, sem barreiras e superfície livre. Os vazios são completados por gramas, chegando a atingir 84% da área total.

---

<sup>8</sup> Disponível em: <<https://docomomo.org.br/wp-content/uploads/2016/01/077.pdf>>. Acesso em: 23 de nov. de 2021.

Figura 9 - Croqui de Lúcio Costa –Vista e Perspectiva Superquadras



Fonte: Arquivo Público do Distrito Federal

As Asas, Norte e Sul, seguem a mesma lógica numérica e de pontos cardeais para definição das vias e superquadras. Em todo sentido longitudinal há o “Eixão”, que divide a parte Leste, onde está situado o Eixo L e superquadras pares (200 e 400), e a parte Oeste, contida pelo Eixo W e superquadras ímpares (100 e 300). A numeração das superquadras acontece sempre em 3 dígitos, com as dezenas variando de 2 a 16 e prosseguindo de forma longitudinal com a indicação da quantidade de quadras após o eixo monumental.

Figura 11 – Divisão das superquadras no Plano Piloto



Fonte: MARTINATTI, Y. W. P. (2021, p. 16).

As superquadras residenciais, intercaladas pelas entrequadras (comércio local, recreio, equipamentos de uso comum), se sucedem, regular e linearmente dispostas ao longo dos 6 km de cada ramo do eixo arqueado – Eixo Rodoviário-Residencial. A escala definida por esta sequência entrosa-se com a escala monumental não apenas pelo gabarito das edificações como pela definição geométrica do território de cada quadra através da arborização densa da faixa

verde que a delimita e lhe confere cunho de “pátio interno urbano” (Lucio Costa, Brasília revisitada 1985/87).

Ressalta-se que os edifícios das 100, 200 e 300 são caracterizados por pilotis e gabarito de seis pavimentos, já nas superquadras 400 os edifícios são térreos e de até três pavimentos, devido à restrição de altura.

Os edifícios residenciais têm em sua tipologia os conceitos de: a) vazados, em que a unidade privativa se dispõe no decorrer das fachadas anterior e posterior; e b) não vazados, contendo duas unidades privativas entre as fachadas, ocasionando na falta de ventilação cruzada e limitação da paisagem externa.

A escolha da proposta arquitetônica pode ser feita pelos arquitetos, de maneira a promover uma diversidade visual e, ao mesmo tempo, garantir os requisitos de gabarito de 6 pavimentos, pilotis livres e área máxima ou projeção dentro do determinado.

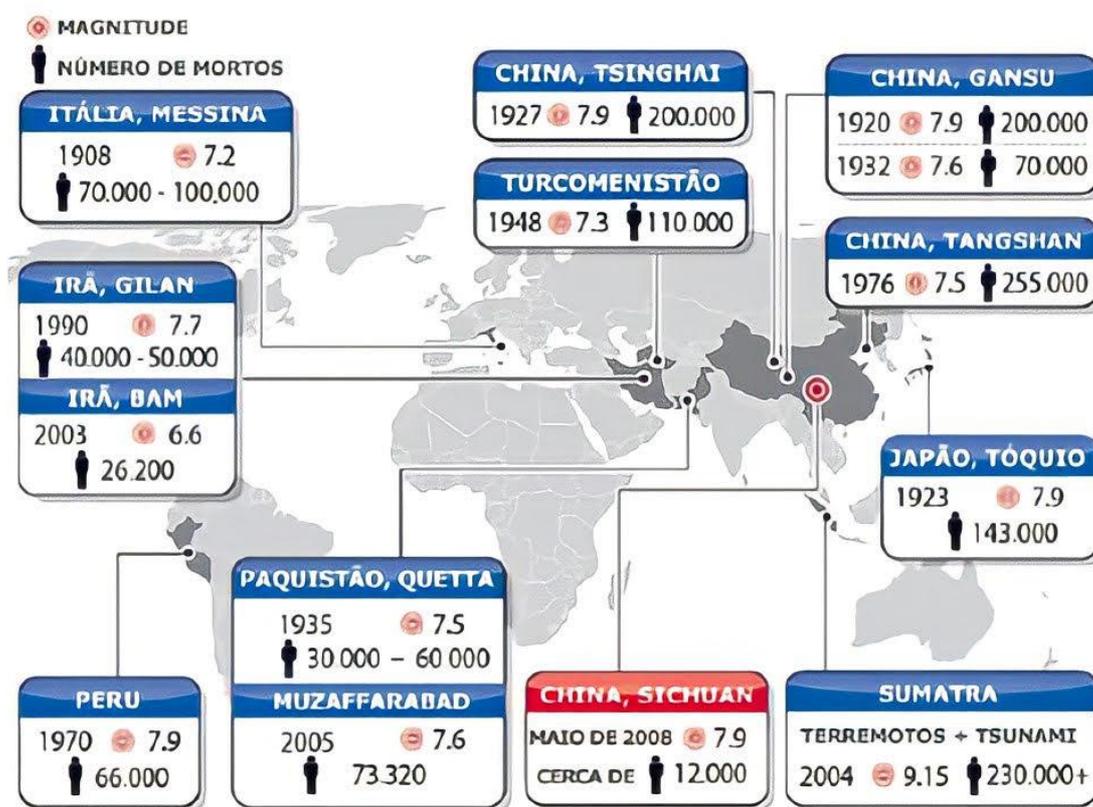
É de se afirmar que as edificações contidas na escala residencial não são tombadas por si só, mas sim, inseridas em uma área tombada. Como consequência, modificações no seu contexto traria prejuízo na concepção inicial do Plano Piloto de Brasília.

## **2.5 Sismo**

Um grande terremoto ocorreu em 1908, na cidade de Messina (Itália), acometendo entre 70 000 e 100 000 vítimas. Outro terremoto de catastrófica proporção ocorreu em 1920, na cidade de Gansu, na China, deixando aproximadamente 200 000 pessoas mortas.

A imagem a seguir mostra os maiores sismos do mundo, suas magnitudes e o número aproximado de vítimas.

Figura 10 – Terremotos mais devastadores



Fonte: Geological Survey -US:2008.

O globo terrestre é dividido em 52 placas tectônicas, sendo 14 principais e 38 secundárias. As atividades sísmicas tendem a ocorrer em regiões onde há o encontro de placas tectônicas, que são como vários pequenos blocos, com dimensões variadas. Esses recortes constituem as falhas tectônicas. Fazendo uma analogia, essas falhas são como feridas que não cicatrizam e que, apesar de serem bastante antigas, podem abrir a qualquer momento, liberando energia.

Lindeburg e McMullin (2008) explicam que o movimento das placas gera, nas rochas, forças geológicas que procedem como corpos elásticos e concentram muita energia de deformação. Com isso, quando as tensões geradas nas rochas superam as resistências, há a ocorrência de rupturas, o que causa a liberação da energia que foi acumulada – de uma única vez ou em eventos consecutivos – e provoca, assim, um terremoto.

Segundo a (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2018), entre os anos de 1998 e 2018, estima-se que 251.770 óbitos são decorrentes de catástrofe relacionada ao sismo (ao próprio abalo sísmico ou tsunami consequente deste). Esses desastres

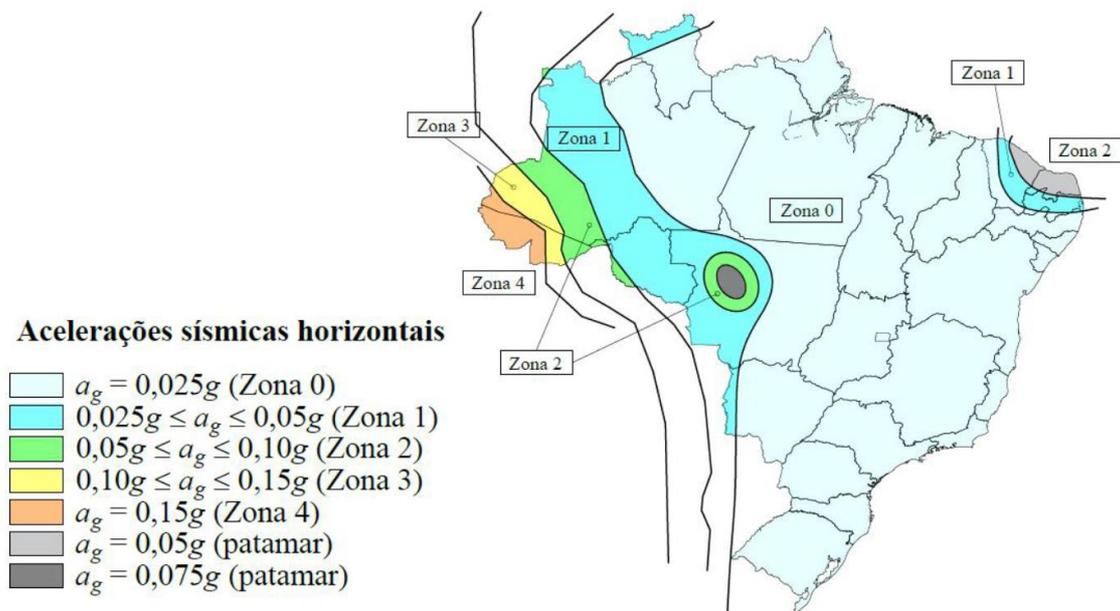
acarretaram uma perda econômica de aproximadamente US\$ 280 Bilhões nas regiões afetadas, e em um prejuízo global estimado em US\$ 660 Bilhões.

### 2.5.1 Histórico das atividades sísmicas no Brasil

A área territorial brasileira possui uma baixa atividade sísmica, pois sua localização é centralizada na placa sul-americana. Portanto, a atividade se diferencia daquelas desencadeadas em regiões situadas nos limites das placas tectônicas, o que não significa haver inatividade sísmica. Santos e Lima (2005) apontam que foi somente na década de 1970 que, no Brasil, o estudo da sismicidade, com base científica, teve início. Na ocasião, foram instalados sismógrafos em vários pontos do país. No entanto, até a presente data, não foi possível a realização de um estudo completo dessas manifestações sísmicas.

A seguir, pode-se observar sugestão de mapa de sismicidade brasileira proposta por Felipe de Vasconcelos Alves, onde tem-se a divisão das zonas em que ocorrem as acelerações sísmicas horizontais.

Figura 11 – Proposta de alteração no mapa de sismicidade brasileira de F. V. Alves.



Fonte: MIRANDA, P, S, T; (2021, p. 68)

Segundo Saadi (2002), o maior número de falhas concentra-se nas regiões Sudeste e Nordeste, que apresentam o maior número de terremotos. Depois, há as regiões Norte,

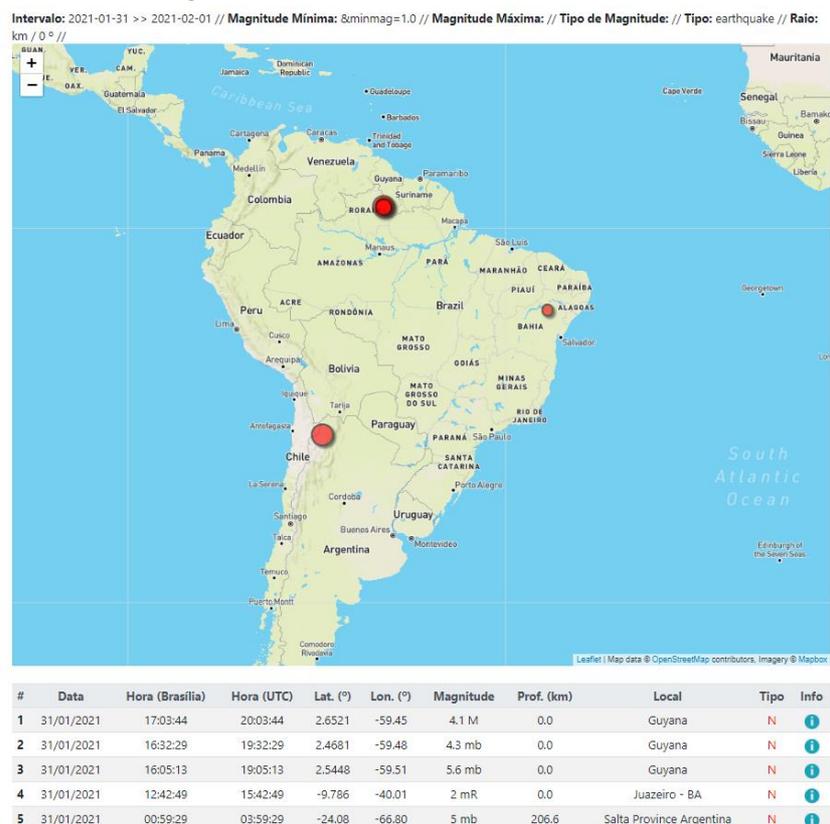
Centro-Oeste e Sul, que têm o menor número de falhas. De acordo com o histórico da atividade sísmica, o maior terremoto já registrado no país ocorreu há mais de 50 anos conforme descrito por Miranda (2013).

“O maior terremoto que o país já teve, ocorreu há mais de 50 anos, na Serra do Tombador, no Mato Grosso, atingindo 6,6 graus na escala Richter. Outros registros que merecem destaque: Manaus-AM (1963) com 5,1 graus, noroeste do Mato Grosso do Sul (1964) com 5,4 graus, Pacajus-CE (1980) com 5,2 graus, Codajás-AM (1983) com 5,5 graus, João Câmara-RN (1986 e 1989) com 5,1 graus e 5,0 graus respectivamente, Plataforma-RS (1990) com 5,0 graus, Porto Gaúcho-MT (1998) com 5,2 graus, divisa entre Acre e Amazonas (2007) com 6,1 graus. Em Itacarambi-MG, no dia 09 de dezembro de 2007 ocorreu um terremoto com 4,9 graus na escala Richter que provocou a primeira vítima fatal da história do Brasil além de deixar cinco feridos e várias casas destruídas.” (MIRANDA, 2013, p. 31-32).

Já em 2021, tivemos o registro de 5 terremotos no território brasileiro (considerados sensível a ser sentido pelo ser humano) – 2 no Ceará, com magnitude de 2,2 graus, 1 no Estado do Goiás, com a magnitude de 3,2 graus, 1 em Minas Gerais, com 3 graus de magnitude, e o mais intenso, registrado em Roraima, com 5,7 graus.

O terremoto registrado no estado de Roraima teve seu epicentro na Guiana, no dia 31 de janeiro, às 15h5min, e foi sentido em Manaus. Houve, ainda, o registro de outro terremoto no Rio Grande do Sul, com 2 graus de magnitude, e o último registrado foi em São Paulo, com 3 graus de magnitude, atingindo o município de Guaimbê (SP) a 1h38min do dia 17 de março.

Figura 12 – Terremotos mais sentidos no Brasil



Fonte: Sismógrafo UnB<sup>9</sup>.

Depois desses eventos, o objetivo de se compreender suas origens tem mobilizado estudos acerca da sismicidade e do tectonismo no Brasil. Hasui e Ponçano (1978), por exemplo, associam os citados sismos aos movimentos tectônicos de caráter global. Zonas de descontinuidade (geossuturas proterozóicas) foram identificadas e são tidas como zonas frágeis, onde há a ação das forças tectônicas que originam, portanto, os sismos. Haberlehner (1978) constata que há, no território brasileiro, 10 províncias sismo tectônicas. Nessas áreas, onde estão presentes falhas tectônicas, existe a concentração de atividades sísmicas.

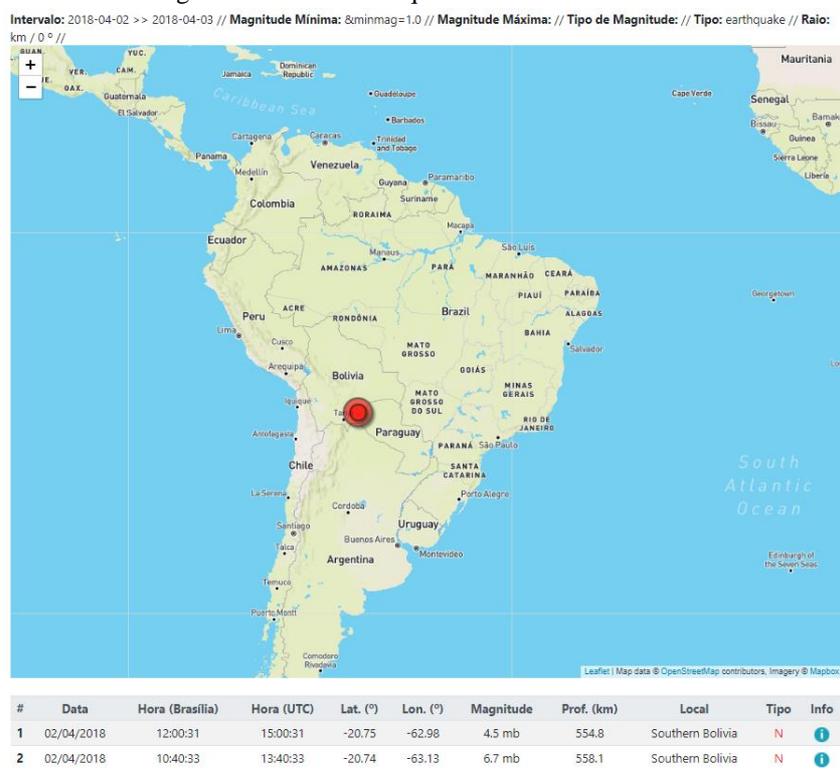
### 2.5.2 Histórico das atividades sísmicas em Brasília

Conforme amplamente noticiado, em 2 de abril de 2018 foi sentido um terremoto em Brasília, que foi reflexo de um terremoto que ocorreu na Bolívia, com a magnitude de

<sup>9</sup> Disponível em: < <http://obsis.unb.br/portalsis/> >. Acesso em 16 de mar. de 2021.

6,7 na escala Richter. O forte tremor, ante à magnitude aferida, levou à evacuação de vários edifícios, pois havia o risco de danos.

Figura 13 – Terremoto que foi sentido em Brasília.



Fonte: Sismógrafo UnB <sup>10</sup>.

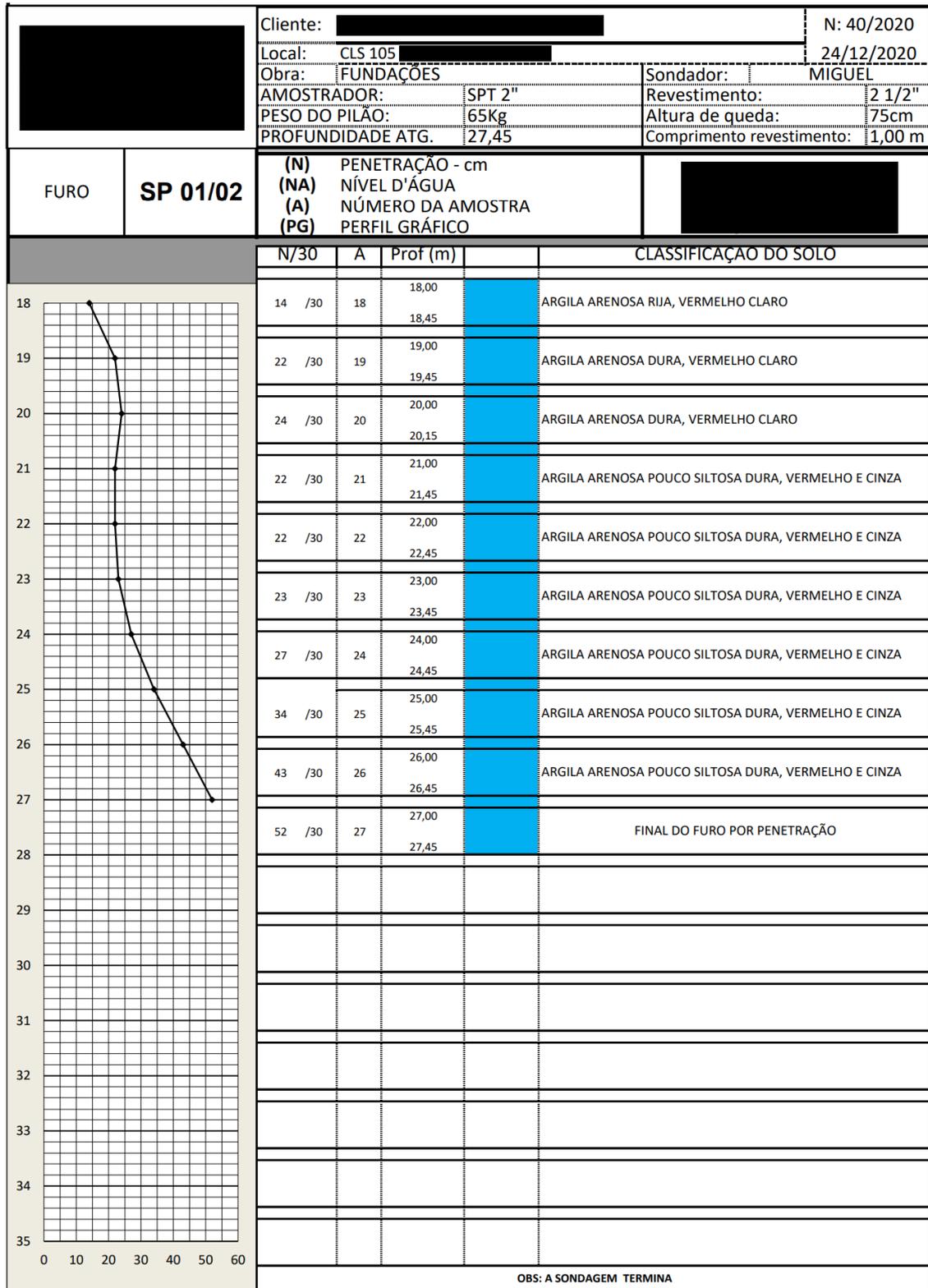
Ainda no mesmo ano, foi registrado, em 22 de agosto, mais um terremoto. Com magnitude de 7,3 na escala Richter, seu epicentro foi na Venezuela e teve a duração de, aproximadamente, 5 segundos.

Brasília é localizada na Zona 0 de acelerações sísmicas horizontais, sendo assim, seria considerado desnecessário o cálculo para verificação de resistência à sismo nas estruturas. Entretanto, o centro da cidade de Brasília possui solo com baixa resistência mecânica, tornando-a assim mais suscetível a danos advindos de esforços horizontais resultantes de sismos, mesmo que em menor intensidade. O Plano Piloto apresenta solo colapsível de argila vermelha como pode ser observado nos laudos de sondagem SPT (Standard Penetration Test) a seguir:

<sup>10</sup> Disponível em: < <http://obsis.unb.br/portalsis/>>. Acesso em 16 de mar. de 2021.

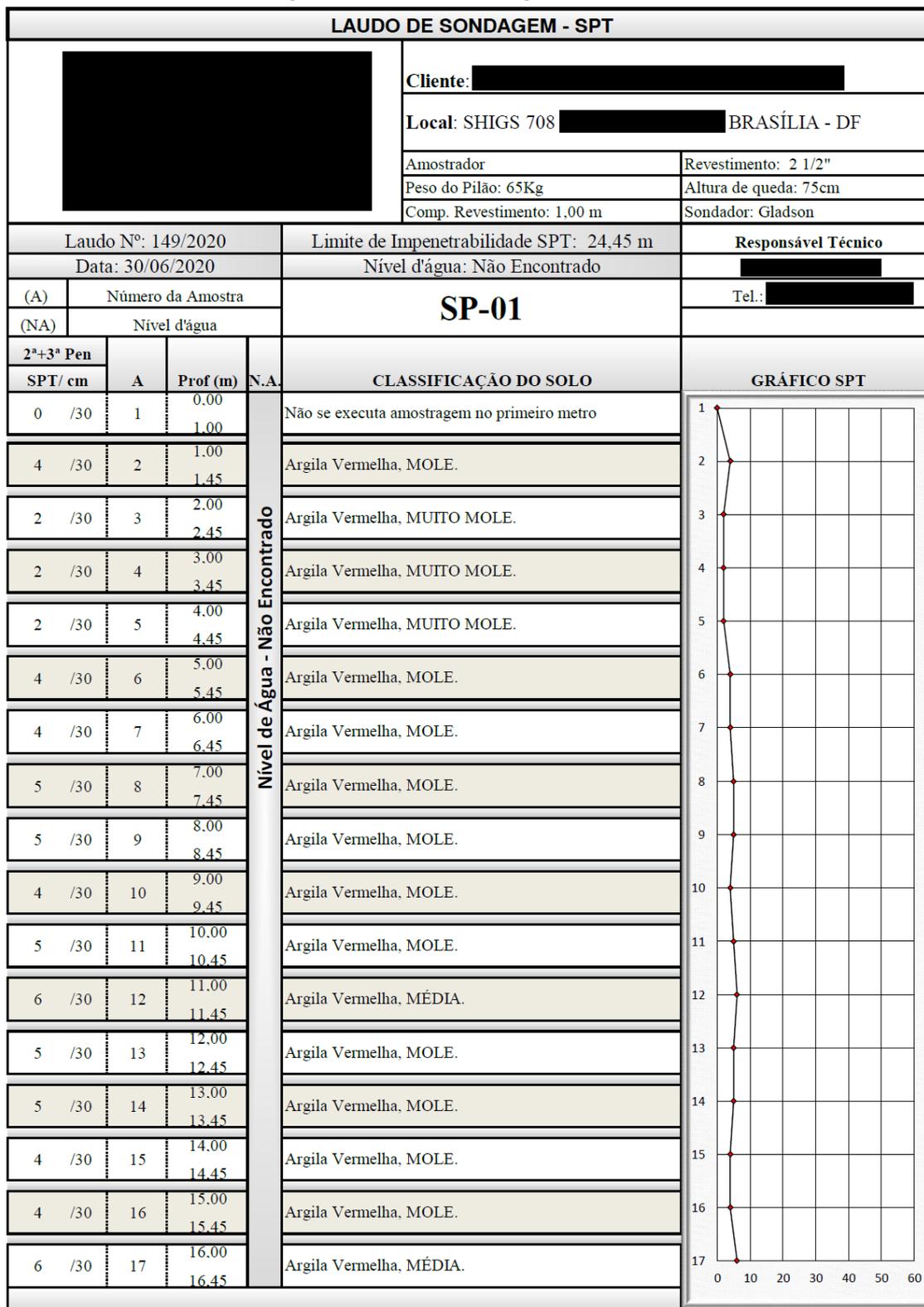


Figura 15 – Continuação do ensaio de sondagem 1 – Brasília.



Fonte: Autor (2021).

Figura 16 – Ensaio de sondagem 2 – Brasília.



Fonte: Autor (2021).



De acordo com a NBR 15421 (ABNT, 2006) é possível classificar diferentes tipos de terrenos de acordo com os parâmetros geotécnicos a partir do número médio de golpes,  $N$ , do ensaio SPT regulamentado pela NBR 6484 (ABNT, 2001). Conforme observado abaixo:

Tabela 2 – Classes do terreno

Classe do terreno	Designação da Classe do terreno	Propriedades médias para os 30 m superiores do terreno	
		$v_s$	$N$
A	Rocha sã	$v_s \geq 1500$ m/s	(não aplicável)
B	Rocha	$1500$ m/s $\geq v_s \geq 760$ m/s	(não aplicável)
C	Rocha alterada ou solo muito rígido	$760$ m/s $\geq v_s \geq 370$ m/s	$N \geq 50$
D	Solo rígido	$370$ m/s $\geq v_s \geq 180$ m/s	$50 \geq N \geq 15$
E	Solo mole	$v_s \leq 180$ m/s	$N \leq 15$
	-	Qualquer perfil incluindo camada com mais de 3 m de argila mole	
F	-	Solo exigindo avaliação específica, como: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Solos vulneráveis à ação sísmica, como solos liquefazíveis, argilas muito sensíveis e solos colapsíveis fracamente cimentados;</li> <li>2. Turfa ou argilas muito orgânicas;</li> <li>3. Argilas muito plásticas;</li> <li>4. Estratos muito espessos (<math>\geq 35</math> m) de argila mole ou média.</li> </ol>	

Fonte: NBR 15421 (ABNT, 2006)

A Tabela 2 indica os valores obtidos através do ensaio SPT ao longo da profundidade em que se busca o valor médio  $N$  e a classificação do solo.

Tabela 3 – Ensaios SPT dos Casos de estudo

Prof. (m)	S1	S2
1,0	1	0
2,0	1	4
3,0	1	2
4,0	1	2
5,0	2	2
6,0	2	4
7,0	3	4
8,0	4	5
9,0	5	5
10,0	8	4
11,0	8	5
12,0	9	6
13,0	10	5
14,0	11	5
15,0	7	4
16,0	5	4
17,0	6	6
18,0	14	19
19,0	22	24
20,0	24	28
N	7,2	6,9

Fonte: Autor (2021).

Com o valor de  $N$  obtido, torna-se possível identificar a Classe de Terreno na qual o solo estudado se encontra inserida. Ao cruzar as informações da Tabela 3 com as informações da Tabela 2, verifica-se que os terrenos se enquadram na classe de terreno E.

### 2.5.3 Método de Hirosawa

Primando por um método de avaliação que mais se adeque à realidade brasileira, é imprescindível destacar o método Hirosawa – precisamente, o seu primeiro nível de avaliação, que é uma das melhores opções quando se trata de avaliação da vulnerabilidade sísmica de estruturas de concreto armado.

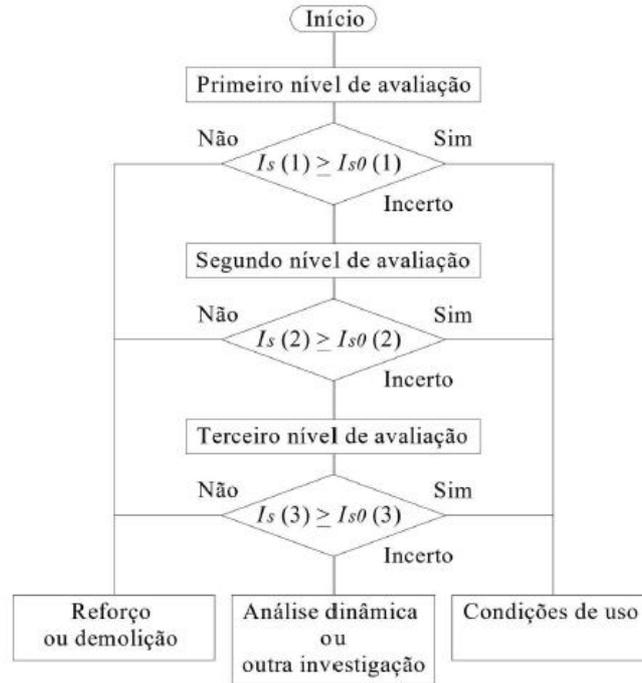
#### 2.5.3.1 Generalidades

O método de Hirosawa é capaz de avaliar o desempenho sísmico de estruturas de concreto armado ou de detectar se sofreram algum dano, estando, no entanto, restrito a construções com até 8 pavimentos (ALBUQUERQUE, 2008). Desta forma, é com base na comparação de dois índices – o índice de desempenho sísmico,  $I_s$ , e o índice de solicitação sísmica,  $I_{s0}$  – que é feita a referida avaliação, podendo resultar em duas situações:

- $I_s \geq I_{s0}$  – a edificação tem segurança frente ao evento sísmico idealizado e pode continuar a ser usada, sem a necessidade de reforço sísmico;
- $I_s < I_{s0}$  – a edificação tem um comportamento incerto frente ao evento sísmico idealizado.

Cabe destacar, ainda, que o método pode ser dividido em três níveis de avaliação, sendo o primeiro classificado como qualitativo de avaliação da vulnerabilidade sísmica, e o segundo e o terceiro níveis classificados como quantitativos. Conforme informa Miranda (2013), essa classificação em níveis leva em conta o volume de informações necessárias, a complexidade dos cálculos e a precisão dos resultados, classificados em ordem crescente, do nível 1 ao nível 3.

Figura 18 – Fluxograma de investigação de diagnóstico sísmico.



Fonte: MIRANDA, P. S. T.; (2013, p. 70)

Independente do pavimento e da direção, haverá somente um índice de solicitação  $I_{s0}$ , que é calculado para a totalidade da estrutura.

#### 2.5.4 Índice de desempenho sísmico $I_s$

O índice de desempenho sísmico  $I$  pode ser obtido por meio da seguinte equação:

$$I_s = E_0 * S_D * T_D \quad (6)$$

Onde:

$E_0$ : subíndice de desempenho sísmico básico estrutural;

$S_D$ : subíndice de configuração estrutural;

$T_D$ : subíndice de deterioração estrutural.

Assim, o nível de avaliação influenciará diretamente a metodologia de cálculo do subíndice de desempenho sísmico estrutural  $E_0$ . O primeiro nível de avaliação se baseia

na capacidade de resistência da edificação, estimada através da resistência média ao cisalhamento dos elementos verticais. O segundo nível leva em conta as resistências máximas para os modos de ruptura por cisalhamento, para calcular a capacidade e a ductilidade dos elementos verticais. O último nível abarca, ainda, os elementos horizontais (vigas), para determinar a capacidade de resistência e ductilidade da estrutura.

Independentemente do nível de avaliação, e com base nos subíndices que compõem o índice de desempenho sísmico, é possível organizar, em sequência, os procedimentos a serem tomados

#### 2.5.4.2 Subíndice $E_0$

A verificação da resistência ao cisalhamento de cada andar da construção pode ser representada pelo subíndice  $E_0$ , o mais importante na determinação do índice de desempenho sísmico, diferentemente dos subíndices  $S_D$  e  $T_D$ , que são fatores de redução.

O subíndice  $E_0$  considera apenas a capacidade resistente dos pilares, sendo representado pela equação a seguir:

$$E_0 = \left\{ \left( \frac{n+1}{n+i} \right) \right\} \cdot (a_1 \cdot C_c) \cdot F_c \quad (7)$$

Considera-se 200kgf/cm<sup>2</sup> o valor máximo para a resistência à compressão do concreto de acordo com o método de Hirosawa original. Desta forma, utiliza-se o termo  $\left( \frac{f_c}{200} \right)$  no cálculo do índice de resistência  $C_c$ , correspondente a um fator de redução para concretos com inferiores resistências à compressão.

No método adaptado, faz-se uso do sistema internacional de unidades, ou seja, as unidades de resistência média ao cisalhamento são calculadas em MPa, a área das seções transversais dos elementos verticais é medida em m<sup>2</sup>, e por fim, o peso da estrutura é aferido em kN. Devido à essas conversões, o fator de redução de resistência à compressão do concreto não mais é de  $\left( \frac{f_c}{200} \right)$ , mas sim de  $\left( \frac{f_c}{20} \right)$ .

#### 2.5.5 Adaptação do método de Hirosawa

É importante ressaltar que a aplicação de quaisquer dos métodos de avaliação qualitativa de vulnerabilidade sísmica deve ser realizada com base nas características de

cada país com relação a métodos construtivos, materiais utilizados, mão de obra empregada e risco sísmico. Diante disso, é preciso que haja uma adaptação ao método, de modo a aproximar os resultados ao comportamento real da estrutura.

Além do fator geográfico que favorece o presente estudo, vale também salientar que o método de PAHO considera a utilização de painéis de alvenaria na avaliação do desempenho estrutural, diferentemente do método Hirosawa original, que por sua vez, leva em consideração somente os elementos de concreto armado (pilares, pilares curtos e paredes), e, portanto, não poderia ser aplicado no Brasil. Cabe destacar que, para este método avaliativo, somente serão considerados os painéis de alvenaria que possuam função estrutural, desconsiderando as alvenarias de vedação. No Brasil, o comum é que as alvenarias das construções de concreto armado possuam somente função de vedação, seja como divisórias ou elementos de fechamento externo.

### 2.5.5.3 Índice de desempenho sísmico – adaptado

Através do método de Hirosawa adaptado, no primeiro pavimento consideram-se somente os pilares de concreto como componentes estruturais verticais. Tal fato se darem razão de, no Brasil, as construções de até oito pavimentos, conforme ordena o método, normalmente não possuem pilares curtos nem paredes de concreto. Estas geralmente são mais encontradas em construções mais altas e atuam como elementos de contraventamento, para limitação dos deslocamentos.

Para o método de Hirosawa original, é considerada uma resistência à compressão de no máximo 200 kgf/cm<sup>2</sup> para o concreto. Desta forma, deve-se utilizar o termo  $f_c/200$  para o cálculo do índice de resistência ( $C_c$ ), que por sua vez é um fator de redução para concretos de menores resistências à compressão. O índice de resistência ( $C_c$ ) pode ser calculado através da seguinte equação:

$$C_c = \frac{f_c}{200} \cdot \frac{(\tau_{c1} \cdot A_{c1} + \tau_{c2} \cdot A_{c2})}{W} \quad (8)$$

Onde:

$C_c$ : índice de resistência dos pilares;

$\tau_{c1}$ : resistência média ao cisalhamento no estado limite último dos pilares cuja altura livre dividida pela base da seção do pilar é menor que 6,0, podendo ser tomada como 10 kgf/cm<sup>2</sup>;

$\tau_{c2}$ : resistência média ao cisalhamento no estado limite último dos pilares cuja altura livre dividida pela base da seção do pilar é maior ou igual a 6,0, podendo ser tomada como 7 kgf/cm<sup>2</sup>;

$A_{c1}$ : somatório das áreas de seção transversal dos pilares cuja altura livre dividida pela base da seção do pilar é menor que 6,0 (cm<sup>2</sup>);

$A_{c2}$ : somatório das áreas de seção transversal dos pilares cuja altura livre dividida pela base da seção do pilar é maior ou igual a 6,0 (cm<sup>2</sup>);

$W$ : peso da estrutura acima do pavimento analisado (kgf).

Lembrando que, devido à conversão de unidades para o sistema internacional, o fator de redução de resistência à compressão do concreto passa a ser considerado  $f_c/20$ . Sendo assim, substituindo a Equação (8) do índice de resistência dos pilares ( $C_c$ ), na Equação (7) para cálculo do subíndice  $E_0$ , tem-se:

$$E_0 = \left\{ \left( \frac{n+1}{n+i} \right) \right\} \cdot a_1 \left[ \frac{f_c}{20} \cdot \frac{(\tau_{c1} \cdot A_{c1} + \tau_{c2} \cdot A_{c2})}{W} \right] \cdot F_c \quad (9)$$

Para estruturas em que a resistência à compressão é superior à 20 MPa, Albuquerque (2008) propõe a substituição do termo  $\frac{f_c}{20}$  por  $\sqrt{\frac{f}{20}}$ , sendo assim, tem-se a seguinte equação:

$$E_0 = \left\{ \left( \frac{n+1}{n+i} \right) \right\} \cdot a_1 \left[ \sqrt{\frac{f_c}{20}} \cdot \frac{(\tau_{c1} \cdot A_{c1} + \tau_{c2} \cdot A_{c2})}{W} \right] \cdot F_c \quad (10)$$

Além disso, essa adaptação ao método permite, através do produto das seções transversais dos pilares de concreto, independentemente da direção analisada, verificar o índice de desempenho sísmico, em uma única direção. Isto se dá em razão da consideração apenas dos pilares para o cálculo do método. No cálculo do subíndice  $E_0$ , as resistências  $T_{c1}$  e  $T_{c2}$  assumem os valores do método original.

### 2.5.6 Índice de solicitação sísmica – adaptado

Influenciado de forma robusta pelo subíndice de solicitação sísmica básica ( $E_s$ ), o índice de solicitação sísmica tem relação direta com o comportamento particular da estrutura em face de um abalo sísmico. Como já mencionado, o valor do índice  $E_s$ , constante no método Hirosawa original, foi obtido com base na análise de danos das

edificações em decorrência dos terremotos em Tokachi-oki, em 1968, e Miyagiken-oki, em 1978, ambos no Japão.

Para considerar o efeito dos sismos nas estruturas, os primeiros projetos que levaram em conta esses esforços fizeram-no de maneira bem simplificada, através da aplicação de força cortante, equivalente a uma porcentagem da massa total da estrutura. Essa porcentagem é correspondente ao coeficiente de resposta sísmico ( $C_s$ ) da ABNT – NBR 15421:2006.

O coeficiente sísmico define o valor resultante das forças estáticas através da multiplicação do coeficiente pelo valor das ações da gravidade. Desta forma, ao distribuir a força estática na altura, faz-se possível a determinação dos efeitos da ação sísmica em uma direção (Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes de Portugal -RSA, 1983).

Para Paulo Miranda (2013), através do coeficiente sísmico é possível definir o índice de solicitação sísmica ( $I_s0$ ).

De acordo com a ABNT NBR 15421:2006, deve-se multiplicar pelo fator  $I/R$  todas as respostas modais referentes às reações de apoio, forças e momentos. Desta forma, o coeficiente sísmico ( $C_s$ ) pode ser calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$C_s = \frac{m \cdot S_a(I/R)}{m \cdot g} \quad (11)$$

$m$  – Massa da estrutura;

$S_a$  - Aceleração espectral;

$g$  – Aceleração da gravidade.

Tratando-se de estruturas aperticadas construídas em concreto armado, a norma NBR 15421 (2006) estabelece que o valor do coeficiente de modificação de resposta ( $R$ ) é 3. Consequentemente, o subíndice de solicitação sísmica básica é igual a 0,83.

Os valores do subíndice de sismicidade ( $Z$ ), expostos na Tabela 4, correspondem aos valores das acelerações sísmicas ( $ag$ ) da NBR 15421 (ABNT, 2006), divididos pela aceleração da gravidade ( $g$ ). A favor da segurança e para a simplificação do processo, os valores adotados são os maiores de cada zona sísmica (Tabela 2), o que leva à igualdade de valores para as zonas sísmicas 3 e 4.

Tabela 4 – Subíndices de sismicidade do método de Hirosawa adaptado ao Brasil.

Zona sísmica	Valores de $Z$
Zona 0	0,025
Zona 1	0,050
Zona 2	0,100
Zona 3 e 4	0,150

Fonte: MIRANDA, P. S. T.; (2013, p. 92)

Conforme observado na Tabela 5, os valores do subíndice topográfico e geotécnico ( $G$ ) expostos correspondem aos valores dos fatores de amplificação sísmica do solo para períodos de 0s extraídos da Tabela 4 da NBR 15421 (ABNT, 2006).

Tabela 5 - Subíndice topográfico e geotécnico do método de Hirosawa adaptado ao Brasil.

Classe do terreno	$G$	
	$Z \leq 0,100$	$Z = 0,150$
A	0,8	0,8
B	1,0	1,0
C	1,2	1,2
D	1,6	1,5
E	2,5	2,1

Fonte: MIRANDA, P. S. T.; (2013, p. 93)

Os valores do subíndice de importância da edificação ( $U$ ), expostos na Tabela 6, equivalem aos fatores de importância de utilização ( $I$ ), conforme observado na Tabela 9 da NBR 15421 (ABNT, 2006).

Tabela 6 - Subíndice de importância da edificação do método de Hirosawa adaptado ao Brasil.

Categoria de utilização	$U$
I	1,00
II	1,25
III	1,50

Fonte: MIRANDA, P. S. T.; (2013, p. 93)

Assim como a NBR 15421 (ABNT, 2006) limita o coeficiente sísmico ( $C_s$ ) em seus valores mínimo e máximo, esses limites são impostos ao índice  $I_s0$ . O limite inferior,  $I_s0,inf$  é, portanto, igual a 0,01.

Ao adotar o coeficiente de modificação de resposta ( $R$ ), equivalente a 3,0, chamar  $C_v$  de  $G_s$  e substituir as igualdades  $Z=ag/g$  e  $U=I$ , obtém-se a equação a seguir, a partir da qual é possível obter a limitação do valor máximo de  $C_s$ :

$$I_{s0,sup} = \frac{0,33.G_s.Z.U}{T_a} \quad (12)$$

Nela,  $T_a$  é o período natural aproximado da estrutura, definido pela equação 15 da NBR 15421 (ABNT, 2006). Essa admissão do período aproximado justifica-se pelo caráter ágil e preliminar da verificação de vulnerabilidade sísmica do método. Os valores do subíndice  $G_s$ , apresentados na Tabela 5, correspondem às medidas dos fatores de amplificação sísmica do solo para períodos de 1 s extraídos da Tabela 4, também da NBR 15421 (ABNT, 2006).

Tabela 7 - Subíndice  $G_s$  do método de Hirosawa adaptado ao Brasil.

Classe do terreno	$G_s$	
	$Z \leq 0,100$	$Z = 0,150$
A	0,8	0,8
B	1,0	1,0
C	1,7	1,7
D	2,4	2,2
E	3,5	3,4

Fonte: MIRANDA, P. S. T.; (2013, p. 94)

Para que a adaptação do método seja bem-sucedida, é necessário conferir a importância do coeficiente de modificação de resposta ( $R$ ) quando da avaliação do índice de solicitação sísmica. Esse coeficiente associa os esforços obtidos em uma análise elástica linear aos esforços obtidos a partir da consideração de um comportamento não linear dos materiais. Assim, sua aplicação retrata a consideração da estrutura em regime não linear. As acelerações espectrais são diminuídas por meio da aplicação do fator de modificação de resposta ( $R$ ), já que a resposta elástica de projeto, com taxa de amortecimento de 5% para um espectro de resposta, possui um amortecimento superior a 5%. Uma ferramenta para determinar o valor do coeficiente de modificação de resposta ( $R$ ), portanto, é a taxa de amortecimento da estrutura. A NBR 15421 (ABNT, 2006) estabelece que um fator de correção, devidamente justificado, pode ser aplicado pelo projetista ao espectro de resposta de projeto se uma estrutura ou parte dela apresentar uma

fração de amortecimento diferente de 5%. Entretanto, a norma brasileira não recomenda a maneira de fazê-lo.

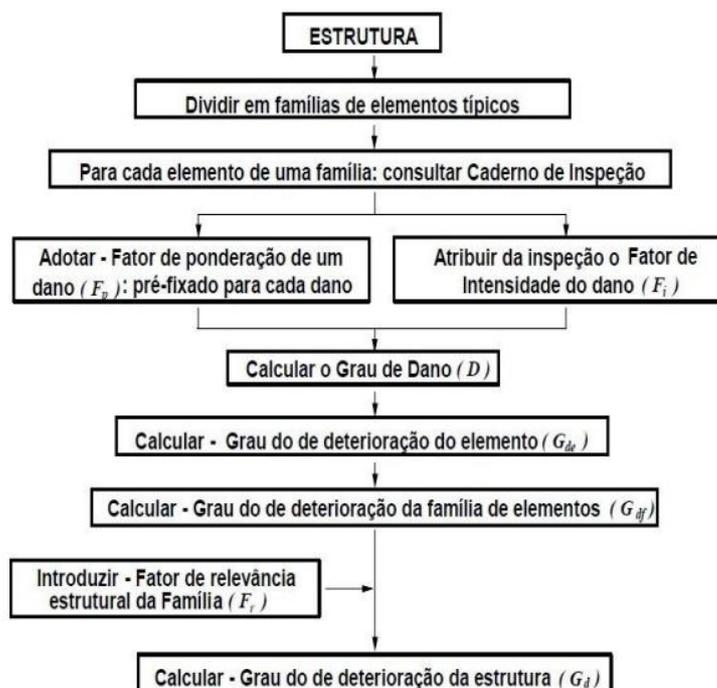
## 2.6 Metodologia para avaliação de processo de degradação em estrutura de concreto armado

A metodologia de Grau de Deterioração do Elemento – GDE, surgiu visando a implementação de um sistema de inspeções sistemático para a manutenção das estruturas. Desde a sua criação tiveram diversas propostas de alteração e aperfeiçoamento da metodologia sem modificar a sua estrutura básica. Diversos pesquisadores fizeram sua contribuição dentre eles, destacam-se Lopes (1998), Boldo (2002) e Fonseca (2007)

### 2.6.1 Grau de Deterioração do elemento – GDE

O trabalho realizado por Castro (1994) propôs uma metodologia, na qual há o método Grau de Deterioração do Elemento (GDE). O método consiste em uma divisão da obra nos seguintes elementos: vigas; pilares; lajes; cortinas; escadas e rampas; reservatórios; blocos; juntas de dilatação; e elementos de composição arquitetônica.

Figura 19 – Fluxograma da metodologia GDE (adaptado de Kraus-94)

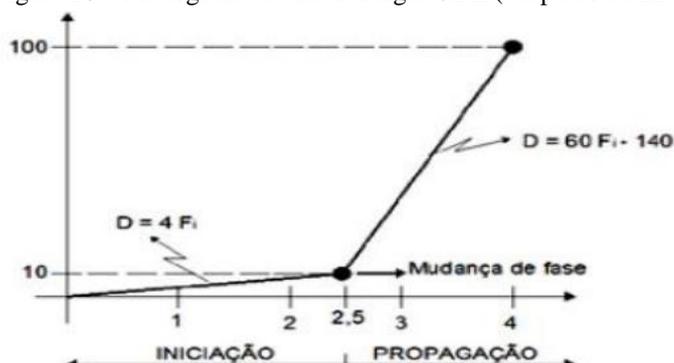


Fonte: Adaptada de Castro (1994)

Dois importantes fatores foram determinados. Um deles é o fator de ponderação ( $F_p$ ), que varia dentro de um intervalo de 1 a 10 para cada patologia e de acordo com a sua importância para a integridade da peça. A numerologia foi determinada com base no trabalho de Klein et al (1991). O segundo é o fator de intensidade ( $F_i$ ), que o engenheiro vistoriador, a partir de sua observação, atribui um valor que varia de 0 (inexistência da patologia) até 4 (para uma situação muito grave).

De acordo com Tuutti (1982), o dano considera duas etapas para o processo de evolução de patologias: as etapas de iniciação e de propagação. A iniciação é um processo de degradação lenta e quase imperceptível, e a propagação é uma degradação acelerada, não só bastante perceptível, como de periculosidade considerável, visto que pode comprometer o funcionamento da estrutura.

Figura 20 – Fluxograma da metodologia GDE (adaptado de Kraus-94).



Fonte: Verly, 2015

A fonte dos dados é de Tuutti (1982). O eixo das abscissas corresponde aos valores de  $F_i$  e o eixo das coordenadas ao valor obtido para o Grau de Dano ( $D$ ). Correlacionando os valores  $F_p$  e  $F_i$ , então, é calculado um Grau do Dano ( $D$ ) para cada patologia, de acordo com as equações que se seguem:

$$D = 0,4 * F_i * F_p, \text{ para } F_i \leq 2,5 \quad D = (6F_i - 14) * F_p, \text{ para } F_i > 2,5 \quad (13)$$

Esse Grau de Dano ( $D$ ) será usado para o cálculo do GDE, obedecendo à seguinte equação:

$$G_{de} = D_{max} * \left[ 1 + \frac{(\sum_{i=1}^{m-1} D_i) - D_{max}}{\sum_{i=1}^m D_i} \right] \quad (14)$$

Quadro 1 – Classificação dos níveis de deterioração do elemento (adaptado de Kraus-94)

Nível de deterioração	G <sub>de</sub>	Ações a serem adotadas
Baixo	0 - 15	Estado aceitável. Manutenção preventiva.
Médio	15 – 50	Definir prazo/natureza para nova inspeção. Planejar intervenção em médio prazo (máx. 2 anos).
Alto	50 – 80	Definir prazo/natureza para inspeção especializada detalhada. Planejar intervenção em curto prazo (máx. 1 ano).
Crítico	> 80	Inspeção especial emergencial. Planejar intervenção imediata.

Fonte: Manual de aplicação da Metodologia GDE/UnB (2015)

A partir do cálculo do GDE de cada elemento, calcula-se o grau de deterioração da família ( $G_{df}$ ), no qual  $n = n^\circ$  de elementos da família:

$$G_{df} = \frac{\sum_{i=1}^n G_{de(i)}}{n} \quad (15)$$

Por fim, relacionando os valores dos  $G_{df}$  calculados e acrescidos de um fator de relevância ( $F_r$ ) específico para cada família, pode ser calculado o valor de  $G_d$  (grau de deterioração da estrutura).

$$G_d = \frac{\sum_{i=1}^k F_r(i) * G_{df(i)}}{\sum_{i=1}^k F_r(i)} \quad (16)$$

- Elementos de composição arquitetônica –  $F_r = 1,0$ ;
- Reservatório superior –  $F_r = 2,0$ ;
- Escadas/rampas, reservatório inferior, cortinas, lajes secundarias –  $F_r = 3,0$ ;
- Lajes, fundações, vigas secundárias, pilares secundários –  $F_r = 4,0$ ;
- Vigas e pilares principais –  $F_r = 5,0$ .

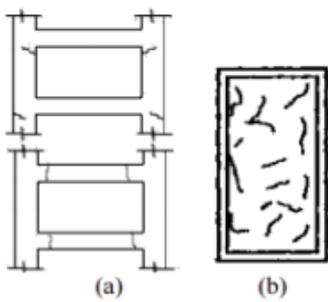
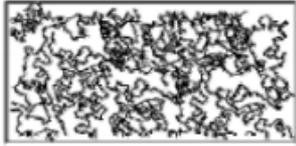
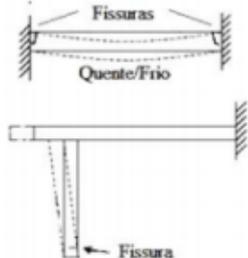
Quadro 2 – Valores de Gd (adaptado de Kraus-94)

<b>Nível de deterioração</b>	<b>G<sub>d</sub></b>	<b>Ações a serem adotadas</b>
Baixo	0 – 15	Estado aceitável. Manutenção preventiva.
Médio	15 – 40	Definir prazo/natureza para nova inspeção. Planejar intervenção em médio prazo (máx. 2 anos).
Alto	40 – 60	Definir prazo/natureza para inspeção especializada detalhada. Planejar intervenção em curto prazo (máx. 1 ano).
Crítico	> 60	Inspeção especial emergencial. Planejar intervenção imediata.

Fonte: Manual de aplicação da Metodologia GDE/UnB (2015)

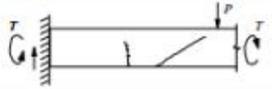
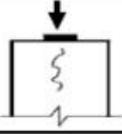
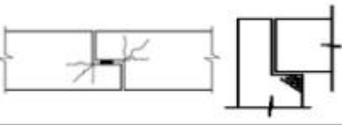
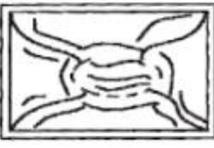
Com a utilização do método proposto em trabalhos posteriores de Lopes (1998) e de Boldo (2002), foram feitos estudos que levaram a modificações no método (Fonseca, 2007), principalmente em relação ao fator de ponderação e à análise de fissuras, substituindo-se, então, o intervalo de  $F_p$  pelo intervalo de 1 a 5. Além disso, são diferenciados os valores de  $F_p$  referente a fissuras, conforme o Quadro 1, o Quadro 3 e o Quadro 4, respectivamente.

Quadro 3 – Fatores de ponderação (Fp)

	<b>Fissuras</b>	<b>Descrição</b>	<b>Croquis</b>	<b>F<sub>p</sub></b>
<b>ESTADO PLÁSTICO</b>	de retração plástica do concreto	<ul style="list-style-type: none"> <li>- comuns em lajes e paredes</li> <li>- paralelas, superficiais e afastadas de 0,3 a 1 m.</li> </ul>		2
	de assentamento do concreto	<ul style="list-style-type: none"> <li>- acompanham as armaduras</li> <li>- em pilares, ficam abaixo dos estribos;</li> <li>- interação com armaduras vizinhas</li> </ul>		3
	de movimentação de fôrmas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- indicam mau posicionamento, má fixação ou resistência insuficiente de fôrmas e escoramentos</li> </ul>		3
<b>ESTADO ENDURECIDO</b>	de retração do concreto por secagem	<ul style="list-style-type: none"> <li>- vigas podem ocasionar fissuras nos pilares e vice-versa, por diferenças de rigidez (a)</li> <li>- aspecto de mosaico em lajes e paredes, podendo aparecer em ambas as faces (b)</li> <li>- indicam restrição de movimentos</li> <li>- profundidade reduzida</li> <li>- aberturas de 0,1 a 0,2 mm</li> </ul>		3
	mapeadas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mais visíveis em superfícies lisas de lajes e paredes</li> <li>- abertura e extensão reduzidas</li> <li>- indicam desempenho excessivo.</li> <li>- danos apenas estéticos, em geral</li> </ul>		2
	de variações de temperatura	<ul style="list-style-type: none"> <li>- em geral, normais ao eixo de elementos lineares</li> <li>- indicam restrição de movimento por mau funcionamento de juntas de dilatação e/ou sua inexistência</li> </ul>		3

Fonte: Fonseca (2007)

Quadro 4 – Fatores de Ponderação (Fp) para fissuras decorrentes de projeto/execução ou de carga excessivas.

	Fissuras	Descrição	Croquis	F <sub>p</sub>
ERROS DE PROJETO/ EXECUÇÃO OU CARGAS EXCESSIVAS	de flexão em vigas	- normais ao eixo, em trechos de momento fletor elevado e com boa aderência aço-concreto		4
	de força cortante - flexão em vigas	- inclinadas nas duas faces - podem entrar na zona de compressão e se dirigir aos apoios		4
	de cortante, momentos de torção e flexão em vigas	- inclinadas em uma face - na face oposta: menor abertura e inclinação		4
	de flexo-tração em pilares	- normais ao eixo do pilar na face tracionada - paralelas ao eixo na face comprimida, podem indicar esmagamento do concreto - mais próximas de extremidade com maior momento		5
	de compressão	- paralelas ao eixo e convergindo para o centro nas proximidades de ruptura - indicam espaçamento excessivo ou deslocamento de estribos		5
	de carga concentrada em área reduzida	- comuns em apoios de pontes, estruturas pré-moldadas e apoios indiretos - indicam armadura deficiente de fretagem e mau detalhamento		3
	em apoios do tipo gerber (vigas e pilares)	- comuns em pontes e estruturas pré-moldadas - indicam deficiência de aparelhos de apoio e/ou detalhamento inadequado		3
	de flexão em lajes	- na face inferior, paralelas aos vãos com continuidade ou vãos maiores, se estendendo em direção aos cantos - na face superior, paralelas aos e bordos com continuidade		4
	de momentos volventes	- em cantos de lajes extremas, podendo abrir nas duas faces - influenciadas por variações de temperatura e retração		3
	de punção	- traçado circular e/ou radial em torno do pilar		5

Fonte: Fonseca (2007)

Mudanças importantes foram feitas também em fórmulas utilizadas para o cálculo do grau de dano (D) e do  $G_{df}$ :

$$D = 0,8F_p F_i, \text{ para } F_i \text{ menor ou igual a } 2,5 \quad (17)$$

$$D = (12F_i - 28)F_p, \text{ para } F_i \text{ maior que } 2,5 \quad (18)$$

Fonseca (2007) observou a ocorrência de uma supervalorização do estado real de um elemento crítico e que quanto mais elementos a família abrangia, mais a expressão ficava próxima da razão 2. Com isso, o  $G_{df}$  tinha uma tendência a ficar cada vez mais próximo do dobro do valor máximo dos elementos da família do  $G_{de}$ .

$$G_{df} = G_{deMáx} \left[ \sqrt{1 + \frac{\sum_{i=1}^m G_{de(i)} - G_{deMáx}}{\sum_{i=1}^m G_{de(i)}}} \right] \quad (19)$$

Após essa mudança, o quadro para classificação foi reformulado:

Quadro 5 – Valores de  $G_d$  adaptado (adaptado de Kraus-94)

Nível de deterioração	$G_d$	Ações a serem adotadas
Baixo	0 - 15	Estado aceitável. Manutenção preventiva.
Médio	15 - 50	Definir prazo/natureza para nova inspeção. Planejar intervenção em longo prazo (máx. 2 anos).
Alto	50 - 80	Definir prazo/natureza para inspeção especializada detalhada. Planejar intervenção em médio prazo (máx. 1 ano).
Sofrível	80 - 100	Definir prazo/natureza para inspeção especializada detalhada. Planejar intervenção em curto prazo (máx. 6 meses).
Crítico	> 100	Inspeção especial emergencial. Planejar intervenção imediata.

Fonte: Medeiros (2015)

## 2.6.2 GDE parametrizado

A seguir são descritas as principais modificações a serem feitas na metodologia GDE/UnB, escolhida para avaliação do grau de deterioração, de dano e de posterior grau de integridade dos elementos estruturais, na avaliação das estruturas existentes de concreto armado. Uma grande vantagem dessa abordagem é sua simplicidade e possibilidade que ela oferece de ser acoplada a softwares estruturais existentes após algumas modificações. A decomposição da estrutura em elementos e famílias é ideal para esse fim.

### 2.6.2.4 Metodologia GDE parametrizada

Para fazer a adequação das variáveis existentes na metodologia GDE-UnB é necessário efetuar um processo de parametrização. Isso possibilita a adoção de diferentes escalas, além de seu acoplamento a outros tipos de avaliações, principalmente na análise

estrutural. A seguir, são descritas as principais modificações a serem feitas para avaliação do grau de deterioração, de dano e de posterior grau de integridade dos elementos estruturais, segundo a abordagem proposta.

#### 2.6.2.5 Fatores de ponderação, intensidade e relevância estrutural parametrizados

A Figura 21 mostra como os valores do fator de ponderação, intensidade e relevância estrutural, presentes na metodologia original, são parametrizados. É importante perceber que as escalas de valores propostas pelo trabalho original são mantidas, uma vez que representam a contribuição dos autores sobre os fenômenos atuantes no processo de deterioração da estrutura.

#### 2.6.2.6 Parâmetros parametrizados

Figura 21 – Parametrização dos fatores da metodologia GDE-UnB

<b>Estruturas de Concreto Armado</b>	
<b>ESCALA - Fator de ponderação</b>	
<b>Tipo de degradação</b>	<b>F<sub>p</sub></b>
Contaminação por cloretos	1
Corrosão de armaduras	1
Fissuras estruturais	1
Sinais de esmagamento	1
Esfoliação	0,8
Carbonatação	0,7
Desagregação	0,7
Desvio de geometria	0,6
Infiltração	0,6
Eflorescência	0,5
Manchas	0,5
Segregação	0,5

<b>Estruturas de Concreto Armado</b>	
<b>ESCALA - Fator de relevância estrutural</b>	
<b>Tipo de família</b>	<b>F<sub>R</sub></b>
Família 1	0,05
Família 2	0,125
Família 3	0,34
...	...
Família N	0,222

$$\sum F_{Ri} = 1$$
  

<b>Estruturas de Concreto Armado</b>	
<b>ESCALA - Fator de intensidade</b>	
<b>Gravidade</b>	<b>F<sub>I</sub></b>
Sem lesões	0
Lesões leves	0.25
Lesões toleráveis	0.50
Lesões graves	0.75
Lesões intoleráveis	1.0

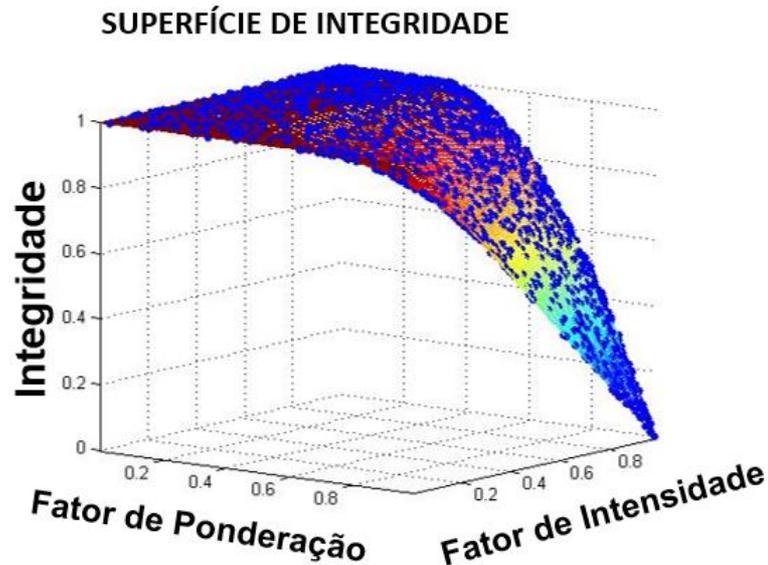
Fonte: Pantoja, J. C

É também necessária uma substituição do modelo de Tuutti por um modelo de integridade cúbico, conforme Figura 22, para possibilitar o acoplamento da metodologia, tanto aos valores dos índices de confiabilidade propostos para estruturas existentes como para a transformação dos fatores de dano em fatores de integração, via equação:

$$Integr = [1 - D(F_i, F_p)] \quad (20)$$

Essa transformação é necessária para que se possa utilizar o modelo como ponderador da resistência junto à matriz de rigidez de cada um dos elementos da grelha.

Figura 22 – Modelo de Integridade Cúbico de Heideck-Pantoja.



Fonte: Pantoja, J. C

Para a consideração dos fatores de integridade de cada elemento de uma mesma família, considera-se uma média direta de todos os danos presentes no elemento, diferentemente da versão original. Sendo assim, apenas valores de  $d(F_i, F_p)$  maiores que 0,2 serão contabilizados. Isso visa evitar o mascaramento de valores superiores na presença de outros menores. Para uma família de elementos, deve-se também determinar uma média dos valores. Na consideração dos valores de integridade da estrutura completa, deverão ser definidos pesos para cada família. No presente trabalho, para a família correspondente às barras de apoio (elementos 1, 4, 11 e 14), foi adotado um valor de 0,5, ficando as outras duas famílias (barras nos eixos Y e Z) com 0,25 cada. Uma boa opção, a ser utilizada conjuntamente com a parametrização, é a substituição do modelo bilinear por uma curva cúbica, conforme Tuutti.

### 2.6.2.7 Avaliação do nível de segurança via confiabilidade

O acoplamento do nível de segurança da estrutura é feito de forma simplificada, adotando-se a hipótese de que a variação do índice de fiabilidade de elementos, famílias e estrutura segue a mesma lei de comportamento que o fator de integridade. Isso possibilita representar o índice de fiabilidade de cada elemento, através da equação:

$$\beta \approx \text{Integridade}(F_i, F_p) \cdot \varphi \quad (21)$$

Duas coisas devem ser esclarecidas: os valores mínimo e máximo da variável  $\varphi$ , que representa o nível de fiabilidade do elemento, seguem os valores previstos para estruturas existentes, descritos na Tabela 8.

$$P(F/I) = P(F \cap I) / P(I) \quad (22)$$

No presente trabalho, os valores serão 0 e 4, respectivamente. O agrupamento do índice de fiabilidade de cada família, para obtenção do índice de fiabilidade estrutural, segue a regra de probabilidade condicionada, conforme indicado na Tabela 6, através da equação (22).

Tabela 8 – Índice de Fiabilidade de referencia (Fib Bulletin 62 – volume 5)

Classe de consequência	Período Mínimo de referência para estruturas existentes	$\beta$ Nova		$\beta$ Reparada		$\beta$ Existente	
		WN	WD	WN	WD	WN	WD
CCO	1 ano	3.3	2.3	2.8	1.8	1.8	0.8
CC1 - Baixa	15 anos	3.3	2.3	2.8	1.8	1.8	1.1
CC2 - Média	15 anos	3.8	2.8	3.3	2.5	2.5	2.5
CC3 - Alta	15 anos	4.3	3.3	3.8	3.3	2.5	3.3

Classes de 0 a 1 (CCO e CC1) - aplicadas apenas em situações onde não houver dano humano envolvido

WN - Forças devido ao vento não são dominantes

WD - Forças devido ao vento são dominantes

Fonte: Pantoja, J. C

### 3 METODOLOGIA PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA

Primeiramente devemos escolher o objeto de estudo, após essa escolha deve-se fazer o levantamento da edificação ou análise dos projetos.

Com os dados obtidos recomenda-se a modelagem da edificação utilizando um programa de sua escolha, no caso foi utilizado o TQS V. 22.5 Além disso, foi utilizada a norma que se encontrava em vigor na época da elaboração do projeto estrutural do edifício. Todas as cargas foram adotadas conforme indicado nas normas e, portanto, foram consideradas cargas de dormitórios/sala/cozinha: 0,10 tf/m<sup>2</sup>, para cargas permanentes, e 0.15 tf/m<sup>2</sup> para cargas acidentais, vide Figura 23.

Figura 23 – Cargas adotadas para a parte interna da estrutura.

Fonte: Autor

Para as varandas em balanço, foram adotados os carregamentos de 0.25 tf/m<sup>2</sup>. para cargas permanentes, e de 0.15 tf/m<sup>2</sup> para cargas acidentais, conforme Figura 24.

Figura 24 – Carga adotadas para as lajes em balanço das varandas.

Definição de carregamentos

Caso/Carga  
0.25/0.15

Numéricas | Alfanuméricas

Carga distribuída por área

Carga principal ou permanente 0.25 tf/m<sup>2</sup>

Carga acidental 0.15 tf/m<sup>2</sup>

Inserir Apagar Caso 0001 - TODAS - Todas permanentes e acidentais dos pavimentos

Entre com o valor total da carga, ou a componente permanente, caso haja separação de cargas acidentais e permanentes definida no edifício.

OK Cancelar

Fonte: Autor

O Quadro 8 mostra as características e propriedades necessárias para o cálculo do índice de desempenho sísmico ( $I_s$ ). É importante lembrar que, devido à consideração dos pilares de concreto como os únicos elementos verticais no método adaptado, a verificação do índice de desempenho sísmico ( $I_s$ ) é realizada em uma única direção, uma vez que o somatório de suas seções transversais independe da direção analisada.

Quadro 6 – Modelo de Tabela para o índice de desempenho sísmico.

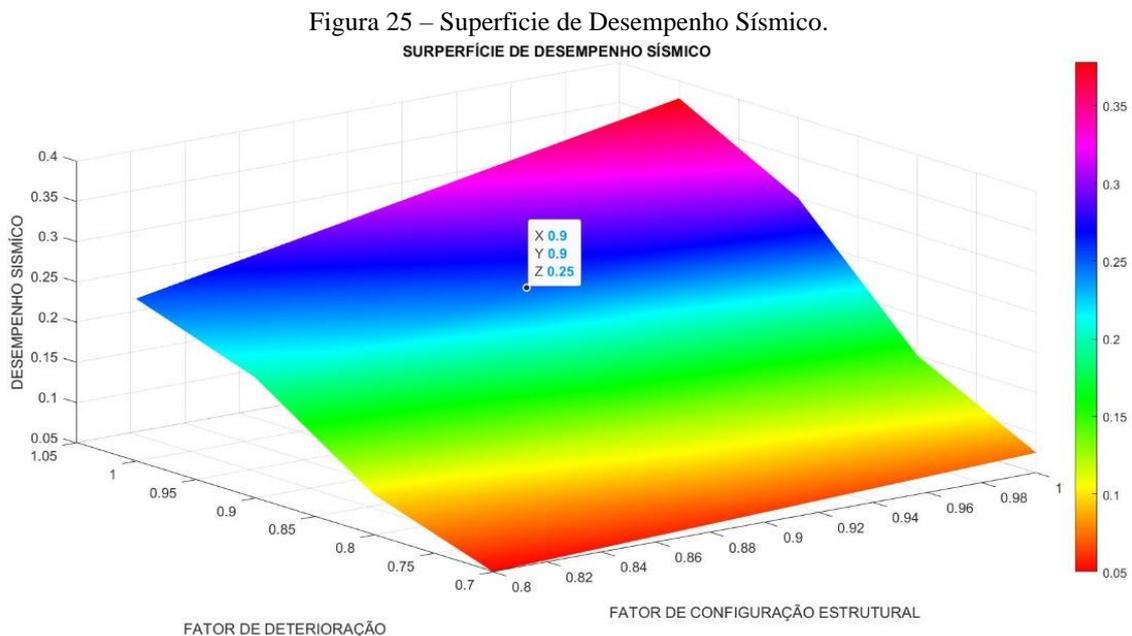
	Pavimento 1	Pavimento 2	Pavimento 3	Pavimento 4	Pavimento 5	Pavimento 6
Nível da Laje						
Peso Total (W) em kgf						
Área do pavimento em m <sup>2</sup>						
Soma das seções dos Pilares (Ac2) em cm <sup>2</sup>						
Período da estrutura (T <sub>a</sub> ) em segundos						
Sub-índice de desempenho sísmico Básico estrutural (E0)						
Sub-índice de configuração estrutural (Sd)						
sub-índice de deterioração estrutura (Td)						
índice de desempenho sísmico (I <sub>s</sub> )						

Fonte: Autor

O índice de desempenho sísmico ( $I_s$ ) mede a resistência estrutural da edificação considerando seu nível de deterioração (Td) e sua tipologia estrutural (Sd). O valor mínimo do índice de desempenho sísmico acontece quando há o máximo de deterioração

estrutural (quando o valor do subíndice de deterioração estrutural se encontra no valor de 0,7) e com sua configuração estrutural mínima (quando o valor do subíndice de configuração estrutural tiver o valor de 1).

A Figura 30 mostra o comportamento da superfície de acordo com os possíveis valores sismo resistentes (índice de desempenho sismo) levando em consideração a variação dos elementos envolvidos. A superfície obtida foi denominada superfície de desempenho sísmico.

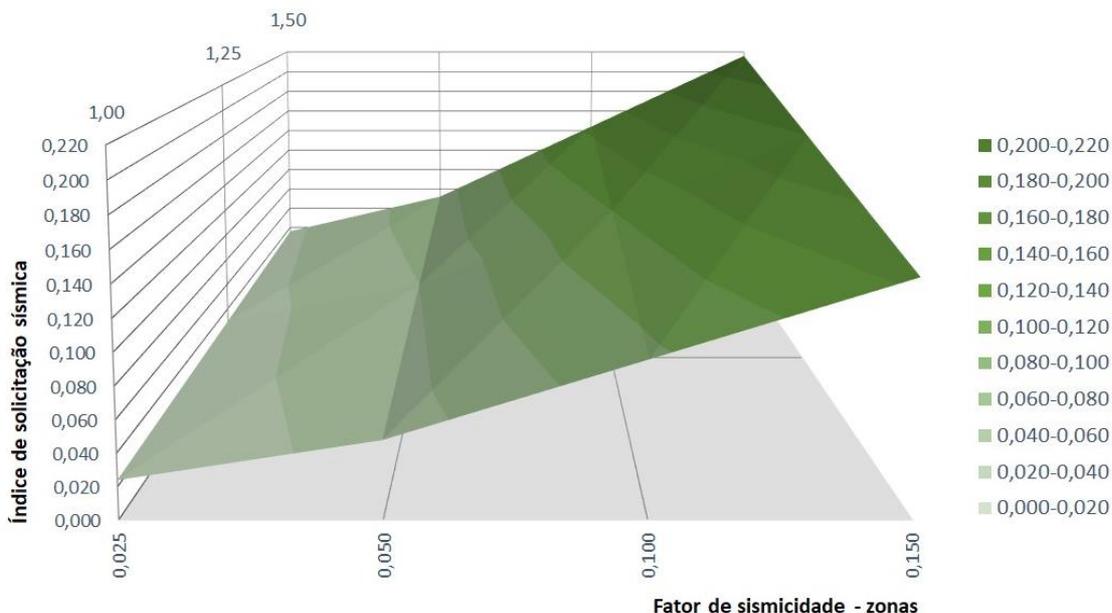


Fonte: Autor

São calculados os índices de solicitação sísmica ( $I_s0$ ), supondo que a estrutura está localizada em qualquer uma das zonas sísmicas do território nacional e assentada sobre qualquer um dos terrenos classificados na NBR 15421 (ABNT, 2006). Os valores dos subíndices  $Z$  e  $G$  são obtidos a partir da Tabela 4 e da Tabela 5, respectivamente.

Após essa análise foram realizados os cálculos, através dos valores obtidos criou-se a superfície de solicitação sísmica ( $I_s0$ ).

Figura 26 – Superfície de solicitação sísmica.



Fonte: Autor

As comparações entre o índice de desempenho sísmico ( $I_s$ ) da estrutura e os índices de solicitação sísmica ( $I_s0$ ), para as combinações de zonas sísmicas e classes de terreno do território nacional, permitem definir quais estruturas são consideradas vulneráveis, segundo o primeiro nível de avaliação do método de Hirosawa, adaptado por Miranda. Os valores em vermelho representam as situações em que o índice de solicitação sísmica ( $I_s0$ ) é maior do que o índice de desempenho sísmico ( $I_s$ ).

Com os dados obtidos do índice de desempenho sísmico, são calculadas as reservas de capacidade resistente ( $R_{cr}$ ). As situações em que se apresentam reservas de capacidade resistente menor ou igual a zero, apresentadas em vermelho, também indicam a vulnerabilidade da estrutura.

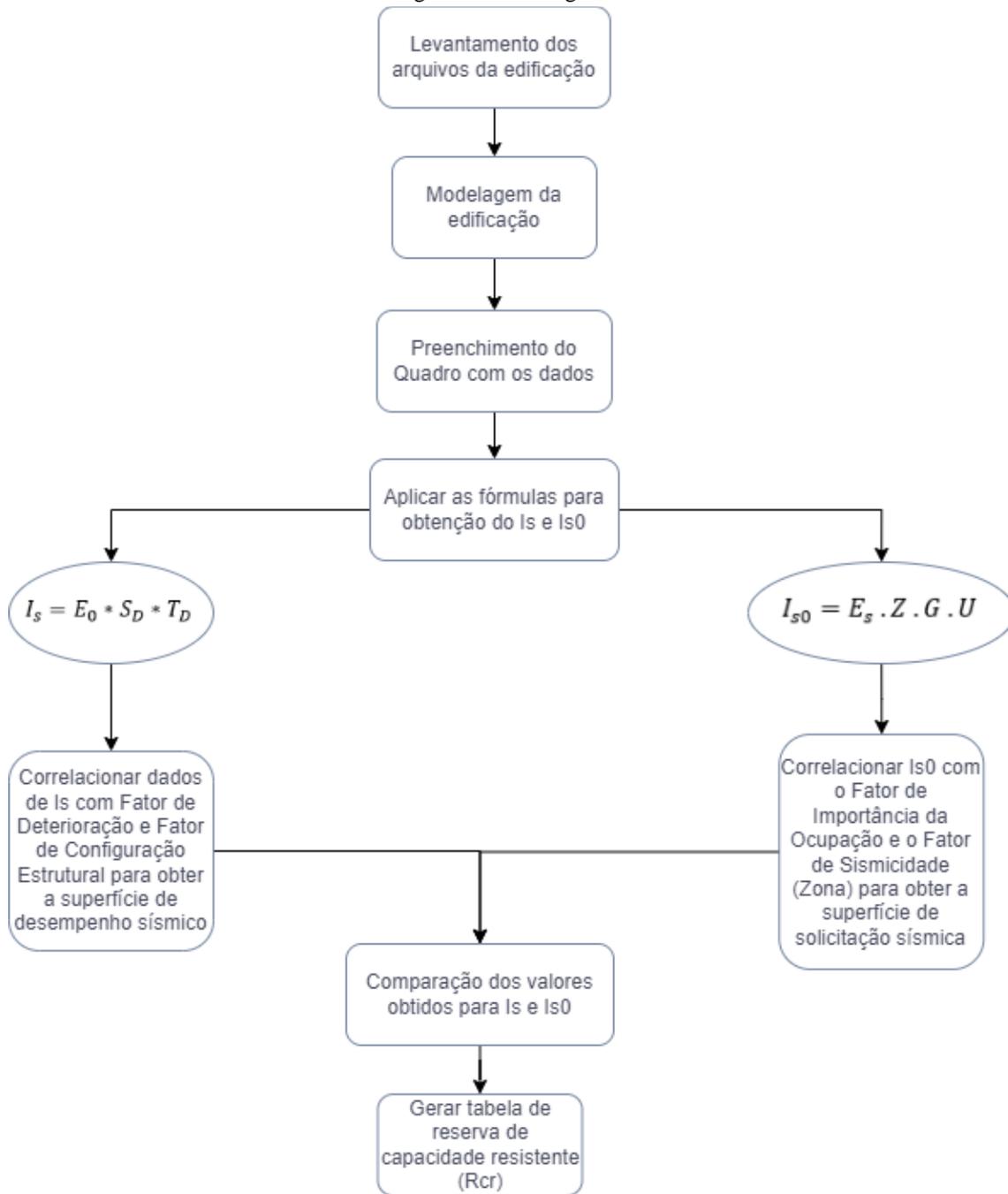
Quadro 7 – Reserva de capacidade resistente ( $R_{cr}$ ) da SQS 112 Bloco H.

Zona sísmica	Classe do Terreno ( $R_{cr}$ )				
	A	B	C	D	E
0	87%	84%	80%	74%	59%
1	74%	67%	61%	48%	18%
2	48%	35%	21%	-5%	-64%
3 e 4	21%	2%	-18%	-47%	-106%

Fonte: Autor

Como pode ser visto no fluxograma a ordem que deve ser feita a análise para vulnerabilidade sísmica.

Figura 27 – Fluxograma.



Fonte: Autor

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

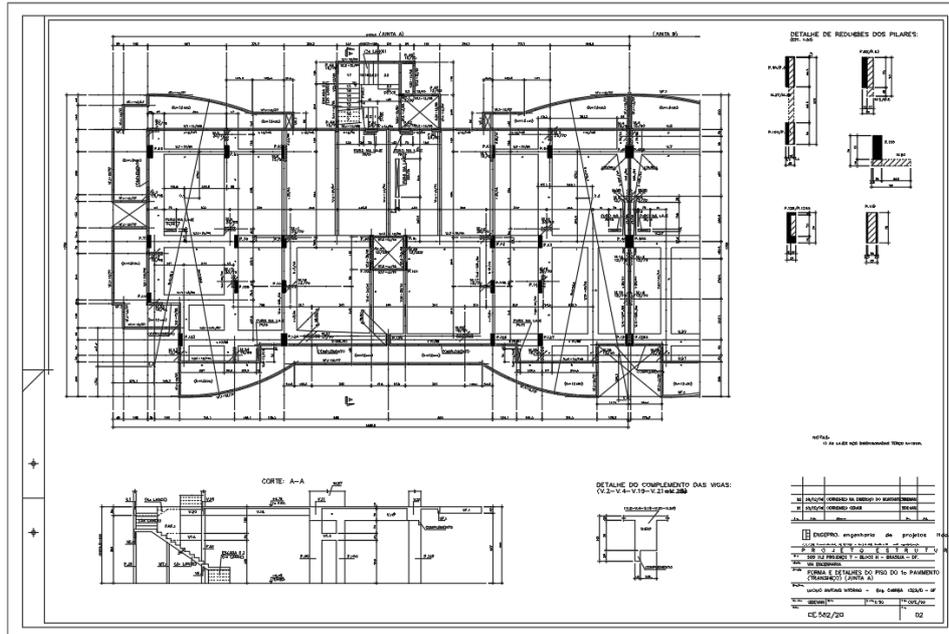
Foram selecionados dois edifícios residenciais localizados na região do Plano Piloto de Brasília, sendo uma localizada na região da Asa Sul e a outra na Asa Norte, pertencentes a quadras diferentes, compostos por sete pavimentos em concreto armado, dentre eles: térreo (sustentados por pilotis), cinco pavimentos tipo e cobertura privativa.

#### 4.1 CASO DE ESTUDO 1 - SQS 112 Bloco H

A estrutura em questão possui uma área total de 2.561,3m<sup>2</sup>, distribuída em seus respectivos pavimentos, tendo o térreo 460,14m<sup>2</sup> e os pavimentos tipo 420,23m<sup>2</sup>.

Foram fornecidas as plantas referentes ao projeto estrutural do edifício, e todo o material foi analisado e utilizado também para uma nova modelagem estrutural do edifício.

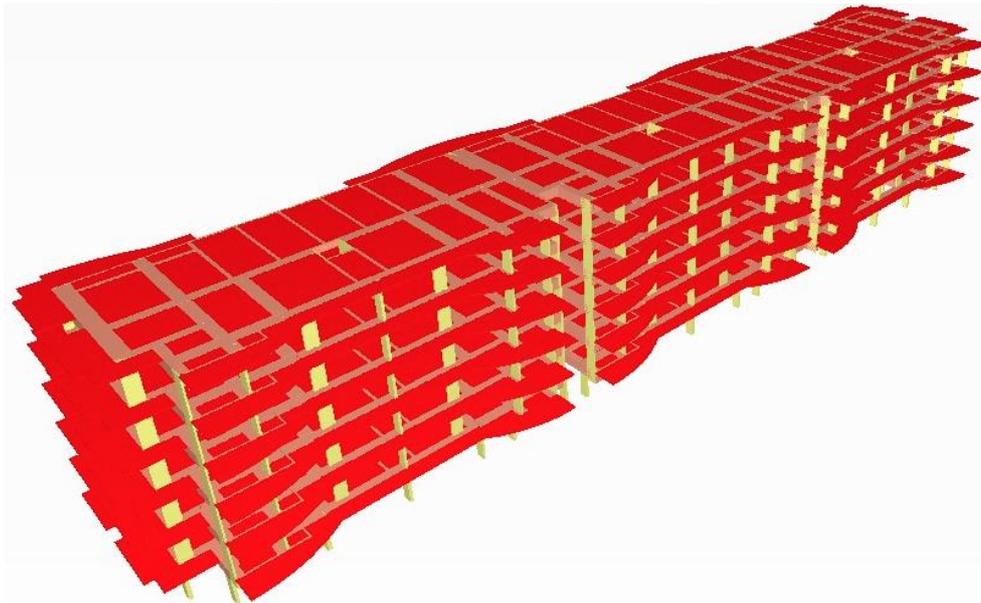
Figura 28 – Planta de forma e detalhes do piso do 1º pavimento – projeto original.



Fonte: SQS 112 Bloco H

Após finalizar a inserção de dados de todos os elementos estruturais, tem-se o modelo 3D do edifício, conforme Figura 29.

Figura 29 – Vista do modelo 3D da edificação.



Fonte: Autor

O Quadro 8 mostra as características e propriedades da edificação em questão para o cálculo do índice de desempenho sísmico ( $I_s$ ).

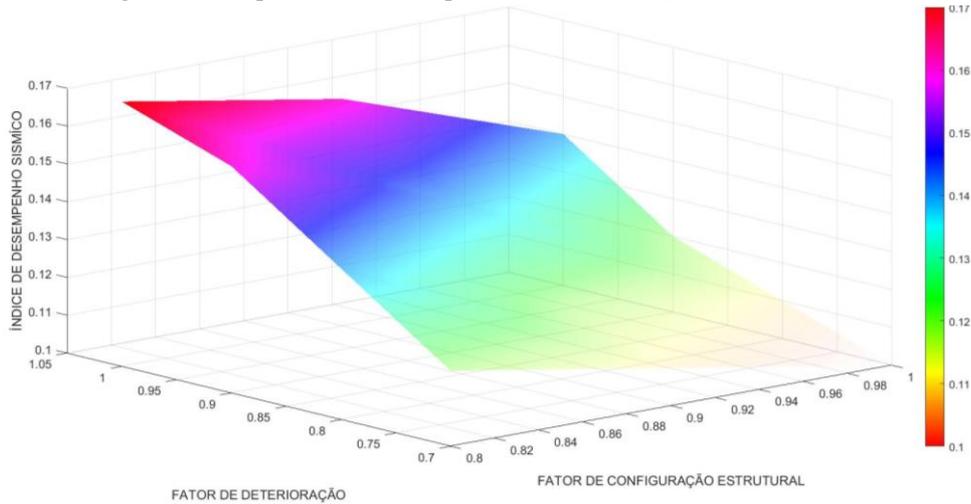
Quadro 8 – Índice de desempenho sísmico da SQS 112 bloco H

	Pavimento 1	Pavimento 2	Pavimento 3	Pavimento 4	Pavimento 5	Pavimento 6
Nível da Laje	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90
Peso Total (W) em kgf	2.820.452,72	2.783.056,00	2.218.969,44	1.654.882,88	1.090.796,40	526.709,84
Área do pavimento em m <sup>2</sup>	460,14	460,14	460,14	460,14	460,14	460,14
Soma das seções dos Pilares (Ac2) em cm <sup>2</sup>	49.600,00	49.600,00	49.600,00	49.600,00	49.600,00	49.600,00
Período da estrutura (Ta) em segundos	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Sub-índice de desempenho sísmico Básico estrutural (E0)	0,17	0,15	0,17	0,21	0,28	0,54
Sub-índice de configuração estrutural (Sd)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
sub-índice de deterioração estrutura (Td)	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
índice de desempenho sísmico ( $I_s$ )	0,14	0,12	0,14	0,16	0,23	0,43

Fonte: Autor

A Figura 30 mostra a superfície de desempenho sísmico com seus possíveis valores de sismo resistentes (índice de desempenho sismo).

Figura 30 – Superfície de desempenho sísmico da SQS 112 bloco H



Fonte: Autor

São calculados e expostos, no Quadro 9, os índices de solicitação sísmica ( $I_s0$ ), supondo que a estrutura está localizada em qualquer uma das zonas sísmicas do território nacional e assentada sobre qualquer um dos terrenos classificados na NBR 15421 (ABNT, 2006). Os valores dos subíndices  $Z$  e  $G$  são obtidos a partir da Tabela 4 e da Tabela 5, respectivamente.

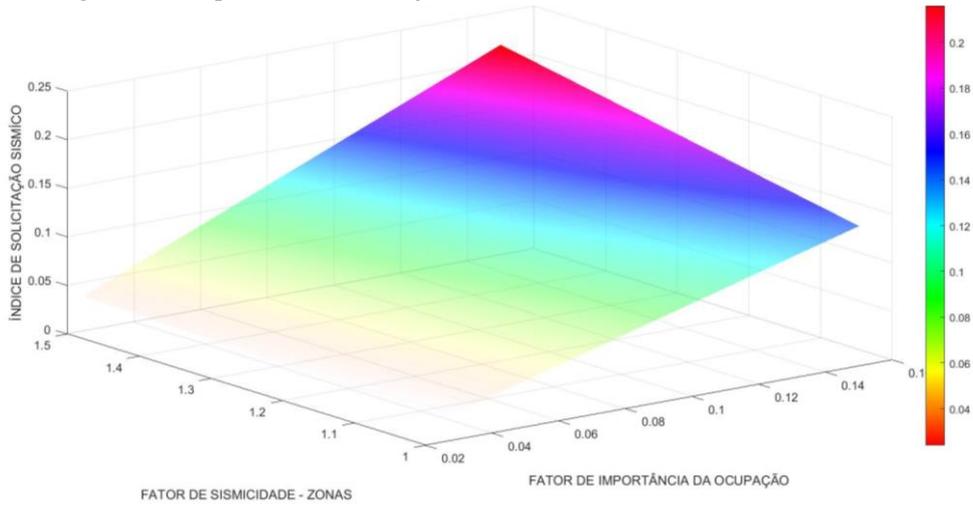
Quadro 9 – Índice de solicitação sísmica ( $I_s0$ ) da SQS 112 Bloco H.

Segundo andar					
Zona sísmica	Classe do Terreno ( $I_s0$ )				
	A	B	C	D	E
0	0,016	0,02	0,024	0,032	0,05
1	0,032	0,04	0,048	0,064	0,1
2	0,064	0,08	0,096	0,128	0,2
3 e 4	0,096	0,12	0,144	0,18	0,252

Fonte: Autor

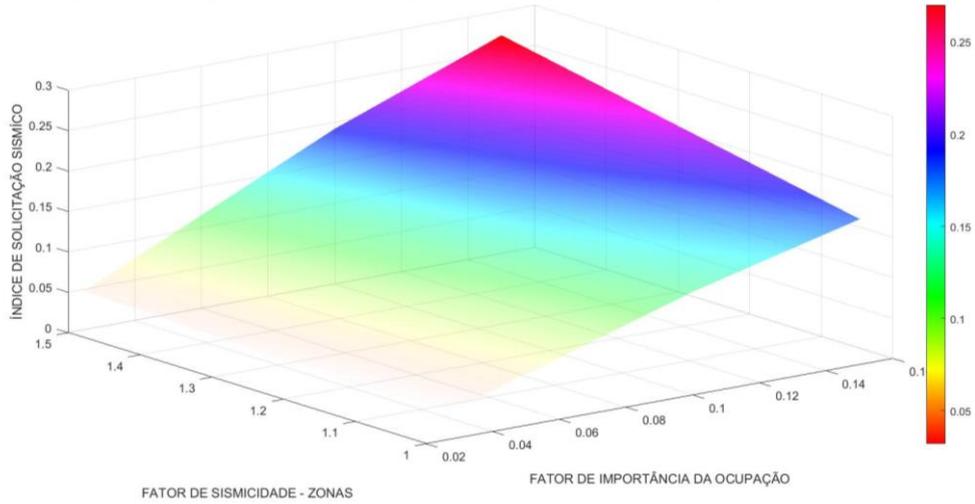
Após essa análise foram realizados os cálculos, através dos valores obtidos criou-se a superfície de solicitação sísmica ( $I_s0$ ) de cada classe do terreno, foram geradas as superfícies de solicitação sísmica para as classes de terreno C, D e E, conforme observado nas imagens a seguir respectivamente:

Figura 31 – Superfície de solicitação sísmica – classe C da SQS 112 bloco H



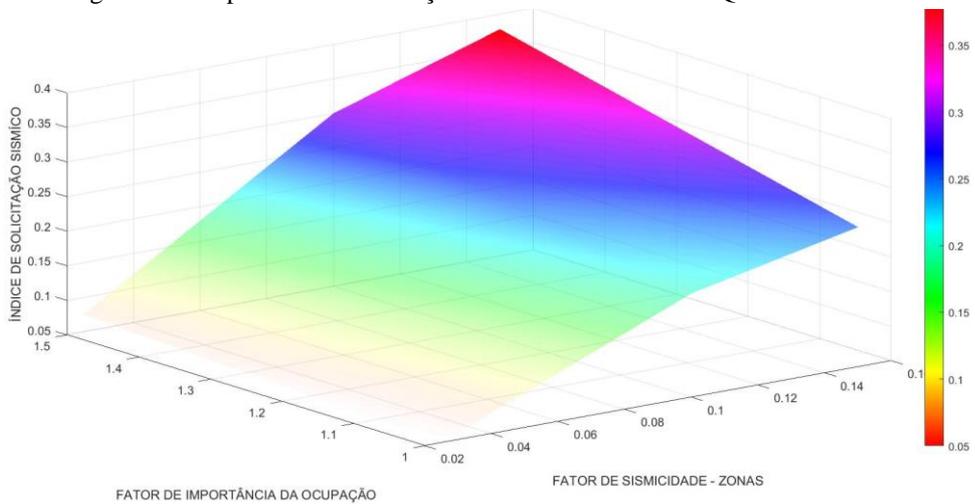
Fonte: Autor

Figura 32 – Superfície de solicitação sísmica – classe D da SQS 112 bloco H



Fonte: Autor

Figura 33 – Superfície de solicitação sísmica – classe E da SQS 112 bloco H



Fonte: Autor

Com os dados obtidos no Quadro 9, são calculadas as reservas de capacidade resistente ( $R_{cr}$ ). As situações em que se apresentam reservas de capacidade resistente menor ou igual a zero, apresentadas em vermelho, também indicam a vulnerabilidade da estrutura.

Quadro 10 – Reserva de capacidade resistente ( $R_{cr}$ ) da SQS 112 Bloco H.

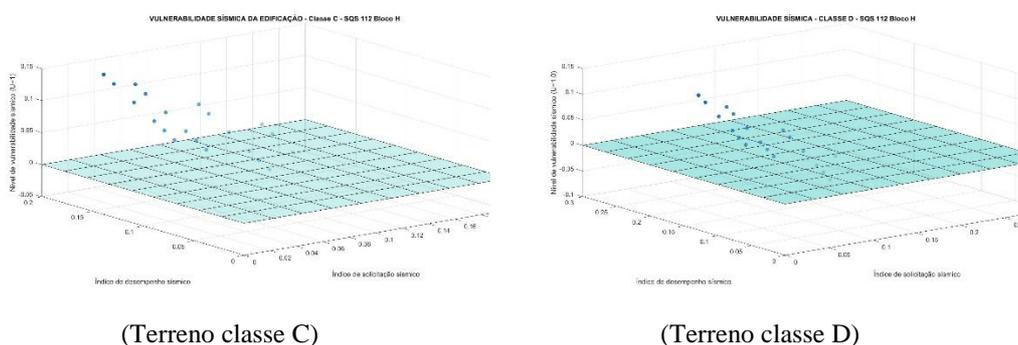
Zona sísmica	Classe do Terreno ( $R_{cr}$ )				
	A	B	C	D	E
0	87%	84%	80%	74%	59%
1	74%	67%	61%	48%	18%
2	48%	35%	21%	-5%	-64%
3 e 4	21%	2%	-18%	-47%	-106%

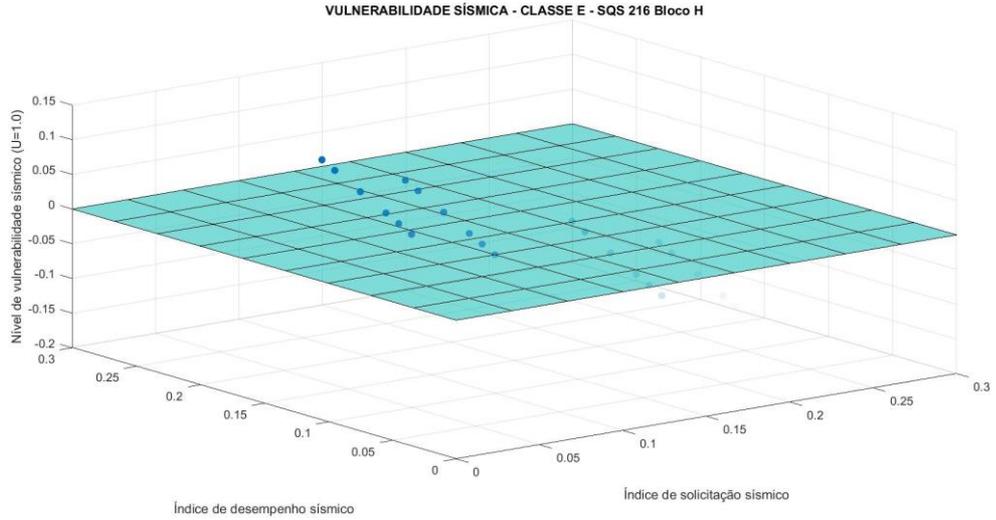
Fonte: Autor

Foram realizadas simulações computacionais levando em consideração os três possíveis valores para o fator de importância ( $U$ ): 1.00, 1.25 e 1.50. A partir destas simulações obteve-se três superfícies para cada classe de terreno da região avaliada (terrenos classe C, D e E) como mostrado nas figuras a seguir, onde é possível observar a modificação na superfície de solicitação sísmica em relação ao terreno e ao fator de importância.

Inicialmente, foi utilizado o fator de importância ( $U$ ) com o valor de 1.00, variando somente as classes do terreno para obter o valor de  $I_{s0}$  (índice de solicitação sísmica). Com base nos valores obtidos, gerou-se as superfícies abaixo:

Figura 34 – Vulnerabilidade Sísmica da edificação – Fator de Importância ( $U = 1.00$ ).



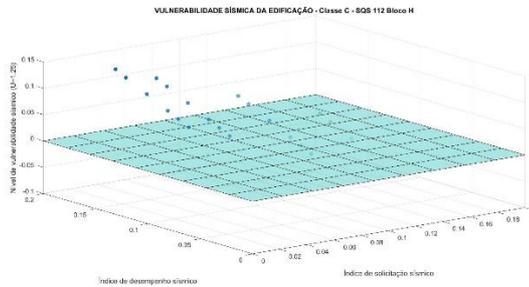


(Terreno classe E)

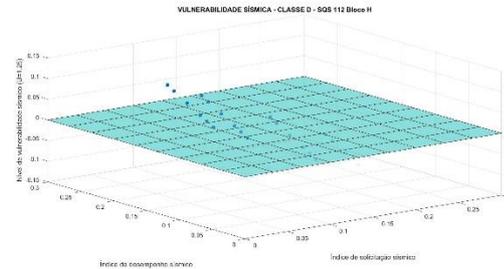
Fonte: Autor

Posteriormente, foi utilizado o fator de importância (U) com o valor de 1.25 para elaboração dos cálculos, variando as classes do terreno conforme informado anteriormente para a obtenção de  $I_{s0}$  (índice de solicitação sísmica). Desta forma, foram geradas as seguintes superfícies:

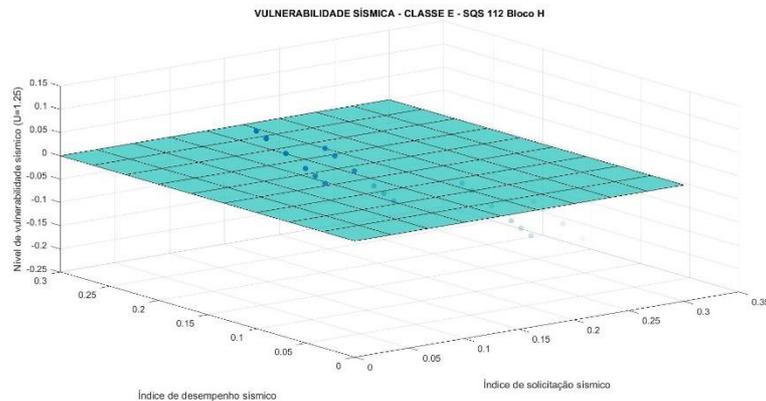
Figura 35 – Vulnerabilidade Sísmica da edificação – Fator de Importância (U = 1.25).



(Terreno classe C)



(Terreno classe D)

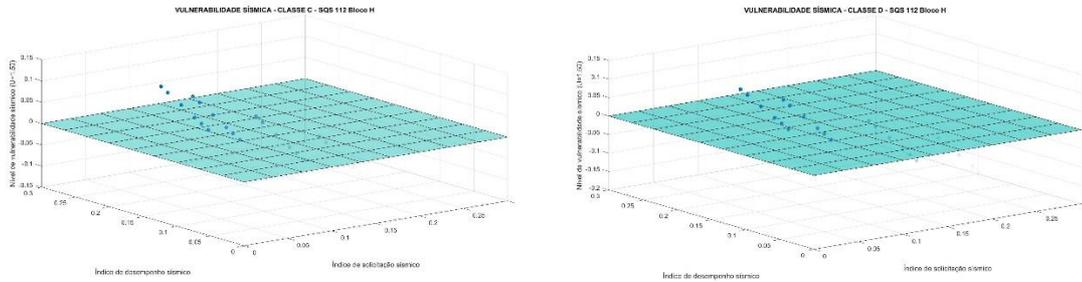


(Terreno classe E)

Fonte: Autor

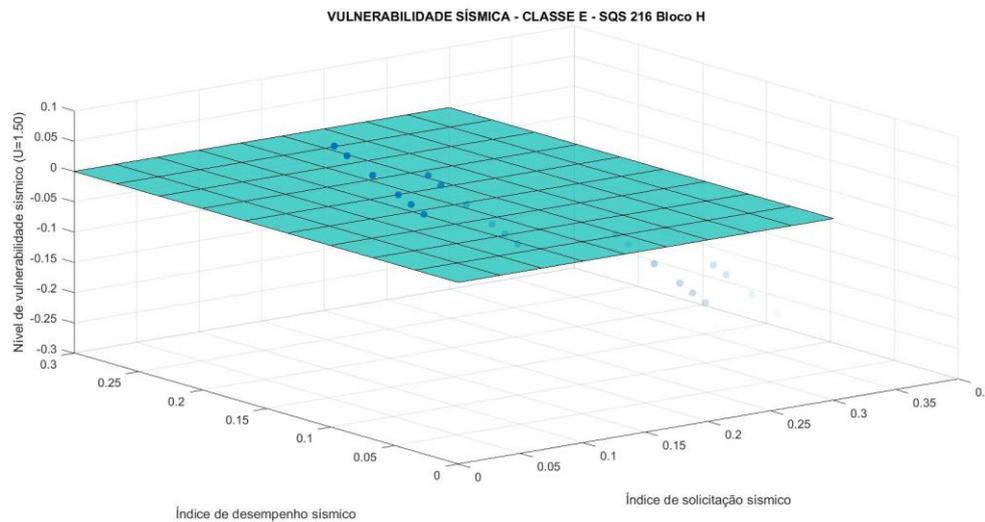
Para finalizarmos as comparações, foi utilizado o fator de importância (U) com o valor de 1.50, variando as classes do terreno para obter o valor de  $I_s$  (índice de solicitação sísmica), gerando assim as superfícies abaixo:

Figura 36 – Vulnerabilidade Sísmica da edificação – Fator de Importância (U = 1.50).



(Terreno classe C)

(Terreno classe D)

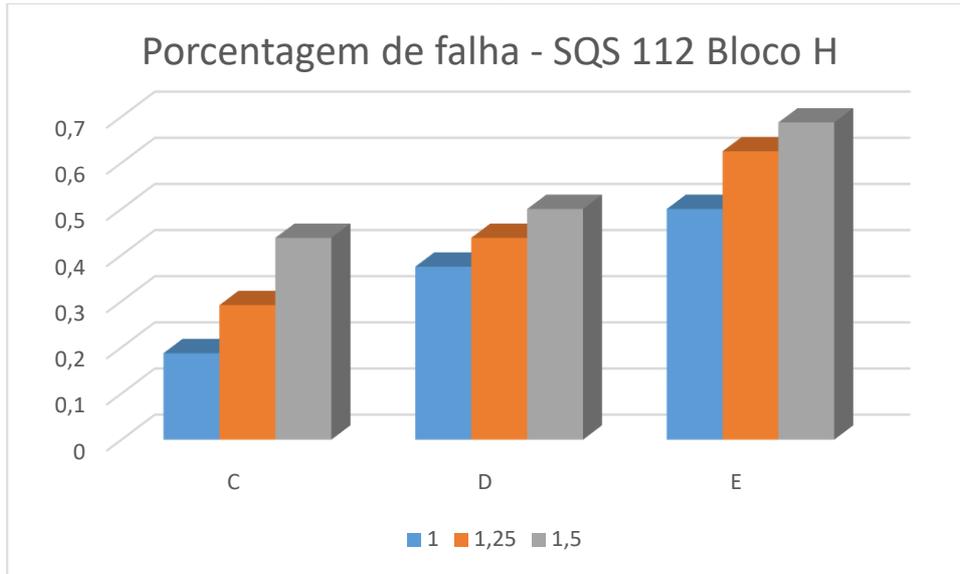


(Terreno classe E)

Fonte: Autor

Com os resultados obtidos, torna-se possível a comparação da porcentagem de falha entre os diferentes tipos de terreno, assim como o fator de importância onde tem-se a classificação como 1.00, 1.25 e 1.50, respectivamente.

Figura 37 – Gráfico de porcentagem de falha.



É possível notar que a piora do terreno e respectivo aumento na importância de edificação levam a um aumento na vulnerabilidade sísmica da edificação.

Com a finalidade de análise comparativa, foram realizadas simulações para verificação do comportamento de cada pavimento da edificação objeto de estudo. Para isto, foram simuladas situações hipotéticas em que a edificação se encontrasse inserida nas diferentes classes de terreno, desta mesma forma, foram realizadas simulações para as diferentes zonas sísmicas, conforme exposto a seguir:

Figura 38 – Gráfico comparativo em zona sísmica.

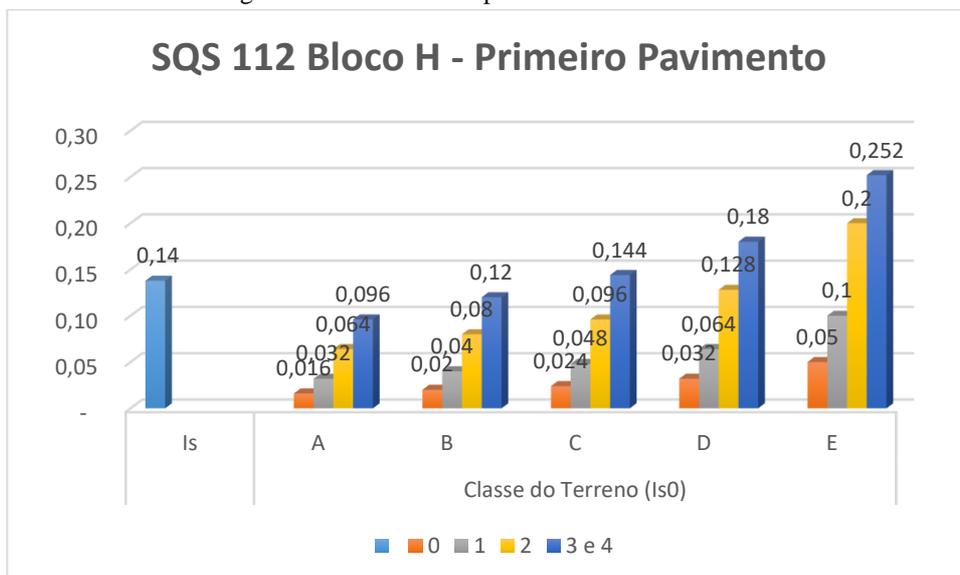
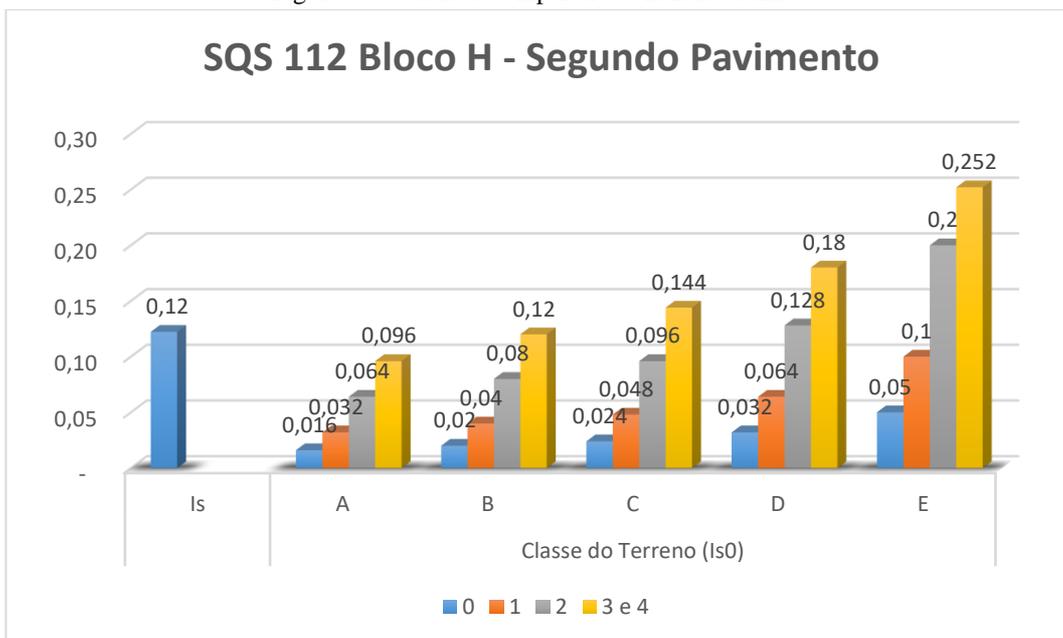
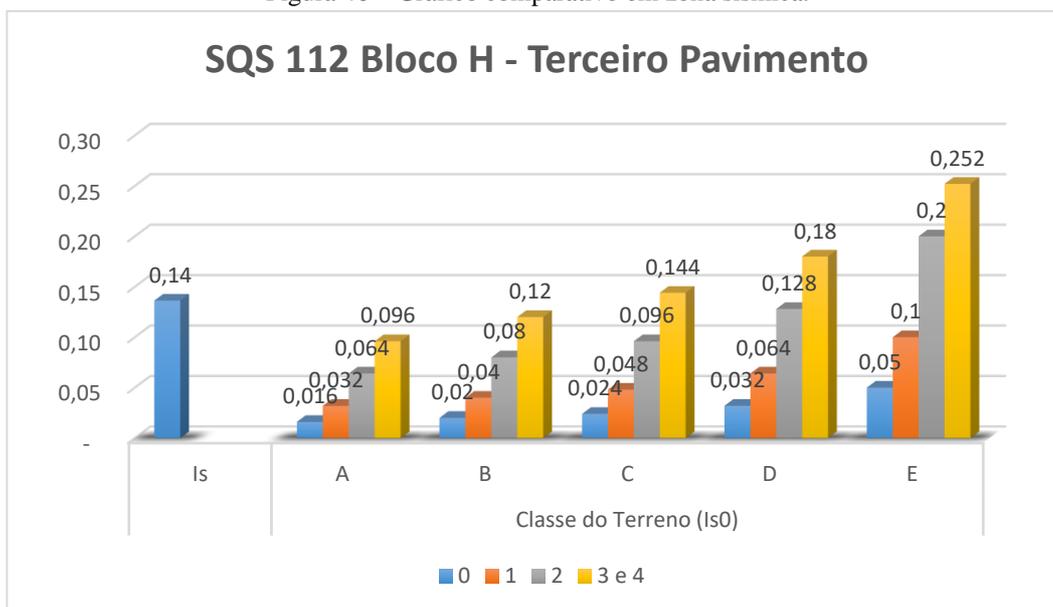


Figura 39 – Gráfico comparativo em zona sísmica.



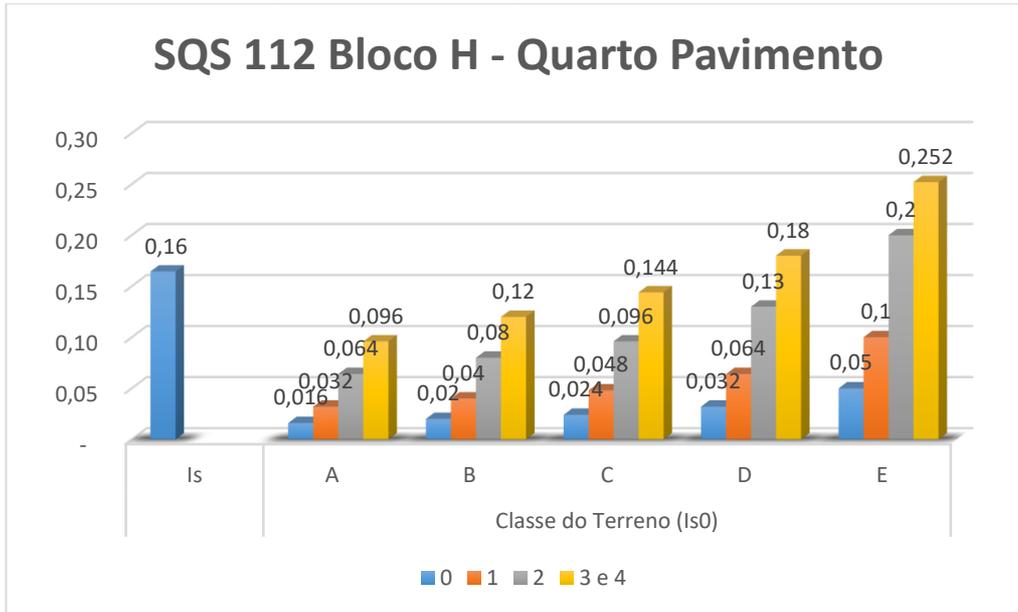
Fonte: Autor

Figura 40 – Gráfico comparativo em zona sísmica.



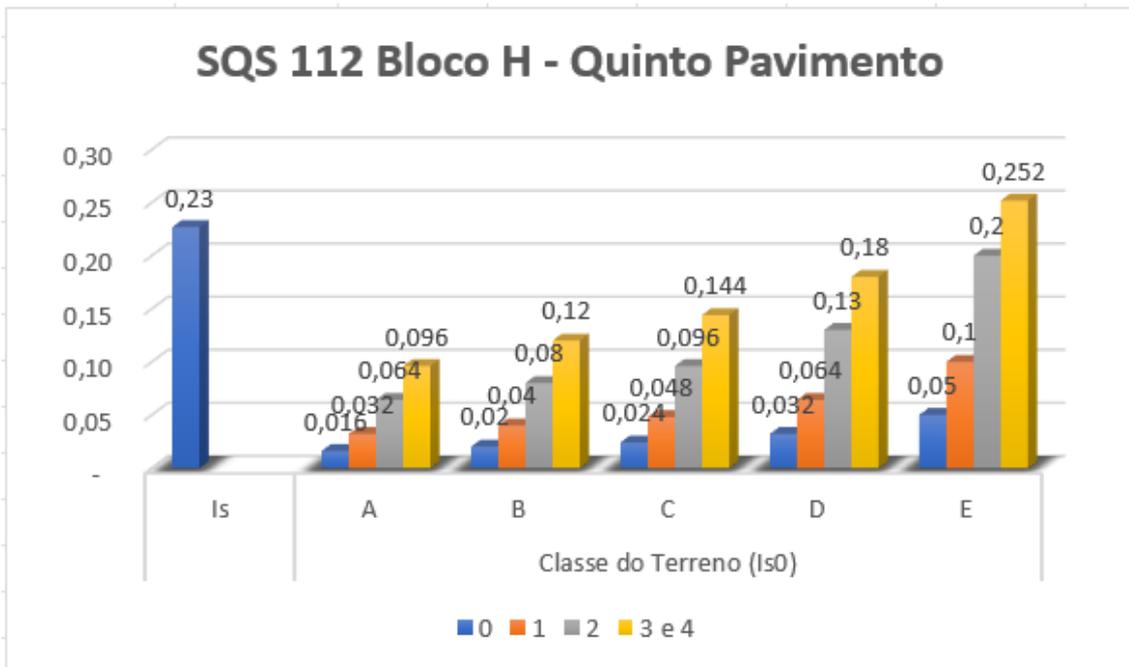
Fonte: Autor

Figura 41 – Gráfico comparativo em zona sísmica.



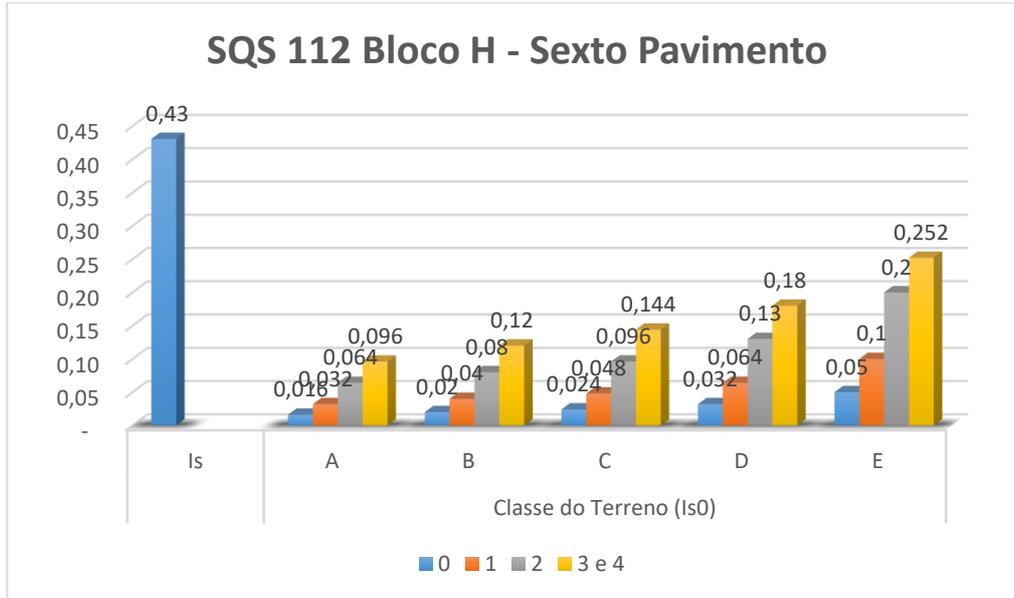
Fonte: Autor

Figura 42 – Gráfico comparativo em zona sísmica.



Fonte: Autor

Figura 43 – Gráfico comparativo em zona sísmica.



Fonte: Autor

Os pilares foram avaliados um a um, entretanto, com a finalidade de simplificar o cálculo, foi adotado um mesmo nível de degradação para todos os pilares. O conjunto de pilares teve sua integridade calculada através do método GDE parametrizado. Foi desenvolvida uma fórmula para obtenção de um subíndice de deterioração estrutural ( $Td$ ), conforme demonstrado abaixo:

$$Integr = [1 - GDEp] \quad (23)$$

$$Td = 0,7 + (0,3 * [1 - GDEp]) \quad (24)$$

Onde o valor para o GDE parametrizado é obtido conforme observado a seguir:

Figura 44 – Cálculo do GDE parametrizado.

	Nome do Elemento	PILAR 1 - Lado Oeste A				Descrição dos Danos
	Localização	SQS 112 Bloco H				Eflorescência
1	Danos	Fp	Fi	D	GDE	Figuras 
	Carbonatação	0,7	0	0	0,225	
	Cobrimento deficiente	0,6	0	0		
	Contaminação por cloretos	1	0	0		
	Corrosão de armaduras	0,7	0	0		
	Desagregação	0,7	0	0		
	Eflorescência	0,5	0,75	0,22		
	Dmáx	0,22	Soma	0,23		

Fonte: Autor

Com a obtenção do valor do subíndice de deterioração estrutural, foram então recalculadas as estruturas levando em consideração este novo valor para  $Td$ .

No caso de estudo 1, observou-se que a estrutura teve um dano calculado de 22,5% através do método GDE parametrizado. Ao aplicar a nova formulação para o  $Td$ , foi obtido o valor de 0,9325. Com o valor encontrado e as demais informações referentes ao

caso em questão, obtém-se o resultado do índice de solicitação sísmica, conforme exposto a seguir:

Figura 45 – Índice de solicitação sísmica.

Z	U	Td	G	Is0	Is
Zona 0	1,5	<b>0,9325</b>	2,5	<b>0,075</b>	<b>0,16</b>

Fonte: Autor

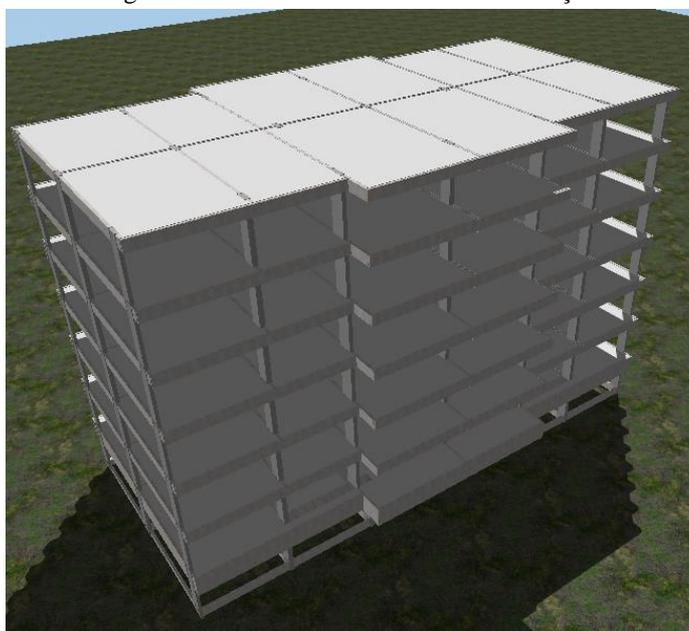
#### 4.2 CASO DE ESTUDO 2 - SQN 216 Bloco H

Na edificação caso de estudo 2, a estrutura da edificação possui uma área total de 2.521,39m<sup>2</sup>, distribuída entre seus pavimentos – o térreo tem 420,23m<sup>2</sup> e os pavimentos tipo têm 420,23m<sup>2</sup>.

Assim como na edificação caso de estudo 1, foram fornecidas as pranchas do projeto estrutural do edifício.

Após finalizar a inserção de dados de todos os elementos estruturais, tem-se o modelo 3D do edifício, conforme Figura 46.

Figura 46 – Vista do modelo 3D da edificação.



Fonte: Autor

O Quadro 11 mostra as características e propriedades da edificação em questão para o cálculo do índice de desempenho sísmico (*Is*).

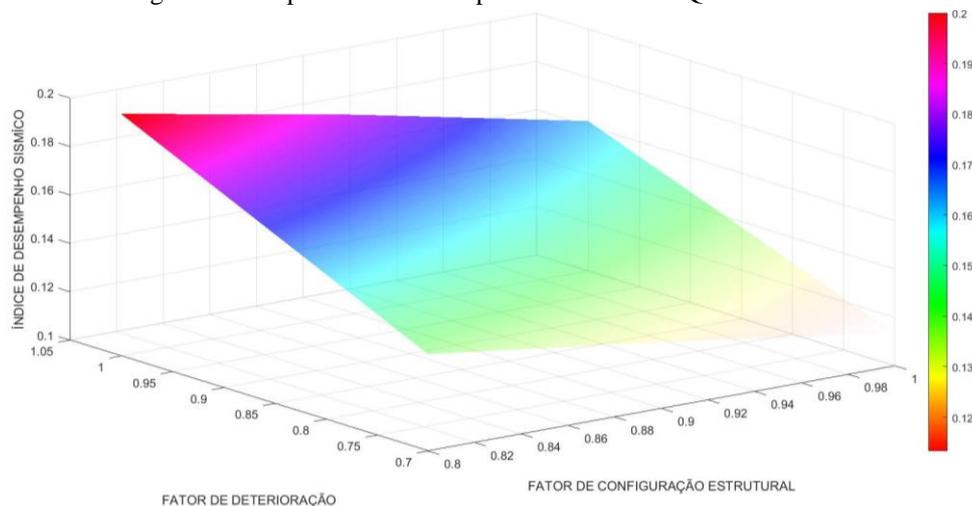
Quadro 11 – Índice de desempenho sísmico da SQN 216 bloco H.

	Pavimento 1	Pavimento 2	Pavimento 3	Pavimento 4	Pavimento 5	Pavimento 6
Nível da Laje	2,77	2,77	2,77	2,77	2,77	2,77
Peso Total (W) em kgf	2.179.087,52	2.159.189,60	1.783.951,28	1.482.553,52	1.181.155,76	880.816,72
Área do pavimento em m <sup>2</sup>	420,23	420,23	420,23	420,23	420,23	420,23
Soma das seções dos Pilares (Ac2) em cm <sup>2</sup>	28.800,00	28.800,00	28.800,00	28.800,00	28.800,00	28.800,00
Período da estrutura (Ta) em segundos	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Sub-índice de desempenho sísmico Básico estrutural (E0)	0,20	0,18	0,19	0,21	0,24	0,29
Sub-índice de configuração estrutural (Sd)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
sub-índice de deterioração estrutura (Td)	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
índice de desempenho sísmico (Is)	0,16	0,14	0,15	0,17	0,19	0,23

Fonte: Autor

A Figura 47 mostra a superfície de desempenho sísmico com seus possíveis valores de sismo resistentes (índice de desempenho sismo).

Figura 47 – Superfície de desempenho sísmico da SQN 216 bloco H



Fonte: Autor

São calculados e expostos, no Quadro 12, os índices de solicitação sísmica ( $I_s0$ ), supondo que a estrutura está localizada em qualquer uma das zonas sísmicas do território nacional e assentada sobre qualquer um dos terrenos classificados na NBR 15421 (ABNT, 2006). Os valores dos sub-índices  $Z$  e  $G$  são obtidos a partir da Tabela 4 e Tabela 5 respectivamente.

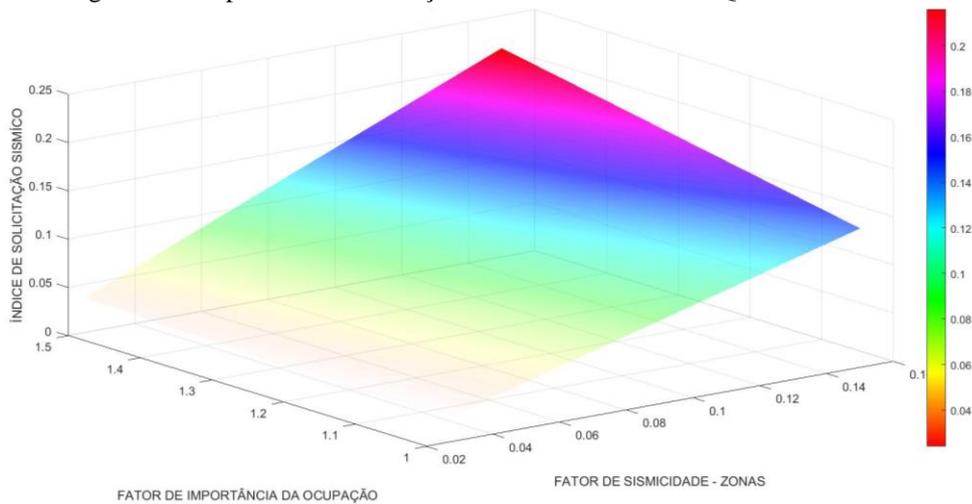
Quadro 12 - Índice de solicitação sísmica ( $I_s0$ ) da SQN 216 Bloco H.

Segundo andar					
Zona sísmica	Classe do Terreno ( $I_s0$ )				
	A	B	C	D	E
0	0,016	0,02	0,024	0,032	0,05
1	0,032	0,04	0,048	0,064	0,1
2	0,064	0,08	0,096	0,13	0,2
3 e 4	0,096	0,12	0,144	0,18	0,252

Fonte: Autor

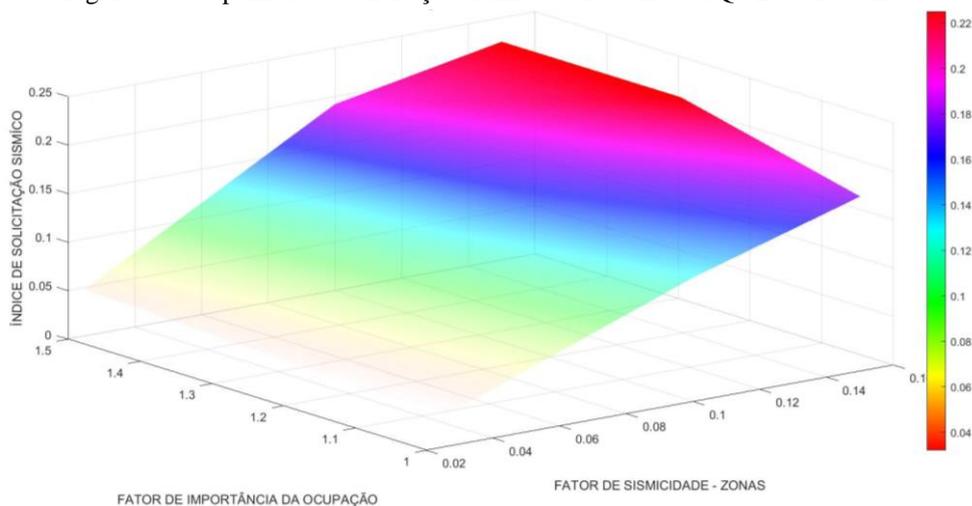
Após essa análise foram realizados os cálculos, através dos valores obtidos criou-se a superfície de solicitação sísmica ( $I_s0$ ) de cada classe do terreno, foi gerado as superfícies de solicitação sísmica para as classes de terreno C, D e E conforme observado nas imagens a seguir respectivamente:

Figura 48 – Superfície de solicitação sísmica – classe C da SQS 216 bloco H



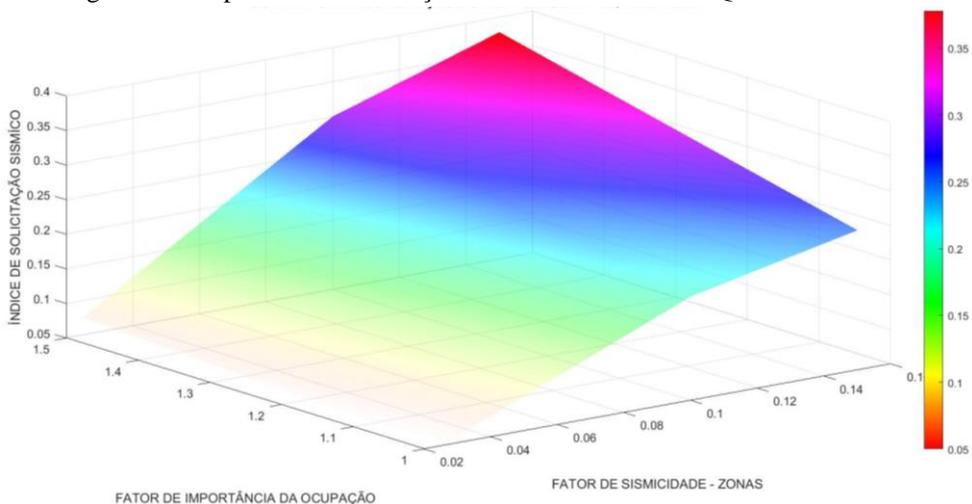
Fonte: Autor

Figura 49 – Superfície de solicitação sísmica – classe D da SQS 216 bloco H



Fonte: Autor

Figura 50 – Superfície de solicitação sísmica – classe E da SQS 216 bloco H



Fonte: Autor

As comparações entre o índice de desempenho sísmico ( $I_s$ ) da estrutura e os índices de solicitação sísmica ( $I_{s0}$ ), para as combinações de zonas sísmicas e classes de terreno do território nacional, permitem definir quais estruturas são consideradas vulneráveis, segundo o primeiro nível de avaliação do método de Hirosawa, adaptado por Miranda. Os valores em vermelho representam as situações em que o índice de solicitação sísmica ( $I_{s0}$ ) é maior do que o índice de desempenho sísmico ( $I_s$ ).

Com os dados obtidos no Quadro 13, são calculadas as reservas de capacidade resistente ( $R_{cr}$ ). As situações em que se apresentam reservas de capacidade resistente menor ou igual a zero, apresentadas em vermelho, também indicam a vulnerabilidade da estrutura.

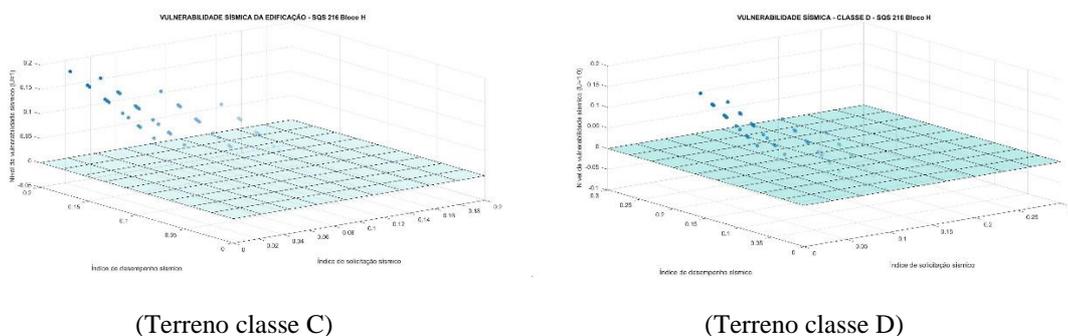
Quadro 13 – Reserva de capacidade resistente ( $R_{cr}$ ) da SQN 216 Bloco H.

Zona sísmica	Classe do Terreno ( $R_{cr}$ )				
	A	B	C	D	E
0	89%	86%	83%	78%	65%
1	78%	72%	66%	55%	30%
2	55%	44%	33%	9%	-40%
3 e 4	33%	16%	-1%	-26%	-76%

Fonte: Autor

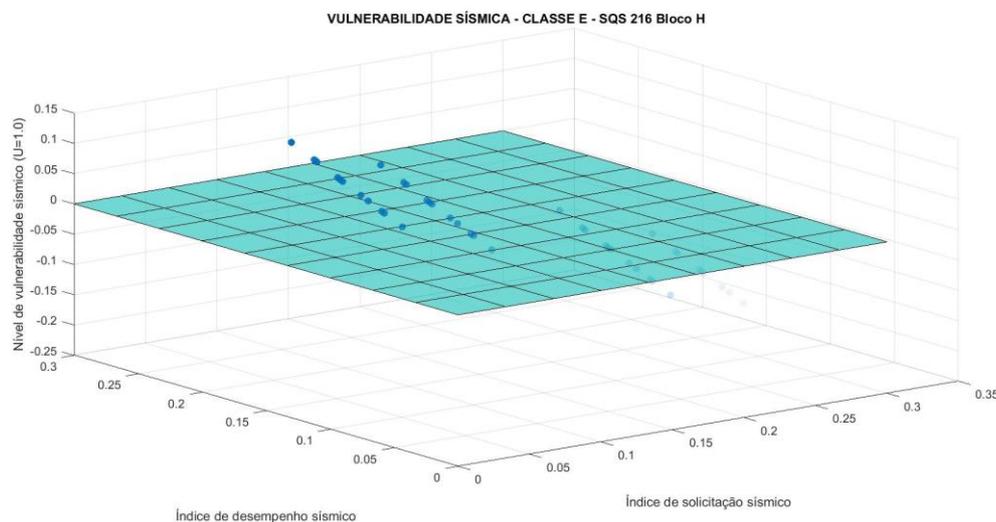
Assim como no caso de estudo 1, foram realizadas as simulações variando a classe de terreno entre C, D e E, assim como o fator de importância ( $U$ ) entre 1.00, 1.25 e 1.50. Desta forma, foram obtidas as seguintes superfícies:

Figura 51 – Vulnerabilidade Sísmica da edificação – Fator de Importância ( $U = 1.00$ ).



(Terreno classe C)

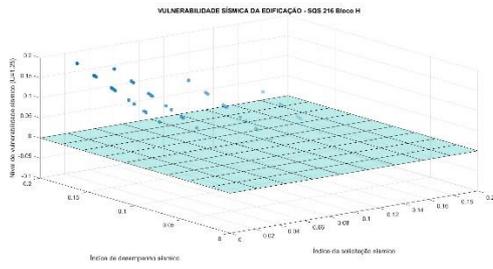
(Terreno classe D)



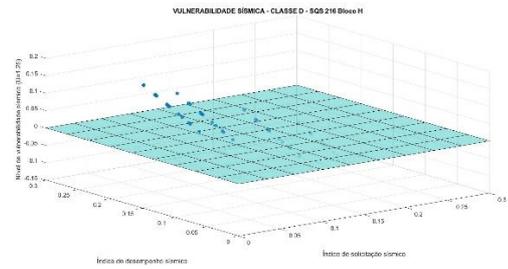
(Terreno classe E)

Fonte: Autor

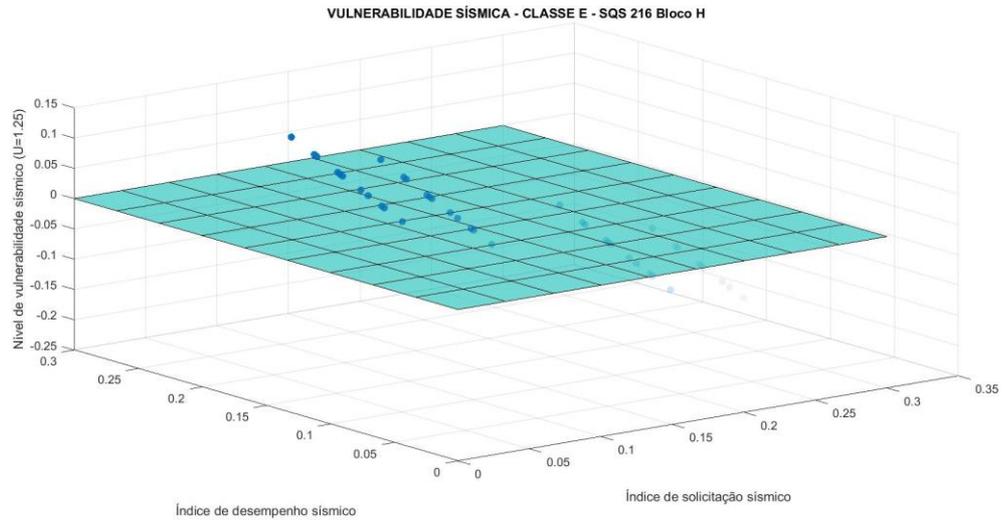
Figura 52 – Vulnerabilidade Sísmica da edificação – Fator de Importância ( $U = 1.25$ ).



(Terreno classe C)

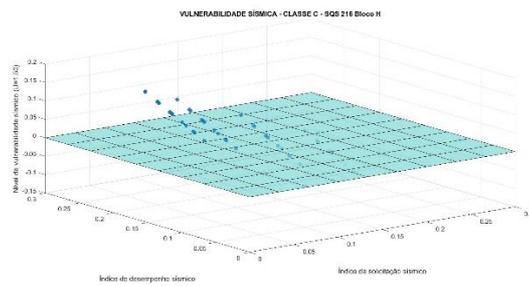


(Terreno classe D)

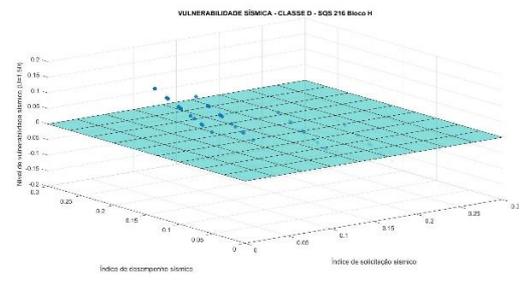


(Terreno classe E)  
Fonte: Autor

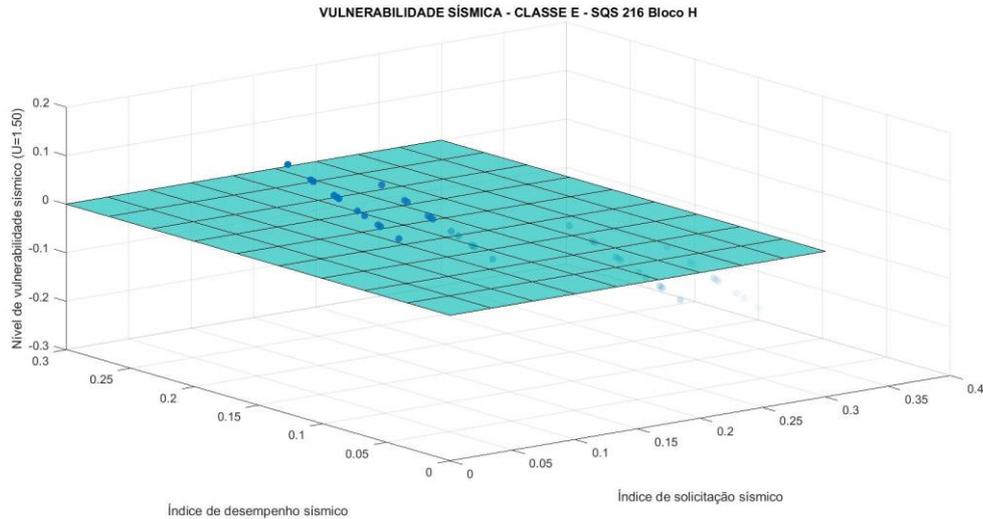
Figura 53 – Vulnerabilidade Sísmica da edificação – Fator de Importância ( $U = 1.50$ ).



(Terreno classe C)



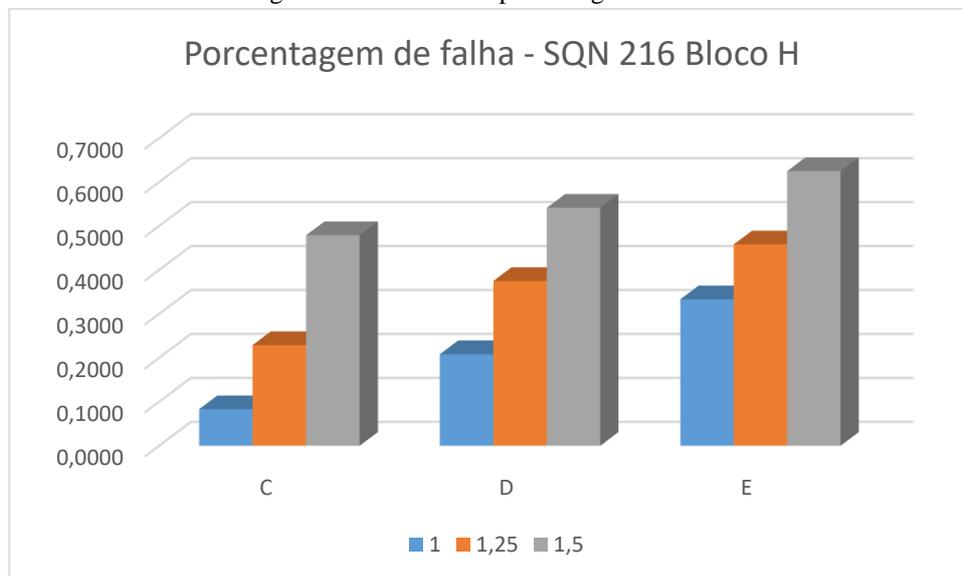
(Terreno classe D)



(Terreno classe E)  
Fonte: Autor

Com base nos resultados obtidos, foi realizada a comparação da porcentagem de falha entre os diferentes tipos de terreno para os diferentes fatores de importância (U):

Figura 54 – Gráfico de porcentagem de falha.

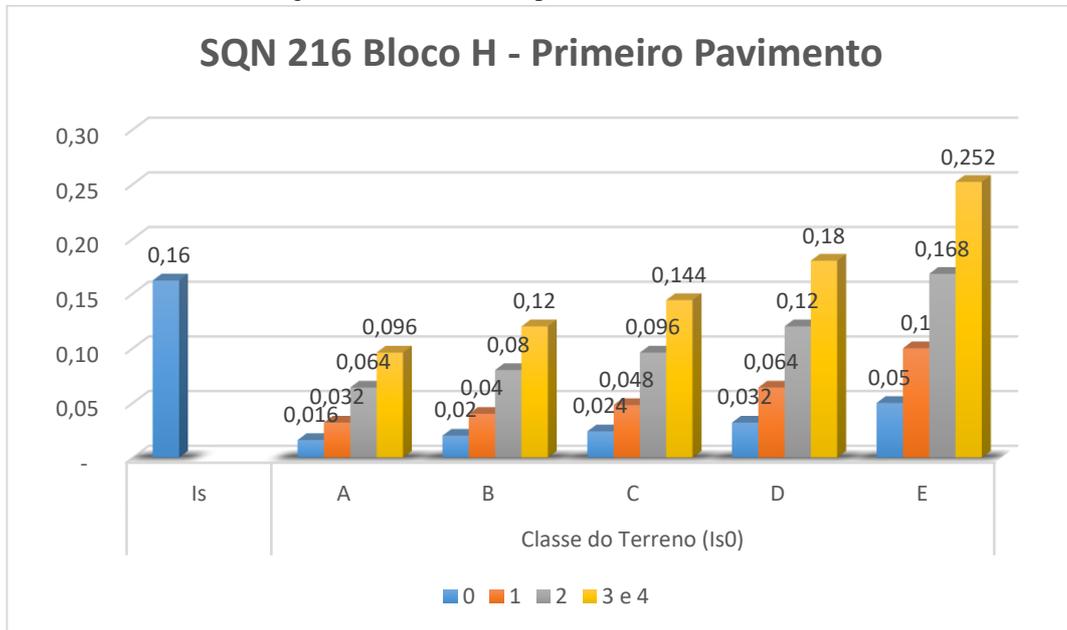


Fonte: Autor

Com a finalidade de análise comparativa, foram realizadas simulações para verificação do comportamento de cada pavimento da edificação objeto de estudo. Para isto, foram simuladas situações hipotéticas em que a edificação se encontrasse inserida

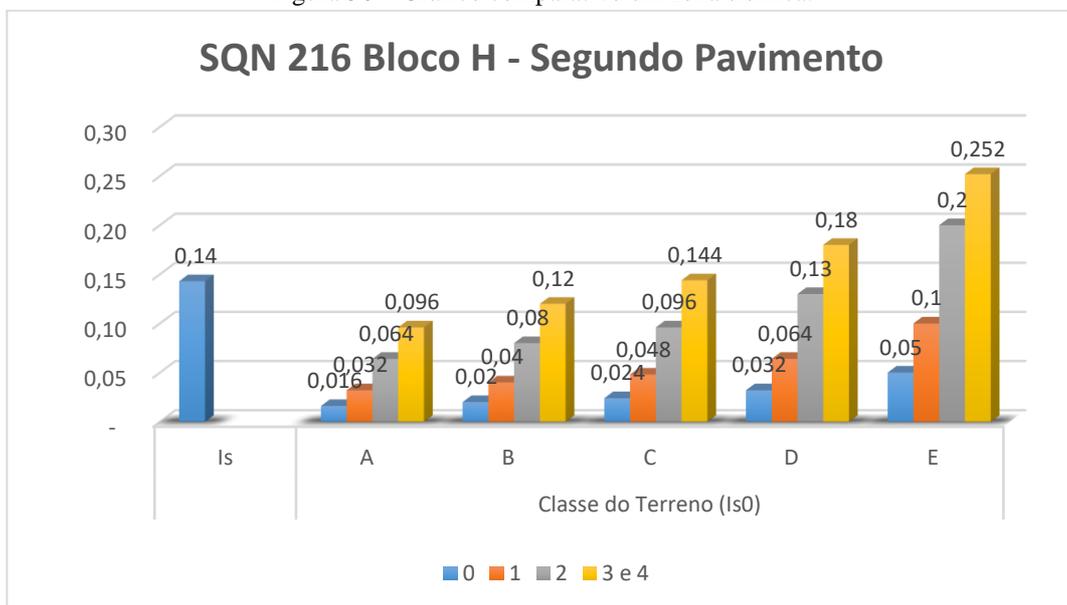
nas diferentes classes de terreno, desta mesma forma, foram realizadas simulações para as diferentes zonas sísmicas, conforme exposto a seguir:

Figura 55 – Gráfico comparativo em zona sísmica.



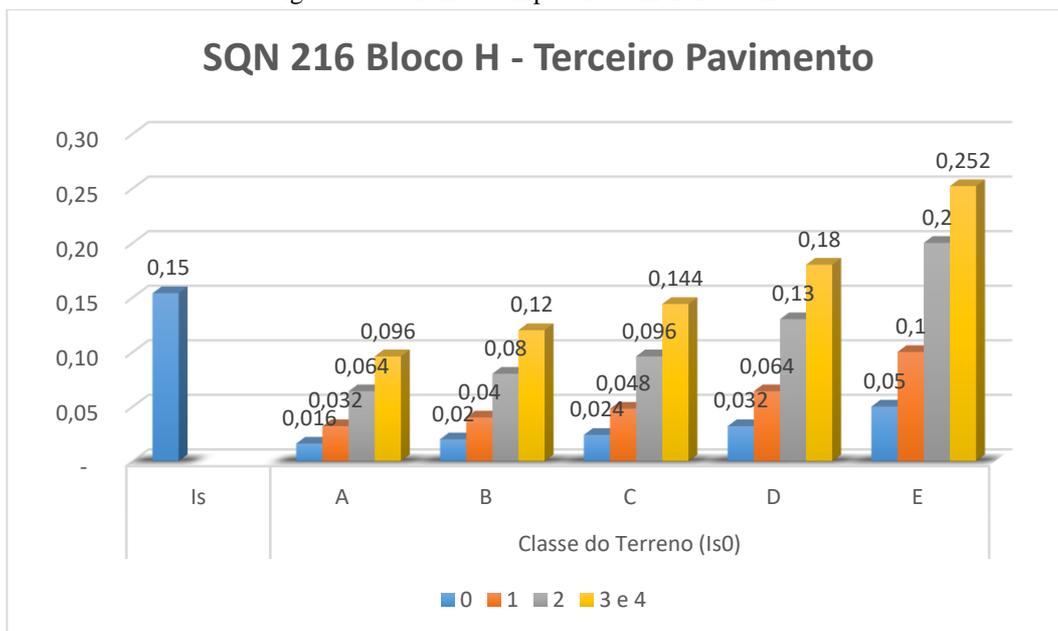
Fonte: Autor

Figura 56 – Gráfico comparativo em zona sísmica.



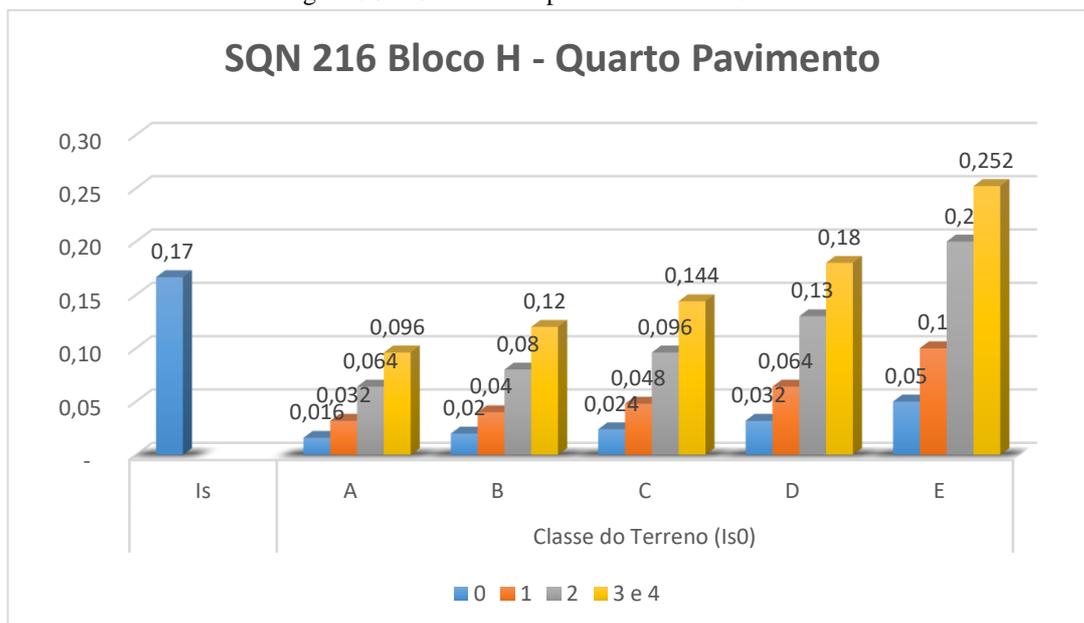
Fonte: Autor

Figura 57 – Gráfico comparativo em zona sísmica.



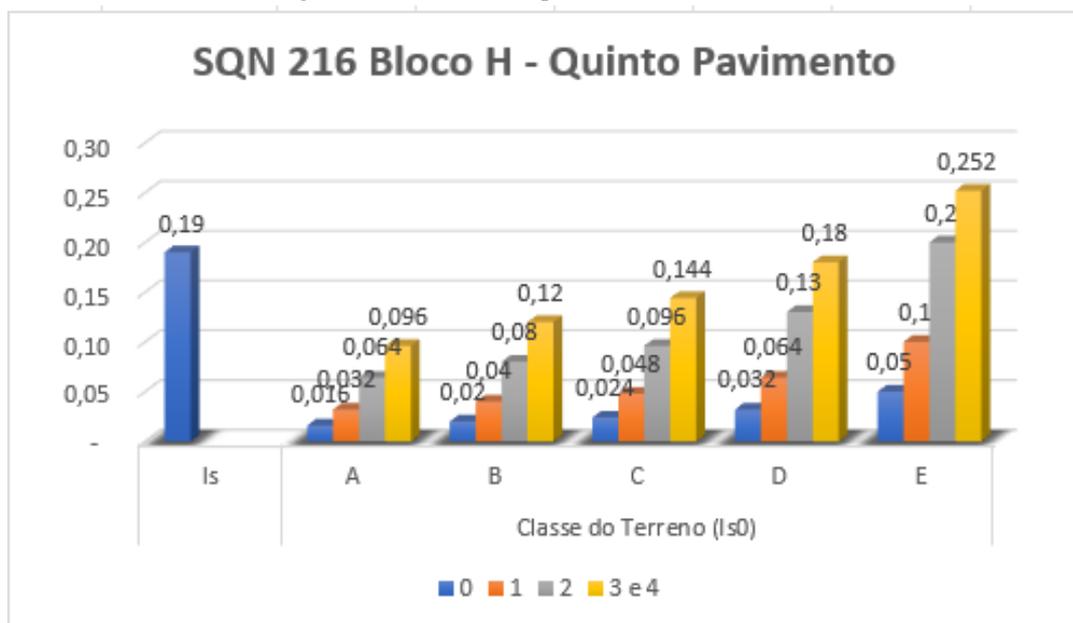
Fonte: Autor

Figura 58 – Gráfico comparativo em zona sísmica.



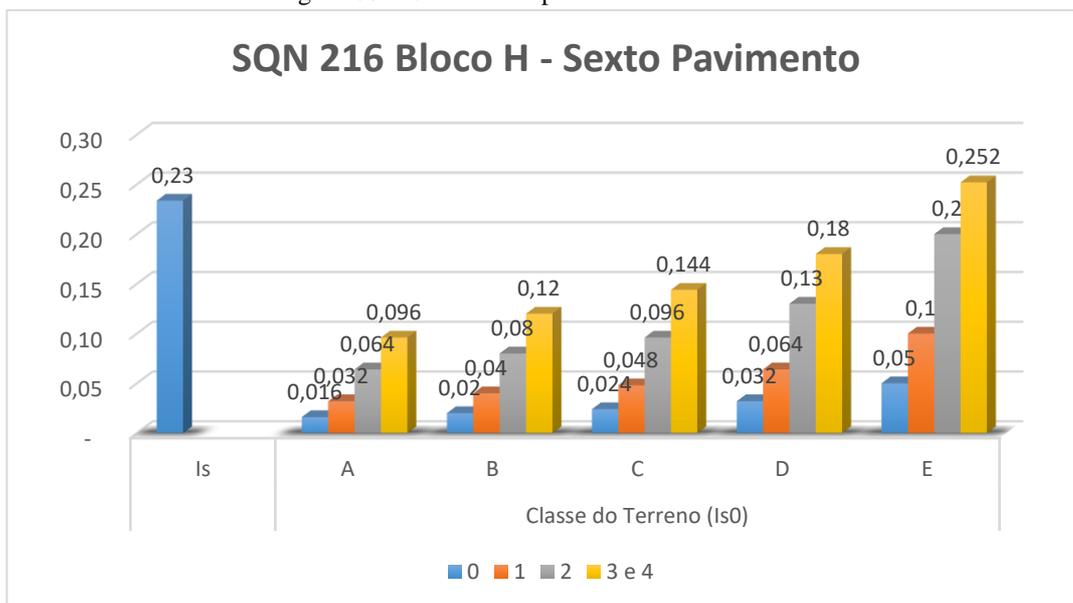
Fonte: Autor

Figura 59 – Gráfico comparativo em zona sísmica.



Fonte: Autor

Figura 60 – Gráfico comparativo em zona sísmica.



Fonte: Autor

Os pilares foram avaliados um a um, entretanto, com a finalidade de simplificar o cálculo, foi adotado um mesmo nível de degradação para todos os pilares. O conjunto de pilares teve sua integridade calculada através do método GDE parametrizado. Foi desenvolvida uma fórmula para obtenção de um subíndice de deterioração estrutural ( $Td$ ), conforme demonstrado abaixo:

$$Integr = [1 - GDEp] \quad (23)$$

$$Td = 0,7 + (0,3 * [1 - GDEp]) \quad (24)$$

Onde o valor para o GDE parametrizado é obtido conforme observado a seguir:

Figura 61 – Cálculo do GDE parametrizado.

2	Nome do Elemento	PILAR 1 - Lado Oeste A				Descrição dos Danos
	Localização	SQN 216 Bloco H				Eflorescência e Infiltração
	Danos	Fp	Fi	D	GDE	Figuras
	carbonatação	0,7	0,5	0,0581	0,184	
	cobrimto deficiente	0,6	0,5	0,0498		
	contaminação por cloretos	1	0,25	0,0415		
	corrosão de armaduras	0,7	0	0		
	desagregação	0,7	0	0		
	eflorescência	0,5	0,5	0,04		
	Dmáx	0,06	Soma	0,18		

Fonte: Autor

Com a obtenção do valor do subíndice de deterioração estrutural, foram então recalculadas as estruturas levando em consideração este novo valor para  $Td$ .

No caso de estudo 2, observou-se que a estrutura teve um dano calculado de 18,4% através do método GDE parametrizado. Ao aplicar a nova formulação para o  $Td$ , foi obtido o valor de 0,9448. Com o valor encontrado e as demais informações referentes ao caso em questão, obtém-se o resultado do índice de solicitação sísmica, conforme exposto a seguir:

Figura 62 – Índice de solicitação sísmica.

Z	U	Td	G	Is0	Is
Zona 0	1,5	<b>0,9448</b>	2,5	<b>0,075</b>	<b>0,19</b>

Fonte: Autor

## 5 CONCLUSÃO

A presente pesquisa avaliou o solo de Brasília com a finalidade de identificar a classe de solo afim de calcular a resistência mecânica do solo. Foram analisadas duas edificações típicas do Plano Piloto, entretanto, localizadas em extremidades opostas, sendo uma localizada na Asa Sul e a outra na Asa Norte. Através dos ensaios SPT de das edificações, verificou-se que ambas são classificadas como classe “E”.

A partir dos resultados obtidos, foi constatado que para as edificações caso de estudo, localizadas na Zona 0, sendo esta a zona sísmica de Brasília, mesmo que o terreno apresente a pior situação, ou seja, seja classificado como classe “E”, as edificações avaliadas não excederam o índice de desempenho sísmico. Sendo assim, ambas as estruturas se apresentaram sismo resistentes.

No presente estudo, foi identificado também, que se as edificações caso de estudo fossem locadas num terreno de mesma característica, entretanto, numa diferente zona sísmica, sendo ela Zona 2 ou Zona 3 e 4, a edificação não seria enquadrada como sismo resistente, podendo vir a colapso durante a ocorrência de um sismo.

Verificou-se que a integração entre o método de Hirosawa adaptado e o método de Grau de Deterioração do Elemento parametrizado permite avaliar de forma satisfatória a vulnerabilidade da estrutura, de forma a simular o efeito da deterioração dos elementos aliada à ocorrência do sismo. No caso de estudo 1, foi calculado através do método GDE o dano na estrutura na ordem de 22,5%, já no caso de estudo 2, foi calculado o dano na estrutura de 18,4%. Com base nestes dados, foi apurado que, apesar das edificações não apresentarem plena capacidade estrutural, estas ainda apresentam desempenho sismo resistente, ou seja, a edificação é considerada segura em relação a possível ocorrência de um sismo.

## **5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

A seguir serão apresentadas sugestões para trabalhos futuros a fim de dar continuidade ao tema abordado neste trabalho e aprofundá-lo:

- Análise de maior quantidade de edificações, assim como variação nas características físicas dos prédios;
- Após obtenção de maior número de dados quanto à resistência sísmica das edificações no Brasil assim como incidência de sismos, sugere-se uma avaliação da necessidade de reformulação no mapa sismicidade brasileira;
- Testar GDE parametrizado de forma individual.

## 6 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

ALBUQUERQUE, P. M. V. **Metodologia de Avaliação da Vulnerabilidade Sísmica Estrutural do Ministério de Construção do Japão: Adaptação e Aplicação ao Corpo 22 do Hospital Santa Maria.** Lisboa. 2008.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **SEI7 – Structures Engineering Institute 7:Minimum Design Loads for Building and Structures and Other Structures.** ASCE. USA. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484: solo - sondagens de simples reconhecimentos com SPT: método de ensaio.** ABNT. Rio de Janeiro, p. 17. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projetos de estruturas de concreto - Procedimento.** abntABNT. Rio de Janeiro, p. 10. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15421: Projetos de estruturas resistentes a sismos: procedimento.** ABNT. RIO DE JANEIRO, p. 26. 2006.

BELZEGA, A. A. A. **Edifícios de Habitação - Caracterização e estimacão técnico-económica.** Lisboa: Imprensa Nacional - Casa da Moeda, 1984.

CANTACUZINO, S. **Principles of protection for the architecture of Modern Movement.** DOCOMOMO 1 st International Conference. Eindhoven University of Techonoly, Netherlands: [s.n.]. 1990. p. 32-42.

CARPANEDA, L. V. **Contribuições para o desenho de espaços seguros: um estudo de caso nas superquadras do Plano Piloto de Brasília.** Universidade de Brasília. Brasília, p. 144. 2010.

CHARLESON, A. **Seismic Design For Architects Outwitting the Quake.** Oxford. UK. 2008.

CONDE, F. R. **Avaliação da Capacidade Sismo-Resistente de Edifícios em Alvenaria segundo a NTC-2017.** Universidade do Porto. Porto. 2018.

COSTA, L. M. F. R. D. L. **o Urbanista defende sua cidade.** COSTA, Maria Elisa. Com a palavra Lúcio Costa. Rio de Janeiro, p. 101. 1967.

FERREIRA, M. M.; GOROVITZ, M. **A invenção da superquadra: o conceito de unidade de vizinhança em Brasilia.** 1ª. ed. Brasília: Iphan, 2009.

G., M. A. **Análise de durabilidade da ponte do rio do Carmo utilizando ensaios não destrutivos, norma DNIT e a metodologia GDE/UnB.** Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2015.

GUICHEN, G. D. **La conservation preventive: un changement profond de mentalité.** ICOM Cahiers d'études N.1. Bruxelas, p. 4-6. 1995.

HABERLEHNER, H. **Análise Sismotectônica do Brasil: notas explicativas sobre o mapa sismotectônico do Brasil e regiões correlacionadas.** ABGE. São Paulo, p. 329. 1978.

HASUI, Y.; PONÇANO, W. L. **Geossuturas e Sismicidade no Brasil.** ABGE. São Paulo, p. 338. 1978.

ICOMOS. **Carta de Burra.** International Council on Monuments and Sites. Burra, Austrália. 1980.

- KLEIN, D. Critérios adotados na vistoria e avaliação de obras de arte. **XXV Jornada Sul Americana de Engenharia Estrutural**, Porto Alegre, Novembro 1991. 196.
- KOS, D. B. **Arquitetura residencial das superquadras do Plano Piloto de Brasília: aspectos de conforto térmico**. Universidade de Brasília. Brasília, p. 168. 2009.
- KRAUS, E. **DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA MANUTENÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**. Universidade de Brasília. Brasília. 1994.
- LINDEBURG, M. R.; MCMULLIN, K. M. **Seismic Design of Building Structures: A professional's Introduction to Earthquake Forces and Design Details**. 09. ed. Belmont: Professional Publications, Inc., 2008.
- MACIEL, P. S. **Conservar, uma questão de decisão. O Julgamento na conservação da arquitetura Moderna**. Univeridade Federal de Pernambuco. Pernambuco, p. 253. 2012.
- MAGNO, A. F. S. **Avaliação das manifestações patológicas dos viadutos da urbana e do anel viário Parnamirim/natal, através da aplicação das metodologias de inspeção GDE adaptada para OAE e da norma DNIT 01/2004 - PRO**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2004.
- MARTINATTI, Y. W. P. **Desenvolvimento de modelo multicritério de tomadas de decisões para aplicação na conservação de edificações das superquadras do Plano Piloto em Brasília/DF**. Universidade de Brasília. Brasília. 2021.
- MIRANDA, P. S. T. **Avaliação da Vulnerabilidade Sísmica na Realidade Predial Brasileira**. Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2013.
- MIRANDA, P. S. T. **A influência das ações sísmicas nas edificações brasileiras em concreto armado**. Universidade do Porto. Porto, Portugal, p. 647. 2021.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Danos econômicos causados por terremotos e tsunamis aumentaram mais de 67% em 20 anos. **ONU News | Perspectiva Global Reportagens Humanas**, 2018. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2018/11/1645882>>. Acesso em: 19 nov. 2021.
- RODRIGUES, H. F. P. **Comportamento Sísmico de Edifícios irregulares de betão armado**. Universidade de Aveiro. Portugal. 2006.
- ROMEU, V. Seismic Risk at the Urban Scale: Assessment, Mapping and Planning. 4th International Conference on Building Resilience, Building Resilience. **ELSEVIER**, United kingdom, p. 10, September 2014.
- RSA. **Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes**. [S.l.]. 1983.
- SANTOS, S. H. C.; LIMA, S. S. Elements for a Future Brazilian Standard for Seismic Resistance of Concrete Structures of Building. **Ibracon Structural Journal**, v. 1, p. 47-62, 2005.
- TEIXEIRA, E. O. **método de avaliação ambiental de espaços urbanos estudo de caso: Asa Sul do Plano Piloto de Brasília-DF**. Universidade de Brasília. Brasília, p. 143. 2013.
- TUUTTI, K. **Corrosion Steel in Concrete**. Swedish Cement and Concrete Research Institute. [S.l.], p. 469. 1982.

UNIVERSIDADE DE BRASILIA. Sismografo UnB. **Obsis**, 2019. Disponivel em:  
<<http://obsis.unb.br/portalsis/>>. Acesso em: semanalmente.