



Interação Solo-Estrutura no comportamento sísmico de estruturas – estudo paramétrico

Fernando Henrique Faoro

Dissertação apresentada à

**Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança**

para obtenção do grau de Mestre em

Engenharia da Construção

Mai 2020



Interação Solo-Estrutura no comportamento sísmico de estruturas – estudo paramétrico

Fernando Henrique Faoro

Dissertação apresentada à

**Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança**

para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia da Construção

Orientador:

Professor Doutor João Carlos Almendra Roque

Coorientador:

Professor Doutor Gustavo Lacerda Dias

Esta dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo Júri

Mai 2020

Interação Solo-Estrutura no comportamento sísmico de estruturas – estudo paramétrico

Fernando Henrique Faoro

Dissertação apresentada à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia da Construção

Maio 2020

Interação Solo-Estrutura no comportamento sísmico de estruturas – estudo paramétrico

Fernando Henrique Faoro

Dissertação apresentada à

**Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança**

para obtenção do grau de Mestre em

Engenharia da Construção

Orientador:

Professor Doutor João Carlos Almendra Roque

Coorientador:

Professor Doutor Gustavo Lacerda Dias

Mai 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela oportunidade de fazer parte do programa de Dupla Diplomação, onde pude atingir conhecimentos e vivenciar experiências valiosas que levarei para toda a vida. Foi Ele também o responsável por me guiar e me dirigir em todo o desenvolvimento do trabalho, sempre trazendo luz ao que parecia complexo e incompreensível.

Sou extremamente grato aos meus pais que tanto se dedicaram por mim, com todos os ensinamentos e conselhos. Eles foram a base de tudo e propiciaram todo o sustento financeiro e emocional para que essa oportunidade se tornasse possível.

Aos meus familiares que sempre deram total apoio e suporte durante todos os anos da minha graduação e sem dúvida tem uma grande parcela de contribuição na minha formação pessoal e profissional.

Aos amigos que tornaram cada momento único e sempre estiveram ao meu lado durante todo esse tempo prestando todo o tipo de apoio.

Também agradeço as instituições de ensino Universidade Tecnológica Federal do Paraná e Instituto Politécnico de Bragança que disponibilizam de programas como este que vêm a acrescentar de forma muito enriquecedora a formação dos seus alunos.

Por fim, um agradecimento especial ao professor Dr. João Carlos Almendra Roque e o professor Dr. Gustavo Lacerda Dias pelo acompanhamento e ampla participação no processo de desenvolvimento do trabalho.

RESUMO

O comportamento sísmico das estruturas é responsável por elevar o grau de complexidade do dimensionamento de projetos de engenharia. Abrigar pessoas, suportar indústrias e grandes centros comerciais a medida que forças naturais de ordem aleatória tendem a por em prova a capacidade resistente das edificações tornam-se grandes desafios para profissionais da área.

Entender como as estruturas respondem aos estímulos sísmicos faz-se então uma questão chave no desenvolvimento de medidas que venham a mitigar os danos que esses fenômenos podem causar. Com isso, é de fundamental importância que a comunidade técnico-científica desenvolva estudos e evidências que venham a contribuir com a diminuição do risco sísmico das edificações em geral.

O estudo do comportamento sísmico das estruturas parte da premissa de que os terremotos são transmitidos desde a sua fonte e viajam rapidamente pela crosta terrestre. Ao atingirem a superfície, podem causar tremores nos solos locais, que dependendo da localização, são solos que suportam diversas edificações. Esses tremores são propagados pelos solos locais até atingirem as estruturas, podendo danificá-las.

A maneira que a estrutura irá responder aos estímulos sísmicos está diretamente relacionada aos parâmetros dos sistemas solo-estrutura, gerando assim um processo de interdependência conhecido como interação sísmica solo-estrutura (ISSE).

A variação dos parâmetros pertencentes aos sistemas solo-estrutura é responsável por determinar a intensidade dos efeitos dos sismos nas estruturas. Assim, conhecer como os parâmetros influenciam na resposta estrutural sísmica pode se tornar um grande progresso no desenvolvimento de medidas de mitigação.

Neste contexto, o presente estudo analisou, através de simulações computacionais tridimensionais, o comportamento ISSE sísmico de estruturas fundadas em solos brandos (tipo D na classificação do Eurocódigo 8).

As simulações foram realizadas com a variação de parâmetros tanto estruturais quanto do solo e dos abalos sísmicos considerados. Para as estruturas foram variadas as frequências naturais de vibração. Para os solos foram variadas a velocidade de propagação das ondas de corte e a altura da coluna de solo considerada. Por fim, foram analisados os sistemas solo-estrutura para os dois tipos de sismos determinados pelo Eurocódigo 8, que são: sismos afastados (tipo 1) e sismos próximos (tipo 2).

Através das simulações obteve-se valores máximos de deformação das estruturas que foram convertidos em acelerações estruturais máximas a fim de comparar com as acelerações espectrais regulamentadas pelo Eurocódigo 8 na intenção de analisar se os efeitos da ISSE são benéficos ou não.

Assim, determinaram-se ao final do trabalho quais foram os cenários críticos, ou seja, para qual combinação de parâmetros que a interação sísmica solo-estrutura apresentou efeitos mais significantes na estrutura.

Palavras chave: Interação sísmica solo-estrutura; abalo sísmico; frequência natural de vibração; velocidade de propagação das ondas de corte; acelerograma.

ABSTRACT

The seismic behavior of structures is responsible for raising the degree of complexity in the design of engineering projects. Housing people, supporting industries and large shopping centers as natural forces of random order tend to test the resilient capacity of buildings become major challenges for professionals in the field.

Understanding how structures respond to seismic stimulus is therefore a key issue in the development of measures that will mitigate the damage that these phenomena can cause. As a result, it is of fundamental importance that the technical-scientific community develops studies and evidences that will contribute to reducing the seismic risk of buildings in general.

The study of the seismic behavior of structures starts from the premise that earthquakes are transmitted from their source and travel quickly through the earth's crust. When they reach the surface, they can cause tremors in the local soils, which depending on the location, are soils that support several buildings. These tremors are propagated by the local soils until they reach the structures, and can damage them.

The way the structure will respond to seismic stimulus is directly related to the parameters of the soil-structure systems, thus generating an interdependence process known as seismic soil-structure interaction (SSI).

The variation of the parameters of the soil-structure systems is responsible for determining the intensity of the effects of earthquakes on the structures. Thus, knowing how the parameters influence the structural seismic response can become a major step forward in the development of mitigation measures.

In this context, the present study analyzed, through three-dimensional computer simulations, the seismic SSI behavior of structures based on soft soils (type D in the Eurocode 8 classification).

The simulations were carried out with the variation of both structural and soil parameters and the seismic shocks considered. For the structures, the natural frequencies of vibration were varied. For the soils, the propagation speed of the cutting waves and the height of the soil column considered were varied. Finally, soil-structural systems were analyzed for the two types of earthquakes determined by Eurocode 8, which are: remote earthquakes (type 1) and near earthquakes (type 2).

Through the simulations, maximum values of deformation of the structures were obtained, which were converted into maximum structural accelerations in order to compare with the spectral accelerations regulated by Eurocode 8 in order to analyze whether the ISSE effects are beneficial or not.

Thus, at the end of the work, the critical scenarios were determined, that is, for which combination of parameters that the soil-structure seismic interaction had the most significant effects on the structure.

Keywords: Seismic soil-structure interaction; earthquake; natural frequency of vibration; shear wave velocity; accelerogram.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	ENQUADRAMENTO TEMÁTICO	1
1.2	OBJETIVOS.....	4
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	4
2	SISMOS E AÇÃO SÍSMICA	6
3	INTERAÇÃO DINÂMICA SOLO-ESTRUTURA	14
3.1	ABORDAGEM HISTÓRICA	14
3.2	FENÔMENOS DA INTERAÇÃO SÍSMICA SOLO-ESTRUTURA E IMPORTÂNCIA.....	18
3.3	MÉTODO DE ANÁLISE.....	31
4	ESTUDO PARAMÉTRICO DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA EM EDIFÍCIOS CORRENTES	36
4.1	ACELEROGRAMAS SÍSMICOS	37
4.2	SOLOS.....	41
4.3	PÓRTICOS.....	43
4.4	MODELO NUMÉRICO	47
4.4.1	<i>Análise estática</i>	55
4.4.2	<i>Análise modal</i>	55
4.4.3	<i>Análise sísmica transiente</i>	58
4.4.4	<i>Resultados</i>	59
4.4.5	<i>Análise dos resultados da ISSE</i>	60
5	CONCLUSÕES	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
	ANEXO I. COMPORTAMENTO DINÂMICO DO SISTEMA	78
	ANEXO II. ACELEROGRAMAS	81

ANEXO III. ESPECTROS DE RESPONSA ELÁSTICA..... 87

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1- Valores dos parâmetros descritos dos espectros de resposta elástica do sismo tipo 1 do EC8	12
Quadro 2.2- Valores dos parâmetros descritos dos espectros de resposta elástica do sismo tipo 2 do EC8	12
Quadro 2.3- Classe de importância de edifícios no EC8.....	12
Quadro 2.4- Coeficientes de importância no EC8	13
Quadro 3.1- Tipos de solo	26
Quadro 4.1 – Cenários sísmicos utilizados na geração dos acelerogramas sintéticos	40
Quadro 4.2- Principais parâmetros dos acelerogramas artificiais	41
Quadro 4.3- Características dos solos brandos utilizados neste trabalho	42
Quadro 4.4- Características das estruturas (pórticos).....	46
Quadro 4.5- Características do material adotado.....	47
Quadro 4.6- Frequência de vibração para os 3 primeiros modos de vibração dos solos	56
Quadro 4.7- Frequência de vibração para os 3 primeiros modos de vibração dos pórticos.....	56
Quadro 4.8- Frequência de vibração para os 3 primeiros modos de vibração dos sistemas solo-estrutura.....	57
Quadro 4.9- Fatores de amplificação dos resultados obtidos para sismos tipo 1 em relação a sismos tipo 2.....	61
Quadro 4.10- Valores médios das acelerações espectrais (obtidos através dos três acelerogramas artificiais para sismo tipo 1)	62
Quadro 4.11- Valores médios das acelerações espectrais (obtidos através dos três acelerogramas artificiais para sismo tipo 2)	63

Quadro 4.12- Porcentagem das acelerações espectrais médias que ficaram abaixo (-) ou acima (+) do espectro de referência para solos tipo D e sismo tipo 1 (EC8).....	68
Quadro 4.13- Porcentagem das acelerações espectrais médias que ficaram abaixo (-) ou acima (+) do espectro de referência para solos tipo D e sismo tipo 2 (EC8).....	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Representação da distribuição das placas tectônicas da crosta terrestre.....	7
Figura 2.2- Sinal sísmico no substrato rochoso propagado ao solo subjacente à estrutura	7
Figura 2.3- Forma do espectro de resposta elástica do EC8	11
Figura 3.1- Estrutura ideal com uma haste cilíndrica fina composta por uma ponta hemisférica na base incorporada em um meio homogêneo	16
Figura 3.2- Representação de um sistema de um grau de liberdade fixo na base e outro conectado a uma mola rotacional	20
Figura 3.3- Estrutura fundada em solo não rígido	21
Figura 3.4- Espectros de resposta filtrados e normalizados à aceleração de pico do afloramento rochoso com Índice de plasticidade da camada de solo igual a 50 %.....	30
Figura 3.5- Amplificação das ondas sísmicas em três perfis de solos brandos	30
Figura 3.6- Espectro de resposta elástica do EC8 para sismos tipo 1 e 2 respectivamente	31
Figura 3.7- Modelo de Winkler para representação do solo	32
Figura 3.8- Comparação entre o método direto (a) e método indireto (b) de análise	33
Figura 3.9- Sistema solo-estrutura unificados para análise pelo método direto	34
Figura 4.1- Espectros de resposta elástica de referência (EC8) para a criação dos acelerogramas artificiais	39
Figura 4.2- Representação esquemática do corte de um pórtico transversal à direção do sismo com indicação da largura (b) de influência dos pórticos na direção do sismo	43
Figura 4.3- Caracterização e deslocamentos sísmicos horizontais de um modelo <i>Shear Building</i> de um grau de liberdade.....	44

Figura 4.4- Representação das análises utilizadas no ANSYS <i>Workbench</i>	49
Figura 4.5- SOLID185 geometria homogênea de estrutura sólida	50
Figura 4.6- Malha de elementos finitos do volume de solo modelado (L=30m; b=4m; h=variável).....	51
Figura 4.7- Deformação de uma viga Timoshenko (azul) comparada com uma viga Euler-Bernoulli (vermelho)	52
Figura 4.8- Pórtico representativo da estrutura <i>Shear Building</i> adotada; (a) geometria; (b) e (c) malha de elementos finitos	52
Figura 4.9- Representação do problema de contato	53
Figura 4.10- Representação da formulação utilizada para resolução do problema de contato.....	54
Figura 4.11- Modelação final do sistema solo-estrutura; (a) volume; (b) malha de elementos finitos	54
Figura 4.12- Representação dos três primeiros modos de vibração do solo....	57
Figura 4.13- Representação dos três primeiros modos de vibração da estrutura	57
Figura 4.14- Representação dos três primeiros modos de vibração do sistema solo-estrutura	58
Figura 4.15- Representação de acelerograma artificial no ANSYS para efetuar a análise sísmica.....	58
Figura 4.16- Área de controle de informações referentes aos acelerogramas importados no ANSYS	58
Figura 4.17- Deslocamentos para análise da deformação temporal das estruturas	59
Figura 4.18- Evolução das respostas estruturais em relação a variação da altura do solo para sismos do tipo 1	65
Figura 4.19- Evolução das respostas estruturais em relação a variação da altura do solo para sismos do tipo 2;	65
Figura 4.20- Acelerações estruturais máximas versus a taxa de rigidez dos sistemas solo-estrutura analisados	67
Figura I.0.1- Idealização de um sistema massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade	78

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento temático

As cargas dinâmicas têm se mostrado cada vez mais relevantes na concepção de projetos de engenharia. A prática de assumir estruturas desconsiderando esse tipo de efeito é falha para assegurar a segurança e um desempenho adequado de construções cada vez mais arrojadas e complexas na sua arquitetura. Deste modo, para que a engenharia de estruturas garanta a viabilidade estrutural das edificações, os métodos de análise ISSE dinâmica devem estar cada vez mais sofisticados, permitindo aos profissionais da área possuir conhecimento detalhado sobre como eventos dinâmicos afetam o comportamento das edificações.

Os tremores de terra são um dos principais exemplos de ações dinâmicas que devem ser considerados na elaboração de projetos, principalmente em locais de elevada atividade sísmica. Esses fenômenos naturais causam grandes impactos ao atingirem a superfície terrestre com certa magnitude, pois têm potencial catastrófico sobre edifícios que não possuam a preparação apropriada. Tais impactos podem refletir não apenas em perdas socioeconômicas, como também, em casos mais graves, a perda de vidas.

A comunidade técnico-científica torna-se então aliada ao desenvolvimento de medidas que venham a mitigar os danos causados pela atividade sísmica nas estruturas. Todavia, o processo requer conhecimentos cada vez mais específicos, tal como a influência que os vários parâmetros exercem no comportamento sísmico de sistemas solo-estrutura.

Um abalo sísmico é transmitido através de ondas primárias e secundárias desde o seu hipocentro até atingir a superfície terrestre. Essa propagação

tem suas características amplificadas ou diminuídas de acordo com o meio no qual se locomovem. As características de um solo são as principais responsáveis pelo comportamento da propagação das vibrações. Isso conseqüentemente resultará em movimentos de maior ou menor intensidade na estrutura.

Para (ANAND, 2018), durante o processo de vibração, além da resposta de uma estrutura ser modificada pela flexibilidade dos solos, a resposta do solo também é modificada pela presença de uma estrutura. Sendo assim, os movimentos do solo são alterados na presença de uma estrutura e não possuem um comportamento semelhante de quando estão sob a situação de campo livre. Com isso, tem-se que os deslocamentos estruturais e do solo não são independentes um do outro, levando assim a um processo de interdependência.

Este processo de interdependência das respostas estruturais e do solo é denominado interação sísmica solo-estrutura (ISSE). Somente a partir de análises ISSE que envolvam a Interação sísmica solo-estrutura é possível estimar de que maneira um determinado tipo de solo transfere energia para uma estrutura, bem como, qual será a resposta desta em relação ao solo.

Além disso, através de uma análise ISSE é possível obter resultados sobre as ampliações gerais das deflexões que permitem chegar a conclusões a respeito do nível de desempenho das estruturas. Por vezes, como citado no trabalho de (TABATABAIEFAR e FATAHI, 2014), a vida útil desses edifícios muda significativamente com as análises ISSE, chegando próximo ao colapso, o que é muito perigoso e ameaça a segurança. Assim, procedimentos de projetos convencionais, excluindo a ISSE, podem não ser considerados adequados para garantir a segurança estrutural de uma edificação.

De modo geral, pode-se afirmar que a ISSE é benéfica, e para a maioria dos casos apenas confirma que a utilização dos recursos da norma é suficiente para o correto dimensionamento de estruturas. Contudo, evidências e estudos como os de (KRAMER, 1996) e (TABATABAIEFAR e FATAHI, 2014) mostram que em determinadas situações ela revela-se muito importante na

resposta estrutural, situação que geralmente está condicionada a estruturas rígidas repousadas em solos flexíveis.

Atualmente, os avanços em relação aos métodos de análise disponíveis já permitem aos engenheiros prever, mesmo que de forma aproximada, através de simulações computacionais, o comportamento dos solos e das estruturas de forma unificada diante desses fenômenos. No entanto, (FAR, 2017) afirma que a adoção de técnicas de modelagem realistas e aprofundadas ainda é uma questão bastante discutida e desafiadora no campo do design sísmico.

Sob o ponto de vista teórico, o método mais preciso para se considerar a deformabilidade do solo é por meio de uma análise ISSE interativa tridimensional, onde solo e estrutura são considerados como um sistema único. Entretanto, a complexidade destes modelos torna essa análise bastante sofisticada e requer métodos numéricos para sua solução.

Métodos como o dos elementos finitos são capazes de incorporar efeitos como os de não linearidade do material e amortecimento, bem como alterações na geometria do meio na análise ISSE dinâmica. Infelizmente, por demandar profissionais altamente capacitados e com conhecimento aprofundado a respeito de modelos construtivos, a alternativa tem sido empregada predominantemente no meio científico e, pontualmente no meio prático. Contudo, com o advento de computadores poderosos o uso dos métodos numéricos tem sido ampliado nos estudos de comportamentos interativos complexos e complicados.

A (NP EN 1998-1, 2010) é o documento normativo que estabelece como as ações sísmicas devem ser consideradas nos projetos de estruturas resistentes aos terremotos. O período de retorno, tipo do solo e o tipo de sismo (próximo ou afastado) determinam a ação sísmica. O recurso de espectro de resposta elástica constitui uma alternativa aos acelerogramas reais ou artificiais (nem sempre disponíveis) como uma forma prática e coerente de caracterizar uma ação sísmica. No entanto, para todos os casos, os efeitos da Interação sísmica solo-estrutura não são levados em consideração, o que pode levar a análises incorretas do comportamento sísmico de uma estrutura.

Nesse contexto, o presente trabalho pretende contribuir para uma melhor percepção dos efeitos da ISSE em edifícios, sua importância e quais os parâmetros que mais influenciam esses fatores. Será dada particular ênfase à análise sísmica de estruturas de edifícios assente em solos brandos (solo D no Eurocódigo 8), além de diferentes frequências naturais para os sistemas estruturais em questão. Isso fará com que os resultados possam ser traduzidos para ampla gama de casos reais com idênticas frequências de vibração através da comparação espectral entre respostas para as diversas condições analisadas.

1.2 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é contribuir com a mitigação dos danos devido aos sismos em estruturas de edifícios correntes assentes em solos brandos através da consideração da Interação sísmica solo-estrutura.

Também é objetivo a determinação de quais parâmetros dos sistemas são mais influentes na resposta estrutural aos fenômenos da ISSE.

As respostas estruturais e do solo aos estímulos sísmicos serão obtidas através de simulações computacionais utilizando modelos numéricos para discretização dos sistemas solo-estrutura.

Por fim, o trabalho busca contribuir com insumos que tornem as análises sísmicas de edifícios mais claras e assertivas principalmente em regiões de alta atividade sísmica.

1.3 Organização do trabalho

A dissertação está dividida em cinco capítulos, onde o primeiro destina-se a introdução do assunto e objetivos esperados.

No segundo capítulo é feito uma abordagem sobre os sismos, com destaque as principais características e formas de consideração da ação sísmica em um projeto de engenharia.

O terceiro capítulo introduz o tema Interação sísmica solo-estrutura através de um compilado geral de informações. O desenvolver é iniciado atra-

vés de um breve histórico com posterior explicação detalhada e demonstração da sua significância através de estudos anteriores.

O quarto capítulo destina-se inteiramente ao estudo paramétrico. Inicialmente é detalhado todo o modelo solo-estrutura, ação sísmica e *software* utilizado. Posteriormente são abordadas as análises realizadas e, por fim, os resultados obtidos, traçando relações entre os parâmetros analisados a fim de encontrar os casos críticos da Interação sísmica solo-estrutura.

O capítulo quinto apresentam-se as principais conclusões que puderam ser extraídas com o estudo desenvolvido.

2 SISMOS E AÇÃO SÍSMICA

Os terremotos são eventos, geralmente de ordem natural, que tendem a se concentrar em zonas específicas da superfície da Terra, tal como os limites das placas tectônicas nas quais a crosta terrestre está dividida e também em zonas onde há falhas dentro das próprias placas. Essas placas estão em constante movimento e a medida que ocorrem deslocamentos de uma em relação a outra, ao longo dos seus limites, elas tendem a não deslizar suavemente, pois estão interligadas. Com isso, o intertravamento entre as placas faz com que ocorram deformações nas rochas em ambos os lados dos seus limites, resultando em acúmulo de tensões. Como a capacidade das rochas de suportar essas tensões é limitada de acordo com o material que constitui a rocha, quando as tensões atingem certo nível, a rocha tende a fraturar localmente de forma bruta, e os dois lados se movem, liberando uma parte da energia acumulada gerando grandes movimentos conhecidos como abalos sísmicos.

A Figura 2.1 ilustra a divisão das placas tectônicas ao longo da extensão do planeta, onde é possível perceber quais regiões estão mais suscetíveis a tais fenômenos.

Ainda segundo (KRAMER, 1996), em locais próximos ao epicentro de um grande terremoto, o tremor do solo pode causar tremendos danos, onde sem dúvida, o mais dramático e memorável é o colapso estrutural, que pode gerar a perda de várias vidas. Este pode variar desde o colapso previsível das estruturas não reforçadas nas quais vivem muitos moradores principalmente de áreas subdesenvolvidas do mundo até a surpreendente destruição de construções mais modernas.

Os danos estruturais são a principal causa de mortes e perda econômica na maioria dos terremotos. Além disso, as estruturas não necessariamente precisam entrar em colapso para causar mortes e perdas. Danificações, como fachadas de tijolos e parapeitos no exterior de uma estrutura, ou quadros pesados e prateleiras dentro de uma estrutura, causaram baixas em muitos terremotos. As instalações internas, como tubulações, iluminação e sistemas de armazenamento também podem ser danificadas durante os terremotos (KRAMER, 1996).

A compreensão dos efeitos de um sismo está atrelada às principais características que conferem grandeza e poder de destruição a ele. De acordo com (LANAMME, 1999) a medida de amplitude mais comumente utilizada para descrever um evento sísmico é a aceleração horizontal de pico "*Peak Ground Acceleration*" (PGA), para propósitos de engenharia. Esta pode ser obtida por meio do acelerograma que descreve o sismo, bastando identificar o maior valor absoluto entre as acelerações. Para (RUIVO, 2010), a importância desse parâmetro reside em sua relação direta com as forças inerciais despertadas pelo sismo, além de poder se correlacionar com a intensidade sísmica, segundo alguns autores.

Entretanto, de acordo com estudos como os de (KOUTSOURELAKIS *et al*, 2002) e (KRAMER, 1996) um terremoto deve ser caracterizado por, além da intensidade, medidas de seu conteúdo de frequência e duração. Para os autores, apenas medidas de amplitude como PGA não são ideais para estimar a intensidade dos terremotos, pois não contêm informações sobre a duração e o conteúdo da frequência de movimentos fortes do solo, especialmente para

problemas que envolvem degradação da rigidez. Consequentemente, o uso de parâmetros de intensidade, juntamente com informações sobre o conteúdo de duração e frequência, para caracterizar os movimentos do abalo sísmico, podem levar a uma melhor previsão dos danos causados pelo terremoto.

Além disso, de acordo com a sua natureza, os sismos podem ser divididos em dois tipos, sismos interplacas, denominado como Tipo 1 (afastado), que estão associados a sismos de elevada magnitude, longa duração e com maior predominância de baixas frequências, e sismos intraplacas, denominado como Tipo 2 (próximo), que correspondem geralmente a magnitude moderada de duração inferior e com predominância de frequências mais elevadas. Os sismos Tipo 1 geralmente percorrem extensos caminhos ao longo da crosta, enquanto o Tipo 2 tem sua área de influência limitada a regiões próximas ao epicentro.

A consideração da ação sísmica na Interação sísmica solo-estrutura pode ser feita de duas maneiras. A primeira delas é a caracterização da ação através do espectro de resposta de projeto e a segunda é através de sinais temporais de acelerações do solo - acelerogramas.

A caracterização da ação sísmica através de um espectro de resposta, segundo (RODRIGUES, 2012) não é uma representação direta da ação, através de grandezas diretamente medidas ou registros, mas sim uma representação dos seus efeitos sobre um conjunto de osciladores lineares de um grau de liberdade. Desta forma, o que se tem é um espectro de resposta simplificado que procura envolver o efeito de todos os terremotos com uma dada probabilidade de ocorrer numa determinada zona sísmica, especificados para classes de terreno e para determinados fatores de amortecimento. Por serem os espectros de projeto desenvolvidos através de análise exaustiva e cuidadosa, e por ser este um método simples e já bem estabelecido, essa é a abordagem mais comum para se realizar análises sísmicas de edifícios e demais estruturas convencionais.

Todavia, a aplicação do método do espectro de resposta não é direcionada a análises não lineares. Para algumas classes de estruturas mais críticas

ou diferenciadas, como usinas nucleares, barragens e edifícios muito altos, uma análise temporal é necessariamente adotada. Além disso, a consideração espectral, embora tenha seus coeficientes que abordam a variação do tipo de solo, não levam em conta os efeitos da ISSE de forma clara e explícita.

Por outro lado, as análises através de históricos temporais de aceleração expressam todas as características reais de um abalo sísmico, garantindo que as informações perdidas nas análises espectrais sejam consideradas na obtenção da resposta sísmica. No entanto, como o registro de acelerações é uma tecnologia relativamente recente, é pouco provável que exista um conjunto de registros reais disponíveis representativos da perigosidade sísmica para serem aplicados especificamente a uma localidade. Aliás, são poucos ou não existem, na maior parte do globo, registros de sismos com as características comumente requeridas para o dimensionamento sísmico (RODRIGUES, 2012).

Como solução para a falta de registros sísmicos reais, sismos artificiais podem ser gerados e adequados ao local de implantação da edificação em conformidade com os espectros definidos pelas normas vigentes. Atualmente a geração de sismos artificiais conta com a ajuda de softwares. O SeismoArtif é um aplicativo capaz de gerar acelerogramas de terremotos artificiais correspondentes a um espectro de resposta específico usando diferentes métodos de cálculo e suposições variadas (SEISMOSOFT, 2020). Ele possui em sua base de dados diversas normas mundiais, inclusive o Eurocódigo 8 (EC8), para a criação de acelerogramas compatíveis com determinações espectrais específicas.

Desta forma, ao utilizar do método de geração artificial de sismos, estes serão criados a partir do regulamento de projeto antissísmico do EC8, que para as componentes horizontais da ação sísmica, define os espectros através das seguintes equações:

$$0 \leq T \leq T_B : S_e(T) = a_g \cdot S \left[1 + \frac{T}{T_B} (\eta \cdot 2,5 - 1) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C}{T} \right]$$

$$T_D \leq T \leq 4s : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right]$$

Onde:

$S_e(T)$ espectro de resposta elástica;

T período de vibração de um sistema linear com um grau de liberdade;

a_g valor de cálculo da aceleração à superfície para um terreno tipo A ($a_g = 1$);

T_B limite inferior do período no patamar de aceleração espectral constante;

T_C limite superior do período no patamar de aceleração espectral constante;

T_D valor que define no espectro o início do ramo de deslocamento constante;

S coeficiente do solo;

η coeficiente de correção do amortecimento, com valor de referência $\eta = 1$ para 5% de amortecimento viscoso.

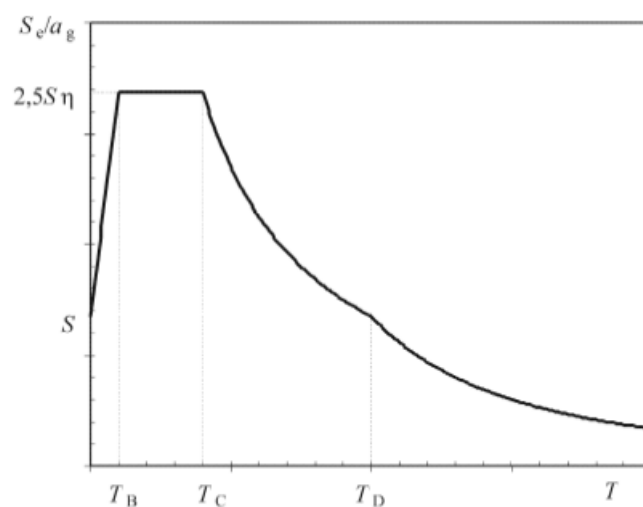


Figura 2.3- Forma do espectro de resposta elástica do EC8

Fonte: (NP EN 1998-1, 2010)

Os valores de T_B , T_C , T_D e do coeficiente de solo S que descrevem a forma do espectro dependem do tipo de terreno. No cenário português, tais valores podem ser obtidos através de quadros, como o 2.1 e 2.2 abaixo, extraídos do anexo nacional.

Quadro 2.1- Valores dos parâmetros descritos dos espectros de resposta elástica do sismo tipo 1 do EC8**Fonte: (NP EN 1998-1, 2010)**

Tipo de terreno	S_{max}	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,0	0,1	0,6	2,0
B	1,35	0,1	0,6	2,0
C	1,6	0,1	0,6	2,0
D	2,0	0,1	0,8	2,0
E	1,8	0,1	0,6	2,0

Quadro 2.2- Valores dos parâmetros descritos dos espectros de resposta elástica do sismo tipo 2 do EC8**Fonte: (NP EN 1998-1, 2010)**

Tipo de terreno	S_{max}	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,0	0,1	0,25	2,0
B	1,35	0,1	0,25	2,0
C	1,6	0,1	0,25	2,0
D	2,0	0,1	0,3	2,0
E	1,8	0,1	0,25	2,0

O EC8 preconiza que os efeitos gerados pela ação sísmica não tem o mesmo impacto socioeconômico em todos os tipos de edificações. Com isso, o EC8 classifica a classe de importância das edificações conforme o Quadro 2.3 abaixo.

Quadro 2.3- Classe de importância de edifícios no EC8**Fonte: (NP EN 1998-1, 2010)**

Classe de importância	Edifícios
I	Edifícios de importância menor para a segurança pública, como por exemplo edifícios agrícolas, etc.
II	Edifícios correntes, não pertencentes às outras categorias.
III	Edifícios cuja resistência sísmica é importante tendo em vista as consequências associadas ao colapso, como por exemplo escolas, salas de reunião, instituições culturais, etc.
IV	Edifícios cuja integridade em caso de sismo é de importância vital para a protecção civil, como por exemplo hospitais, quartéis de bombeiros, centrais eléctricas, etc.

Os fatores multiplicativos (coeficiente de importância) considerados para as classes acima são descritos no Quadro 2.4 em função da classe das construções e do tipo de sismo.

Quadro 2.4- Coeficientes de importância no EC8

Fonte: (NP EN 1998-1, 2010)

Classe de Importância	Acção sísmica Tipo 1	Acção sísmica Tipo 2	
		Continente	Açores
I	0,65	0,75	0,85
II	1,00	1,00	1,00
III	1,45	1,25	1,15
IV	1,95	1,50	1,35

Para a utilização de acelerogramas artificiais, o Eurocódigo 8 traz algumas recomendações, dentre elas a de que devem ser utilizados no mínimo 3 acelerogramas para validar uma análise. A necessidade de mais de um acelerograma de projeto está relacionada ao caráter aleatório deste fenômeno e visa garantir que a composição dos efeitos seja representativa da ação sísmica na excitação das frequências de vibração das estruturas, em termos da energia desenvolvida pelo sismo.

A técnica de geração de sismos artificiais procura assegurar que estes se mostrem consistentes com as características de sismos reais. Este não é um desafio fácil a ser vencido, pois muitos acelerogramas gerados podem se apresentar razoáveis no domínio do tempo, mas o mesmo não se verifica no domínio da frequência, e vice-versa, portanto é preciso cautela com seu uso (RODRIGUES, 2012).

3 INTERAÇÃO DINÂMICA SOLO-ESTRUTURA

3.1 Abordagem histórica

Segundo (KAUSEL, 2009), as primeiras formulações que vieram a desencadear tudo o que se tem hoje sobre a Interação sísmica solo-estrutura datam do decorrer do século 19 e início do século 20. Deste então, vários cientistas forneceram o embasamento teórico juntamente com soluções fundamentais que viabilizaram o desenvolvimento posterior da ISSE.

Com o tempo, as pesquisas foram ganhando força, até que em 1936, através da publicação do cientista alemão Erich Reissner, a teoria da Interação sísmica solo-estrutura dinâmica começou a dar seus primeiros passos fundamentais (ANAND, 2018). Os estudos de Reissner se deram inicialmente com a exploração do comportamento de placas circulares em meios elásticos submetidos a cargas verticais harmônicas no tempo (KAUSEL, 2009).

Após um ano das suas primeiras descobertas, através de outro artigo inovador, (REISSNER, 1937) abordou o problema de um meio elástico excitado na superfície por fontes de torção concentradas e distribuídas e avaliou a resposta de torção de cilindros maciços sob a hipótese de tensões de cisalhamento por contato que aumentavam linearmente com a distância do eixo. Além disso, também abordou o caso de um estrato de solo de profundidade finita, e até discutiu brevemente a generalização de solos cujas propriedades alteram-se continuamente com a profundidade.

Para (KAUSEL, 2009), apesar das simplificações relativas à distribuição das tensões de contato, e considerando as percepções notáveis que Reissner obteve, sem o uso de computadores, pode-se afirmar que ele é de fato, o avô da análise dinâmica na ISSE.

O pós-guerra das décadas de 1950 e 1960 viram uma rápida expansão das atividades na área da ISSE, o que levou à publicação de um número bastante grande de artigos sobre placas circulares carregadas dinamicamente, repousando em um meio, bem como estratos de profundidade finita. No entanto, a grande maioria dos artigos ainda eram baseados em algum tipo de aproximação, seja na forma como as tensões de contato são distribuídas, seja na forma como as equações integrais são resolvidas e avaliadas. Uma característica comum é que elas fornecem apenas resultados em uma faixa limitada de frequências, e todos, exceto Thomson e Kobori, ainda tratavam apenas do problema das placas circulares (KAUSEL, 2009).

(THOMSON E KOBORI, 1963) foram os únicos da época a abordar o problema das fundações retangulares. No entanto, como em outras pesquisas desse período, eles limitaram seus resultados a baixas frequências, e utilizaram várias aproximações que geravam conformidades quase sempre muito grandes com os outros modelos.

É importante salientar que, paralelamente às análises dinâmicas sobre os sistemas de fundação, a interação dinâmica entre uma estrutura e o solo também começava a ser considerada no Japão. (SEZAWA and KANAI, 1935) publicaram um artigo onde modelaram uma estrutura ideal com uma haste cilíndrica fina composta por uma ponta hemisférica na base incorporada em um meio homogêneo, semelhante ao exposto na Figura 3.1. A ponta hemisférica foi submetida a ondas primárias planas, que se propagam verticalmente, e ao atingir a base hemisférica, são parcialmente dispersas em todas as direções e parcialmente transmitidas para a haste, que por sua vez retorna ao solo e contribui para o campo disperso. A partir de então, eles finalmente concluíram que o movimento na estrutura era limitado pela perda de energia na forma de ondas que retornam ao solo. Desta forma, começou-se a ter noção da importância das considerações de Interação Solo-Eestrutura.

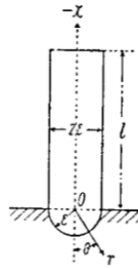


Figura 3.1- Estrutura ideal com uma haste cilíndrica fina composta por uma ponta hemisférica na base incorporada em um meio homogêneo

Fonte: (SEZAWA and KANAI, 1935)

Do outro lado do planeta, na década de 40, (MARTEL, 1940) faz as primeiras menções sobre interação entre solo e estrutura nos Estados Unidos. Através de suas observações, ele cita o resultado de estudos sobre o terremoto de 1933 em Long Beach, juntamente com os efeitos observados no Hollywood Storage Building, bem como as pesquisas japonesas da década de 1930, e opina que em construções sobre solos macios pode-se esperar maiores elevações dos danos do que em edifícios apoiados em solo firme ou nivelado. No entanto, por falta de meios adequados, suas evidências eram pouco confiáveis para basear suas previsões, pois os instrumentos para medir movimentos fortes eram raros em sua época e os registros sísmicos eram feitos em categorias de danos.

Em meados da década de 60, (PARMELEE, 1967) e (PARMELEE, *et al.*, 1968) iniciaram as avaliações dos efeitos da Interação sísmica solo-estrutura por meio de um modelo estrutural bastante simples com três graus de liberdade: translação e a rotação da base, juntamente com o movimento lateral da superestrutura. O sistema foi montado em molas laterais e oscilantes com base em funções de rigidez já existentes. Primeiramente, o autor considerou apenas a rigidez estática, sem amortecimento. Com isso, apenas as funções de resposta harmônica foram obtidas. Na falta de recursos matemáticos adequados para este trabalho, e lutando com limitações numéricas, este estudo obteve sucesso limitado na avaliação dos efeitos da ISSE.

As décadas foram se passando e pequenas evoluções foram alcançadas por pesquisadores e engenheiros, como o caso do célebre engenheiro e

professor da Universidade de Illinois Newmark. (NEWMARK, 1969) em seu trabalho, considerou as respostas de torção de estruturas simétricas provocadas por ondas que passam por baixo da fundação, um fenômeno que ele chamou de “Efeito Tau”, registrando o atraso na excitação de partes da fundação, causado por ondas que atingem primeiro um lado do edifício e depois o outro.

Logo após, (SARRAZÍN, 1970) e (SARRAZÍN, *et al.*, 1972) adotaram o modelo de Parmelee, e através do trabalho utilizando “molas e amortecedores” chegaram a valores relativos de oscilações e frequências estruturais, além do amortecimento efetivo como a frequência do modo de vibração em função da razão da altura do edifício. Em seu estudo, eles também aplicam a teoria da vibração aleatória para avaliar as respostas máximas da estrutura à entrada de ruído. Com isso, os autores chegaram a conclusão de que a Interação sísmica solo-estrutura é favorável ao ponto em que as amplitudes de resposta são reduzidas em comparação com a resposta para uma condição de base fixa.

A partir de então, através das publicações como as de (VELETSOS e WEI, 1971) e (LUCO e WESTMANN, 1971 e 1972), que forneciam soluções rigorosas completas para o problema de placas circulares subjacentes a meios elásticos excitados dinamicamente sobre uma ampla gama de frequências e para um amplo conjunto da razão de Poisson, pode-se dizer que houve uma aceleração no progresso de novas descobertas em relação a ISSE.

Para (KAUSEL, 2009), o principal influenciador desse progresso foi o desenvolvimento de novas indústrias, principalmente na área de geração de energia nuclear, as quais necessitam dos mais diversos meios de proteção contra qualquer fenômeno que venha a ameaçar a integridade das suas estruturas. Além disso, entre 1960 e 1970, também foi uma época marcada pela ascensão de computadores digitais juntamente com métodos numéricos versáteis (especialmente o método dos elementos finitos), que ajudaram a mudar radicalmente o ramo da pesquisa e afastar sua ênfase em análises através de métodos puramente analíticos. Desta forma, problemas matemáticos que antes eram altamente idealizados, como as placas circulares rígidas em meios perfeitamente homogêneos, deram lugar a abordagem de fundações flexíveis de

formato irregular incorporadas em meios não homogêneos ou em camadas, podendo considerar até mesmo efeitos de bastante complexidade como a inelasticidade do solo.

Com a entrada dos computadores em cena, novos programas também vieram a surgir. No entanto, alguns dos programas começaram a ser usados na indústria por pessoas que não tinham o conhecimento adequado das suposições subjacentes. Por outro lado, quando as previsões numéricas começaram a superar o observável, estimulou-se a pesquisa intensiva sobre métodos experimentais e verificação laboratorial, o que ajudou a fornecer uma verificação da realidade dos modelos numéricos complexos que estavam sendo utilizados (KAUSEL, 2009).

Por fim, as análises envolvidas para a obtenção da resposta sísmica de um sistema solo-estrutura sempre foram bastante limitadas, e a partir do momento em que as soluções começaram a ser aprimoradas, inconsistências passaram a ser encontradas. Com isso, o assunto se expandiu enormemente e deu origem a inúmeros trabalhos que, de tempos em tempos, trazem evolução e maior consistência nas análises feitas.

3.2 Fenômenos da Interação sísmica solo-estrutura e importância

Na concepção de edifícios, as fundações são os sistemas responsáveis por receber os carregamentos atuantes sobre a superestrutura e transmiti-los ao solo. Para tal, é importante que esses sistemas sejam capazes não apenas de transmitirem as cargas, como também garantirem a estabilidade e indescalabilidade da estrutura que suporta. Desta forma, o comportamento dos solos passa a ter um papel fundamental para o dimensionamento das estruturas.

Os solos estão a todo o momento suscetíveis a fenômenos vibratórios, a exemplo dos abalos sísmicos, que tendem a causar deslocamentos em sua massa. Esses deslocamentos, dependendo de sua intensidade, podem afetar significativamente uma estrutura, causando danos que comprometem sua segurança. Neste âmbito, faz-se necessário uma análise que leve em consideração não somente os aspectos da estrutura, mas também as características do

solo de fundação, pois elas irão nortear a intensidade das vibrações que atingirão a estrutura.

De acordo com (ANAND, 2018), quando uma fundação está sob influência de um evento sísmico, observa-se que o deslocamento estrutural e o deslocamento do solo não são independentes um do outro. Este processo de interdependência das respostas estruturais e do solo é denominado Interação sísmica solo-estrutura. Deste modo, pode-se afirmar que a ISSE busca avaliar a diferença na resposta estrutural entre fundações apoiadas em solos de condição ideal rígida e fundações apoiadas em solos que expressem a condição real em que a edificação se encontra.

Em outras palavras, usando uma descrição aproximada, pode-se afirmar que o termo Interação sísmica solo-estrutura é frequentemente usado para denotar uma categoria específica de problemas de contato onde, ao longo da superfície de um elemento estrutural encostada ao solo, as tensões que atuam na interface não podem ser definidas sem determinar simultaneamente os campos de deformação e deslocamento ao longo da mesma interface (LAI E MATINELLI, 2013).

No entanto, para (KAUSEL, 2009) as definições são mais complexas. Segundo ele, qualquer um que tenha tentado definir de forma sucinta o termo Interação sísmica solo-estrutura, certamente está ciente de que é bastante difícil chegar a uma definição concisa sem fornecer uma longa explicação.

Para melhor compreensão do conceito, é importante destacar que existem dois fenômenos que ocorrem devido à presença de uma estrutura dinamicamente excitada no local do solo. Os fenômenos são conhecidos como efeitos “cinemáticos” e “inerciais”.

A interação cinemática representa o fenômeno pelo qual o movimento de campo livre (movimento do solo na ausência da estrutura) é diferente daquela em que há algum tipo de estrutura no local. Essa interação é essencialmente um fenômeno de dispersão devido a uma incompatibilidade na impedância (resistência do sistema ao movimento sísmico) dinâmica entre a estrutura e o solo circundante. Portanto, a interação cinemática representa a diferença

entre a resposta estrutural devido ao movimento do solo em campo livre e a resposta calculada usando o movimento do solo quando a presença da estrutura é considerada. A magnitude do fenômeno depende da geometria da estrutura, do tamanho e do embasamento da fundação, da cinemática do movimento de campo livre e do ângulo de incidência das ondas sísmicas (LAI E MATINELLI, 2013).

Por outro lado, a interação inercial é o resultado do acoplamento dinâmico entre uma estrutura e seu aterramento. A deformabilidade do solo aumenta os graus de liberdade da estrutura, como é possível observar na Figura 3.1. Se a deformabilidade e a dissipação de energia de um solo de suporte forem contabilizadas, a resposta de uma estrutura a um determinado movimento de solo seria substancialmente diferente daquela de uma estrutura de base fixa. A magnitude dessa diferença dependerá da incompatibilidade entre a rigidez do solo e da estrutura. Assim, a interação inercial seria insignificante para estruturas fundadas em rochas ou solos muito rígidos, porque nesses casos a resposta estrutural seria quase idêntica à de uma estrutura de base fixa. Por outro lado, o efeito de interação pode ser bastante significativo para estruturas fundadas em solos brandos e altamente deformáveis (LAI E MATINELLI, 2013).

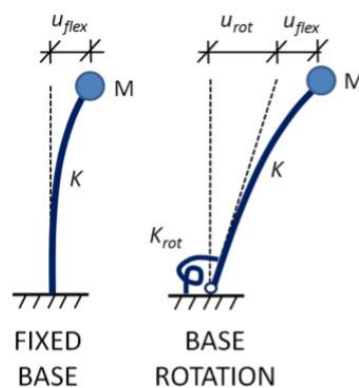


Figura 3.2- Representação de um sistema de um grau de liberdade fixo na base e outro conectado a uma mola rotacional

Fonte: (LAI E MATINELLI, 2013)

Uma das razões pelas quais a ISSE vem sendo estudada há mais de oitenta anos é que a resposta de um sistema estrutural pode ser bastante dife-

rente se o terreno de suporte de uma edificação não for rígido (LAI E MATINELLI, 2013).

De acordo com (KRAMER, 1996), fundações apoiadas sobre rochas são consideradas estruturas de base fixa, e possuem seus movimentos sísmicos muito próximos ao movimento de campo livre. Por outro lado, se a estrutura estiver fundada em solos moles (Figura 3.3), sua fundação apresentará incapacidade de se adaptar às deformações do movimento de campo livre, o que faria com que o movimento da base da estrutura se desviasse do movimento de campo livre. Além disso, a resposta dinâmica da própria estrutura induziria a deformação do solo de suporte.

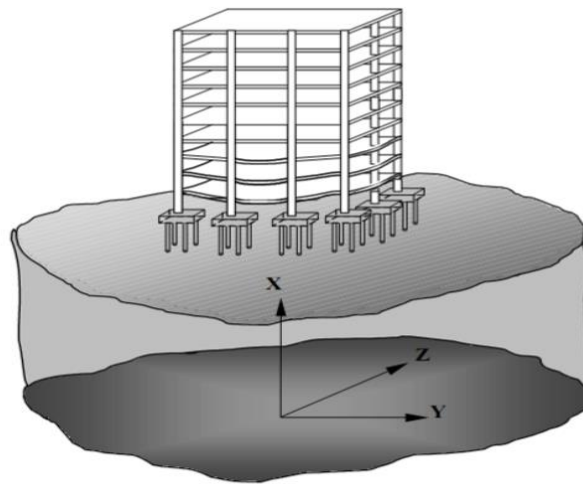


Figura 3.3- Estrutura fundada em solo não rígido

Fonte: (ANTONIAZZI, 2011)

(LAI E MATINELLI, 2013) em seu estudo, identificam que o caso em que a ISSE pode apresentar pouco efeito na resposta dinâmica são os sistemas estruturais altamente flexíveis onde os deslocamentos e as rotações da fundação podem ser pequenos em comparação com os da superestrutura e, por este motivo, podem ser negligenciados. Em outros casos, no entanto, seus efeitos podem ser significativos, como em sistemas estruturais rígidos onde os movimentos da fundação podem representar uma contribuição significativa para a flexibilidade do sistema geral. Portanto, ignorar esses efeitos pode levar a erros grosseiros na avaliação da resposta sob carregamentos dinâmicos vindo de abalos sísmicos. Se a negligência de seus efeitos trará consequências des-

favoráveis ou não, isso dependerá dos detalhes do problema em questão e deve ser avaliado caso a caso.

As principais características que afetam na resposta sísmica da ISSE, e que torna cada caso único em suas análises são: a geometria e rigidez da superestrutura, características da fundação, rigidez do solo e velocidade de propagação das ondas em depósitos estratificados (ANAND, 2018). Tais fatores condicionam os sistemas solo-estrutura a diferentes comportamentos nas respostas dinâmicas.

Consoante a isso, autores como (CIAMPOLI e PINTO, 1995) promoveram trabalhos que aprofundam o conhecimento de como os fatores citados acima interferem nas análises da Interação sísmica solo-estrutura. Eles identificaram através de estudos realizados em pontes a relação entre os deslocamentos e a geometria da estrutura, variando parâmetros como a altura, área transversal da secção, massa, dimensões da fundação, entre outros. Ainda, abordam em seus estudos a importância de se considerar a ISSE no projeto estrutural a partir de três variáveis que levam em consideração todos os aspectos alterados ao longo dos experimentos, que são elas: rigidez relativa do meio de fundação e a estrutura, relações geométricas da estrutura e fundações, dentre outras.

(NGUYEN *et al.*, 2016), por sua vez, estabeleceu as características da fundação, como o tamanho da base em fundações pouco profundas, na resposta sísmica de sistema solo-estrutura.

Também é importante salientar que a demanda por projetos com características arquitetônicas arrojadas tem aumentado significativamente nos últimos anos. (BADRY e SATYAM, 2016) abordam em seu estudo uma comparação entre edificações com três formatos distintos e assimétricos sob a influência de quatro abalos sísmicos de diferentes magnitudes para detectar, dentre outras características, a influência da assimetria em uma situação de perturbação sísmica.

As conclusões de (BADRY e SATYAM, 2016) afirmam que as formas de edificações consideradas mais complexas foram as que apresentaram maio-

res chances de falha sob um terremoto. O estudo levou em consideração os abalos sísmicos do Nepal de 2015, Chamba de 1995, o Uttarkashi de 1999 e o Bhuj de 2001, e para todos os casos as considerações foram as mesmas. Além disso, como as estruturas assimétricas são quase inevitáveis na prática de engenharia civil e considerada a mais vulnerável em eventos sísmicos, é realmente necessário adotar a precisão em tais análises.

Tais alterações, sejam na geometria da estrutura ou propriedades do solo, são responsáveis por mudanças consideráveis na aceleração espectral com relação ao período natural, observáveis nos espectros de resposta. Assim, a mudança no período natural pode alterar consideravelmente a resposta sísmica de qualquer estrutura.

Como citado, as características dos solos são extremamente determinantes no comportamento sísmico dos sistemas solo-estrutura. Por definição, de acordo com (ABREU, 2016), solo é o termo utilizado para descrever uma combinação entre materiais cuja composição é constituída de rochas, compostos oriundos da degradação natural das rochas, material orgânico, água e gases atmosféricos. Os solos podem ser classificados em diferentes categorias, dependendo da sua constituição física, granulometria, teor de água, rocha de origem e tipo de formação. Portanto, devido à complexidade das transformações e grande variação de constituintes, os solos são considerados como compostos heterogêneos de comportamento não linear.

A resposta dinâmica dos solos depende das suas características, nomeadamente a velocidade de propagação das ondas de corte (v_s) e a sua rigidez. A constituição dos solos mencionada acima ocasiona uma enorme variabilidade dessas características, que são responsáveis por diferentes deformações sofridas pelos solos aos estímulos recebidos através de abalos sísmicos. Desta forma, destaca-se a importância de conhecer o tipo de solo em que será inserida uma estrutura, principalmente em locais suscetíveis a atividades sísmicas.

Um abalo sísmico é propagado desde a sua fonte até distâncias que variam de acordo com determinados fatores. No entanto, durante a sua propagação, os tremores podem atingir locais onde se encontram habitações ou até

mesmo complexos urbanos fundados em solos com as mais diversas características. Deste modo, as ondas sísmicas, que se propagam através da rocha, quando atingem os solos locais são levadas até as estruturas que se encontram na superfície, podendo danificá-las. Com isso, a compreensão dos efeitos do solo local em relação aos movimentos da base é de particular importância para a mitigação de possíveis desastres causados pelos tremores de terra (MATINMANESHA e ASHEGHABADIB, 2011).

Para comprovação, diversos estudos têm sido realizados no âmbito de abranger o comportamento sísmico dos solos através da variação das suas mais diversas características.

(SÁEZ *et al.*, 2013), por exemplo, estudaram os efeitos da interação dinâmica solo-estrutura inelástica sobre a resposta sísmica de edifícios de vários andares fundados em solos com diferentes graus de saturação. Por outro lado, (THUSOO *et al.*, 2015), analisaram a diferença nas deflexões em solos com diferentes graus de rigidez, comprovando inclusive que solos brandos possuem maior deflexão em relação aos rígidos e médios.

Também, (TABATABAIEFAR e FATAHI, 2014) elaboraram um estudo com investigações numéricas para os efeitos da interação dinâmica solo-estrutura em um projeto sísmico, com estruturas construídas sobre três classes de solos distintos C_e ($v_s = 600m/s$), D_e ($v_s = 320m/s$) e E_e ($v_s = 150m/s$). De acordo com as análises, os resultados obtidos em termos de deslocamentos laterais para as estruturas construídas sobre a classe de solo C_e ($v_s = 600m/s$) são insignificantes. No entanto, a interação dinâmica solo-estrutura tem efeitos significativos na resposta sísmica de estruturas que repousam nas classes de solo D_e e E_e . O nível de desempenho das estruturas do edifício altera-se de seguro para próximo do colapso na classe de solo E_e , recomendando-se que o projeto sísmico não elástico de estruturas de construção, excluindo a interação sísmica solo-estrutura, de acordo com o autor, não é adequado para garantir a segurança estrutural.

Em resumo, negligenciar ou desconsiderar a ISSE em estruturas fundadas em solos brandos faz com que os engenheiros assumam condições irre-

ais em seus dimensionamentos. Essas condições podem gerar erros grosseiros que, ainda de acordo com (THUSOO *et al.*, 2015), alteram significativamente a resposta estrutural de edificações sujeitas a eventos sísmicos.

Ao tomar por referência os estudos citados acima, o presente trabalho foi desenvolvido com o intuito de analisar o comportamento dinâmico da ISSE para solos brandos. Entretanto, algumas considerações foram feitas com o objetivo de simplificação. O solo foi tratado como homogêneo, ou seja, desconsiderou-se os efeitos da estratificação na propagação das ondas vibratórias. Além disso, foi considerado como um material isotrópico. Para (ABREU, 2016), os modelos simplificados podem não representar o comportamento exato do meio, mas podem fornecer respostas suficientemente precisas para problemas de engenharia complexos.

Atualmente, a Interação sísmica solo-estrutura tem sido considerada como tendo efeitos benéficos na resposta sísmica de uma estrutura para grande parte dos casos. Prova disso são dimensionamentos de projeto em que já se permite reduções do coeficiente sísmico geral por conta das considerações feitas. Para (ANAND, 2018) o raciocínio é válido, pois considerando a ISSE, a estrutura torna-se mais flexível e melhora sua taxa de amortecimento. Por este fato, essas modificações levam a redução do cisalhamento da base em uma estrutura se comparada com a sua consideração de base fixa.

No entanto, há estudos como o de (CARLO *et al.*, 2000) que afirmam que utilizar a Interação sísmica solo-estrutura de forma negligente, especialmente no caso de estruturas rígidas, pode levar a uma subestimação significativa na curva de demanda de ductilidade, e dos deslocamentos no topo da estrutura. Para o caso em questão, que envolve o estudo de pontes, as estruturas flexíveis e delgadas são significativamente afetadas pelo movimento rotacional na base, o que implicaria em grande deslocamento residual no topo da ponte após o evento sísmico.

De forma complementar, (KRAMER, 1996) afirma que os efeitos da ISSE, para alguns casos, podem apresentar efeitos insignificantes, enquanto para outros, um grande efeito pode ser observado na resposta sísmica do siste-

ma. Para o autor, os efeitos tornam-se significantes quando estruturas rígidas são suportadas por solos relativamente brandos.

Tal fato é comprovado por (KRAMER, 1996) através de ilustrações onde mensura os efeitos da Interação sísmica solo-estrutura através de parâmetros adimensionais baseados em características tanto dos solos quanto das estruturas. Para exemplificar, um dos parâmetros considerados é a taxa de rigidez, expressa da seguinte maneira:

$$\bar{s} = \frac{(\omega_0 * h)}{v_s} \quad (1)$$

Onde a taxa de rigidez (\bar{s}) é proporcional à frequência natural de vibração da estrutura (ω_0); a altura da coluna de solo (h) e a velocidade de propagação das ondas de corte do solo (v_s). Segundo o autor, valores elevados da taxa de rigidez representam as situações onde a consideração da ISSE é indispensável. Desta forma, as estruturas relativamente rígidas repousadas em solos com baixas velocidades de propagação representam os casos críticos para o comportamento dinâmico ISSE de um sistema.

A velocidade de propagação das ondas de corte é um dos parâmetros fundamentais que define a classe de rigidez de um solo e, como citado acima, tem importância fundamental na determinação do seu comportamento sísmico. Valores mais baixos para a velocidade caracterizam solos brandos, enquanto valores mais altos definem os solos com maior rigidez. A norma (NP EN 1998-1, 2010) categoriza os solos de acordo com parâmetros geométricos onde a velocidade de propagação é um parâmetro chave (Ver Quadro 3.1).

Quadro 3.1- Tipos de solo

Fonte: (NP EN 1998-1, 2010)

Tipo de terreno	Descrição do perfil estratigráfico	Parâmetros		
		$v_{s,30}$ (m/s)	N_{SPT} (palcadas/30 cm)	c_u (kPa)
A	Rocha ou outra formação geológica de tipo rochoso, que inclua, no máximo, 5 m de material mais fraco à superfície	> 800	–	–
B	Depósitos de areia muito compacta, de seixo (cascalho) ou de argila muito rija, com uma espessura de, pelo menos, várias dezenas de metros, caracterizados por um aumento gradual das propriedades mecânicas com a profundidade	360 – 800	> 50	> 250
C	Depósitos profundos de areia compacta ou medianamente compacta, de seixo (cascalho) ou de argila rija com uma espessura entre várias dezenas e muitas centenas de metros	180 – 360	15 - 50	70 - 250
D	Depósitos de solos não coesivos de compactidade baixa a média (com ou sem alguns estratos de solos coesivos moles), ou de solos predominantemente coesivos de consistência mole a dura	< 180	< 15	< 70
E	Perfil de solo com um estrato aluvionar superficial com valores de v_s do tipo C ou D e uma espessura entre cerca de 5 m e 20 m, situado sobre um estrato mais rígido com $v_s > 800$ m/s			
S_1	Depósitos constituídos ou contendo um estrato com pelo menos 10 m de espessura de argilas ou siltes moles com um elevado índice de plasticidade ($PI > 40$) e um elevado teor de água	< 100 (indicativo)	–	10 - 20
S_2	Depósitos de solos com potencial de liquefação, de argilas sensíveis ou qualquer outro perfil de terreno não incluído nos tipos A – E ou S_1			

Assim, assumindo que a velocidade de propagação das ondas de corte condiciona o comportamento sísmico de um solo, diversos autores abordam em seus estudos as principais distinções entre um solo de baixa e alta velocidade.

(REINOSO e ORDAZ, 2000) asseguram que um dos efeitos da presença de solos brandos é o aumento da duração das vibrações sísmicas, ou seja, quanto menor for a velocidade de propagação, maior será a duração do sismo, o que se relaciona diretamente com os danos. Suas conclusões foram baseadas através da seguinte expressão empírica da duração (D), em segundos, em termos de magnitude sísmica (M), distância à ruptura sísmica (R) e período dominante do solo (T_s).

$$D = 0.01e^M + (0.036M - 0.07)R + (4.8M - 16)(Ts - 0.5) \quad (2)$$

O período dominante de uma coluna de solo está relacionado diretamente com a rigidez do solo, onde quanto maior o seu valor, mais brando é o solo, sendo adotado 0,5 como valor de referência para solos rígidos. A duração, segundo o autor, é o parâmetro que relaciona adequadamente um sismo ao seu poder de dano, ou seja, há grande relevância na consideração das características do solo subjacentes às construções.

Além disso, para solos brandos, as amplitudes de ondas sísmicas, de acordo com (SAFAK, 2001), aumentam significativamente à medida que passam pelas camadas e se aproximam da superfície. Esse fenômeno, vulgarmente conhecido como amplificação do local, é de extrema importância para determinar o impacto e a extensão dos danos nas estruturas, por isso, é fundamental que seja considerada no projeto de estruturas em solos deste tipo.

O aumento da amplitude ocorre devido à baixa impedância de camadas do solo próximo a superfície. A impedância pode ser definida como o produto da densidade de massa do solo e da velocidade de propagação das ondas. Na prática, o termo amplificação do local é usado para avaliar diferenças nos movimentos do solo de dois locais próximos.

Desta forma, o cálculo da amplificação será feito utilizando o princípio da conservação de energia, isto é, negligenciando as perdas devido ao amortecimento. Seguindo a pesquisa de (SAFAK, 2001), o fluxo de energia é definido pela seguinte equação:

$$E(t) = \frac{1}{2}(\rho v_s)x^2(t) \quad (3)$$

Onde ρv_s é a impedância do meio com ρ sendo a densidade de massa, v_s a velocidade de propagação das ondas e $x(t)$ a velocidade do abalo sísmico. Se a energia permanece constante durante a propagação, uma alteração na impedância do meio deverá ser compensada por uma alteração na veloci-

dade de agitação. Portanto, de acordo com (JOYNER e BOORE, 1988), se a mudança na impedância ocorrer de forma gradual, a expressão para a amplitude pode ser definida como:

$$A = \left[\frac{x_2(t)_{m\acute{a}x}}{x_1(t)_{m\acute{a}x}} \right] = \sqrt{\frac{(\rho v_s)_1}{(\rho v_s)_2}} \quad (4)$$

Por outro lado, caso a variação da impedância ocorra de forma acentuada, de acordo com (SAFAK, 1995), a expressão se tornará:

$$A = \left[\frac{x_2(t)_{m\acute{a}x}}{x_1(t)_{m\acute{a}x}} \right] = \frac{(\rho v_s)_1}{(\rho v_s)_2} \quad (5)$$

Em estudo realizado por (ESTÊVÃO *et al*, 2007) foi analisada a amplificação dos esforços em estruturas de edifícios correntes fundadas em solos brandos na região sul de Portugal. Através dos resultados obtidos pelos autores é possível identificar uma amplificação espectral máxima de até 3,4 vezes para solos brandos com alta plasticidade em relação ao espectro definido pelo EC8 para solos rígidos (denominados como solo tipo A), como ilustrado pela Figura 3.4. Desta forma, é explicitado pelo estudo que atividades sísmicas em solos de velocidade de propagação das ondas de corte inferiores a 100m/s podem gerar danos elevados as estruturas, evidenciando a importância da ISSE para projetos desenvolvidos neste local.

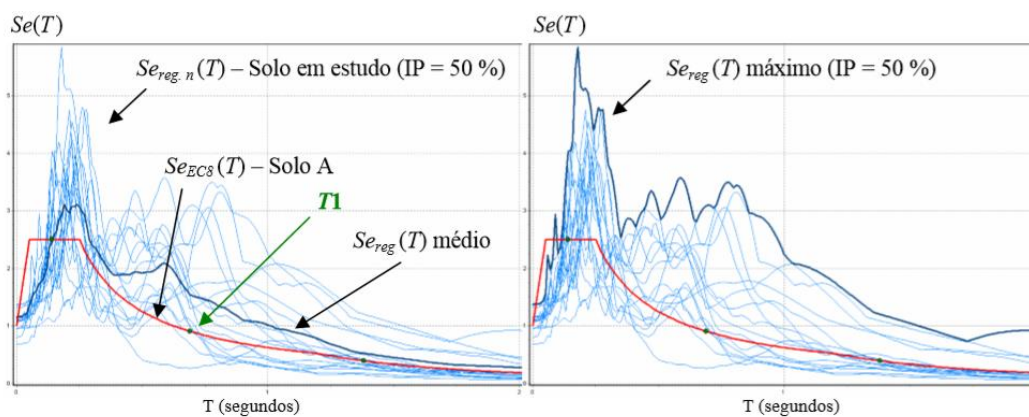


Figura 3.4- Espectros de resposta filtrados e normalizados à aceleração de pico do afloramento rochoso com Índice de plasticidade da camada de solo igual a 50 %

Fonte: (ESTÊVÃO *et al*, 2007)

(YUNITA *et al*, 2018) também aborda a amplificação através de um caso de estudo de uma cidade chamada de “Banda Aceh”, na Indonésia, que está potencialmente exposta a um risco sísmico e seus efeitos de amplitude. A estimativa da amplificação sísmica da cidade é necessária para qualquer esforço de mitigação dos impactos sísmicos, pois a cidade está fundada sob uma camada espessa de solo mole. A Figura 3.5 ilustra os valores das amplificações para solos brandos em três locais distintos sob influência dos mesmos sismos.

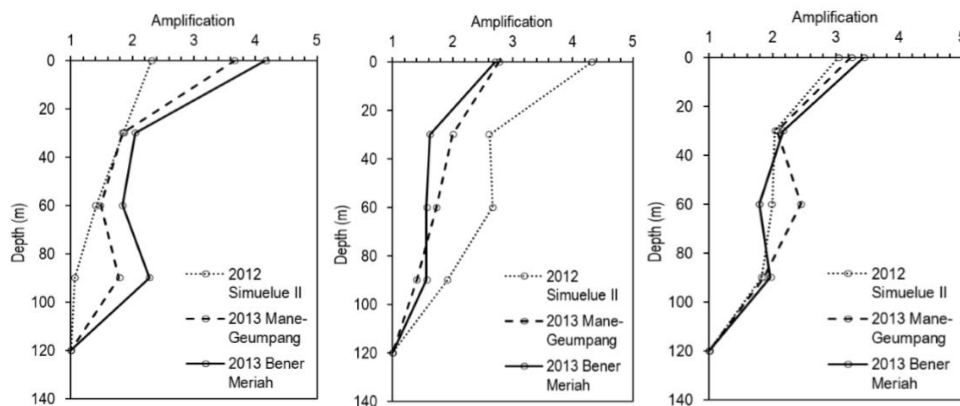


Figura 3.5- Amplificação das ondas sísmicas em três perfis de solos brandos

Fonte: (YUNITA *et al*, 2018)

No EC8, a amplificação da resposta sísmica por influência da geologia local nos espectros de resposta de referência é representada pelo fator S. Este fator é considerado unitário para terrenos rochosos e são propostos outros valores para os diversos tipos de solo. Os valores estão explicitados nos Quadros 2.1 e 2.2 e ilustrados na Figura 3.6 abaixo e estão divididos em dois espectros de acordo com o tipo de sismo.

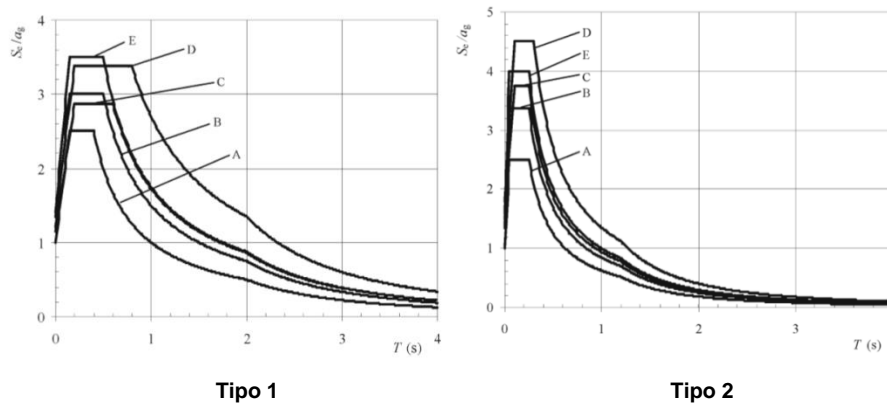


Figura 3.6- Espectro de resposta elástica do EC8 para sismos tipo 1 e 2 respectivamente

Fonte: (EN 1998-1, 2010)

Diante do exposto, para o presente estudo, o solo considerado será o tipo D de acordo com o Quadro 3.1 retirado da (NP EN 1998-1, 2010) mencionado acima. Este solo se enquadra nas características que o torna brando e, portanto, pode apresentar severas consequências a edificações diante de ações sísmicas.

3.3 Método de análise

As análises da Interação sísmica solo-estrutura podem ser realizadas de diferentes modos, como através da utilização do modelo de Winkler (modelo de mola), métodos numéricos de análise, dentre outros.

Um modelo bastante simples proposto por Winkler para o comportamento do solo admite que o deslocamento de qualquer ponto situado na superfície do solo é diretamente proporcional a um carregamento aplicado no ponto e independe de outros carregamentos externos, aplicados em pontos distintos do solo (Figura 3.7). A equação abaixo representa a descrição matemática do modelo, onde $Q(x, y)$ é o carregamento aplicado no solo, k é a rigidez do solo e $u(x, y)$ o deslocamento sofrido em um ponto qualquer da superfície.

$$Q(x, y) = ku(x, y) \quad (6)$$

Fisicamente, este modelo consiste em um sistema de molas mutuamente independentes entre si. Com isso, uma das hipóteses assumidas no modelo é que os deslocamentos são determinados para pontos imediatamente abaixo da região carregada, sendo nulos os deslocamentos fora dessa área. Tal simplificação pode, dependendo do problema analisado, produzir grandes desvios das respostas.

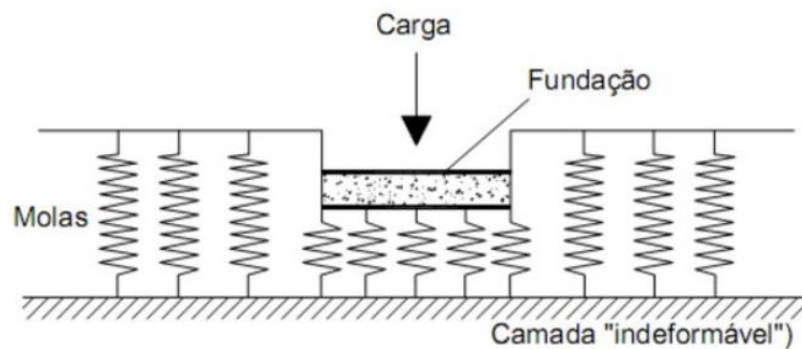


Figura 3.7- Modelo de Winkler para representação do solo

Fonte: (NOGUEIRA, 2016)

Para (COLARES, 2006), a superfície de deslocamentos, determinada pelo modelo de Winkler é delimitada pela região carregada, restringindo sua aplicabilidade a colunas de solos com baixa coesão. No entanto, a prática experimental mostra que a superfície de deslocamentos não se desenvolve apenas imediatamente abaixo da região carregada, mas também dentro de zonas limitadas fora da área carregada, fato que justifica o modelo não ser adequado para análises ISSE complexas.

(FAR, 2017), em seu estudo comparativo afirma que é o emprego de métodos numéricos, tal como o método dos elementos finitos, que torna possível a modelação de geometrias e condições complicadas do solo com alto grau de precisão, usando elementos bidimensionais ou tridimensionais. Além disso, (GUTIERRES e CHOPRA, 1978) apontaram que os métodos numéricos são os mais adequados e precisos para a análise da ISSE. (FAR, 2017) traz em seu estudo embasamento teórico que comprova a prioridade do uso dos métodos numéricos para tal tipo de análise.

Ao tomar o método numérico como referência, as análises da Interação sísmica solo-estrutura podem ser categorizadas de duas diferentes formas, são elas o método direto e método indireto (ou de subestruturas).

O método indireto ou de subestruturas é designado pela divisão do sistema em subestruturas que são analisadas de forma independente e posteriormente sobrepostas para obter a resposta estrutural. De acordo com (KRAMER, 1996) tal modelo “isola” as duas principais causas da interação sísmica solo-estrutura: a incapacidade das fundações de corresponder à deformação do campo livre e o efeito da resposta dinâmica do sistema estrutura-fundação ao movimento do solo de suporte. Como eles dependem da superposição, estão limitados à análise de sistemas lineares (ou equivalentes lineares). A Figura 3.8 exemplifica uma análise direta e indireta onde solo e estrutura são consideradas em duas etapas distintas de análise.

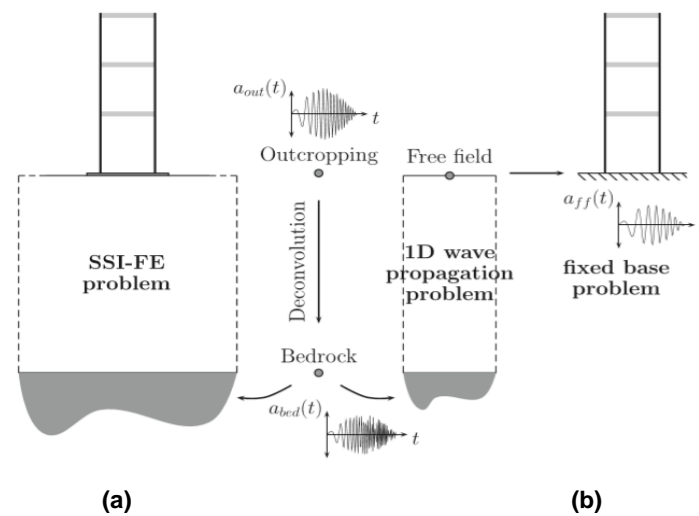


Figura 3.8- Comparação entre o método direto (a) e método indireto (b) de análise

Fonte: (SÁEZ, 2013)

O método indireto, segundo (ANAND, 2018) é amplamente utilizado nas análises da Interação sísmica solo-estrutura (ISSE). No entanto, (RAHMANI *et al.*, 2016) em um estudo de avaliação do método indireto para problemas de Interação sísmica solo-estrutura em pontes concluiu que dividir um sistema em subestruturas apresenta superestimação das respostas sísmicas. O autor ainda cita que representar a flexibilidade das fundações por um conjunto de

molares e amortecedores linearizados não é um método de simulação adequado para considerar a ISSE, principalmente em pontes.

Por outro lado, na abordagem direta, o solo e a estrutura fazem parte do mesmo modelo, que é analisado em uma única etapa usando uma das várias técnicas de discretização numérica como, por exemplo, o Método dos Elementos Finitos que foi utilizado para a realização do presente trabalho. Desta forma, o solo pode ser modelado com elementos tridimensionais sólidos e a estrutura com elementos de barra (LAI E MATINELLI, 2013), como mostrado na Figura 3.8.

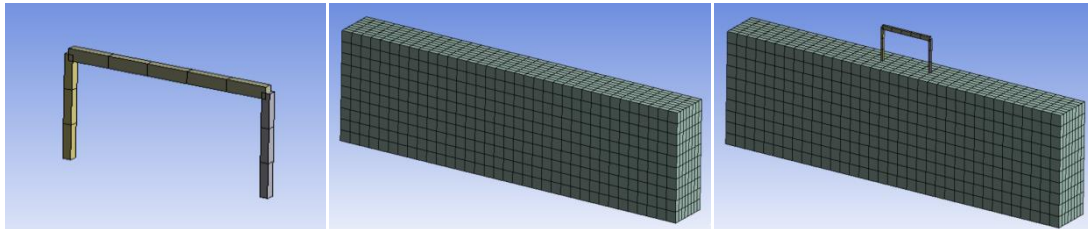


Figura 3.9- Sistema solo-estrutura unificados para análise pelo método direto

Fonte: autoria própria

Embora o método direto permita a consideração uma série de fatores que representam de forma mais realista a ISSE, segundo (LAI E MATINELLI, 2013) essa abordagem pode ser computacionalmente muito cara, dependendo do tamanho do modelo, das leis constitutivas adotadas para descrever quer a resposta dinâmica de solos quer a dos elementos estruturais, o tipo de condições de fronteira cinemático nas interfaces estrutura-solo dentre outros. Para que os resultados sejam significativos, o método direto também exige uma caracterização detalhada tanto do solo quanto da estrutura.

Tal técnica torna-se útil ao passo que permite incorporar os mais diversos efeitos ao sistema, sejam eles de linearidade ou não linearidade, homogeneidade ou heterogeneidade, isotropia ou anisotropia, dentre outros, o que permite uma análise bastante completa e rigorosa. Também, (DUTTA e ROY, 2002) recomendam que modelar o sistema de acordo com o conceito de elementos finitos é um método muito eficiente, que deve ser empregado para estudar o efeito da Interação sísmica solo-estrutura com rigor.

A relevância do uso do método direto é abordada pelo estudo comparativo de (RAHMANI *et al.*, 2016). Neste trabalho as análises da resposta sísmica de sistemas de pontes junto às capacidades do método justificam a importância de uma análise de alta fidelidade da Interação sísmica solo-estrutura, a fim de melhorar a segurança sísmica e reduzir despesas injustificadas.

4 ESTUDO PARAMÉTRICO DA INTERÇÃO SOLO-ESTRUTURA EM EDIFÍCIOS CORRENTES

O estudo paramétrico realizado consistiu em determinar as respostas sísmicas temporais de um conjunto de sistemas solo-estrutura considerando a interação sísmica solo-estrutura (ISSE), a fim de compará-las em termos de acelerações espectrais com os espectros estabelecidos pelo Eurocódigo 8. Conforme os resultados obtidos em termos de acelerações máximas estruturais, poder-se-ão apontar os parâmetros mais influentes na consideração da quantificação de efeitos da interação sísmica solo-estrutura no processo de concepção de projetos de engenharia.

O passo inicial para o desenvolvimento do estudo foi a modelação do sistema solo-estrutura. Para tal, houve a necessidade da utilização de um *software* que possibilitasse a criação de um modelo numérico com todas as características desejadas e que fizesse sua discretização numérica para uma análise mais completa do comportamento sísmico do sistema em interação.

As modelações utilizadas no trabalho consistem em três estruturas do tipo “*Shear Building*” com características dinâmicas distintas, determinadas por diferentes frequências naturais de vibração. Toda estrutura possui uma frequência de vibração própria que define o seu comportamento dinâmico perante eventos sísmicos, e é desta forma que o estudo busca, através de estruturas fictícias, generalizar seus resultados para estruturas reais com características dinâmicas semelhantes.

Além do mais, diversos solos brandos com propriedades diferentes foram utilizados. O EC8 divide os tipos de solos de acordo com características que estão compreendidas em intervalos de valores como citado no Quadro 3.1. Com isso, para abranger todo o intervalo desejado e trazer um estudo mais

consistente, três solos com velocidades de propagação de ondas de corte distintas foram empregadas dentro do intervalo correspondente ao solo brando (tipo D no EC8). Foram então modeladas três colunas de solo com diferentes alturas (h).

Com os sistemas definidos, a próxima etapa foi determinar a ação sísmica para as análises da interação sísmica solo-estrutura (ISSE). Como já mencionado, as ações sísmicas são expressas através de espectros de resposta elástica definidos pelo Eurocódigo 8 e, buscando melhor atender cada situação, consideram diversos parâmetros do sistema, como tipo do solo em que a estrutura está fundada, a classe de importância da estrutura, qual o tipo de sismo, dentre outros. Para cada parâmetro há um coeficiente que busca deixar a ação sísmica compatível com a condição real em que se está projetando, e tudo isso foi levado em consideração para a formulação do estudo.

Em seguida, foi necessário gerar os acelerogramas artificiais compatíveis com o espectro adequado e definido pelo EC8 para inserir as acelerações no sistema a fim de se obter as respostas desejadas. Para tal, um *software* de geração de sismos artificiais foi utilizado, onde se criaram três acelerogramas para o sismo tipo 1 e três acelerogramas para o sismo tipo 2.

Após definir os sistemas e as ações sísmicas, o próximo passo foi executar as análises dinâmicas para obter as respostas sísmicas da ISSE, nomeadamente as acelerações máximas estruturais. O processo se deu através de simulações computacionais que utilizaram o método dos elementos finitos para determinar o comportamento dinâmico linear dos sistemas. Assim, os resultados estão prontos para serem comparados e discutidos a fim de determinar a importância da Interação sísmica solo-estrutura no comportamento sísmico de estruturas de edifícios em solos brandos e proporcionar indicações práticas para projetos em termos de espectros de resposta com a ISSE.

4.1 Acelerogramas sísmicos

Na ausência de sinais sísmicos reais representativos da perigosidade sísmica de Portugal, as ações variáveis no domínio do tempo foram inseridas

no modelo através de acelerogramas gerados artificialmente compatíveis com os espectros de respostas definidos pelo Eurocódigo 8 para afloramento rochoso. A partir de espectros referência é possível, através de um *software* especializado, gerar acelerogramas compatíveis.

O primeiro passo foi selecionar a norma (Eurocódigo 8), o que tornou posteriormente possível a inserção de dados como classe de importância, tipo do solo, amortecimento, aceleração espectral e tipo da ação sísmica para servir de referência na criação de um espectro.

Para a definição da classe de importância foi utilizado o Quadro 2.3 retirado do EC8. No presente trabalho foi adotado a classe II de importância correspondente a edifícios correntes, com o coeficiente de importância de 1,0 de acordo o Quadro 2.4 que contém os coeficientes para cada classe.

Como mencionado anteriormente, é através dos solos rígidos que as ondas sísmicas se propagam até atingirem as mais diversas extensões ao seu alcance. Tais solos são determinados pelo EC8 como tipo A. Portanto, este foi o solo adotado para criação do espectro que gerou os movimentos de base pretendidos para o estudo.

Com o intuito de aprofundar as análises, foram adotados abalos sísmicos tanto interplacas quanto intraplacas, determinados pelo Anexo Nacional português presente no Eurocódigo 8 como tipo 1 e tipo 2 respectivamente. Desta forma, respeitando as exigências da devida norma, foram necessários três acelerogramas para cada tipo de sismo, contabilizando um total de seis sismos para realização das análises.

A aceleração espectral em rocha (a_g) para o estudo em questão foi determinada pelo valor de $1m/s^2$. Assim, os efeitos obtidos através do estudo para a aceleração unitária podem ser multiplicados para casos semelhantes, porém com acelerações distintas.

Através dos dados acima, a Figura 4.1 traz a configuração dos espectros utilizados para o desenvolvimento do estudo.

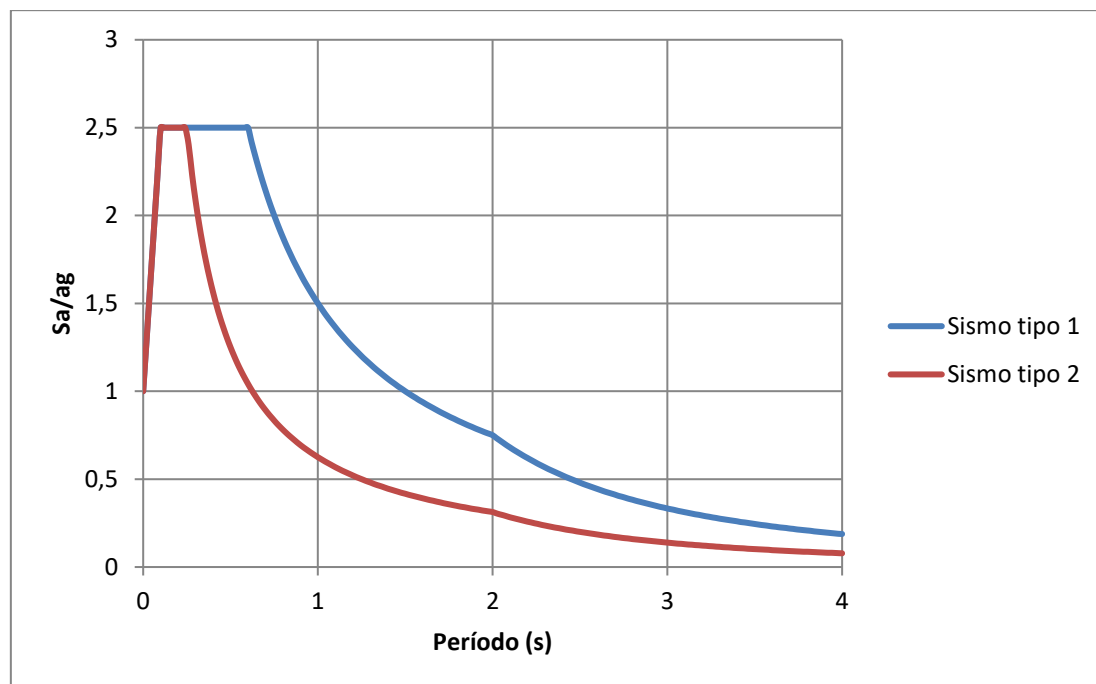


Figura 4.1- Espectros de resposta elástica de referência (EC8) para a criação dos acelerogramas artificiais

Fonte: autoria própria

Definido os valores para o espectro, passou-se à criação dos acelerogramas sintéticos. Esse tipo de acelerograma tende a ser bastante realista e pode ser gerado através de conhecimentos básicos da história de um terremoto e das condições do solo em relação ao local de interesse. Este método é capaz de combinar com eficiência dados de entrada simples com bons resultados (SEISMOARTIF, 2020).

Para a criação dos acelerogramas sintéticos, o SeismoArtif requer informações iniciais sobre o tipo de sismo, sua magnitude e os efeitos do solo (não considerado para este trabalho). O tipo de sismo foi determinado para as duas situações desejadas (interplacas e intraplacas) onde posteriormente foram atribuídos valores em quilômetros para as distâncias ao espectro correspondentes ao ambiente tectônico da zona. Por fim, os efeitos do solo foram desconsiderados para que a propagação seja considerada apenas em rocha. As distâncias aos espectros e características principais dos cenários sísmicos podem ser observadas no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Cenários sísmicos utilizados na geração dos acelerogramas sintéticos

Fonte: adaptado de (ROQUE, 2009)

Tipo	Magnitude	Distância do epicentro (km)	Período de retorno (anos)
Afastado (1)	7,4	205	475
Próximo (2)	6,7	20	475

Com a inserção dos dados finalizada, geraram-se no SeismoArtif os acelerogramas sintéticos de referência para cada cenário, a partir dos quais foram gerados os seis acelerogramas artificiais posteriormente utilizados nas análises da Interação sísmica solo-estrutura. Cada acelerograma sintético pode gerar diversos outros artificiais. Os acelerogramas sintéticos encontram-se no Anexo II do presente trabalho.

O método de cálculo padrão fornecido pelo *software* para a criação dos acelerogramas artificiais é baseado no algoritmo de (HALLODORSON E PAPPAGEORGIOU, 2005). Os acelerogramas artificiais são definidos a partir de um sintético, compatível com o espectro criado, e adaptando seu conteúdo de frequência usando o Método de Transformação de Fourier (SEISMOARTIF, 2020).

Nesta etapa, o usuário tem a possibilidade de definir os parâmetros básicos pretendidos para o acelerograma, como o intervalo de tempo (*time-step*) em que as acelerações serão consideradas. A partir do *time-step* definido como 0,01 segundos e dos acelerogramas sintéticos de referência reproduziram-se três acelerogramas artificiais para cada cenário posteriormente utilizados nas análises de Interação sísmica solo-estrutura. Os principais parâmetros dos ace-

lerogramas artificiais estão no quadro 4.2, enquanto os acelerogramas estão representados no Anexo II.

Quadro 4.2- Principais parâmetros dos acelerogramas artificiais

Fonte: autoria própria

Tipo	Magn.	Distância (km)	Período de retorno (anos)	Sismos	PGA (m/s ²)	Freq. Dominante (Hz)	Duração (s)
Afastado	7,4	205	475	1	0,980	2	45,13
				2	0,975		45,23
				3	0,966		45,33
Próximo	6,7	20	475	1	0,924	4	10,03
				2	0,719		10,13
				3	1,341		10,23

A partir dos acelerogramas artificiais obtidos, extraíram-se os valores das acelerações no domínio do tempo em modelo de uma tabela para que pudessem ser compilados pelo ANSYS (*software* que realizou as análises dinâmicas).

4.2 Solos

As características dos solos brandos adotados para as análises foram baseadas nas velocidades de propagação que o EC8 define para o solo tipo D, representado do Quadro 3.1 da presente dissertação.

A velocidade de propagação das ondas de corte tem sua importância atrelada às principais características geotécnicas do solo. Dada a sua importância no comportamento dinâmico de um solo, vários trabalhos têm relacionado empiricamente v_s com propriedades mecânicas do solo, como o módulo de distorção (G) ver expressão 7 do Eurocódigo 8 (EM 1998-5,2010). Para relacionar o módulo de distorção (G) e o módulo de *Young* (E) do solo utilizou-se a expressão (8) válida para comportamento elástico linear dos materiais, onde ν é o coeficiente de Poisson.

$$G = \rho v_s^2 \quad (\text{EC8}) \quad (7)$$

$$E = (1 + \nu)2G \quad (8)$$

A velocidade de propagação das ondas de corte v_s para esse tipo de solo é definido pelo Eurocódigo 8 como sendo valores inferiores a 180m/s. Para as análises poder ser minimamente representativa da variação dos solos brandos, três velocidades foram adotadas pertencentes ao intervalo de forma a abrangê-lo por completo, que são 170m/s, 140m/s e 100m/s. Valores inferiores a 100m/s não foram adotados, pois segundo a (NP EN 1998-1), eles podem produzir efeitos anômalos de amplificação do movimento sísmico local e de interação entre o solo e a estrutura.

Para as demais características dos solos, como a densidade mássica e coeficiente de Poisson foram adotados valores de referência para solos brandos (THUSOO *et al.*, 2015). Assim, o amortecimento de referência adotado foi de 5% baseado em estudos como o de (MATINMANESHA e ASHEGHABADIB, 2011) e (CARLO *et al.*, 2000). O Quadro 4.3 resume as características adotadas para os três tipos de solo brando considerados neste estudo.

Quadro 4.3- Características dos solos brandos utilizados neste trabalho

Fonte: autoria própria

	Vs(m/s)	ρ (kg/m ³)	Poisson	G (MPa)	E (MPa)	Amortecimento (%)
Solo 1	100	1700	0,4	17	47,6	5
Solo 2	140	1700	0,4	33,32	93,3	5
Solo 3	170	1700	0,4	49,13	137,56	5

Para o modelo geométrico do solo adotou-se um bloco maciço paralelepípedo com três alturas (h) diferentes. Para a largura (b) foi adotado um valor de referência padrão entre os pórticos de 4 metros (Figura 4.2) baseado no estudo de (SAEZ *et al.*, 2013). O comprimento de 35 metros foi adotado depois de simulações estáticas preliminares onde o peso da estrutura passou a não

influenciar no deslocamento lateral do solo, ou seja, seu comportamento passou a ser o de um meio semi-infinito. Para as alturas das colunas de solo foram definidos os valores de 5, 10 e 15 metros.

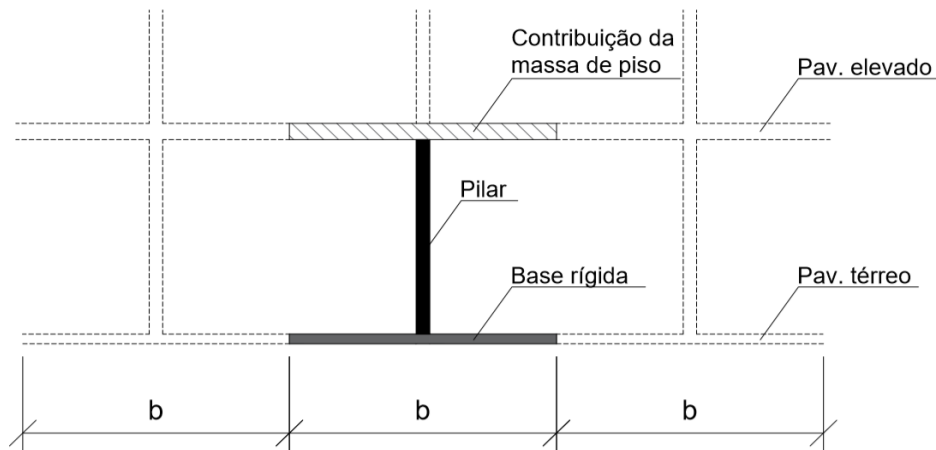


Figura 4.2- Representação esquemática do corte de um pórtico transversal à direção do sismo com indicação da largura (b) de influência dos pórticos na direção do sismo

Fonte: autoria própria

4.3 Pórticos

Para a obtenção da resposta sísmica de uma estrutura genérica que facilmente descreva as características desejadas, foi adotado o modelo estrutural *Shear Building* (comportamento dinâmico expresso no Anexo I). Um modelo *Shear Building* pode ser definido como uma estrutura na qual não há rotação de uma seção horizontal no nível dos pisos. Além disso, aproxima cada pavimento de uma edificação a um pórtico de piso rígido onde cada andar é descrito por um sistema massa-mola-amortecedor.

Para considerar um edifício desta forma deve-se assumir que: a massa total da estrutura está concentrada no nível dos pisos; as lajes ou vigas dos pisos são infinitamente rígidas em comparação com as colunas; são desprezíveis as deformações axiais dos pilares, ou seja, só há movimento horizontal nas lajes. Essas simplificações transformam o problema de uma estrutura com um número infinito de graus de liberdade a uma estrutura que possui apenas tantos graus quanto massas aglomeradas ao nível dos pavimentos. A segunda simplificação introduz o requisito de que as ligações entre viga-coluna sejam

fixadas contra rotação. A Figura 4.5 ilustra o modelo *Shear Building* para um sistema com apenas um grau de liberdade (movimento horizontal do piso).

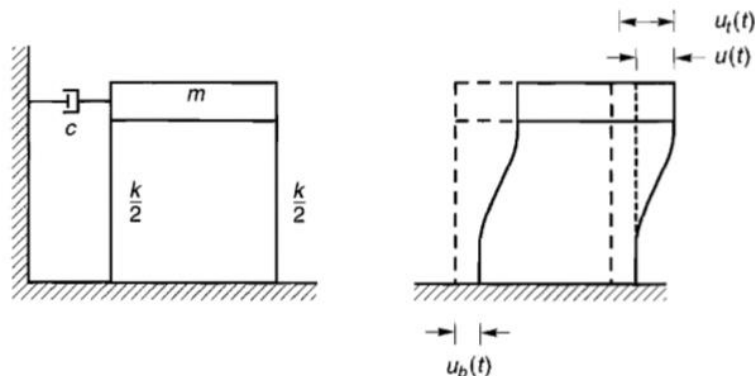


Figura 4.3- Caracterização e deslocamentos sísmicos horizontais de um modelo *Shear Building* de um grau de liberdade

Fonte: (KRAMER, 1996)

Nas hipóteses do modelo, considerou-se ainda que os pilares são considerados engastados entre os pavimentos, de modo que o coeficiente de rigidez k de corte horizontal de cada coluna é dado pela expressão:

$$k = \frac{12EI}{L^3} \quad (9)$$

onde E é o módulo de Young (ou módulo de elasticidade), I é o momento de inércia da seção do pilar e L a altura do pilar.

(PAZ e KIM, 2019) afirma que somente se a estrutura puder assumir uma forma única durante o movimento (sistema com um grau de liberdade) ela irá fornecer a resposta dinâmica exata. Caso contrário, quando a estrutura demonstrar mais de uma forma possível durante o movimento, os resultados serão apenas uma aproximação ao verdadeiro comportamento dinâmico.

Desta forma, a estrutura utilizada para o desenvolvimento do trabalho é um modelo *Shear Building* de apenas um grau de liberdade. Essa estrutura, por ser comparada a um sistema massa-mola, cuja equação de equilíbrio dinâmico é:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = F(t) \quad (10)$$

onde m é a massa da estrutura, c é a constante de amortecimento e k é a rigidez das colunas. Os vetores $\ddot{u}(t)$, $\dot{u}(t)$ e $u(t)$ representam a aceleração, velocidade e deslocamento da estrutura, respectivamente, e $F(t)$ representa a força excitadora aplicada.

$$F_{inércia}(t) = m\ddot{u}(t) \quad (11)$$

$$F_{elástica}(t) = ku(t) \quad (12)$$

Em termos de valores máximos, as equações podem ser igualadas para obter uma importante relação entre a deformação e a aceleração da estrutura.

$$m\ddot{u}_{máx} = ku_{máx} \quad (13)$$

$$\ddot{u}_{máx} = \frac{k}{m}u_{máx} \quad (14)$$

A relação entre rigidez e massa pode ser substituída pela frequência natural de vibração, resultando na seguinte expressão.

$$\ddot{u}_{máx} = \omega^2 u_{máx} \quad (15)$$

A relação expressa em (15) torna-se importante à medida que os resultados obtidos através das análises em termos de deformação da estrutura podem ser facilmente convertidos em acelerações através do conhecimento da frequência natural de vibração da estrutura.

Para o trabalho foram utilizados três pórticos do modelo *Shear Building* distintos com $5m$ de comprimento e $3m$ de altura para as análises cujas carac-

terísticas materiais e geométricas estão descritas no Quadro 4.4. Os valores das frequências de vibração dos pórticos utilizados são representativos de edifícios regulares correntes baixos (3Hz), médios (2Hz) e altos (1Hz).

Quadro 4.4- Características das estruturas (pórticos)

Fonte: autoria própria

	Freq. Natural (Hz)	Barras verticais (cm)	Área de contribuição (m ²)	Massa (kg)	Altura (m)	Compr. (m)	Amort. (%)
Estrutura 1	1	20x20	20	80500	3	5	5
Estrutura 2	2	20x20	20	21160			
Estrutura 3	3	20x20	20	9600			

Com as propriedades geométricas e de massa descritas no Quadro 4.4 os pórticos têm as frequências naturais de vibração para o estudo. Tais frequências são alcançadas através das equações 16 ou 17 em função da unidade de medida.

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ (rad/s)} \quad (16)$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ (Hz)} \quad (17)$$

A obtenção dos valores das frequências foi feita mantendo-se a rigidez (k) da estrutura constante e variando a massa (m) atuante sobre o pórtico. As massas foram adotadas com o cálculo da massa específica do concreto (γ_{conc}), considerado no Quadro 4.5, multiplicado pela área de influência (A_{cont}) de uma laje com altura (H_{laje}) definida atuando sobre o pórtico (semelhante ao exposto na Figura 5.2).

As características do concreto utilizado estão descritas no Quadro 4.5.

Quadro 4.5- Características do material adotado

Fonte: autoria própria

	Peso específico (kN/m ³)	Módulo de Young (GPa)	Poisson
Concreto	23	30	0,18

Para a modelação do pórtico foi utilizada a interface *DesignModeler* do ANSYS, que também permite a criação das mais variadas geometrias. Desta forma, a estrutura *Shear Building* foi gerada a partir de elementos de barra, que são unidimensionais no espaço. Portanto, inicialmente criaram-se os pontos de referência e através deles determinaram-se as linhas que serviram de base para a introdução de uma secção transversal.

Para cada pórtico, foram criadas duas secções transversais retangulares. A primeira foi atribuída às barras verticais laterais (pilares) com dimensões descritas no Quadro 4.4 e a segunda atribuída à barra horizontal (viga). Também, para que a estrutura se comporte como um modelo *Shear Building*, a barra horizontal para cada caso foi considerada como elemento rígido, opção que é disponibilizada pelo próprio ANSYS. Desta forma, a estrutura passou a não possuir rotação da secção horizontal e a rigidez da viga pode ser considerada infinitamente maior que a dos pilares.

4.4 Modelo numérico

O ANSYS é um *software* que utiliza o método dos elementos finitos para desenvolvimento de modelos numéricos em diversos campos científicos. Através da utilização desta ferramenta computacional é possível modelar sistemas estruturais e analisá-los sob influência de diversos tipos de estímulos estáticos e dinâmicos (ABREU, 2016). Por estes motivos, o software mostrou-se como uma alternativa eficiente para a concepção da análise do comportamento interativo de uma estrutura repousada em um determinado volume de solo condicionado a efeitos sísmicos, objetivo da dissertação.

Além disso, o ANSYS possui diversas interfaces, das quais o *Workbench* foi o escolhido para executar as modelações, pois ele exibe os resultados gráficos permitindo uma fácil introdução e visualização da geometria e leitura dos resultados, facilitando assim o processo de entendimento do comportamento do modelo durante as análises. Ainda, o *Workbench* combina diversas ferramentas de simulação com as ferramentas necessárias para o melhor gerenciamento dos projetos através de diagramas do tipo fluxograma que ligam as análises e permitem o compartilhamento e transferência de dados entre elas.

A modelação neste software compreende três etapas:



Na etapa de pré-processamento são atribuídas as características determinantes para o modelo, como as dimensões dos elementos e suas propriedades físicas e mecânicas. Além disso, define-se o tipo de elementos finitos que serão utilizados na modelação. O ANSYS possui uma variada gama de elementos finitos pré-estabelecidos, como elementos de barras, de casca, sólidos, contato, dentre outros. Também são definidos nesta etapa os tipos de análises desejadas (estática, modal e dinâmica) e a malha dos elementos.

Para iniciar o pré-processamento, o ANSYS *Workbench* necessita do usuário a inserção de qual será o tipo de análise desejada, podendo ser adicionado mais de uma opção para cada projeto, como para o presente estudo ilustrado pela Figura 4.8. Com isso, a primeira análise criada para o estudo foi a estrutural estática. Esta análise, por si só, não proporcionou as respostas aos estímulos dinâmicos que foram executadas no trabalho, porém foi o ponto de partida para a criação dos elementos, inserção das suas propriedades e a determinação da ação gravitacional do sistema que foram utilizados posteriormente para as análises de interesse.

Além disso, foi pela análise estática que se determinou o comprimento da coluna de solo. Para tal, foram simulados os solos e adicionadas as estruturas. O comprimento foi determinado a partir do valor em que o peso da estrutura não influenciasse o deslocamento do solo, ou seja, as extremidades da coluna não sofriam variações em um estado plano de deformação xy .

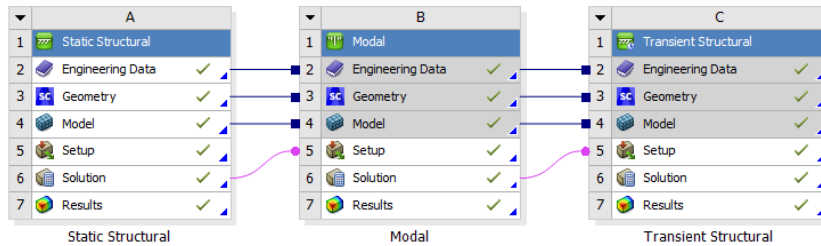


Figura 4.4- Representação das análises utilizadas no ANSYS Workbench

Fonte: autoria própria

Para a análise estática, foram criados os materiais constituintes do modelo, sendo eles três tipos de solos com características definidas através das velocidades de propagação das ondas de corte e um tipo de concreto para as estruturas dos pórticos.

Com as propriedades dos materiais definidas, passou-se ao processo de modelação dos elementos com posterior definição das conexões entre eles (viga-pilar; pilar-solo) de forma a garantir a Interação sísmica solo-estrutura.

A segunda etapa, conhecida como análise (ou processamento), é o momento onde são feitas as configurações das análises com a finalidade de obter os resultados referentes ao que se deseja através do modelo.

Por fim, na etapa de pós-processamento são obtidos os resultados, sejam eles de deslocamentos, tensões, reações, dentre outras variadas possibilidades. Também é possível extrair animações referentes aos resultados obtidos.

O pós-processamento realizado para o presente estudo consistiu em coletar e analisar os dados obtidos. A análise e tratamento dos dados se deram através de planilhas do Microsoft Excel.

Os deslocamentos do topo e da base dos pórticos ao longo do tempo foram extraídos do ANSYS e inseridos em uma planilha do Excel. A diferença

entre os deslocamentos na direção x entre o topo e a base representou a deformação sofrida pela estrutura perante a ação sísmica. Encontradas as deformações, identificaram-se os valores máximos para cada caso.

Com as deformações máximas e as frequências naturais de vibração das estruturas, foi possível determinar, através da equação (14), as acelerações máximas totais para cada caso, que podem ser comparadas com as acelerações espectrais definidas nos espectros de resposta nas normas referentes (neste caso a (NP EN 1998-1, 2010)). Tal comparação é o objetivo maior da dissertação, pois a partir dela foi possível determinar quais fatores influenciaram de forma mais ou menos significativa para Interação sísmica solo-estrutura.

- **Elementos finitos utilizados e malha do modelo:**

O volume de solo foi modelado através da interface *SpaceClaim* do (ANSYS, 2019) que se apresenta como uma ferramenta valiosa no desenvolvimento de modelagens. Esta interface permite a criação de elementos sólidos com extrema facilidade através da utilização de elementos finitos pré-estabelecidos.

O elemento finito utilizado para a discretização do solo foi o SOLID185. O SOLID185 é adequadamente usado para modelagem tridimensional de estruturas sólidas em geral, definido por oito nós (Figura 4.5) com três graus de liberdade em cada nó: translação nas direções x , y e z .

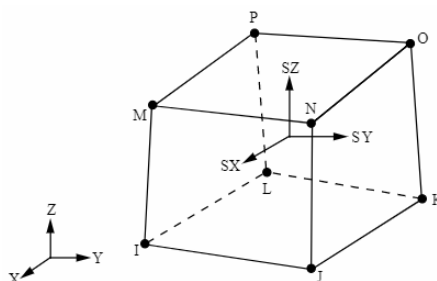


Figura 4.5- SOLID185 geometria homogênea de estrutura sólida

Fonte: (ANSYS, 2019)

Com o SOLID185, realizou-se a discretização da malha para o volume de solo, indicando as dimensões para cada elemento proporcionalmente ao volume total do solo. Para que as análises não exigissem um alto grau de recurso computacional, mas mesmo assim representassem de forma satisfatória o comportamento dos solos, cada elemento passou a possuir as seguintes dimensões: 1,0 metro nas direções x e y e 0,5 metros na direção z . Na Figura 4.6 mostra-se a configuração final da modelação geométrica do volume de solo.

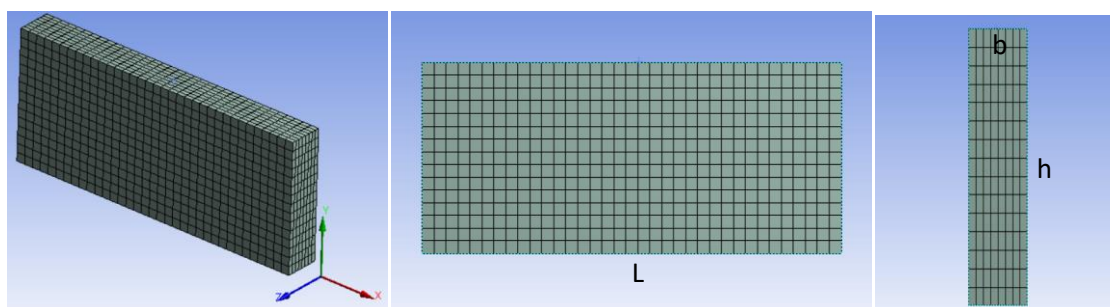


Figura 4.6- Malha de elementos finitos do volume de solo modelado (L=30m; b=4m; h=variável)

Fonte: autoria própria

Para as barras do pórtico, foram utilizados elementos de barra BEAM188, pré-estabelecido no ANSYS. Este é adequado para analisar estruturas desde vigas delgadas a moderadamente grossas. O elemento é delimitado por dois nós e possui seis ou sete graus de liberdade em cada nó, que inclui translações e rotações nas direções x , y e z . O sétimo grau de liberdade (magnitude de deformação) é opcional.

O BEAM188 é baseado na teoria de vigas de Timoshenko, que considera a deformação por cisalhamento de primeira ordem: a tensão de cisalhamento transversal é constante na seção transversal (ou seja, as seções transversais permanecem planas após a deformação), como exemplificado na Figura 4.7.

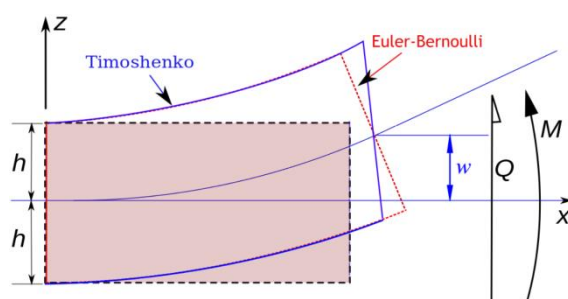


Figura 4.7- Deformação de uma viga Timoshenko (azul) comparada com uma viga Euler-Bernoulli (vermelho)

Fonte: (TIMOSHENKO, 2020)

Com o elemento finito e as propriedades definidas, realizou-se a determinação da malha para análise da estrutura. As barras verticais foram divididas em 3 elementos finitos de 1 metro de comprimento e a barra horizontal dividida em 5 elementos de 1 metro de comprimento. A configuração e a malha estão representadas na Figura 4.8.

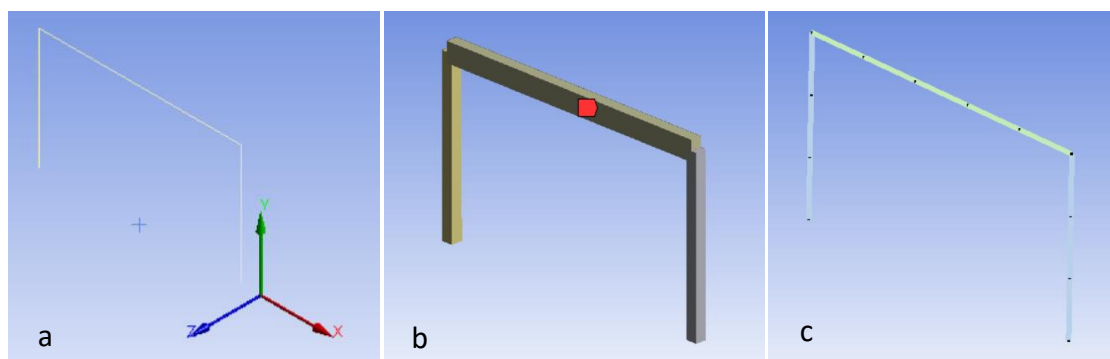


Figura 4.8- Pórtico representativo da estrutura *Shear Building* adotada; (a) geometria; (b) e (c) malha de elementos finitos

Fonte: autoria própria

- **Condições de fronteira:**

As restrições cinemáticas consistiram em garantir um estado plano de deformação no plano xy . Desta forma, elas se deram na base do solo, suas laterais (xy) e na direção transversal ao pórtico. A base do solo foi restringida através de apoios de terceiro gênero, impedindo movimentos de translação nas três direções. As laterais das colunas de solo, juntamente as laterais da estrutura tiveram seus movimentos de translação restringidos na direção z do siste-

ma de eixos cartesiano considerado, através de apoios de primeiro gênero para simular o estado plano de deformação pretendido.

- **Conexões:**

As condições de contato são criadas automaticamente pelo *software* a partir do momento em que são detectados dois corpos distintos (sólido, superfície e corpo de linha) que se tocam. Elas são responsáveis por garantir a não interpenetração entre os corpos, a transmissão de esforços, sua junção para elementos unidos e a colisão para elementos distantes (ANSYS, 2019).

Ainda de acordo com (ANSYS, 2019), como os corpos de contato não se interpenetram, o *software* estabelece um relacionamento entre as duas superfícies para impedir que elas passem entre si na análise. A Figura 4.9 abaixo exemplifica o problema de contato.

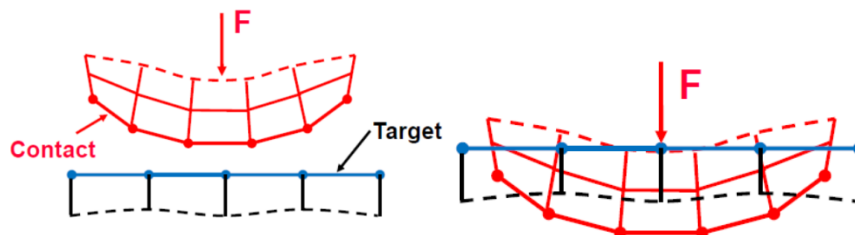


Figura 4.9- Representação do problema de contato

Fonte: (ANSYS, 2019)

A formulação de contato utilizada para garantir a compatibilidade de conexão entre os elementos foi a pré-definida pelo ANSYS como *Pure Penalty*, que usa o seguinte princípio para a situação ilustrada na Figura 4.10.

$$F_{Normal} = K_{Normal} * X_{Penetração} \quad (18)$$

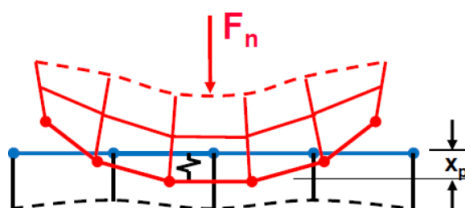


Figura 4.10- Representação da formulação utilizada para resolução do problema de contato

Fonte: (ANSYS, 2019)

Deste modo, quanto maior for a rigidez de contato, menor será a penetração da conexão.

As conexões, para o estudo, se deram entre os elementos (barras verticais com a barra horizontal e barras verticais com o volume de solo) através da opção *connections* do ANSYS. Esta opção possibilita a determinação de vários modos diferentes de conexões entre elementos, além de permitir a sua configuração de acordo com o comportamento desejado para a ligação. Para o presente trabalho foram determinadas conexões do tipo *bonded* (ligação rígida) com características determinadas pelos padrões automáticos do *software*.

De acordo com o próprio (ANSYS, 2019) essa conexão pode ser aplicada para qualquer região de contato. Se as regiões estiverem unidas através da opção *bonded*, não será permitido deslizamento ou separação entre elementos, pois a região estará “colada”.

Neste trabalho, foram criadas as conexões rígidas solo-estrutura de forma que o pórtico possua seu comportamento atrelado ao comportamento do solo. Portanto, a modelação final do sistema está exemplificada na Figura 4.11.

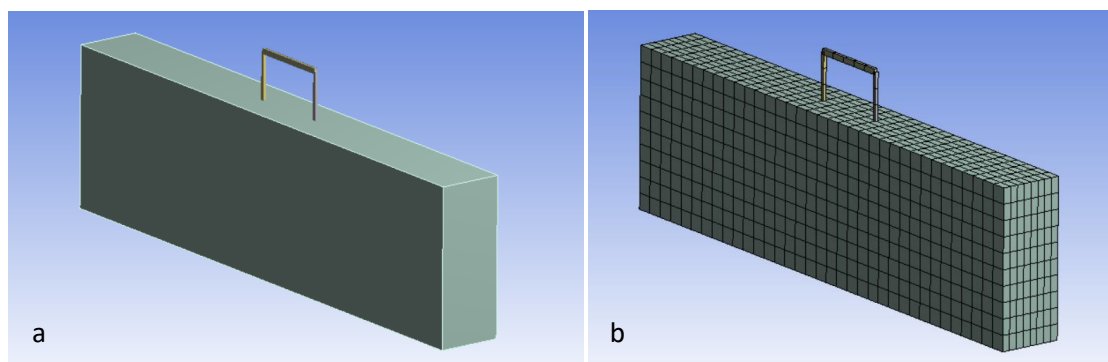


Figura 4.11- Modelação final do sistema solo-estrutura; (a) volume; (b) malha de elementos finitos

Fonte: autoria própria

4.4.1 Análise estática

Nesta etapa foi inserida a ação gravitacional no sistema, com aceleração vertical de $9,81m/s^2$ (no sentido negativo do eixo y). Esta análise foi efetuada com o objetivo de verificar o comportamento estático do modelo.

4.4.2 Análise modal

O processo de análise dinâmica do sistema iniciou com a realização de análise modal para determinar as frequências naturais de vibração do sistema e respectivos modos de vibração.

Os dados necessários para a determinação das frequências são obtidos através das características inseridas na análise estática, portanto, não há necessidade de efetuar uma remodelação do sistema. Com isso, o único passo para realização da análise modal foi estabelecer a condição de dependência entre as análises e determinar o número de modos de vibração desejados, que para o trabalho foram definidos 10 modos.

Nos quadros 4.6, 4.7 e 4.8 estão descritas as frequências referentes aos três primeiros modos de vibração para os solos, as estruturas e o sistema solo-estrutura respectivamente, obtidos através da análise modal para o estudo.

Quadro 4.6- Frequência de vibração para os 3 primeiros modos de vibração dos solos

Fonte: autoria própria

FREQUÊNCIAS PARA OS 3 PRIMEIROS MODOS DE VIBRAÇÃO DO SOLO			
Coluna de solo com $v_s=100\text{m/s}$			
Modo de vibração	Frequência para $h=5\text{m}$ (Hz)	Frequência para $h=10\text{m}$ (Hz)	Frequência para $h=15\text{m}$ (Hz)
1	4,8071	2,3175	1,4880
2	5,3195	3,2907	2,6515
3	6,897	4,5612	3,1786
Coluna de solo com $v_s=140\text{m/s}$			
1	6,7315	3,2465	2,0840
2	7,4487	4,6080	3,7104
3	9,6563	6,3840	4,4477
Coluna de solo com $v_s=170\text{m/s}$			
1	8,1746	3,9430	2,5315
2	9,0455	5,5959	4,5056
3	11,7260	7,7513	5,4000

Quadro 4.7- Frequência de vibração para os 3 primeiros modos de vibração dos pórticos

Fonte: autoria própria

FREQUÊNCIAS PARA OS 3 PRIMEIROS MODOS DE VIBRAÇÃO DA ESTRUTURA			
Modo de vibração	Frequências das estruturas (Hz)	Frequências das estruturas (Hz)	Frequências das estruturas (Hz)
1	0,995	1,9893	2,9211
2	15,731	30,2310	44,0460
3	27,252	52,2270	75,1130

Quadro 4.8- Frequência de vibração para os 3 primeiros modos de vibração dos sistemas solo-estrutura

Fonte: autoria própria

FREQUÊNCIAS PARA OS 3 PRIMEIROS MODOS DE VIBRAÇÃO SISTEMA SOLO-ESTRUTURA			
Modo de vibração	Frequência para sistema com estrutura de 1Hz (Hz)	Frequência para sistema com estrutura de 2Hz (Hz)	Frequência para sistema com estrutura de 3Hz (Hz)
1	0,4126	0,9473	1,4495
2	3,2551	3,2560	3,2566
3	4,4459	4,6068	4,6131

As figuras 4.12, 4.13 e 4.14 são referentes aos três primeiros modos de vibração dos solos, estruturas e sistema solo-estrutura respectivamente.

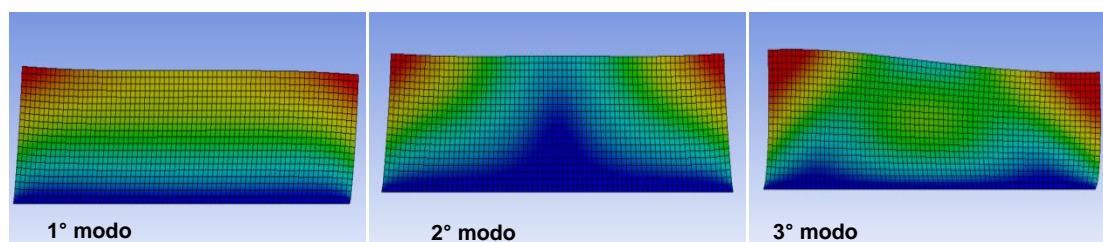


Figura 4.12- Representação dos três primeiros modos de vibração do solo

Fonte: autoria própria

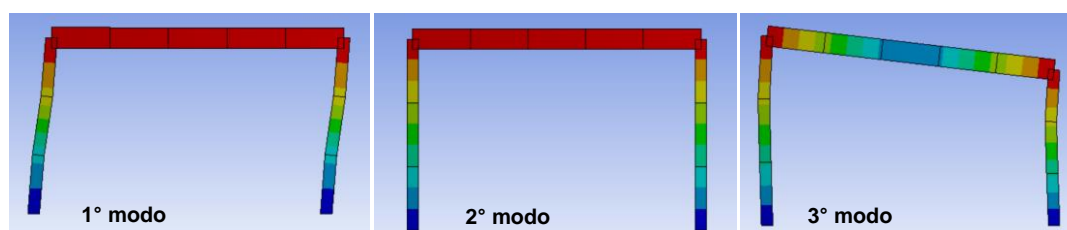


Figura 4.13- Representação dos três primeiros modos de vibração da estrutura

Fonte: autoria própria

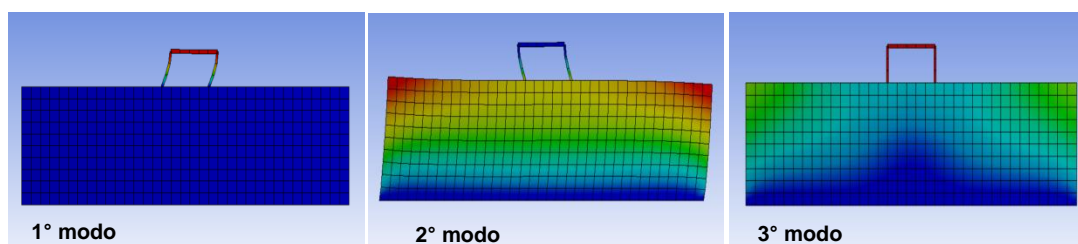


Figura 4.14- Representação dos três primeiros modos de vibração do sistema solo-estrutura

Fonte: autoria própria

4.4.3 Análise sísmica transiente

A análise dinâmica teve início com a atribuição das condições iniciais onde foram determinadas as ligações de dependência entre as análises anteriores e a atual. Posteriormente, foram inseridas as acelerações excitadoras obtidas com os acelerogramas artificiais (ver tópico 4.1). As séries de acelerações discretizadas no domínio do tempo foram extraídas do *software* SEISMOARTIF e inseridas em um arquivo de extensão XML de forma a serem compiladas pelo ANSYS (Figura 4.15).

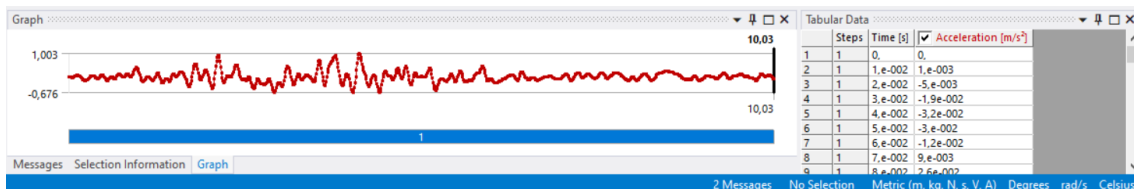


Figura 4.15- Representação de acelerograma artificial no ANSYS para efetuar a análise sísmica

Fonte: autoria própria

Dos acelerogramas extraíram-se valores referentes a acelerações no domínio do tempo. Sendo assim, foi necessário definir que os intervalos de tempo em que os dados foram obtidos fossem semelhantes aos intervalos em que o *software* efetuaria a inserção deles no modelo. Definiu-se o eixo x como direção horizontal da ação sísmica. A Figura 4.16 exemplifica os dados necessários requeridos pelo ANSYS para ler e tratar os acelerogramas importados.

Step Controls	
Number Of Steps	1,
Current Step Number	1,
Step End Time	10,03 s
Auto Time Stepping	Off
Define By	Time
Time Step	1, e-002 s
Time Integration	On

Figura 4.16- Área de controle de informações referentes aos acelerogramas importados no ANSYS

Fonte: autoria própria

Por fim, foram determinados quais dados de saída (*output*) seriam necessários para a realização das análises. Para as análises foram requeridos os deslocamentos do topo e da base da estrutura na direção x (ver Figura 4.17) para analisar as deformações sofridas ao longo do tempo. Com as deformações máximas foi possível, através da relação (15), encontrar as acelerações máximas sofridas pela estrutura na ISSE a fim de compará-las às determinadas pelo EC8 para frequências semelhantes através dos espectros de resposta. Para análise dos efeitos da ISSE, também foram obtidos os valores das acelerações no tempo da superfície livre do terreno.

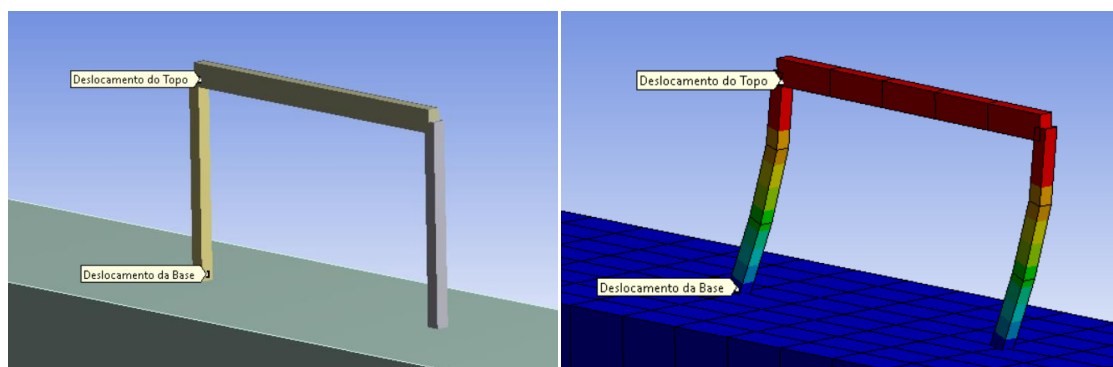


Figura 4.17- Deslocamentos para análise da deformação temporal das estruturas

Fonte: autoria própria

4.4.4 Resultados

Dentro dos aspectos abrangidos pelo presente trabalho, foram realizadas 162 análises paramétricas para avaliação da ISSE sísmica. Foram consideradas três estruturas com diferentes frequências, solos com três velocidades de propagação das ondas de corte, três alturas da coluna de solo, dois tipos de sismo e três acelerogramas para cada um dos sismos. Tais análises resultaram em diferentes comportamentos estruturais que ajudam a compreender de que forma as estruturas fundadas em solos brandos reagem às ações sísmicas, e entender em quais situações a consideração da Interação sísmica solo-estrutura se faz realmente indispensável para projetos de engenharia.

Com o objetivo de organizar os resultados e perceber a influência dos diferentes parâmetros na resposta sísmica da ISSE, as comparações se deram

na forma espectral, ou seja, as acelerações estruturais máximas para cada caso foram sobrepostas com os espectros de resposta elástica regulamentais (Eurocódigo 8) a fim de obter as comparações desejadas (Anexo III). Desta forma, além de analisar as variações ocorridas entre os casos simulados, é possível fazer comparações com o estabelecido no Eurocódigo 8 para casos semelhantes.

Os resultados foram organizados por sismo tipo e alturas dos terrenos. Como as respostas obtidas para um mesmo sismo tipo foram semelhantes, as comparações foram feitas com as médias dos três acelerogramas para cada tipo de sismo. Com isso, um total de seis conjuntos de resultados foram criados e comparados aos espectros do EC8, todos expressos no Anexo III. Além dos espectros, também os valores das acelerações máximas para cada caso constam no mesmo anexo.

Com as respostas estruturais organizadas, as análises dos resultados obtidos foram divididas de acordo com os parâmetros de cada sistema solo-estrutura. Assim, torna-se de fácil entendimento a influência de cada fator para a consideração da Interação sísmica solo-estrutura.

4.4.5 Análise dos resultados da ISSE

Nesta secção analisam-se os resultados obtidos nas simulações dinâmicas com o objetivo de avaliar a influência de parâmetros como o tipo de sismo, as características da coluna de solo (a velocidade de propagação das ondas de corte e a altura da coluna) e a rigidez estrutural nos fenômenos de Interação sísmica solo-estrutura (ISSE).

- **Influência do tipo de sismo**

As características dos sismos são responsáveis por alterar os valores das respostas estruturais na ISSE. Desta forma, para as análises foram inseridos no sistema seis acelerogramas, três com características de sismo afastado (Tipo 1) e três com características de sismo próximo (Tipo 2), no entanto, am-

bos com valores de aceleração máxima de pico (PGA) em rocha com valor aproximado de $1m/s$.

Os espectros de resposta em que os sismos afastados (Tipo 1) foram considerados apresentam respostas estruturais consideravelmente maiores se comparado aos espectros para sismos próximos (Tipo 2). Tal consideração pode ser observada de forma mais nítida para as estruturas com menor período de vibração, pois estas foram mais afetadas pela diferença sísmica.

O Quadro 4.9 abaixo traz as comparações entre as médias dos três acelerogramas para cada tipo de sismo, onde os sistemas semelhantes estão sob ações sísmicas distintas. Os fatores de amplificação indicam em quantas vezes a resposta espectral do sismo afastado (Tipo 1) foi maior em relação ao sismo próximo (Tipo 2).

Quadro 4.9- Fatores de amplificação dos resultados obtidos para sismos tipo 1 em relação a sismos tipo 2

Fonte: autoria própria

FATORES DE AMPLIFICAÇÃO (SISMO TIPO 1/ SISMO TIPO 2)				
		Fatores de amplificação - solo 5m	Fatores de amplificação - solo 10m	Fatores de amplificação - solo 15m
Estrutura 1 (1Hz)	100m/s	3,41	2,20	2,13
	140m/s	2,35	2,27	2,39
	170m/s	2,36	2,71	2,45
Estrutura 2 (2Hz)	100m/s	2,97	2,98	3,21
	140m/s	2,88	2,58	2,92
	170m/s	2,89	2,75	2,82
Estrutura 3 (3Hz)	100m/s	1,92	2,10	2,83
	140m/s	1,84	1,64	1,76
	170m/s	1,94	1,72	1,99

- **Influência da velocidade de propagação das ondas de corte**

O principal objetivo da dissertação é determinar a importância da consideração da Interação sísmica solo-estrutura para estruturas assentes em solos brandos do tipo D determinados pelo Eurocódigo 8. Tais solos, como já ci-

tado anteriormente, possuem suas características atreladas, dentre outros fatores, com a velocidade de propagação das ondas de corte, que estão representadas pelo EC8 através de um intervalo de valores correspondente. Assim sendo, os testes feitos para as velocidades de $100m/s$, $140m/s$ e $170m/s$ buscaram ser representativos da diversidade de solos brandos (valores abaixo de $180m/s$ para o estudo em questão) e foram responsáveis pelos resultados descritos abaixo.

Com as acelerações obtidas através das análises é possível observar de forma clara que as diferentes velocidades alteram significativamente o comportamento da estrutura durante um sismo. Essas alterações se dão à medida que para valores menores da velocidade de propagação, as deformações máximas na estrutura são maiores. Conseqüentemente, as acelerações máximas encontradas na estrutura também são maiores para solos com as mesmas características geométricas, mas menor valor para a velocidade de propagação das ondas de corte.

Este comportamento vai ao encontro das conclusões obtidas por (TABATABAIEFAR e FATAHI, 2014), que embora utilizem velocidades de propagação diferentes, têm resultados que representam efeitos semelhantes. Para os autores, o solo mais brando utilizado em seus estudos ($150m/s$) gerou uma situação de quase colapso da estrutura, o que comprova a importância de considerar este fator como extremamente significativo no desenvolvimento de projetos de edificações.

Os Quadros 4.10 e 4.11 abaixo demonstram valores médios das acelerações máximas encontradas através dos experimentos numéricos para os três acelerogramas utilizados em cada tipo de sismo. Por meio desses valores é possível observar que, de forma geral, para uma mesma estrutura e um mesmo volume de solo, as acelerações máximas decrescem com o aumento da velocidade de propagação.

Quadro 4.10- Valores médios das acelerações espectrais (obtidos através dos três acelerogramas artificiais para sismo tipo 1)

Fonte: autoria própria

ACELERAÇÕES MÉDIAS ESPECTRAIS (SISMO TIPO 1) (m/s ²)				
Estruturas	Vs (m/s)	Solo h = 5m	Solo h = 10m	Solo h = 15m
<i>f</i> (1Hz)	100m/s	1,28	0,58	0,65
	140m/s	0,55	0,55	0,61
	170m/s	0,55	0,65	0,60
<i>f</i> (2Hz)	100m/s	1,35	1,89	2,94
	140m/s	1,31	1,50	2,11
	170m/s	1,30	1,46	1,71
<i>f</i> (3Hz)	100m/s	2,09	4,12	12,88
	140m/s	2,04	2,52	5,35
	170m/s	1,99	2,31	3,83

Quadro 4.11- Valores médios das acelerações espectrais (obtidos através dos três acelerogramas artificiais para sismo tipo 2)

Fonte: autoria própria

ACELERAÇÕES MÉDIAS ESPECTRAIS (SISMO TIPO 2) (m/s ²)				
Estruturas	Vs (m/s)	Solo h = 5m	Solo h = 10m	Solo h = 15m
<i>f</i> (1Hz)	100m/s	0,37	0,26	0,30
	140m/s	0,23	0,24	0,25
	170m/s	0,23	0,24	0,24
<i>f</i> (2Hz)	100m/s	0,45	0,63	0,91
	140m/s	0,45	0,58	0,72
	170m/s	0,45	0,53	0,60
<i>f</i> (3Hz)	100m/s	1,09	1,96	4,55
	140m/s	1,11	1,53	3,03
	170m/s	1,02	1,34	1,92

Embora as acelerações espectrais correspondentes às baixas velocidades sejam maiores, apenas em estruturas de menores períodos de vibração é que os resultados demonstram necessidade de atenção especial. Para os casos onde a estrutura com período de 1s (frequência 1Hz), em momento algum as acelerações foram maiores do que a norma espera para considerações, tanto de base rígida quando para solos brandos tipo D.

Para as estruturas de período igual a $0,5s$, apenas solos com $100m/s$ atrelados a altura de 15 metros e sob influência de sismos tipo 1 é que as acelerações são maiores que as recomendações do Eurocódigo 8 para situação de base rígida, no entanto ainda assim são menores que o estipulado no EC8 para solos brandos (D), o que não apresenta problemas para o dimensionamento.

No entanto, em estruturas mais rígidas, com período igual a $0,33s$ e solos tanto com $100m/s$ quanto os com $140m/s$, também aliados a altura de 15 metros e sismos do tipo 1, apresentam valores insatisfatórios para as acelerações máximas, podendo gerar deformações excessivas a ponto de comprometer a sua segurança sísmica. Para estes casos justifica-se a utilização de simulações computacionais para o correto dimensionamento de uma estrutura.

Deste modo, percebe-se que mesmo dentro de uma mesma classificação do tipo de solo, os valores estipulados para os intervalos causam variações grandes o suficiente para alterar a condição de segurança sísmica uma estrutura.

- **Influência da altura da coluna de solo**

Outro fator alterado nas análises foi a altura da coluna de solo. Graficamente é possível perceber que quanto maior for a altura do solo considerado, maior são os valores para as acelerações máximas encontradas, ou seja, maior é a influência que um sismo exerce em uma estrutura.

Através dos espectros é possível notar que para solos com altura de 5 metros a Interação sísmica solo-estrutura apresenta valores insignificantes, desta forma a estrutura assemelha-se a fundada em base rígida. Também é possível observar valores insignificantes da ISSE para colunas de solo com altura de 10 metros submetidas a ações de sismos próximos (Tipo 2), exceto para os casos onde a velocidade de propagação do solo é de $100m/s$.

Para as estruturas com período de $0,33s$ (frequência 3Hz), a variação na altura do solo foi um importante fator amplificativo das respostas. As Figuras 4.18 e 4.19 abaixo expressam os gráficos que demonstram, apenas para esses

casos, a evolução das respostas em relação a variação da altura do solo. É importante salientar que a segurança estrutural para estes casos é representado por qualquer valor encontrado que se localize a esquerda da linha denominada “solo D EC8”.

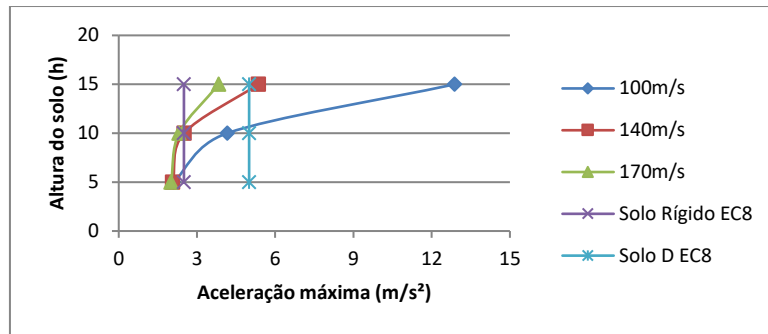


Figura 4.18- Evolução das respostas estruturais em relação a variação da altura do solo para sismos do tipo 1

Fonte: autoria Própria

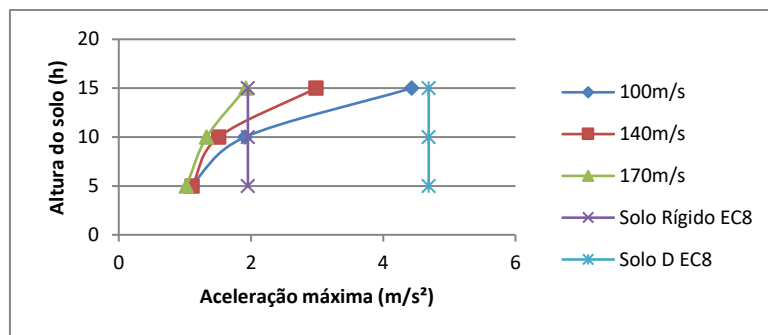


Figura 4.19- Evolução das respostas estruturais em relação a variação da altura do solo para sismos do tipo 2;

Fonte: autoria própria

Através da Figura 4.18 é possível observar a grande amplitude das respostas para solos com velocidade de 100m/s a uma altura de 15 metros. Para os três acelerogramas em questão houve a extrapolação do valor limite determinado pela norma, ou seja, a exigência do Eurocódigo 8 não satisfaz as condições de segurança mínima. Para os sismos próximos (Tipo 2), como ilustrado na Figura 4.19, os valores máximos das acelerações para os casos mais críticos ficam próximos do limite.

- **Influência da rigidez estrutural**

(KRAMER, 1996) afirma que os efeitos da Interação sísmica solo-estrutura tornam-se significantes quando estruturas rígidas são suportadas por solos relativamente brandos. Estruturas rígidas resultam em maiores frequências naturais de vibração, o que foi obtido através da variação da massa para o presente estudo, que naturalmente geram estruturas com menores períodos naturais. Desta forma, a afirmação de Kramer é comprovada através dos resultados obtidos pelas simulações, como exposto pelos espectros.

As estruturas menos afetadas pelas atividades sísmicas foram as com período natural de 1s. Em todas as análises feitas para esse tipo de estrutura, a Interação sísmica solo-estrutura apresentou valores insignificantes, o que leva a afirmar que seus efeitos podem ser desconsiderados, ou seja, seguir a recomendações do Eurocódigo 8 são mais que suficientes para garantir a segurança sísmica da estrutura.

Estruturas com período de vibração de 0,5s também não apresentaram valores significativos. Para os sismos próximos, as acelerações máximas obtidas sequer ultrapassaram o valor recomendado pela norma para considerações de base rígida. Já para os sismos distantes, apenas em solos com velocidade de propagação de 100m/s e altura de 15 metros é que as acelerações foram maiores que o limite de base rígida, no entanto, ainda estão abaixo do limite estipulado para solos brandos.

Por outro lado, as estruturas mais suscetíveis na ISSE a sofrer deformações são as mais rígidas, com período natural de 0,33s. Dentre as estruturas estudadas, apenas estas ultrapassam o limite estipulado pelo Eurocódigo 8.

- **Análise comparativa**

De um modo geral, através da variação de características na busca por melhor compreender o comportamento dinâmico de determinados sistemas solo-estrutura, percebe-se que os fatores estão todos interligados. Um sismo não se torna mais ou menos danoso através da simples variação de uma ca-

racterística específica do sistema, mas sim através do resultado de uma combinação de aspectos que tendem fazer com que a estrutura venha possuir os mais diversos comportamentos.

Os casos em que a ISSE se torna mais danosa para as estruturas são quando há a combinação de fatores como: colunas de solo com as maiores alturas, solos com baixa velocidade de propagação das ondas de corte e estrutura com altas frequências de vibração. Além disso, como já mencionado, os efeitos mais significativos estão condicionados a sismos afastados (Tipo 1).

Uma maneira de relacionar todos os parâmetros variados e compreender de forma clara os efeitos da ISSE para os sistemas analisados é através da taxa de rigidez expressa por (KRAMER, 1996) (ver equação 1). A Figura 4.20 ilustra a relação entre todas as respostas obtidas através das simulações e a taxa de rigidez dos sistemas. Com isso é possível observar o padrão de comportamento sísmico dos sistemas de acordo com o tipo de sismo.

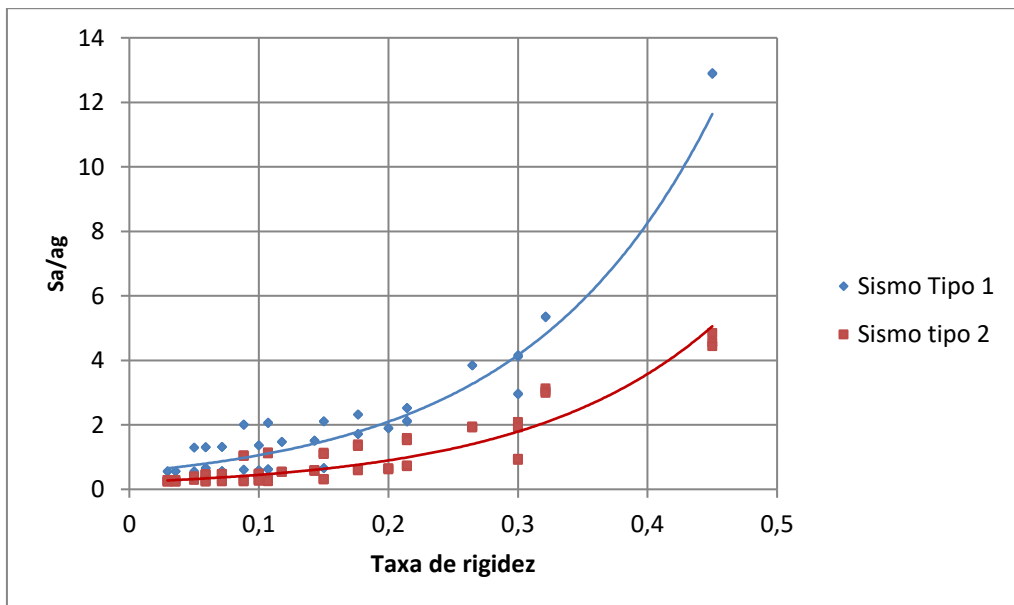


Figura 4.20- Acelerações estruturais máximas versus a taxa de rigidez dos sistemas solo-estrutura analisados

Fonte: autoria própria

Por fim, dentre todos os casos analisados, apenas 5,55% necessitariam de atenção especial para um possível subdimensionamento ao levar em consideração o que determina o Eurocódigo 8 para estruturas assente em so-

los brandos do tipo D. Ainda, para 12,96% das análises feitas, os valores das acelerações ficaram acima do limite para considerar uma estrutura fundada em solo rígido, no entanto, abaixo do limite para solos brandos, o que não interfere na segurança sísmica da edificação. O restante, ou seja, 81,48% das análises, resultaram em acelerações máximas abaixo do que a norma prevê para estruturas fundadas em solos rígidos (efeitos benéficos da ISSE). Portanto, além de prever possíveis falhas de segurança, as análises de Interação sísmica solo-estrutura ajudam a identificar situações de superdimensionamento exigidas pelo próprio Eurocódigo. Os quadros 4.10 e 4.11 ilustram, através da média das acelerações para os três acelerogramas de cada tipo de sismo, a porcentagem que as acelerações espectrais regulamentares ficam abaixo ou acima da linha limite do espectro de resposta para solos tipo D (Eurocódigo 8).

Quadro 4.12- Porcentagem das acelerações espectrais médias que ficaram abaixo (-) ou acima (+) do espectro de referência para solos tipo D e sismo tipo 1 (EC8)

Fonte: autoria própria

ACELEROGRAMAS TIPO 1				
		Solo 5m	Solo 10m	Solo 15m
Estrutura 1 (1Hz)	100m/s	-67,8%	-85,5%	-83,7%
	140m/s	-86,1%	-86,0%	-84,6%
	170m/s	-86,2%	-83,7%	-84,9%
Estrutura 2 (2Hz)	100m/s	-72,9%	-62,2%	-41,2%
	140m/s	-73,7%	-69,9%	-57,8%
	170m/s	-73,9%	-70,7%	-65,7%
Estrutura 3 (3Hz)	100m/s	-58,0%	-17,5%	157,7%
	140m/s	-59,0%	-49,6%	7,0%
	170m/s	-60,1%	-53,7%	-23,3%

Quadro 4.13- Porcentagem das acelerações espectrais médias que ficaram abaixo (-) ou acima (+) do espectro de referência para solos tipo D e sismo tipo 2 (EC8)

Fonte: autoria própria

ACELEROGRAMAS TIPO 2				
		Solo 5m	Solo 10m	Solo 15m
Estrutura 1 (1Hz)	100m/s	-74,8%	-82,4%	-79,6%
	140m/s	-84,3%	-83,6%	-82,8%
	170m/s	-84,4%	-84,0%	-83,6%
Estrutura 2 (2Hz)	100m/s	-84,8%	-78,8%	-69,5%
	140m/s	-84,8%	-80,6%	-75,9%
	170m/s	-84,9%	-82,3%	-79,8%
Estrutura 3 (3Hz)	100m/s	-76,7%	-58,0%	+2,9%
	140m/s	-76,2%	-67,2%	-35,2%
	170m/s	-78,1%	-71,3%	-59,0%

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho analisou 162 sistemas solo-estrutura para identificar de que forma parâmetros como: a frequência natural de vibração de estruturas, velocidade de propagação das ondas de corte do solo, altura da coluna de solo e o tipo de sismo influenciam a resposta estrutural considerando a interação sísmica solo-estrutura (ISSE) para estruturas fundadas em solos brandos (tipo D, no Eurocódigo 8).

De forma geral, os resultados obtidos revelam uma relação entre os parâmetros referidos e a intensidade dos efeitos da ISSE.

Importantes respostas da ISSE foram encontrados em cenários que combinam solos com menores velocidades de propagação (v_s), maior altura da coluna de solo, estruturas com as maiores frequências naturais de vibração e a ação do sismo afastado (tipo 1 no Eurocódigo 8).

Assim, os resultados através das simulações realizadas neste trabalho indicam que a ISSE, em geral, é benéfica para estruturas com período igual ou maior que 0,5s (frequência menor ou igual a 2Hz), pois as acelerações estruturais máximas obtidas considerando a ISSE são menores que as determinadas pelos espectros de resposta do EC8 para solo rochoso. A exceção para estes casos é quando a coluna de solo subjacente à estrutura com período igual a 0,5s apresenta velocidade de propagação de 100m/s e uma altura da coluna de solo de 15 metros submetidas a ações sísmicas afastadas (tipo 1), onde as acelerações estruturais máximas superam as estabelecidas no EC8 para solo rochoso mas não as estabelecidas para solo brando.

Para estruturas com período inferior a 0,5s (frequência menor que 2Hz) fundadas em colunas de solos com altura superior a 10 metros, as acelerações espectrais obtidas com a ISSE apresentam valores acima dos regulamentados

pelo EC8 para rocha. Para a coluna de solo com altura de 15 metros e velocidade de propagação igual ou inferior a 140m/s e sismo afastado (tipo 1), as respostas obtidas ultrapassam mesmo os valores normatizados pelo EC8 para solos brandos (tipo D).

Os resultados da ISSE obtidos neste estudo indicam também que os sistemas solo-estrutura sob ação de sismos próximos (tipo 2) apresentam acelerações estruturais inferiores em relação aos sismos afastados (tipo 1). No entanto, para estruturas com período inferior a 0,5s, colunas de solos com altura de 15 metros e solos com velocidade de propagação inferior a 140m/s os resultados extrapolaram as considerações do EC8 para rocha e também merecem atenção especial de projetistas.

Por fim, com o estudo paramétrico realizado foi possível compreender melhor quais os parâmetros de sistemas solo-estrutura que mais influenciam a ISSE e identificar os cenários mais críticos, o que pode contribuir para a mitigação de danos sísmicos em estruturas fundadas em solos brandos em locais de perigosidade sísmica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, J. (2016). Estudo computacional via ANSYS de vigas, arcos e anéis com restrições de contato impostas por bases elásticas (Mestre). Universidade Federal de Ouro Preto.
- Anand, V. (2018). Seismic Soil-structure Interaction: A State-of-the-Art Review. In *Structures* (pp. 317-326).
- ANSYS *Academic Research Mechanical*, Release 18.1, Help System, Coupled Field Analysis Guide, ANSYS, Inc.
- Antoniuzzi, J. (2011). *Interação Solo-Estrutura De Edifícios Com Fundações Superficiais* (Mestre). Universidade Federal de Santa Maria.
- Badry, P., & Satyam, N. (2016). Seismic soil structure interaction analysis for asymmetrical buildings supported on piled raft for the 2015 Nepal earthquake. In *Journal of Asian Earth Sciences*.
- Carlo, G., Dolce, M., & Liberatore, D. (2000). Influence of Soil-Structure Interaction on the seismic response of bridge piers. In *World Conference on Earthquake Engineering* (12th ed.). Auckland, New Zealand.
- Ciampoli, M., & Pinto, P. (1995). Effects of Soil-Structure Interaction on Inelastic Seismic Response of Bridge Piers. In *Journal of Structural Engineering, ASCE* (pp. 806-814).
- Coburn, A., & Spence, R. (2002). *Earthquake protection* (2nd ed.). Chichester, West Sussex, England: J. Wiley.
- Colares, G. (2006). Programa para análise ds interação solo-estrutura no projeto de edifícios (Mestre). Universidade de São Paulo.
- Correia, A. (2004). Características de deformabilidade dos solos que interessam à funcionalidade das estruturas. In *Geotecnia, Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia* (pp. 103-122). Sociedade Portuguesa de Geotecnia.

- Dutta, S., & Roy, R. (2002). A critical review on idealization and modeling for interaction among soil–foundation–structure system. In *Department of Applied Mechanics, Bengal Engineering College (Deemed University)* (pp. 1579–1594). West Bengal, India.
- Estêvão, J., Silva, E., & Silva, J. (2007). Avaliação da Resposta Sísmica de Edifícios Sitos em Solos Brandos Estratificados. In *Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica* (7th ed.).
- Far, H. (2017). Advanced computation methods for soil-structure interaction analysis of structures resting on soft soils. In *International Journal of Geotechnical Engineering*.
- Gutierrez, J., & Chopra, A. (1978). A Substructure Method for Earthquake Analysis of structures Including Structure-Soil Interaction. In *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 6 (pp. 51–69).
- Joyner, W., & Boore, D. (1988). Measurement, characterization and prediction of strong ground motion. In *Proceedings of Earthquake Engineering & Soil Dynamics II GT Div/ASCE*. Park City, Utah.
- Kausel, E. (2009). Early history of soil–structure interaction. In *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* (pp. 822-832).
- Koutsourelakis, S., Prévost, J., & Deodatis, G. (2002). Risk assessment of an interacting structure–soil system due to liquefaction. In *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, Vol. 31 (pp. 851–879).
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall.
- Lai, C., & Martinelli, M. (2013). Soil-Structure Interaction Under Earthquake Loading: Theoretical Framework. In *ALERT Doctoral School*.
- Lanamme. (1999). *Evaluación del impacto ingenieril de un terremoto en la península de Nicoya : Informe final*. Costa Rica. Universidad de Costa Rica (UCR). Programa de Ingeniería Sísmica.
- Luco J.E., & Westmann, R.A. (1972). Dynamic response of rigid footing bonded to an elastic half-space. In *Journal of Applied Mechanics*, Vol.39 (pp. 527–534).

- Luco, J.E., & Westman, R.A. (1971). Dynamic response of circular footings. In *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 97 (pp. 1381–1395).
- Martel, R. (1940). Effect of Foundation on Earthquake Motion. In *Civil Engineering*.
- Matinmanesh, H., & Asheghabadi, M. (2011). Seismic Analysis on Soil-Structure Interaction of Buildings over Sandy Soil. In *The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction* (pp. 1737–1743). Procedia Engineering.
- Newmark, N.M. (1969). Torsion in Symmetrical Buildings. In *Proceedings of the Fourth World Conference on Earthquake Engineering*. Santiago, Chile.
- Nguyen, Q., Fatahi, B., & Hokmabadi, A. (2016). The effects of foundation size on the seismic performance of buildings considering the soil-foundation-structure interaction. In *Structural Engineering and Mechanics*, Vol.58 (pp. 1045-1075).
- Nogueira, H. (2016). Análise estrutural de uma edificação de médio porte considerado um modelo simplificado de Interação Solo Estrutura.
- NP EN 1998-1, (2010): Eurocode 8 - EN1998-1 Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and general requirements for structures, *CEN - Comité Européene de Normalisation*, Brussels.
- NP EN 1998-5, (2010): Eurocode 8 - EN1998-5 Design of structures for earthquake resistance – Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects, *CEN - Comité Européene de Normalisation*, Brussels.
- Omori, F. (1922). The semi-destructive earthquake of April 26, 1922. In *Seismological Notes (Imperial Earthquake Investigation Committee)*.
- Parmelee, R. (1967). Building-Foundation Interaction Effects. In *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 93 (pp. 131-152).

- Parmelee, R., Perelman, D., Lee, S., & Keer, L. (1968). Seismic Response of Structure-Foundation Systems. In *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 94 (pp. 1295-1316).
- Paz, M., & Kim, Y. (2019). *Structural Dynamics Theory and Computation* (6th ed.). Springer Nature Switzerland.
- Rahmani, A., Taiebat, M., Finn, W., & Ventura, C. (2016). Evaluation of substructuring method for seismic soil-structure interaction analysis of bridges. In *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 90 (pp. 112-127).
- Reinoso, E., & Ordaz, M. (2000). Duration of strong ground motion during Mexican earthquakes in terms of magnitude, distance to the rupture area and dominant site period. In *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, Vol. 30 (pp. 653–673).
- Reissner, E. (1937). Freie und erzwungene Torsionsschwingungen des elastischen Halbraumes. *Ingenieur-Archiv*, Vol. 8 (pp. 229-245).
- Rodrigues, R. (2012). *Geração de Acelerogramas Sísmicos Artificiais Compatíveis com um Espectro de Resposta* (Graduado). Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Rôlo, R. (2009). *Geração De Pares De Sismos Compatíveis Com Um Espectro De Resposta* (Mestre). Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Roque, J. (2009). Metodologia Integrada para Avaliação e Mitigação da Vulnerabilidade Sísmica das Construções Históricas em Alvenaria: A Igreja dos Jerónimos como Caso de Estudo. Universidade do Minho.
- Ruivo, L. (2010). *Análise da Eficiência Sísmica de Estruturas de Edifícios* (Mestre). Universidade Técnica de Lisboa.
- Sáez, E., Caballero, F., & Razavi, A. (2013). Inelastic dynamic soil-structure interaction effects on moment-resisting frame buildings. In *Engineering Structures*, Vol. 51 (pp. 166-177).
- Safak, E. (1995). Discrete-Time Analysis of Seismic Site Amplification. In *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 121 (pp. 801-809).

- Safak, E. (2001). Local site effects and dynamic soil behavior. In *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 21 (pp. 453-458).
- Sarrazín, M.A. (1970). Soil–structure interaction in earthquake resistant design. In *Research Report R70-59*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Sarrazín, M.A., Roësset, J.M., & Whitman, R.V. (1972). Dynamic soil–structure interaction. In *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 98 (pp. 1525-1544).
- Seismosoft. (2020). SeismoArtif - Artificial Earthquake Accelerograms - Seismosoft. Retrieved 9 April 2020, from <https://seismosoft.com/products/seismoartif/>.
- Sezawa, K., & Kanai, K. (1935). Decay in the seismic vibration of a simple or tall structure by dissipation of their energy into the ground. In *Bulletin of the Earthquake Research Institute* (pp. 681–696). Japan.
- Tabatabaiefar, H., & Fatahi, B. (2014). Idealisation of soil–structure system to determine inelastic seismic response of mid-rise building frames. In *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* (pp. 339-351).
- Thomson, W., & Kobori, T. (1963). Dynamical Compliance of Rectangular Foundations on an Elastic Half-Space. In *J. Appl. Mech* (pp. 579–584).
- Thusoo, S., Modi, K., Kumar, R., & Madahar, H. (2015). Response of Buildings with Soil-Structure Interaction with Varying Soil Types. In *Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering*, Vol. 9. World Academy of Science.
- Timoshenko - Ehrenfest beam theory | Wikiwand. (2020). Retrieved 5 May 2020, from [https://www.wikiwand.com/en/Timoshenko-Ehrenfest beam theory](https://www.wikiwand.com/en/Timoshenko-Ehrenfest_beam_theory).
- Veletsos, A., & Wei, Y. (1971). Lateral and Rocking Vibration of Footings. In *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 97 (pp. 1227-1248).

Yunita, H., Setiawan, B., Saidi, T., & Abdullah, N. (2018). Site response analysis for estimating seismic site amplification in the case of Banda Aceh - Indonesia. In *MATEC Web of Conferences*.

ANEXO I. COMPORTAMENTO DINÂMICO DO SISTEMA

Para o modelo estrutural simplificado utilizado, a expressão de equilíbrio dinâmico é:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = F(t)$$

Onde m é a massa da estrutura, c é a constante de amortecimento e k é a rigidez das colunas. Os vetores $\ddot{u}(t)$, $\dot{u}(t)$ e $u(t)$ representam a aceleração, velocidade e deslocamento da estrutura, respectivamente, e $F(t)$ representa a força excitadora aplicada. Tal modelo pode ser esquematizado como sistema-massa-mola-amortecedor (Figura I.1).

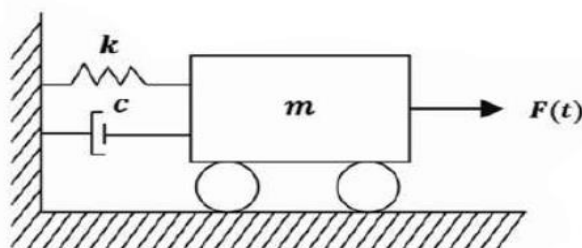


Figura I.0.1- Idealização de um sistema massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade

Fonte: (PAZ e KIM, 2019)

A equação diferencial de segunda ordem, para casos em que a estrutura está sob efeito de uma ação dinâmica qualquer, pode ser resolvida utilizando a integral de Duhamel. O carregamento aplicado pode ser entendido como um somatório de impulsos infinitesimais, onde o impulso é um carregamento instantâneo, que provoca uma velocidade inicial e deslocamento desprezível. Assim o estado de equilíbrio ocorre após um período infinitesimal de tempo e o sistema entra em vibração livre.

O deslocamento, para respostas de sistemas lineares, pode ser encontrado através da integral de Duhamel.

$$u(t) = \frac{1}{m\omega_D} \int_0^t F(\tau) e^{-\xi\omega_n(t-\tau)} \sin\omega_D(t-\tau) d\tau$$

Tal integral permite análises no domínio do tempo, sendo necessária a utilização da transformada de Fourier para obter análises no domínio da frequência.

Os termos da equação são dados por τ que descreve o instante de referência do impulso, ω_n a frequência natural do sistema, ω_D a frequência amortecida do sistema, m a massa e ξ o coeficiente de amortecimento. A frequência natural, como visto anteriormente, pode ser descrita pela seguinte equação:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Esta relaciona-se diretamente com a frequência amortecida.

$$\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$$

Por fim, o coeficiente de amortecimento para a integral é definido por:

$$\xi = \frac{c}{2m\omega_n}$$

No entanto, quando o modelo *Shear Building* é acoplado ao solo e analisado de forma conjunta, o sistema passa a possuir mais de um grau de liberdade. O equilíbrio dinâmico, para este caso, deve ser garantido para todas as massas. A equação a seguir mostra o equilíbrio dinâmico para um sistema com múltiplos graus de liberdade do sistema sujeito a um carregamento $F(t)$ qualquer.

$$[M]\ddot{u}(t) + [C]\dot{u}(t) + [K]u(t) = \{F(t)\}$$

$[M]$, $[C]$ e $[K]$ são as matrizes de massa, amortecimento e rigidez, respectivamente, $\ddot{u}(t)$, $\dot{u}(t)$ e $u(t)$ representam os vetores das acelerações, velocidades e deslocamentos das massas do sistema. Por fim, $\{F(t)\}$ representa o vetor das forças excitadoras aplicada em cada grau de liberdade.

ANEXO II. ACELEROGRAMAS

Neste anexo estão contidos:

Acelerogramas Sintéticos

Acelerogramas Artificiais

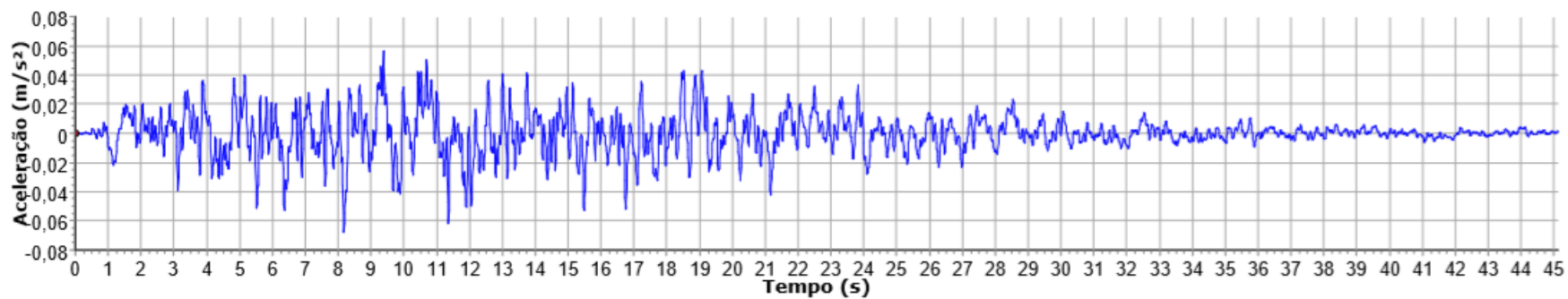


Figura 6.2- Acelerograma sintético para sismos afastados (tipo1)

Fonte: autoria própria

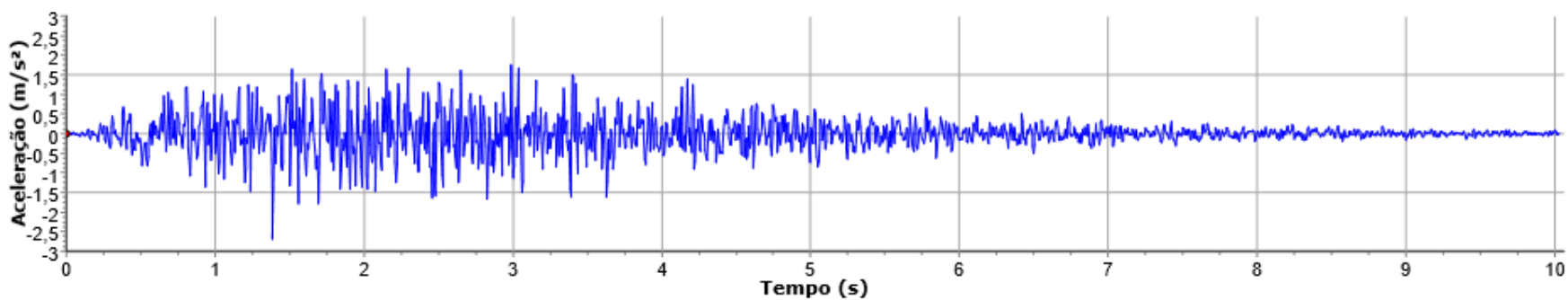


Figura 6.3- Acelerograma sintético para sismos próximos (tipo2)

Fonte: autoria própria

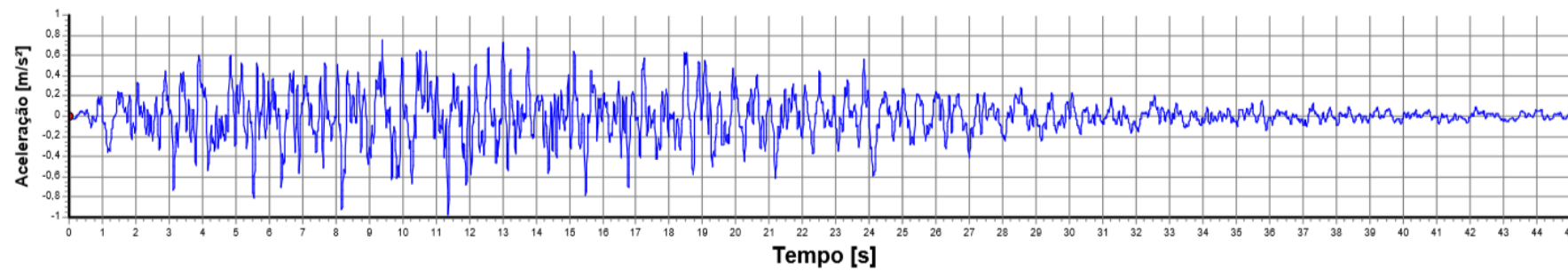


Figura 6.4- Acelerograma artificial para sismo afastado (tipo 1) - 1

Fonte: autoria própria

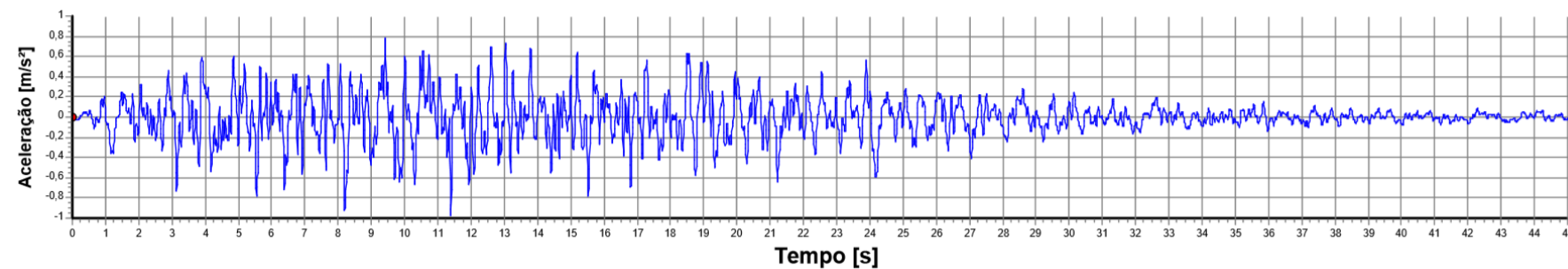


Figura 6.5- Acelerograma artificial para sismo afastado (tipo 1) - 2

Fonte: autoria própria

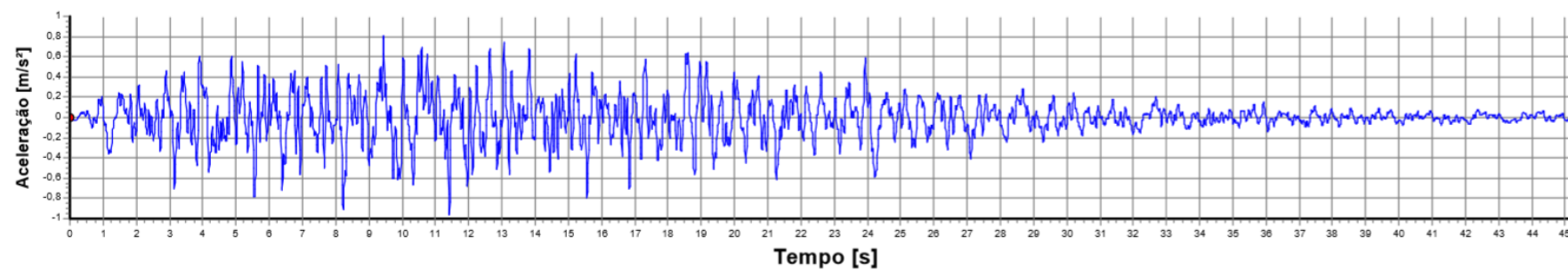


Figura 6.6- Acelerograma artificial para sismo afastado (tipo 1) - 3

Fonte: autoria própria

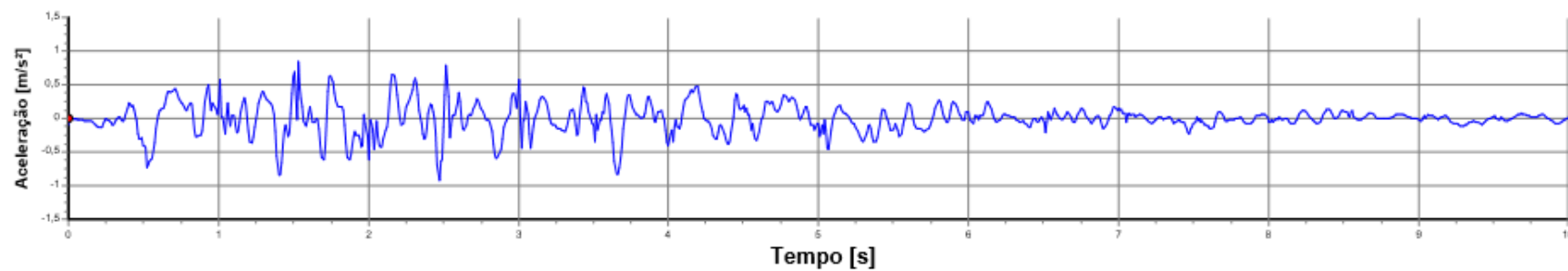


Figura 6.7- Acelerograma artificial para sismo próximo (tipo 2) - 1

Fonte: autoria própria

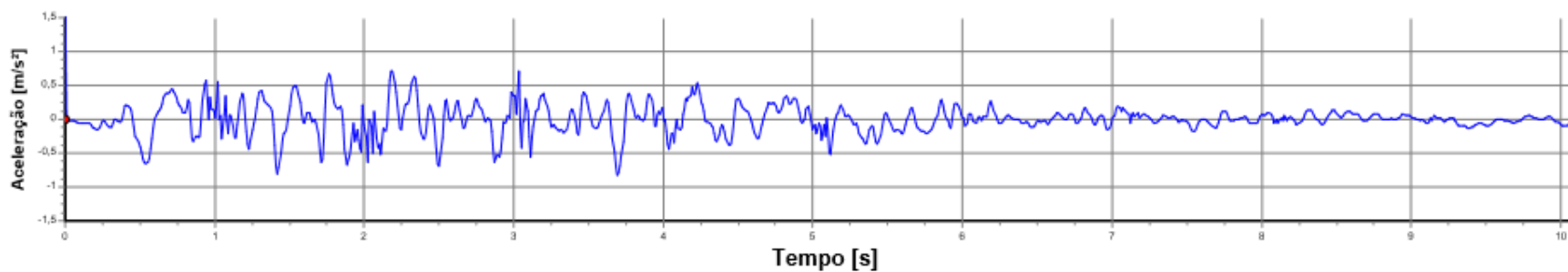


Figura 6.8- Acelerograma artificial para sismo próximo (tipo 2) - 2

Fonte: autoria própria

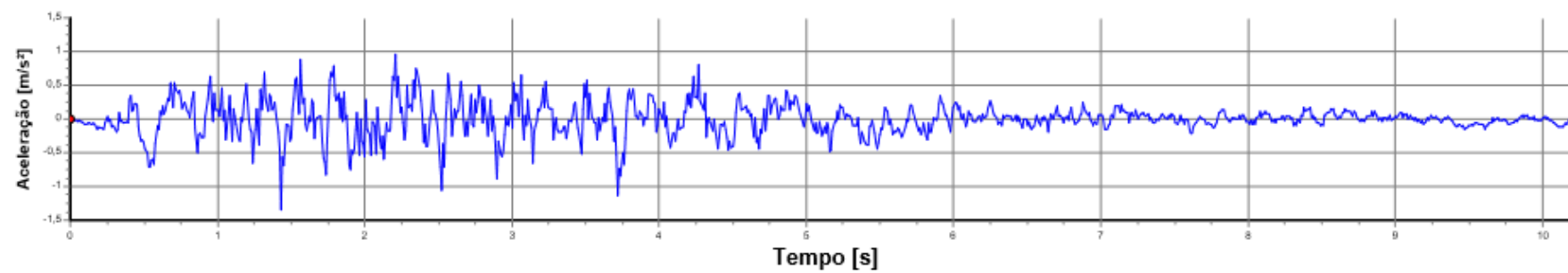


Figura 6.9- Acelerograma artificial para sismo próximo (tipo 2) - 3

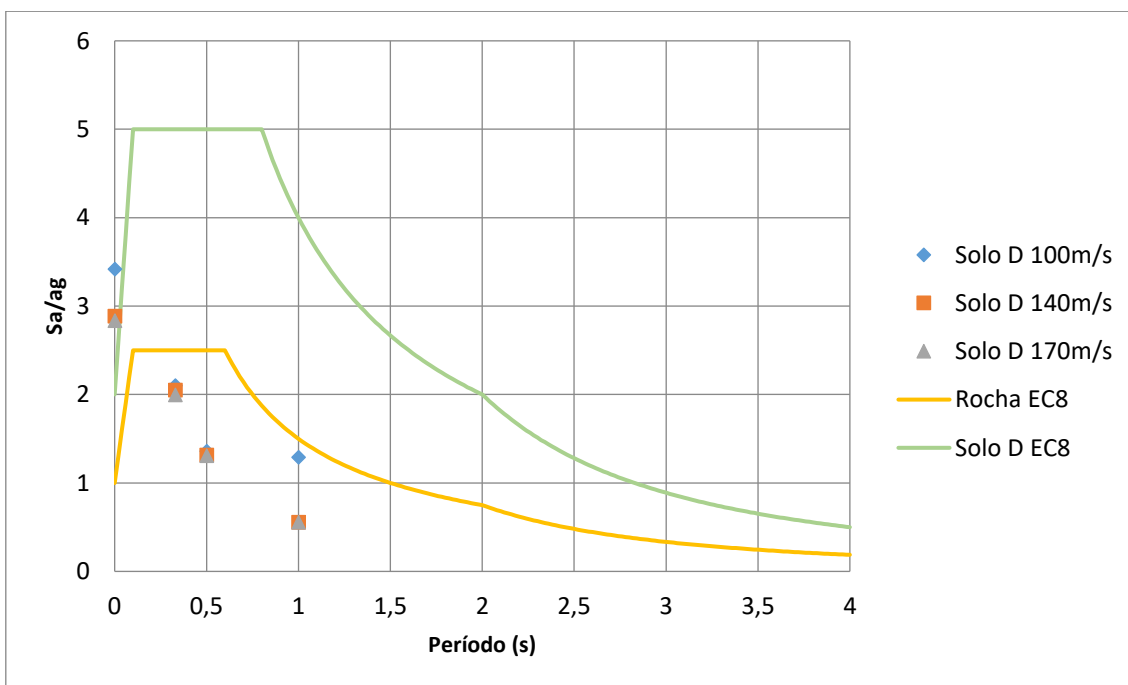
Fonte: autoria própria

ANEXO III. ESPECTROS DE RESPOSTA ELÁSTICA

Sismo tipo 1.

Espectro de resposta elástica correspondente a um solo com altura $h=5m$.

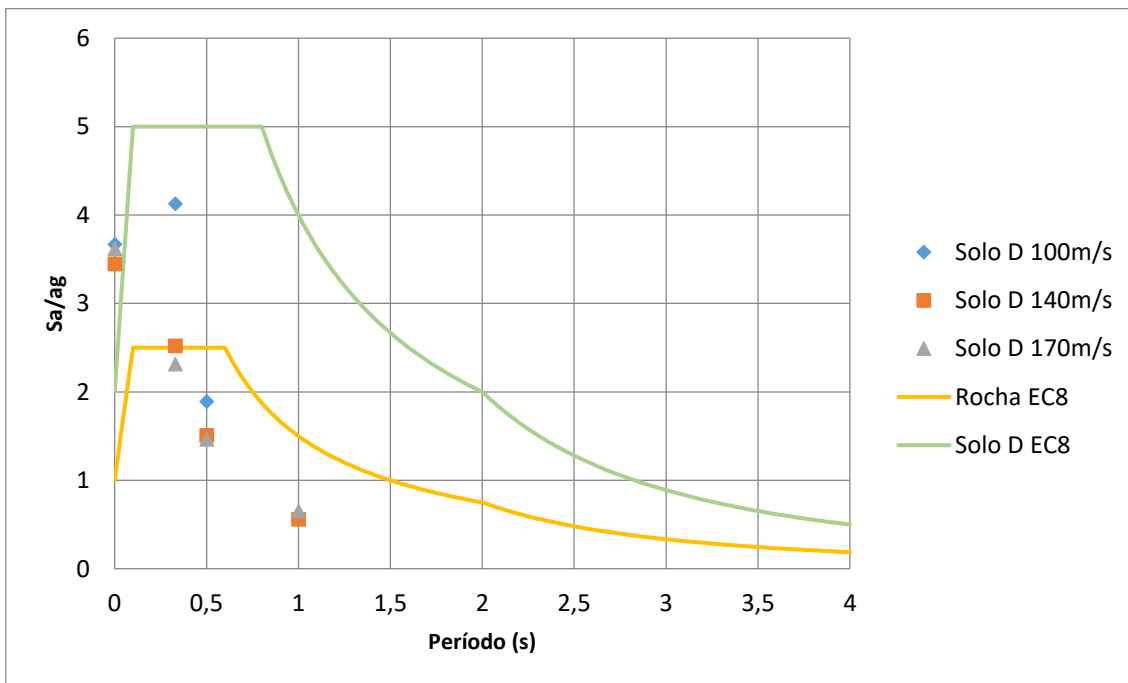
SISMO TIPO 1			
h=5m			
Vs (m/s)	Frequência (Hz)	Período (s)	Sa/ag
100	1	1	1,2881
	2	0,5	1,3563
	3	0,33	2,0990
	infinito	0	3,4159
140	1	1	0,5547
	2	0,5	1,3125
	3	0,33	2,0490
	infinito	0	2,8860
170	1	1	0,5530
	2	0,5	1,3069
	3	0,33	1,9954
	infinito	0	2,8325



Sismo tipo 1.

Espectro de resposta elástica correspondente a um solo com altura $h=10m$.

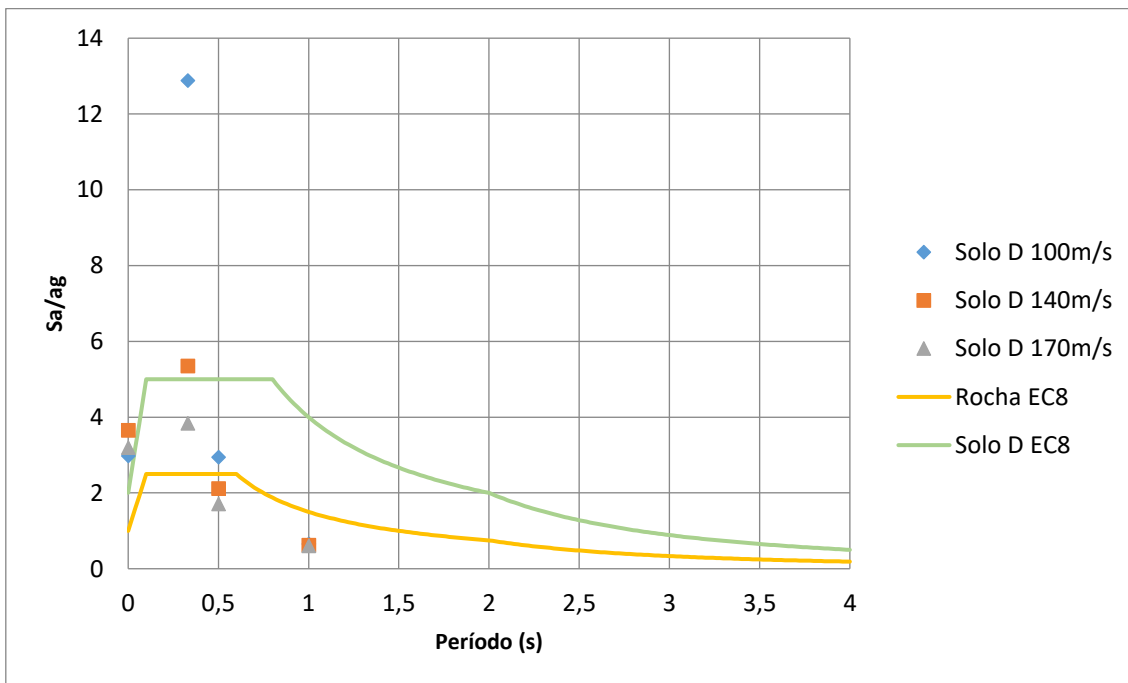
SISMO TIPO 1			
h=10m			
Vs (m/s)	Frequência (Hz)	Período (s)	Sa/ag
100	1	1	0,5818
	2	0,5	1,8918
	3	0,33	4,1257
	infinito	0	3,6678
140	1	1	0,5590
	2	0,5	1,5068
	3	0,33	2,5205
	infinito	0	3,4479
170	1	1	0,6509
	2	0,5	1,4639
	3	0,33	2,3128
	infinito	0	3,6196



Sismo tipo 1.

Espectro de resposta elástica correspondente a um solo com altura h=15m.

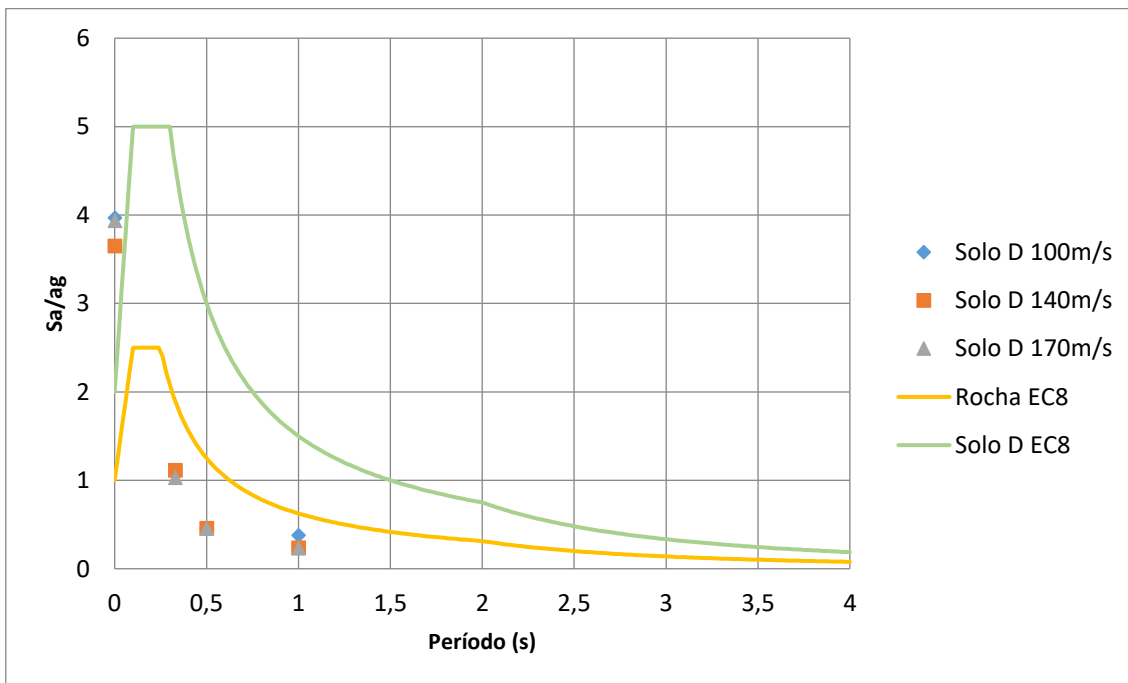
SISMO TIPO 1			
h=15m			
Vs (m/s)	Frequência (Hz)	Período (s)	Sa/ag
100	1	1	0,6509
	2	0,5	2,9402
	3	0,33	12,8838
	infinito	0	2,9752
140	1	1	0,6164
	2	0,5	2,1116
	3	0,33	5,3505
	infinito	0	3,6536
170	1	1	0,6026
	2	0,5	1,7127
	3	0,33	3,8334
	infinito	0	3,1932



Sismo tipo 2.

Espectro de resposta elástica correspondente a um solo com altura $h=5m$.

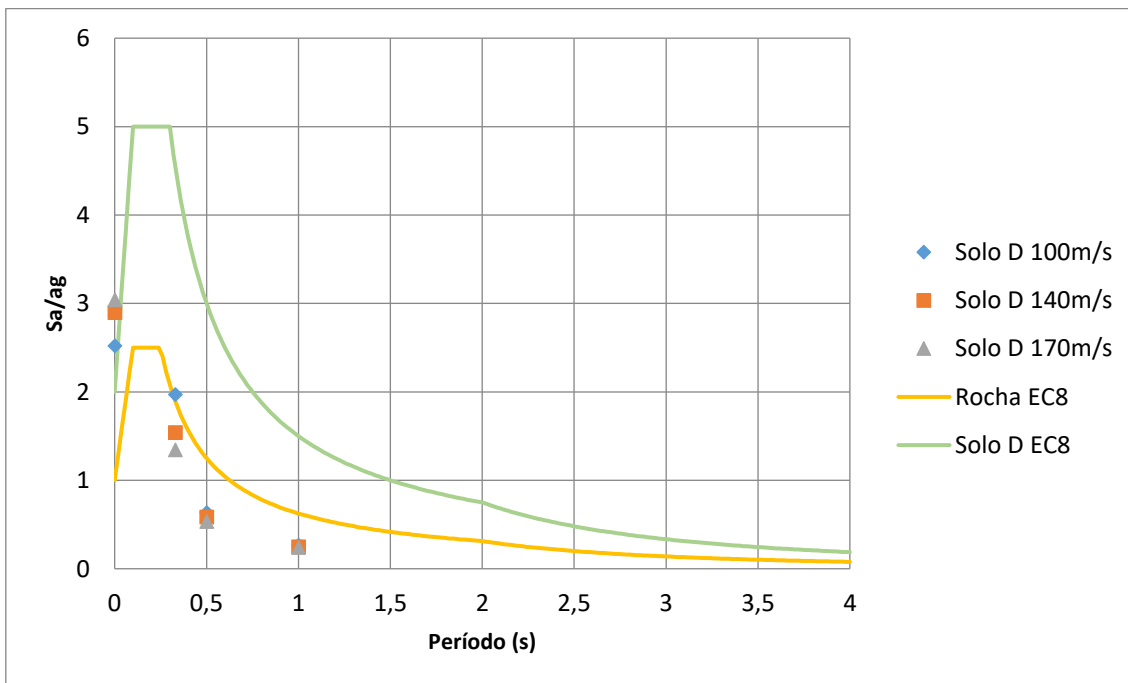
SISMO TIPO 2			
h=5m			
Vs (m/s)	Frequência (Hz)	Período (s)	Sa/ag
100	1	1	0,3775
	2	0,5	0,4566
	3	0,33	1,0913
	infinito	0	3,9657
140	1	1	0,2359
	2	0,5	0,4564
	3	0,33	1,1137
	infinito	0	3,6490
170	1	1	0,2340
	2	0,5	0,4520
	3	0,33	1,0275
	infinito	0	3,9349



Sismo tipo 2.

Espectro de resposta elástica correspondente a um solo com altura $h=10\text{m}$.

SISMO TIPO 2			
h=10m			
Vs (m/s)	Frequência (Hz)	Período (s)	Sa/ag
100	1	1	0,2643
	2	0,5	0,6357
	3	0,33	1,9689
	infinito	0	2,5201
140	1	1	0,2458
	2	0,5	0,5831
	3	0,33	1,5377
	infinito	0	2,8961
170	1	1	0,2403
	2	0,5	0,5322
	3	0,33	1,3443
	infinito	0	3,0407



Sismo tipo 2.

Espectro de resposta elástica correspondente a um solo com altura $h=15\text{m}$.

SISMO TIPO 2			
h=15m			
Vs (m/s)	Frequência (Hz)	Período (s)	Sa/ag
100	1	1	0,3054
	2	0,5	0,9159
	3	0,33	4,5524
	infinito	0	2,3263
140	1	1	0,2574
	2	0,5	0,7231
	3	0,33	3,0369
	infinito	0	2,5083
170	1	1	0,2464
	2	0,5	0,6063
	3	0,33	1,9223
	infinito	0	3,0396

