

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

GERAÇÃO DE EXCITAÇÃO SÍSMICA
ATRAVÉS DO ESPECTRO DE KANAI-TAJIMI

por

Pedro Santos Schaan

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, junho de 2014



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

GERAÇÃO DE EXCITAÇÃO SÍSMICA
ATRAVÉS DO ESPECTRO DE KANAI-TAJIMI

por

Pedro Santos Schaan

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof^a Dr^a Letícia Fleck Fadel Miguel

Comissão de Avaliação:

Prof. Jun Sérgio Ono Fonseca

Prof. Walter Jesus Paucar Casas

Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Porto Alegre, 24 de junho de 2014.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, principalmente meus pais, Clenia Elena Gonçalves dos Santos e Leonel Batista Schaan, por todos seus esforços em favor da minha educação e estarem ao meu lado em todos esses anos.

Agradeço aos amigos verdadeiros que fiz durante este curso, Érgon Fleck, Dárlon Soliman, Giordano Demoliner, Bernardo Barcelos, Diogo Pinto entre outras grandes amizades, que tiveram grande influência para minha formação e dividiram este caminho comigo.

Agradeço também à Agência Nacional de Petróleo pela oportunidade de participar do programa de Iniciação Científica ANP-PRH 38 dentro do período da minha graduação neste universidade e agradeço a orientação e apoio da professora Annelise Kopp Alves.

Por fim, agradeço especialmente à minha professora orientadora deste trabalho, Letícia Fleck Fadel Miguel pelo apoio neste trabalho e disposição em ensinar.

SCHAAN, P.S. **Geração de Excitação Sísmica Através do Espectro de Kanai-Tajimi**. 2014. 15p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

RESUMO

Esta monografia apresenta o processo de geração de um registro de excitação sísmica, de acordo com características próprias do local onde uma estrutura será construída, usando o espectro proposto por Kanai-Tajimi. Isto é, através da função densidade espectral de potência proposta por Kanai-Tajimi, e utilizando um método de simulação do processo randômico, é possível simular um registro sísmico de aceleração versus tempo. A partir disto, para fins de ilustração, também é elaborada uma rotina computacional para a determinação da resposta dinâmica de uma estrutura submetida à excitação sísmica gerada, utilizando as equações do método de Newmark. Os programas numérico-computacionais elaborados são em linguagem MATLAB. Os resultados foram considerados bons ao se mostrarem condizentes com a literatura estudada.

PALAVRAS-CHAVE: Resposta Dinâmica, Sismo, Espectro de Kanai-Tajimi, Método de Newmark, MATLAB.

SCHAAN, P.S. **Generation of Seismic Excitation Through Kanai-Tajimi Spectrum**. 2014. 15p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

ABSTRACT

This monograph presents the process of generation of a seismic excitation record, in agreement with local own characteristics where a structure will be built, using the spectrum proposed by Kanai-Tajimi. In other words, through the spectral density function proposed by Kanai-Tajimi and using a method of simulation of random process, it is possible to simulate a seismic record of acceleration versus time. From that, for illustration purposes, it was also developed a computational routine for the determination of the dynamic response of a structure subjected to the generated seismic excitation, using the equations of Newmark method. The numeric-computational programs are developed in MATLAB language. The results were considered good, being in accordance with the studied literature.

KEYWORDS: Dynamic Response, Earthquake, Kanai-Tajimi Spectrum, Newmark Method, MATLAB.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	2
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
4.1 Sistemas Amortecidos com Vários GDL Submetidos a Excitações de Base	3
4.2 Autocorrelação	3
4.3 Densidade Espectral	4
4.4 Método de Newmark	5
5 METODOLOGIA	6
5.1 Geração do Sinal	6
5.2 Análise Dinâmica	8
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	9
7. CONCLUSÕES	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
APÊNDICE	15

1. INTRODUÇÃO

O Brasil situa-se, na sua maior parte, na região central da placa tectônica sul-americana. Embora seja uma região predominantemente estável, com atividade sísmica pouco frequente, uma porção do território encontra-se mais perto das bordas dessa placa e mesmo falhas geológicas podem ocasionar sismos interplacas. Verifica-se anualmente em diversos pontos do país abalos sísmicos de magnitude fraca, e ocasionalmente, moderada. Dentre os sismos mais famosos registrados no país, destacam-se alguns como o ocorrido no município de Itacarambi, Minas Gerais, em 2007, de 4,9 graus na Escala Richter, que resultou em um óbito, cinco feridos e diversas estruturas afetadas, além do tremor no Estado do Amazonas, em 2003, de magnitude 7,1 na Escala Richter, o maior já registrado no Brasil.

Recentemente, foi lançada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas a norma brasileira NBR 15421:2006, que trata do tema de projeto de estruturas resistentes a eventos sísmicos. Essa medida visa atualizar o conhecimento científico brasileiro sobre o tema, que no passado não vinha recebendo a devida atenção e aproximar sua regulamentação das normas mais empregadas internacionalmente.

Quando se deseja projetar uma estrutura em uma zona onde há atividade sísmica é necessário se levar em consideração as cargas que o sismo impõe na mesma. Em muitos casos estas cargas são consideradas de maneira 'estática equivalente'. Porém, atualmente se sabe que uma análise dinâmica é fundamental.

No que se refere às cargas de natureza estática, os esforços internos e deformações dependem somente do carregamento imposto, podendo ser determinados por equilíbrio de forças estáticas. Se o carregamento aplicado é dinâmico, os deslocamentos resultantes da estrutura não dependem somente do carregamento, mas também das forças inerciais que se opõem às acelerações que as produzem.

Para se realizar esta análise dinâmica é necessário conhecer a excitação atuante na estrutura, ou seja, saber *a priori* qual seria o sismo que a excitaria. Como não há como prever exatamente o registro sísmico que atuará na estrutura, é muito comum, para fins de projeto, submeter a estrutura a registros de terremotos reais que já ocorreram na região onde a mesma será construída. No entanto, exceto por muito poucas regiões do planeta onde registros de acelerogramas estão disponíveis, terremotos artificiais são geralmente usados para a análise dinâmica [Valencia, 2004]. Além disso, foi demonstrado por Kumar, 2004, não existirem garantias de que um evento sísmico futuro apresente um movimento de solo igual ou similar, ainda que disponha-se dos registros locais reais.

Logo, uma forma mais inteligente de resolver o problema é simular um registro de excitação sísmica, de acordo com as características do local onde a estrutura será construída, usando o espectro proposto por Kanai-Tajimi.

Segundo Valencia, 2004, a resposta dinâmica de estruturas sob movimentos sísmicos do solo pode ser calculada usando ou o método do espectro de resposta (pseudo-aceleração) ou um histórico no tempo de acelerações. Por ser simples e difundido, o primeiro método é geralmente usado em análise linear de estruturas convencionais. Entretanto, para análise sísmica de muitas estruturas críticas (pontes estaiadas, usinas nucleares, etc) uma análise passo-a-passo no tempo é usualmente realizada. Também, a aplicação do espectro de resposta numa análise não-linear não é simples e ainda é objeto de estudos. Para esses casos não-lineares, a análise no tempo requer acelerogramas representativos dos terremotos esperados no local.

A seguir são apresentados exemplos de registros de acelerações de sismos reais.

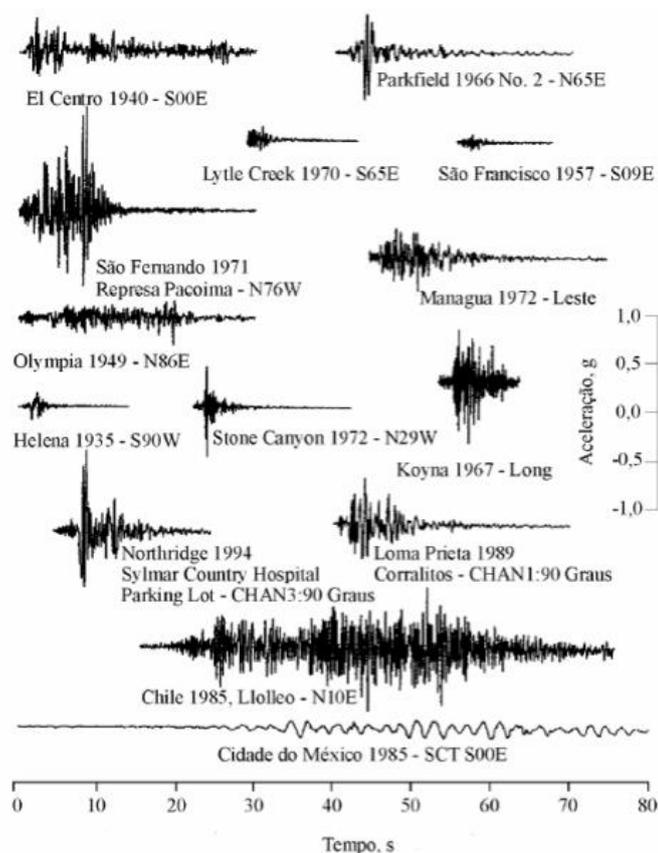


Figura 1.1 – Registros das acelerações do solo de sismos reais. Chopra, 2012.

2. OBJETIVOS

Este trabalho objetiva gerar um registro de excitação sísmica, de acordo com características próprias do local onde uma estrutura será construída, usando o espectro proposto por Kanai-Tajimi e conceitos de processos estocásticos. Isto é, através da função densidade espectral de potência proposta por Kanai-Tajimi é possível simular um registro sísmico de aceleração versus tempo. Este trabalho visa gerar um registro próprio a um processo aleatório de caráter unicamente estacionário, não levando em consideração características não-estacionárias de processo, como os trechos de crescimento e atenuação de sismos. A aplicação de filtros e outras técnicas mais avançadas para geração de sinal pode servir de foco para futuros trabalhos.

De posse do sinal gerado, para exemplificar a aplicação, torna-se possível realizar uma análise da resposta dinâmica de uma estrutura, cujos resultados serão comparados com dados disponíveis na literatura.

Tanto a programação para a geração do registro de aceleração sísmica quanto o programa para determinação da resposta dinâmica são elaborados em linguagem MATLAB.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Kanai, 1961 e Tajimi, 1960, propuseram uma equação empírica para calcular o espectro de excitações sísmicas partir de um ruído branco gaussiano, seguindo características próprias do solo, como sua frequência natural e razão de amortecimento crítico. Este modelo proposto tem sido largamente usado, desde então, na análise de engenharia de estruturas sob excitações sísmicas. Apresenta a aceleração do solo como um processo aleatório estacionário idealizado.

Amim e Ang, 1966, mostraram que um processo gaussiano filtrado, modificado por uma função envelope, é um modelo satisfatório tanto para terremotos de altas quanto baixas magnitudes, estabelecendo um método consolidado de geração de sismos artificiais no domínio do tempo,

Shinozuka e Jan, 1972, propuseram um método eficiente para a simulação digital de processos aleatórios usando a densidade espectral de potência, que, essencialmente, faz uso de uma série de funções cosseno, frequências equilibradamente espaçadas e ângulos de fase aleatórios.

Mohebbi *et al.*, 2012 estudaram um método para mitigar a resposta de estruturas submetidas a eventos sísmicos baseado em múltiplos amortecedores de massa sintonizados. Como ilustração, um edifício de dez andares foi submetido a excitações sísmicas unidimensionais geradas através do espectro de Kanai-Tajimi. Foram comparadas as respostas dinâmicas do edifício com e sem os amortecedores. Os resultados mostraram a simplicidade e eficácia do método.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. Sistemas Amortecidos com Vários Graus de Liberdade Submetidos a Excitações de Base

Segundo Rao, 1995, o sistema de equações diferenciais do movimento dinâmico de um sistema com vários graus de liberdade sujeito a uma aceleração na base, pode ser escrito em forma matricial como:

$$M\ddot{\vec{x}}(t) + C\dot{\vec{x}}(t) + K\vec{x}(t) = -M\ddot{\vec{x}}_g(t) \quad \text{Eq. (4.1)}$$

onde

t é o tempo;

$\ddot{\vec{x}}_g$ é o histórico de aceleração do solo;

$\vec{x}(t)$ é o vetor deslocamento do sistema, em função do tempo;

$\dot{\vec{x}}(t)$ é o vetor velocidade do sistema, em função do tempo;

$\ddot{\vec{x}}(t)$ é o vetor aceleração do sistema, em função do tempo;

M é a matriz de massa do sistema;

C é a matriz de amortecimento do sistema;

K é a matriz rigidez do sistema.

4.2. Autocorrelação

Newland, 1987, define a função de autocorrelação para um processo aleatório $x(t)$ como o valor médio (ou expectância) do produto $x(t)x(t + \tau)$.

$$R_x(\tau) = E[x(t)x(t + \tau)] \quad \text{Eq. (4.2)}$$

Pela definição da estatística, o valor da autocorrelação está entre 1 (correlação perfeita) e -1, o que significa anti-correlação perfeita. O valor zero significa total ausência de correlação.

4.3. Densidade Espectral

Segundo Newland, 1987, ao analisar-se a composição de frequências de um processo aleatório natural, nota-se que o histórico no tempo de $x(t)$ de uma função não é periódico, portanto não pode ser representado por uma série de Fourier discreta. Além disso, para um processo estacionário, $x(t)$ perpetua-se indefinidamente e a condição

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt < \infty \quad \text{Eq. (4.3)}$$

não é satisfeita, logo a teoria clássica de análise de Fourier não pode ser aplicada a uma amostra da função. Essa dificuldade pode ser vencida analisando, não amostras de funções do processo somente, mas sua função de autocorrelação $R_x(\tau)$.

A lógica por trás desse raciocínio é que a função de autocorrelação dá informações sobre as frequências presentes em um processo aleatório indiretamente. Ainda segundo Newland, 1987, a função $R_x(\tau)$ tem seu máximo quando os valores de τ cujos $x(t)$ e $x(t + \tau)$ estão em fase e um mínimo para valores de τ para os quais eles estão em anti-fase, para um mesmo instante t . Desta forma, as frequências presentes no gráfico de $R_x(\tau)$ versus τ refletem o conteúdo de frequências de amostras de funções do processo randômico $x(t)$. Se o valor inicial do processo aleatório $x(t)$ for normalizado (ou ajustado) de modo que o valor médio do processo $m = E[x]$ seja zero, então, assumindo que $x(t)$ não tenha componentes periódicos,

$$R_x(\tau \rightarrow \infty) = 0 \quad \text{Eq. (4.4)}$$

e a condição

$$\int_{-\infty}^{\infty} |R_x(\tau)| d\tau < \infty \quad \text{Eq. (4.5)}$$

é satisfeita [Newland, 1987]. Pode-se então calcular a transformada de Fourier da função de autocorrelação $R_x(\tau)$ e sua inversa, que são dadas por

$$S_x(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad \text{Eq. (4.6)}$$

e

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad \text{Eq. (4.7)}$$

onde $S_x(\omega)$ é chamada densidade espectral do processo x e é uma função da frequência angular ω . A propriedade mais importante de $S_x(\omega)$ torna-se aparente quando coloca-se $\tau = 0$ na equação 4.7. Neste caso,

$$R(\tau = 0) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) d\omega \quad \text{Eq. (4.8)}$$

o que, pela definição fundamental de $R_x(\tau)$ em 4.2, fica

$$E[x^2] = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) d\omega. \quad \text{Eq. (4.9)}$$

O valor quadrático médio de um processo aleatório estacionário x é então dado pela área sobre o gráfico da função densidade espectral $S_x(\omega)$ versus ω , como apresentado na Figura 4.1.

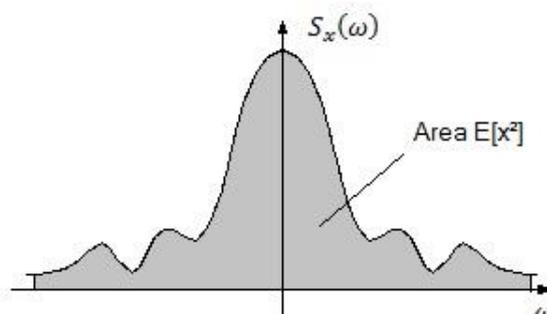


Figura 4.1 – A área sob a curva da densidade espectral é igual a $E[x^2]$.

Newland, 1987, mostra que transformada de Fourier pode ser expressa em termos de suas partes real e imaginária. Neste caso tem-se:

$$S_x(\omega) = A(\omega) - iB(\omega) \quad \text{Eq. (4.10)}$$

onde

$$A(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) \cos \omega\tau \, d\tau \quad \text{Eq. (4.11)}$$

e

$$B(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) \sen \omega\tau \, d\tau \quad \text{Eq. (4.12)}$$

Uma vez que $R_x(\tau)$ é uma função par de τ enquanto $\sen \omega\tau$ é uma função ímpar, o produto $R_x(\tau) \sen \omega\tau$ é ímpar e sua integral de $-\infty$ a 0 é exatamente igual e oposta da integral de 0 a ∞ . $B(\omega)$ é então zero e

$$S_x(\omega) = A(\omega) \quad \text{Eq. (4.13)}$$

o que, por (4.11), é uma função real par de ω . Em suma, a densidade espectral média quadrática de um processo aleatório estacionário $x(t)$ é uma função real, par e não-negativa de ω , da forma ilustrada na Figura 4.1.

Um processo cuja densidade espectral cobre uma larga faixa de frequências é chamado processo de banda larga, ou ruído branco, em analogia à luz branca. Seu histórico de tempo é feito pela superposição de toda a banda de frequências.

4.4. Método de Newmark

Os métodos de integração direta das equações de movimento consistem em procedimentos numéricos do tipo passo a passo que não requerem o cálculo prévio das características dinâmicas da estrutura, como autovalores e autovetores [Miguel, 2006]. Há duas categorias de métodos de integração direta, os implícitos e os explícitos. A convergência e exatidão da solução são funções da capacidade da função adotada para representar a

aceleração com precisão dentro de cada intervalo de tempo Δt , e também do tamanho do intervalo.

Segundo Miguel, 2006, o método de Newmark é o eficaz dos métodos implícitos. O método busca satisfazer as equações diferenciais do movimento no instante $t + \Delta t$, usando a solução neste instante. As funções que representam a variação do deslocamento, da velocidade e da aceleração no instante $t + \Delta t$ são dadas pelas seguintes equações:

$$\vec{x}(t_{i+1}) = (a_0[M] + a_5[C] + [K])^{-1}\{F(t_{i+1}) + [M][a_0\vec{x}(t_i) + a_1\dot{\vec{x}}(t_i) + a_2\ddot{\vec{x}}(t_i)] + [C][a_5\vec{x}(t_i) + a_6\dot{\vec{x}}(t_i) + a_7\ddot{\vec{x}}(t_i)]\} \quad \text{Eq. (4.14)}$$

$$\dot{\vec{x}}(t_{i+1}) = a_5[\vec{x}(t_{i+1}) - \vec{x}(t_i)] - a_6\dot{\vec{x}}(t_i) - a_7\ddot{\vec{x}}(t_i) \quad \text{Eq. (4.15)}$$

$$\ddot{\vec{x}}(t_{i+1}) = a_0[\vec{x}(t_{i+1}) - \vec{x}(t_i)] - a_1\dot{\vec{x}}(t_i) - a_2\ddot{\vec{x}}(t_i) \quad \text{Eq. (4.16)}$$

Onde os vetores $\vec{x}(t_{i+1})$, $\dot{\vec{x}}(t_{i+1})$ e $\ddot{\vec{x}}(t_{i+1})$ representam o deslocamento, a velocidade e a aceleração no tempo $t + \Delta t$ e os vetores $\vec{x}(t_i)$, $\dot{\vec{x}}(t_i)$ e $\ddot{\vec{x}}(t_i)$ representam o deslocamento, a velocidade e a aceleração no tempo t .

As constantes a_k são parâmetros do método de Newmark dados pelo conjunto de equações 4.17:

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{\alpha\Delta t^2}, \quad a_1 = \frac{1}{\alpha\Delta t}, \quad a_2 = \frac{1}{2\alpha} - 1, \quad a_3 = (1 - \delta)\Delta t \\ a_4 &= \delta\Delta t, \quad a_5 = \frac{\delta}{\alpha\Delta t}, \quad a_6 = \frac{\delta}{\alpha} - 1, \quad a_7 = \frac{\Delta t}{2}\left(\frac{\delta}{\alpha} - 2\right) \end{aligned} \right\} \quad \text{Eq. (4.17)}$$

Os parâmetros α e δ são incondicionalmente estáveis para valores $\alpha = 0,5$ e $\delta = 0,25$. Para o primeiro passo de tempo, os vetores deslocamento e velocidade devem ter condições iniciais conhecidas. O vetor aceleração inicial é dado pela equação 4.18:

$$\ddot{\vec{x}}(t_0) = [M]^{-1}[F(t_0) - [C]\dot{\vec{x}}(t_0) - [K]\vec{x}(t_0)] \quad \text{Eq. (4.18)}$$

5. METODOLOGIA

5.1. Geração do Sinal

A primeira parte deste trabalho consiste na elaboração de uma rotina computacional para geração do sinal sísmico aleatório usando o *software* MATLAB. A rotina foi estruturada em etapas de entrada de dados, pré-processamento, solução e pós-processamento, conforme a Figura 5.1:

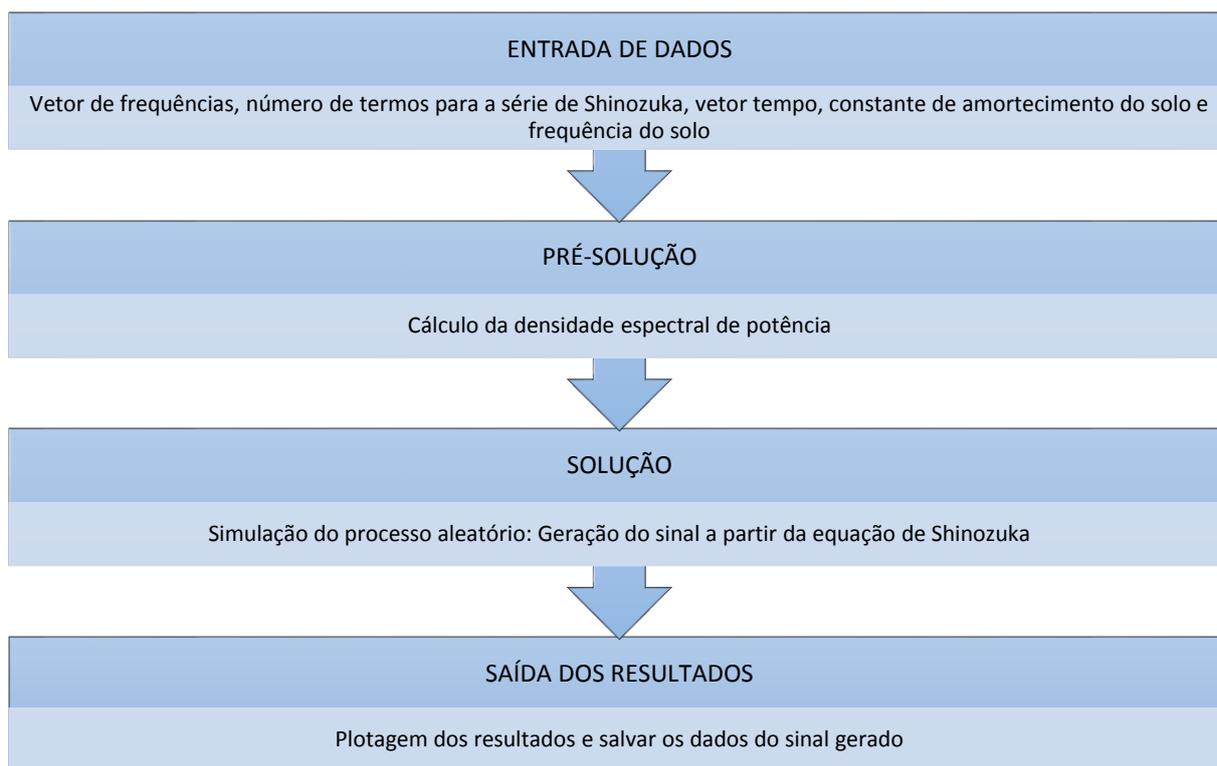


Figura 5.1 – Estrutura da rotina computacional para geração do sinal

A etapa de pré-processamento começa com a definição dos dados de entrada requeridos pelas equações.

Neste trabalho, usou-se um vetor de frequências, onde a frequência mínima $f_{min} = 0$, a frequência máxima $f_{max} = 25$ Hz e o incremento $df = 0,01$ Hz.

Segundo Rodrigues, 2012, a duração do sismo é um parâmetro de grande importância para a análise sísmica, ao mesmo tempo que é de difícil estimativa, pois apresenta alta variabilidade. A NBR 15421:2006 não estabelece nenhum requisito quanto à duração dos acelerogramas usados em projeto. Entretanto, a superestimação deste parâmetro é menos problemática do que sua subestimação. A fim de posterior comparação com a literatura estudada, foi usado um vetor tempo, onde tempo inicial $t_0 = 0$, tempo final $t_{final} = 50$ segundos e o incremento $dt = 0,02$ s.

Após, ainda nesta etapa, é calculada a densidade espectral de potência através de um ruído branco gaussiano, passado pelo filtro de Kanai-Tajimi [Kanai, 1961; Tajimi, 1960], através da equação:

$$S(\omega) = S_0 \left[\frac{\omega_g^4 + 4\omega_g^2 \xi_g^2 \omega^2}{(\omega^2 - \omega_g^2)^2 + 4\omega_g^2 \xi_g^2 \omega^2} \right] \quad \text{Eq. (5.1)}$$

e

$$S_0 = \frac{0,03 \xi_g}{\pi \omega_g (4 \xi_g^2 + 1)} \quad \text{Eq. (5.2)}$$

onde S_0 é a densidade espectral constante, e ξ_g e ω_g são o amortecimento e a frequência natural do solo, respectivamente. Neste trabalho, para fins de comparação, adotaram-se os mesmos valores considerados por Mohebbi *et al.*, 2012, $\xi_g = 0,3$ e $\omega_g = 37,3$ rad/s.

No próximo passo o programa resolve o método para simulação do processo aleatório, proposto por Shinozuka e Jan, 1972, cuja equação é dada por:

$$\vec{y}(t) = \sum_{k=1}^N \sqrt{2S_w(f_k)\Delta f_k} \cos(2\pi f_k t + \phi_k) \quad \text{Eq. (5.3)}$$

Para poder aplicar o método, a banda de frequências deve ser dividida em N intervalos, de modo que $\Delta f_k = f_{k+1} - f_k$. ϕ_k é o ângulo de fase, que é uma variável aleatória entre 0 e 2π , com função distribuição de probabilidade uniforme.

Na etapa final, obtém-se a aceleração do solo gerada pelo espectro de Kanai-Tajimi em função do tempo, ao normalizar e multiplicar o vetor com os todos valores do sinal gerado pelo valor de pico de aceleração do solo (ou PGA, *peak ground acceleration*), o qual, também para fins de comparação, foi usado o mesmo valor de Mohebbi *et al.* 2012, isto é, $PGA = 0,475g$. Nesta etapa também faz-se a plotagem dos gráficos para validação do resultado.

5.2. Análise Dinâmica

Após a geração do registro sísmico com as propriedades desejadas, para fins de ilustração, na segunda parte deste trabalho é realizada a análise de resposta dinâmica da estrutura de um prédio de dez andares. O prédio em consideração é o mesmo estudado por Mohebbi *et al.*, 2012, possibilitando assim comparar e validar a resposta obtida neste trabalho.

A Figura 5.2 mostra o edifício estudado, no qual o número de graus de liberdade n é igual a 10.

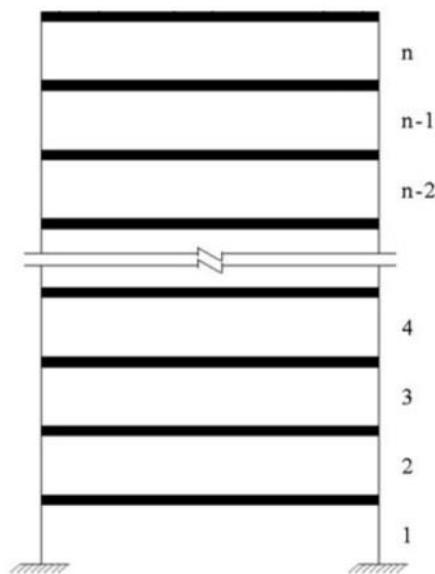


Figura 5.2 - Estrutura com n graus de liberdade, sendo $n = 10$ para o caso em estudo (fonte: Mohebbi *et al.*, 2012).

Todos os andares possuem massa, amortecimento e rigidez iguais. As propriedades são listadas abaixo:

$$m_i = 360000 \text{ kg ou } 360 \text{ t}$$

$$c_i = 6,2 \text{ MN.s/m}$$

$$k_i = 650 \text{ MN/m}$$

$$i = 1, 2, \dots, 10$$

Esta segunda rotina computacional foi desenvolvida seguindo os mesmos moldes da primeira, sendo as etapas ilustradas na Figura 5.3.

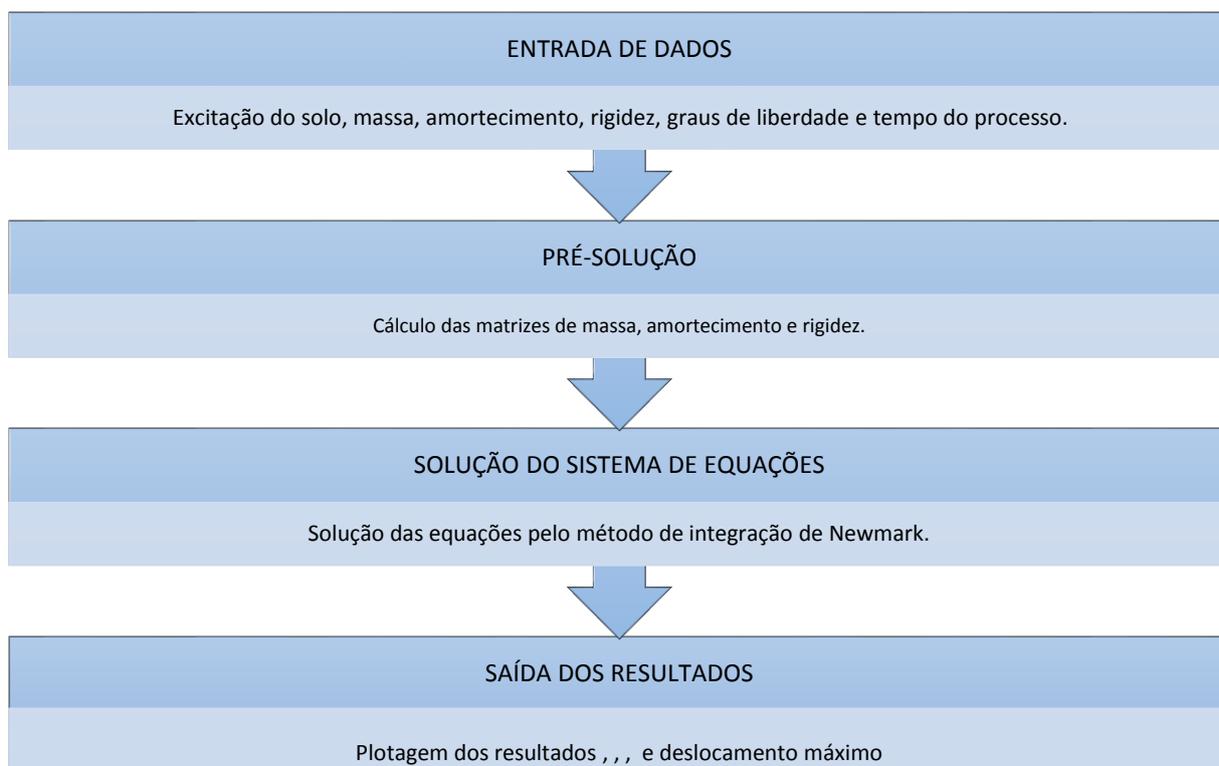


Figura 5.3 – Estrutura da rotina computacional para análise dinâmica

A etapa de pré-processamento agora consiste em importar os dados do histórico no tempo da excitação gerada no primeiro programa elaborado. Também são necessários os dados de massa, amortecimento e rigidez e é nesta etapa que são montadas as matrizes $[M]$, $[C]$ e $[K]$.

Posteriormente, dá-se a solução das equações de movimento pelo método de Newmark.

Os resultados são alcançados na última etapa, onde se obtém os vetores de deslocamento, velocidade e aceleração para cada andar da estrutura, além do valor máximo absoluto de deslocamento, localizado, como se esperava, no décimo andar do prédio (topo da estrutura), vide Tabela 6.1.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados gerados pela rotina numérico-computacional criada para este estudo, considerações e comparações com dados da literatura.

Como explicado no capítulo anterior, o primeiro cálculo executado pelo programa após a entrada dos dados é a densidade espectral de Kanai-Tajimi, que é apresentada na Figura 6.1.

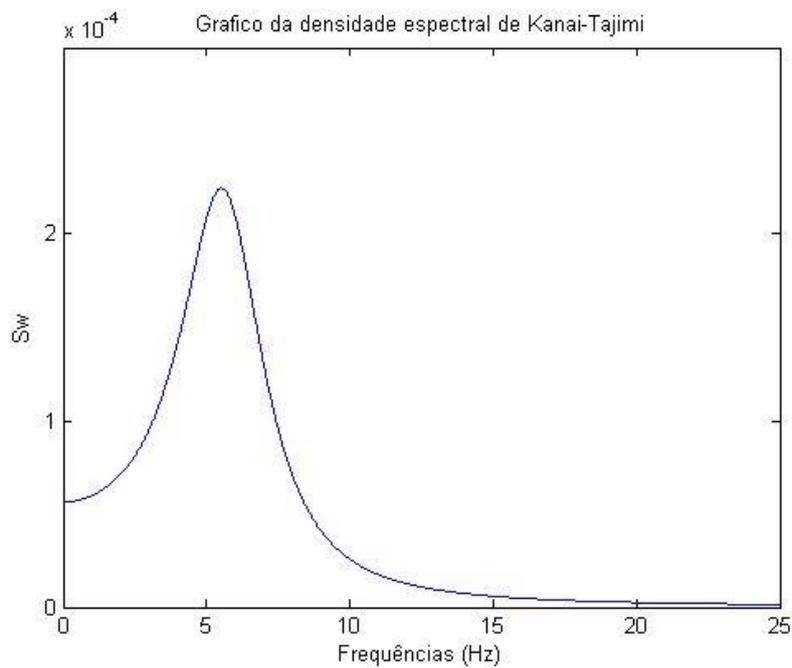


Figura 6.1 – Densidade espectral $S_x(\omega)$ obtida.

Enquanto a Figura 6.2 apresenta o acelerograma do sinal de entrada obtido a partir da densidade espectral apresentada na Figura 6.1.

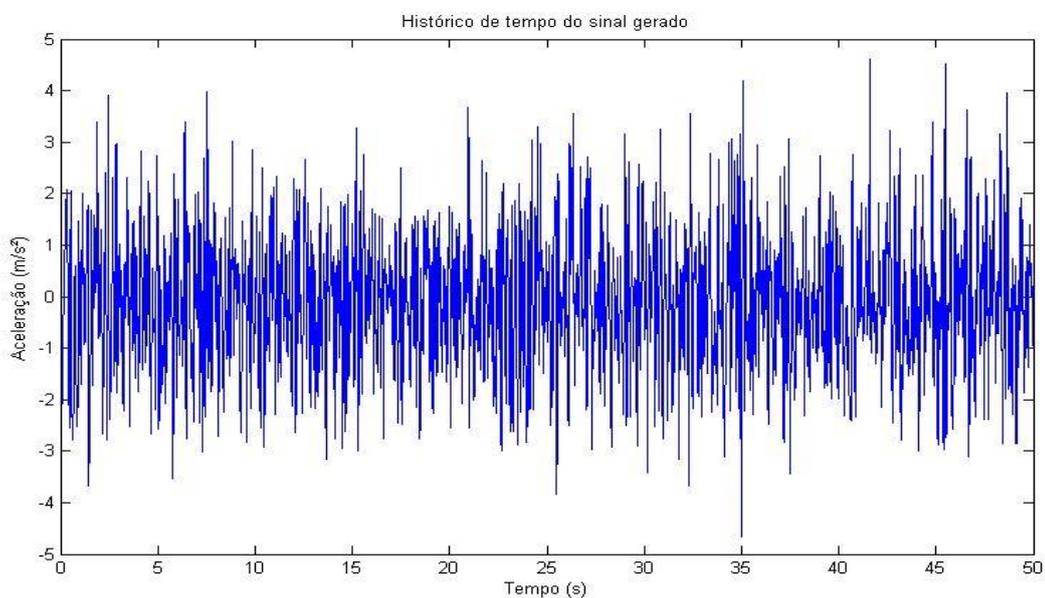
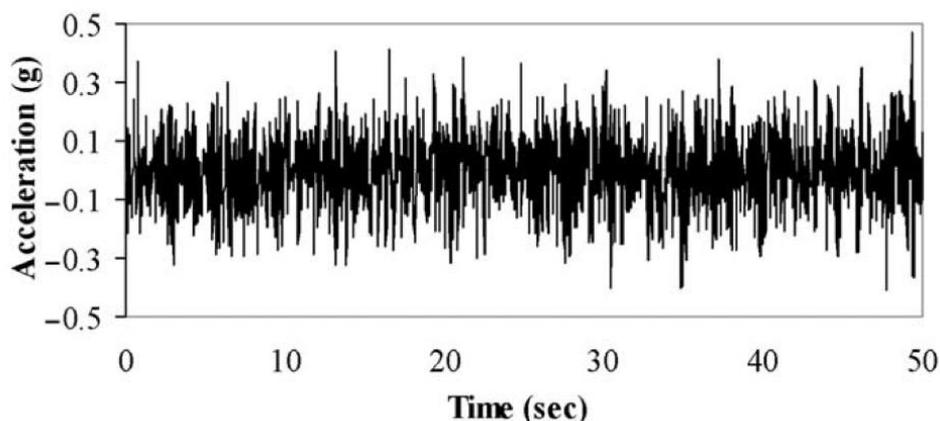


Figura 6.2 – Aceleração do solo gerada pelo espectro de Kanai-Tajimi em função do tempo.

A Figura 6.3 apresenta o acelerograma do sinal de entrada obtido por Mohebbi et. al, 2012, para fins de comparação.



Aceleração do solo obtido por Mohebbi et. al, 2012.

Pode-se notar na Figura 6.2 que a amplitude máxima absoluta corresponde ao valor de pico de aceleração do solo usado neste trabalho, de 0,475g, em torno dos trinta e cinco segundos, e que o conteúdo de frequência do sinal está condizente com a literatura, como por exemplo, o apresentado por Mohebbi *et al.*, 2012.

Em seguida, na Figura 6.4, apresenta-se a resposta do problema, na forma do histórico de deslocamentos do último andar da estrutura analisada (décimo GDL). Este andar é considerado crítico por ser o sujeito aos maiores deslocamentos, o que foi confirmado nos cálculos da segunda rotina computacional, onde usou-se o acelerograma gerado para calcular a resposta dinâmica da estrutura ao sismo. Fica evidente o formato diferente do sinal de saída em comparação ao sinal de entrada, visto não ser uma excitação harmônica. Na entrada, apenas o conteúdo de frequências de excitação é levado em conta, enquanto na saída as frequências da estrutura são adicionadas.

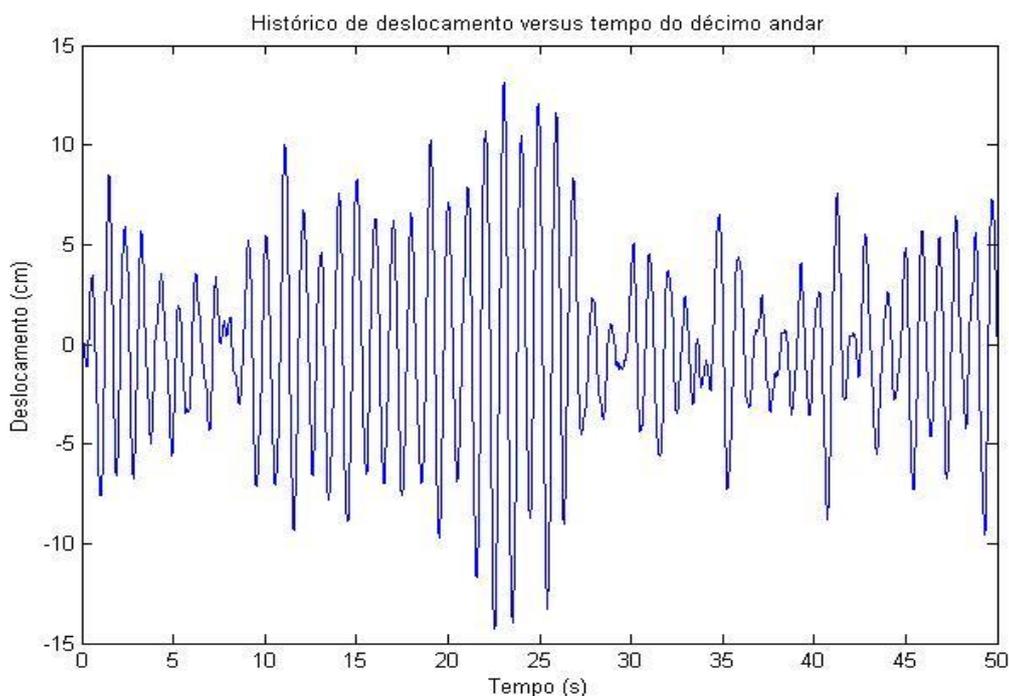


Figura 6.3 – Histórico de deslocamento versus tempo do décimo andar.

O valor máximo do deslocamento encontrado foi de 14,30 cm para este caso.

Este valor foi considerado muito satisfatório para validar o programa desenvolvido, visto ser muito próximo do encontrado por Mohebbi *et al.*, 2012, que obteve um valor para o deslocamento de 14,03 cm, para os mesmos parâmetros da estrutura e da equação de Kanai-Tajimi. Deve-se salientar que o valor não é exatamente igual, pois como o sismo na base é gerado através de um processo aleatório, cada vez que o sismo é gerado, estes não são exatamente iguais.

A fim de ilustrar o explicado no parágrafo anterior, a Tabela 6.1 mostra os valores de deslocamentos absolutos máximos para cada andar obtidos por Mohebbi *et al.* (2012) e os obtidos neste trabalho, considerando três gerações de acelerogramas com os mesmos parâmetros.

Tabela 6.1 – Comparação entre os deslocamentos máximos por andar obtidos por Mohebbi *et al.*, 2012 e os obtidos no presente trabalho.

Andar	Deslocamentos absolutos máximos (cm)			
	Mohebbi <i>et al.</i> , 2012	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	2,17	2,31	2,20	2,28
2	4,30	4,48	4,31	4,49
3	6,28	6,43	6,23	6,58
4	8,01	8,14	7,93	8,50
5	9,50	9,62	9,42	10,24
6	10,75	10,94	10,70	11,76
7	11,86	12,24	11,76	13,04
8	12,88	13,25	12,59	14,02
9	13,63	13,95	13,17	14,69
10	14,03	14,30	13,37	15,06

Como se pode observar na Tabela 6.1, os valores de deslocamentos máximos deram semelhantes aos encontrados por Mohebbi *et al.*, 2012. Isto mostra que tanto o programa desenvolvido para gerar o sismo aleatório quanto o programa elaborado para determinar a resposta dinâmica da estrutura estão corretos.

Analogamente, outra forma de validar as rotinas desenvolvidas é analisar as respostas em termos de aceleração. Neste sentido, a Tabela 6.2 mostra os valores de acelerações absolutas máximas para cada andar obtidos por Mohebbi *et al.* (2012) e os obtidos neste trabalho, considerando três gerações de acelerogramas com os mesmos parâmetros.

Tabela 6.2 – Comparação entre as acelerações máximas por andar obtidas por Mohebbi *et al.*, 2012 e as obtidas no presente trabalho.

Andar	Acelerações absolutas máximas (cm/s ²)			
	Mohebbi <i>et al.</i> , 2012	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	345,35	380,37	382,56	409,95
2	571,60	662,67	564,99	639,29
3	708,65	773,15	671,22	761,26
4	708,89	772,71	722,00	792,52
5	749,88	725,07	721,68	766,19
6	719,11	711,95	710,97	729,66
7	713,77	728,28	715,68	808,14
8	713,73	717,14	744,35	883,01
9	730,84	830,30	784,74	944,13
10	802,68	903,07	813,59	979,05

Finalmente, como se pode observar na Tabela 6.2, os valores de acelerações máximas também resultaram semelhantes aos encontrados por Mohebbi *et al.*, 2012. Isto mostra que tanto o programa desenvolvido para gerar o sismo aleatório quanto o programa elaborado para determinar a resposta dinâmica da estrutura estão corretos.

A resposta em termos de aceleração para o topo do edifício para a simulação 1 pode ser vista na Figura 6.4.

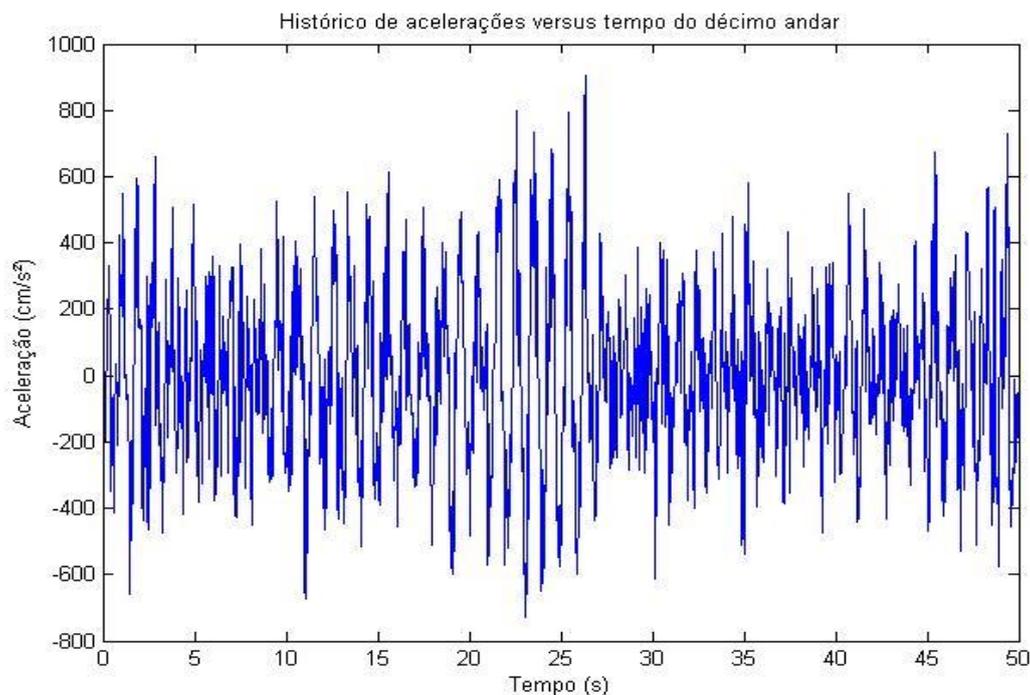


Figura 6.4 – Histórico de acelerações versus tempo do décimo andar.

Neste trabalho não foram comparados valores RMS, visto não ter sido disponibilizado na literatura, por Mohebbi et.al e, portanto, não ser possível a comparação.

7. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados nos capítulos anteriores demonstraram que este trabalho obteve êxito no seu objetivo principal, de simular um registro de excitação sísmica de acordo com características próprias do local onde uma estrutura será construída, usando o espectro proposto por Kanai-Tajimi e conceitos de processos estocásticos e não somente empregando registros sísmicos passados.

O objetivo secundário, de aplicar o registro gerado para realizar a análise dinâmica de uma estrutura também se mostrou bem sucedido, estando os dados de acordo com a literatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amin, M.; Ang, A. H. S.; “**Nonstationary stochastic model of earthquake motions.**” J. Eng. Mech. Div., ASCE, 94(2), 559-583. 1968.

Chopra, A. K.; “**Dynamics of structures.**” New York: McGraw-Hill, Fourth Edition, 2012.

Kanai, K.; “**An empirical formula for the spectrum of strong earthquake motions.**” Bulletin Earthquake Research Institute, University of Tokyo 39: 85–95. 1961.

Kumar, A.; “**Software for generation of spectrum compatible time history.**” Proc. 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B. C., Paper n° 2096. Canadá, 2004.

Miguel, L. F. F.; “**Introdução ao Estudo de Vibrações.**” Notas de Aula, UFRGS, 1a ed., 2006.

Mohebbi, M. *et al*; “**Designing optimal multiple tuned mass dampers using genetic algorithms (GAs) for mitigating the seismic response of structures.**” Journal of Vibration and Control 2012; DOI: 10.1177/1077546311434520.

Newland, D.E.; “**An introduction to random vibrations and spectral analysis.**” 2nd ed., Nova York, Longman, 1987.

Rao, S. S.; “**Mechanical Vibrations.**” Prentice Hall, 5ª ed, 1995.

Rodrigues, R. M. R.; “**Geração de acelerogramas sísmicos artificiais compatíveis com um espectro de resposta.**” Monografia, Escola Politécnica da UFRJ. 2012.

Shinozuka, M, Jan C.M.; “**Digital simulation of random process and its applications.**” J Sound Vib 1972; 25:111–8.

Tajimi, H.; “**A statistical method of determining the maximum response of a building structure during an earth- quake.**” In Proceedings of 2nd World Conference in Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, July, pp. 781–797. 1961.

Valencia, L. A. M. “**Generation and analysis of spectrum-compatible time- histories using wavelets.**” M.Sc. dissertation, University of Puerto Rico, Mayagüez Campus, Mayagüez, 2004.

APÊNDICE

Rotinas desenvolvidas:

Geração do sinal

```

%%% Entrada de dados

% N = 100;
f_min = 0; %Hz
f_max = 25; %Hz
del_f = 0.01;
f = f_min:del_f:f_max;

t_inicial = 0; %segundos
t_final = 50; %segundos
dt = 0.02;
t = t_inicial:dt:t_final;
sinal_gerado = zeros(1,length(t));

%%% Pre-processamento

% Geracao do vetor phi com N angulos aleatorios.
phi = zeros(1,length(f));
for count = 1:length(f)
    phi(count) = rand*2*pi;
end

Sw = zeros(1,length(f));

omega = 2*pi*f;
omega_g = 37.3; %rad/s
ksi_g = 0.3;
S0 = (0.03*ksi_g)/(pi*omega_g*(4*ksi_g^2+1));

% Resolve a eq de Kanai-Tajimi, gerando a densidade espectral no dominio da
frecuencia
for j = 1:length(f)
    Sw(j) = S0*[(omega_g^4+(4*omega_g^2*ksi_g^2*omega(j)^2))/((omega(j)^2-
omega_g^2)^2+(4*omega_g^2*ksi_g^2*omega(j)^2))];
end

%%% Solução da eq de Shinozuka

% Resolve o metodo de Shinozuka, gerando o sinal no dominio do tempo
for i = 1:length(t)
    for j = 1:length(f)
        V(j) = sqrt(2*Sw(j)*del_f)*cos(2*pi*f(j)*t(i)+phi(j));
    end
    sinal_gerado(i) = sum(V);
end

AcelExcit =
sinal_gerado(1,1:length(sinal_gerado))/max(abs(sinal_gerado(1,1:length(sinal_
gerado))));
PGA = 0.475*9.80665;

```

```

AcelExcit = PGA*AcelExcit;

%%% Plotagem dos resultados

figure(1);
plot(f,Sw) % Gera o grafico do espectro gerado por
Kanai-Tajimi
title('Grafico de Sw')

figure(2);
plot(t,sinal_gerado) % Gera o grafico da funcao y(t) de Shinozuka
para o intervalo de tempo t
title('Grafico de y(t)')

[espectro,f] = pwelch(sinal_gerado,t,[],[],2*max(f));
figure(3);
plot(f,espectro)

% Salva o sinal em txt
dlmwrite('Sinal_Kanai_Tajimi.txt',AcelExcit)

figure(4);
plot(t,AcelExcit)
title('Aceleração do Solo Gerada pelo Espectro de Kanai-Tajimi em Função do
Tempo')

```

Método de Newmark

```

function [y,v,a] = MetodoDeNewmark (M,C,K,GDL,Fexcit,t_final,dt)

%%% Definicao dos dados

t_inicial = 0; %segundos
t = t_inicial:dt:t_final;

x = zeros(GDL,length(t));
Dx = zeros(GDL,length(t));
D2x = zeros(GDL,length(t));

%%% Parametros de Newmark.
phi = 0.5;
alpha = 0.25;

%%% Constantes de Newmark.
a0 = 1/(alpha*(dt^2));
a1 = 1/(alpha*dt);
a2 = (1/(2*alpha))-1;
a3 = (1-phi)*dt;
a4 = phi*dt;
a5 = phi/(alpha*dt); %a5 = a4*a0;
a6 = (phi/alpha)-1; %a6 = a4*a1;
a7 = 0;

A = (a0*M+a5*C+K);
D2x(:,1) = M\((-C*Dx(:,1))-(K*x(:,1)));

```

```

    for i = 1:(length(t)-1)
        x(:,i+1) =
A \ (Fexcit(:,i+1)+M*(a0*x(:,i)+a1*Dx(:,i)+a2*D2x(:,i))+C*(a5*x(:,i)+a6*Dx(:,i)
+a7*D2x(:,i)));
        Dx(:,i+1) = a5*(x(:,i+1)-x(:,i))-a6*Dx(:,i)-a7*D2x(:,i);
        D2x(:,i+1) = a0*(x(:,i+1)-x(:,i))-a1*Dx(:,i)-a2*D2x(:,i);
    end

    y = x;
    v = Dx;
    a = D2x;
end

```

Análise Dinâmica

```

AcelExcit = importdata('Sinal_Kanai_Tajimi.txt');

t_final = 50;
dt = 0.02;

[M,C,K] = CalcularMatrizesMCK (360000, 6200000, 650000000, 10);

Fexcit = diag(M) * AcelExcit;

GDL = 10;

[matrizDeDeslocamentos,matrizDeVelocidades,matrizDeAceleracoes] =
MetodoDeNewmark (M, C, K, GDL, Fexcit, t_final, dt);

deslocMax = max(abs(matrizDeDeslocamentos(GDL,:)))

```