

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**Simulação de Movimentos Sísmicos Considerando o
Mecanismo de Ruptura da Falha Causativa do Terremoto**

Por:

Luis Angel Dalguer Gudiel

Tese apresentada ao corpo docente do curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul Como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia

Área de concentração: Estruturas

Porto Alegre
Novembro de 2000

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pelo Programa de Pós-Graduação. A tese foi realizada uma parte no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e a outra parte no Instituto de Investigação de Prevenção de Desastres (Disaster Prevention Research Institute, DPRI) da Universidade de Kyoto, Japão.

Prof. Jorge Daniel Riera
Orientador

Prof. Kojiro Irikura
Co-Orientador
Disaster Prevention Research Institute, DPRI,
Kyoto University, Japan

Prof. Francisco de Paula Simões Lopes Gastal
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

BANCA EXAMINADORA

- Prof. Jesús Antónío Berrocal Gómez
Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo (USP)

- Prof. José Luis Vital de Brito
Faculdade de Engenharia Civil da Universidade de Brasília (UnB)

- Prof. Marcelo Maia Rocha
Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

AGRADECIMENTOS

Ao professor Jorge Daniel Riera pela sua valiosa e constante orientação durante todo o período do meus estudos de doutorado no Brasil e, superando a distância, no Japão. Sua paixão pela ciência e a pesquisa, seu desejo da superação de seus alunos e aproveitando seus contatos no exterior, fez possível que minha tese, dada a característica do tema, fosse terminada no Japão.

Ao professor Kojiro Irikura, orientador durante minha estada no Japão, superando os problemas de idioma e diferenças de cultura, soube sabiamente me encaminhar na direção certa e pacientemente me transmitir os conhecimentos necessários, que ate então não eram muito bem entendidos por mim, da sismologia, para poder concluir satisfatoriamente a presente tese.

Aos amigos e colegas que tive a sorte de encontrar no meu caminho e que souberam me acolher e me fazer sentir em casa durante minha estada tanto no Brasil como no Japão. Eu posso me considerar uma pessoa de muita sorte porque estes AMIGOS, que prefiro manter como anônimos porque com certeza eles sabem de quem falo, souberam me transmitir esse calor humano indispensável para poder chegar a meta traçada. Mas não posso deixar de mencionar a Vichy e Flavia pêlos chazinhos do fim de semana em Porto Alegre.

Aos professores e funcionários da Escola de Engenharia e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia, pela convivência e auxílio prestado.

Especial agradecimento a Misaki-chan, pelo seu companheirismo durante minha estada no Japão.

A minha Família, a quem dedico esta tese, superando as dificuldades impostas pela distância souberam me alimentar de energia e força necessária para poder fazer realidade mais um de meus objetivos traçados.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) do Governo do Brasil e ao Ministério de Educação, Ciência e Cultura do Governo Japonês (MONBUSHO) pela concessão de bolsas de estudo durante minha estada no Brasil e no Japão respectivamente.

E finalmente a Deus, porque sem ele nada de isto teria sido possível.

CONTEÚDO

CONTEUDO	iv
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE SIMPOLOS	xvi
RESUMO	xix
ABSTRACT	xx
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Definição do problema,	1
1.2 A importância do desenvolvimento de modelos para a simulação (física) da excitação sísmica.	6
1.3 Objetivo da tese	9
1.4 Organização da tese	9
2 MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS.	11
2.1 Formulação do Método dos Elementos Discretos (MED)	11
2.2 Uso de modelos de elementos discretos na análise dinâmica da fonte sísmica	14
3 DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES INICIAIS E CONDIÇÕES DE BORDO	19
3.1 Critérios e métodos numéricos utilizados nos contornos artificiais do meio contínuo	19
3.1.1 Contornos absorventes locais no domínio do tempo	19
3.1.2 Contornos absorventes locais no domínio do tempo utilizado no presente trabalho	21
3.2 Condições iniciais e de contorno ao longo da falha pré-existente	25
4 AS EQUAÇÕES CONSTITUTIVAS DA FALHA	28
4.1 Modelo de fricção de Coulomb ou Fricção seca	29
4.2 Modelo de fricção dependente do deslizamento (<i>Slip-weakening model</i>)	30
4.3 Modelo de fricção dependente da velocidade (<i>Velocity-weakening model</i>)	33
4.4 Modelo de fricção dependente do tempo, deslizamento e velocidade (<i>Rate-state frictional model</i>)	34
5 APLICAÇÕES PRELIMINARES DO MODELO	36

5.1	Validade do modelo	36
5.2	Simulação do movimento aderência deslizamento: Precursores e seqüência de terremotos	37
5.2.1	Simulação da seqüência de terremotos e precursores	39
5.2.2	Simulação da seqüência de terremotos e movimentos sísmicos	47
5.3	Simulações do mecanismo da fonte de falha de um terremoto.	57
6	MODELO DO SISMO DE KOBE DE 1995	63
6.1	Introdução	63
6.2	Modelagem da Falha	63
6.3	Resultados da simulação	65
7	MODELO DO SISMO DE CHI-CHI (TAIWAN) DE 1999	72
7.1	Introdução	72
7.2.	Breve descrição de falhas normais e inversas	75
7.3	Simulação de movimento sísmico e a ruptura dinâmica da falha perto do epicentro (modelo parte sul)	76
7.3.1	Modelo dinâmico da falha	77
7.3.2	Resultados da simulação	81
7.4	Diferenças do processo de ruptura da falha entre a parte norte e parte sul	89
7.4.1	Modelo dinâmico da falha (modelo norte)	91
7.4.2	Comparação dos resultados do modelo norte e modelo sul	91
8	SIMULAÇÃO DE MOVIMENTOS SÍSMICOS EM ALTAS FREQUENCIAS	99
8.1	Introdução.	99
8.2	Procedimento para simular movimentos sísmicos em bandas de freqüência ampla	100
8.3	Simulação do movimento sísmico em altas freqüências	100
9	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	107
9.1	Conclusões	107
9.2	Recomendações	110
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. 1. Distribuição de danos em edificações causados pelo terremoto de Hyogo-ken Nanbu (Kobe, Japão) de 1995 (Architectural Institute of Japan ,1995). A área vermelha representa a zona de danos severos em prédios. Linha azul representa os segmentos da falha causativa do terremoto (Sekiguchi et al., 1996) 7
- Figura 1.2. Distribuição de danos em edificações causado pelo terremoto de Chi-Chi (Taiwan) de 1999. Pontos de cor laranja são zonas com prédios completamente danificados e os pontos verdes severamente danificados (Architecture & Building Research Institute, Ministry of Interior, ROC, Taipei, Taiwan). A linha vermelha representa a falha Chelungpu (falha causativa do terremoto), e a linha roxa é a falha Shuangtung (como referência). 8
- Figura 2.1. Método dos Elementos Discretos construído por módulos cúbicos. (a) módulos cúbico básico, (b) representação de um sólido em 3 dimensões (c) representação de um corpo em estado plano de deformações (o deslocamento em z igual a zero). 11
- Figura 2.2. Esquema do modelo numérico utilizado por Burridge e Knopoff (1967) para estudar o processo dinâmico da fonte de terremotos. 15
- Figure 2.3. Representação do modelo simples de aderência-deslizamento que acontece quando a força da mola $k\varepsilon$ aplicada na massa M supera a força de fricção ϕP (ϕ é o coeficiente de fricção). a) modelo simples de massa-mola; b) movimento de aderência-deslizamento “*stick-slip motion*” representado pela curva deslocamento-tempo (Jaeger e Cook, 1976). 15
- Figura 2.4. Esquema do modelo da falha em dois dimensões utilizando elementos discretos (Mikumo e Miyatake 1978). 16
- Figura 2.5. Modelo utilizado para a simulação do mecanismo focal utilizando o Método dos Elementos Distintos. O Modelo esta sob um deslocamento controlado na parte superior

- e inferior do bloco, a falha pré-existente esta localizada no meio do modelo. Uma vez superada as forças que interagem entre as partículas que se encontram ao longo da falha, elas perdem contato e o deslizamento da falha acontece (Rimal, 1992). 17
- Figura 2.6. Modelo utilizado por Shi et al. 1998 para estudar o mecanismo de uma falha reversa utilizando elementos de treliça triangulares. O bloco de acima (Hanging wall) está submetido a uma força móvel que o faz deslizar sobre o bloco de baixo (footwall) uma vez que as forças de corte superem as forças de fricção. 18
- Figure 2.7. Modelo utilizado por Doz e Riera (1995) para simular o mecanismo de aderência-deslizamento utilizando elementos de treliça cúbicos. O bloco está sobre uma superfície rígida e submetido a um deslocamento controlado no lado esquerdo do bloco (ponto A). O deslizamento do bloco acontece quando as forças de fricção são superadas pelas forças de corte. 18
- Figure 3.1. a) Barra prismática semi-infinita; b) Equilíbrio de um elemento infinitesimal, c) barra truncada modelada com amortecedor viscoso. 21
- Figura 3.2. Comparação da propagação de ondas de um modelo com contorno absorventes e sem contornos absorventes em um meio contínuo simulado em estado plano de deformações (2D). Foi aplicada uma carga unitária horizontal retangular durante 0.5 segundos distribuída em uma área de 1km x 1km localizada no meio de um espaço de 10km x 10km. 24
- Figura 3.3. Meio contínuo finto com superfície S e uma falha pré-existente. A área limitada pelas linhas entrecortadas representa a região a ser modelada. O modelo é assumido em estado plano de deformações. As setas mostram a orientação das tensões tangenciais ao longo da falha pré-existente. 25
- Figura 3.4. Esquema do processo de ruptura da falha no tempo t . 26
- Figura 4.1. a) Relação constitutiva entre as tensões de corte e o deslizamento da falha observado em experimentos de aderência-deslizamento de Ohnaka et al. (1987). Durante o

- progresso do deslizamento da falha, as tensões de corte incrementam rapidamente a um valor pico σ_p , e logo diminui gradualmente a um nível de fricção constante σ_f em um deslocamento crítico D_c . b) Modelo simplificado de fricção dependente do deslizamento “*slip weakening model*” proposto por Andrews (1976) 31
- Figura 4.2. Modelo simplificado de fricção dependente da velocidade de deslizamento “*velocity weakening model*”. (Reproduzido de Fukuyama e Madariaga, 1998) 34
- Figura 5.1. Comparação da simulação numérica com a solução analítica de um problema de propagação de ruptura de uma falha por corte (*in-plane problem*) com velocidade de ruptura constante de $v_r=0.80\beta$: (a) deslizamento (b) velocidade do deslizamento e (c) tensão por corte. As cruzes representam a solução numérica e a linha sólida a solução analítica apresentada por Kostrov (1964). 37
- Figura 5.2. Esquema do processo de propagação aderência deslizamento (reproduzida de Doz, 1995) 39
- Figura 5.3 a) Esquema do bloco de rocha com uma falha simulada. As flechas indicam a direção das cargas. b) Bloco triangular sobre uma superfície rígida utilizada para simular o movimento de aderência-deslizamento. Este representa a metade do bloco mostrada em (a). F é a força móvel para gerar deslizamento. 41
- Figura 5.4. Distribuição de deslizamento ao longo da falha para um coeficiente de fricção igual a 0.55. A seqüência de eventos principais estão precedidas por pequenos eventos (precursores): a) Vista da distribuição de deslizamento em espaço e tempo dos dois primeiros principais eventos com seus respectivos precursores; b) Registro de deslocamentos do deslizamento dos nós P5 a P13 mostrando uma serie de precursores do primeiro evento principal. 42
- Figura 5.5. Distribuição do deslizamento ao longo da falha para um coeficiente de fricção igual a 1.00. A seqüência de eventos principais estão precedidas por pequenos eventos (precursores): a) Vista da distribuição de deslizamento em espaço e tempo dos dois primeiros principais eventos com seus respectivos precursores; b) Registro do

deslocamentos do deslizamento dos nós P5 a P13 mostrando uma serie de precursores do primeiro evento principal; c) Detalhe do deslocamento do deslizamento (linhas sólidas) e da velocidade do deslizamento (linhas tracejadas) do primeiro precursor do primeiro evento principal. 43

-Figura 5.6. Distribuição de deslizamento ao longo da falha para um coeficiente de fricção igual a 3.0. A seqüência de eventos principais estão precedidas por pequenos eventos (precursores): a) Vista da distribuição de deslizamento em espaço e tempo de três principais eventos com seus respectivos percursos; b) Registro do deslocamentos do deslizamento dos nós P4 a P12; c) Perfil do deslizamento ao longo da falha mostrando a periodicidade dos principais eventos. 44

-Figura 5.7. Distribuição de deslizamento ao longo da falha para um coeficiente de fricção igual a 5.0. A seqüência de eventos principais estão precedidas por pequenos eventos (precursores): a) Vista da distribuição de deslizamento em espaço e tempo de três principais eventos com seus respectivos percursos; b) Registro do deslocamentos do deslizamento dos nós P2 a P10; c) Perfil do deslizamento ao longo da falha mostrando a periodicidade dos principais eventos. 45

-Figura 5.8. a) Processo de nucleação observado em experimentos de laboratório desenvolvidos por Ohanka e Kuwahara (1990); b) Processo de nucleação observado em simulações numéricas apresentadas por Ben-Zion e Rice (1997). 46

-Figura 5.9. Perfil de ciclos de terremotos desenvolvidos por Ben-Zion e Rice (1995). 46

-Figura 5.10. Representação do modelo deformado em corte puro. 48

-Figura 5.11. Modelo utilizado para simular o movimento de aderência-deslizamento ao longo da falha pré-existente. As linhas pontilhadas representam a deformação do modelo em corte puro. As barras verticais nos lados da falha pré-existente simulam a anti-simetria do modelo. Os amortecedores nos contornos artificiais são os contornos absorventes. 49

-Figura 5.12. Esquema que mostra a localização do início da ruptura (hipocentro), direção

da propagação da ruptura e a distribuição das estações de registro hipotéticas A, B, C e D.	50
-Figura 5.13. Evolução do deslizamento dos nós da falha pré-existente.	51
-Figura 5.14. Evolução da tensão de corte meia ao longo da falha pré-existente.	51
-Figura 5.15. Evolução da tensão normal meia ao longo da falha pré-existente.	52
-Figura 5.16. Deslizamento meio final dos três eventos principais (curva tempo-deslocamento meio).	52
-Figura 5.17. Detalhe da propagação de ruptura do evento S1 (curva de tempo-deslocamento de cada nó ao longo da falha).	53
-Figura 5.18. Componente vertical (direção X) de aceleração das estações A, B, C e D perto da falha.	53
-Figura 5.19. Componente vertical e horizontal dos registros de aceleração das estações A, B, C e D.	54
-Figura 5.20. a) Falha teórica que se projeta até o infinito. O processo de ruptura inicia-se no meio da falha e propaga-se bilateralmente; b) Modelo de fricção dependente do deslizamento utilizado na simulação dinâmica.	58
-Figura 5.21. Solução dinâmica em função da posição ao longo do plano de falha no tempo normalizado $\beta t/L_c = 8.07$. Linha sólida representa o deslizamento normalizado dividido por 10, $\frac{\mu u}{10L_c(\Delta\tau)}$; linha entrecortada é a tensão de corte normalizado, $(\frac{\tau}{\Delta\tau})$: a) Solução numérica obtida por Andrews(1976) e b) Solução numérica obtida no presente trabalho.	60
-Figura 5.22. Solução dinâmica em função da posição ao longo do plano de falha no tempo normalizado $\beta t/L_c = 10.38$. (legenda é a mesma da Figura 5.21): a) Solução numérica obtida por Andrews(1976) e b) Solução numérica obtida no presente trabalho.	60

- Figura 5.23. Solução dinâmica em função da posição ao longo do plano de falha no tempo normalizado $\beta t/L_c = 12.36$. (legenda é a mesma da Figura 5.21): a) Solução numérica obtida por Andrews(1976) e b) Solução numérica obtida no presente trabalho. 61
- Figura 5.24. Solução dinâmica em função da posição ao longo do plano de falha no tempo normalizado $\beta t/L_c = 14.34$. (legenda é a mesma da Figura 5.21): a) Solução numérica obtida por Andrews(1976) e b) Solução numérica obtida no presente trabalho. 61
- Figura 6.1. Modelo de falha desenvolvido por Sekiguchi et al. (1996a) (resultados de inversões cinemática de registros de movimentos fortes) e localização das estações de registro sísmicos utilizados para a comparação dos resultados. 64
- Figura 6.2. Modelo de falha utilizado para a simulação dinâmica do terremoto de Kobe de 1995. 65
- Figura 6.3. Comparação dos registros da componente normal a falha das velocidades e acelerações das estações KOB e KBU com os simulados. 67
- Figura 6.4. Comparação da transformada de Fourier dos registros da componente normal a falha das velocidades e acelerações das estações KOB e KBU com os simulados. 68
- Figura 6.5. Comparação dos picos de velocidade com modelos empíricos de atenuação de Fukushima e Midorikawa (1995) e Joyner e Boore (1981). Na parte superior do gráfico mostra-se um esquema das seções (S1-S8) utilizadas para registrar os picos de velocidade da simulação numérica. 69
- Figura 6.6. Comparação dos picos de aceleração com modelos empíricos de atenuação de Fukushima e Tanaka (1992) e Joyner e Boore (1981). Na parte superior do gráfico mostra-se um esquema das seções (S1-S8) utilizadas para registrar os picos de aceleração da simulação numérica. 70
- Figura 7.1. Localização da superfície de ruptura da falha Chelongpu, epicentro e estações

- de registro. 73
- Figura 7.2. Comparação dos pseudo espectros de velocidade dos registros das estações localizadas na parte norte (TCU052) e na parte sul (TCU129 e TCU089). 74
- Figura 7.3. a) Mapa de distribuição de danos em edificações causado pelo terremoto de Chi-Chi (Taiwan) em 1999; os pontos de cor laranja são zonas com prédios completamente danificados e os pontos verdes severamente danificados (Architecture & Building Research Institute, Ministry of Interior, ROC, Taipei, Taiwan); b) Distribuição da população ao longo da falha causativa do terremoto (Tsai e Huang, 2000). A linha vermelha representa a falha Chelungpu (falha causativa do terremoto), e a linha roxa na figura (a) é a falha Shuangtung (como referência). 74
- Figura 7.4. Esquema de uma falha normal. 75
- Figura 7.5 Esquema de uma falha invertida. 76
- Figura 7.6. Localização da superfície de ruptura da falha Chelongpu e um esquema da seção transversal do modelo utilizado para a simulação dinâmica da parte sul. A linha grossa tracejada mostra a seção transversal do modelo. Os triângulos pretos são as estações de registro utilizadas para comparar resultados. A estrela representa a localização do hipocentro. 78
- Figura 7.7. Modelo da falha e distribuição de parâmetros utilizados para a simulação dinâmica do processo de ruptura da parte sul perto do epicentro. 79
- Figura 7.8. Sólido utilizado para a simulação dinâmica de um terremoto de falha inversa. A área obscura é separada da área do modelo dinâmico cortando as barras que se conectam entre elas. A linha grossa representa a superfície livre. 80
- Figura 7.9. Velocidade de deslizamento e deslizamento ao longo da falha do modelo da parte sul. 82

- Figura 7.10. Imagens instantâneas cada segundo durante 12 segundos da componente de velocidade paralela a falha. Na parte superior é mostrada a distribuição das máximas velocidades. 83
- Figura 7.11. Distribuição no espaço-tempo da velocidade de deslizamento ao longo da falha correspondente ao “*hanging wall*”. Modelo parte sul. 84
- Figura 7.12. Comparação da componente horizontal e vertical dos máximos deslocamentos ao longo da superfície entre os simulados e os dados do GPS. Modelo parte sul. 84
- Figura 7.13. Comparação da componente horizontal e vertical do deslocamento final e das máximas velocidades ao longo da superfície entre o modelo utilizado para simular o terremoto de Taiwan (linha sólida) e um outro modelo onde a ruptura não alcança a superfície (linha entrecortada). a) Deslocamento final; b) picos de velocidade. 85
- Figura 7.14. Esquema da propagação de ruptura no espaço e tempo. Modelo parte sul. 86
- Figura 7.15. Comparação entre as simulações e os registros da estação TCU084 das componentes leste-oeste (horizontal) e vertical dos deslocamentos e velocidades dos movimentos sísmicos. Na parte inferior mostra-se a comparação num intervalo de frequência entre 0.50Hz e 1.0Hz. 87
- Figura 7.16. Comparação entre as simulações e os registros da estação TCU089 das componentes leste-oeste (horizontal) e vertical dos deslocamentos e velocidades dos movimentos sísmicos. Na parte inferior mostra-se a comparação num intervalo de frequência entre 0.50Hz e 1.0Hz. 87
- Figura 7.17. Comparação entre as simulações e os registros da estação TCU129 das componentes leste-oeste (horizontal) e vertical dos deslocamentos e velocidades dos movimentos sísmicos. Na parte inferior mostra-se a comparação num intervalo de frequência entre 0.50Hz e 1.0Hz. 88
- Figura 7.18. Comparação entre as simulações e os registros da estação TCU122 das

- componentes leste-oeste (horizontal) e vertical dos deslocamentos e velocidades dos movimentos sísmicos. Na parte inferior mostra-se a comparação num intervalo de frequência entre 0.50Hz e 1.0Hz. 88
- Figura 7.19. Comparação entre as simulações e os registros da estação TCU116 das componentes leste-oeste (horizontal) e vertical dos deslocamentos e velocidades dos movimentos sísmicos. Na parte inferior mostra-se a comparação num intervalo de frequência entre 0.50Hz e 1.0Hz. 89
- Figura 7.20. Localização da seção transversal do modelo da parte norte e parte sul. Os triângulos representam as estações utilizadas par comparação. 90
- Figura 7.21. Modelo da falha e distribuição de parâmetros utilizados para a simulação dinâmica do processo de ruptura da parte norte. 91
- Figura 7.22. Velocidade de deslizamento e deslizamento ao longo da falha do modelo da parte norte. 92
- Figura 7.23. Distribuição no espaço-tempo da velocidade de deslizamento ao longo da falha correspondente ao “*hanging wall*”. Modelo norte. 93
- Figura 7.24. Comparação entre as simulações e os registros da estação TCU052 das componentes leste-oeste (horizontal) e vertical dos deslocamentos e velocidades dos movimentos sísmicos. Na parte inferior mostra-se a comparação num intervalo de frequência entre 0.50Hz e 1.0Hz. 93
- Figura 7.25. Comparação do processo da propagação de ruptura entre o modelo sul e modelo norte. 94
- Figura 7.26. Comparação do deslocamento final ao longo da superfície livre entre o modelo sul e modelo norte. 95
- Figura 7.27. Comparação das máximas velocidade ao longo da superfície livre entre o

modelo sul e modelo norte.	96
-Figura 7.28. Comparação entre o modelo sul e modelo norte das máximas velocidade no intervalo de frequência 0.5Hz-2.0Hz ao longo da superfície livre.	96
-Figura 7.29. Comparação da formas de onda das velocidades ao longo da superfície livre entre o modelo norte e modelo sul.	97
-Figura 8.1. Comparação entre as observações e a simulação das componentes horizontal e vertical das histórias de velocidade no tempo em um intervalo de frequência de 0.01Hz-20.0Hz.	105
-Figura 8.2. Comparação entre as observações e as simulações da transformada de Fourier, representado pela densidade espectral de potência, das componentes vertical e horizontal das velocidades e acelerações.	106

LISTA DE SIMBOLOS

- A : Área de uma barra prismática ou da falha.
- AE_d : Rigidez equivalente de uma barra diagonal de um módulo cúbico do Método dos Elementos Discretos.
- AE_n : Rigidez equivalente de uma barra normal de um módulo cúbico do Método dos Elementos Discretos.
- c : Constante de amortecimento proporcional a massa.
- c_l : Velocidade de onda de uma barra axial
- d : Distância mais próxima da projeção da superfície à ruptura da falha.
- $D(x,t)$: Deslizamento da falha em x no tempo t .
- $\dot{D}(x,t)$: Velocidade do deslizamento da falha em x no tempo t .
- D_c : Deslocamento crítico.
- D_f : Constante proporcional ao amortecimento crítico ξ_n
- dx : Diferencial de x .
- E : Módulo de elasticidade longitudinal ou módulo de Young.
- F : Caminho de radiação da velocidade de onda S
- f_i : Componente de força nodal na direção i .
- f_i^b : Força elástica da barra b na direção i .
- f_i^{ext} : Resultante de todas as forças externas nodais na direção i .
- f_n : Freqüência natural de vibração do modo n
- f_u : Força tangencial última antes de acontecer a ruptura de uma falha.
- $G(\omega)$: Resposta do efeito do sítio G : Energia superficial de fratura efetiva.
- $H(\omega-\omega_c)$: Função de passo unitário.
- L : Comprimento da barra de um módulo cúbico do Método dos Elementos Discretos.
- L_c : Comprimento crítico de ruptura de uma falha.
- m : Massa nodal.
- m_0^i : Momento sísmico do sub-evento correspondente à subfalha i .
- M : Magnitude.
- M_w : Magnitude do momento sísmico.
- M_o : Momento sísmico
- $P(\omega)$: Filtro de quarto ordem de Butterworth.

- PV : Pico de velocidade.
 PA : Pico de aceleração.
 Q : Fator de qualidade do meio.
 r_i : Distância do sítio à subfalha i
 R : Distância em km da fonte ao sítio.
 $S(\omega)$: Espectro da fonte sísmica.
 S_e : Excesso de tensão “*strength excess*”.
 $T(D, \dot{D})$: Força de fricção dependente do deslizamento D e da velocidade de deslizamento \dot{D} que atua ao longo da falha.
 T_u : Tensão última ou a resistência da superfície da falha ao deslizamento.
 T_d : Tensão de fricção dinâmica.
 u_i : Componente do vetor de deslocamentos nodais na direção i .
 \dot{u} : Velocidade
 \ddot{u} : Aceleração.
 $u(x,y,t)$: Deslocamento na direção x em x,y no tempo t
 $v(x,y,t)$: Deslocamento na direção y em x,y no tempo t
 V_{min} : Velocidade mínima de propagação de onda no contínuo.
 V_o : Velocidade de deslizamento característica.
 V_p : Velocidade de propagação da onda P
 $W(t)$: Função de ruído Gaussiano janelado no domínio do tempo..
 $W(\omega)$: Espectro de Fourier do ruído Gaussiano janelado.
 α : Velocidade de ondas P .
 β : Velocidade das ondas S .
 ΔL : Menor comprimento de barra de um módulo cúbico do Método dos Elementos Discretos
 Δt : Intervalo de integração no tempo.
 Δt_{crit} : Intervalo de integração crítico no tempo.
 ΔT : Queda da resistência “*breakdown strength drop*”.
 Δx : Comprimento do lado de um elemento cúbico.
 $\Delta \tau, \Delta \sigma$: Queda de tensão.
 δ : Deslizamento.
 $\dot{\delta}$: Velocidade de deslizamento.
 ξ_n : Relação de amortecimento crítico.

- ε_b : Deformação axial da barra b
 $\dot{\varepsilon}_b$: Velocidade de deformação da barra b .
 ω : Freqüência angular em radianes.
 ω_c : Freqüência de esquina circular em radianes
 θ : Variável de estado.
 ϕ : Coeficiente de fricção.
 μ_d : Coeficiente de fricção dinâmico.
 μ_s : Coeficiente de fricção estático.
 λ e μ : Constantes de Lamé
 λ_c : Escala característica da superfície de ruptura (considerado como o comprimento da onda característico da irregularidade geométrica da superfície da falha).
 ρ : Densidade de massa
 τ : Tensão de corte ao longo da falha.
 τ_o : Tensão inicial de corte ao longo da falha.
 η : Coeficiente de amortecimento proporcional a rigidez
 π : Número pi
 σ_n : Tensão normal.
 ν : Coeficiente de Poisson
 $\frac{\partial(f)}{\partial x}$: Derivada parcial de uma função f em relação a x
 $\frac{\partial^2(f)}{\partial x^2}$: Segunda derivada parcial de uma função f em relação a x .

Abreviaturas:

- GPS : Do Inglês *Global Positioning Satellite*
 MED : Método dos Elementos Discretos

RESUMO

O estudo dos terremotos, considerado um tema de interesse na comunidade científica internacional, tem como um dos objetivos a prevenção de desastres. Para este propósito é necessário o estudo do mecanismo da falha para atingir um melhor entendimento do processo envolvido nos terremotos.

Neste contexto, no presente trabalho é apresentado um modelo teórico de simulação do mecanismo dinâmico da falha. O meio contínuo, com uma falha pré-existente, é modelado em condições de estado plano de deformações. A solução numérica é calculada utilizando o Método dos Elementos Discretos (MED).

O MED consiste na representação de sólidos modelados com um arranjo de barras normais e diagonais unidas por massas nodais. A análise dinâmica é desenvolvida resolvendo a simples equação de movimento, dada pela segunda lei de Newton, para cada massa nodal através do método explícito de integração numérica no domínio do tempo.

A solução numérica é desenvolvida acoplando o movimento elastodinâmico do meio contínuo perto da falha com o deslizamento friccional de uma falha pré-existente. A simulação da ruptura espontânea, causada pelas repentinas quedas de tensão das asperezas da falha, é modelada utilizando uma lei de fricção ao longo da falha dependente do deslizamento “*slip-weakening friction model*”. A ruptura é iniciada impondo quedas de tensão em um domínio limitado de espaço da área hipocentral.

A validade do modelo é mostrada comparando a solução numérica do processo de ruptura dinâmica de uma falha obtida através do MED com a solução analítica e soluções numéricas apresentadas na literatura especializada. Em seguida simula-se o mecanismo de aderência-deslizamento para descrever seqüências de terremotos e o processo de nucleação representada através dos precursores de um terremoto. Ajusta-se o modelo para simular seqüências de terremotos, em escala real, e avalia-se a geração dos movimentos sísmicos mostrando os efeitos da direcionalidade da propagação da ruptura.

Finalmente, o modelo proposto é utilizado para a simulação do mecanismo focal e movimentos sísmicos dos terremotos de Kobe de 1995 e de Taiwan de 1999 e comparando os resultados obtidos da simulação com os observados. A simulação dos movimentos sísmicos perto do epicentro correspondem satisfatoriamente aos observados. Mostrando desta maneira que as principais características dos terremotos são reproduzidas.

ABSTRACT

The study of earthquakes, which they are an interest of the international community, has the objective of disaster prevention. For this purpose the study of faults mechanism is fundamental to achieve a better understanding of process involved in earthquakes.

In this context, a theoretical model to simulate the dynamic mechanism of a fault is presented herein. The continue medium with a pre-existing fault, assumed in a plane strain condition, is considered. The numerical simulation is calculated using the Discrete Element Method (DEM).

The DEM consists in the representation of solids modeled by an array of normal and diagonal elements linking lumped nodal masses. The dynamic process is obtained by resolving the simple equation of motion of Newton law for each lumped nodal mass by an explicit numerical integration in the time domain. The numerical solution is developed for near-field elastodynamic motion coupled to frictional sliding on a pre-existing fault. The spontaneous rupture by a sudden break of the fault under the slip-weakening friction model is simulated. Rupture is initiated in the simulation by imposed slip in a limited space domain of the hypocentral area.

In order to validate the dynamic model studied here, the numerical solution of the dynamic rupture process of a fault obtained using the DEM is compared with analytical solution and numerical solution presented in the specialized literature. Continuously, the stick-slip motion is simulated in order to show earthquake sequences and nucleation process represented as a foreshock of a principal event. The earthquakes sequences in real scale are simulated and the effects of the rupture propagation directivity on ground motion are analyzed.

Finally, the model is used to simulate the dynamic rupture process and the ground motion of the 1995 Kobe earthquake and the 1999 Chi-Chi (Taiwan) earthquake is simulated. The simulated motions show that the main features of the recorded ground motion can be reproduced. Thus, the 2D model used for the dynamic source simulation leads to good approximations in the vicinity of the epicenter.