



Judith Yimena Ramos Arce

**Comparação entre recalques estimados
por métodos simplificados e numérico devido à
densificação de solos arenosos por terremotos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil pelo programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Celso Romanel

Rio de Janeiro
Outubro de 2023



Judith Yimena Ramos Arce

**Comparação Entre Recalques Estimados
por Métodos Simplificados e Numérico Devido
à Densificação de Solos Arenosos por Terremotos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Celso Romanel

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Dr. Karl Igor Martins Guerra

TECGRAF / PUC-Rio

Dr. Jorge Cárdenas Guillén

UNI/ PERU

Rio de Janeiro, 27 de outubro de 2023

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Judith Yimena Ramos Arce

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Nacional de Engenharia – UNI (Lima-Peru) em 2012. Principais áreas de interesse: Dinâmica dos Solos, Geomecânica Computacional e Experimental.

Ficha Catalográfica

Arce, Judith Yimena Ramos

Comparação entre recalques estimados por métodos simplificados e numérico devido à densificação de solos arenosos por terremotos / Judith Yimena Ramos Arce; orientador: Celso Romanel. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2023.

195 f.: il. ; 29,7 cm

1. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

Inclui referências bibliografias.

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Terremotos. 3. Densificação de solos. 4. Recalque. 5. Métodos simplificados. 6. Análise numérica. Romanel, Celso. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. III. Título.

CDD:624

A Deus por nunca desistir de mim.

Agradecimentos

A Deus, aquele que me deu forças para continuar quando eu estava prestes a cair.

Aos meus pais, Arnulfa e Wenceslao, que sempre me apoiaram, me motivaram e inculcaram valores, serei eternamente grata a eles.

Aos meus irmãos Jinthon, Gimena, Anderson e Anghelo que, apesar da distância, sempre estiveram aí para me incentivar.

Ao Professor Celso Romanel, meu orientador da dissertação, por ter me concedido a oportunidade de aproveitar suas habilidades, conhecimentos e experiência que contribuiram para a minha formação profissional; além de ter tido toda a paciência do mundo durante o desenvolvimento da pesquisa.

A Edivan Lima, gratidão por todo o apoio, compreensão e parceria que você me ofereceu ao longo desta jornada acadêmica.

A Celso Salvador, pela amizade e por todo o apoio durante o desenvolvimento da dissertação.

À banca examinadora pelas sugestões fornecidas para aprimorar este trabalho acadêmico.

Ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio pela infraestrutura fornecida e aos professores pelos conhecimentos transmitidos.

Aos meus colegas da PUC-Rio, que eu levarei nas minhas memórias para toda a vida.

Aos meus amigos Andrés Castañeda, Carlo Aguinda, Celso Salvador, Erland Gonzales, Gerson Ortiz, Jainor Cabrera, Jéssica Nunes, Jhonatan Edward, Kevin Calvay, Lizardo Glorioso, Miguel Villalobos, Paul Pinedo, Rodman Raul, Ronald Marcos, Sandra Rosero, pela amizade compartilhada na nossa PUC-Rio.

A todas as pessoas que de uma forma ou outra contribuíram para conseguir terminar esta pesquisa, gratidão para sempre.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Resumo

Ramos Arce, Judith Yimena; Romanel, Celso (Orientador). **Comparação entre Recalques Estimados por Métodos Simplificados e Numérico Devido à Densificação de Solos Arenosos por Terremotos**. Rio de Janeiro, 2023. 195. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

À medida que a população mundial aumenta, as atividades humanas e os desenvolvimentos urbanos se movem em direção a áreas interiores e desérticas, como o distrito de Ancón, localizada próxima à Lima, no Peru, em uma região denominada cinturão de fogo do Pacífico, que registra aproximadamente 85% da atividade sísmica mundial. Naquela cidade existem depósitos arenosos fofos, com nível d'água subterrânea profundo, que tendem a densificar sob excitação sísmica. Em um terremoto, a estrutura equilibrada do esqueleto de solo é perturbada por tensões cisalhantes cíclicas, com as partículas se movimentando para uma posição mais estável e gerando recalques por densificação das camadas de solo. O objetivo principal desta pesquisa é comparar métodos simplificados para cálculo de recalque considerando 4 perfis de solos e 11 sismos de projeto. Os valores obtidos também são comparados com análises numéricas pelo método dos elementos finitos com o modelo constitutivo elastoplástica PM4Sand para simulação do comportamento de solos sob carregamento cíclico.

Palavras – chave

Terremotos; densificação de solos; análise numérica.

Abstract

Ramos Arce, Judith Yimena; Romanel, Celso (advisor). **Comparison Between Settlements Estimated by Simplified and Numerical Methods due to Densification of Sandy Soils by Earthquakes.** Rio de Janeiro, 2023. 195. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

As the world's population increases, human activities and urban developments are moving toward inland and desert areas, such as the district of Ancón, located near Lima, Peru, in a region called the Pacific Fire Belt, which records approximately 85% of the world's seismic activity. In that city there are soft sandy deposits, with deep groundwater levels, which tend to densify under seismic excitation. In the event of an earthquake, the balanced structure of the soil skeleton is disturbed by cyclic shear stresses, with the particles moving to a more stable position and generating settlements due to densification of the soil layers. The main objective of this research is to compare simplified methods for calculating settlement considering 4 soil profiles and 11 earthquakes. The values obtained are also compared with numerical analyzes using the finite element method with the PM4Sand elastoplastic constitutive model to simulate the behavior of soils under cyclic loading.

Keywords

Earthquakes; soil densification; numerical analysis.

Sumário

1	Introdução	24
1.1.	Objetivo da pesquisa	24
1.2.	Estrutura da dissertação	26
2	Conceitos de sismicidade	27
2.1.	Conceitos de sismicidade	27
2.1.1.	Placas tectônicas	27
2.1.1.1.	Limites divergentes	28
2.1.1.2.	Limites convergentes	29
2.1.1.3.	Limites transformantes	30
2.1.2.	Sismicidade no Peru	30
2.1.2.1.	Neotectônica das principais fontes sismogênicas	31
2.2.	Ondas sísmicas	34
2.2.1.	Ondas de corpo	35
2.2.1.1.	Ondas primárias (P)	35
2.2.1.2.	Ondas primárias (S)	36
2.2.2.	Ondas de superfície	37
2.2.2.1.	Ondas Love	38
2.2.2.2.	Ondas Rayleigh	38
3	Descrição da área de estudo	40
3.1.	Localização	40
3.2.	Perfis de velocidade de ondas S	40
3.3.	Registros sísmicos	44
3.3.1.	Geração de registros	44
3.3.2.	Registros sísmicos utilizados	46
3.3.3.	Correção da linha base e filtragem	49
3.3.3.1.	Correção da linha base	49
3.3.3.2.	Filtragem	50
3.3.4.	Geração de acelerogramas artificiais pela técnica de ajuste espectral	52

3.4. Análises da resposta sísmica	62
3.4.1. Amplificação sísmica	62
3.4.2. Análise de resposta unidimensional do terreno	63
3.4.2.1. Método Linear	64
3.4.2.2. Método linear equivalente	65
4 Procedimentos simplificados para a avaliação de recalques e medidas de mitigação	67
4.1. Procedimentos simplificados	68
4.1.1. Método simplificado de Tokimatsu & Seed (1987)	68
4.1.1.1. Deformação de cisalhamento desenvolvida no solo durante terremotos	68
4.1.1.2. Deformação volumétrica	69
4.1.2. Método simplificado de Pradel (1998)	71
4.1.2.1. Determinação da tensão de cisalhamento cíclica	72
4.1.2.2. Determinação da deformação de cisalhamento cíclica	73
4.1.2.3. Determinação da deformação volumétrica	73
4.1.3. Método simplificado de Yi (2010)	74
4.1.3.1. Tensão de Cisalhamento Cíclica	75
4.1.3.2. Avaliação da deformação de cisalhamento cíclica	75
4.1.3.3. Avaliação da Deformação Volumétrica Cíclica	75
4.1.3.4. Relação entre deformação volumétrica e deformação de cisalhamento	76
4.1.3.5. Relação entre deformação volumétrica e deformação de cisalhamento	77
4.1.3.6. Cálculo do recalque	77
4.1.4. Método simplificado de Stewart & Whang (2003)	78
4.1.4.1. Fator de redução da tensão de cisalhamento (rd)	78
4.1.4.2. Número equivalente de ciclos de tensão uniforme)	78
4.1.4.3. Variação da amplitude da deformação por cisalhamento	79
4.1.4.4. Estimativa das deformações volumétricas	80
4.2. Parâmetros utilizados na dissertação	81
4.3. Medidas de mitigação de recalque por densificação	82

4.3.1. Escavação e/ou compactação	82
4.3.2. Densificação do terreno in situ	82
4.3.3. Fundações profundas	83
4.3.4. Fundações rasas reforçadas	83
5 Aspectos da modelagem numérica	85
5.1. O modelo constitutivo PM4Sand	85
5.2. Características do modelo	85
5.2.1. Índice do estado relativo	85
5.2.2. Superfícies limite, dilatância, crítica	87
5.2.3. Superfície de escoamento e tensores de razão de tensão posterior	87
5.2.4. Efeitos da estrutura do solo	89
5.3. Parâmetros do modelo	90
5.3.1. Estimativa dos parâmetros principais	91
5.3.1.1. Densidade relativa DR	91
5.3.1.2. Coeficiente do módulo de cisalhamento G0	92
5.3.1.3. Parâmetro de velocidade de contração hp0	92
5.3.2. Parâmetros secundários	94
5.3.2.1. Índices de vazios máximo (emax) e mínimo (emin.)	94
5.3.2.2. Parâmetro da superfície limite nb	95
5.3.2.3. Parâmetro da superfície de dilatância nd	95
5.3.2.4. Ângulo de atrito sob volume constante Øcv	95
5.3.2.5. Coeficiente de Poisson ν e pressão atmosférica pA	95
5.3.2.6. Parâmetros da linha de estado crítico Q e R.	95
5.3.2.7. Indicador de pós-sismo	95
6 Apresentação e análise de resultados	98
6.1. Resultados obtidos pelos métodos simplificados	98
6.2. Resultados obtidos pelo método dos elementos finitos	111
6.3. Comparação entre os métodos simplificados e o método dos elementos finitos (MEF)	123

7 Conclusões e sugestões	127
7.1. Conclusões	127
7.2. Sugestões para futuras pesquisas	129
8 Referências bibliográficas	130
Apêndice A	136

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Recalques em rodovia após o terremoto de San Fernando, em 1971.	25
Figura 1.2 – Após o terremoto de Northridge em 1994, recalques significativos sismicamente induzidos observados em aterros.	25
Figura 2.1 - Localização de placas tectônicas da Terra.	28
Figura 2.2 - Os três tipos de limites de placas tectônicas.	28
Figura 2.3 - Características da placa de Nazca (estruturas lineares ou feições tectônicas) e subducção geral da placa de Nazca sob a placa Sul-Americana.	32
Figura 2.4 - Processo de subducção no Peru.	34
Figura 2.5 - Esquema de propagação de ondas Rayleigh (A) e ondas Love (B)	39
Figura 3.1 - Localização do distrito de Ancón, próxima à Lima, Peru	40
Figura 3.2 - Perfil A-01 de velocidade de ondas S.	41
Figura 3.3 - Perfil A-01 de velocidades de ondas S.	41
Figura 3.4 - Perfil Masw-10 de velocidades de ondas S.	41
Figura 3.5 - Perfil Masw-14 de velocidades de ondas S.	42
Figura 3.6 - Perfil A-01 do índice de resistência à penetração (N), obtido por meio de correlação com a velocidade de cisalhamento.	43
Figura 3.7 - Perfil A-02 do índice de resistência à penetração (N), obtido por meio de correlação com a velocidade de cisalhamento.	43
Figura 3.8 - Perfil Masw-10 do índice de resistência à penetração (N), obtido por meio de correlação com a velocidade de cisalhamento.	44

Figura 3.9 - Perfil Masw-14 do índice de resistência à penetração (N), obtido por meio de correlação com a velocidade de cisalhamento.	44
Figura 3.10 - Histórias de aceleração, velocidade e deslocamento originais e corrigidas pela linha base e filtragem do registro do terremoto de Ancash 1970.	51
Figura 3.11 - História de aceleração corrigidas pela linha base e filtragem do registro do terremoto de Arequipa 2001.	51
Figura 3.12 - História de aceleração corrigidas pela linha base e filtragem do registro do terremoto de Atico 2001.	51
Figura 3.13 - História de aceleração corrigidas pela linha base e filtragem do registro do terremoto de Cañete 2021.	51
Figura 3.14 - História de aceleração corrigidas pela linha base e filtragem do registro do terremoto de Cañete 2022.	51
Figura 3.15 - História de aceleração corrigidas pela linha base e filtragem do registro do terremoto de Lima 1966.	52
Figura 3.16 - História de aceleração corrigidas pela linha base e filtragem do registro do terremoto de Lima 1974.	52
Figura 3.17 - História de aceleração corrigidas pela linha base e filtragem do registro do terremoto de Moquegua 2001.	52
Figura 3.18 - História de aceleração corrigidas pela linha base e filtragem do registro do terremoto de Moquegua 2003.	52
Figura 3.19 - História de aceleração corrigidas pela linha base e filtragem do registro do terremoto de Tacna 2010.	52
Figura 3.20 - História de aceleração corrigidas pela linha base e filtragem do registro do terremoto de Tacna 2012.	52

Figura 3.21 - Ajuste espectral do terremoto de Ancash 1970 ao espectro de ameaça uniformemente provável (TR=475 anos).	55
Figura 3.22 - Ajuste espectral do terremoto de Arequipa 2001 ao espectro de ameaça uniformemente provável (TR=475 anos).	55
Figura 3.23 - Ajuste espectral do terremoto de Atico 2001 ao espectro de ameaça uniformemente provável (TR=475 anos).	56
Figura 3.24 - Ajuste espectral do terremoto de Cañete 2021 ao espectro de ameaça uniformemente provável (TR=475 anos).	56
Figura 3.25 - Ajuste espectral do terremoto de Cañete 2022 ao espectro de ameaça uniformemente provável (TR=475 anos).	57
Figura 3.26 - Ajuste espectral do terremoto de Lima 1966 ao espectro de ameaça uniformemente provável (TR=475 anos).	57
Figura 3.27 - Ajuste espectral do terremoto de Lima 1974 ao espectro de ameaça uniformemente provável (TR=475 anos).	58
Figura 3.28 - Ajuste espectral do terremoto de Moquegua 2001 ao espectro de ameaça uniformemente provável (TR=475 anos).	58
Figura 3.29 - Ajuste espectral do terremoto de Moquegua 2003 ao espectro de ameaça uniformemente provável (TR=475 anos).	59
Figura 3.30 - Ajuste espectral do terremoto de Tacna 2010 ao espectro de ameaça uniformemente provável (TR=475 anos).	59
Figura 3.31 - Ajuste espectral do terremoto de Tacna 2012 ao espectro de ameaça uniformemente provável (TR=475 anos).	60
Figura 3.32 - Registro de aceleração do sismo de Ancash 1970 após o ajuste espectral.	60
Figura 3.33 - Registro de aceleração do sismo de Arequipa 2001 após o ajuste espectral.	60

Figura 3.34 - Registro de aceleração do sismo de Atico 2001 após o ajuste espectral.	60
Figura 3.35 - Registro de aceleração do sismo de Cañete 2021 após o ajuste espectral.	60
Figura 3.36 - Registro de aceleração do sismo de Cañete 2022 após o ajuste espectral.	61
Figura 3.37 - Registro de aceleração do sismo de Lima 1966 após o ajuste espectral.	61
Figura 3.38 - Registro de aceleração do sismo de Lima 1974 após o ajuste espectral.	61
Figura 3.39 - Registro de aceleração do sismo de Moquegua 2001 após o ajuste espectral.	61
Figura 3.40 - Registro de aceleração do sismo de Moquegua 2003 após o ajuste espectral.	61
Figura 3.41 - Registro de aceleração do sismo de Tacna 2010 após o ajuste espectral.	61
Figura 3.42 - Registro de aceleração do sismo de Tacna 2012 após o ajuste espectral.	62
Figura 3.43 - Processo de refração que produz propagação de ondas quase vertical perto da superfície do solo.	63
Figura 3.44 - Nomenclatura da resposta do solo. a) solo sobrejacente à rocha; b) nenhum solo sobrejacente à rocha.	63
Figura 3.45 – Histórico de dois registros de deformação de cisalhamento com deformações de cisalhamento de pico idênticas. Para o movimento de um terremoto real, a deformação de cisalhamento efetiva é comumente considerada como 65% da deformação cisalhante de pico.	66

Figura 4.1 - Gráficos para determinação de deformação induzida em areia seca.	70
Figura 4.2 - Relações entre deformação volumétrica e deformação cisalhante e resistência à penetração para areias secas.	70
Figura 4.3 - Razão de deformação volumétrica e número de ciclos para areias secas.	72
Figura 4.4 - Relação analítica entre número equivalente de ciclos e magnitude do terremoto, comparada com dados experimentais de Tokimatsu & Seed (1987).	74
Figura 4.5 - Relação entre deformação volumétrica, deformação de cisalhamento e velocidade de onda de cisalhamento corrigida para areia limpa e seca.	77
Figura 4.6 - Variação dos valores de N com distância e magnitude de acordo com Liu et al. (2001) para sítios em solo e rocha.	79
Figura 4.7 - Estimativa da amplitude da deformação de cisalhamento considerando as curvas de redução do módulo de cisalhamento propostas por Iwasaki (1978) e Darendeli & Stokoe (2001) mostrando os efeitos da tensão vertical efetiva e do índice de plasticidade.	80
Figura 4.8 – Deformação volumétrica de areia limpa em ensaios de cisalhamento simples.	81
Figura 4.9 - Deformação volumétrica em ensaios de cisalhamento simples em areias siltosas e argilas de baixa plasticidade.	81
Figura 5.1 Definição do índice de parâmetro de estado relativo ξ_R (Boulangier 2003a) e os efeitos da variação de Q e R.	86
Figura 5.2 - Esquema das linhas de escoamento, crítica, dilatância, e delimitadora no espaço p-q. A localização relativa das linhas de dilatância e delimitadora corresponde a estados de tensão densos ou críticos.	89

Figura 5.3 - Esquema das superfícies delimitadoras, de dilatação e de escoamento no plano de razão de tensão $r_{yy} - r_{xy}$, com a superfície de escoamento, tensor normal, razão de tensão de retroação de dilatância e razão de tensão de retroação delimitadora. As localizações relativas das superfícies diferem daquelas da Figura 5.2.	89
Figura 5.4 - Comparação entre valores de CRR obtidos por meio de simulações com hpo uniformemente distribuídos e utilizando modelos empíricos relacionando CRR com $(N1)_{60}$ para areia limpa, $M = 7,5$ e $\sigma'_{vc} = 1$ atm.	93
Figura 6.1 - Recalques estimados pelos métodos simplificados indicados para o terremoto de Ancash 1970.	99
Figura 6.2 - Recalques estimados pelos métodos simplificados indicados para o terremoto de Arequipa 2001.	100
Figura 6.3 - Recalques estimados pelos métodos simplificados indicados para o terremoto de Atico 2001.	101
Figura 6.4 - Recalques estimados pelos métodos simplificados indicados para o terremoto de Cañete 2021.	102
Figura 6.5 - Recalques estimados pelos métodos simplificados indicados para o terremoto de Cañete 2022.	103
Figura 6.6 - Recalques estimados pelos métodos simplificados indicados para o terremoto de Lima 1966.	104
Figura 6.7 - Recalques estimados pelos métodos simplificados indicados para o terremoto de Lima 1974.	105
Figura 6.8 - Recalques estimados pelos métodos simplificados indicados para o terremoto de Moquegua 2001.	106
Figura 6.9 - Recalques estimados pelos métodos simplificados indicados para o terremoto de Moquegua 2003.	107

Figura 6.10 - Recalques estimados pelos métodos simplificados indicados para o terremoto de Tacna 2010.	108
Figura 6.11 - Recalques estimados pelos métodos simplificados indicados para o terremoto de Tacna 2012.	109
Figura 6.12 - Resultados numéricos para o terremoto de Ancash, 1970. (a) Malha deformada do perfil A-01, (b) Recalque no perfil A-01, (c) Malha deformada do perfil A-02, (d) Recalque no perfil A-02, (e) Malha deformada do perfil Masw-10, (f) Recalque no perfil Masw-10, (g) Malha deformada do perfil Masw-14, (h) Recalque no perfil Masw-14.	112
Figura 6.13 - Resultados numéricos para o terremoto de Arequipa, 2001. (a) Malha deformada do perfil A-01, (b) Recalque no perfil A-01, (c) Malha deformada do perfil A-02, (d) Recalque no perfil A-02, (e) Malha deformada do perfil Masw-10, (f) Recalque no perfil Masw-10, (g) Malha deformada do perfil Masw-14, (h) Recalque no perfil Masw-14.	113
Figura 6.14 - Resultados numéricos para o terremoto de Atico, 2001. (a) Malha deformada do perfil A-01, (b) Recalque no perfil A-01, (c) Malha deformada do perfil A-02, (d) Recalque no perfil A-02, (e) Malha deformada do perfil Masw-10, (f) Recalque no perfil Masw-10, (g) Malha deformada do perfil Masw-14, (h) Recalque no perfil Masw-14.	114
Figura 6.15 - Resultados numéricos para o terremoto de Cañete, 2021. (a) Malha deformada do perfil A-01, (b) Recalque no perfil A-01, (c) Malha deformada do perfil A-02, (d) Recalque no perfil A-02, (e) Malha deformada do perfil Masw-10, (f) Recalque no perfil Masw-10, (g) Malha deformada do perfil Masw-14, (h) Recalque no perfil Masw-14.	115
Figura 6.16 - Resultados numéricos para o terremoto de Cañete, 2022. (a) Malha deformada do perfil A-01, (b) Recalque no perfil A-01, (c) Malha deformada do perfil A-02, (d) Recalque no perfil A-02, (e) Malha deformada do perfil Masw-10, (f) Recalque no perfil Masw-10, (g) Malha deformada do perfil Masw-14, (h) Recalque no perfil Masw-14.	116

Figura 6.17 - Resultados numéricos para o terremoto de Lima, 1966.
(a) Malha deformada do perfil A-01, (b) Recalque no perfil A-01, (c) Malha deformada do perfil A-02, (d) Recalque no perfil A-02, (e) Malha deformada do perfil Masw-10, (f) Recalque no perfil Masw-10, (g) Malha deformada do perfil Masw-14, (h) Recalque no perfil Masw-14. 117

Figura 6.18 - Resultados numéricos para o terremoto de Lima, 1974.
(a) Malha deformada do perfil A-01, (b) Recalque no perfil A-01, (c) Malha deformada do perfil A-02, (d) Recalque no perfil A-02, (e) Malha deformada do perfil Masw-10, (f) Recalque no perfil Masw-10, (g) Malha deformada do perfil Masw-14, (h) Recalque no perfil Masw-14. 118

Figura 6.19 - Resultados numéricos para o terremoto de Moquegua, 2001.
(a) Malha deformada do perfil A-01, (b) Recalque no perfil A-01, (c) Malha deformada do perfil A-02, (d) Recalque no perfil A-02, (e) Malha deformada do perfil Masw-10, (f) Recalque no perfil Masw-10, (g) Malha deformada do perfil Masw-14, (h) Recalque no perfil Masw-14. 119

Figura 6.20 - Resultados numéricos para o terremoto de Moquegua, 2003.
(a) Malha deformada do perfil A-01, (b) Recalque no perfil A-01, (c) Malha deformada do perfil A-02, (d) Recalque no perfil A-02, (e) Malha deformada do perfil Masw-10, (f) Recalque no perfil Masw-10, (g) Malha deformada do perfil Masw-14, (h) Recalque no perfil Masw-14. 120

Figura 6.21 - Resultados numéricos para o terremoto de Tacna, 2010. (a) Malha deformada do perfil A-01, (b) Recalque no perfil A-01, (c) Malha deformada do perfil A-02, (d) Recalque no perfil A-02, (e) Malha deformada do perfil Masw-10, (f) Recalque no perfil Masw-10, (g) Malha deformada do perfil Masw-14, (h) Recalque no perfil Masw-14. 121

Figura 6.22 - Resultados numéricos para o terremoto de Tacna, 2012. (a) Malha deformada do perfil A-01, (b) Recalque no perfil A-01, (c) Malha deformada do perfil A-02, (d) Recalque no perfil A-02, (e) Malha deformada do perfil Masw-10, (f) Recalque no perfil Masw-10, (g) Malha deformada do perfil Masw-14, (h) Recalque no perfil Masw-14. 122

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Estado de compactidade e consistência dos solos.	42
Tabela 3.2 - Registros sísmicos considerados	47
Tabela 3.3 – Aceleração horizontal de pico na superfície do solo considerando os 11 sismos da pesquisa.	66
Tabela 4.1- Influência da magnitude do terremoto na deformação volumétrica de areias secas.	71
Tabela 4.2 - Métodos para mitigação de recalques por densificação do solo.	84
Tabela 5.1– Parâmetros do modelo constitutivo PM4Sand.	91
Tabela 5.2 – Parâmetros do modelo PM4Sand para análise dinâmica do perfil A-1.	96
Tabela 5.3– Parâmetros do modelo PM4Sand para análise dinâmica do perfil A-2.	97
Tabela 5.4– Parâmetros do modelo PM4Sand para análise dinâmica do perfil Masw-10.	97
Tabela 5.5– Parâmetros do modelo PM4Sand para análise dinâmica do perfil Masw-14.	97
Tabela 6.1 – Média dos Recalques obtidos pelos métodos simplificados analisados.	110
Tabela 6.2 - Recalques obtidos com os métodos simplificados e pela análise numérica.	123

Lista de Símbolos

a_{max} - aceleração máxima

B - módulo de deformação volumétrica

B^e - módulo de deformação volumétrica elástico

c - coesão

D_r - densidade relativa

E - módulo de Young

e - índice de vazios

e_c - índice de vazios crítico

f_c - frequência de corte

ϕ_{cv} - ângulo de atrito de volume constante ou ângulo de transformação de fase

ϕ' - ângulo de atrito interno efetivo do solo

g - aceleração da gravidade

G - módulo cisalhante

G_{max} - módulo cisalhante máximo

H - altura do estrato

γ - peso específico

ϵ - módulo de deformação volumétrica

k_σ - fator de correção por sobrecarga

λ - comprimento de onda numa máxima frequência

M - magnitude

M_w - magnitude momento

N_m - contagem do número de golpes do ensaio SPT medido no campo

$(N_1)_{60}$ - contagem do número de golpes do ensaio SPT normalizado

$(N_1)_{60cs}$ - contagem do número de golpes do ensaio SPT normalizado para areia limpa

n - porosidade

P_a - pressão atmosférica

r_d - coeficiente de redução de tensão

ρ - massa específica

σ'_m - tensão média efetiva

σ_n - tensão normal

σ_t - tensão cisalhante

σ_{vo} - tensão vertical inicial total

σ'_{vo} - tensão vertical inicial efetiva

τ_{av} - tensão cisalhante cíclica média

T_r - período de recorrência

t - tempo

V_p - velocidades de propagação das ondas P

V_s - velocidades de propagação das ondas S

z - profundidade

u - coeficiente de Poisson

ξ - razão de amortecimento

Lista de Abreviaturas

CPT - ensaio de penetração de cone

CRR - razão da resistência cíclica

FC - porcentagem de finos

FDEP - função densidade de espectro de potência

ICOLD - *International Commission on Large Dams*

MDF - método das diferenças finitas

MSF - fator de escala de magnitude

PGA - *Peak ground acceleration*, aceleração máxima do solo

PHA^{solo} - aceleração horizontal máxima esperada no solo

SPT - ensaio de penetração estandar

1 Introdução

A interação entre solos e terremotos é um campo de estudo essencial na engenharia geotécnica, particularmente em regiões geologicamente propensas a atividades sísmicas. Na ocorrência de terremotos, o comportamento dinâmico dos solos desempenha um papel crucial na resposta de sistemas construtivos ou naturais. Neste contexto, um fenômeno desafiador é o recalque sísmicamente induzido que em solos arenosos fofos se manifesta como resultado da densificação durante os eventos sísmicos. A estrutura equilibrada do esqueleto é perturbada por tensões de cisalhamento cíclicas, fazendo com que as partículas tenham a tendência de se mover para uma posição mais estável. A reorganização dos grãos leva a uma densificação do material.

Vários casos históricos de recalque por densificação em solos arenosos foram reportados na literatura. O terremoto de San Fernando, na Califórnia em 1971, provocou recalques de 10 a 60 cm em aterros insaturados (Fukuoka, 1971) – Figura 1.1. O terremoto de Northridge, em 1994, também induziu recalques significativos em aterros (Steward et al. 2001), que escreveram: “essa deformação não danificou as estruturas a ponto de ameaçar a segurança de vida, mas as perdas econômicas foram grandes” – Figura 1.2.

1.1. Objetivo da pesquisa

O objetivo principal da pesquisa é analisar os recalques induzidos por terremotos como resultado da densificação de solos arenosos, analisando o comportamento dinâmico de quatro perfis de solo do distrito de Ancón, no Peru. Para atingir essa meta, foi necessário executar as seguintes etapas:

- geração de onze sismos artificiais pelo método do ajuste espectral;



Figura 1.1 - Recalques em rodovia após o terremoto de San Fernando, em 1971. (Fonte: Researchgate. Disponível em : https://www.researchgate.net/figure/Settlement-in-a-highway-after-the-San-Fernando-earthquake-in-1971-Courtesy-of-the_fig1_259466872. Acesso em: 15 jul. 2023).



Figura 1.2 – Após o terremoto de Northridge em 1994, recalques significativos sismicamente induzidos observados em aterros. (Fonte: Britannica. Disponível em: <https://www.britannica.com/event/Northridge-earthquake-of-1994>. Acesso em: 15 jul. 2023).

- análise da resposta sísmica local devido à amplificação sísmica (*site effects*) empregando o programa computacional DEEPSOIL para propagação de ondas elásticas 1D;

- estimativa de recalque nos solos arenosos estudados mediante aplicação de procedimentos simplificados;

- análise dinâmica dos quatro perfis de solos por meio do método dos elementos finitos, levando em consideração a aplicação do modelo constitutivo elastoplástico PM4Sand e sua implementação no software de simulação PLAXIS 2D.

1.2. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em sete capítulos, iniciando com o presente capítulo que apresenta o objetivo principal da pesquisa e os passos realizados para atingi-lo. O capítulo 2 aborda conceitos básicos de sismicidade e de propagação de ondas elásticas 2D enquanto o capítulo 3 descreve o sítio investigado, os terremotos gerados e as amplificações sísmicas calculadas na superfície do terreno.

O capítulo 4 apresenta métodos simplificados para a avaliação de recalques sísmicamente induzidos em solos arenosos, e o capítulo 5 aborda os detalhes do modelo constitutivo PM4Sand, juntamente com sua implementação no Método dos Elementos Finitos (FEM). Também analisa os parâmetros do modelo para a modelagem numérica.

No capítulo 6 é feita a apresentação e análise de resultados obtidos na presente pesquisa, comparando os resultados determinados com os métodos simplificados e com aqueles previstos numericamente. Finalmente o capítulo 7 contém as conclusões da dissertação e sugestões de temas para futuras pesquisas, relacionados com o comportamento sísmico de solos.

2

Conceitos de sismicidade

2.1.

Conceitos de sismicidade

Sismicidade refere-se à frequência e à intensidade dos eventos sísmicos em uma região específica durante um intervalo de tempo determinado (Kagan, 2002). Estes eventos resultam da liberação repentina de energia acumulada nas falhas geológicas e são caracterizados pela propagação de ondas sísmicas através da crosta terrestre. A sismicidade desempenha um papel fundamental na geotecnia, uma disciplina que lida com o estudo do comportamento dos solos e materiais terrosos sob diferentes condições de carregamento, incluindo carregamentos cíclicos gerados por eventos sísmicos. A compreensão da sismicidade e sua integração com a geotecnia são essenciais para a análise, projeto e mitigação de riscos geotécnicos associados à atividade sísmica.

2.1.1.

Placas tectônicas

As placas tectônicas são grandes blocos rígidos que compõem a crosta terrestre e a parte superior do manto da Terra. Elas são como peças de um quebra-cabeça que se encaixam para formar a superfície do nosso planeta. Não são placas fixas pois estão constantemente em movimento sobre a astenosfera, uma camada semifluida do manto terrestre situada logo abaixo das placas (Skinner et al, 2004).

Esses movimentos das placas tectônicas são responsáveis por uma série de fenômenos geológicos, como terremotos, vulcões, formação de montanhas e o desenvolvimento de características geográficas, como oceanos e continentes.

A litosfera, camada rígida mais externa do planeta, ou seja, a crosta e o manto superior, é subdividida em placas tectônicas, dentre as quais as placas principais bem definidas (Norte-Americana, Sul-Americana, do Pacífico, Africana, Eurasiática, Australiana e Antártica), e várias placas secundárias, como as do Caribe, Cocos, Nazca, das Filipinas, Arábica, Indiana, da Escócia e Juan de Fuca

(Figura 2.1). O local onde as placas se encontram determina o tipo de limite, de acordo com o movimento relativo amostrada na Figura 2.2. (Tarbuck et al, 2018).



Figura 2.1 - Localização de placas tectônicas da Terra. Ilustração: Rainer Lesniewski / Shutterstock.com.



Figura 2.2 - Os três tipos de limites de placas tectônicas. (Fonte: Cola da web. Disponível em: <https://www.coladaweb.com/geografia/placas-tectonicas>. Acesso em 25 jul. 2023).

2.1.1.1. Limites divergentes

Nesse tipo de limite as placas tectônicas se afastam uma da outra. Isso ocorre principalmente em regiões oceânicas, onde uma nova crosta é formada à medida que o magma do manto terrestre sobe para preencher o espaço criado pela separação das placas. Esse processo é chamado de "expansão do assoalho

oceânico". À medida que a crosta se forma, ela se move para além do limite divergente em ambas as direções. O exemplo clássico é a Dorsal Mesoatlântica, onde as placas tectônicas da América do Norte e da Eurásia se afastam, no Oceano Atlântico (Skinner et al, 2004).

2.1.1.2. Limites convergentes

Nos limites convergentes, as placas tectônicas se movem uma em direção à outra. Isso resulta em choque entre placas, onde uma delas pode ser forçada a subduzir sob a outra devido à diferença de densidade. Quando isso acontece, muitas vezes ocorrem terremotos e vulcões (Tarbuck et al, 2018). Existem três tipos principais de limites convergentes:

2.1.1.2.1. Convergência Oceano-Oceano

Se as duas placas envolvidas forem placas oceânicas, a litosfera oceânica da placa em subducção mergulha na astenosfera e é eventualmente reciclada pelo sistema de convecção do manto. Este processo cria um limite de placas marcado por uma cadeia de vulcões conhecida como "círculo de fogo" ou "arco de ilhas". Um exemplo é a convergência das placas do Pacífico e das Filipinas, onde uma placa oceânica é forçada sob a outra, criando trincheiras oceânicas profundas e vulcões (Skinner et al, 2004).

2.1.1.2.2. Convergência Continente-Oceano

A placa oceânica mergulha sob a placa continental de menor densidade, com a margem continental sendo deformada com a criação de cordilheiras paralelas à fossa do fundo do mar. Enormes forças de colisão e subducção produzem grandes terremotos ao longo desta fronteira. Um exemplo é a convergência entre a placa Sul-Americana e a placa de Nazca, onde a placa oceânica de Nazca mergulha sob o continente sul-americano, fenômeno responsável pela formação da Cordilheira dos Andes e dos altos níveis de atividade sísmica e vulcânica ao longo da costa ocidental da América do Sul (Tarbuck et al, 2018).

2.1.1.2.3. Convergência Continente-Continente

Neste tipo de limite, duas placas continentais colidem, com ocorrência de terremotos violentos que modificam a crosta terrestre. Um exemplo notável é a colisão entre as placas Indiana e Eurasiática que deu origem ao Himalaia e às montanhas adjacentes (Skinner et al, 2004).

2.1.1.3. Limites transformantes

Nos limites transformantes, as placas deslizam lateralmente uma em relação à outra. Esse tipo de limite é frequentemente associado a falhas geológicas. Um exemplo é a Falha de San Andreas na Califórnia, onde a placa do Pacífico se move lateralmente em relação à placa Norte-Americana. A interação ao longo dessas falhas pode causar terremotos (Skinner et al, 2004).

É importante notar que os limites de placas são locais dinâmicos e complexos, e as interações entre as placas podem variar em intensidade ao longo do tempo geológico. A compreensão desses limites desempenha um papel fundamental na previsão de eventos geológicos, como terremotos e erupções vulcânicas (Skinner et al, 2004).

2.1.2. Sismicidade no Peru

O Peru é uma das regiões mais sismicamente ativas do mundo devido à sua localização geográfica com a subdução da Placa de Nazca em relação à Placa Sul-Americana. A subdução ocorre ao longo de grande parte da borda oeste do continente sul-americano com uma velocidade relativa de 10 cm/ano (Minster & Jordan, 1978), o que gera um alto índice de deformação no continente e que já deu origem à formação da Cordilheira dos Andes, que se estende de norte a sul ao longo de 7.000 km com alturas de até 7.000 m acima do nível do mar. A sismicidade no Peru pode ser dividida em dois tipos: o primeiro está diretamente associado ao contato das placas, gerando terremotos de alta magnitude, relativamente frequentes, em diferentes profundidades, e o segundo tipo corresponde à sismicidade produzida pela deformação da Cordilheira dos Andes, com terremotos menores em magnitude e menos frequentes (Távera et al., 2002).

Todos os terremotos na porção oceânica correspondem à zona de subducção, enquanto na porção continental incluem terremotos na zona de Benioff, com profundidades focais superiores a 70 km, e terremotos continentais que são superficiais (Gonçalves & Assumpção).

2.1.2.1.

Neotectônica das principais fontes sismogênicas

2.1.2.1.1.

Localização Tectônica Regional

O Peru está incluído entre as regiões com maior atividade sísmica da Terra, formando parte do Cinturão Circumpacífico. A estrutura tectônica regional de maior escala é governada pela interação entre as placas de Nazca e Sul-Americana. As principais feições tectônicas da região oeste da América do Sul, como a Cordilheira dos Andes e a fossa oceânica Peru-Chile, estão relacionadas à alta atividade sísmica e outros fenômenos telúricos em consequência da interação das duas placas convergentes (Hamilton, 2013).

O mecanismo básico que causa o movimento das placas não é conhecido, mas afirma-se que se deve a correntes de convecção ou movimentos do manto plástico e quente da Terra e aos efeitos gravitacionais e de rotação do planeta (Lowrie, 2007).

A Placa Sul-Americana cresce a partir da cadeia mesoceânica atlântica, avançando para noroeste a uma taxa de 2 a 3 cm por ano e encontra a Placa de Nazca em sua extremidade ocidental, constituída pela costa sul-americana do Pacífico. Por outro lado, a Placa de Nazca cresce a partir da cadeia mesoceânica do Pacífico Oriental e avança para o leste com uma velocidade de aproximadamente 5 a 10 cm por ano, subjacente à Placa Sul-Americana com uma velocidade de convergência de 7 a 12 cm por ano (Berrocal et al, 1975). Como resultado do encontro da Placa Sul-Americana e da Placa de Nazca e da subducção desta última, a cadeia Andina e a fossa Peru-Chile (Figura 2.3) foram formadas em diferentes estágios evolutivos. A interação contínua dessas duas placas dá origem à maior proporção de atividade sísmica na região ocidental do nosso continente.

A Placa de Nazca submerge abaixo da fronteira Peru-Brasil e noroeste da Argentina, o que é confirmado pela distribuição espacial dos hipocentros, embora

haja alguma controvérsia devido à ausência de atividade sísmica entre 300 e 500 km de profundidade (Berrocal et al, 1975).

Alguns trabalhos sobre sismotectônica na América do Sul têm apontado certas discontinuidades regionais, que dividem o panorama tectônico desta região em várias províncias tectônicas. Essas províncias são separadas por discontinuidades laterais (Berrocal, 1974) ou por "zonas de transição" sismotectônicas (Deza & Carbonell, 1978), todas elas normais à zona de subducção ou formando um grande ângulo com ela. Estas províncias tectônicas possuem características específicas que influenciam a atividade sísmica que ocorre em cada uma delas.

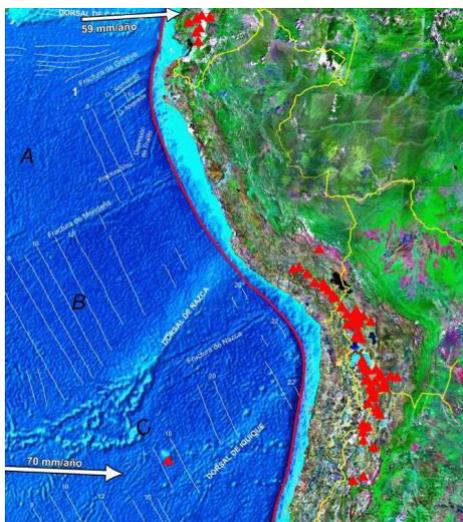


Figura 2.3 - Características da placa de Nazca (estruturas lineares ou feições tectônicas) e subducção geral da placa de Nazca sob a placa Sul-Americana. A linha vermelha representa a fossa Peru-Chile. As setas brancas indicam a direção do movimento relativo das placas e os triângulos vermelhos representam atividade vulcânica. (IGP).

2.1.2.1.2. Zoneamento Tectônico

No Peru, a deformação quaternária da crosta é gerada pela subducção da placa de Nazca sob a placa sul-americana, cujos efeitos se concentram no processo de orogenia andina. Os Andes peruanos estão localizados na zona central da cordilheira dos Andes, que se estende desde o Golfo de Guayaquil (4º S) até o Golfo de Penas no Chile (46º 30' S). Nos Andes peruanos, duas zonas podem ser distinguidas com base nas características de subducção, que são conhecidas como Setor Norte e Setor Central. Durante o início do Mesozóico, o Setor Norte (4º S a 14º S), foi dominado por tectonismo extensional e subducção, e subseqüentemente, a migração de deformação para leste elevou os Andes

peruanos em decorrência de um processo de subducção plano e raso. O resultado do espessamento da crosta deu origem à Cordilheira Branca onde existe um número significativo de falhas normais ativas, bem como uma importante atividade sísmica superficial que caracteriza a Cordilheira Oriental e a zona subandina, onde a deformação é dominada por falhas relacionadas a estruturas dobráveis. Um comportamento atípico é a ausência de atividade vulcânica neste setor (Macharé et al, 2003).

O Setor Central dos Andes (14° - 27° S) está associado ao processo de subducção que nesta zona apresenta um ângulo de 30° com o arco vulcânico ativo. Este setor é caracterizado por uma mudança brusca no ângulo de subducção em relação ao Setor Norte, devido à presença da Cordilheira de Nazca que subduz sob a placa Sul-Americana, bem como uma zona de transição suave para outro setor de subducção plana e raso na região sul, localizada no norte da Argentina (Macharé et al, 2003).

Entre os processos orogênicos que ocorrem no continente devido à colisão da placa de Nazca com a placa continental Sul-Americana, são citados a seguir (Pomachagua, O., 2000):

i) Sistemas de falhas: diferentes sistemas de falhas que se distribuem na zona continental foram formados como efeito secundário da colisão da placa oceânica com a placa continental. Esse processo gerou a presença de dobras e fraturas na crosta terrestre. Os sistemas de falhas estão localizados principalmente nas terras altas e na região subandina de norte a sul, bem como no sopé das serras ou montanhas cobertas de neve e entre os limites da Cordilheira Ocidental e a zona costeira.

Na região centro-sul do Peru, onde se encontra a área investigada no presente trabalho, pode-se reconhecer a falha de San Lorenzo, situada a poucos quilômetros da cidade de Lima que foi gerada pela subsidência, em relação à ilha de San Lorenzo, da costa central do Peru ao longo do Quaternário (Sebrier et al, 1982). Pela comparação das alturas dos níveis do Holoceno, a falha teria tido maior atividade no Pleistoceno Superior, não possuindo atualmente as características de falha ativa, apesar de ser recente. O perfil batimétrico entre Cercado de Lima e San Lorenzo mostra uma depressão denominada El Boquerón. É possível que esta feição indique o rastro da referida falha, cuja extensão pode ser estimada em 30 km.

ii) Cadeia vulcânica: a formação da cadeia vulcânica se deve ao choque entre as margens das placas de Nazca e Sul-Americana. No Peru, a cadeia vulcânica está localizada na região sul da Cordilheira Ocidental, com cones vulcânicos ativos como os de Ampato, Coropuna, Paucarani, Misti, Ubinas, Sarasara etc. Na região norte e central do Peru há ausência de vulcões porque o processo de subducção nessas regiões tende a ser quase horizontal.

iii) Cordilheira de Nazca: esta cordilheira está localizada no Oceano Pacífico entre as latitudes 15° S e 19° S. A estrutura da cordilheira é produto de um processo de estiramento da crosta oceânica e estima-se que sua formação tenha uma idade entre 5 a 10 milhões de anos. Esta cordilheira teve uma influência decisiva na constituição tectônica da parte ocidental do continente, onde se nota uma alteração marcante na continuidade de outras feições tectônicas. Na parte oceânica, a Cordilheira de Nazca divide a Fossa Oceânica na Fossa de Lima e na Fossa de Arica (Figura 2.4).

2.2. Ondas sísmicas

As ondas sísmicas são ondas de energia de deformação elástica que se propagam da fonte sísmica para o subsolo a velocidades que dependem do módulo de elasticidade e da densidade do meio de propagação. Existem dois tipos de ondas sísmicas: ondas de corpo que se propagam pelo interior de um sólido e ondas de superfície que podem se propagar pelo contato entre suas superfícies ou por mudanças bruscas na rigidez do meio, que podem permanecer no interior do sólido.

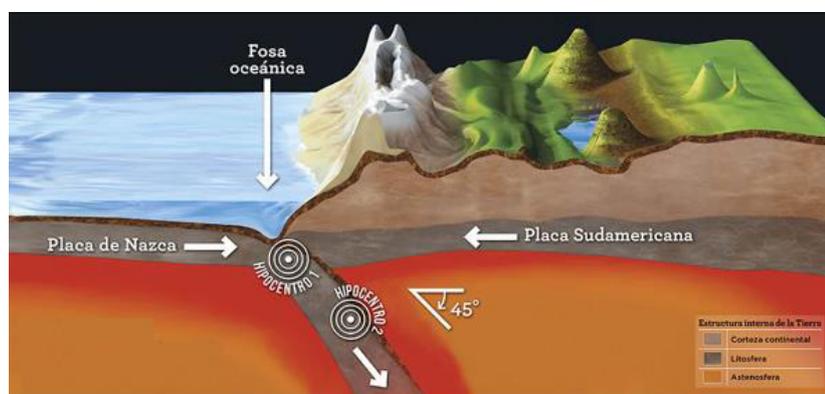


Figura 2.4 - Processo de subducção no Peru. (Fonte: Aire de Santa Fé. Disponível em: <https://www.airedesantafe.com.ar>. Acesso em: 30 jul. 2023)).

2.2.1. Ondas de corpo

Dois tipos de ondas de corpo podem viajar através de sólidos elásticos: ondas longitudinais, primárias ou compressivas e ondas transversais, secundárias ou de cisalhamento (Figura 2.5), conforme descrito abaixo:

2.2.1.1. Ondas primárias (P)

As ondas P são as ondas sísmicas mais rápidas, as primeiras a serem registradas em um sismograma após um terremoto. São ondas longitudinais, o que significa que as partículas do solo se movem na mesma direção da propagação da onda, alternando entre compressão e expansão. São capazes de propagar através de sólidos, líquidos e gases. Têm velocidades que variam de acordo com o meio em que se propagam. Em geral, as ondas P têm velocidades mais altas em materiais sólidos do que em líquidos ou gases (Stein & Wysession, 2003).

A influência da elasticidade nas ondas primárias (P) em materiais sólidos é significativa, pois determina várias propriedades e características dessas ondas. As propriedades elásticas do material, como o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, afetam diretamente a velocidade, a direção de propagação, a reflexão, a refração e a atenuação das ondas primárias (Shearer, 2009).

A velocidade de propagação da onda P, descrita no Kramer (1996) é determinada pela teoria da elasticidade linear por:

$$V_P = \sqrt{\frac{G(2-2\nu)}{\rho(1-2\nu)}} \quad (2.1)$$

Onde ρ é a massa específica do material, G é o módulo de cisalhamento e ν o coeficiente de Poisson.

A amplitude das ondas P pode variar consideravelmente dependendo de vários fatores, incluindo a magnitude do terremoto, a distância até o epicentro, a profundidade do foco sísmico e as propriedades do meio através do qual as ondas estão se propagando (Shearer, 2009).

Em geral, as ondas P tendem a ter amplitudes menores em comparação com as ondas superficiais (como as ondas de superfície), especialmente à medida que a distância do epicentro aumenta. Isso ocorre porque as ondas P são ondas de compressão e expansão que se propagam pelo interior da Terra, enquanto as ondas superficiais se propagam na superfície da Terra, o que pode resultar em amplitudes maiores. A amplitude das ondas P também pode ser influenciada por fatores como a profundidade do foco sísmico. Terremotos rasos geralmente produzem ondas P com amplitudes maiores do que terremotos mais profundos (Lay & Wallace, 1995).

2.2.1.2. Ondas primárias (S)

As ondas S são mais lentas que as ondas P. Também conhecidas como ondas secundárias, de cisalhamento ou transversais, elas causam deformações de cisalhamento quando viajam através de um material (Lay & Wallace, 1995). O movimento da perturbação é perpendicular à direção de propagação da onda S. A direção do movimento de uma partícula pode ser usada para dividir as ondas S em duas componentes, SV (movimento em um plano vertical) e SH (movimento em um plano horizontal). A velocidade com que as ondas de cisalhamento viajam varia dependendo da rigidez dos materiais através dos quais propagam. As ondas S só podem ocorrer através de sólidos porque os líquidos não suportam tensões de cisalhamento (Shearer, 2009).

A viscosidade dos líquidos está relacionada à sua capacidade de suportar tensões de cisalhamento. Em geral, líquidos têm uma viscosidade mais alta do que sólidos, o que significa que eles resistem mais ao fluxo ou à deformação quando sujeitos a tensões de cisalhamento. A incapacidade dos líquidos de suportar tensões de cisalhamento está relacionada diretamente à sua viscosidade. Quando uma tensão de cisalhamento é aplicada a um líquido, ele não pode se deformar facilmente devido à sua alta viscosidade, resultando na impossibilidade de propagação das ondas de cisalhamento (ondas S) através do líquido. Em contraste, os sólidos, que têm uma viscosidade muito menor, são capazes de suportar tensões de cisalhamento e, portanto, podem suportar a propagação das ondas S (Cengel & Cimbala, 2013).

No caso do ar, sua viscosidade é muito baixa em comparação com líquidos e sólidos. Devido a essa baixa viscosidade, o ar não é capaz de suportar tensões

de cisalhamento significativas. Como resultado, as ondas de cisalhamento (ondas S) não podem se propagar através do ar da mesma forma que não podem se propagar através de líquidos (White, 2011).

No entanto, é importante notar que, enquanto as ondas S não podem se propagar através do ar, as ondas de compressão (ondas P) podem se propagar tanto através de sólidos quanto de líquidos, bem como através do ar. Isso ocorre porque as ondas P são ondas de compressão e expansão que podem se propagar através de meios fluidos, incluindo o ar (Shearer, 2009).

A velocidade de propagação V_s , descrita no Kramer (1996), é expressa pela teoria da elasticidade linear por:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (2.2)$$

Onde ρ é a massa específica do material, G é o módulo de cisalhamento, E é o módulo de Young e ν o coeficiente de Poisson.

2.2.2. Ondas de superfície

As ondas sísmicas de superfície são um tipo de onda sísmica que se propaga ao longo da superfície da Terra, diferentemente das ondas de corpo, e se movem a uma velocidade um pouco inferior à velocidade das ondas de cisalhamento. As ondas de superfície têm a característica de mudar de forma à medida que viajam, pois os diferentes componentes de frequência que as constituem se propagam em velocidades diferentes, o que é conhecido como onda de dispersão. Os padrões de dispersão são indicativos da estrutura de velocidade do meio através do qual a onda viaja (Lay & Wallace, 2009).

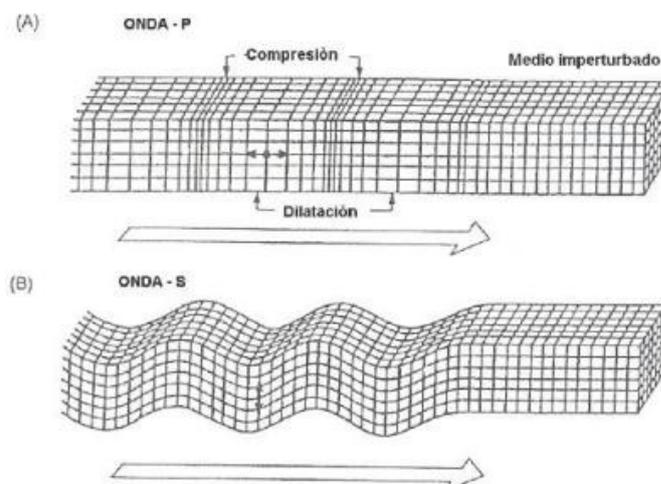


Figura 2.5 - Esquema de propagação de ondas P (A) e ondas SV (B) - (Vasquez, 2008).

2.2.2.1. Ondas Love

São o resultado da interação das ondas SH com uma camada superficial de menor rigidez. Elas não possuem componente vertical de movimento (Figura 2.6 B) e geram um movimento das partículas perpendicularmente à direção de propagação. As ondas Love podem ser consideradas como ondas S confinadas na crosta terrestre, cuja amplitude diminui rapidamente com a profundidade (Lay & Wallace, 2009).

2.2.2.2. Ondas Rayleigh

Também viajam ao longo da superfície livre da Terra com amplitudes que diminuem exponencialmente com a profundidade. O movimento das partículas ocorre em uma direção elíptica retrógrada em um plano vertical em relação à superfície. Como contêm componentes de cisalhamento, se propagam apenas através de meios sólidos. Sua velocidade de propagação, que é definida como velocidade de fase $C(\omega)$, é determinada principalmente pela velocidade da onda de cisalhamento (V_S) dos materiais (Aki & Richards, 2002).

Para fins de engenharia, a velocidade de propagação das ondas Rayleigh (V_R) pode ser calculada como sendo aproximadamente igual à velocidade de propagação das ondas S com base na equação:

$$V_R = \frac{0,862 + 1,14\nu}{1 + \nu} V_S \quad (2.3)$$

A eq. (2.3) uma expressão empírica utilizada para estimar a velocidade das ondas Rayleigh (V_R) em relação à velocidade das ondas S (V_S) em um meio elástico isotrópico. Ela leva em consideração o coeficiente de Poisson (ν), que é uma medida da relação entre a deformação lateral e a deformação axial de um material sob tensão, para fornecer uma estimativa mais precisa da velocidade das ondas Rayleigh. No entanto, é importante notar que essa é uma relação aproximada e pode não ser precisa em todas as situações, especialmente em materiais anisotrópicos ou sob condições específicas (Aki & Richards, 2002).

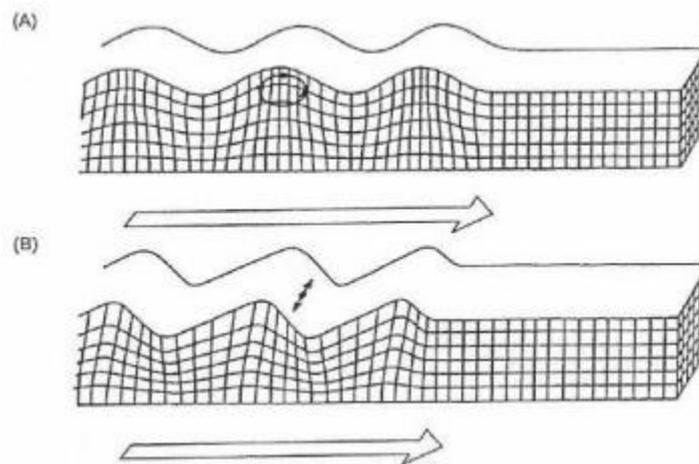


Figura 2.5 - Esquema de propagação de ondas Rayleigh (A) e ondas Love (B) (Vasquez, 2008).

3

Descrição da área de estudo

3.1.

Localização

A área de estudo situa-se no distrito de Ancón ($11^{\circ}40'26''$ - $11^{\circ}49'22''$ Latitude Sul, $77^{\circ}07'23''$ - $77^{\circ}11'54''$ Longitude Oeste) localizado a 43 km ao norte da cidade de Lima, no Peru (Figura 3.1).

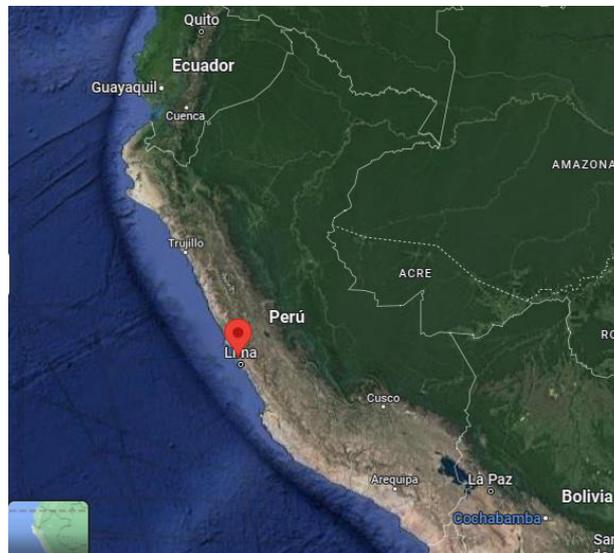


Figura 3.1 - Localização do distrito de Ancón, próxima à Lima, Peru (Google Earth, acesso em 13 maio 2023).

3.2.

Perfis de velocidade de ondas S

No presente estudo foram utilizados 4 perfis de velocidade de ondas S obtidos de uma investigação de Microzonificação Sísmica realizados na área de estudo (Ramos, 2016). As informações disponíveis incluem o perfil geológico regional e local, os registros de perfuração e os perfis de velocidade de onda S determinados pelo método geofísico de análise multicanal de ondas superficiais (Masw) e pelo método de arranjo de microtremores e ensaios de caracterização física (Figuras 3.2 a 3.5).

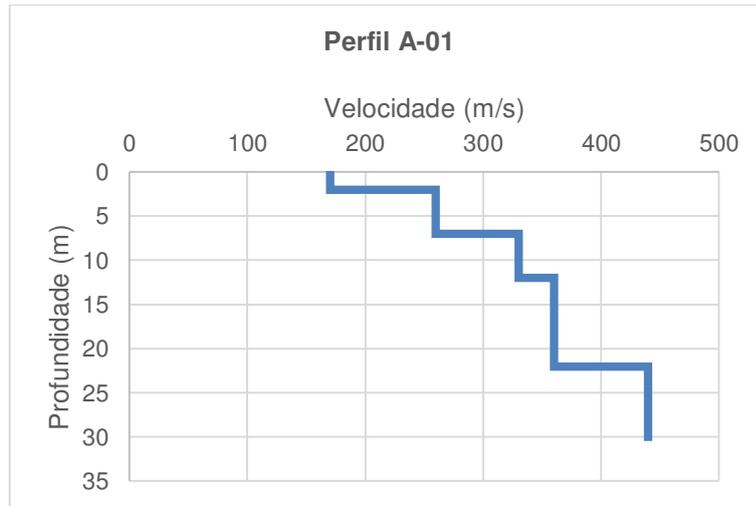


Figura 3.2 - Perfil A-01 de velocidade de ondas S.

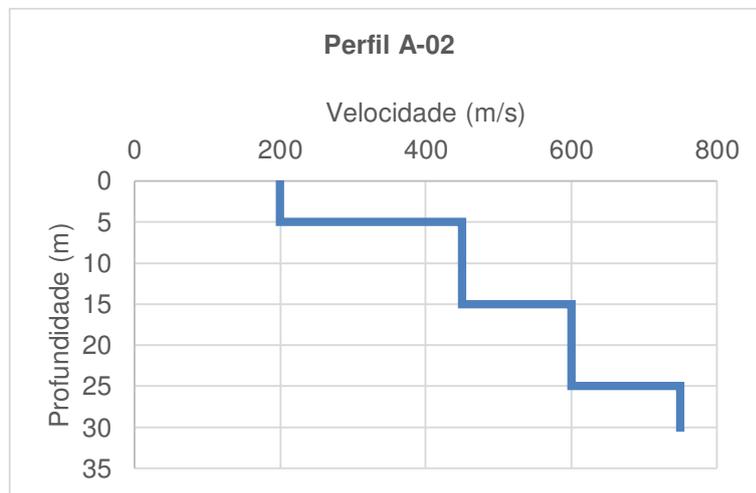


Figura 3.3 - Perfil A-01 de velocidades de ondas S.

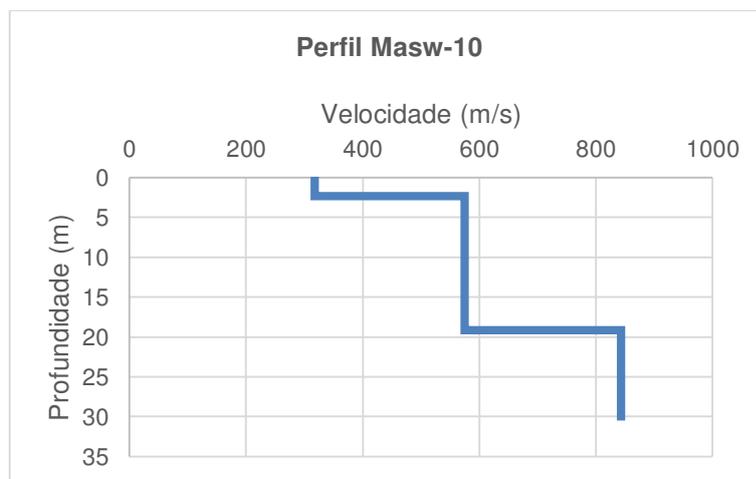


Figura 3.4 - Perfil Masw-10 de velocidades de ondas S.

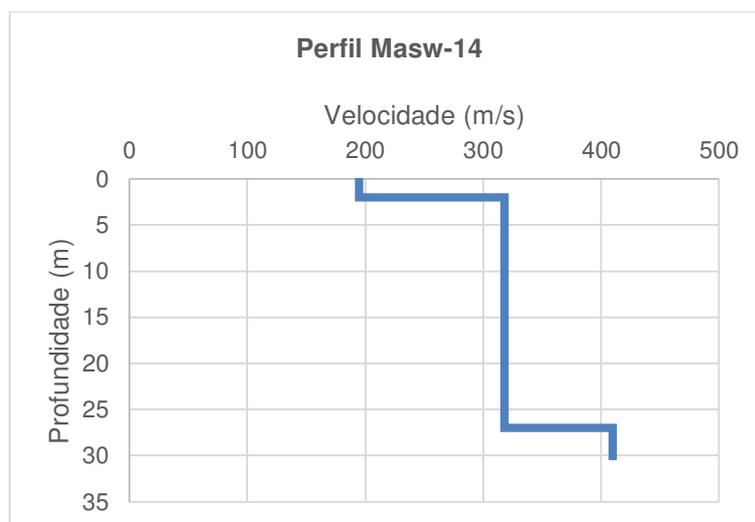


Figura 3.5 - Perfil Masw-14 de velocidades de ondas S.

Aplicou-se a eq. (3.1), proposta por Alfaro (2007), para estimar o número de golpes (N) em função da velocidade das ondas de cisalhamento V_S .

$$V_S = 99,783 \cdot N^{0,383} \quad (3.1)$$

Tabela 3.1 – Estado de compactidade e consistência dos solos (Fonte: ABNT NBR 6484 2020).

Solo	Índice de resistência à penetração N	Designação
Areias e siltes arenosos	≤ 4	Fofa (o)
	5 a 8	Pouco compacta (o)
	9 a 18	Medianamente compacta (o)
	19 a 40	Compacta (o)
	> 40	Muito compacta (o)
Argilas e siltes argilosos	≤ 2	Muito mole
	3 a 5	Mole
	6 a 10	Média (o)
	11 a 19	Rija (o)
	20 a 30	Muito rija (o)
	> 30	Dura (o)

Para a caracterização das camadas dos perfis dos solos, utilizou-se à Tabela 3.1, obtendo-se:

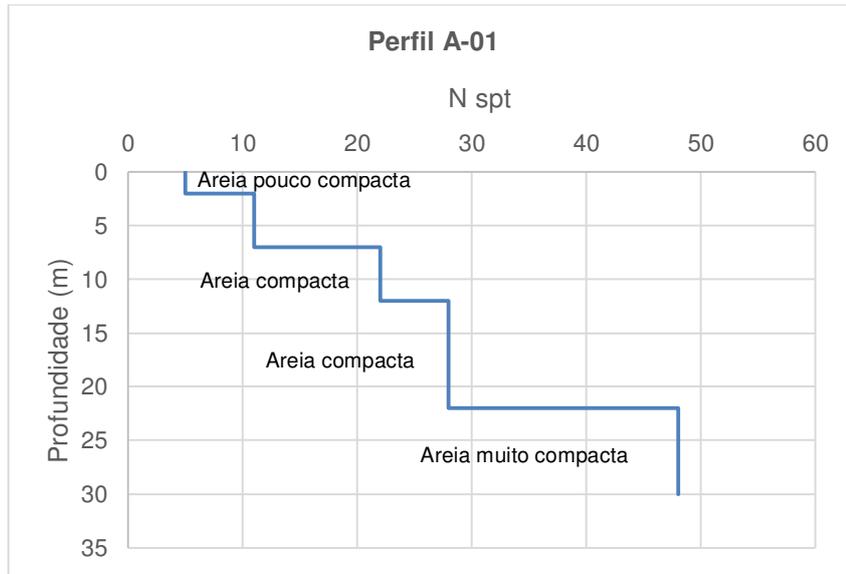


Figura 3.6 - Perfil A-01 do índice de resistência à penetração (N), obtido por meio de correlação com a velocidade de cisalhamento.

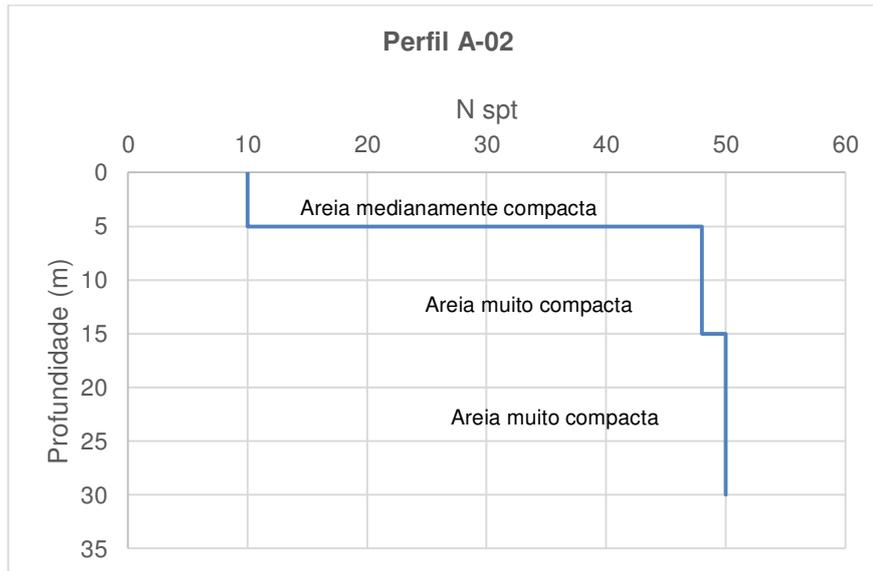


Figura 3.7 - Perfil A-02 do índice de resistência à penetração (N), obtido por meio de correlação com a velocidade de cisalhamento.

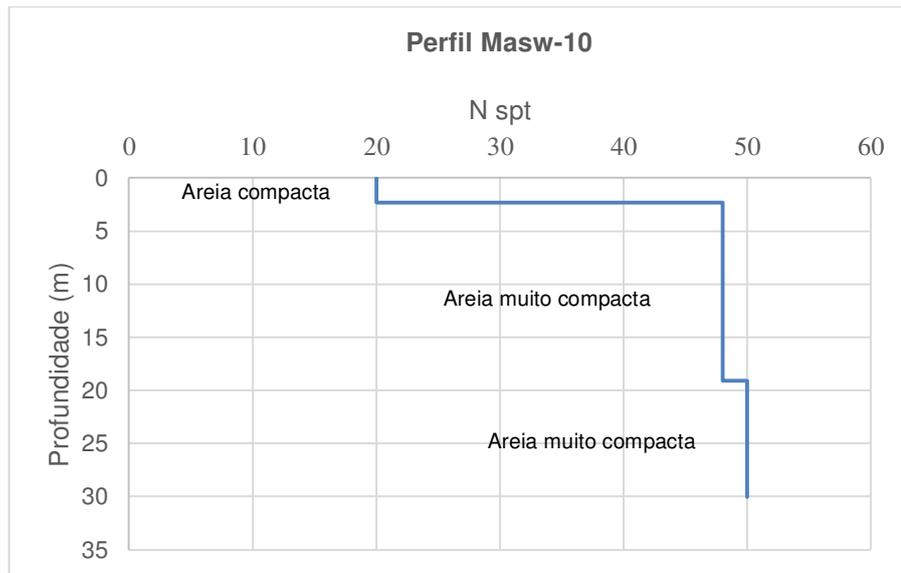


Figura 3.8 - Perfil Masw-10 do índice de resistência à penetração (N), obtido por meio de correlação com a velocidade de cisalhamento.

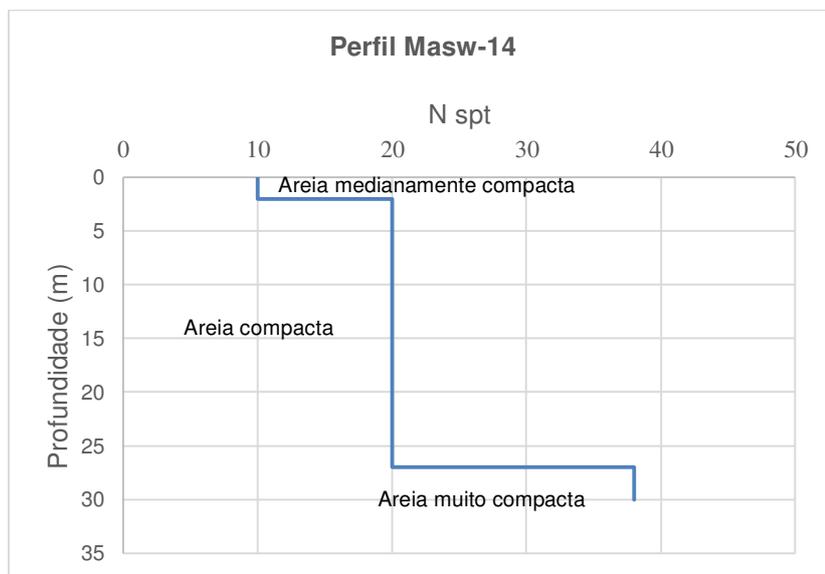


Figura 3.9 - Perfil Masw-14 do índice de resistência à penetração (N), obtido por meio de correlação com a velocidade de cisalhamento.

3.3. Registros sísmicos

3.3.1. Geração de registros

A geração de registros sísmicos é um importante processo de sismologia que envolve a coleta e o registro de ondas sísmicas geradas por eventos naturais, como terremotos, ou por fontes controladas, como explosões em estudos geofísicos. Esses registros, conhecidos como sismogramas, constituem uma fonte

rica de informações que desempenha um papel fundamental na compreensão da atividade sísmica e na investigação da estrutura do subsolo (Shearer, 2009).

O processo começa com a detecção de ondas sísmicas por meio de sismógrafos ou acelerômetros. Os sismógrafos tradicionais utilizam um pêndulo suspenso para registrar o movimento relativo do solo, enquanto os acelerômetros modernos medem diretamente a aceleração do solo (Bolt, 1993).

Os dados coletados são transmitidos para centros de processamento em tempo real ou armazenados para análises posteriores. Os métodos para seleção do registro sísmico de projeto são basicamente os seguintes (Aguilar, 2001):

- Método da utilização do histórico de registros sísmicos.
- Método baseado no modelo de falha.
- Método do espectro padrão.

O primeiro método consiste em duas alternativas: na primeira, fornece registros sísmicos históricos próximos ao local do projeto que sejam compatíveis com os níveis de aceleração determinados a partir de estudos de ameaça sísmica. Os registros de terremotos são usados sem modificação, mas a aplicabilidade deste método depende da disponibilidade de registros sísmicos nas proximidades. Na segunda alternativa, as acelerações do registro sísmico histórico são modificadas (registros artificiais), sendo a forma mais simples multiplicar por uma constante tal que a aceleração máxima coincida com a aceleração máxima prevista no estudo de ameaça sísmica. Uma variação desta alternativa também consiste em aplicar uma técnica de ajuste espectral de tal modo que o espectro da resposta do terremoto original esteja tão próximo quanto possível do espectro de ameaça uniformemente provável obtido do estudo de ameaça sísmica (Bommer & Crowley, 2008). Neste estudo os acelerogramas artificiais foram obtidos por ajuste espectral considerando terremotos com período de recorrência $TR = 475$ anos.

Para edifícios comuns é habitual considerar uma vida útil efetiva de 50 anos (tempo de exposição) e aceitar apenas 10% de probabilidade de superação; Isto nos leva ao pico de aceleração dos terremotos que têm um período de retorno de aproximadamente 475 anos (Muñoz, 2020). A região de investigação desta dissertação é designada para a utilização de edificações ordinárias.

O segundo método é baseado em um modelo de falha e é utilizado para calcular teoricamente a representação da ruptura da falha e a irradiação sísmica gerada pela ruptura da falha. Diversas alternativas de análise estão disponíveis, seja com base em modelos de fontes sísmicas ou utilizando a função de Green (Aki & Richards, 2002).

O terceiro método consiste em gerar um registro sísmico sintético com base no fato de que qualquer função periódica pode ser expandida utilizando a sobreposição de um grande número de ondas senoidais de diferentes amplitudes e diferentes ângulos de fase. Geralmente o espectro de aceleração é predefinido em normas técnicas que regulamentam a construção de obras submetidas a carregamentos sísmicos (Kramer, 1996).

3.3.2. Registros sísmicos utilizados

A análise sismológica de regiões próximas a zonas de subducção, como Ancón, sugere que a maioria dos sismos nesses locais é caracterizada como de interfase, devido à atividade sísmica associada à interação entre as placas tectônicas, com a placa de Nazca subduzindo sob a placa sul-americana. Esses eventos são frequentemente relacionados a movimentos ao longo de falhas geológicas em zonas de subducção e tendem a ser mais comuns e de maior magnitude. No entanto, é importante ressaltar que também há a possibilidade de ocorrência de sismos intraplaca na região, embora em menor escala e frequência, influenciados por fatores geológicos locais e por processos sísmicos internos da placa tectônica.

Nesta pesquisa foram considerados 11 sismos obtidos da base de dados do Centro de Observação de Engenharia Sísmica (CEOIS) do Centro Japonês Peruano de Pesquisa Sísmica e Mitigação de Desastres (CISMID) e do Instituto Geofísico do Peru (IGP). Os sismos selecionados estão listados na Tabela 3.2 com suas características originais. Nesta dissertação foram usados os registros com maiores acelerações horizontais entre as direções NS e EW.

Tabela 3.2 - Registros sísmicos considerados

Sismo	Data	Magnitude de momento (Mw)	Estação (ID)	Mecanismo Focal	PGA (g)	Prof. (km)
Ancash 1970	31 maio 1970	7.9	Parque de la Reserva (PRQ)	Subdução Interfase	0.11	35
Arequipa 2001	07 julho 2001	8.4	Estación Unsa (AQP001)	Subdução Interfase	0.13	32
Atico 2001	23 junho 2001	8.4	César Vizcarra Vargas (MOQ001)	Subdução Interfase	0.3	32
Cañete 2021	22 junho 2021	6	Municipio de Independencia (INDEP)	Subdução Interfase	0.21	32
Cañete 2022	12 maio 2022	5.5	Municipio de Independencia (INDEP)	Subdução Interfase	0.24	49
Lima 1966	17 outubro 1966	8.1	Parque de la Reserva (PRQ)	Subdução Interfase	0.27	24
Lima 1974	03 outubro 1974	8.1	Parque de la Reserva (PRQ)	Subdução Interfase	0.2	13
Moquegua 2001	23 junho 2001	8.4	César Vizcarra Vargas (MOQ001)	Subdução Interfase	0.3	32
Moquegua 2003	26 agosto 2003	6	MOQ2 (MOQ002)	Subdução Interfase	0.28	32
Tacna 2010	05 maio 2010	6.2	Jorge Basadre Grohman University (TAC001)	Subdução Interfase	0.19	36
Tacna 2012	14 maio 2012	6.3	Alberto Giesecke Matto (TAC002)	Subdução Interfase	0.18	98

Segue uma breve descrição dos sismos de projeto utilizados:

O sismo de Ancash de 31 de maio de 1970, também conhecido como terremoto do 70, foi um sismo de interfase. Ele atingiu uma magnitude de 7,9 na escala de magnitude de momento e uma intensidade de grau IX (muito destrutivo) na escala de Mercalli. O epicentro estava localizado no mar de Áncash e foi sentido em toda a costa peruana e várias províncias do departamento de Huánuco, no norte de Lima e na região de La Libertad. Esse terremoto foi amplamente sentido e teve consequências devastadoras, incluindo 70 mil mortes, 20 mil desaparecidos e 145 mil feridos. As cidades de Yungay e Ranrahirca foram completamente destruídas e sepultadas. Foi um dos terremotos mais trágicos da história do Peru.

O sismo de Arequipa de 2001, ocorrido em 7 de julho de 2001, na região sul do Peru, foi um sismo de interfase. Sua magnitude foi de 8,4 Mw (magnitude de momento) e a profundidade do foco sísmico foi de 32 km. O epicentro estava localizado a 82 km da localidade de Ocoña, na província de Camaná. Esse terremoto afetou as regiões peruanas de Arequipa, Moquegua e Tacna. O sismo

de Arequipa de 2001 foi resultado da interação entre as placas de Nazca e Sul-Americana.

O sismo de Atico de 2001, ocorrido em 23 de junho de 2001, na região sul do Peru, foi um sismo de interfase. Sua magnitude foi de 8,4 Mw (magnitude de momento) e a profundidade do foco sísmico foi de 32 km. O epicentro estava localizado a 82 km da localidade de Ocoña, na província de Camaná. Esse terremoto afetou as regiões peruanas de Arequipa, Moquegua e Tacna.

O sismo de Cañete de 22 de junho de 2021, ocorrido na região sul do Peru, foi um sismo de interfase. Sua magnitude foi inicialmente relatada como 5,8 e depois corrigida para 6,0 na escala de Richter. O epicentro estava localizado a 33 km a sudoeste de Mala, em Cañete, com uma profundidade de 32 km. De acordo com o Instituto Geofísico do Peru (IGP), o sismo teve uma intensidade de nível V.

O sismo de Cañete de 12 de maio de 2022, ocorrido na região sul do Peru, foi um sismo de interfase. Sua magnitude foi de 5,5 e o epicentro estava localizado a 49 km ao sudoeste da localidade de Chilca, em Cañete, Lima. A profundidade do foco sísmico foi de 49 km. Esse terremoto causou preocupação entre os habitantes da região.

O sismo de Lima e Callao de 1966, ocorrido em 17 de outubro de 1966, foi um sismo de interfase com magnitude de 8,1. Ele causou danos significativos em várias áreas, incluindo 70 mil mortes. Esse terremoto foi um dos mais destrutivos ocorridos em Lima após o terremoto de 1940. Em resumo, foi um evento devastador causado pela interação entre as placas de Nazca e Sul-Americana.

O sismo de Lima e Callao de 1974, ocorrido em 3 de outubro de 1974, foi um sismo de interfase com magnitude de 8,1 na escala de Magnitude de Momento (Mw). O epicentro estava localizado no mar, em frente às Salinas de Huacho, Huaura. Esse terremoto afetou as regiões peruanas de Lima, Callao e a costa central. Foi o último grande terremoto que atingiu a capital peruana.

O sismo de Moquegua de 23 de junho de 2001, ocorrido na região sul do Peru, foi um sismo de interfase. Sua magnitude foi de 8,4 Mw (magnitude de momento) e a profundidade do foco sísmico foi de 32 km. O epicentro estava localizado a 82 km da localidade de Ocoña, na província de Camaná. Esse terremoto afetou as regiões peruanas de Arequipa, Moquegua e Tacna.

O sismo de Moquegua de 26 de agosto de 2003, ocorrido na região sul do Peru, foi um sismo de interfase. Sua magnitude foi de 5,8 ML (magnitude local) e o epicentro estava localizado a 32 km ao sudoeste da cidade de Moquegua. Este terremoto resultou em danos significativos a um grande número de casas de adobe em Moquegua, provocando alarme nas cidades de Arequipa e Tacna, assim como em várias localidades adjacentes.

O sismo de Tacna de 5 de maio de 2010, ocorrido na região sul do Peru, foi um sismo de interfase. Sua magnitude foi de 6,5 ML (magnitude local) e o epicentro estava localizado a 97 km a oeste-sudoeste da cidade de Tacna. Esse terremoto teve seu foco a uma profundidade de 36 km e teve origem no processo de fricção entre as placas de Nazca e Sul-Americana. A área de percepção do sismo abrangeu aproximadamente 250 km de raio, com maior intensidade nas cidades e localidades de Tacna, Ilo e Arica, no Chile.

O sismo de Tacna de 14 de maio de 2012, ocorrido na região sul do Peru, foi um sismo de interfase. Sua magnitude foi de 6,3 Mw (magnitude de momento) e o epicentro estava localizado a 21 km ao sudeste da cidade de Tacna. O sismo ocorreu a uma profundidade de 98 km (foco intermédio) e, em geral, apresentou um raio de percepção de cerca de 200 km, sendo mais intenso nas cidades de Tacna e Arica, no Chile.

Nesta pesquisa, baseando-se nos espectros de projeto, foram considerados sismos com mecanismo de falha do tipo interfase. Todos os onze sismos utilizados foram caracterizados como de interfase.

3.3.3. Correção da linha base e filtragem

A correção da linha de base e a filtragem de registros sísmicos são processos essenciais na análise e no processamento de dados sísmicos. Elas visam melhorar a qualidade dos sismogramas, removendo interferências e ruídos indesejados.

3.3.3.1. Correção da linha base

A correção da linha base é um procedimento realizado para eliminar ou atenuar a componente de baixa frequência que pode estar presente nos

sismogramas devido a várias fontes de interferência, como variações na resposta instrumental, movimentos de baixa frequência e vibrações ambientais. Esse processo é importante para garantir que as características de interesse das ondas sísmicas se destaquem com clareza nos registros (Lay & Wallace, 1995).

3.3.3.2. Filtragem

A filtragem de registros sísmicos é um processo que envolve a aplicação de filtros para remover ou atenuar componentes de frequência indesejados nos sismogramas. Esses componentes podem incluir ruídos de alta frequência, vibrações ambientais e interferências de várias fontes (Shearer, 2009). Há 4 tipos de filtros sísmicos:

- Filtro Passa-Baixa: remove frequências acima de um determinado limite, o que é útil para eliminar ruídos de alta frequência.

- Filtro Passa-Alta: remove frequências abaixo de um limite, eficaz na remoção de componentes indesejados de baixa frequência.

- Filtro Passa-Banda: permite a passagem de frequências dentro de uma faixa específica, bloqueando frequências fora dessa faixa.

- Filtro Rejeita-Banda: bloqueia frequências dentro de uma faixa específica, permitindo a passagem de todas as outras frequências.

Todos os registros utilizados foram previamente tratados por correção da linha base e a aplicação de um filtro passa-banda de tipo Butterworth no intervalo de 0.1Hz a 25Hz, faixa de frequências usualmente considerada em análises sísmicas. Para execução deste procedimento foi utilizado o software SeismoSignal (SeismoSoft, 2016).

As Figura 3.10 a Figura 3.20 comparam as histórias de aceleração, velocidade e deslocamento exibindo os acelerogramas originais e aqueles corrigidos pela linha base e filtragem de frequências passa-banda para os sismos analisados.

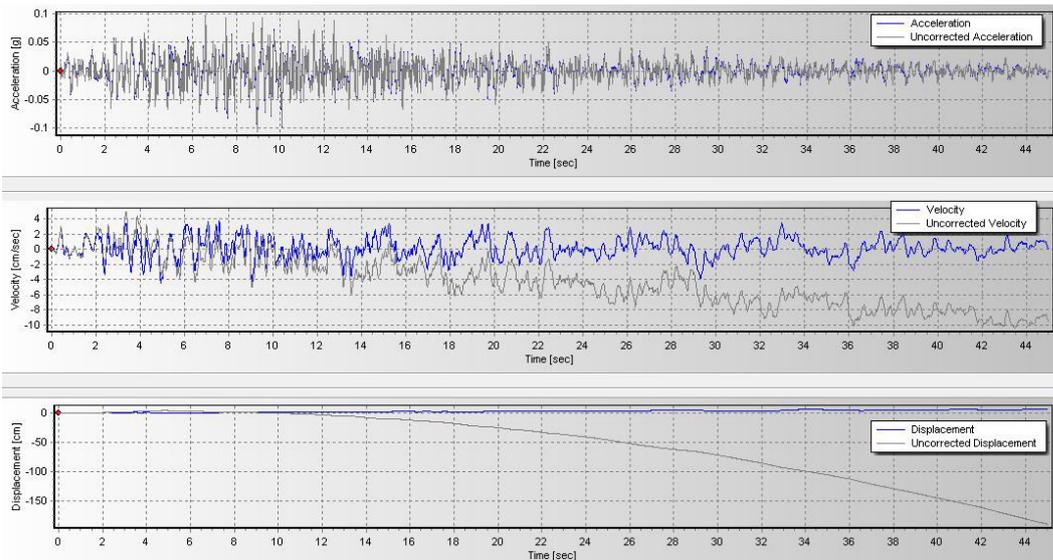


Figura 3.10 - Histórias de aceleração, velocidade e deslocamento originais e corrigidas pela linha base e filtragem do registro do terremoto de Ancash 1970.

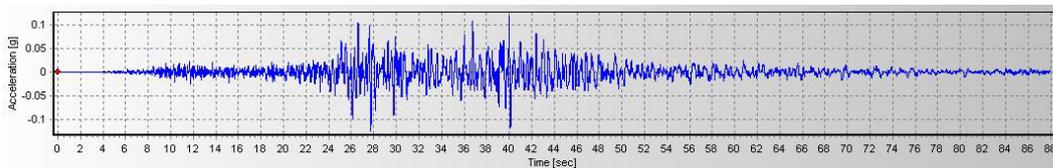


Figura 3.11 - História de aceleração corrigidas pela linha base e filtragem do registro do terremoto de Arequipa 2001.

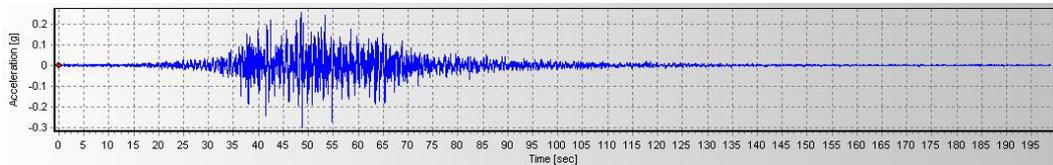


Figura 3.12 - História de aceleração corrigidas pela linha base e filtragem do registro do terremoto de Atico 2001.

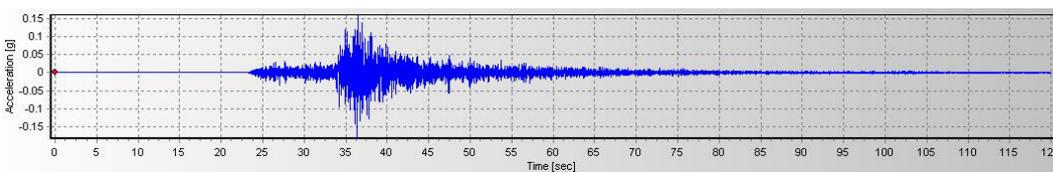


Figura 3.13 - História de aceleração corrigidas pela linha base e filtragem do registro do terremoto de Cañete 2021.

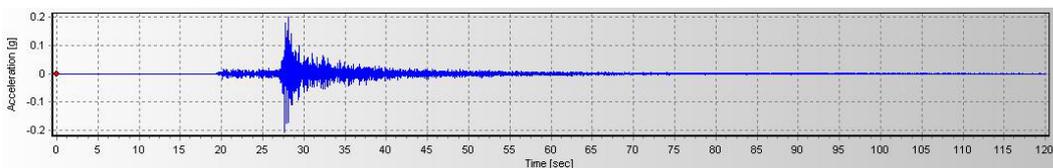


Figura 3.14 - História de aceleração corrigidas pela linha base e filtragem do registro do terremoto de Cañete 2022.

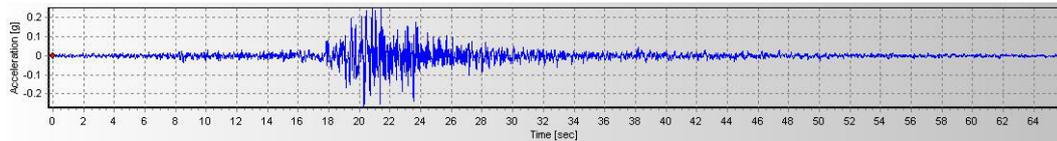


Figura 3.15 - História de aceleração corrigidas pela linha base e filtragem do registro do terremoto de Lima 1966.

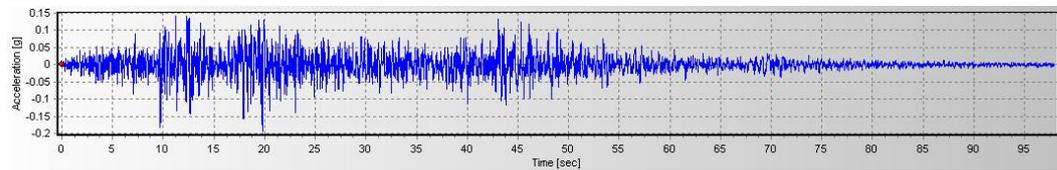


Figura 3.16 - História de aceleração corrigidas pela linha base e filtragem do registro do terremoto de Lima 1974.

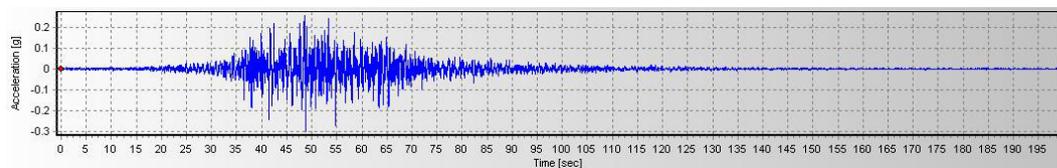


Figura 3.17 - História de aceleração corrigidas pela linha base e filtragem do registro do terremoto de Moquegua 2001.

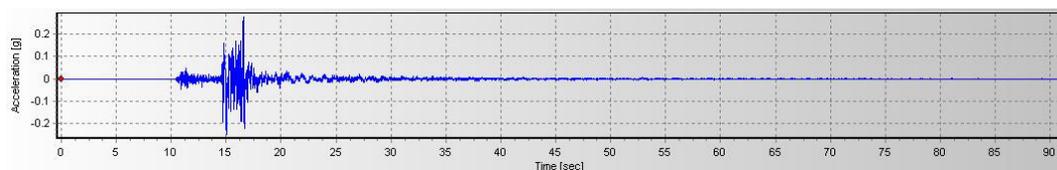


Figura 3.18 - História de aceleração corrigidas pela linha base e filtragem do registro do terremoto de Moquegua 2003.

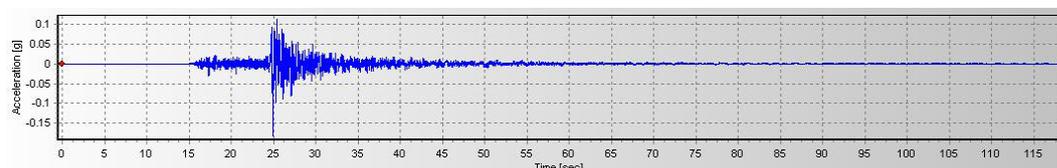


Figura 3.19 - História de aceleração corrigidas pela linha base e filtragem do registro do terremoto de Tacna 2010.

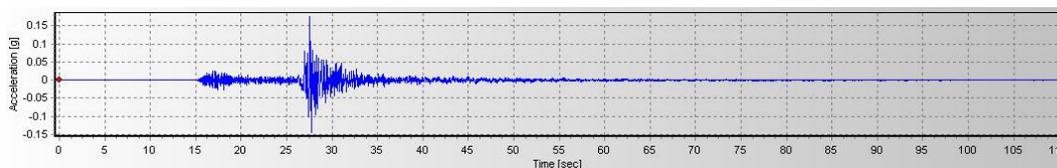


Figura 3.20 - História de aceleração corrigidas pela linha base e filtragem do registro do terremoto de Tacna 2012.

3.3.4. Geração de acelerogramas artificiais pela técnica de ajuste espectral

A técnica para gerar acelerogramas por ajuste espectral do registro no domínio do tempo consiste em adicionar wavelets às séries de aceleração. Esta técnica tem as mesmas vantagens do ajuste no domínio da frequência, mas introduz menos energia no registro sísmico e preserva as características não

estacionárias do registro original (Kalkan et al., 2014). A metodologia é baseada no trabalho de Lihanand e Tseng (1987) utilizando códigos computacionais originalmente escritos por Abrahamson (1992) e posteriormente atualizados por Hancock et al. (2006).

Na geração de acelerogramas artificiais pela técnica de ajuste espectral, as wavelets são funções matemáticas que representam oscilações de curta duração e podem ser usadas para modelar diferentes componentes de frequência do sismograma. As wavelets são utilizadas como parte do processo de decomposição e reconstrução do sinal sísmico, permitindo ajustar a amplitude e a fase em diferentes faixas de frequência de forma mais eficaz. Isso possibilita a criação de acelerogramas sintéticos que reproduzem com precisão as características espectrais do sismograma alvo. As wavelets são escolhidas com base nas propriedades do sismograma alvo e nos objetivos específicos do ajuste espectral. Essa abordagem permite uma modelagem mais flexível e refinada dos sismogramas sintéticos, contribuindo para uma melhor representação do comportamento dinâmico do solo durante eventos sísmicos (Kalkan & Kunnath, 2007).

Uma descrição do procedimento de ajuste espectral é feita a seguir:

1. Calcula-se o espectro de resposta elástico de um sistema com 1 grau de liberdade (1 GDL) sob a ação de um registro de aceleração para cada período natural e nível de amortecimento a ser ajustado.
2. Compara-se o pico da resposta do espectro elástico de 1 grau de liberdade com a amplitude do espectro alvo da ameaça sísmica e determina-se o erro entre eles.
3. Adicionam-se wavelets no registro de aceleração com amplitudes e fases apropriadas para que o pico de cada resposta se ajuste à amplitude do espectro alvo.

O "espectro alvo da ameaça sísmica" é uma representação gráfica das características espectrais do movimento do solo esperado em uma determinada região em resposta a terremotos potenciais. Ele descreve a distribuição da amplitude das vibrações sísmicas em diferentes frequências. Portanto, podemos defini-lo como o espectro de resposta sísmica desejado para a região em estudo, levando em consideração os terremotos prováveis e os possíveis danos

estruturais esperados. Este espectro é usado como uma referência para avaliar a adequação do projeto de estruturas e sistemas de engenharia para resistir a terremotos (Cornell, 1996).

As wavelets são funções matemáticas que representam oscilações de curta duração e são amplamente utilizadas na análise de sinais e processamento de dados. Elas são caracterizadas por sua capacidade de capturar tanto informações de baixa frequência quanto de alta frequência em um sinal, o que as torna extremamente úteis em uma variedade de aplicações, incluindo a geração de sismogramas sintéticos. Matematicamente, uma wavelet é definida como uma função $\psi(t)$ que possui uma média nula e é normalizada de modo que sua energia total seja igual a 1. (Mallat, 1998). Formalmente, uma wavelet é expressa como:

$$\psi(t) = \int \varphi^*(t) x(t) dt \quad (3.2)$$

Onde:

$\psi(t)$ é a wavelet;

$\varphi^*(t)$ é a wavelet mãe conjugada;

$x(t)$ é o sinal de entrada.

Ao adicionar wavelets ao registro de aceleração com amplitudes e fases apropriadas, é possível ajustar o pico de cada resposta para que se alinhe com a amplitude do espectro alvo. Isso permite uma modelagem precisa das características espectrais do sismograma desejado, contribuindo para a geração de acelerogramas sintéticos de alta qualidade (Mallat, 1998).

Para o ajuste espectral nesta dissertação foi utilizado o software SeismoMatch (SeismoSoft, 2016). As Figuras 3.21 a 3.31 apresentam os acelerogramas sintéticos obtidos por ajuste espectral e seus respectivos espectros de resposta (espectro alvo e espectro ajustado).

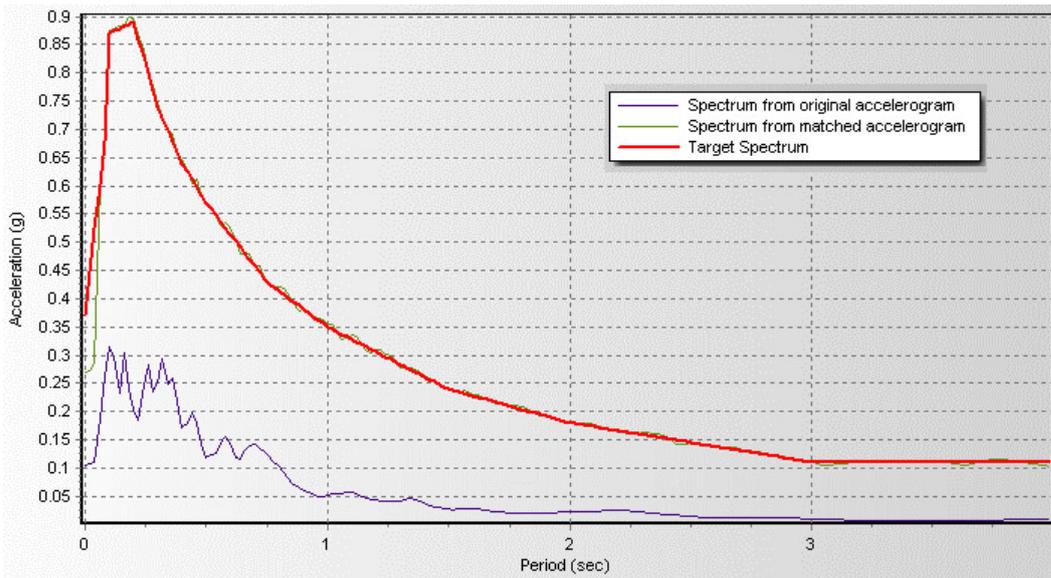


Figura 3.21 - Ajuste espectral do terremoto de Ancash 1970 ao espectro de ameaça uniformemente provável (TR=475 anos).

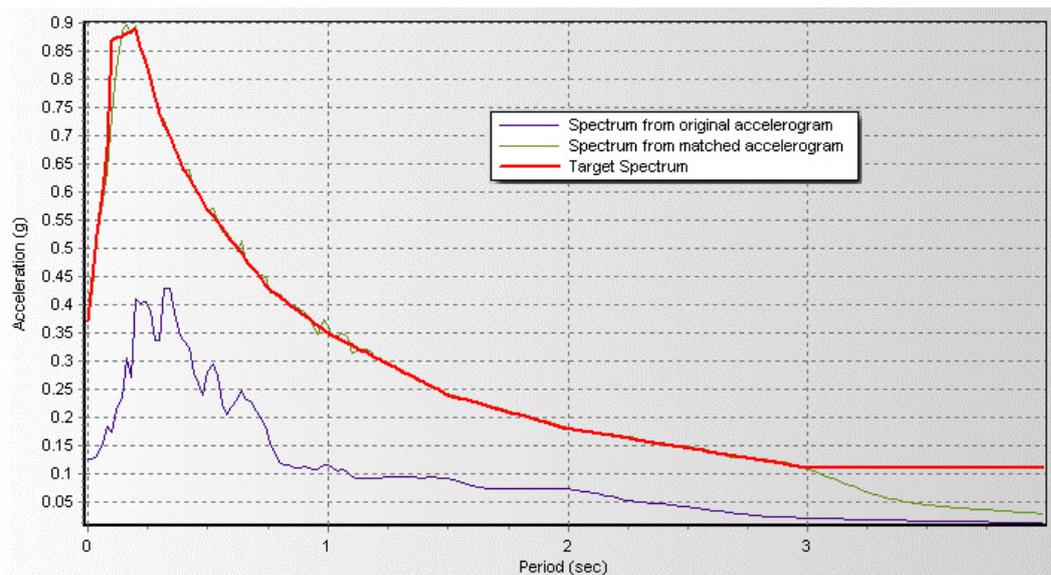


Figura 3.22 - Ajuste espectral do terremoto de Arequipa 2001 ao espectro de ameaça uniformemente provável (TR=475 anos).

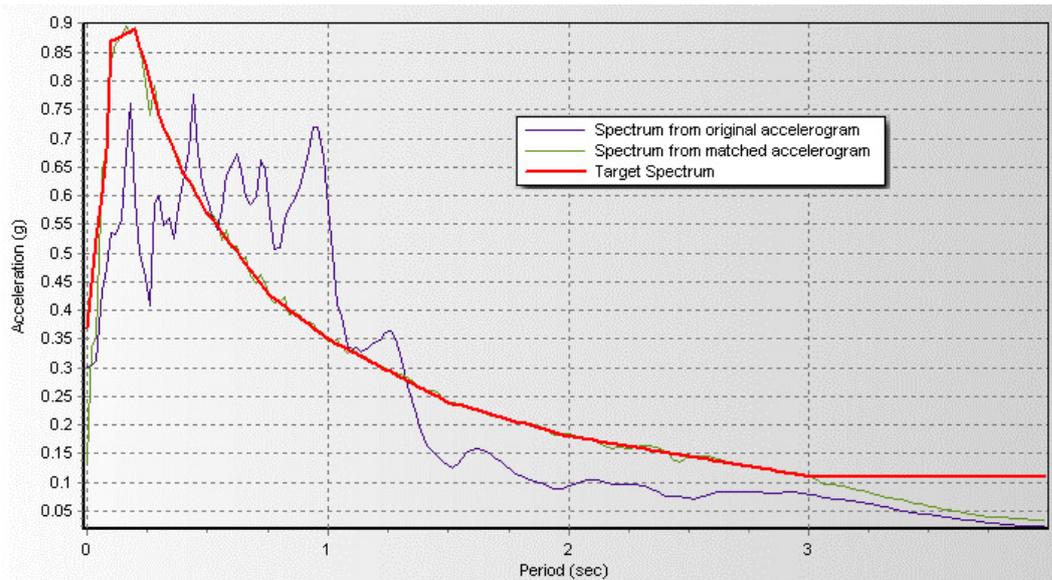


Figura 3.23 - Ajuste espectral do terremoto de Atico 2001 ao espectro de ameaça uniformemente provável (TR=475 anos).

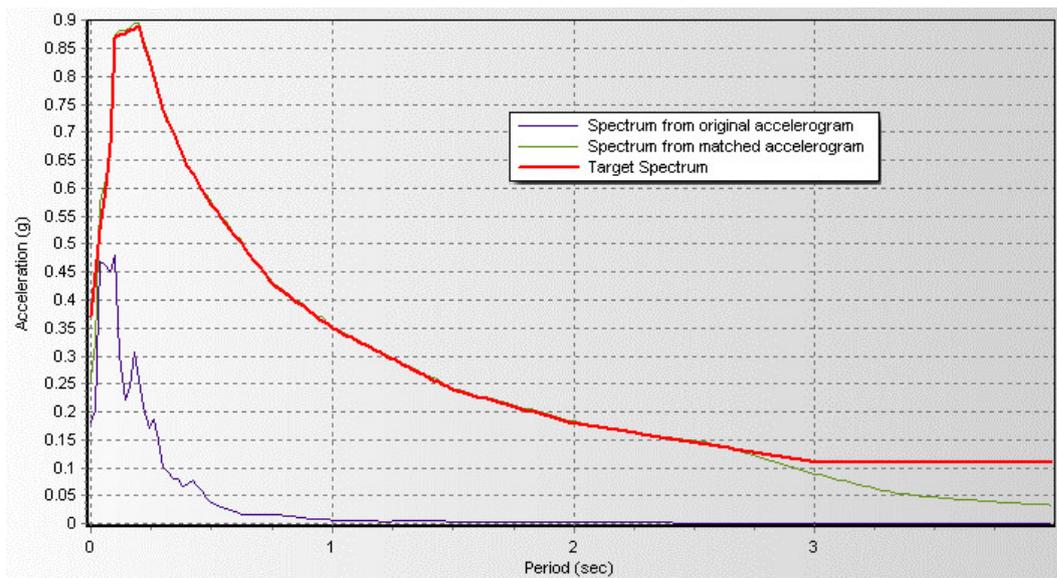


Figura 3.24 - Ajuste espectral do terremoto de Cañete 2021 ao espectro de ameaça uniformemente provável (TR=475 anos).

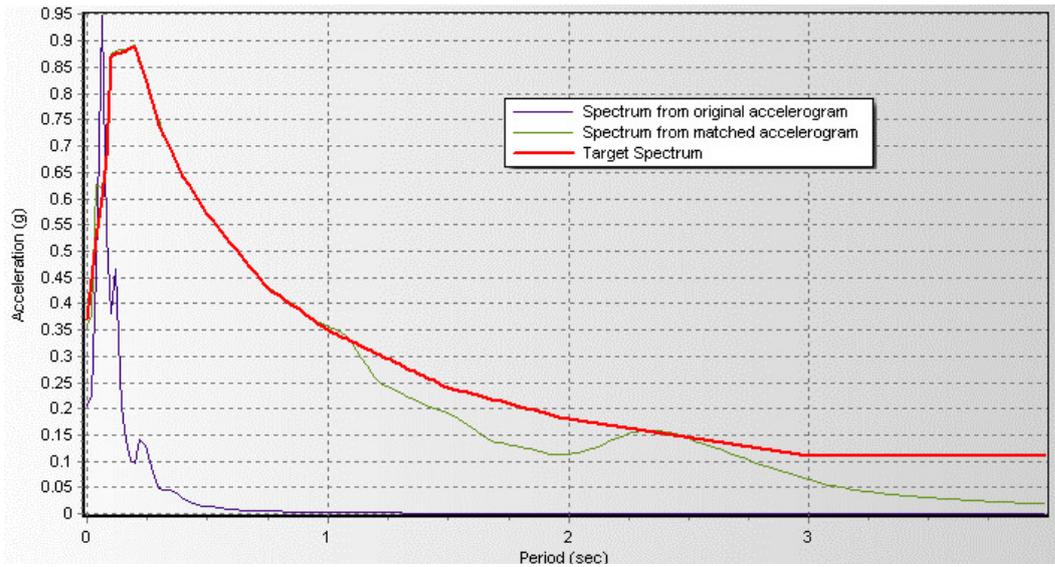


Figura 3.25 - Ajuste espectral do terremoto de Cañete 2022 ao espectro de ameaça uniformemente provável (TR=475 anos).

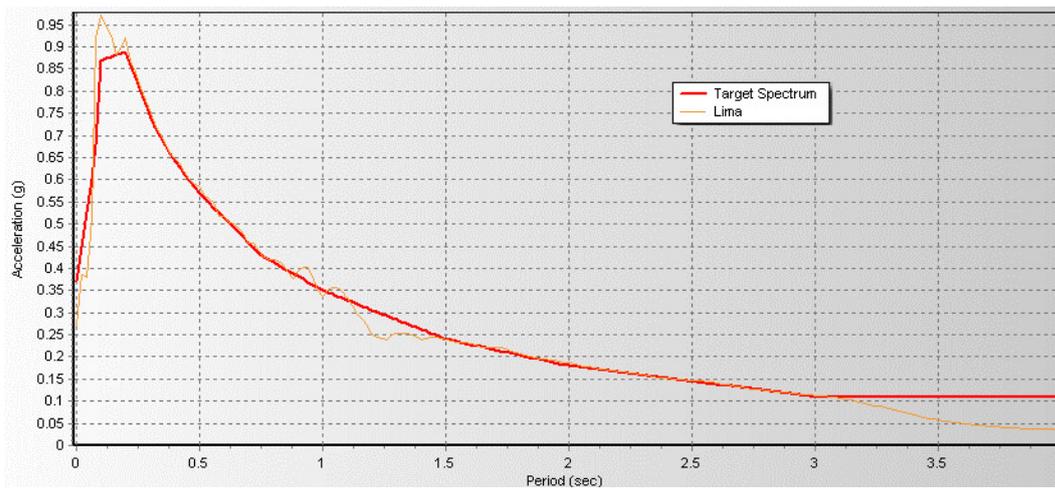


Figura 3.26 - Ajuste espectral do terremoto de Lima 1966 ao espectro de ameaça uniformemente provável (TR=475 anos).

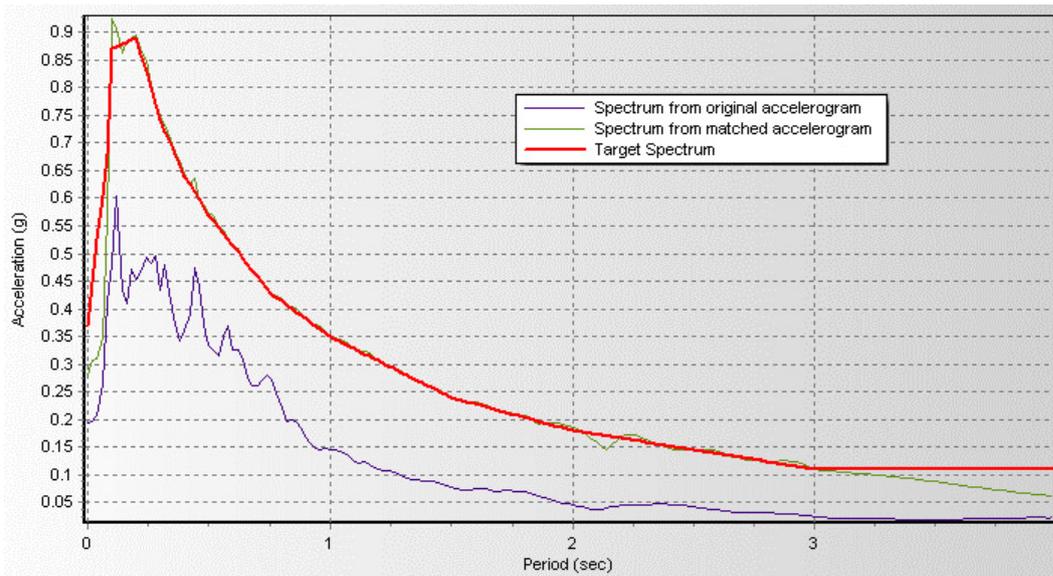


Figura 3.27 - Ajuste espectral do terremoto de Lima 1974 ao espectro de ameaça uniformemente provável (TR=475 anos).

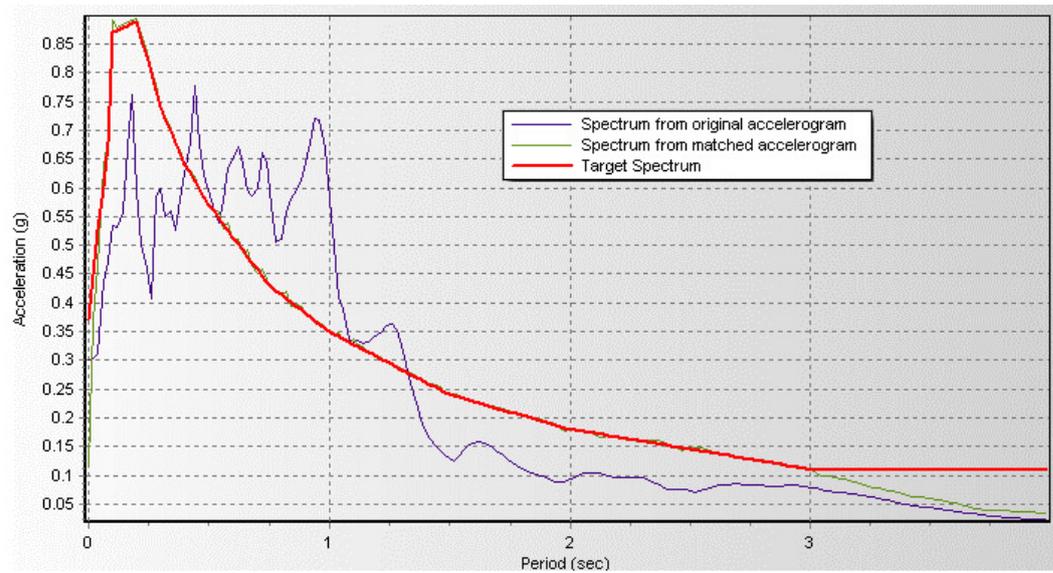


Figura 3.28 - Ajuste espectral do terremoto de Moquegua 2001 ao espectro de ameaça uniformemente provável (TR=475 anos).

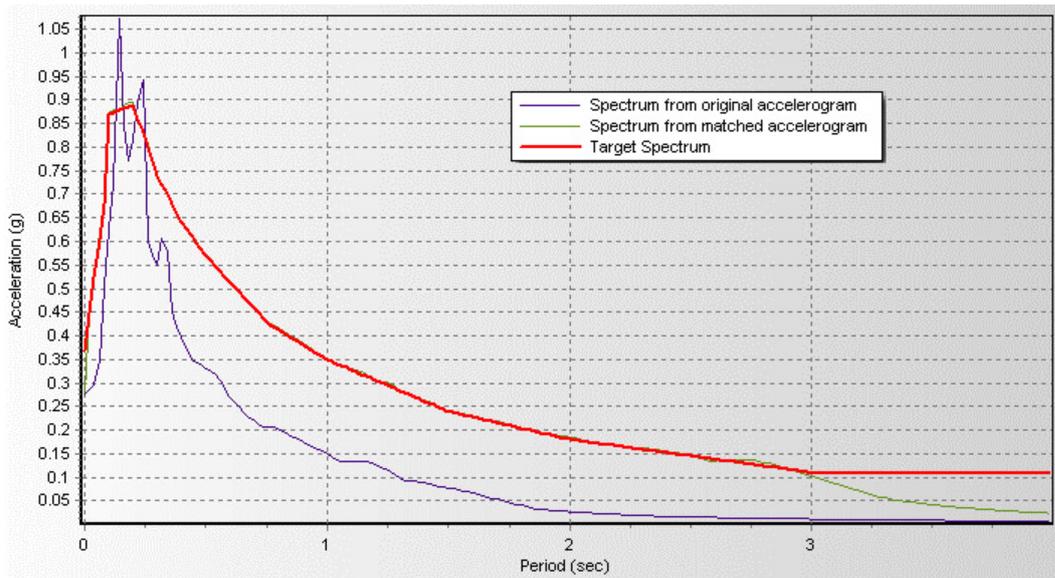


Figura 3.29 - Ajuste espectral do terremoto de Moquegua 2003 ao espectro de ameaça uniformemente provável ($TR=475$ anos).

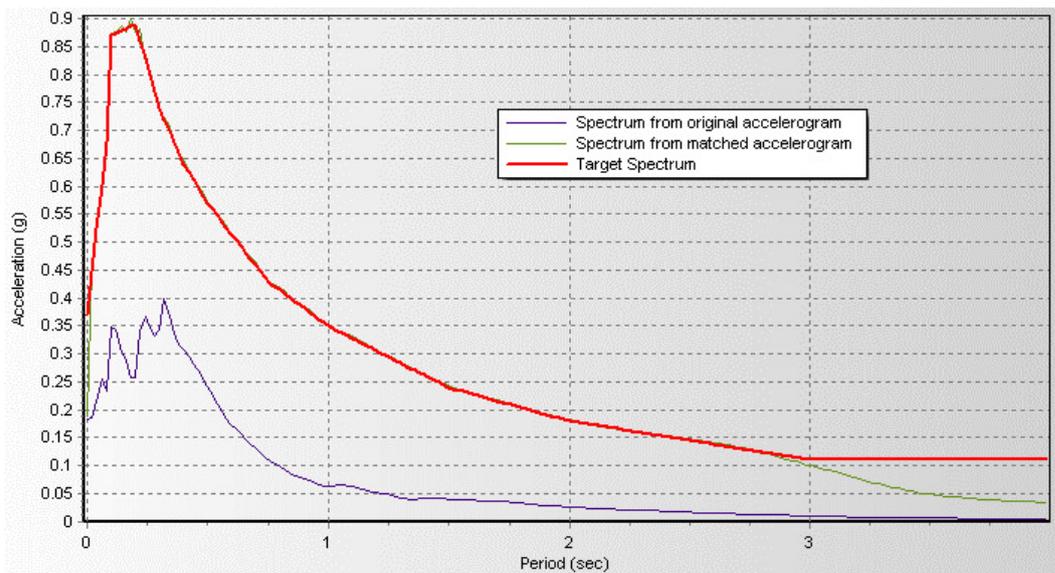


Figura 3.30 - Ajuste espectral do terremoto de Tacna 2010 ao espectro de ameaça uniformemente provável ($TR=475$ anos).

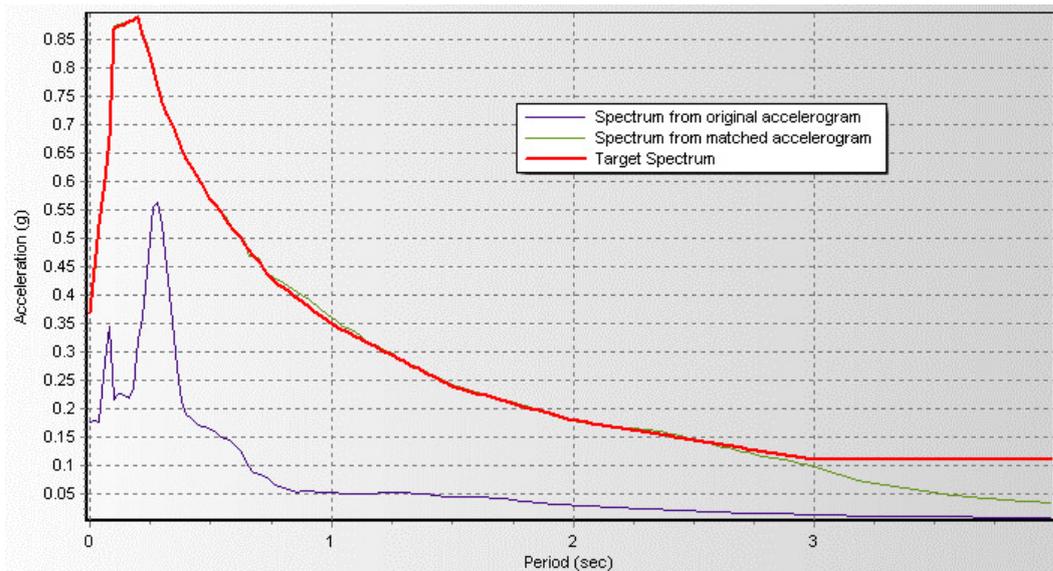


Figura 3.31 - Ajuste espectral do terremoto de Tacna 2012 ao espectro de ameaça uniformemente provável (TR=475 anos).

As Figuras 3.32 a 3.42 exibem as histórias de aceleração dos sismos ajustados.

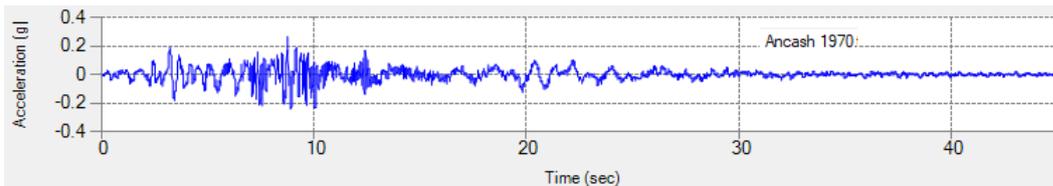


Figura 3.32 - Registro de aceleração do sismo de Ancash 1970 após o ajuste espectral.

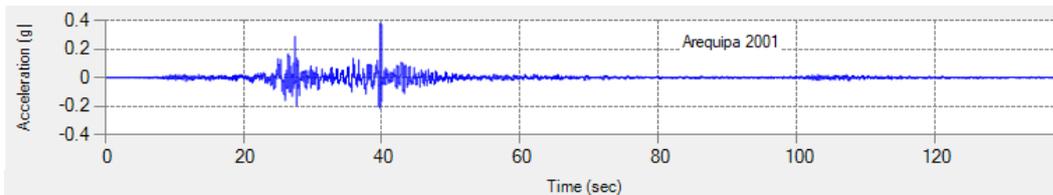


Figura 3.33 - Registro de aceleração do sismo de Arequipa 2001 após o ajuste espectral.

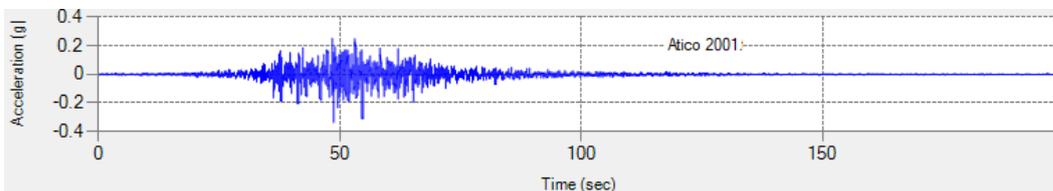


Figura 3.34 - Registro de aceleração do sismo de Atico 2001 após o ajuste espectral.

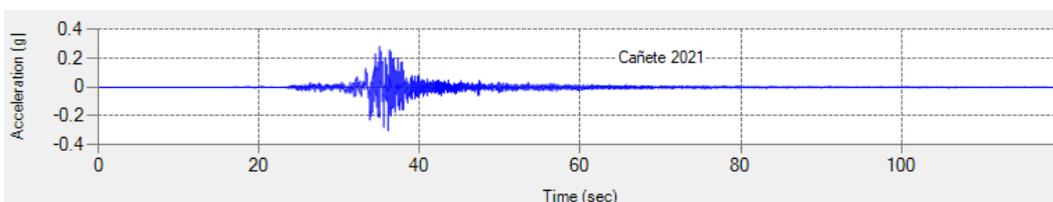


Figura 3.35 - Registro de aceleração do sismo de Cañete 2021 após o ajuste espectral.

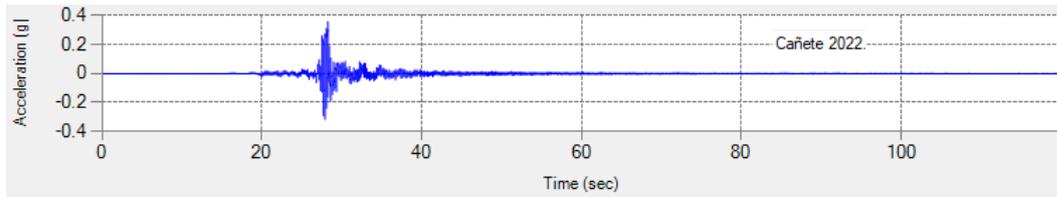


Figura 3.36 - Registro de aceleração do sismo de Cañete 2022 após o ajuste espectral.

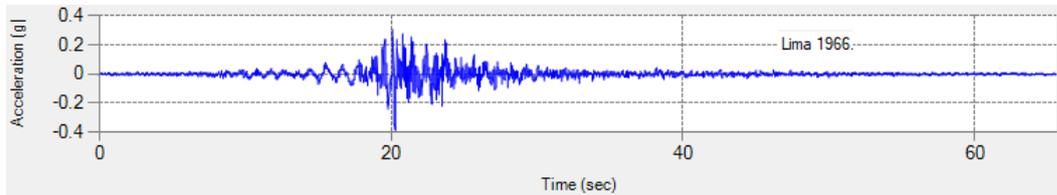


Figura 3.37 - Registro de aceleração do sismo de Lima 1966 após o ajuste espectral.

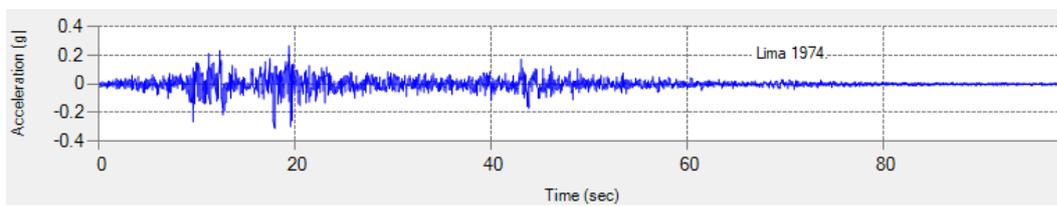


Figura 3.38 - Registro de aceleração do sismo de Lima 1974 após o ajuste espectral.

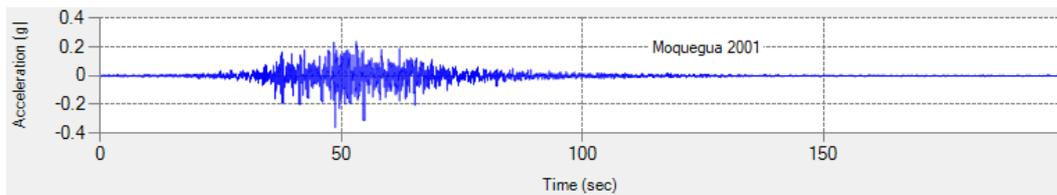


Figura 3.39 - Registro de aceleração do sismo de Moquegua 2001 após o ajuste espectral.

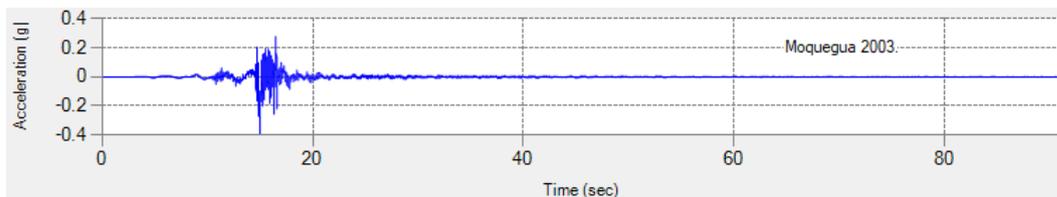


Figura 3.40 - Registro de aceleração do sismo de Moquegua 2003 após o ajuste espectral.

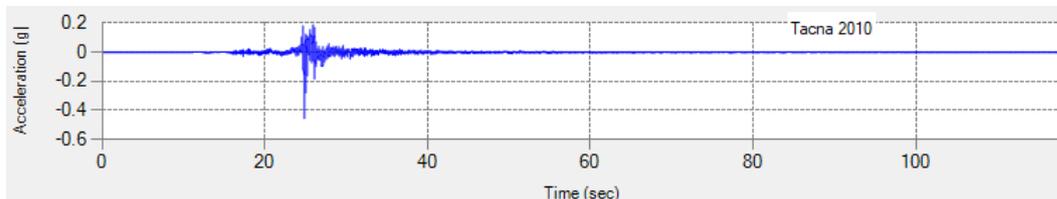


Figura 3.41 - Registro de aceleração do sismo de Tacna 2010 após o ajuste espectral.

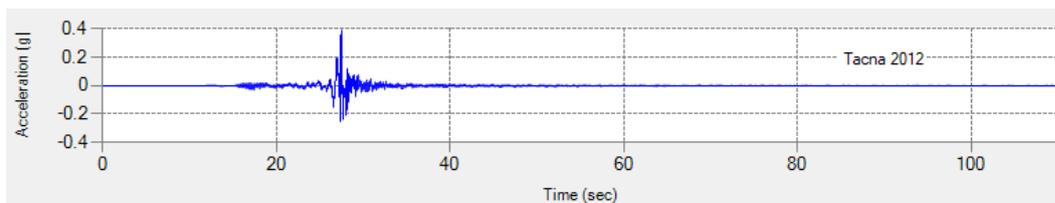


Figura 3.42 - Registro de aceleração do sismo de Tacna 2012 após o ajuste espectral.

3.4. Análises da resposta sísmica

3.4.1. Amplificação sísmica

A modificação do sinal sísmico devido à influência das condições geológicas e topográficas durante um terremoto é chamada de amplificação sísmica (*site effects* na terminologia de língua inglesa) e consiste na amplificação do sinal e na variação do seu conteúdo de frequências (Bard, 1999).

Durante um movimento sísmico, as camadas de solo atuam como filtros de frequência, de tal forma que modificam a energia que transmitem à estrutura que suportam. Observou-se que os depósitos de solo amplificam o movimento ou sinal de entrada quando as frequências predominantes são baixas (períodos altos), enquanto os solos rígidos o fazem com sinais cujas frequências predominantes são altas (períodos baixos) (Seed & Idriss, 1970).

Por outro lado, se o solo de fundação é mole, ocorre o fenômeno chamado de interação solo-estrutura, que consiste na flexibilidade do solo influenciando o movimento da estrutura e a estrutura influenciando o movimento do solo (Wolf, 2005).

Da mesma forma, podem ocorrer outros fenômenos que alteram a resposta da estrutura, como rupturas do solo, deslizamentos de terra ou liquefação dinâmica. Esses fenômenos são conhecidos como efeitos induzidos e causam a perda da capacidade de carga do solo ou são uma causa direta de danos estruturais (Youd & Idriss, 2001).

Por estas razões, a identificação das frequências predominantes do solo e a quantificação da amplificação do sinal sísmico constituem aspectos de grande interesse na engenharia sísmica (Kaklamanos, 2014).

3.4.2. Análise de resposta unidimensional do terreno

A análise da resposta unidimensional é baseada na suposição de que a superfície do terreno e todas as interfaces entre camadas de solo são horizontais e que a resposta de um depósito de solo é causada predominantemente por ondas cisalhantes SH que se propagam verticalmente nos estratos superficiais de solo (Figura 3.43). A superfície do embasamento rochoso também é admitida estender-se infinitamente na direção horizontal (Kramer, 1996).

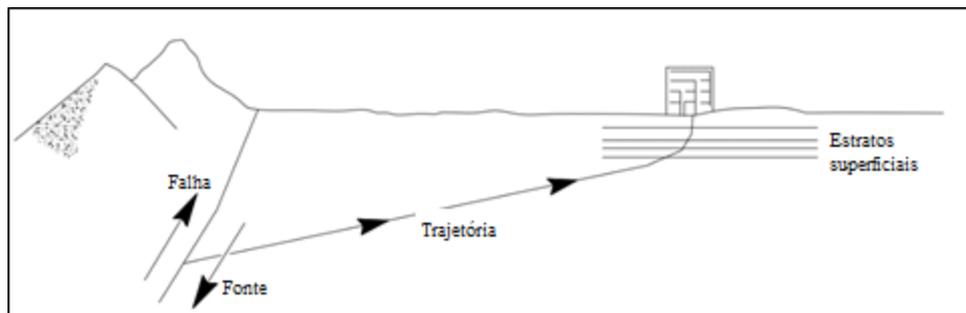


Figura 3.43 - Processo de refração que produz propagação de ondas quase vertical perto da superfície do solo. (Kramer, 1996).

A Figura 3.43 ilustra as definições usadas para descrever os movimentos do solo. O movimento na superfície de um depósito de solo é conhecido como "movimento de superfície livre" e o movimento no embasamento rochoso é chamado de "movimento na rocha de base". O movimento em um local onde a rocha de base é exposta na superfície do solo é chamado de "movimento de afloramento rochoso" (Kramer, 1996).

Se o depósito de solo não estivesse presente (Figura 3.44b), o movimento na rocha de base também seria um "movimento de afloramento rochoso".

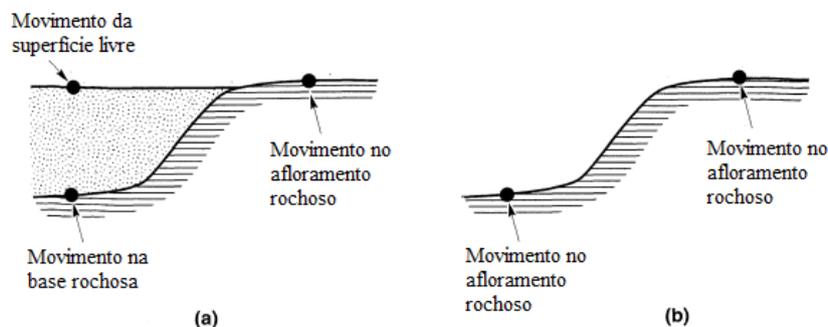


Figura 3.44 - Nomenclatura da resposta do solo. a) solo sobrejacente à rocha; b) nenhum solo sobrejacente à rocha. A escala vertical é exagerada. (Kramer, 1996).

3.4.2.1. Método Linear

Um conjunto de técnicas de análise de resposta do solo baseia-se no uso de "funções de transferência", que determinam para cada frequência como o movimento da rocha de base é amplificado ou desamplificado devido à presença do depósito de solo. Para o problema de resposta do solo, as funções de transferência podem ser usadas para expressar vários parâmetros de resposta, como deslocamento, velocidade, aceleração, tensão de cisalhamento em função de um parâmetro de movimento de entrada, como aceleração da rocha. Uma vez que tipo de análise é baseado no princípio da superposição, esta abordagem limita-se à análise de sistemas lineares. No entanto, o comportamento não linear pode ser aproximado usando um procedimento iterativo com propriedades lineares equivalentes do solo (Idriss, 1970).

Embora as funções de transferência possam ser intrinsecamente complexas devido ao envolvimento de números complexos, uma aproximação linear pode ser utilizada para simplificar o processo de cálculo, tornando-o mais direto e fácil de implementar. O histórico de tempo do movimento de entrada no embasamento rochoso é representado como uma série de Fourier no domínio da frequência usando o algoritmo Fast Fourier Transform (Bracewell, 1999).

No processo de análise da resposta do solo a um terremoto, utilizamos a série de Fourier para representar o movimento de entrada registrado no embasamento rochoso. Essa série de Fourier descreve o movimento como uma combinação de várias componentes de frequência, representando as diferentes oscilações presentes no sinal sísmico (Kramer, 1996).

A função de transferência, por sua vez, descreve como o solo reage às diferentes frequências de entrada. Ela representa as características do solo que afetam a propagação das ondas sísmicas e determina como o movimento do embasamento rochoso é modificado ao se propagar para a superfície do solo (Kramer, 1996).

Assim, para determinar o movimento da superfície do solo, cada termo na série de Fourier do movimento de entrada é multiplicado pela respectiva função de transferência. Esse processo nos permite entender como as diferentes frequências do movimento de entrada são amplificadas ou atenuadas à medida

que se propagam através do solo até a superfície, contribuindo para a compreensão da resposta sísmica do solo em diferentes condições geotécnicas (Kramer, 1996).

3.4.2.2. Método linear equivalente

Como solos são materiais com comportamento tensão vs. deformação não linear, o método linear deve ser modificado para fornecer estimativas da resposta do solo em problemas práticos. O comportamento real tensão-deformação não linear do solo excitado ciclicamente pode ser aproximado por propriedades lineares equivalentes dependentes: o módulo de cisalhamento G e a razão de amortecimento histerético ξ , que assumem valores consistentes com o nível de deformação cisalhante cíclica induzido em cada estrato de solo (Vucetic & Dobry, 1991). As curvas de degradação do módulo de cisalhamento e de aumento do amortecimento foram obtidas por diversos pesquisadores para vários tipos de solo em ensaios de laboratório como exemplo temos Vucetic, Dobry, H. B. Seed e I. M. Idriss. O histórico de deformação cisalhante para um terremoto é bastante irregular, com amplitudes de pico que poucas vezes são alcançadas no registro completo. A Figura 3.45 compara as tensões de cisalhamento geradas por um carregamento harmônico (ensaio de laboratório) e transiente (terremoto) que apresentam o mesmo valor de pico. Como a excitação harmônica representa claramente uma condição de carregamento mais severa, o nível de deformação induzido pelo terremoto é caracterizado em termos de uma “deformação de cisalhamento efetiva”, equivalente a 65% da deformação de pico (Kramer, 1996).

Como o nível de deformação calculado depende dos valores das propriedades lineares equivalentes, é necessário um procedimento iterativo para garantir que as propriedades utilizadas na análise sejam compatíveis com os níveis de deformação calculados em todos os estratos (Vucetic & Dobry, 1991).

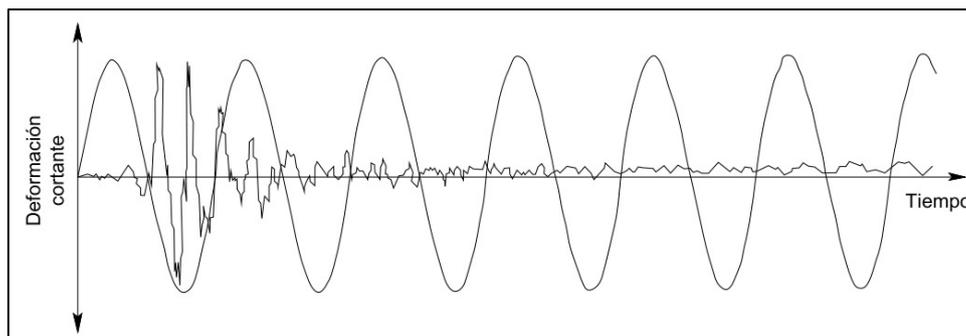


Figura 3.45 – Histórico de dois registros de deformação de cisalhamento com deformações de cisalhamento de pico idênticas. Para o movimento de um terremoto real, a deformação de cisalhamento efetiva é comumente considerada como 65% da deformação cisalhante de pico (Kramer, 1996).

Para determinar as acelerações horizontais de pico na superfície do solo, nesta dissertação as análises foram feitas utilizando o Software DEEPSOIL V7 (Hashash et al., 2016) simulando o comportamento do solo pelo modelo Kodner Zelasko Modificado (MKZ) dependente da tensão de confinamento (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Aceleração horizontal de pico na superfície do solo considerando os 11 sismos da pesquisa.

Sismo	Acelerações na superfície do solo (g)			
	A-01	A-02	Masw-10	Masw-14
Ancash 1970	0,41	0,44	0,38	0,24
Arequipa 2001	0,72	0,47	0,55	0,42
Atico 2001	0,48	0,41	0,41	0,41
Cañete 2021	0,47	0,52	0,41	0,35
Cañete 2022	0,58	0,60	0,46	0,40
Lima 1966	0,66	0,62	0,48	0,24
Lima 1974	0,55	0,44	0,38	0,34
Moquegua 2001	0,50	0,42	0,46	0,41
Moquegua 2003	0,66	0,62	0,44	0,32
Tacna 2010	0,82	0,68	0,56	0,41
Tacna 2012	0,82	0,60	0,58	0,30

Dos quatro perfis de solos arenosos, para o perfil A-01 foi determinada uma velocidade média de onda S nos primeiros 30 m de profundidade ($V_{s_{30}}$) de 326 m/s e para o perfil Masw-14 de 311 m/s. De acordo com a norma International Building Code (IBC, 2012) os dois perfis são classificados como terreno tipo D (solo rígido). A velocidade $V_{s_{30}}$ no perfil A-2 foi 425 m/s, no perfil Masw-10 foi 619 m/s, com ambos os perfis classificados como tipo C (solo muito denso / rocha branda).

4

Procedimentos simplificados para a avaliação de recalques e medidas de mitigação

À medida que a população mundial aumenta, as atividades humanas e os desenvolvimentos urbanos se movem em direção às áreas interiores e desérticas onde existem depósitos arenosos fofos e águas subterrâneas profundas (Yi, 2010), como a área do presente estudo. Esses depósitos de areia tendem a densificar quando submetidos a movimentos sísmicos. Em um terremoto, a estrutura equilibrada do esqueleto de areia é perturbada por tensões de cisalhamento cíclicas e as partículas de areia tendem a se mover para uma posição mais estável. O rearranjo dos grãos leva a uma densificação dos depósitos de areia seca, causando recalques da superfície do terreno.

Na literatura, são poucos os casos relatados, provavelmente devido à falta de atividades humanas nessas áreas. De acordo com Steward et al. (2002), a referência mais antiga disponível deve-se a Lawson (1908), que observou rachaduras no solo, em áreas de encostas, causadas pelo terremoto de 1906 em San Francisco. Após o terremoto de San Fernando em 1971, foi constatada a ocorrência de recalques entre 10 a 60 cm em aterros insaturados (Fukuoka, 1971). Após o terremoto de Northridge, em 1994, recalques sismicamente induzidos também foram observados em aterros (Steward et al. 2001) que, segundo aqueles pesquisadores, “embora essa deformação normalmente não danificou estruturas a ponto de ameaçar a segurança de vidas, as perdas econômicas foram grandes”.

Como mencionado na introdução deste trabalho, o objetivo principal desta dissertação é comparar os métodos de procedimentos simplificados para estimativa de recalques por densificação de solos arenosos secos com soluções avançadas obtidas por métodos computacionais. Silver & Seed (1971) mostraram que o recalque de areias secas devido ao carregamento cíclico é uma função de: (1) da densidade relativa do solo; (2) da magnitude da deformação de cisalhamento cíclico; e (3) do número de ciclos de deformação. Por esta razão, os procedimentos simplificados seguem as seguintes etapas gerais de cálculo:

1) Estimativa da amplitude da deformação de cisalhamento das camadas de solo a partir da determinação da aceleração horizontal de pico na superfície do solo e de outros parâmetros sismológicos locais. A aceleração de pico foi calculada por meio do software DEEPSOIL 6.1 (Hashash et al, 2016), no domínio da frequência, empregando o método linear equivalente.

2) Estimativa de deformações volumétricas das camadas do solo com base a amplitude da deformação de cisalhamento e do número equivalente de ciclos de deformação uniforme.

3) Integração das deformações volumétricas ao longo da profundidade das camadas do solo para estimar o recalque total na superfície.

4.1. Procedimentos simplificados

Nesta dissertação foram considerados 4 procedimentos simplificados propostos por Tokimatsu & Seed (1987), Pradel (1998), Stewart & Whang (2003) e Yi (2010).

4.1.1. Método simplificado de Tokimatsu & Seed (1987)

4.1.1.1. Deformação de cisalhamento desenvolvida no solo durante terremotos

O principal fator que controla os recalques em areias secas é a deformação de cisalhamento cíclica induzida no solo em várias profundidades. De acordo com a lei de Hooke, a tensão de cisalhamento (τ) é calculada como o produto do módulo de cisalhamento (G) e a deformação de cisalhamento (γ) para um material elástico linear. O solo geralmente se comporta como um material não linear sob carregamento sísmico. Utilizando uma relação não linear entre a razão do módulo de cisalhamento ($\frac{G}{G_{max}}$) e a deformação de cisalhamento, então a deformação de cisalhamento cíclica induzida pode ser determinada pela eq. (4.1):

$$\gamma_{eff} = \frac{\tau_{av}}{G_{eff}} = \frac{\tau_{av}}{G_{max}(\frac{G_{eff}}{G_{max}})} \quad (4.1)$$

Onde G_{max} é o módulo de cisalhamento máximo sob baixo nível de deformação, G_{eff} é o módulo de cisalhamento efetivo em nível de deformação induzida e τ_{av} é a tensão de cisalhamento cíclica média na profundidade correspondente.

Seed & Idriss (1971) apresentaram a eq. (4.2) para calcular τ_{av} :

$$\tau_{av} = \frac{0.65a_{max}\cdot\sigma_0\cdot r_d}{g} \quad (4.2)$$

Onde:

σ_0 : tensão de sobrecarga total na profundidade h;

r_d : fator de redução de tensão;

a_{max} : aceleração máxima na superfície do solo.

Substituindo a eq. (4.2) na eq. (4.1) e reorganizando os termos leva a:

$$Y_{eff}\left(\frac{G_{eff}}{G_{max}}\right) = \frac{0.65a_{max}\cdot\sigma_0\cdot r_d}{g\cdot G_{max}} \quad (4.3)$$

O lado direito da eq. (4.3) pode ser avaliado para qualquer profundidade considerando que G_{max} pode ser determinado a partir da eq. (4.4):

$$G_{max} = \rho \cdot v_s^2 \quad (4.4)$$

Onde ρ é a massa específica do solo e v_s é a velocidade da onda de cisalhamento.

Tendo determinado o produto $Y_{eff}\left(\frac{G_{eff}}{G_{max}}\right)$ então o valor de Y_{eff} pode ser determinado da Figura 4.1.

4.1.1.2. Deformação volumétrica

Silver & Seed (1971) apresentaram relações entre deformação volumétrica e deformação de cisalhamento para areias sob diferentes densidades relativas após 15 ciclos de carregamento harmônico. Tokimatsu & Seed (1987) combinaram essas relações rerepresentando-as para areias com diferentes valores do número de golpes N dos ensaios SPT como mostrado na Fig. 4.2.

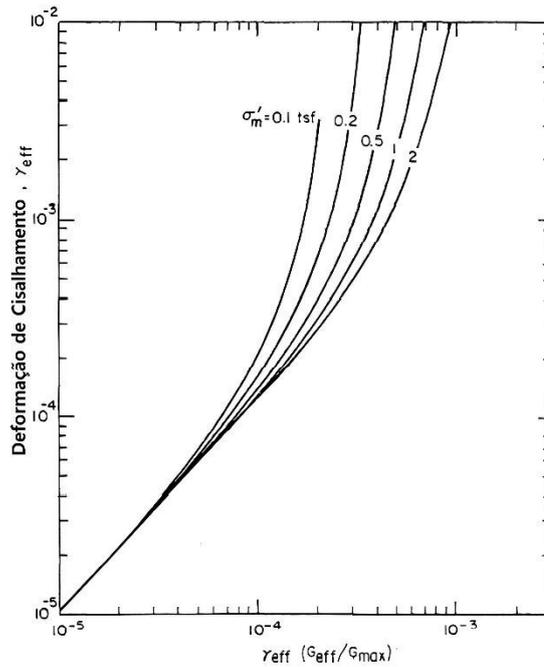


Figura 4.1 - Gráficos para determinação de deformação induzida em areia seca (Tokimatsu & Seed, 1987).

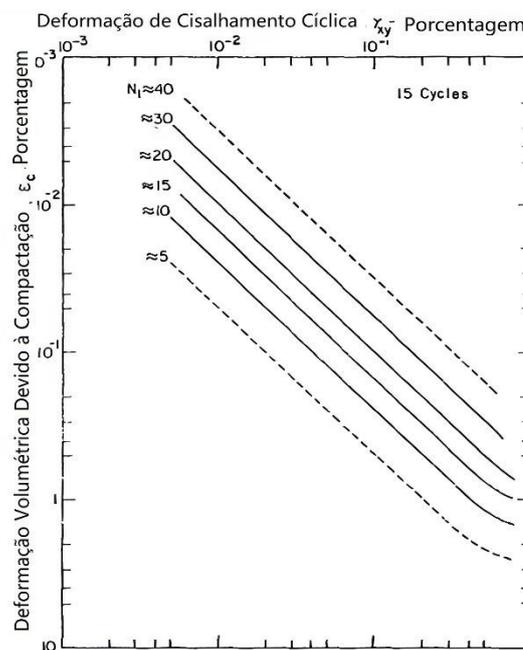


Figura 4.2 - Relações entre deformação volumétrica e deformação cisalhante e resistência à penetração para areias secas. (Tokimatsu & Seed, 1987).

Os gráficos são aplicáveis apenas para casos envolvendo 15 ciclos de deformação uniforme equivalentes que são tipicamente representativos de um terremoto de magnitude 7,5. No entanto, os resultados podem ser estendidos para eventos de diferentes magnitudes.

A razão entre a deformação volumétrica $\epsilon_{C,N}$ para determinada magnitude de terremoto e a deformação volumétrica $\epsilon_{C,N=15}$ para terremoto com magnitude 7,5 (número de ciclos igual a 15) pode ser estimada da Figura 4.3, com valores listados na terceira coluna da Tabela 4.1. Multiplicando a deformação volumétrica determinada na Figura 4.2 pelo fator de correção de magnitude da coluna 3, é possível obter a deformação volumétrica cíclica para diferentes magnitudes de terremoto.

Deve-se notar as relações da Figura 4.3 foram obtidas de ensaios de cisalhamento simples unidirecionais, enquanto sob condições reais de carregamento sísmico, os solos são submetidos a excitações multidirecionais. Ensaio de cisalhamento multidirecional feitos por Pyke et al. (1975) levaram à conclusão de que "os recalques causados por movimentos horizontais combinados são aproximadamente iguais à soma dos recalques causados pelas componentes agindo isoladamente". Isso significa que a deformação volumétrica estimada na Figura 4.2 deve ser dobrada para levar em consideração os efeitos de excitação multidirecional de acordo com a eq. (4.5):

$$\epsilon_{vc,M} = K_{vc,M} \cdot [2\epsilon_{vc1,M=7,5}] \quad (4.5)$$

Onde $K_{vc,M}$ é o fator de correção da magnitude do terremoto.

4.1.2. Método simplificado de Pradel (1998)

O método simplificado de Pradel (1998) consiste em um conjunto de equações que podem ser usadas para prever diretamente o recalque de uma camada de areia submetida a carregamento sísmico. Este método analítico é baseado no procedimento de Tokimatsu e Seed (1987), mas não requer a execução de iterações ou uso de gráficos ou tabelas. Uma das principais vantagens é que o método pode ser implementado numericamente e permite a análise rápida de perfis complicados, sendo particularmente útil para análises de sensibilidade e análise de perfis com várias camadas.

Tabela 4.1- Influência da magnitude do terremoto na deformação volumétrica de areias secas (Tokimatsu & Seed, 1987).

Magnitude do terremoto	Número de ciclos representativos em $0,65 \tau_{max}$	Razão entre Deformações Volumétricas $\epsilon_{C,N} / \epsilon_{C,N=15}$
------------------------	---	---

8,5	26	1,25
7,5	15	1
6,75	10	0,85
6	5	0,6
5,25	2-3	0,4

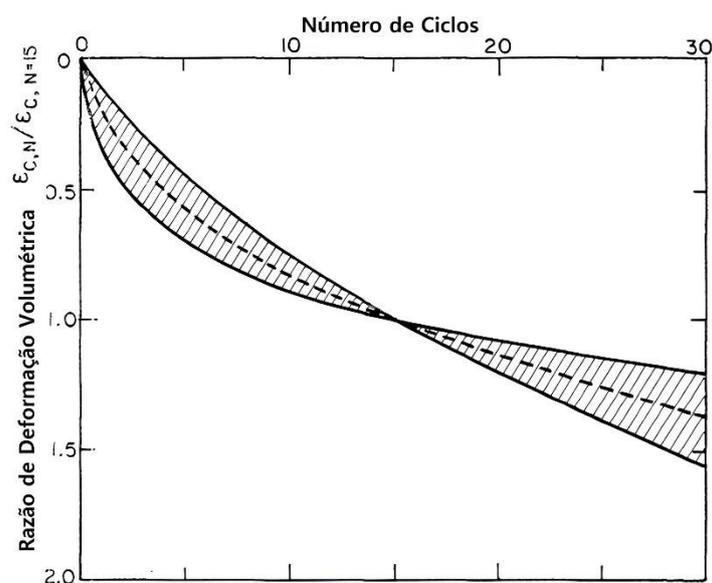


Figura 4.3 - Razão de deformação volumétrica e número de ciclos para areias secas (Tokimatsu & Seed, 1987).

4.1.2.1. Determinação da tensão de cisalhamento cíclica

As deformações cíclicas induzidas no solo dependem da tensão de cisalhamento cíclica média, τ_{av} , na profundidade z . Pradel (1998) usou a eq. 4.2 para o cálculo da tensão de cisalhamento cíclica, conforme eq. (4.6):

$$\tau_{av} = 0,65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \rho \cdot z \cdot \frac{1}{1 + (\frac{z}{z_0})^2} \quad (4.6)$$

Onde ρ é a massa específica do solo, z é a profundidade do ponto da camada do solo e z_0 é uma constante igual a 30,5 m (100 pés).

4.1.2.2.

Determinação da deformação de cisalhamento cíclica

A deformação de cisalhamento cíclica, γ , induzida no solo pode então ser determinada a partir da eq. (4.1). A aplicação desta equação requer conhecimento do módulo de cisalhamento máximo, G_{max} , e da relação G/G_{max} que é uma função da deformação de cisalhamento cíclica γ . Com base na relação de degradação do módulo de cisalhamento em função da deformação cisalhante obtida experimentalmente para areias secas por Iwasaki et al. (1978), Pradel (1998) sugeriu que a deformação cisalhante γ pode ser aproximadamente obtida por:

$$\gamma = \left[\frac{1+a \cdot e^{\frac{b \cdot \tau_{av}}{G_{max}}}}{1+a} \right] \frac{\tau_{av}}{G_{max}} \quad (4.7)$$

$$a = 0,0389 \cdot \left(\frac{p}{p_0} \right) + 0,124 \quad (4.7a)$$

$$b = 6400 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{-0,6} \quad (4.7b)$$

Onde p é a tensão total média na profundidade z e p_0 representa a pressão atmosférica (100 kPa).

4.1.2.3.

Determinação da deformação volumétrica

A partir dos resultados de Silver & Seed (1971) e de Tokimatsu & Seed (1987), a estimativa da deformação volumétrica foi proposta por Pradel (1998) conforme eq. (4.8) para sismo com magnitude 7,5 (número de ciclos uniforme igual a 15):

$$\epsilon_{15} = \gamma \cdot \left(\frac{N_1}{20} \right)^{-1,2} \quad (4.8)$$

A relação entre o número de ciclos N_c e a magnitude do terremoto M , obtida por Tokimatsu & Seed (1987), foi analiticamente aproximada pela eq. (4.9), mostrada na Figura 4.4:

$$N_c = (M - 4)^{2,17} \quad (4.9)$$

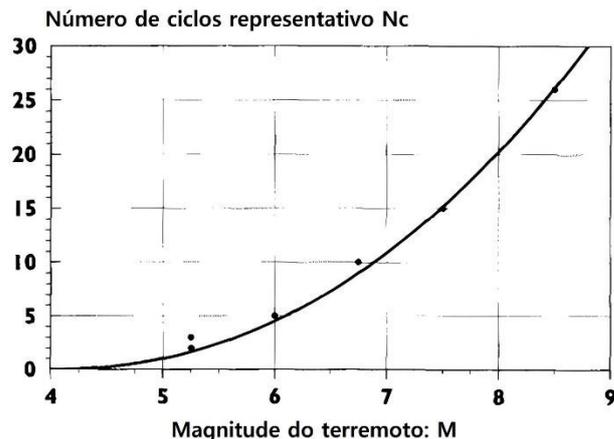


Figura 4.4 - Relação analítica entre número equivalente de ciclos e magnitude do terremoto, comparada com dados experimentais de Tokimatsu & Seed (1987) (Pradel, 1998).

Silver & Seed (1971) já haviam proposto que a deformação volumétrica para um número de ciclos variável pode ser normalizada em relação à deformação volumétrica para um número de ciclos igual a 15. Pradel (1998) resumiu analiticamente esta relação pela eq. (4.10):

$$\epsilon_{Nc} = \epsilon_{15} \cdot \left(\frac{Nc}{15}\right)^{0,45} \quad (4.10)$$

Novamente, as previsões pelo método simplificado de Pradel (1998) foram determinadas com base em ensaios de cisalhamento simples unidirecionais. De acordo com a recomendação de Pyke et al. (1975), para carregamentos cíclicos multidirecionais as deformações volumétricas (e, portanto, o recalque ΔS) podem ser dobradas de acordo com a eq. (4.11):

$$\Delta S = 2 \cdot \Delta h \cdot \epsilon_{Nc} \quad (4.11)$$

Onde Δh representa a espessura da camada de solo.

4.1.3. Método simplificado de Yi (2010)

O método de Yi (2010) é um procedimento mais detalhado, incluindo cálculos de tensão de cisalhamento cíclica, deformação de cisalhamento, deformação volumétrica e recalque. Atenção especial foi dada à discussão da relação entre densidade relativa e velocidade da onda de cisalhamento. O procedimento apresentado por Yi (2010) tem como base a metodologia originalmente proposta por Seed & Silver (1972) e posteriormente modificada por Tokimatsu & Seed (1987) e Pradel (1998).

4.1.3.1. Tensão de Cisalhamento Cíclica

Yi (2010) usa para o cálculo da tensão de cisalhamento cíclica a eq. (4.2) proposta por Seed & Idriss (1971).

$$\tau_{av} = \frac{0.65 \cdot a_{max} \cdot \sigma_{v0} \cdot r_d}{g} \quad (4.2)$$

Para calcular o coeficiente de redução de tensão cisalhante r_d devido à deformabilidade do solo, foi utilizada a relação sugerida por Idriss (1999), conforme eq. (4.12):

$$r_d = \exp [\alpha(z) + \beta(z) \cdot M] \quad (4.12)$$

$$\alpha(z) = -1,012 - 1,126 \sin \left(\frac{z}{11,73} + 5,133 \right) \quad (4.12a)$$

$$\beta(z) = 0,106 + 0,118 \sin \left(\frac{z}{11,28} + 5,142 \right) \quad (4.12b)$$

Onde z é a profundidade do ponto (m) e M é magnitude do terremoto.

4.1.3.2. Avaliação da deformação de cisalhamento cíclica

Yi (2010) utilizou para estimativa da deformação de cisalhamento cíclica a eq. (4.7) proposta por Pradel (1998).

4.1.3.3. Avaliação da Deformação Volumétrica Cíclica

Com base nas equações desenvolvidas por Terzaghi & Peck (1967), Idriss & Boulanger (2008), Tokimatsu & Seed (1987) e Andrus et al. (2004), Yi (2010) sugeriu a eq. (4.13) que relaciona a densidade relativa D_R com a velocidade de cisalhamento corrigida da onda de cisalhamento V_{s1} .

$$D_R = 17,974 [(V_{s1})_{cs} / 100]^{1,976} \quad (\%) \quad (4.13)$$

Onde o subscrito cs é a abreviação de areia limpa (*clean sand* para solos com 5% ou menos de finos) e $(V_{s1})_{cs}$ é a velocidade da onda de cisalhamento corrigida pela tensão vertical efetiva:

$$(V_{s1})_{cs} = K_{cs} \cdot V_{s1} = K_{cs} \cdot V_s (p_d / \sigma_{v0}')^{0,25} \quad (4.14)$$

Onde K_{CS} é um fator de correção do teor de finos (FC).

Juang et al. (2002) sugeriram as seguintes relações para estimativa de K_{CS} com base no teor de finos FC e V_{s1} :

$$K_{CS} = 1 \quad \text{para } FC \leq 5\% \quad (4.14a)$$

$$K_{CS} = 1 + T(FC - 5) \quad \text{para } 5\% < FC < 35\% \quad (4.14b)$$

$$K_{CS} = 1 + 30T \quad \text{para } FC \geq 35\% \quad (4.14c)$$

$$T = 0,009 - 0,0109(V_{s1}/100) + 0,0038(V_{s1}/100)^2 \quad (4.15)$$

4.1.3.4.

Relação entre deformação volumétrica e deformação de cisalhamento

Yi (2010) utilizou as seguintes equações relacionando a deformação volumétrica com deformação cisalhante em areia limpa e seca:

$$\epsilon_{vc1,M=7.5} = 0,329(D_R/100)^{-2,68} \cdot \gamma \quad (4.16)$$

$$\epsilon_{vc1,M=7.5} = 32,715[(v_{s1})_{CS}/100]^{-5,296} \cdot \gamma \quad (4.17)$$

Onde $\epsilon_{vc1,M=7.5}$ representa a deformação volumétrica obtida por excitação cíclica unidirecional com intensidade equivalente a um terremoto com magnitude de momento de 7,5.

Yi (2010) também apresentou graficamente a relação entre deformação volumétrica, deformação de cisalhamento e velocidade de onda de cisalhamento corrigida na Figura 4.5.

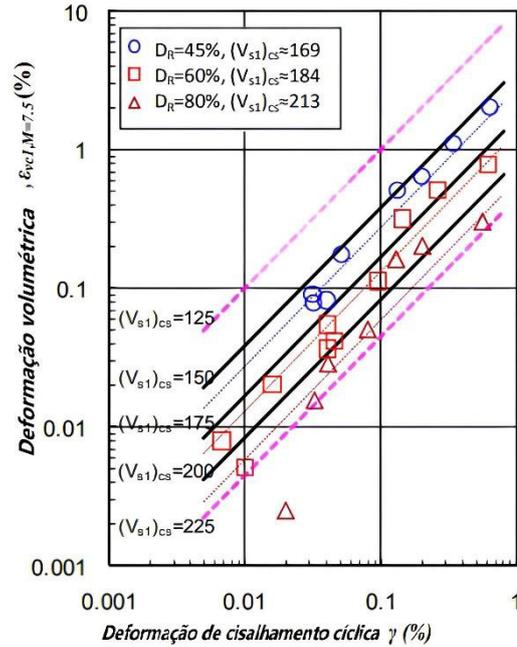


Figura 4.5 - Relação entre deformação volumétrica, deformação de cisalhamento e velocidade de onda de cisalhamento corrigida para areia limpa e seca (Yi, 2010).

4.1.3.5.

Relação entre deformação volumétrica e deformação de cisalhamento

Para as correções devido à natureza multidirecional da excitação sísmica foi novamente considerada a proposta de Pyke et al. (1975) na eq. (4.18), onde $K_{vc,M}$ é o fator de correção da magnitude do terremoto.

$$K_{vc,M} = \epsilon_{vc,M=7.5} / \epsilon_{vc,M=7.5} = 0,26M - 0,96 \quad (4.18)$$

4.1.3.6.

Cálculo do recalque

De modo semelhante ao cálculo de recalques induzidos por liquefação, o recalque por densificação do solo arenoso pode ser avaliado, em um contexto 1D aproximado, igualando a deformação vertical à deformação volumétrica e, em seguida, integrando as deformações verticais ao longo da profundidade:

$$S_{v,1D} = \int_0^{z_{max}} \epsilon_{vc,M} dz \quad (4.19)$$

4.1.4. Método simplificado de Stewart & Whang (2003)

Stewart & Whang (2003) atualizaram o procedimento de Tokimatsu e Seed (1987), estritamente aplicável apenas para areias limpas, estendendo-o para análise de recalques em areias siltosas não plásticas e argilas de baixa plasticidade.

4.1.4.1. Fator de redução da tensão de cisalhamento (r_d)

Stewart e Whang (2003) propuseram uma função de redução de tensão r_d com a profundidade z , eq. (4.20) e eq. (4.21), dependente da magnitude do sismo (M), da aceleração horizontal máxima na superfície PGA e da velocidade média de propagação da onda S nos 12 m superiores (V_{S-12}) em m/s:

$$z < 20 \text{ m: } r_d = \frac{[1+a_1/a_2(z)]}{[1+a_1/a_3]} \quad (4.20)$$

$$z > 20 \text{ m: } r_d = \frac{[1+a_1/a_2(z=20)]}{[1+a_1/a_3]} - 0,0046(z - 20) \quad (4.21)$$

Onde:

$$a_1 = -23,013 - 2,949.PGA/g + 0,999M + 0,0053.V_{S-12} \quad (4.22)$$

$$a_2(z) = 16,258 - 0,201.e^{0,341(z+0,0785V_{S-12}+7,586)} \quad (4.23)$$

$$a_2(z = 20) \text{ é } a_2(z) \text{ com } z \text{ definido em } 20 \text{ m} \quad (4.24)$$

$$a_3(z) = 16,258 - 0,201.e^{0,341(0,0785V_{S-12}+7,586)} \quad (4.25)$$

4.1.4.2. Número equivalente de ciclos de tensão uniforme)

Stewart & Whang (2003) consideraram a correlação empírica obtida por Liu et al. (2001) para estimar o número equivalente de ciclos de tensão uniforme N em função da magnitude (M), da distância sítio-fonte (r), condição do terreno local ($S=0$ para rocha, $S=1$ para solo) e efeitos de direção de ruptura da falha.

$$\ln(N) = \ln \left[\frac{\left(e^{\left(\frac{(b_1+b_2(M-M^*))}{10^{1,5M+16,05}} \right)^{\frac{1}{3}}} \right)}{4,9.10^6 \beta} + Sc_1 + rc_2 \right] \quad (4.26)$$

Onde:

r está em km, $b_1 = 1,53$; $b_2 = 1,51$; $c_1 = 0,75$; $c_2 = 0,095$; $\beta = 3,2$ e $M^* = 5,8$.

Em comparação com os outros métodos que só depende apenas da magnitude do sismo. A Figura 4.6 mostra diferenças significativas no cálculo do número de ciclos em relação à proposta de Seed et al. (1975), somente dependente da magnitude, principalmente em grandes distâncias.

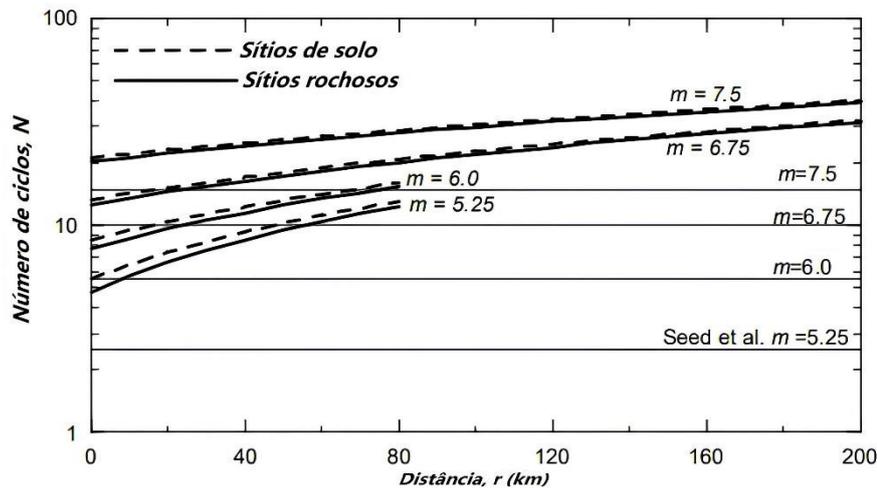


Figura 4.6 - Variação dos valores de N com distância e magnitude de acordo com Liu et al. (2001) para sítios em solo e rocha (Stewart & Whang, 2003).

4.1.4.3.

Variação da amplitude da deformação por cisalhamento

Para estimar a variação da amplitude da deformação por cisalhamento, Stewart & Whang (2003) aplicaram as eq. (4.3) e (4.7) considerando as curvas de redução do módulo de cisalhamento propostas por Iwasaki (1978) e Darendeli e Stokoe (2001) para obtenção das curvas apresentadas na Fig. 4.7.

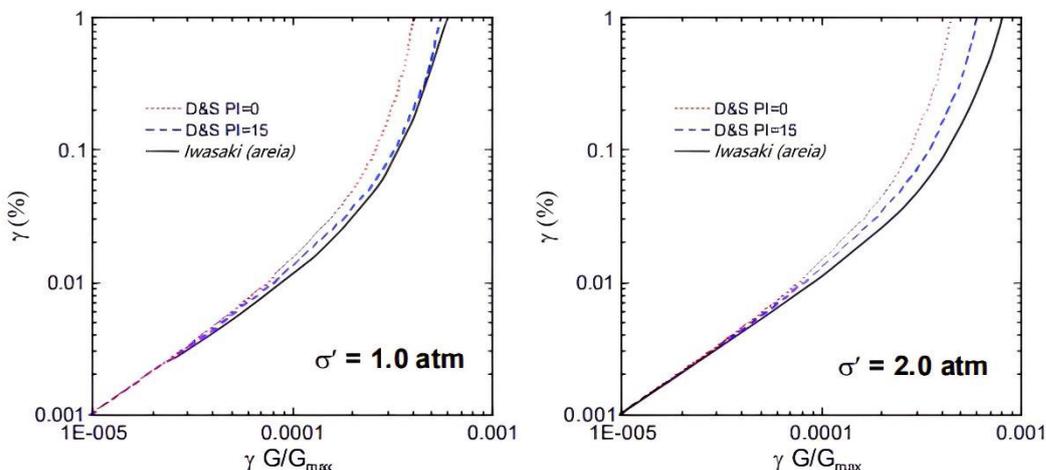


Figura 4.7 - Estimativa da amplitude da deformação de cisalhamento considerando as curvas de redução do módulo de cisalhamento propostas por Iwasaki (1978) e Darendeli & Stokoe (2001) mostrando os efeitos da tensão vertical efetiva e do índice de plasticidade do solo (Stewart & Whang, 2003).

As curvas da figura são analiticamente expressas pela eq. (4.27) onde R representa o produto calculado na eq. 4.3. No caso da redução do módulo de cisalhamento sugerida por Iwasaki (1978) trata-se da mesma eq. (4.7) adotada por Pradel (1998); no caso da redução do módulo de cisalhamento conforme Darendeli & Stokoe (2001) os valores de a, b dependem do índice de plasticidade, de acordo com a eq. (4.29) e eq. (4.30):

$$\gamma = \frac{1+a \cdot e^{bR}}{1+a} R * 100 \quad (4.27)$$

$$PI \approx 15; a = 0,194 \cdot \left(\frac{\sigma'}{p_a}\right)^{0,265} \quad b = 7490 \cdot (\sigma'/p_a)^{-0,418} \quad (4.28)$$

$$PI \approx 0; a = 0,199 \cdot \left(\frac{\sigma'}{p_a}\right)^{0,231} \quad b = 10850 \cdot (\sigma'/p_a)^{-0,410} \quad (4.29)$$

Onde a pressão atmosférica $p_a = 101,3$ kPa. Para outros valores de $0 \leq PI \leq 15$ interpolar entre as curvas determinadas pela eq. (4.28).

4.1.4.4. Estimativa das deformações volumétricas

Stewart & Whang (2003) utilizaram ensaios de cisalhamento simples para revisar as relações empíricas estabelecidas por Silver & Seed (1971) para areia limpa. A Figura 4.8 apresenta os resultados obtidos para areia limpa com densidade relativa $DR = 60\%$, considerando 16 corpos de prova com diferentes tamanhos e formas de grãos, comparados com os anteriormente determinados por Silver & Seed (1971).

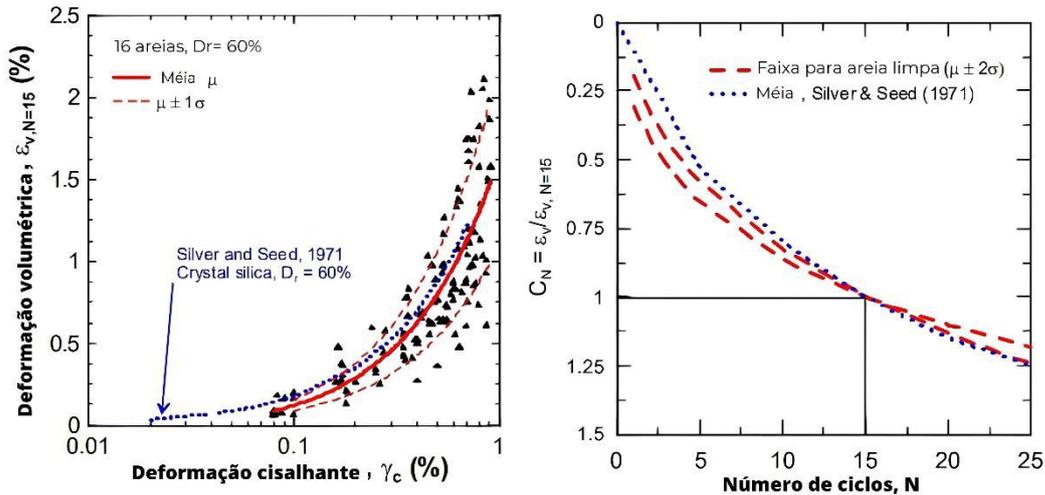


Figura 4.8 – Deformação volumétrica de areia limpa em ensaios de cisalhamento simples (Stewart & Whang, 2003).

No caso de solos com conteúdo de finos, Stewart & Whang (2003) utilizaram quatro amostras provenientes de dois locais anteriormente investigados por Stewart et al. (2002). Os resultados forneceram informações sobre os efeitos de finos, essencialmente não plásticos ($PI = 2$) e finos de baixa plasticidade ($PI = 15$), na deformação volumétrica. Os resultados são mostrados na Figura 4.9.

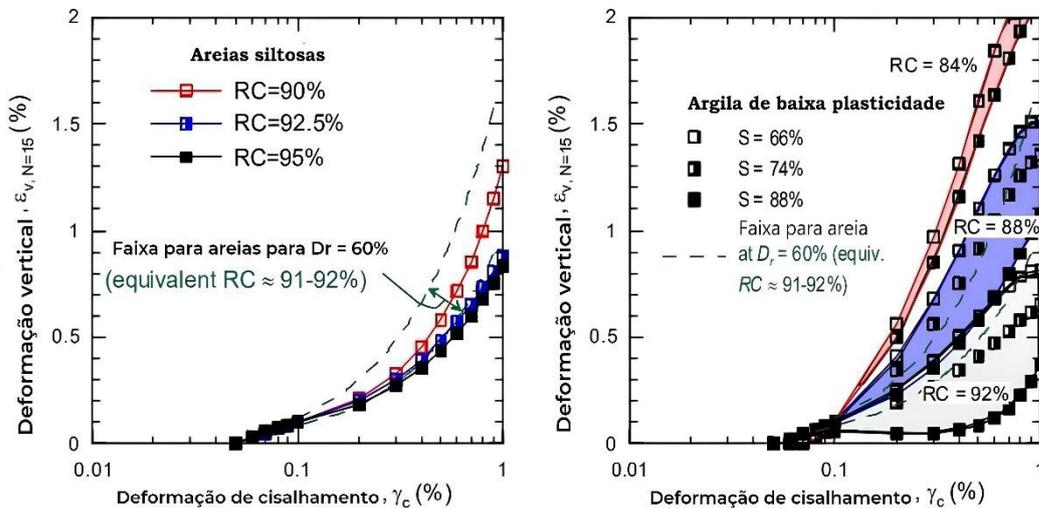


Figura 4.9 - Deformação volumétrica em ensaios de cisalhamento simples em areias siltosas e argilas de baixa plasticidade (Stewart & Whang, 2003).

4.2. Parâmetros utilizados na dissertação

Nesta dissertação as análises foram feitas com base nas velocidades de onda de cisalhamento nos perfis estudados. A seguir são apresentadas as

correlações adotadas para determinação da massa específica, número de golpes N e da densidade relativa.

i) Correlação de Anbazhagan et al. (2016) para o cálculo da massa específica.

$$\rho = 0,412 \cdot V_S^{0,262} \quad (4.30)$$

ii) Correlação de Seed et al. (1983) para o cálculo do número de golpes N .

$$V_S = 56,4N^{0,5} \quad (4.31)$$

iii) Correlação de Idriss & Boulanger (2008) para o cálculo da densidade relativa em função de $(N_1)_{60}$.

$$D_r = \sqrt{\frac{(N_1)_{60}}{46}} \quad (4.32)$$

4.3. Medidas de mitigação de recalque por densificação

Levantamentos geotécnicos permitem a identificação e análise de áreas, camadas ou depósitos de solo em condições adversas, permitindo a tomada de medidas de engenharia para mitigar a ocorrência de recalques por densificação de solos arenosos. Existem várias técnicas disponíveis, cuja escolha depende da aplicabilidade, eficácia, capacidade de verificação da mitigação alcançada, custos e outros aspectos como questões ambientais e jurídicas.

4.3.1. Escavação e/ou compactação

Envolve a compactação superficial, com solos colocados em camadas e compactados por vibração, com especificações que exigem não menos que 95% de compactação relativa com base na densidade seca máxima determinada em Ensaio de Compactação AASHTO Modificado (ASTM 1557D).

4.3.2. Densificação do terreno in situ

Seed et al (2003) recomendam que a aplicação de métodos de densificação in situ sejam associados a um programa de verificação pós-tratamento abrangente para garantir que foi alcançada uma mitigação adequada. O ensaio CPT é

particularmente útil por ser contínuo e de rápida execução. Seed et al (2003) afirmam que imediatamente após a densificação in-situ, apesar do aumento da densidade global dos solos, não é incomum descobrir que as resistências à penetração não aumentaram tanto quanto esperado e, em alguns casos, observaram que até diminuíram ligeiramente.

A vibrodensificação in-situ, ou compactação por meio de sondas vibratórias, tem sido empregada em profundidades de até 70 m. A dificuldade em penetrar através de solos densos, bem como de fornecer energia vibracional suficiente para alcançar a densificação adequada face a altas tensões in situ, pode limitar a eficácia deste método em grandes profundidades. A vibroflotação, cuja fonte vibracional está na ponta inferior da sonda vibratória (interior do solo), geralmente pode fornecer energia vibracional mais alta a profundidades maiores do que a maioria dos outros sistemas empregando sondas vibratórias.

4.3.3. Fundações profundas

Estacas podem fornecer suporte vertical confiável e reduzir ou eliminar o risco de recalques induzidos por terremotos. No entanto, não evitam danos que possam ocorrer como resultado de deslocamentos laterais, razão pela qual o emprego de estacas deve ser associado a elementos de conectividade estrutural lateral suficiente para resistir com segurança a deslocamentos laterais.

4.3.4. Fundações rasas reforçadas

Envolve o uso de fundações superficiais reforçadas e muito rígidas para resistir a deslocamentos laterais e verticais. A prática japonesa tem empregado cada vez mais vigas de nível e fundações reforçadas contínuas para estruturas de altura baixa a moderada, e o desempenho desses tipos de sistemas em terremotos tem considerado adequado.

A Tabela 4.2 apresenta um resumo de métodos para mitigação de recalques por densificação do solo.

Tabela 4.2 - Métodos para mitigação de recalques por densificação do solo (modificado de Seed et al, 2003).

Categoria geral	Métodos de mitigação	Notas
Escavação e/ou compactação	(a) Escavação e disposição dos solos (b) Escavação e recompactação. (c) Compactação (para novo aterro)	
Densificação do Terreno in situ	(a) Compactação com sondas vibratórias (exemplo: vibroflotação, terraprobe, etc.) (b) Consolidação dinâmica (compactação pesada) (c) Estacas de compactação (d) Densificação profunda por detonação (e) Rejunte de compactação	Pode ser acoplado à instalação de colunas de brita Também pode fornecer reforço
Outros tipos selecionados de tratamento de solo	(a) Rejuntamento de permeação (b) Jet grouting (c) Deep mixing (d) Surcharge pre-loading (e) Structural fills	
Bermas, diques, muros marítimos e outras estruturas/sistemas de contenção de borda	(a) Estruturas e/ou estruturas de terra construídas para fornecer contenção de bordas e, assim, evitar grandes espalhamentos laterais	
Fundações profundas	(a) Estacas (instaladas por cravação ou vibração) (b) Piers (instalados por perfuração ou escavação)	-Também pode fornecer densificação do solo
Fundações rasas reforçadas	(a) Grade beams (b) Tapete reforçado (c) Tapete reforçado e/ou pós-tensionado	

5 Aspectos da modelagem numérica

5.1. O modelo constitutivo PM4Sand

O modelo constitutivo PM4Sand versão 3.1 (Boulanger e Ziotopoulou, 2017) é um modelo evictlastoplástico para o comportamento cíclico de areias, desenvolvido por Boulanger & Ziotopoulou (2015), com base no modelo de superfície limite proposto por Dafalias & Manzari (2004).

O modelo é capaz de reproduzir as características essenciais observadas experimentalmente durante a liquefação dinâmica, ou seja, acúmulo de pressão de água nos poros, diminuição da tensão efetiva até atingir a liquefação e diminuição gradativa da rigidez do material. Também pode simular tanto o fluxo de liquefação quanto a mobilidade cíclica de areias densas.

Considerando que a disponibilidade de dados de testes laboratoriais para determinação dos parâmetros do modelo constitutivo PM4Sand é, na prática, muito limitada devido à dificuldade de utilização de corpos de prova indeformados, Boulanger & Ziotopoulou (2018) propõem que os parâmetros sejam estimados com base em testes de campo e correlações com o número de golpes (N) do teste SPT, a resistência de ponta (q_c) do teste CPT ou a velocidade de propagação da onda de cisalhamento V_s em testes de campo (down-hole, cross-hole, SCPT).

5.2. Características do modelo

5.2.1. Índice do estado relativo

O estado crítico é caracterizado pela contínua deformação do solo sob tensão e volume constantes (Schofield & Wroth, 1968). No entanto, em vez de empregar o índice de vazio crítico, o modelo adota a densidade relativa do estado crítico $D_{R,cs}$, conforme definido por Bolton (1986), para estabelecer a linha de estado crítico (CSL) no plano D_{R-p/p_A} . Além disso, o modelo PM4Sand utiliza o

índice de estado relativo ξ_R (Konrad, 1988), em substituição ao parâmetro de estado Ψ (Been & Jefferies, 1985), esse índice é o parâmetro de estado normalizado pela diferença entre os valores de índice de vazios máximo (e_{max}) e índice de vazios mínimo (e_{min}) que são usados para definir a densidade relativa (D_R). O parâmetro de estado relativo "índice" é apenas o parâmetro de estado relativo definido usando um relacionamento empírico para a linha de estado crítico. Boulanger (2003a) usou a relação de dilatância de Bolton (1986) para definir a linha de estado crítico empírico e assim chegou a Eq. 5.1:

$$\xi_R = D_{R,cs} - D_R \quad (5.1)$$

Onde D_R é a densidade relativa atual, $D_{R,cs}$ é a densidade relativa na linha de estado crítico para uma tensão efetiva média atual p , eq. 5.2:

$$D_{R,cs} = \frac{R}{Q - \ln\left(100 \frac{p}{p_A}\right)} \quad (5.2)$$

Onde: p_A representa a pressão atmosférica, enquanto Q e R são os parâmetros propostos por Bolton (Bolton, 1986), com valores de 10 e 1, respectivamente, para areia de quartzo. Na Figura 5.1, foi representada as linhas de estado crítico utilizando os valores padrão do modelo PM4Sand, $Q = 10$ e $R = 1,5$, juntamente com a variação da linha de estado crítico para diferentes valores de Q e R .

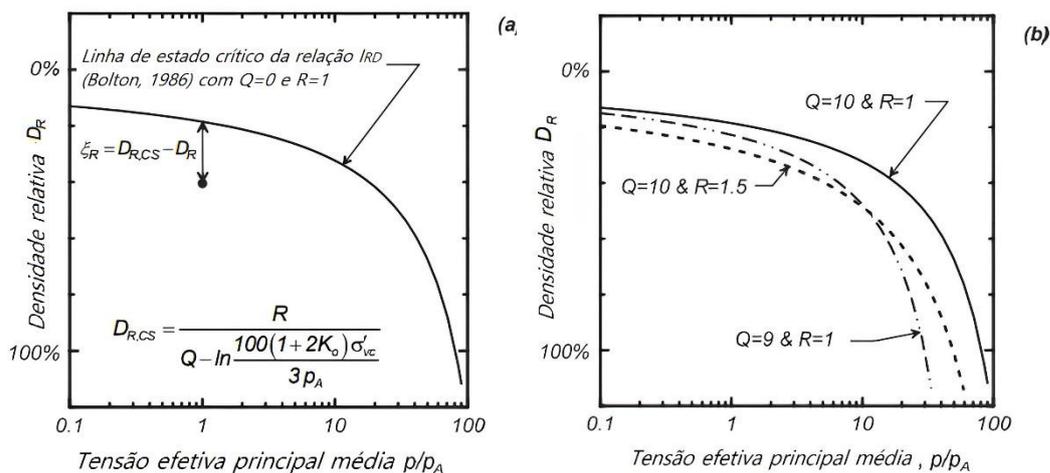


Figura 5.1 Definição do índice de parâmetro de estado relativo ξ_R (Boulanger 2003a) e os efeitos da variação de Q e R .

O parâmetro Q denota o nível normalizado da tensão efetiva média p , onde a linha de estado crítico inicia uma curvatura significativa devido ao esmagamento das

partículas sólidas (Parra, 2016). No modelo PM4Sand, um pequeno incremento em R (1,5) é empregado para uma melhor adaptação aos resultados típicos observados no teste de carregamento de cisalhamento simples direto, DSS (Boulangier & Ziotopoulou, 2018).

5.2.2. Superfícies limite, dilatância, crítica

O modelo incorpora as superfícies limite, dilatância e críticas, conforme proposto por Dafalias & Manzari (2004). Na versão atual, o modelo foi simplificado ao eliminar a dependência do ângulo Lode (por exemplo, os ângulos de atrito são os mesmos para carregamento em compressão ou extensão), de modo que as relações de delimitação (M^b) e de dilatação (M^d) podem estar relacionado à razão de tensão crítica (M) pelas seguintes expressões:

$$M^b = M \cdot \exp(-n^b \xi_R) \quad (5.3)$$

$$M^d = M \cdot \exp(n^d \xi_R) \quad (5.4)$$

$$M = 2 \sin(\varnothing_{cv}) \quad (5.5)$$

Os parâmetros n^b e n^d influenciam os valores de M^b e M^d em relação a M . A razão de tensão limite regula a relação entre o ângulo de atrito máximo e o índice de estado relativo. Durante o cisalhamento, as superfícies de contorno e de dilatação se aproximam da superfície crítica, enquanto o índice de estado relativo se aproxima da linha de estado crítico (ξ_R tende a zero).

A superfície limite modela deformações plásticas dentro do domínio de fluxo, enquanto a superfície de dilatação determina a transição do comportamento de contrativo para dilatante, conhecido como estado de transformação. Sob carregamento cíclico não drenado, a variação na tensão efetiva está relacionada à expansão volumétrica provocada pelo cisalhamento ou à tendência contrativa do solo (Wang & Xie, 2014).

5.2.3. Superfície de escoamento e tensores de razão de tensão posterior

A superfície de escoamento e o tensor da razão de tensão posterior (α) seguem aqueles do modelo Dafalias-Manzari, embora sua forma final seja consideravelmente simplificada pela suposição anterior de remoção de qualquer dependência do ângulo de Lode. A superfície de escoamento é um pequeno cone no espaço de tensão e é definida em termos de tensão pela seguinte expressão:

$$f = [(s - p\alpha): (s - p\alpha)]^{1/2} - \sqrt{\frac{1}{2}} m = 0 \quad (5.6)$$

O tensor de razão de tensão posterior α define o centro da superfície de escoamento, e o parâmetro m define o raio do cone em termos de razão de tensão. A função de escoamento pode ser reescrita para enfatizar o papel dos termos da razão de tensão como segue:

$$f = \sqrt{(\mathbf{r} - \alpha): (\mathbf{r} - \alpha)} - \sqrt{\frac{1}{2}} m = 0 \quad (5.7)$$

Onde:

$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{xy} & r_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sigma_{xx}-p}{p} & \frac{\sigma_{xy}}{p} \\ \frac{\sigma_{xy}}{p} & \frac{\sigma_{yy}-p}{p} \end{pmatrix} \quad (5.8)$$

$$p = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \quad (5.9)$$

O α define o centro da superfície de escoamento e m o raio do cone que representa a superfície de escoamento (valor padrão $m=0,01$).

As superfícies limite e de expansão são definidas em termos dos parâmetros α^b e α^d , eq. (5.10) e eq. (5.11).

$$\alpha^b = \sqrt{\frac{1}{2}} [M^b - m] \mathbf{n} \quad (5.10)$$

$$\alpha^d = \sqrt{\frac{1}{2}} [M^d - m] \mathbf{n} \quad (5.11)$$

Onde \mathbf{n} é o vetor unitário normal à superfície do escoamento, eq. (5.12).

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{r} - \alpha}{\sqrt{\frac{1}{2}} m} \quad (5.12)$$

A Figura 5.2 mostra as superfícies limite, de expansão, crítica e de escoamento.

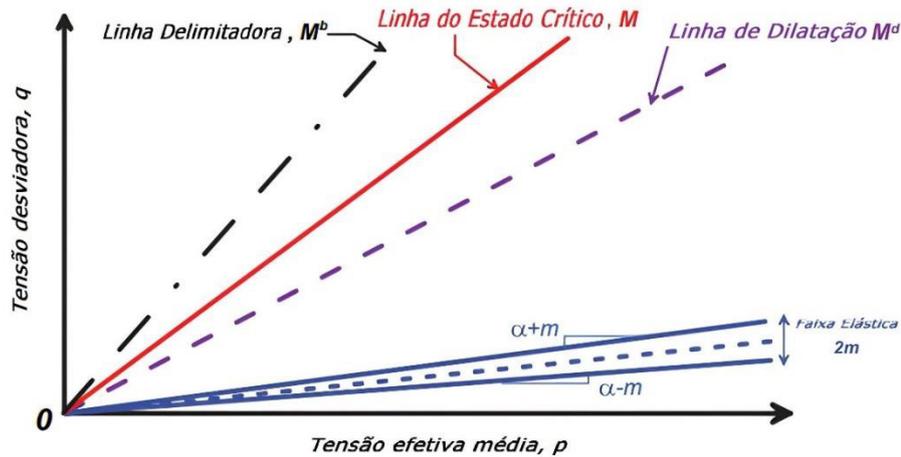


Figura 5.2 - Esquema das linhas de escoamento, crítica, dilatância, e delimitadora no espaço p-q. A localização relativa das linhas de dilatação e delimitadora corresponde a estados de tensão densos ou críticos (Boulanger & Ziotopoulou, 2018).

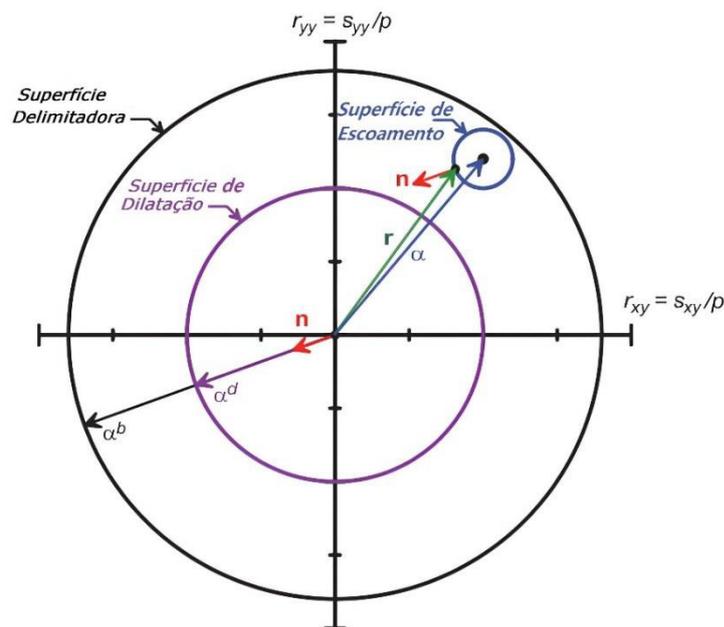


Figura 5.3 - Esquema das superfícies delimitadoras, de dilatação e de escoamento no plano de razão de tensão $r_{yy} - r_{xy}$, com a superfície de escoamento, tensor normal, razão de tensão de retroação de dilatação e razão de tensão de retroação delimitadora. As localizações relativas das superfícies diferem daquelas da Figura 5.2 (Boulanger & Ziotopoulou, 2018).

5.2.4. Efeitos da estrutura do solo

Durante o cisalhamento cíclico, ocorre um rearranjo e/ou destruição da estrutura do solo, acompanhado pela evolução do tensor de dilatância da estrutura z , representado por z , conforme aumenta dz , eq. (5.13). Este tensor considera a pré-deformação do modelo e foi incorporado para representar os efeitos das

mudanças na estrutura da areia durante a dilatação plástica induzida pela reversão da direção do carregamento cíclico.

$$dz = -\frac{c_z}{1 + \left(\frac{z_{cum}}{z_{max}} - 1\right)^D} \langle -d\varepsilon_v^p \rangle (z_{max} \mathbf{n} + \mathbf{z}) \quad (5.13)$$

Onde c_z controla a taxa de evolução e z_{max} representa o valor máximo.

O tensor de dilatância estrutural z evolui com as deformações plásticas devido à deflexão que ocorrem durante a expansão, quando:

$$(\alpha^d - \alpha) : \mathbf{n} < 0 \quad (5.14)$$

O valor cumulativo das variações absolutas do tensor z é definido por:

$$dz_{cum} = |dz| \quad (5.15)$$

A taxa de variação do tensor de dilatação da estrutura diminui à medida que os valores de z_{cum} aumentam, acumulando progressivamente deformações de cisalhamento durante o carregamento cíclico não drenado. Além disso, o modelo incorpora uma memória adicional, representada pelo tensor de estrutura inicial z_{in} , para aprimorar a capacidade de considerar os efeitos decorrentes das tensões de cisalhamento estáticas e das diferenças nos efeitos da estrutura para condições de carregamento drenado versus não drenado.

5.3. Parâmetros do modelo

O modelo constitutivo PM4Sand (Boulanger & Ziotopoulou, 2017) é um modelo elastoplástico implementado no programa computacional Plaxis 2D baseado no método dos elementos finitos. O programa possui 13 parâmetros de entrada (Tabela 5.1) agrupados em duas categorias:

- Um conjunto primário de 4 parâmetros (D_{R0} , G_0 , h_{p0} , p_A) que são os mais importantes para a calibração do modelo.

- Um conjunto secundário de 9 parâmetros (e_{max} , e_{min} , n^b , φ_{CV} , n^d , v , Q , R e PostShake) que podem ser modificados ou mantidos os valores padrão recomendados por Boulanger & Ziotopoulou (2017). Nesta dissertação todos os parâmetros secundários foram assumidos como valores recomendados.

Tabela 5.1– Parâmetros do modelo constitutivo PM4Sand.

Símbolo	Parâmetro
D_R (%)	Densidade relativa
G_0 (kN/m ²)	Coefficiente do módulo de cisalhamento
h_{p0}	Parâmetro de velocidade de contração
p_A (kPa)	Pressão atmosférica
e_{max}, e_{min}	Índice de vazios máximo e mínimo
n^b	Parâmetro da superfície delimitadora
n^d	Parâmetro da superfície de dilatação
ϕ_{CV} (°)	Ângulo de atrito do estado crítico
ν	Coefficiente de Poisson
Q, R	Parâmetros da linha de estado crítico

Da Tabela 5.1 os parâmetros D_R , h_{p0} , e_{max} , e_{min} , n^b , n^d , ϕ_{CV} , ν , Q e R são adimensionais.

5.3.1. Estimativa dos parâmetros principais

5.3.1.1. Densidade relativa D_R

O parâmetro de densidade relativa D_R controla as características de dilatância e a resposta tensão-deformação do material. Boulanger & Ziotopoulou (2018) sugeriram uma correlação entre $(N_1)_{60}$ e D_R , eq. (5.16), para testes SPT, ou entre q_{c1N} , eq. (5.17), para testes CPT, proposta por Idriss & Boulanger (2008):

$$D_R = \sqrt{\frac{(N_1)_{60}}{C_d}} \quad (5.16)$$

$$D_R = 0,465 \left(\frac{q_{c1N}}{C_{dq}} \right)^{0,264} - 1,063 \quad (5.17)$$

Onde os coeficientes C_d e C_{dq} foram estimados em 46 e 0,9 respectivamente.

Boulanger & Ziotopoulou (2017) comentam que o valor de D_R deve ser entendido como uma "densidade relativa aparente", em vez da interpretação restrita de densidade relativa determinada em ensaios de laboratório.

5.3.1.2. Coeficiente do módulo de cisalhamento G_0

Este parâmetro, que regula a magnitude das deformações de cisalhamento dentro da faixa de deformação pequena, foi determinado por meio da correlação (5.18) proposta por Boulanger e Ziotopoulou (2017) com base em valores de $(N_1)_{60}$.

$$G_0 = 167 \sqrt{(N_1)_{60} + 2,5} \quad (5.18)$$

A partir da eq. (5.16) e eq. (5.18) o coeficiente G_0 também pode ser estimado em função da densidade relativa D_R (Eq. 5.19):

$$G_0 = 167 \cdot \sqrt{46 \cdot D_R^2 + 2,5} \quad (5.19)$$

Por outro lado, é possível utilizar uma correlação com a velocidade de propagação da onda S (V_s).

$$G = \rho(V_s)^2 \quad (5.20)$$

$$G_0 = \frac{G}{p_A} \sqrt{\frac{p_A}{p}} \quad (5.21)$$

Onde G é o módulo de cisalhamento, ρ representa a densidade e p_A é a pressão atmosférica.

5.3.1.3. Parâmetro de velocidade de contração h_{p0}

Este parâmetro, que ajusta a velocidade de contração do solo arenoso fofo, pode ser estimado com base na correlação (5.22) sugerida por Chen & Arduino (2021):

$$ah_{p0}^2 + bh_{p0} + c = 0 \quad (5.22)$$

Onde $a = 0,0636$; $b = -0,0749 - 0,1323D_R$; $c = -0,1282 + 0,4952D_R + 5,0565 * 10^{-5}G_0 - 1,4665 * 10^{-4}D_R G_0 - 0,752D_R^2 - CRR$

Sendo, portanto, necessário obter o valor de CRR (*cyclic resistance ratio*) para estimativa de h_{p0} .

5.3.1.3.1. Determinação de CRR

Os métodos utilizados para calcular CRR são empíricos, baseados em resultados de ensaios de campo e casos históricos de campo. Para estimativa deste parâmetro, foi utilizada a Figura 5.4, que apresenta uma comparação de valores de CRR obtidos em simulações com h_{p0} uniformemente distribuídos, e modelos empíricos relacionando CRR com $(N_1)_{60}$ para areia limpa com magnitude $M = 7,5$ e tensão vertical efetiva $\sigma'_{vc} = 1$ atm.

Também pode ser utilizada a eq. (5.4), proposta por Youd et al (2001) para areia limpa:

$$CRR_{7,5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{[10(N_1)_{60} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (5.23)$$

A equação é válida para $(N_1)_{60} < 30$. Para valores superiores, solos granulares não são susceptíveis à liquefação.

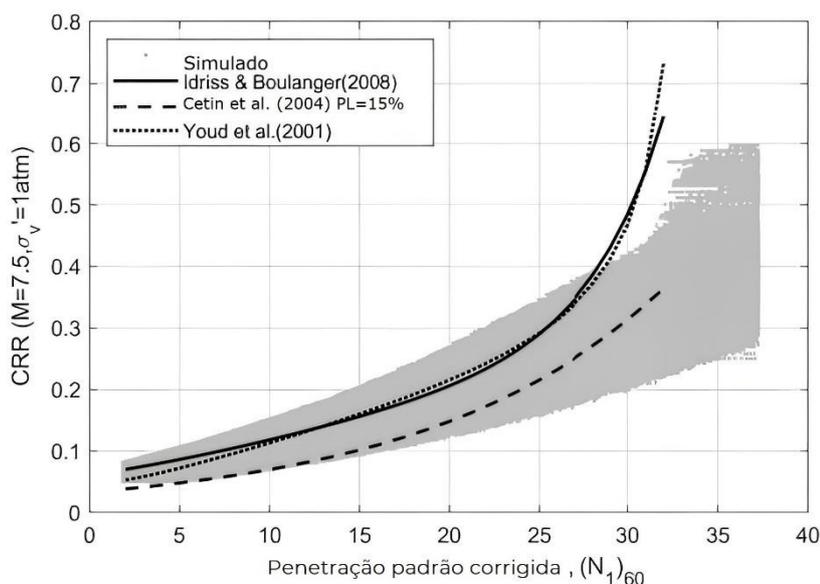


Figura 5.4 - Comparação entre valores de CRR obtidos por meio de simulações com h_{p0} uniformemente distribuídos e utilizando modelos empíricos relacionando CRR com $(N_1)_{60}$ para areia limpa, $M = 7,5$ e $\sigma'_{vc} = 1$ atm. (Chen & Arduino (2021)).

Fatores de correção de CRR

Os valores de CRR obtidos com correlações da literatura se referem a sismos com magnitude 7,5. Para ajustá-los outros valores de magnitude é necessário ajustar CRR por meio do fator de normalização da escala de magnitude MSF (*magnitude scaling factor*). Youd et al. (2001) recomendaram empregar a correlação (5.5) onde M_w é a magnitude de momento.

$$MSF = \frac{10^{2,24}}{M_w^{2,56}} \quad (5.24)$$

O fator de correção K_σ da tensão vertical efetiva é utilizado para estimar o valor da CRR sob tensões superiores a 1 atmosfera. Nesta dissertação, para este propósito, foi utilizada a correlação (5.6) sugerida por Hynes & Olsen (1999).

$$K_\sigma = \left(\frac{\sigma'_{v0}}{P_a}\right)^{(f-1)} \quad (5.25)$$

Onde σ'_{v0} é a tensão vertical efetiva, P_a é a pressão atmosférica e f é um índice que depende das condições do solo, função da densidade relativa, histórico de tensões, idade do depósito e da razão de pré-adensamento. Para densidades relativas de 40 a 60%, os valores de f variam de 0,7 a 0,8, e para densidades relativas de 60 a 80%, os valores de f variam de 0,6 a 0,7.

Nesta dissertação dado que não houve desagregação sísmica do estudo de risco sísmico, foi considerada uma magnitude de 7,5 Mw para o sismo do projecto. Este valor estimado é consistente para um período de retorno de 475 anos, ou 10% de excesso para um tempo de exposição de 50 anos para edifícios e residências.

5.3.2. Parâmetros secundários

5.3.2.1. Índices de vazios máximo (e_{max}) e mínimo (e_{min})

Os índices de vazios influenciam o cálculo do índice de estado relativo ξ_R que posteriormente quantifica a magnitude do comportamento contrativo ou dilatante do solo. Segundo Boulanger e Ziotopoulou (2018) a mudança dos valores pré-estabelecidos não é necessária pois os parâmetros primários são os que mais afetam a resposta devido à excitação cíclica. Os valores padrão de e_{max} e e_{min} são 0,8 e 0,5 respectivamente.

5.3.2.2.

Parâmetro da superfície limite n^b

Controla a posição relativa da superfície limite em relação à superfície de estado crítico, influenciando a dilatância e o ângulo de atrito efetivo de pico. O valor padrão é 0,5.

5.3.2.3.

Parâmetro da superfície de dilatância n^d

Controla a razão de tensão entre a transição de contração e dilatância (fase de transformação). O valor padrão é igual a 0,1, o que produz um ângulo de transformação de fase ligeiramente menor que \emptyset_{cv} , consistente com dados experimentais (Boulanger e Ziotopoulou, 2018).

5.3.2.4.

Ângulo de atrito sob volume constante \emptyset_{cv}

Define a posição da superfície de estado crítico com valor padrão de 33°.

5.3.2.5.

Coefficiente de Poisson ν e pressão atmosférica p_A

O valor padrão de ν é 0,3 e p_A é a pressão atmosférica ao nível do mar com valor 101,3 kPa.

5.3.2.6.

Parâmetros da linha de estado crítico Q e R .

Definem o comportamento contrativo e dilatante da areia durante o cisalhamento cíclico. Os valores padrões para areia de quarto são 10 e 1,0 respectivamente (Bolton, 1986). Entretanto, Boulanger e Ziotopoulou (2018) sugeriram que o R fosse aumentado para 1,5 para melhor aproximação da linha de estado permanente obtida de ensaios DSS.

5.3.2.7.

Indicador de pós-sismo

A ativação deste indicador reduz o módulo ao cisalhamento elástico pós sismo, para incrementar as deformações decorrentes da dissipação dos excessos de poropressão após o término da excitação. Como grande parte do adensamento pós liquefação é governado por efeitos de sedimentação, este indicador foi

introduzido como tentativa de simular o comportamento pós-sismo. Se o engenheiro desejar avaliar o comportamento pós-sismo, dois modelos de materiais podem ser criados: o primeiro definido durante o movimento sísmico (Pos-Sismo = 0) e o segundo para ser ativado após o término da excitação (Pos-Sismo = 1). De acordo com Boulanger e Ziotopoulou (2018) este indicador deve permanecer desativado (valor nulo) durante a maior parte da simulação.

Nesta dissertação, foi realizada uma análise da propagação de ondas 1D utilizando o modelo PM4Sand, por meio do software Plaxis. Esse software permite a geração totalmente automatizada de malhas de elementos finitos, baseada em um procedimento robusto de triangulação. No modelo em questão, uma malha composta por 37 elementos e 384 nós foi gerada.

A decisão de utilizar o modelo PM4Sand foi baseada em sua capacidade de representar o comportamento mecânico não linear dos solos arenosos sob diferentes condições de carregamento, incluindo solos secos. Embora inicialmente desenvolvido para simular a liquefação do solo, o PM4Sand incorpora uma representação detalhada do comportamento dos solos em resposta a carregamentos dinâmicos, como os provocados por terremotos.

Além disso, o modelo PM4Sand é amplamente reconhecido por sua confiabilidade e precisão na representação do comportamento de solos arenosos em uma variedade de condições geotécnicas. Sua validação em estudos anteriores o torna uma ferramenta confiável para a análise de recalques induzidos por terremotos.

O uso do software Plaxis complementa o modelo PM4Sand, fornecendo uma plataforma robusta e versátil para a análise geotécnica avançada. Essa combinação oferece uma abordagem eficaz e confiável para estudar os efeitos sísmicos em solos arenosos secos, permitindo uma análise precisa dos recalques induzidos por terremotos nesses materiais.

As tabelas 5.2 a 5.5 apresentam os parâmetros de entrada do modelo PM4Sand utilizado no PLAXIS 2D para a análise dinâmica dos perfis de solo.

Tabela 5.2 – Parâmetros do modelo PM4Sand para análise dinâmica do perfil A-1.

Prof. (m)	D_{R0}	G_0 (MPa)	h_{p0}	e_{max}	e_{min}	nb	nd	ϕ_{cv}	nu	Q	R
0-2,0	0,31	43,52	0,47	0,8	0,5	0,5	0,1	33,0	0,3	10,0	1,5

Prof. (m)	D_{R0}	G_0 (MPa)	h_{p0}	e_{max}	e_{min}	nb	nd	ϕ_{cv}	nu	Q	R
2,0-7,0	0.46	114,8	0,55	0,8	0,5	0,5	0,1	33,0	0,3	10,0	1,5
7,0-12,0	0.65	197,8	0,75	0,8	0,5	0,5	0,1	33,0	0,3	10,0	1,5
12,0-22,0	0.73	241,3	0,78	0,8	0,5	0,5	0,1	33,0	0,3	10,0	1,5
22,0-30,0	0.96	381,5	0,40	0,8	0,5	0,5	0,1	33,0	0,3	10,0	1,5

Tabela 5.3– Parâmetros do modelo PM4Sand para análise dinâmica do perfil A-2.

Prof. (m)	D_{R0}	G_0 (MPa)	h_{p0}	e_{max}	e_{min}	nb	nd	ϕ_{cv}	nu	Q	R
0-5,0	0.36	486.88	0,67	0,8	0,5	0,5	0,1	33,0	0,3	10,0	1,5
5,0-15,0	0.47	590.43	1,56	0,8	0,5	0,5	0,1	33,0	0,3	10,0	1,5
15,0-25,0	0.36	486.88	3,52	0,8	0,5	0,5	0,1	33,0	0,3	10,0	1,5
25,0-30,0	0.44	566.32	3,60	0,8	0,5	0,5	0,1	33,0	0,3	10,0	1,5

Tabela 5.4– Parâmetros do modelo PM4Sand para análise dinâmica do perfil Masw-10.

Prof. (m)	D_{R0}	G_0 (MPa)	h_{p0}	e_{max}	e_{min}	nb	nd	ϕ_{cv}	nu	Q	R
0-2,3	0.36	486.88	0,98	0,8	0,5	0,5	0,1	33,0	0,3	10,0	1,5
2,3-19,1	0.47	590.43	3,77	0,8	0,5	0,5	0,1	33,0	0,3	10,0	1,5
19,1-30,0	0.36	486.88	4,00	0,8	0,5	0,5	0,1	33,0	0,3	10,0	1,5

Tabela 5.5– Parâmetros do modelo PM4Sand para análise dinâmica do perfil Masw-14.

Prof. (m)	D_{R0}	G_0 (MPa)	h_{p0}	e_{max}	e_{min}	nb	nd	ϕ_{cv}	nu	Q	R
0-2,0	0.36	486.88	0,67	0,8	0,5	0,5	0,1	33,0	0,3	10,0	1,5
2,0-27,0	0.47	590.43	0,76	0,8	0,5	0,5	0,1	33,0	0,3	10,0	1,5
27,0-30,0	0.36	486.88	3,83	0,8	0,5	0,5	0,1	33,0	0,3	10,0	1,5

6

Apresentação e análise de resultados

6.1.

Resultados obtidos pelos métodos simplificados

Para a estimativa dos recalques induzidos pela densificação do solo devido aos terremotos, utilizando os métodos simplificados propostos por Tokimatsu & Seed (1987), Pradel (1998), Stewart & Whang (2003) e Yi (2010), conforme descritos no capítulo 4, foram obtidos os picos de aceleração horizontal na superfície do solo arenoso, que estão apresentados na Tabela 3.3. Onde observamos que a maior aceleração (PGA) registrada foi de 0,82g no perfil A-01 durante o sismo de Tacna (2010), enquanto o menor valor foi de $PGA = 0,24g$ no perfil Masw-14 durante o sismo de Lima (1966).

Os resultados para os quatro perfis analisados foram calculados para onze sismos de projeto. O valor máximo de recalque (59,83 cm) foi obtido para o perfil A-02 durante o sismo de Arequipa (2001), utilizando o método simplificado de Yi (2010). Por outro lado, o valor mínimo de recalque (0,12 cm) foi previsto para o perfil Masw-10 durante o sismo de Cañete (2022), considerando o método simplificado de Tokimatsu & Seed (1987). Como era de se esperar, observamos uma redução nos valores de recalque à medida que aumentava a densidade relativa dos estratos do solo.

Os recalques estimados pelos métodos simplificados analisados nesta pesquisa estão representados nas Figuras 6.1 a 6.11.

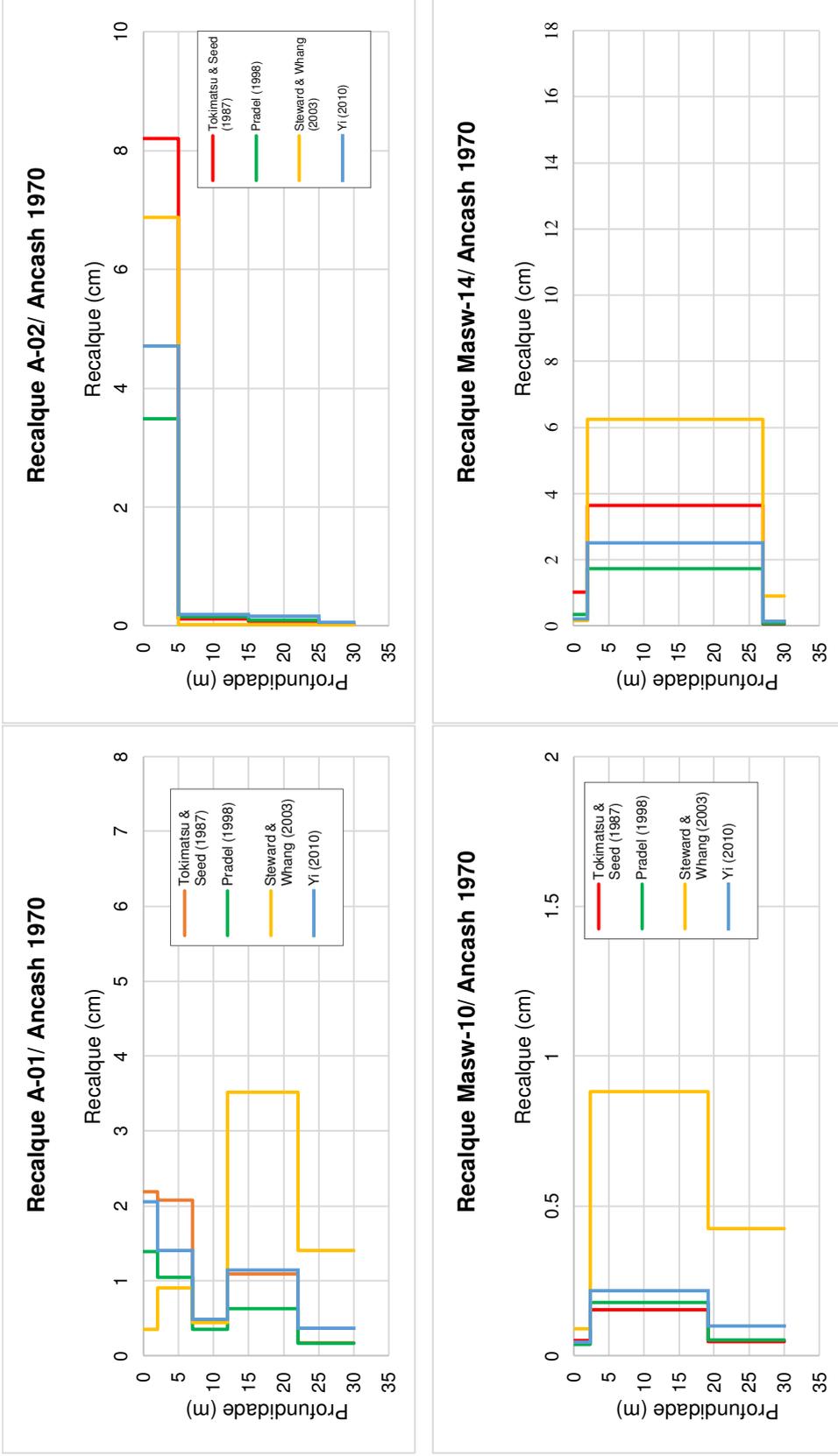


Figura 6.1 - Recalques estimados pelos métodos simplificados indicados para o terremoto de Ancash 1970.

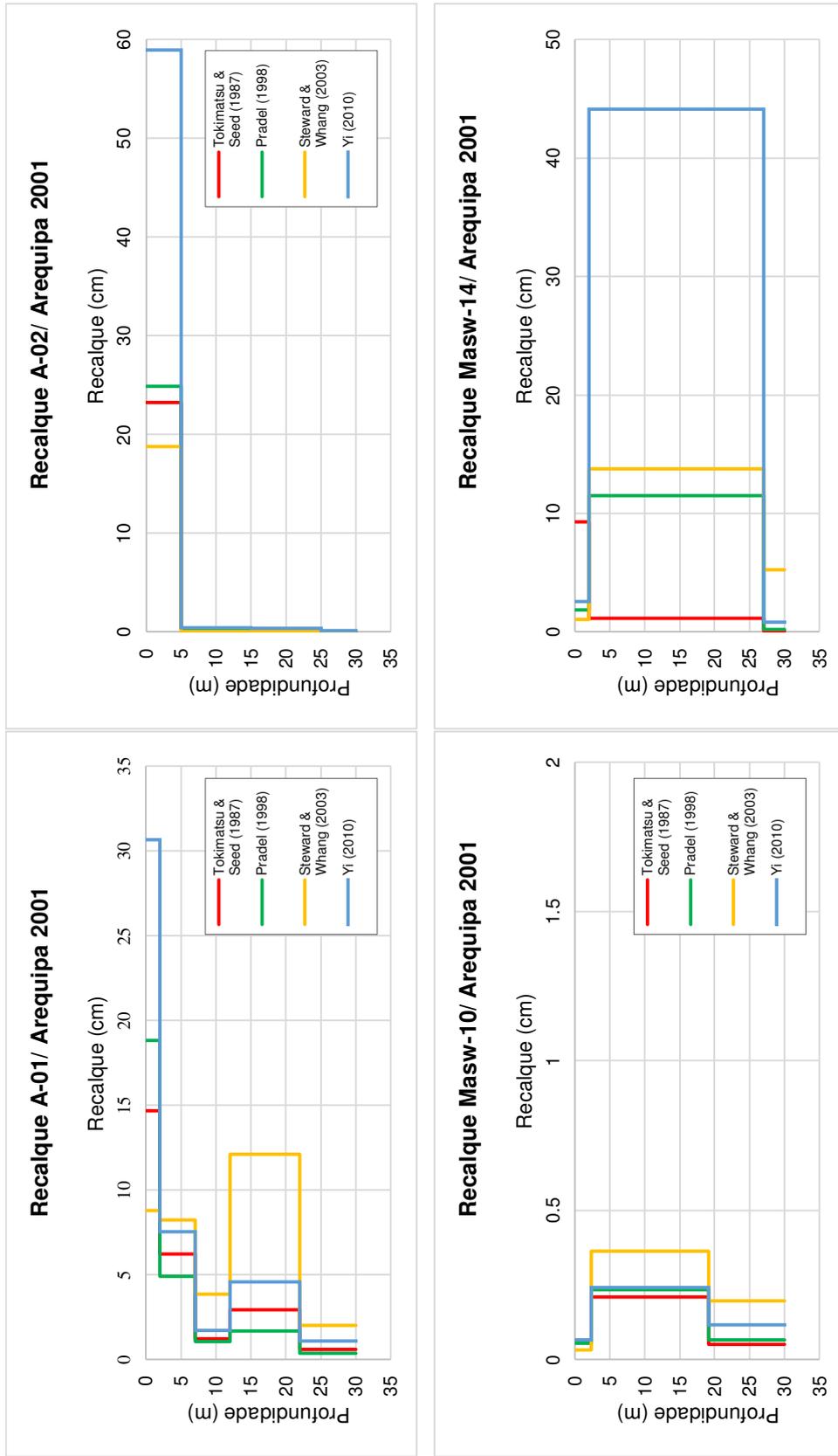


Figura 6.2 - Recalques estimados pelos métodos simplificados indicados para o terremoto de Arequipa 2001.

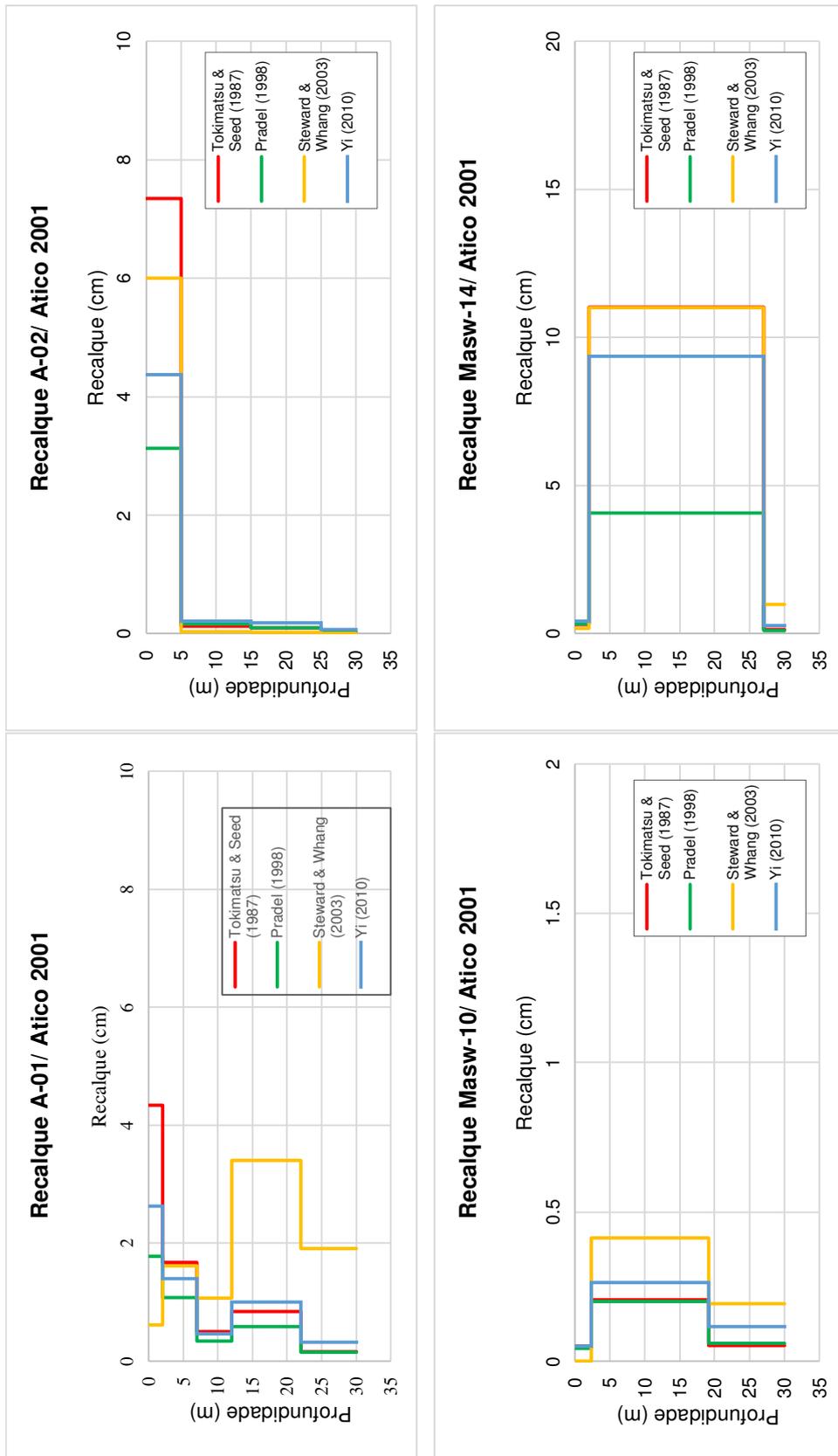


Figura 6.3 - Recalques estimados pelos métodos simplificados indicados para o terremoto de Atico 2001.

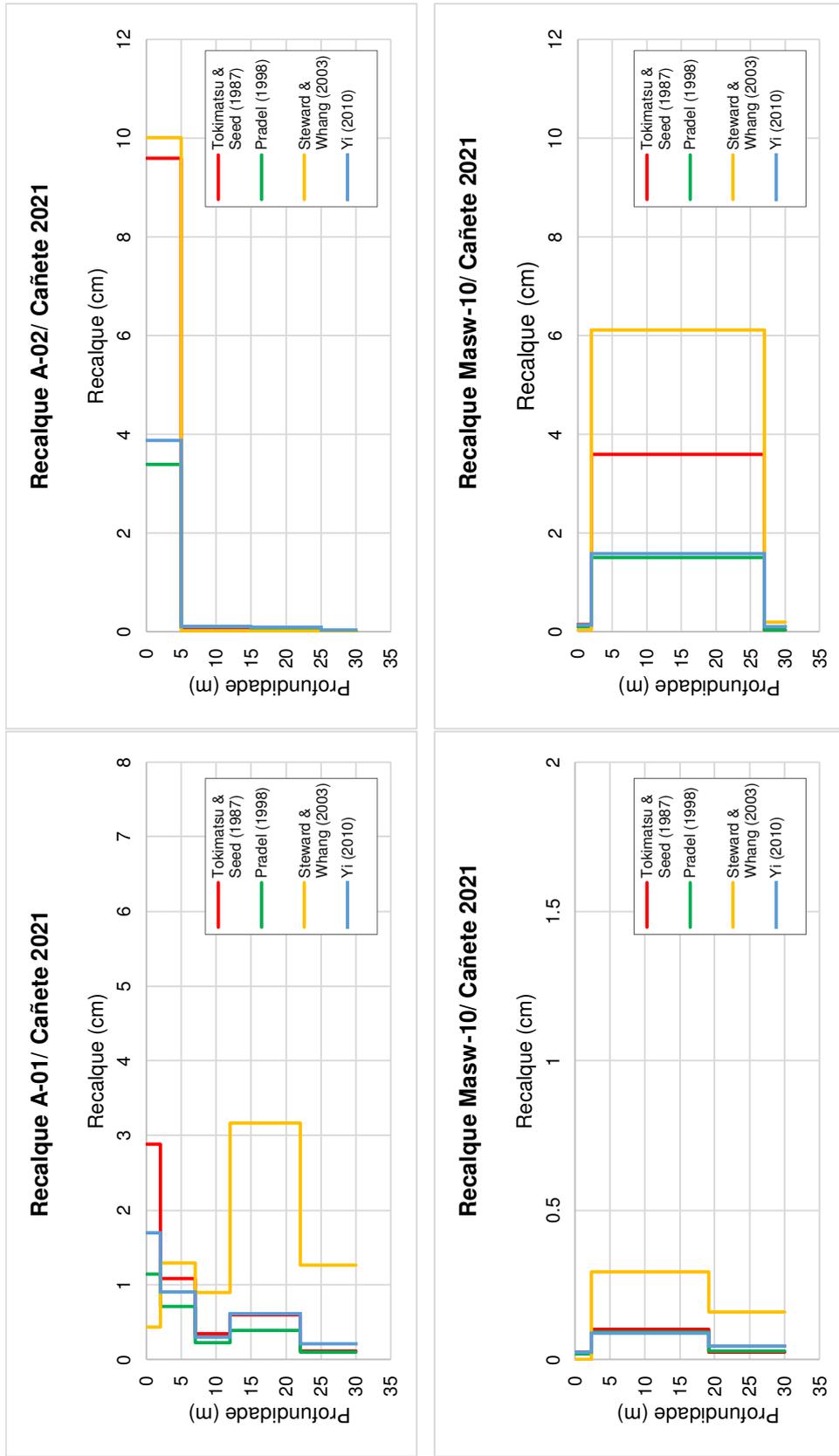


Figura 6.4 - Recalques estimados pelos métodos simplificados indicados para o terremoto de Cañete 2021.

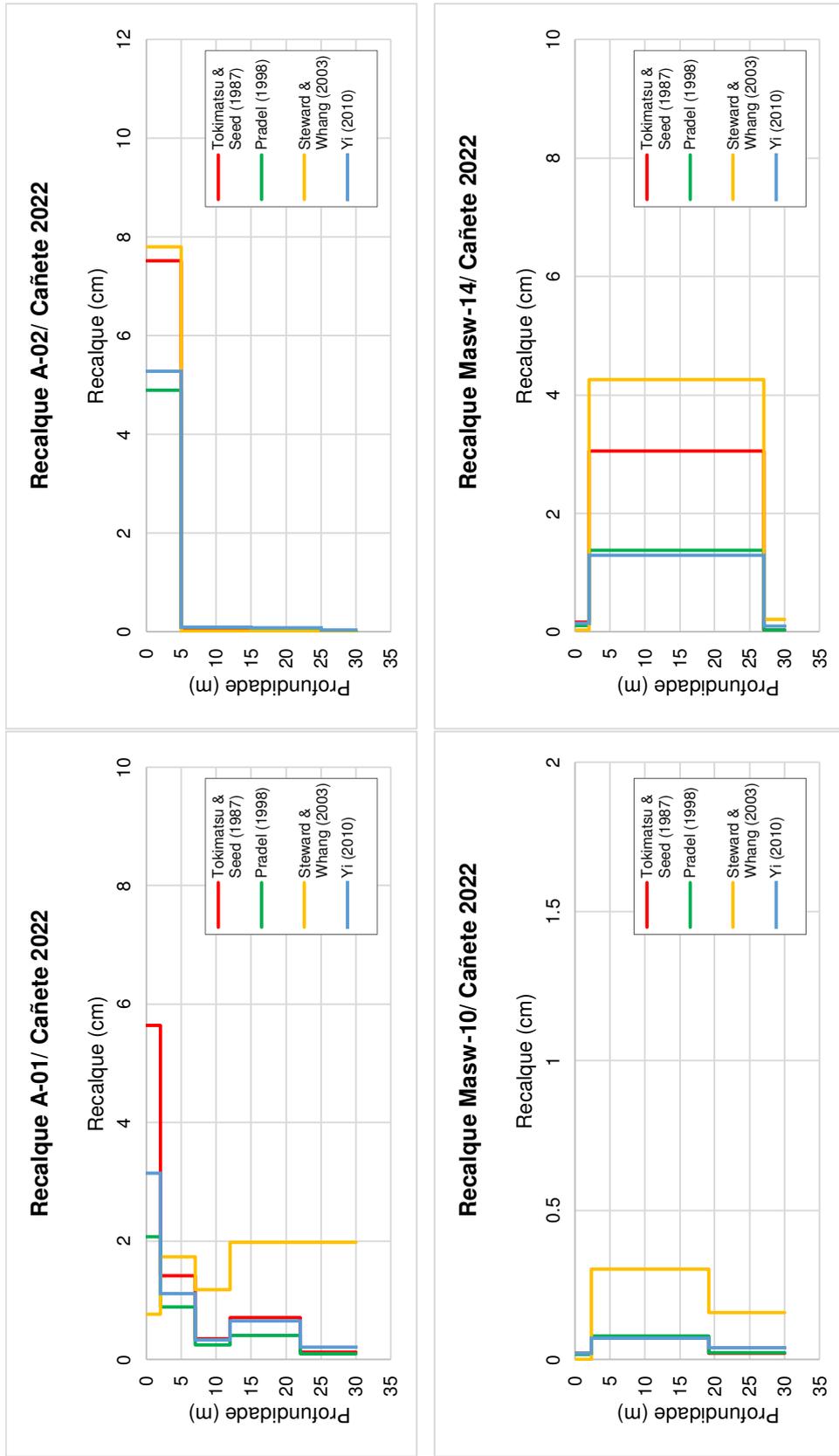


Figura 6.5 - Recalques estimados pelos métodos simplificados indicados para o terremoto de Cañete 2022.

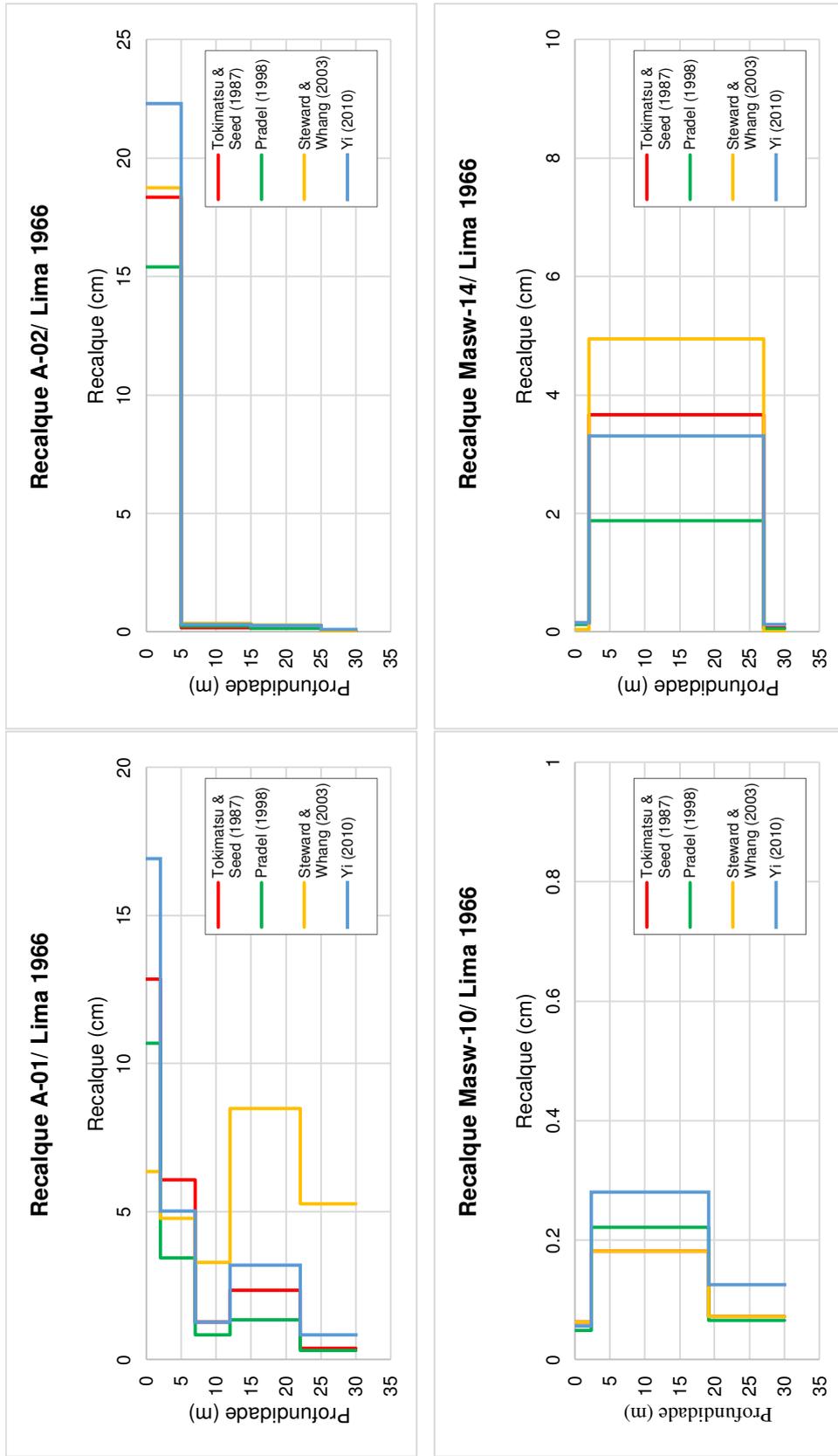


Figura 6.6 - Recalques estimados pelos métodos simplificados indicados para o terremoto de Lima 1966.

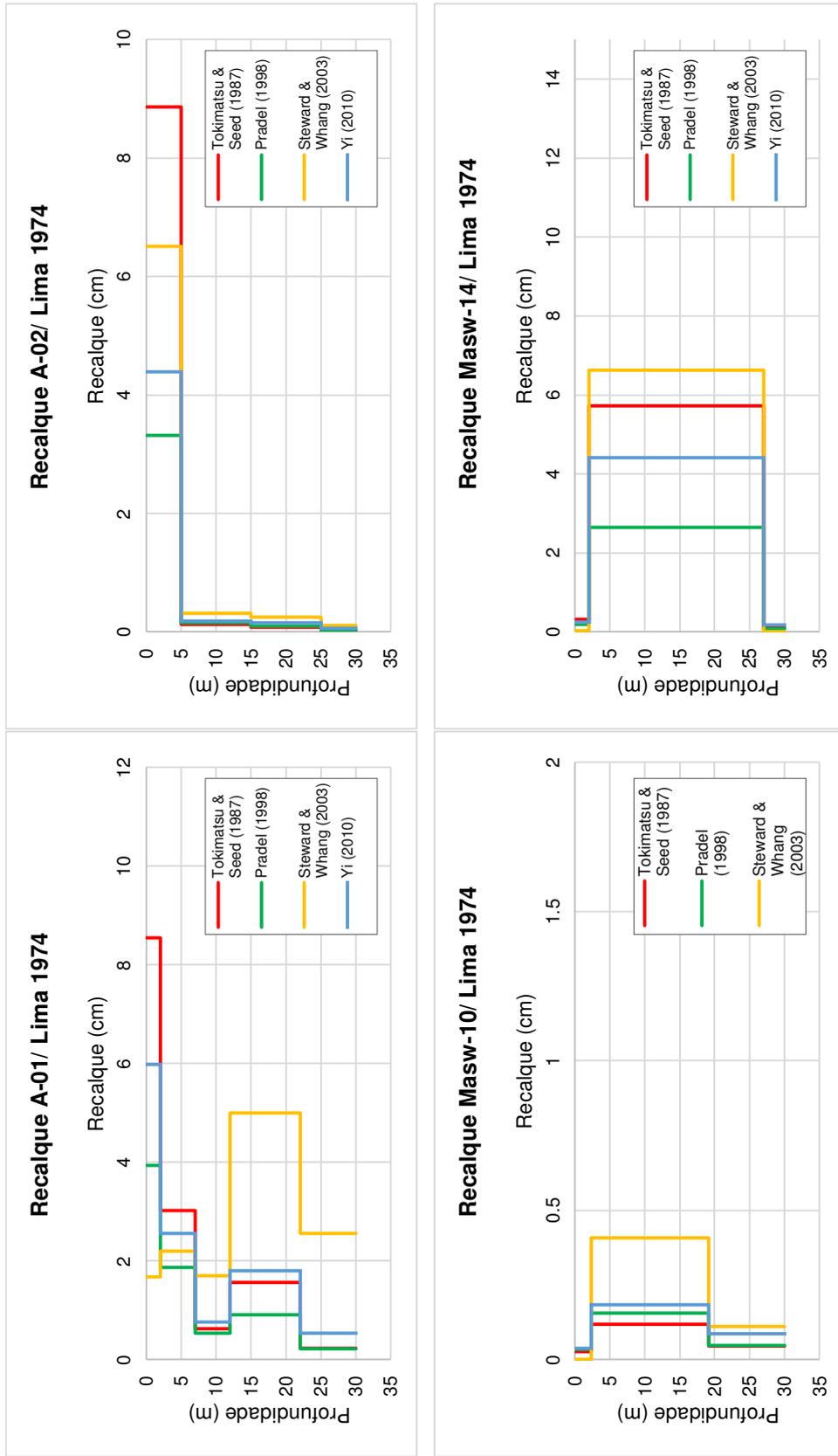


Figura 6.7 - Recalques estimados pelos métodos simplificados indicados para o terremoto de Lima 1974.

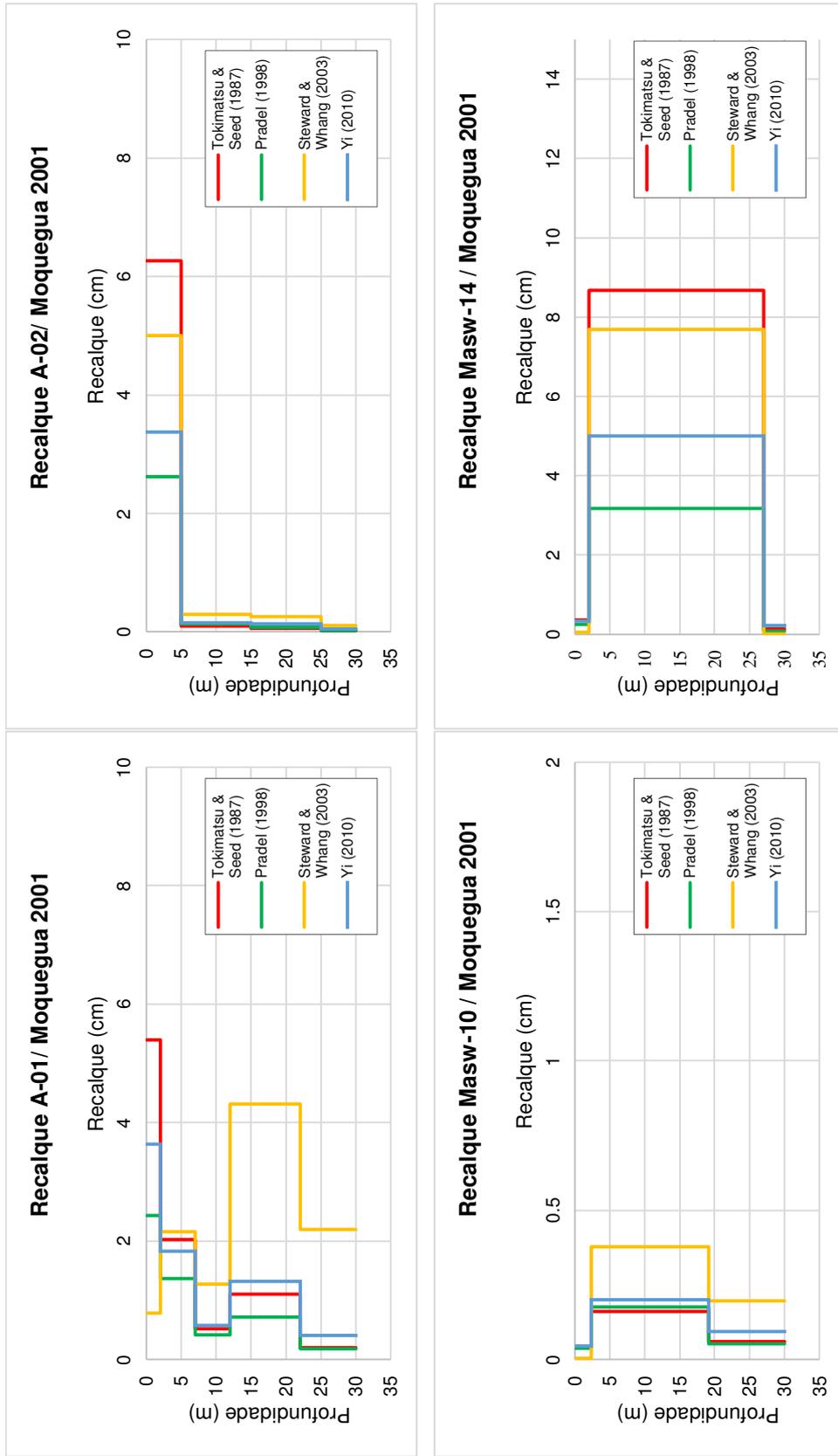


Figura 6.8 - Recalques estimados pelos métodos simplificados indicados para o terremoto de Moquegua 2001.

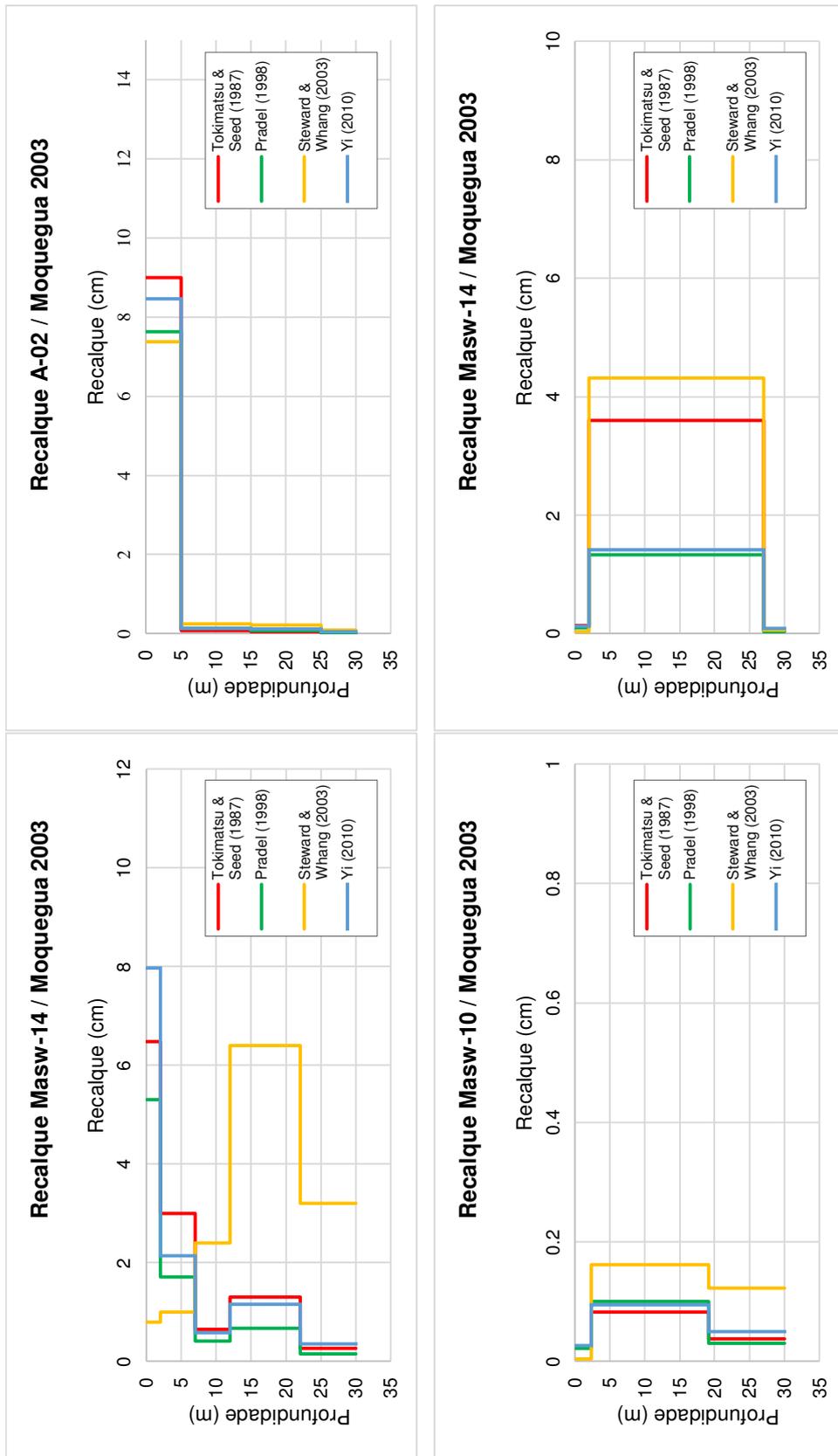


Figura 6.9 - Recalques estimados pelos métodos simplificados indicados para o terremoto de Moquegua 2003.

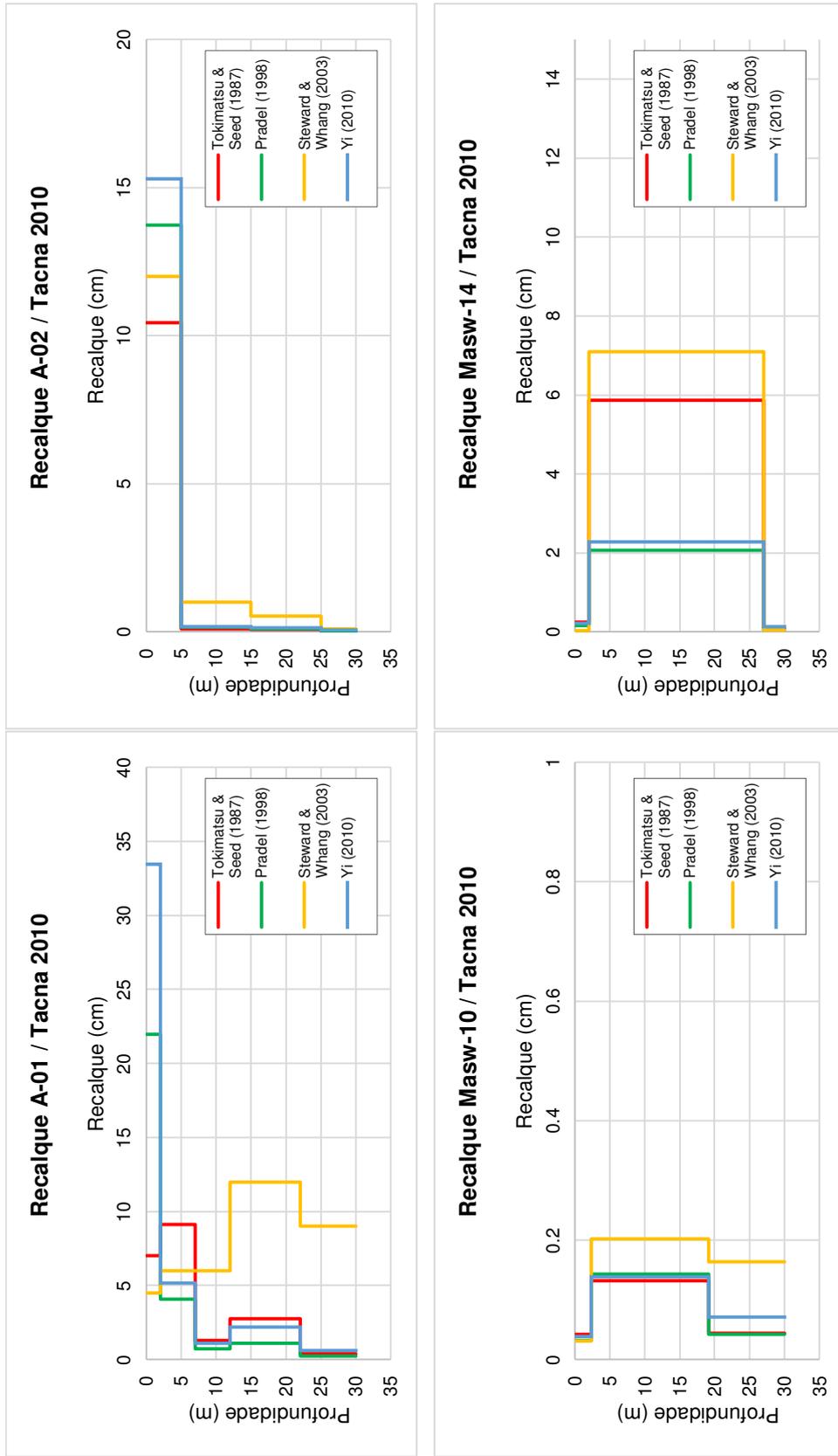


Figura 6.10 - Recalques estimados pelos métodos simplificados indicados para o terremoto de Tacna 2010.

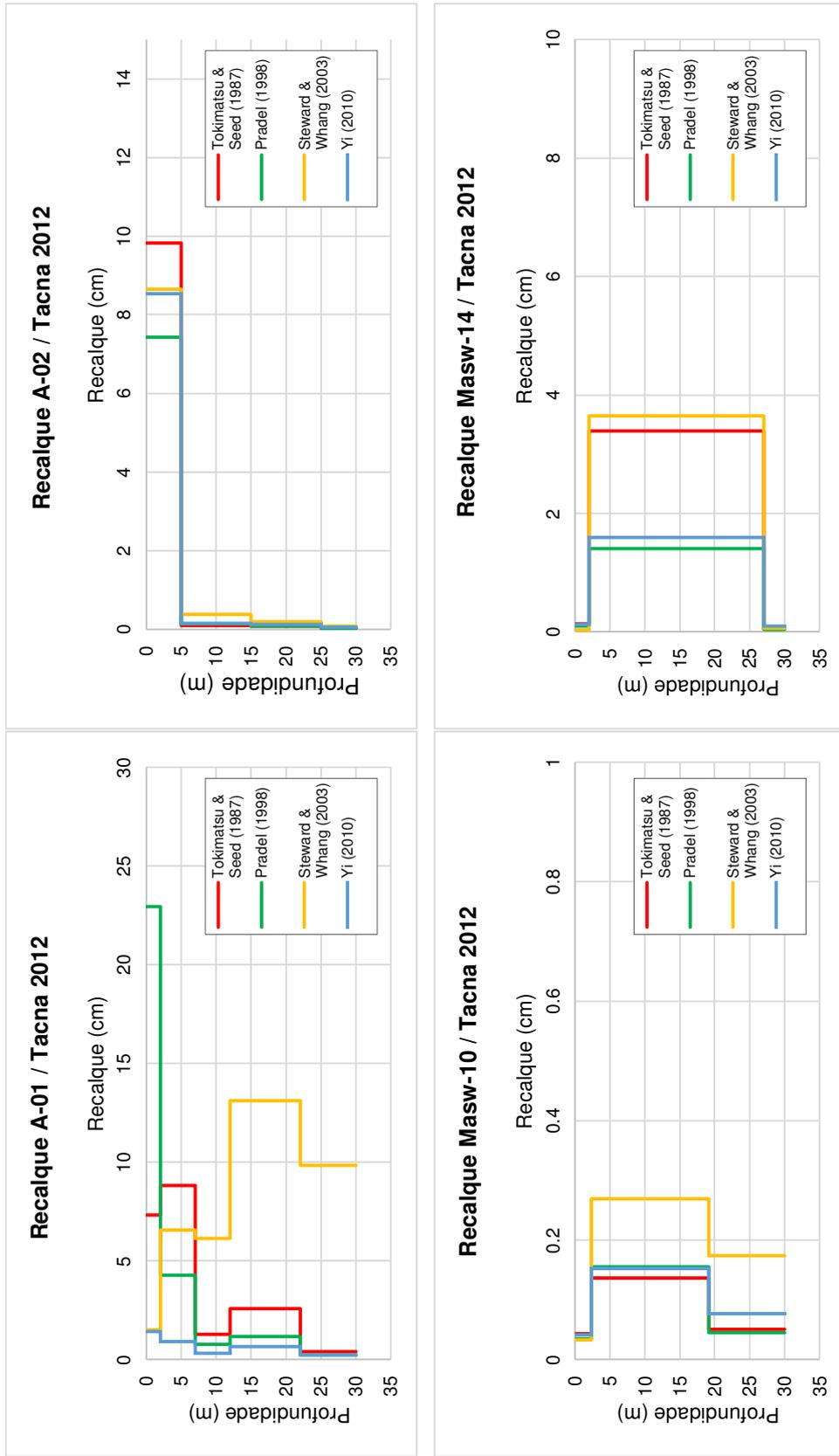


Figura 6.11 - Recalques estimados pelos métodos simplificados indicados para o terremoto de Tacna 2012.

Além disso, verificou-se que os valores médios dos recalques induzidos pela densificação do solo em decorrência dos terremotos, conforme determinados pelos métodos de Tokimatsu & Seed (1987), Pradel (1998), Stewart & Whang (2003) e Yi (2010), exibiram as seguintes grandezas:

Tabela 6.1 – Média dos Recalques obtidos pelos métodos simplificados analisados.

Método	Média dos Recalques (cm)			
	A-01	A-02	Masw-10	Masw-14
Tokimatsu & Seed (1987)	13,75	11,04	0,23	6,54
Pradel (1998)	12,32	8,46	0,24	3,55
Stewart & Whang (2003)	18,67	10,29	0,56	7,74
Yi (2010)	19,26	13,11	0,30	8,05

Da Tabela 6.1 pode-se observar cada método apresenta estimativas diferentes para os recalques, mesmo para os mesmos perfis de solo. Isso ressalta a importância de considerar múltiplos métodos e realizar uma análise comparativa para obter uma compreensão abrangente do comportamento do solo sob carregamento sísmico. Alguns métodos tendem a fornecer estimativas de recalque mais altas do que outros para determinados perfis de solo. Por exemplo, os métodos de Stewart & Whang (2003) e Yi (2010) produziram recalques mais altos em comparação com os métodos de Tokimatsu & Seed (1987) e Pradel (1998) para o perfil A-1. Isso pode ser atribuído a diferentes formulações e suposições adotadas por cada método. Também se observa que o perfil Masw-10 geralmente apresenta os recalques mais baixos em todos os métodos. Isso pode indicar que esse perfil possui características que o tornam menos suscetível à densificação induzida por terremotos, como uma maior densidade relativa ou resistência ao cisalhamento.

Por fim, destaca-se que os valores médios dos recalques obtidos pelos métodos simplificados analisados nesta dissertação, apresentaram os seguintes valores: 16,00 cm para o perfil de solo A-01, 10,73 cm para o A-2, 0,33 cm para o Masw-10 e 6,47 cm para o Masw-14.

No Apêndice A encontram-se as tabelas de cálculo dos recalques obtidos através dos métodos simplificados para os onze sismos desta pesquisa.

6.2. Resultados obtidos pelo método dos elementos finitos

Os resultados numéricos obtidos pelo método dos elementos finitos por meio do software Plaxis 2D para os onze terremotos da pesquisa são apresentados nas Figuras 6.12 a 6.22, exibindo as malhas correspondentes na configuração deformada, juntamente com os recalques observados na superfície dos modelos.

Durante essas análises, observou-se que o valor máximo de recalque (23,16 cm) ocorreu no perfil A-01 durante o sismo de Lima (1966), que também apresentou o maior pico de aceleração horizontal (0,82g, conforme indicado na Tabela 3.3). Em contrapartida, o valor mínimo de recalque (0,34 cm) foi registrado no perfil Masw-10 durante o sismo de Tacna (2010).

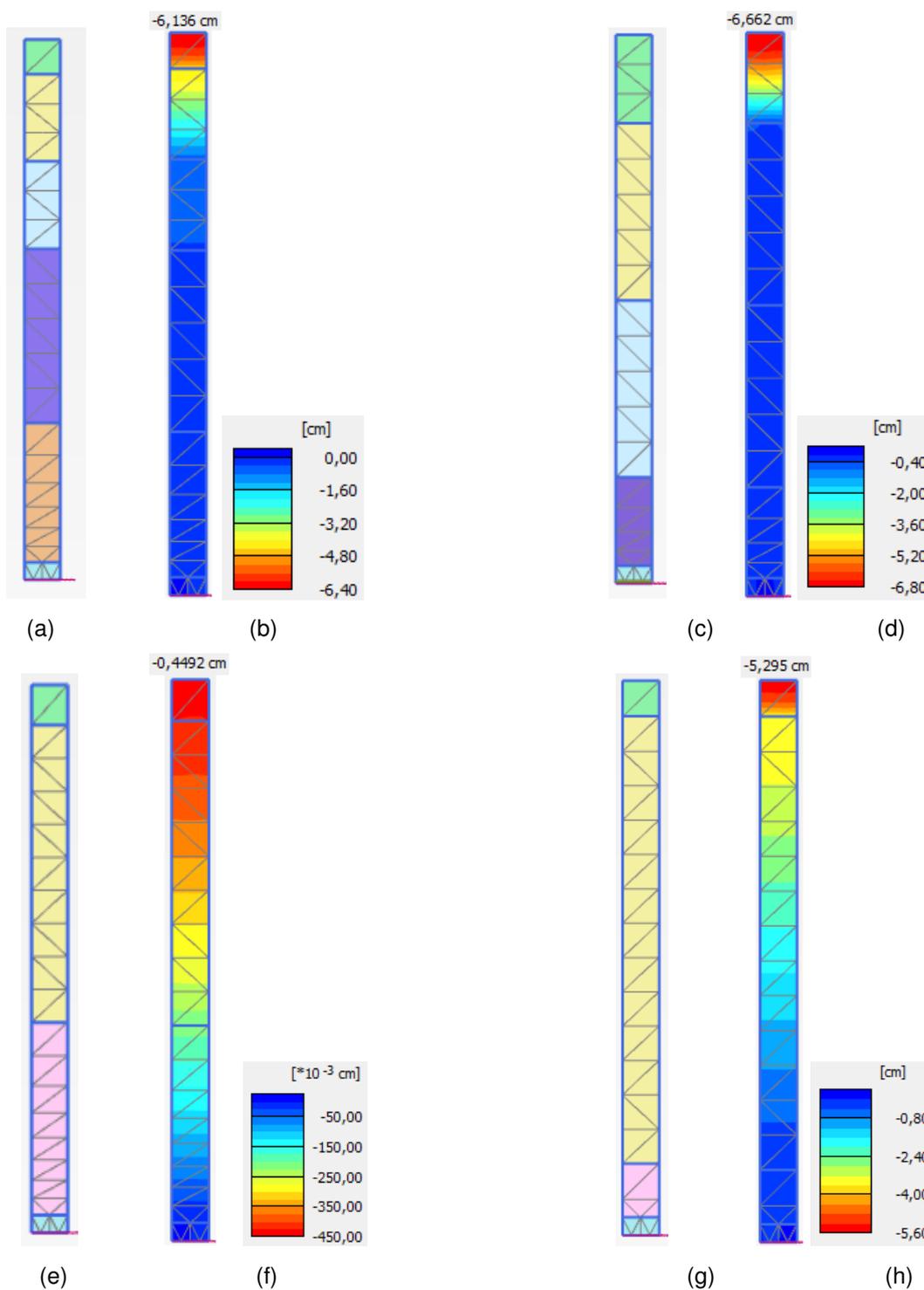


Figura 6.12 - Resultados numéricos para o terremoto de Ancash, 1970. (a) Malha deformada do perfil A-01, (b) Recalque no perfil A-01, (c) Malha deformada do perfil A-02, (d) Recalque no perfil A-02, (e) Malha deformada do perfil Masw-10, (f) Recalque no perfil Masw-10, (g) Malha deformada do perfil Masw-14, (h) Recalque no perfil Masw-14.

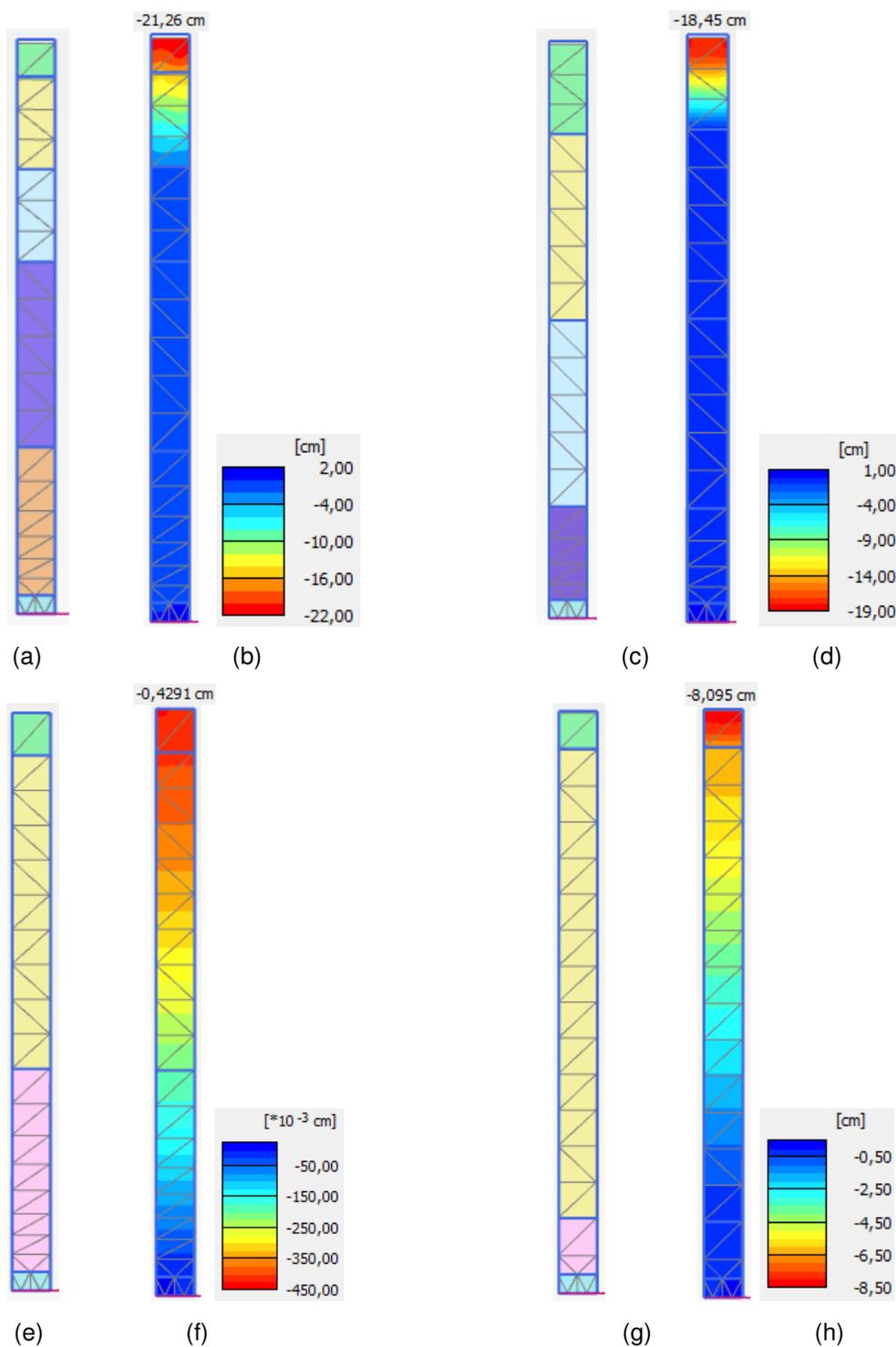


Figura 6.13 - Resultados numéricos para o terremoto de Arequipa, 2001. (a) Malha deformada do perfil A-01, (b) Recalque no perfil A-01, (c) Malha deformada do perfil A-02, (d) Recalque no perfil A-02, (e) Malha deformada do perfil Masw-10, (f) Recalque no perfil Masw-10, (g) Malha deformada do perfil Masw-14, (h) Recalque no perfil Masw-14.

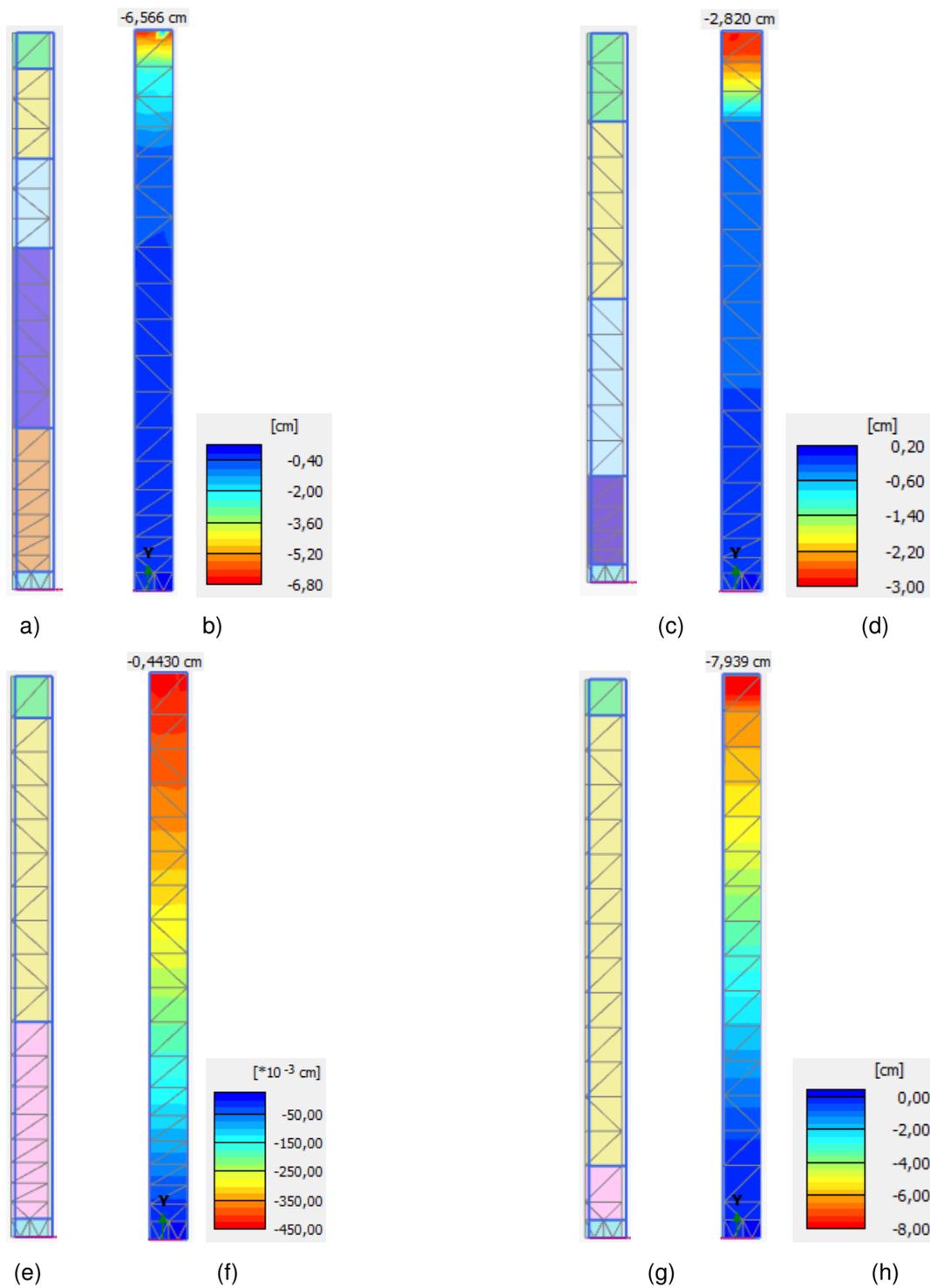


Figura 6.14 - Resultados numéricos para o terremoto de Atico, 2001. (a) Malha deformada do perfil A-01, (b) Recalque no perfil A-01, (c) Malha deformada do perfil A-02, (d) Recalque no perfil A-02, (e) Malha deformada do perfil Masw-10, (f) Recalque no perfil Masw-10, (g) Malha deformada do perfil Masw-14, (h) Recalque no perfil Masw-14.

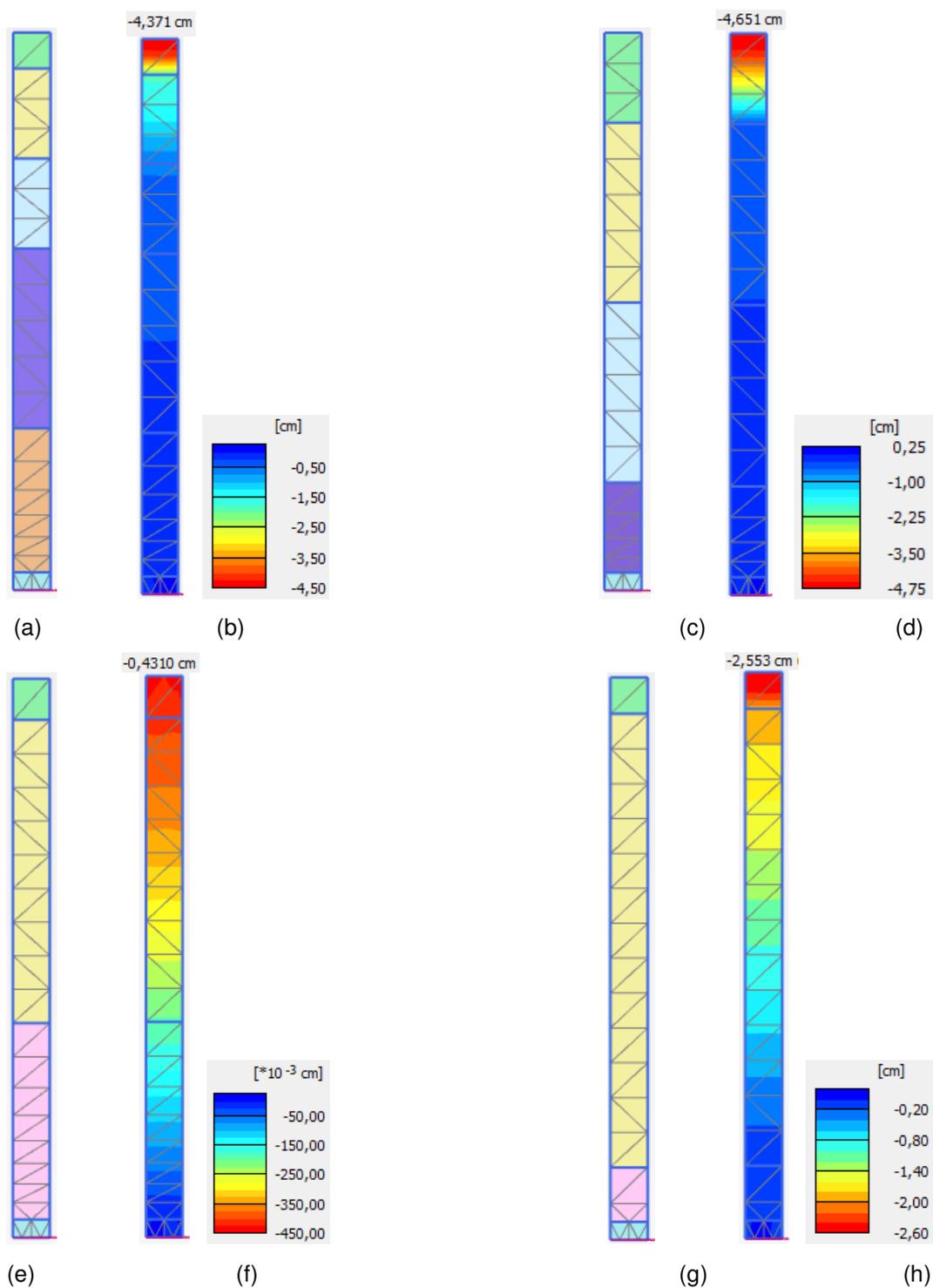


Figura 6.15 - Resultados numéricos para o terremoto de Cañete, 2021. (a) Malha deformada do perfil A-01, (b) Recalque no perfil A-01, (c) Malha deformada do perfil A-02, (d) Recalque no perfil A-02, (e) Malha deformada do perfil Masw-10, (f) Recalque no perfil Masw-10, (g) Malha deformada do perfil Masw-14, (h) Recalque no perfil Masw-14.

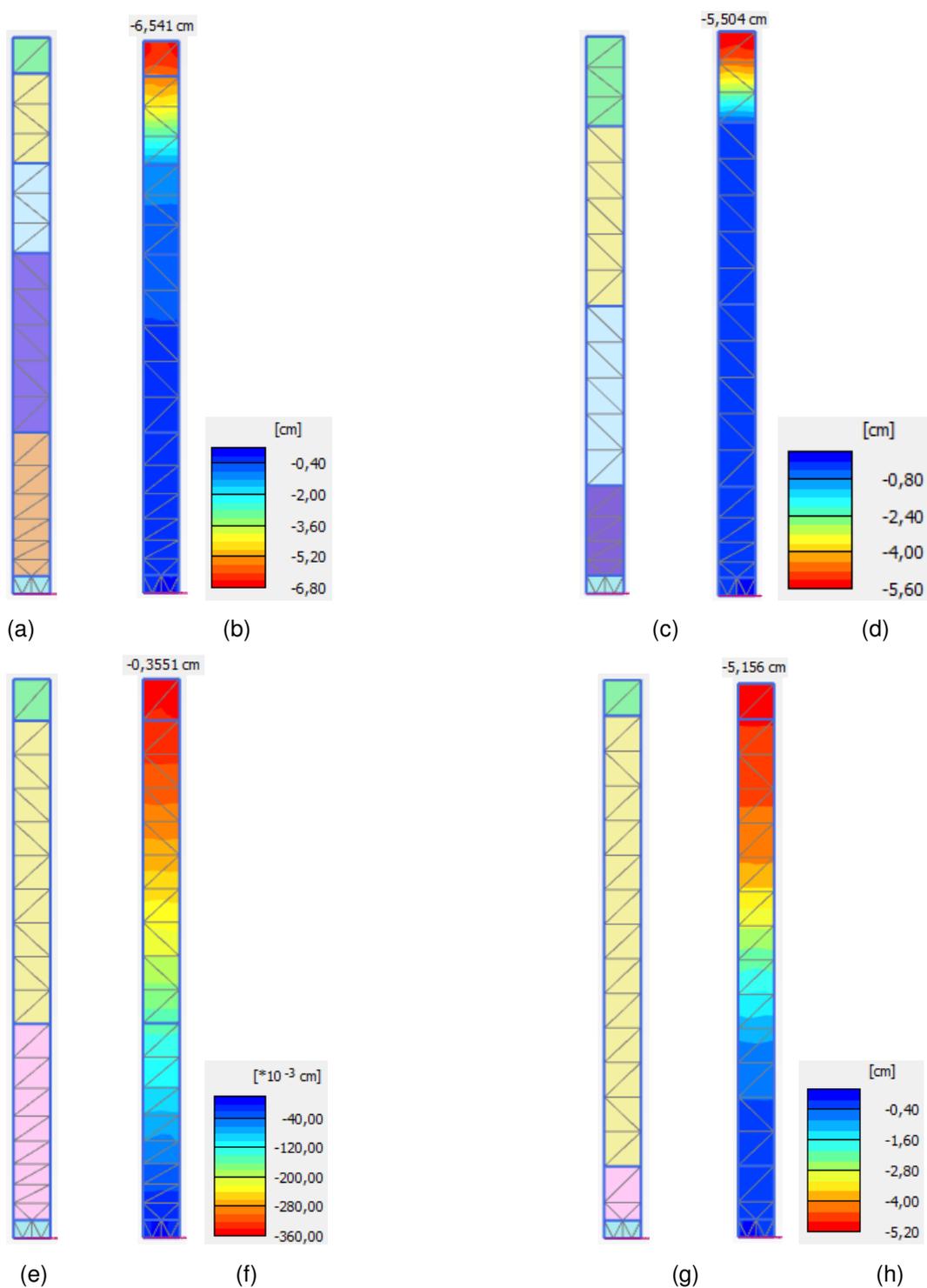


Figura 6.16 - Resultados numéricos para o terremoto de Cañete, 2022. (a) Malha deformada do perfil A-01, (b) Recalque no perfil A-01, (c) Malha deformada do perfil A-02, (d) Recalque no perfil A-02, (e) Malha deformada do perfil Masw-10, (f) Recalque no perfil Masw-10, (g) Malha deformada do perfil Masw-14, (h) Recalque no perfil Masw-14.

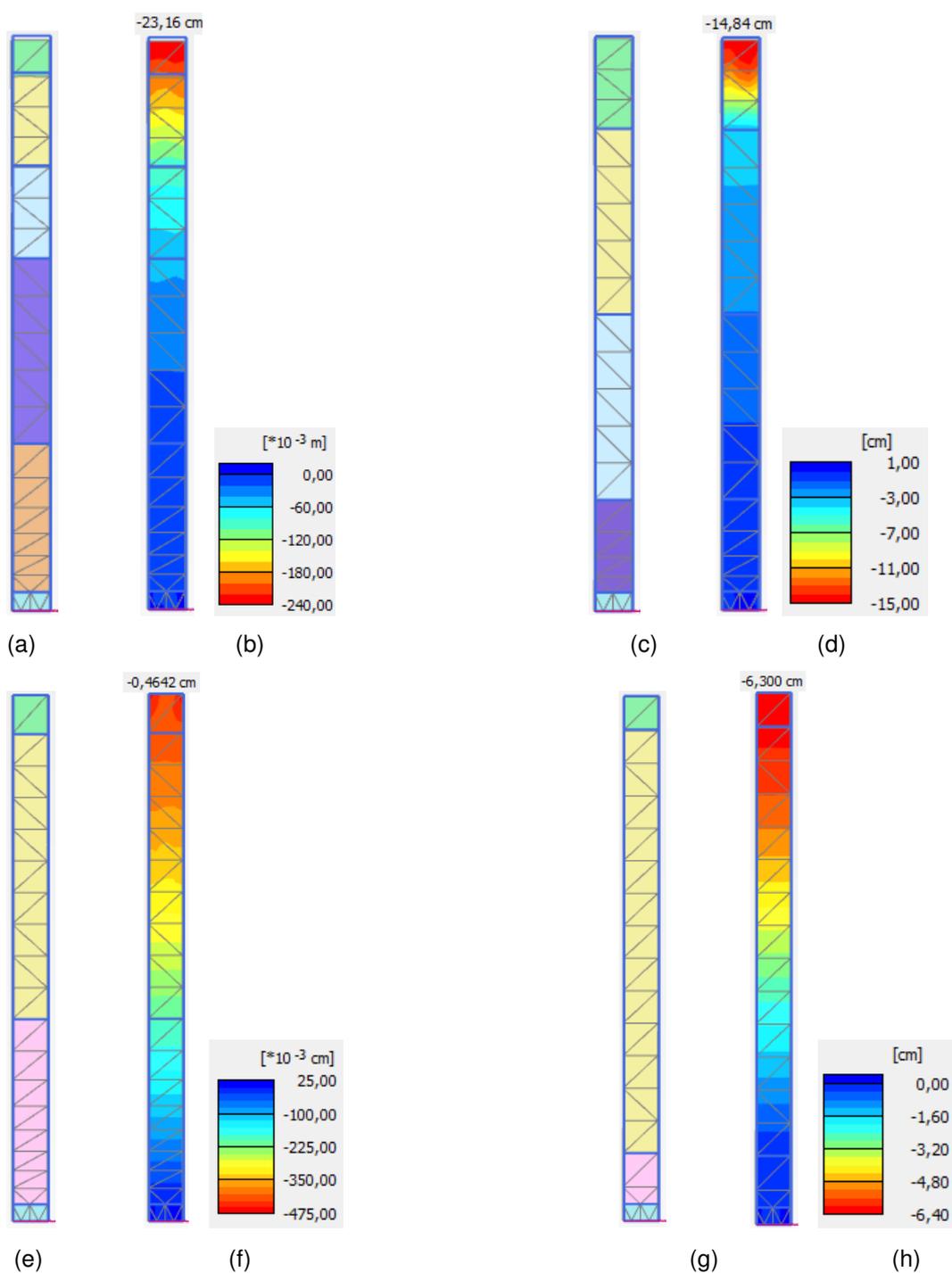


Figura 6.17 - Resultados numéricos para o terremoto de Lima, 1966. (a) Malha deformada do perfil A-01, (b) Recalque no perfil A-01, (c) Malha deformada do perfil A-02, (d) Recalque no perfil A-02, (e) Malha deformada do perfil Masw-10, (f) Recalque no perfil Masw-10, (g) Malha deformada do perfil Masw-14, (h) Recalque no perfil Masw-14.

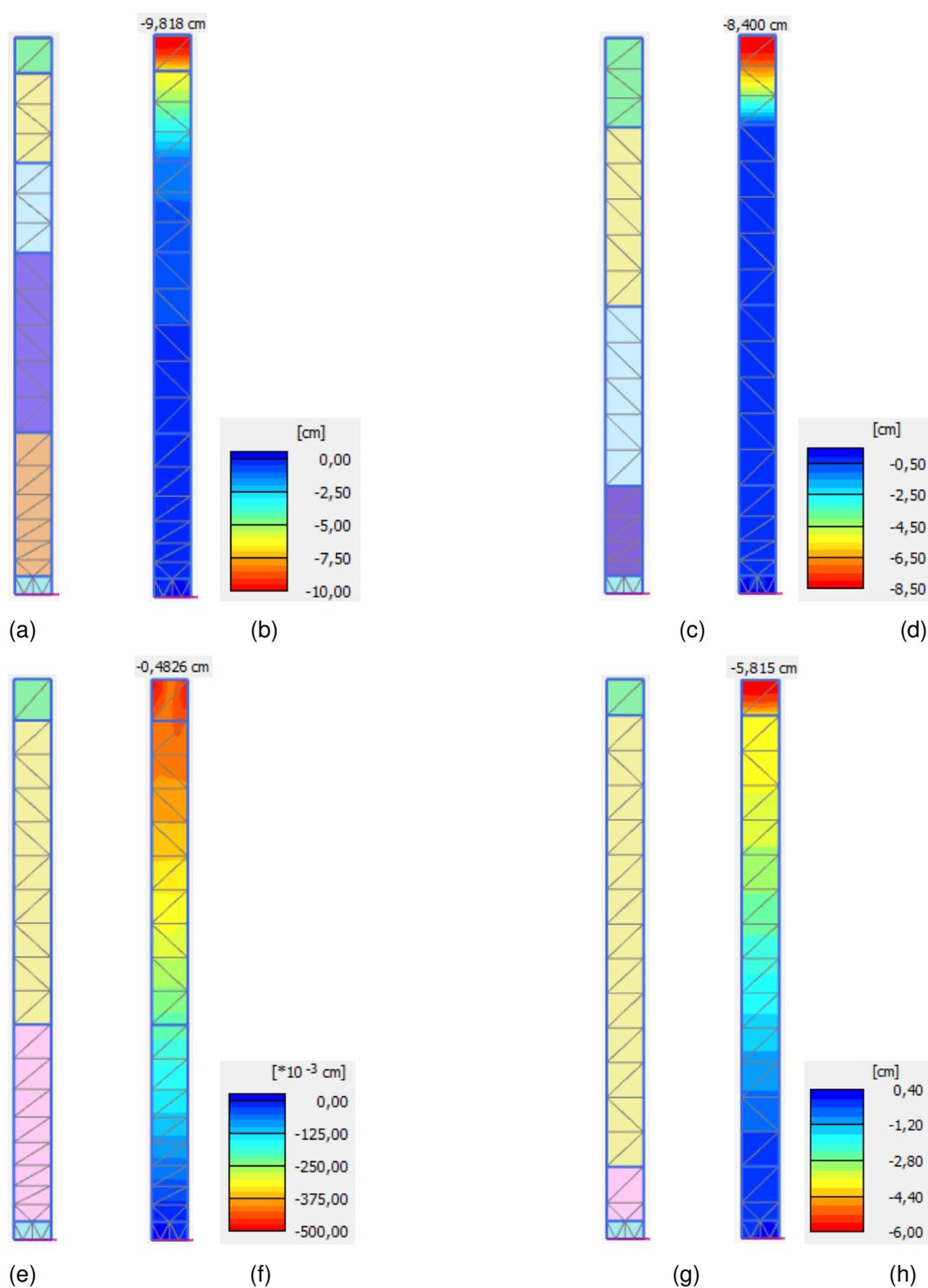


Figura 6.18 - Resultados numéricos para o terremoto de Lima, 1974. (a) Malha deformada do perfil A-01, (b) Recalque no perfil A-01, (c) Malha deformada do perfil A-02, (d) Recalque no perfil A-02, (e) Malha deformada do perfil Masw-10, (f) Recalque no perfil Masw-10, (g) Malha deformada do perfil Masw-14, (h) Recalque no perfil Masw-14.

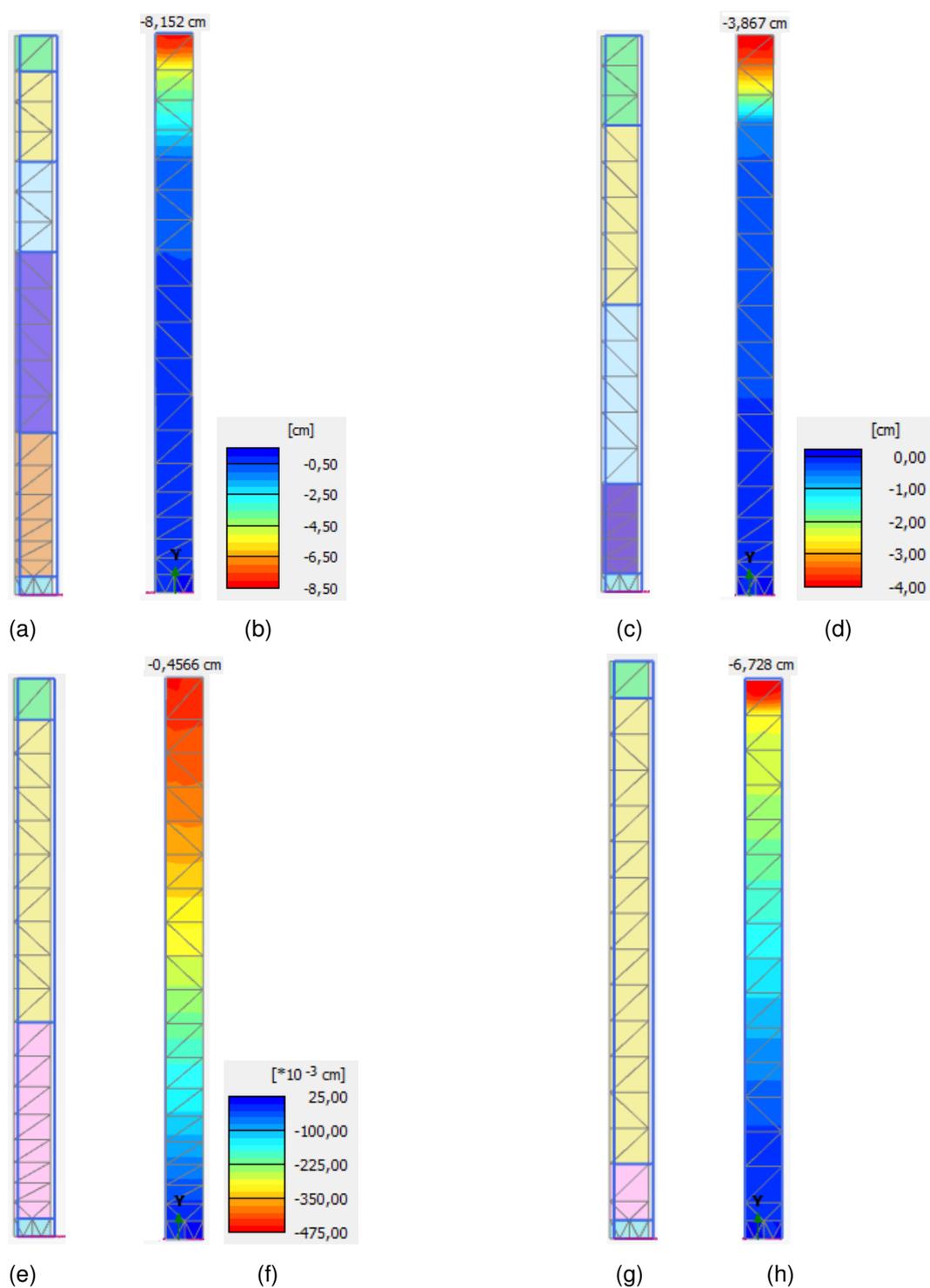


Figura 6.19 - Resultados numéricos para o terremoto de Moquegua, 2001. (a) Malha deformada do perfil A-01, (b) Recalque no perfil A-01, (c) Malha deformada do perfil A-02, (d) Recalque no perfil A-02, (e) Malha deformada do perfil Masw-10, (f) Recalque no perfil Masw-10, (g) Malha deformada do perfil Masw-14, (h) Recalque no perfil Masw-14.

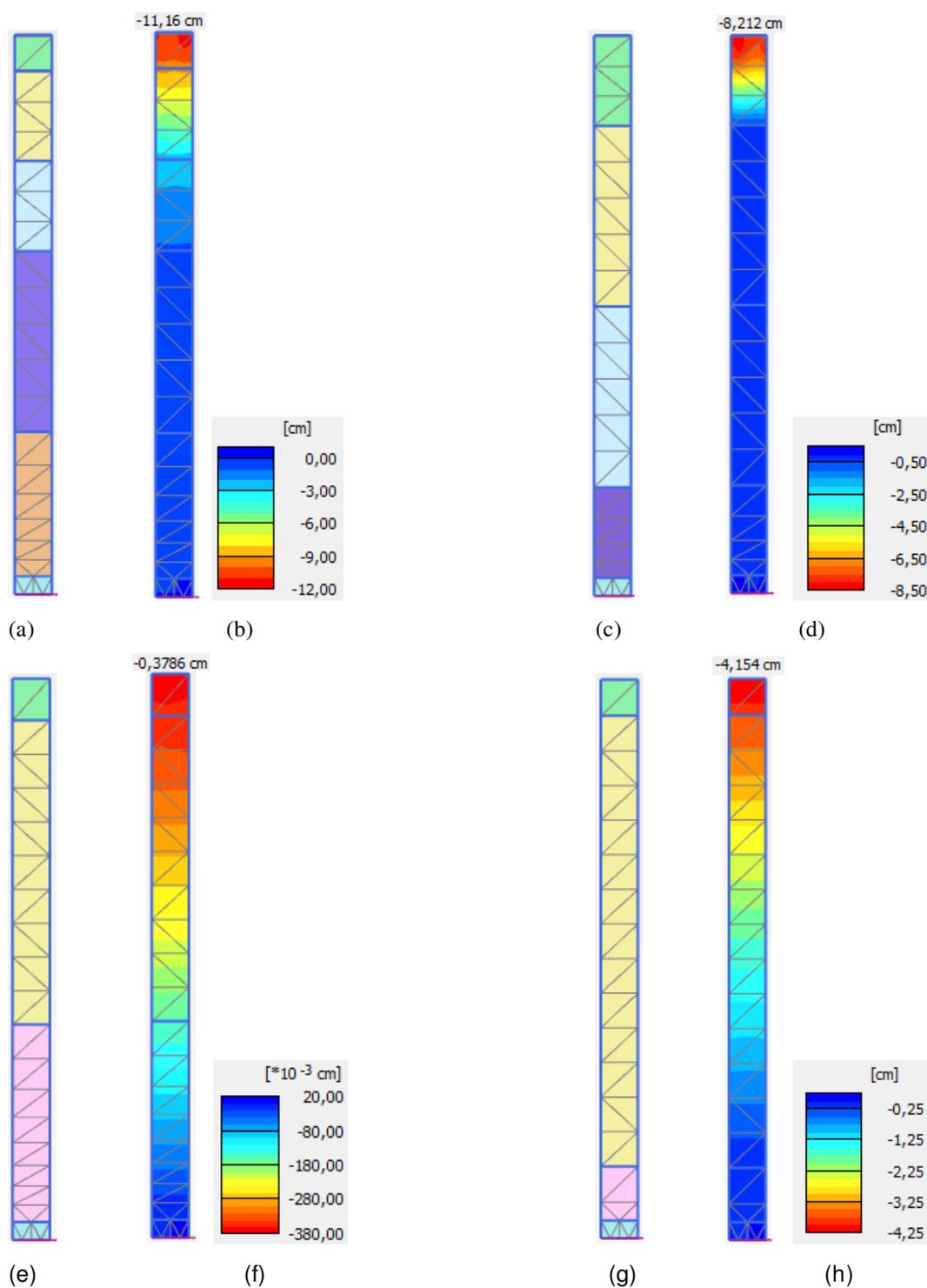


Figura 6.20 - Resultados numéricos para o terremoto de Moquegua, 2003. (a) Malha deformada do perfil A-01, (b) Recalque no perfil A-01, (c) Malha deformada do perfil A-02, (d) Recalque no perfil A-02, (e) Malha deformada do perfil Masw-10, (f) Recalque no perfil Masw-10, (g) Malha deformada do perfil Masw-14, (h) Recalque no perfil Masw-14.

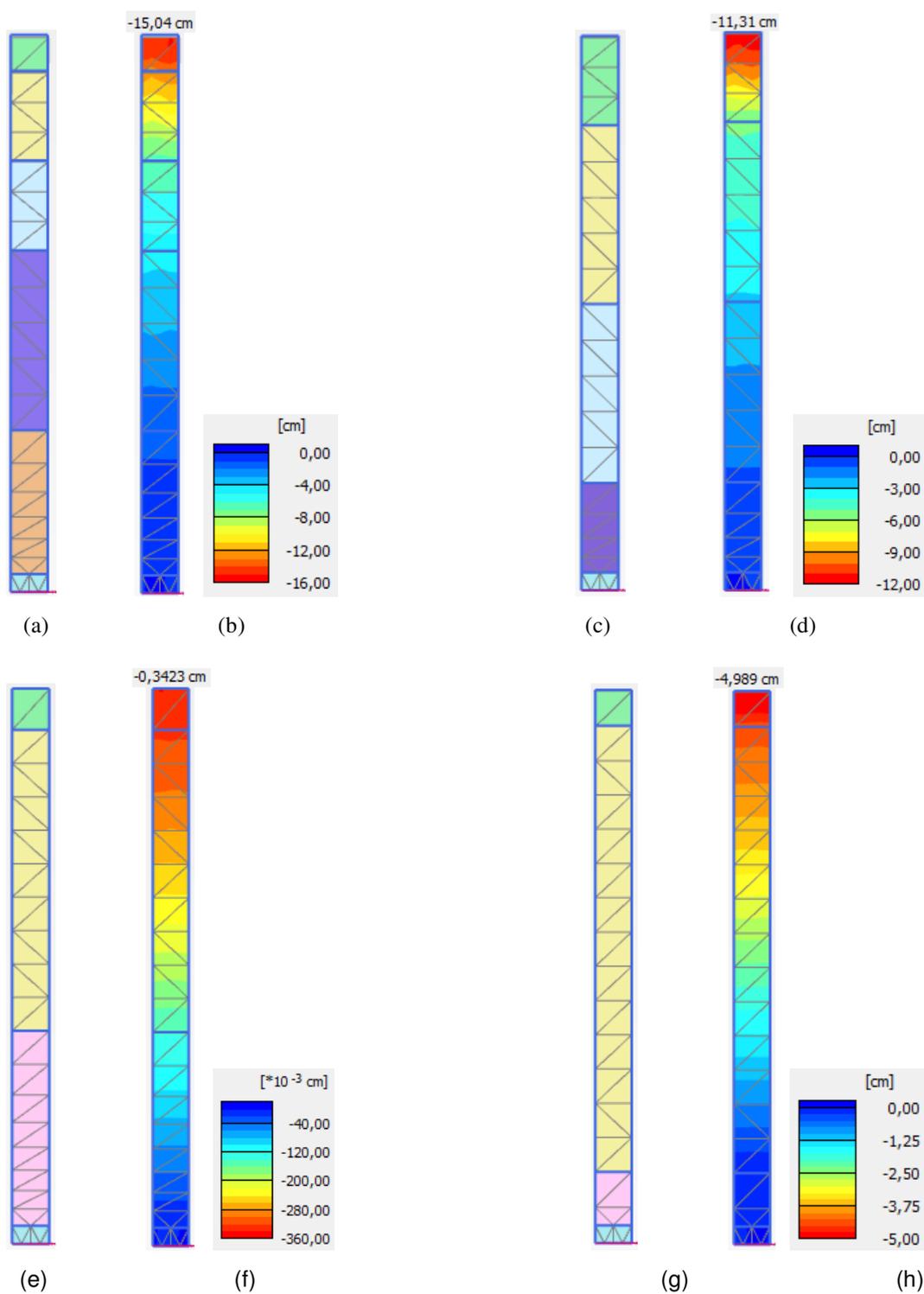


Figura 6.21 - Resultados numéricos para o terremoto de Tacna, 2010. (a) Malha deformada do perfil A-01, (b) Recalque no perfil A-01, (c) Malha deformada do perfil A-02, (d) Recalque no perfil A-02, (e) Malha deformada do perfil Masw-10, (f) Recalque no perfil Masw-10, (g) Malha deformada do perfil Masw-14, (h) Recalque no perfil Masw-14.

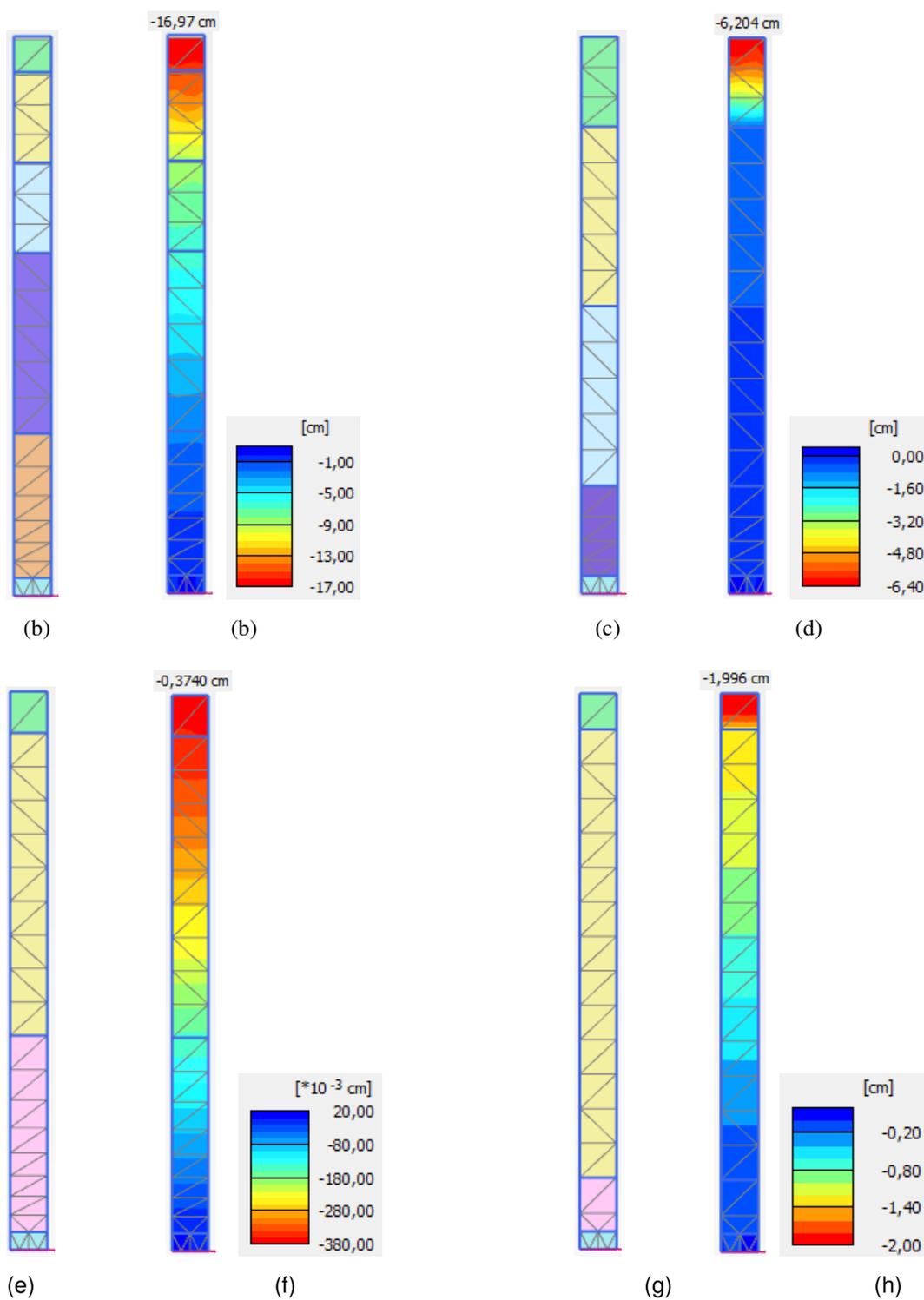


Figura 6.22 - Resultados numéricos para o terremoto de Tacna, 2012. (a) Malha deformada do perfil A-01, (b) Recalque no perfil A-01, (c) Malha deformada do perfil A-02, (d) Recalque no perfil A-02, (e) Malha deformada do perfil Masw-10, (f) Recalque no perfil Masw-10, (g) Malha deformada do perfil Masw-14, (h) Recalque no perfil Masw-14.

Das análises realizadas pelo método dos elementos finitos (MEF), determinou-se a média dos recalques para os diferentes perfis de solo: 11,74 cm para o perfil A-01, 8,45 cm para o perfil A-02, 0,42 cm para o perfil Masw-10 e 5,37 cm para o perfil Masw-14.

6.3.

Comparação entre os métodos simplificados e o método dos elementos finitos (MEF)

O método simplificado de Stewart & Whang (2003) em geral produziu as maiores estimativas de recalque (Tabela 6.2), tanto em relação aos demais métodos simplificados quanto em relação aos valores computados pelo método dos elementos finitos. Os resultados dos demais métodos simplificados, quando comparados entre si ou com os valores previstos numericamente, mostraram um erro relativo máximo geralmente inferior a 100%, o que pode ser considerado aceitável para previsão do recalque por densificação do solo arenoso.

Tabela 6.2 - Recalques obtidos com os métodos simplificados e pela análise numérica.

Terremoto	Método	Recalque (cm)			
		A-01	A-02	Masw-10	Masw-14
Ancash 1970	Tokimatsu & Seed (1987)	6,01	8,44	0,25	10,16
	Pradel (1998)	3,58	3,78	0,27	4,01
	Stewart & Whang (2003)	6,62	6,93	1,12	7,31
	Yi (2010)	5,46	5,14	0,36	7,46
	MEF	6,14	6,66	0,45	5,30
Arequipa 2001	Tokimatsu & Seed (1987)	25,68	23,84	0,33	10,52
	Pradel (1998)	26,87	25,40	0,35	13,57
	Stewart & Whang (2003)	35,02	18,82	0,59	20,05
	Yi (2010)	45,58	59,83	0,42	47,53
	MEF	21,26	18,45	0,43	8,10
Atico 2001	Tokimatsu & Seed (1987)	7,50	7,60	0,31	11,48
	Pradel (1998)	3,91	3,43	0,30	4,52
	Stewart & Whang (2003)	8,59	6,06	0,61	12,17
	Yi (2010)	5,80	4,83	0,43	10,07
	MEF	6,57	2,82	0,44	7,94

Terremoto	Método	Recalque (cm)			
		A-01	A-02	Masw-10	Masw-14
Cañete 2021	Tokimatsu & Seed (1987)	5,02	9,76	0,15	3,78
	Pradel (1998)	2,58	3,59	0,14	1,66
	Stewart & Whang (2003)	7,06	10,44	0,45	6,35
	Yi (2010)	3,73	4,13	0,16	1,84
	MEF	4,37	4,65	0,43	2,55
Cañete 2022	Tokimatsu & Seed (1987)	8,24	7,68	0,12	3,25
	Pradel (1998)	3,71	5,07	0,12	1,52
	Stewart & Whang (2003)	7,65	7,83	0,46	4,51
	Yi (2010)	5,46	5,49	0,13	1,54
	MEF	6,54	5,50	0,36	5,16
Lima 1966	Tokimatsu & Seed (1987)	22,89	18,71	0,32	3,89
	Pradel (1998)	16,61	15,84	0,34	2,05
	Stewart & Whang (2003)	28,15	19,44	0,65	5,00
	Yi (2010)	27,23	22,98	0,46	3,59
	MEF	23,16	16,88	0,46	6,30
Lima 1974	Tokimatsu & Seed (1987)	13,99	9,09	0,19	6,16
	Pradel (1998)	7,45	3,59	0,24	2,91
	Stewart & Whang (2003)	13,14	7,18	0,52	6,68
	Yi (2010)	11,63	4,79	0,31	4,84
	MEF	9,82	8,40	0,48	5,82
Moquegua 2001	Tokimatsu & Seed (1987)	9,24	6,46	0,27	9,17
	Pradel (1998)	5,12	2,86	0,27	3,51
	Stewart & Whang (2003)	10,72	5,67	0,58	7,73
	Yi (2010)	7,77	3,72	0,34	5,55
	MEF	8,15	3,87	0,46	6,73
Moquegua 2003	Tokimatsu & Seed (1987)	11,68	9,16	0,15	3,80
	Pradel (1998)	8,24	7,87	0,15	1,47
	Stewart & Whang (2003)	13,80	7,93	0,29	4,41

Terremoto	Método	Recalque (cm)			
		A-01	A-02	Masw-10	Masw-14
	Yi (2010)	12,19	8,76	0,17	1,63
	MEF	11,16	8,21	0,38	4,15
Tacna 2010	Tokimatsu & Seed (1987)	20,60	10,66	0,22	6,21
	Pradel (1998)	28,12	14,01	0,22	2,30
	Stewart & Whang (2003)	37,50	13,63	0,40	7,18
	Yi (2010)	42,47	15,67	0,25	2,64
	MEF	15,04	11,31	0,34	4,99
Tacna 2012	Tokimatsu & Seed (1987)	20,40	10,04	0,23	3,58
	Pradel (1998)	29,37	7,69	0,24	1,55
	Stewart & Whang (2003)	37,18	9,29	0,48	3,75
	Yi (2010)	44,51	8,86	0,27	1,82
	MEF	16,97	6,20	0,37	2,00

Nos resultados gerais da análise comparativa entre os métodos simplificados e o método de elementos finitos, observa-se que para o perfil A-1, a média do recalque foi de 16,00 cm, enquanto para o perfil A-2 foi de 8,45 cm. Por sua vez, os perfis Masw-10 e Masw-14 apresentaram médias de recalque de 0,42 cm e 5,37 cm, respectivamente.

Apesar das diferenças nos valores absolutos de recalque, há uma certa consistência relativa entre os métodos simplificados e o MEF. Por exemplo, o perfil de solo A-01 tende a apresentar os maiores recalques em ambos os métodos, enquanto o perfil Masw-10 exibe os recalques mais baixos.

Embora os métodos simplificados sejam mais rápidos e menos complexos computacionalmente do que o MEF, os resultados do MEF podem oferecer insights adicionais sobre o comportamento do solo e ajudar a calibrar os métodos simplificados. Portanto, a combinação de ambos os métodos pode fornecer uma abordagem abrangente e robusta para a análise de recalques induzidos por terremotos em solos arenosos.

Além disso, nota-se que o sismo de Arequipa em 2010 registra os recalques mais significativos para cada perfil, enquanto o sismo de Cañete em 2021 exibe os valores de recalque mais baixos. A partir dessa observação, pode-se inferir que

um sismo com as características do sismo de Arequipa na zona de estudo teria um impacto mais significativo na indução de recalques nos perfis de solo analisados. Por outro lado, um sismo com as características do sismo de Cañete, 2021 parece gerar menos deformações no solo.

7

Conclusões e sugestões

7.1.

Conclusões

A principal ênfase desta dissertação foi a avaliação dos recalques provocados por terremotos devido à densificação do solo. O estudo concentrou-se em quatro depósitos de solos arenosos situados no distrito de Ancón, Peru, região caracterizada por uma atividade sísmica significativa devido à sua localização em uma região tectônica de alta atividade sísmica. Nesse contexto, os terremotos de subducção de interfase são predominantes, tornando-a um cenário ideal para investigar os efeitos da agitação sísmica na densidade do solo e, por consequência, nos recalques induzidos.

A pesquisa adotou duas abordagens de análise distintas. A primeira consistiu na aplicação de métodos simplificados, com base nas formulações propostas por Tokimatsu & Seed (1987), Pradel (1998), Stewart & Whang (2003) e Yi (2010). Por sua vez, a segunda abordagem foi desenvolvida por meio de um modelo numérico em elementos finitos, empregando o modelo constitutivo PM4Sand, implementado no programa computacional PLAXIS 2D.

Para examinar os efeitos sísmicos, foram considerados onze sismos de projeto, os quais foram gerados por meio do ajuste espectral de sismos originais, tais como Ancash 1970, Arequipa 2001, Atico 2001, Cañete 2021, Cañete 2022, Lima 1966, Lima 1974, Moquegua 2001, Moquegua 2003, Tacna 2010 e Tacna 2012. Esses eventos foram selecionados com base na curva de ameaça sísmica para um período de retorno de 475 anos, previamente determinada por meio de uma análise probabilística de ameaça sísmica regional.

Quanto aos perfis de solos arenosos analisados, os perfis A-01 e Masw-14 foram classificados como solo tipo D, enquanto os perfis A-02 e Masw-10 foram categorizados como solo tipo C, conforme a designação do International Building Code (IBC, 2012). Essa classificação foi estabelecida com base na velocidade de propagação da onda S nos 30 metros iniciais do depósito.

Ao avaliar os métodos simplificados para previsão de recalque induzido por densificação do solo, observamos que o método proposto por Stewart & Whang (2003) tendeu a fornecer estimativas mais elevadas em comparação com os demais métodos simplificados e com os valores obtidos pelo método dos elementos finitos. No entanto, é importante ressaltar que, apesar dessa tendência, todos os métodos simplificados apresentaram um erro relativo máximo geralmente inferior a 100% quando comparados entre si ou com as previsões numéricas. Tal margem de erro pode ser considerada aceitável para previsões de recalque por densificação.

A análise comparativa dos métodos evidencia a variação nas estimativas de recalque, mesmo para os mesmos perfis de solo. Isso destaca a importância de considerar múltiplos métodos para obter uma compreensão abrangente do comportamento do solo sob carregamento sísmico.

Destaca-se ainda que os métodos simplificados de Pradel (1998) e Yi (2010) oferecem vantagens práticas significativas. Sua implementação numérica é simples e rápida, o que os torna mais acessíveis em comparação com os métodos de Tokimatsu & Seed (1987) e Stewart & Whang (2003), que exigem o uso de gráficos e tabelas para análise. Essa praticidade pode ser especialmente valiosa em cenários onde eficiência e agilidade são prioritárias.

Apesar das diferenças nos valores absolutos de recalque, há uma certa consistência relativa entre os métodos simplificados e o MEF. Por exemplo, o perfil de solo A-01 tende a apresentar os maiores recalques em ambos os métodos, enquanto o perfil Masw-10 exhibe os recalques mais baixos.

Embora os métodos simplificados sejam mais rápidos e menos complexos computacionalmente que o MEF, os resultados deste último podem oferecer insights adicionais sobre o comportamento do solo, além de auxiliar na calibração dos métodos simplificados. Assim, a combinação de ambos os métodos pode proporcionar uma abordagem abrangente e robusta para a análise de recalques induzidos por terremotos em solos arenosos.

Considerando as características e o desempenho dos diferentes métodos, podemos concluir que a escolha do método adequado dependerá das necessidades específicas de cada análise, bem como das considerações sobre precisão e praticidade.

7.2. Sugestões para futuras pesquisas

Para futuras investigações, sugere-se a realização de ensaios de campo e laboratório mais abrangentes, visando fornecer estimativas mais precisas dos parâmetros de solo essenciais, tais como G , G_{max} , ϵ_{15} e ϵ_{Nc} fundamentais para a estimativa precisa dos recalques nos métodos simplificados.

Além disso, uma sugestão pertinente é a inclusão dos valores de previsão da deformação volumétrica devido à compactação do solo nos métodos simplificados. Essa adição permitiria uma análise mais completa do comportamento dinâmico de taludes, baseados na analogia de Newmark (1965). Atualmente, as deformações previstas nesses métodos consideram apenas aquelas geradas por tensões cisalhantes, ignorando as contribuições da compactação do solo.

8

Referências bibliográficas

- ABRAHAMSON, N.A. **Non-stationary spectral matching**. Seismol. Res. Lett. (63)1, 30, 1992.
- AKI, K.; RICHARDS, P. G. Quantitative Seismology. University Science Books, 2002.
- AGUILAR, Z. **Análisis de peligro sísmico y estimado del movimiento sísmico de diseño**. Centro de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres, CISMID, 2001.
- ACEVEDO J., ANA B. **Seismological criteria for selecting and scaling real accelerograms for use in engineering analysis and design**. Dissertation Master Degree, European School of Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk, June, 2003.
- ALFARO CASTILLO, A. F. **Correlación entre el Valor N del Ensayo de Penetración Estándar y Velocidad de Ondas de Corte para Arcillas en Bogotá - Colombia**. Épsilon, 8(3), 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484:2020** - Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.
- BARD, P. Y. **Microtremor Measurements: A Tool for Site Effect Assessment**. Proceedings of the International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 1999.
- BEEN, K.; JEFFERIES, M. G. **A state parameter for sands**. Géotechnique, v. 35, n. 2, p. 99-112, 1985.
- BERNAL, I. **Características de la Sismicidad en la Región Sur del Perú**. Revista de Trabajos de Investigación, CNDG, IGP, pp. 69 – 80. Lima, Perú, 2000.
- BERROCAL J. **South American Seismotectonics from SAAS data**. submitted for the Degree of Doctor of Philosophy in the University of Ec 1974.
- BERROCAL J., DEZA E., SHIKIYA J. **Estudio de Sismicidad para el Proyecto de Derivación del Río Mantaro a Lima**. Informe del Instituto Geofísico del Perú a ELECTROPERU S.A., 1975.

- BOLT, B. A. **Inside the Earth. San Francisco, CA:** W.H. Freeman, 1982.
- BOLT, B. A. **Earthquakes and Geological Discovery.** Scientific American Library, 1993.
- BOMMER, J. J.; CROWLEY, H. **Comprehensive approach to managing earthquake risks: a case study from New Zealand.** Bulletin of Earthquake Engineering, v. 6, n. 2, p. 271-291, 2008.
- BOULANGER, R.W.; ZIOTOPOULOU, K. **Numerical modelling issues in predicting post liquefaction reconsolidation strains and settlements.** 10th International Conference on Urban Earthquake Engineering, 2013.
- BOULANGER, R. W.; ZIOTOPOULOU, K. **PM4Sand (Version 3): A sand plasticity model for earthquake engineering applications.** Center for Geotechnical Modeling Report No. UCD/CGM-15/01, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, Calif., 2015.
- BOULANGER, R. W.; ZIOTOPOULOU, K. **PM4Sand (Version 3.1): a sand plasticity model for earthquake engineering applications.** Report No. UCD/CGM-17/01, Center for Geotechnical Modeling, University of California at Davis, 2017.
- BOULANGER, R. W.; ZIOTOPOULOU, K. **On NDA practices for evaluating liquefaction effects.** In: Brandenberg, S. J.; Manzari, M. T. (Eds.). Proc., Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics V, Geotechnical Special Publication 290. ASCE, 2018.
- BRACEWELL, R. N. **The Fourier Transform and Its Applications.** McGraw-Hill, 1999.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Fluid Mechanics: Fundament Applications.** McGraw-Hill Education, 2013.
- CHEN, L.; ARDUINO, P. **Implementation, Verification, and Validation of the PM4Sand Model in OpenSees.** Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Washington. PEER Report No. 2021/02. Pacific Earthquake Engineering Research Center Headquarters na Universidade da Califórnia, Berkeley, abril de 2021.
- CORNELL, C. A. **Engineering Seismic Risk Analysis.** Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 86, No. 1A, 1996.
- DAFALIAS, Y. F.; MANZARI, M. T. **Simple plasticity sand model accounting for fabric change effects.** Journal of Engineering mechanics, v. 130, n. 6, p. 622-634, 2004.
- DEZA, E. **Estudio Preliminar Sobre las Zonas de Transición que Separan Posibles Regiones Sismotectónicas del Margen Occidental de**

- Sudamérica: Zona de Transición en el Perú.** I Congreso Nacional de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Lima, Perú, 1969.
- DEZA E.; CARBONELL C. **Regionalización Sismotectónica Preliminar del Perú.** IV Congreso Peruano de Geología, Lima, Perú, 1978.
- FOWLER, C. M. **The solid earth: an introduction to global geophysics.** Cambridge University Press, 2005.
- FUKUOKA, M. **Investigation Report of the Los Angeles earthquake.** Soil mechanics and foundation engineering. The Japanese Geotechnical Society, 19(6), 37-43, 1971.
- GONÇALVES, R. M.; ASSUMPÇÃO, M. **Sismicidade e Tectônica da América do Sul.** Editora Universidade de Brasília, 2004.
- GOOGLE. **Google Earth.** Versão 7.3.4.8248. Software. Disponível em: <https://www.google.com/earth/>. Acesso em: 13 maio 2023.
- HAMILTON, W. **Geological Evolution of the Andes.** Springer, 2013.
- HANCOCK, J., WATSON-LAMPREY, J., ABRAHAMSON, N. A., BOMMER, J. J., MARKATIS, A., MCCOY, E., MENDIS, R. **An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets.** J. Earthquake Engng, (10)1, 67–89, 2006.
- HASHASH, Y. M. A. **Nonlinear and Equivalent Linear Seismic Site Response of One-Dimensional Soil Columns.** Deepsoil 6.1. User Manual. June 22, 2016.
- HUDSON, D.E. **Reading and interpreting strong motion accelerograms.** Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, Pasadena, California, USA, 1979.
- IDRISS, I. M. **Soil Properties and their Correlations.** National Science Foundation, 1970.
- INTERNATIONAL BUILDING CODE (IBC). **International Code Council, Inc.,** 2012.
- ISACKS, B.; OLIVER, J.; SYKES, L. R. **Seismology and the New Global Tectonics.** Revista de Geofísica, vol. 75, n. 18, 15 de setembro de 1968.
- JUANG, C.H., JIANG T., ANDRUS R.D. **Assessing probability-based methods for liquefaction potential evaluation.** J. Geot. and Geoenv. Engrg., 128(7), 580-589, 2002.
- KAGAN, Y. Y. **Characteristics of Earthquake Occurrence: A Stochastic Point of View.** Pure and Applied Geophysics, v. 159, n. 11, p. 2347-2360, 2002.
- KAKLAMANOS, J. **Seismic Site Characterization and Engineering Site Response Analysis.** CRC Press, 2014.

- KALKAN, E.; KUNNATH, S. K. **A Method for Simulation of Time Histories of Earthquakes Compatible with Specific Response Spectra and Equivalent Lateral Force Procedure**. Earthquake Spectra, v. 23, n. 3, p. 599-617, 2007.
- KONRAD, J. M. **Interpretation of flat plate dilatometer tests in sands in terms of the state parameter**. Geotechnique, v. 38, n. 2, p. 263-277, 1988.
- KRAMER, S. L. **Geotechnical Earthquake Engineering**. Prentice Hall, New Jersey, USA, 1996.
- LAY, T.; WALLACE, T. C. **Modern Global Seismology**. Academic Press, 1995.
- LILHANAND, K. AND TSENG, W.S. **Generation of synthetic time histories compatible with multiple design response spectra**. Transactions of the 9th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Lausanne, K1, 105-110, 1987.
- LIU A.H., STEWART J.P., ABRAHAMSON N.A., MORIWAKI, Y. **Equivalent number of uniform stress cycles for soil liquefaction analysis**. J. Geotech. & Geoenv. Engrg. ASCE, 127 (12), 1017-1026, 2001.
- LOAYZA, F. HERRERA. **Modelagem do Comportamento Pós-Sismo de uma Barragem de Rejeito**. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), 2009.
- LOWRIE, W. **Fundamentals of geophysics**. Cambridge University Press, 2007.
- MACHARÉ, J., FENTON, C., MACHETTE, M., LAVENU, A., COSTA, C., DART, R. **Database and Map of Quaternary Faults and Folds of Peru and its Offshore Regions**. Open-File Report 03-451, US Geological Survey, U.S.A., 2003.
- MALLAT, S. **A Wavelet Tour of Signal Processing**. Academic Press, 1998.
- MATASOVIĆ, N., VUCETIC, M. **Cyclic characterization of liquefiable sands**. Journal of Geotechnical Engineering, 119(11), 1805–1822, 1993.
- MINSTER, B.; JORDAN, T. **Present Day Plate Motions**. J. geophys. Res., v. 83, 1978. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/JB083iB11p05331>.
- MUÑOZ PELÁEZ, A. **Comentarios a la norma peruana E.030 diseño sismorresistente**. Sencico. Lima, Peru, 2020.
- PARRA BASTIDAS, A. M. **Ottawa F-65 sand characterization**. PhD diss., University of California, Davis, 2016.
- PRADEL, D. **Procedure to Evaluate Earthquake-Induced Settlements in Dry Sandy Soils**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, abril de 1999.

- POMACHAGUA, O. **Características Generales de la Tectónica y Sismicidad de Perú**. Revista de Trabajos de Investigación, CNDG, IGP, pp. 96-100, 2000.
- RAMOS ARCE, J. Y. **Microzonificación Sísmica del Distrito de Ancón**. TCC, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, 2017.
- RAUCH, A. **Personal Communication**. University of Texas, 1998.
- SCHOFIELD, A. N.; WROTH, P. **Critical state soil mechanics**. London: McGraw-Hill, 1968.
- SEBRIER M., HUAMÁN D., BLANC J. L., MACHARÉ J., BONNOT D., CABRERA J. **Observaciones acerca de la Neotectónica del Perú**. Instituto Geofísico del Perú, 1982.
- SEED R.B., CETIN K.O., MOSS R.E.S., KAMMERER A.M., WU J., PESTANA J.M., RIEMER M.F., SANCIO R.B., BRAY R.B., KAYEN R.E., FARIS A. **Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering: A Unified and Consistent Framework**. Relatório No. EERC 2003-06, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 2003.
- SEED, H. B.; IDRIS, I. M. **Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis**. Report No. EERC 70-10. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1970.
- SEISMOSOFT LTD. **SeismoMatch's Help System**, 2016.
- SEISMOSOFT LTD. **SeismoSignal's Help System**, 2016.
- SHEARER, P. M. **Introduction to Seismology**. Cambridge University Press, 2009.
- SKINNER, B. J.; PORTER, S. C.; PARK, J. **Dynamic Earth: An Introduction to Physical Geology**. Wiley, 2004.
- STEIN, S.; WYSESSION, M. **An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure**. Blackwell Publishing, 2003.
- STEWART, J. P., BRAY, J. D., MCMAHON, D. J., KROPP, A. L. **Seismic performance of hillside fills**. Landslides under static and dynamic conditions: Analysis, monitoring, and mitigation, Geotechnical Special Publication No. 52, ASCE, Reston, Va., 76-95, 1995.
- STEWART J.P., SMITH P.M., WHANG D.H., BRAY J.D. **Documentation and analysis of field case histories of seismic compression during the 1994 Northridge, California earthquake**. Report No. PEER2002/09, Pacific Earthquake Engineering Research Center, U.C. Berkeley, October, 2002.

- STEWART, J. P.; WHANG, D. H. **Simplified procedure to estimate ground settlement from seismic compression in compacted soils**. Pacific Conference on Earthquake Engineering, Los Angeles, CA, USA, 2002.
- TARBUCK, E. J.; LUTGENS, F. K.; TASA, D. **Earth: An Introduction to P Geology**. Pearson, 2018.
- TAVERA H., BUFORN E., BERNAL I., ANTAYHUA Y., VILCAPOMA L. **The Arequipa (Peru) Earthquake of June 23, 2001**. Journal of Seismology, Vol. 6, 2002.
- TOKIMATSU, K., SEED, H. B. **Evaluation of settlements in sands due to earthquake shaking**. J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 113(8), 861-878, 1987.
- TURCOTTE, D. L., SCHUBERT. G. **Geodynamics**. Cambridge University Press, 2002.
- VASQUEZ PAREDES T. T. **Aplicación de Métodos Sísmicos: Vibraciones Naturales y Refracción de Microtremores para Caracterización de Sitio en Estudios de Ingeniería Civil**. Universidad Simón Bolívar. Sartenejas, 2008.
- VUCETIC, M.; DOBRY, R. **Stress-strain behavior of cohesionless soils during cyclic loading**. Journal of Geotechnical Engineering, v. 117, n. 1, p. 89-107, 1991.
- WANG, G.; XIE, Y. **Modified bounding surface hypoplasticity model for sands under cyclic loading**. Journal of Engineering Mechanics, v. 140, n. 1, p. 91-101, 2014.
- WHITE, F. M. **Fluid Mechanics**. McGraw-Hill Education, 2011.
- WOLF, J. P. **Foundations of Engineering Geology**. CRC Press, 2005.
- YI, F. **Procedure to Evaluate Seismic Settlement in Dry Sand Based on Shear Wave Velocity**. Proceedings of the 9th U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering. Compte Rendu de la 9ième Conférence Nationale Américaine et 10ième Conférence Canadienne de Génie Parasismique, Toronto, Ontario, Canadá. Paper No 760, 25-29 de julho de 2010.
- YOUD, T. L.; IDRIS, I. M. **Liquefaction Resistance of Soils**. Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. National Center for Earthquake Engineering Research, v. 127, n. 10, p. 817-833, 2001.

Apêndice A

Stewart & Whang (2003)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espezzura (m)	rd	Peso especifico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	$\gamma_{eff} \left(\frac{G_{eff}}{G_{max}} \right)$ (%)	γ (%)	$\epsilon_{C,M=7,5}$ (%)	$\epsilon_{C,M=7,5}$ (%)	$\epsilon_{C,M=7,5}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-10	1	318	2.3	1.000	17.636	40.563	181795.772	0.000059463	7.2309E-03	1.5600E-02	1.5600E-02	0.031	0.072
	2	575	16.8	1.000	20.854	390.917	702852.757	0.000148225	1.9640E-02	2.1000E-02	2.1000E-02	0.042	0.706
	3	843	10.9	0.954	23.239	644.224	1683476.337	0.000097292	1.1184E-02	1.5600E-02	1.5600E-02	0.031	0.340
													1.117

MASW-14 (Ancash 1970)

Tokimatsu & Seed (1987)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espezzura (m)	r_d	N	Peso especifico (KN/m ³)	σ_0 KN/m ²	σ_0 PSF	Gmax (psf)	$\gamma_{eff} \left(\frac{G_{eff}}{G_{max}} \right)$ (%)	γ_{eff} (%)	$\epsilon_{C,M=7,5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2 \epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-14	1	195	2	1	10	15.356	30.713	641.453	1190478.83	1.44E-04	6.00E-04	0.17	0.186	0.372	0.744
	2	318	25	0.95	20	17.636	471.611	9849.808	3635915.438	6.86E-04	1.80E-03	0.17	0.186	0.372	9.299
	3	410	3	0.9	38	18.951	528.464	11037.201	6494686.674	4.08E-04	5.00E-04	0.018	0.020	0.039	0.118
															10.161

Pradel (1998)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espezzura (m)	r_d	peso especifico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	τ_{av} (KN/m ²)	G_0 (kpa)	γ (%)	N	$\epsilon_{C,M=7,5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2 \epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-14	1	195	2	0.996	15.356	30.713	8.150	59523.942	2.8201E-02	10	6.4790E-02	0.0723	0.1447	0.2894
	2	318	25	0.598	17.636	471.611	70.464	181795.772	6.5003E-02	20	6.5003E-02	0.0726	0.1452	3.6294
	3	410	3	0.990	18.951	528.464	71.582	324734.334	3.0908E-02	38	1.4307E-02	0.0160	0.0320	0.0959
														4.0147

Yi (2010)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espezzura (m)	rd	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	τ_{av} (KN/m ²)	G ₀ (Kpa)	γ (%)	N	Dr (%)	$\epsilon_{C,M=7,5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-14	1	195	2	0.995	15.356	30.713	8.141	59523.942	2.8963E-02	10	43.8529	8.6793E-02	0.095	0.190	0.380
	2	318	25	0.748	17.636	471.611	94.006	181795.772	1.0553E-01	20	62.01737	1.2492E-01	0.137	0.273	6.833
	3	410	3	0.988	18.951	528.464	139.138	324734.334	7.4950E-02	38	85.48504	3.7541E-02	0.041	0.082	0.246
															7.459

Stewart & Whang (2003)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espezzura (m)	r_d	peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	G ₀ (Kpa)	$\gamma_{eff}(\frac{G_{eff}}{G_{max}})$ (%)	γ (%)	$\epsilon_{C,M=7,5}$ (%)	$\epsilon_{C,M=7,5}$ (%)	$2\epsilon_{C,M=7,5}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-14	1	195	2	1.004	15.356	30.713	59523.942	0.000138027	3.2831E-02	3.1200E-02	3.9000E-02	0.078	0.156
	2	318	25	0.970	17.636	471.611	181795.772	0.000670820	1.2000E-01	1.0000E-01	1.2500E-01	0.25	6.25
	3	410	3	0.957	18.951	528.464	324734.334	0.000414832	1.2424E-01	1.2000E-01	1.5000E-01	0.3	0.9
													7.306

A-01 (Arequipa 2001)

Tokimatsu & Seed (1987)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espezzura (m)	r_d	N	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 KN/m ²	σ_0 PSF	Gmax (psf)	$\gamma_{eff}(\frac{G_{eff}}{G_{max}})$ (%)	γ_{eff} (%)	$\epsilon_{C,M=7,5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-01	1	170	2	1	5	14.772	29.543	617.024	870337.200	3.32E-04	1.00E-02	3	3.672	7.344	14.688
	2	260	5	0.999	11	16.659	112.838	2356.677	2295920.324	4.80E-04	2.60E-03	0.51	0.624	1.248	6.242
	3	330	5	0.99	22	17.822	201.947	4217.756	3956762.508	4.94E-04	1.20E-03	0.1	0.122	0.245	1.224
	4	360	10	0.9	28	18.266	384.608	8032.705	4826266.155	7.01E-04	1.80E-03	0.12	0.147	0.294	2.938
	5	440	8	0.9	48	19.333	539.275	11263.001	7630888.706	6.22E-04	1.30E-03	0.03	0.037	0.073	0.588
															25.680

Pradel (1998)

Stewart & Whang (2003)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espezzura (m)	r_d	Peso especifico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	$\gamma_{eff} \left(\frac{G_{eff}}{G_{max}} \right)$ (%)	γ (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$2\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	Recalque (cm)
A-02	1	200	5	1.002	15.467	77.334	63065.884	0.000575285	9.7150E+00	1.5000E+00	1.8750E+00	3.75	18.75
	2	450	10	1.002	19.457	271.902	401630.636	0.000317492	8.8605E-02	1.2000E-03	1.5000E-03	0.003	0.03
	3	600	10	0.979	21.107	482.973	774572.311	0.000285706	5.4736E-02	1.0000E-03	1.2500E-03	0.0025	0.025
	4	750	5	0.956	22.483	595.388	1289162.096	0.000206646	2.9994E-02	1.0000E-03	1.2500E-03	0.0025	0.0125
													18.8175

MASW-10 (Arequipa 2001)

Tokimatsu & Seed (1987)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espezzura (m)	r_d	N	peso especifico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	σ_0 (psf)	$\gamma_{eff} \left(\frac{G_{eff}}{G_{max}} \right)$ (%)	γ_{eff} (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-10	1	318	2.3	1	20	17.636	40.563	847.169	1.09E-04	1.70E-04	0.018	0.0141	0.0282	0.0647
	2	575	16.8	0.95	48	20.854	390.917	8164.462	2.58E-04	4.10E-04	0.008	0.0063	0.0125	0.2102
	3	843	10.9	0.9	50	23.239	644.224	13454.891	1.68E-04	1.70E-04	0.003	0.0023	0.0047	0.0511
														0.3261

Pradel (1998)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espezzura (m)	r_d	Peso especifico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	τ_{av} (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	γ (%)	N	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-10	1	318	2.3	0.994	17.636	40.563	18.876	181795.772	1.5467E-02	20	1.5467E-02	0.0121	0.0241	0.0555
	2	575	16.8	0.767	20.854	390.917	131.413	702852.757	2.5432E-02	48	8.8948E-03	0.0069	0.0139	0.2331
	3	843	10.9	0.887	23.239	644.224	153.240	1683476.337	1.1758E-02	50	3.9156E-03	0.0031	0.0061	0.0666
														0.3551

Yi (2010)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espessura (m)	rd	peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	τ_{av} (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	γ (%)	N	Dr (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-10	1	318	2.3	0.9798	17.6359	40.5627	18.6000	181795.7719	1.5306E-02	20	62.017	1.8119E-02	0.0142	0.0283	0.0652
	2	575	16.8	0.7079	20.8544	390.9166	129.5108	702852.7573	2.5007E-02	48	96.077	9.1590E-03	0.0072	0.0143	0.2407
	3	843	10.9	0.8248	23.2392	644.2237	248.6812	1683476.3371	1.9717E-02	50	98.058	6.8370E-03	0.0053	0.0107	0.1166
0.4224															

Stewart & Whang (2003)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espessura (m)	τ_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	$\gamma_{eff}(\frac{G_{eff}}{G_{max}})$ (%)	γ (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-10	1	318	2.3	1.000	17.636	40.563	181795.772	0.000104423	8.0000E-03	8.0000E-03	7.2000E-03	0.014	0.033
	2	575	16.8	1.000	20.854	390.917	702852.757	0.000260297	3.0000E-02	1.2000E-02	1.0800E-02	0.022	0.363
	3	843	10.9	0.954	23.239	644.224	1683476.337	0.000170855	2.1000E-02	1.0000E-02	9.0000E-03	0.018	0.196
0.592													

MASW-14 (Arequipa 2001)

Tokimatsu & Seed (1987)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espessura (m)	N	τ_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 KN/m ²	σ_0 PSF	Gmax (psf)	$\gamma_{eff}(\frac{G_{eff}}{G_{max}})$ (%)	γ_{eff} (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-14	1	195	2	10	1	15.356	30.713	641.453	1190478.83	2.52E-04	9.50E-03	1.9	2.326	4.651	9.302
	2	318	25	20	0.95	17.636	471.611	9849.808	3635915.438	1.20E-03	1.60E-04	0.019	0.023	0.047	1.163
	3	410	3	38	0.9	18.951	528.464	11037.201	6494686.674	7.16E-04	1.60E-04	0.007	0.009	0.017	0.051
10.517															

Pradel (1998)

MASW-14 (Atico 2001)

Tokimatsu & Seed (1987)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espezzura (m)	r_d	N	peso específico (KN/m ³)	σ_0 KN/m ²	σ_0 PSF	Gmax (psf)	$\gamma_{eff} \left(\frac{G_{eff}}{G_{max}} \right)$	γ_{eff}	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-14	1	195	2	1	10	15.35647248	30.71294497	641.4532	1190478.83	1.44E-04	2.4*10 ⁻⁴	0.065	0.07956	0.15912	0.31824
	2	318	25	0.95	20	17.63593729	471.6113771	9849.808	3635915.438	6.86E-04	1.8*10 ⁻³	0.18	0.22032	0.44064	11.016
	3	410	3	0.9	38	18.95088527	528.4640329	11037.2	6494686.674	4.08E-04	6.0*10 ⁻⁴	0.02	0.02448	0.04896	0.14688
															11.48112

Pradel (1998)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espezzura (m)	r_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	τ_{av} (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	γ (%)	N	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-14	1	195	2	0.996	15.356	30.713	8.150	59523.942	2.8201E-02	10	6.4790E-02	0.0814	0.1628	0.3256
	2	318	25	0.598	17.636	471.611	70.464	181795.772	6.5003E-02	20	6.5003E-02	0.0817	0.1633	4.0831
	3	410	3	0.990	18.951	528.464	71.582	324734.334	3.0908E-02	38	1.4307E-02	0.0180	0.0359	0.1078
														4.5166

Yi (2010)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espezzura (m)	rd	peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	τ_{av}	G_0 (Kpa)	γ (%)	N	Dr (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-14	1	195	2	0.999	15.356	30.713	8.178	59523.942	0.029	10	43.8569	8.7663E-02	0.1073	0.2146	0.429
	2	318	25	0.831	17.636	471.611	104.402	181795.772	0.129	20	62.01737	1.5299E-01	0.1873	0.3745	9.363
	3	410	3	0.996	18.951	528.464	140.215	324734.334	0.076	38	85.48504	3.7993E-02	0.0465	0.0930	0.279
															10.071

Stewart & Whang (2003)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espe ssura (m)	r_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	$\gamma_{eff}(\frac{G_{eff}}{G_{max}})$	γ (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-14	1	195	2	1.004	15.356	30.713	59523.942	0.000138009	3.2821E-02	4.0000E-02	4.4000E-02	0.088	0.176
	2	318	25	0.970	17.636	471.611	181795.772	0.000670762	2.5000E-01	2.0000E-01	2.2000E-01	0.44	11
	3	410	3	0.956	18.951	528.464	324734.334	0.000414795	1.2421E-01	1.5000E-01	1.6500E-01	0.33	0.99
													12.166

A-01 (Cañete 2021)

Tokimatsu & Seed (1987)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espe ssura (m)	r_d	N	peso específico (KN/m ³)	σ_0 KN/m ²	σ_0 PSF	Gmax (psf)	$\gamma_{eff}(\frac{G_{eff}}{G_{max}})$	γ_{eff} (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-01	1	170	2	1	5	14.772	29.543	617.024	870337.200	2.17E-04	2.60E-03	1.2	0.720	1.440	2.880
	2	260	5	0.999	11	16.659	112.838	2356.677	2295920.324	3.13E-04	8.50E-04	0.18	0.108	0.216	1.080
	3	330	5	0.99	22	17.822	201.947	4217.756	3956762.508	3.22E-04	6.70E-04	0.058	0.035	0.070	0.348
	4	360	10	0.9	28	18.266	384.608	8032.705	4826266.155	4.58E-04	8.00E-04	0.05	0.030	0.060	0.600
	5	440	8	0.9	48	19.333	539.275	11263.001	7630888.706	4.06E-04	6.00E-04	0.012	0.007	0.014	0.115
															5.023

Pradel (1998)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espe ssura (m)	r_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	τ_{av} (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	γ (%)	N	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-01	1	170	2	0.996	14.772	29.543	8.987	43516.860	9.3077E-02	5	4.9127E-01	0.2858	0.5716	1.1431
	2	260	5	0.974	16.659	112.838	32.747	114796.016	5.9859E-02	11	1.2266E-01	0.0714	0.1427	0.7135
	3	330	5	0.974	17.822	201.947	53.425	197838.125	4.3703E-02	22	3.8980E-02	0.0227	0.0454	0.2268
	4	360	10	0.903	18.266	384.608	77.286	241313.308	5.0513E-02	28	3.3732E-02	0.0196	0.0392	0.3925
	5	440	8	0.936	19.333	539.275	83.736	381544.435	3.0737E-02	48	1.0750E-02	0.0063	0.0125	0.1001
														2.5759

Yi (2010)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espesura (m)	rd	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	τ_{av} (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	γ (%)	N	Dr (%)	$\epsilon_{C,M=7,5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-01	1	170	2	0.9776	14.7716	29.5433	8.8236	43516.8600	9.3108E-02	5	31.009	7.0633E-01	0.4238	0.8476	1.6952
	2	260	5	0.9183	16.6590	112.8383	31.6569	114796.0162	5.7153E-02	11	45.993	1.5074E-01	0.0904	0.1809	0.9044
	3	330	5	0.9183	17.8218	201.9472	56.6565	197898.1254	4.8466E-02	22	65.044	5.0493E-02	0.0303	0.0606	0.3030
	4	360	10	0.7992	18.2661	384.6080	93.9076	241313.3078	6.8151E-02	28	73.380	5.1395E-02	0.0308	0.0617	0.6167
	5	440	8	0.8485	19.3334	539.2754	139.7881	381544.4353	5.9318E-02	48	96.077	2.1725E-02	0.0130	0.0261	0.2086
															3.7279

Stewart & Whang (2003)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espesura (m)	T_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	$\gamma_{eff}(\frac{G_{eff}}{G_{max}})$ (%)	γ (%)	$\epsilon_{C,M=7,5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-01	1	170	2	1.009	14.772	29.543	43516.860	0.000209296	1.3567E-01	1.5000E-01	1.0800E-01	0.2160	0.4320
	2	260	5	1.007	16.659	112.838	114796.016	0.000302274	1.4318E-01	1.8000E-01	1.2960E-01	0.2592	1.2960
	3	330	5	1.006	17.822	201.947	197898.125	0.000313763	1.0267E-01	1.2500E-01	9.0000E-02	0.1800	0.9000
	4	360	10	0.997	18.266	384.608	241313.308	0.000485378	2.5608E-01	2.2000E-01	1.5840E-01	0.3168	3.1680
	5	440	8	0.960	19.333	539.275	381544.435	0.000414546	1.2259E-01	1.1000E-01	7.9200E-02	0.1584	1.2672
													7.0632

A-02 (Cañete 2021)

Tokimatsu & Seed (1987)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espesura (m)	N	T_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 KN/m ²	σ_0 PSF	Gmax (psf)	$\gamma_{eff}(\frac{G_{eff}}{G_{max}})$ (%)	$\epsilon_{C,M=7,5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-02	1	200	5	10	1	15.467	77.334	1615.164	1261316.681	4.33E-04	1.00E-02	0.96	1.92	9.6
	2	450	10	48	0.99	19.457	271.902	5678.796	8032612.710	2.37E-04	3.80E-04	0.0042	0.0084	0.084
	3	600	10	50	0.95	21.107	482.973	10087.104	15491446.224	2.09E-04	2.80E-04	0.0045	0.0054	0.054
	4	750	5	50	0.9	22.483	595.388	12434.939	25783241.915	1.47E-04	1.80E-04	0.0018	0.0036	0.018
														9.756

Pradel (1998)

MASW-10 (Cañete 2021)

Tokimatsu & Seed (1987)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espezzura (m)	r _d	N	Peso específico (KN/m ³)	σ ₀ (KN/m ²)	σ ₀ PSF	Gmax (psf)	γ _{eff} (G _{max})	γ _{eff} (%)	ε _{C,M=7.5} (%)	ε _{C,M} (%)	2ε _{C,M} (%)	Recalque (cm)
Masw-10	1	318	2.3	1	20	17.636	40.563	847.169	3635915.438	6.21E-05	9.60E-05	0.009	0.0054	0.0108	0.0248
	2	575	16.8	0.95	48	20.854	390.917	8164.462	14057055.15	1.47E-04	2.00E-04	0.005	0.0030	0.0060	0.1008
	3	843	10.9	0.9	50	23.239	644.224	13454.891	33669526.74	9.58E-05	1.00E-04	0.0019	0.0011	0.0023	0.0249
															0.1505

Pradel (1998)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espezzura (m)	r _d	Peso específico (KN/m ³)	σ ₀ (KN/m ²)	τ _{av} (KN/m ²)	G ₀ (Kpa)	γ (%)	N	ε _{C,M=7.5} (%)	ε _{C,M} (%)	2ε _{C,M} (%)	Recalque (cm)
Masw-10	1	318	2.3	0.994	17.636	40.563	10.749	181795.772	7.4870E-03	20	7.4870E-03	0.0044	0.0087	0.0200
	2	575	16.8	0.767	20.854	390.917	74.833	702852.757	1.3541E-02	48	4.7358E-03	0.0028	0.0055	0.0926
	3	843	10.9	0.887	23.239	644.224	87.262	1683476.337	6.5494E-03	50	2.1811E-03	0.0013	0.0025	0.0277
														0.1403

Yi (2010)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espezzura (m)	rd	Peso específico (KN/m ³)	σ ₀ (KN/m ²)	τ _{av} (KN/m ²)	G ₀ (Kpa)	γ (%)	N	Dr (%)	ε _{C,M=7.5} (%)	ε _{C,M} (%)	2ε _{C,M} (%)	Recalque (cm)
Masw-10	1	318	2.3	0.9724	17.6359	40.5627	10.5112	181795.7719	7.3213E-03	20	62.017	8.6666E-03	0.0052	0.0104	0.0239
	2	575	16.8	0.6390	20.8544	390.9166	66.5723	702852.7573	1.1924E-02	48	96.077	4.3672E-03	0.0026	0.0052	0.0880
	3	843	10.9	0.7769	23.2392	644.2237	133.3862	1683476.3371	1.0134E-02	50	98.058	3.5139E-03	0.0021	0.0042	0.0460
															0.1579

Stewart & Whang (2003)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espesura (m)	r_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	$\gamma_{eff}(\frac{G_{eff}}{G_{max}})$	γ	$\epsilon_{C,M=7,5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-10	1	318	2.3	1.000	17.636	40.563	181795.772	0.000059463	7.2310E-03	1.000E-04	7.3000E-05	0.0001	0.0003
	2	575	16.8	1.000	20.854	390.917	702852.757	0.000148225	1.9640E-02	1.2000E-02	8.7600E-03	0.0175	0.2943
	3	843	10.9	0.954	23.239	644.224	1683476.337	0.000097293	1.1184E-02	1.0000E-02	7.3000E-03	0.0146	0.1591
													0.4538

MASW-14 (Cañete 2021)

Tokimatsu & Seed (1987)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espesura (m)	r_d	N	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	σ_0 PSF	Gmax (psf)	$\gamma_{eff}(\frac{G_{eff}}{G_{max}})$	γ_{eff} (%)	$\epsilon_{C,M=7,5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-14	1	195	2	1	10	15.356	30.713	641.453	1190478.83	1.23E-04	2.40E-04	0.062	0.0372	0.0744	0.1488
	2	318	25	0.95	20	17.636	471.611	9849.808	3635915.438	5.85E-04	1.20E-03	0.12	0.072	0.144	3.6
	3	410	3	0.9	38	18.951	528.464	11037.201	6494686.674	3.48E-04	5.00E-04	0.01	0.006	0.012	0.036
															3.7848

Pradel (1998)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espesura (m)	r_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	τ_{av} (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	γ (%)	N	$\epsilon_{C,M=7,5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-14	1	195	2	0.996	15.356	30.713	6.957	59523.942	2.0659E-02	10	4.7462E-02	0.0276	0.0552	0.1104
	2	318	25	0.598	17.636	471.611	60.152	181795.772	5.1850E-02	20	5.1850E-02	0.0302	0.0603	1.5081
	3	410	3	0.990	18.951	528.464	61.106	324734.334	2.5704E-02	38	1.1899E-02	0.0069	0.0138	0.0415
														1.6601

Yi (2010)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espezzura (m)	rd	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	τ_{av} (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	γ (%)	N	Dr (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-14	1	195	2	0.978	15.356	30.713	6.831	59523.942	2.0391E-02	10	43.8529	6.1105E-02	0.0367	0.0733	0.1467
	2	318	25	0.502	17.636	471.611	53.867	181795.772	4.4815E-02	20	62.01737	5.3060E-02	0.0318	0.0637	1.5915
	3	410	3	0.959	18.951	528.464	115.349	324734.334	5.6888E-02	38	85.48504	2.8494E-02	0.0171	0.0342	0.1026
															1.8407

Stewart & Whang (2003)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espezzura (m)	r_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	$\gamma_{eff} \left(\frac{G_{eff}}{G_{max}} \right)$ (%)	γ (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-14	1	195	2	1.0042	15.3565	30.7129	59523.942	0.000117879	2.2701E-02	1.2000E-02	8.6400E-03	0.0173	0.0346
	2	318	25	0.9706	17.6359	471.6114	181795.772	0.000572824	1.5000E-01	1.7000E-01	1.2240E-01	0.2448	6.1200
	3	410	3	0.9568	18.9509	528.4640	324734.334	0.000354233	8.3757E-02	4.5000E-02	3.2400E-02	0.0648	0.1944
													6.3490

A-01 (Cañete 2022)

Tokimatsu & Seed (1987)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espezzura (m)	N	r_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	σ_0 PSF	Gmax (psf)	$\gamma_{eff} \left(\frac{G_{eff}}{G_{max}} \right)$ (%)	γ_{eff} (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-01	1	170	2	5	1	14.772	29.543	617.024	870337.200	2.67E-04	1.00E-02	3	1.410	2.820	5.640
	2	260	5	11	0.999	16.659	112.838	2356.677	2295970.324	3.87E-04	1.20E-03	0.3	0.141	0.282	1.410
	3	330	5	22	0.99	17.822	201.947	4217.756	3956762.508	3.98E-04	9.20E-04	0.075	0.035	0.071	0.353
	4	360	10	28	0.9	18.266	384.608	8032.705	4826266.155	5.65E-04	1.10E-03	0.075	0.035	0.071	0.705
	5	440	8	48	0.9	19.333	539.275	11263.001	7630888.706	5.01E-04	9.00E-04	0.017	0.008	0.016	0.128
															8.235

Pradel (1998)

Yi (2010)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espessura (m)	rd	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	τ_{arp} (KN/m ²)	G ₀ (Kpa)	γ (%)	N	Dr (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-10	1	318	2.3	0.9671	17.6359	40.5627	11.7290	181795.7719	8.3382E-03	20	62.017	9.8703E-03	0.0046	0.0093	0.0213
	2	575	16.8	0.5940	20.8544	390.9166	69.4237	702852.7573	1.2472E-02	48	96.077	4.5680E-03	0.0021	0.0043	0.0721
	3	843	10.9	0.7444	23.2392	644.2237	143.3921	1683476.3371	1.0932E-02	50	98.058	3.7907E-03	0.0018	0.0036	0.0388
															0.1323

Stewart & Whang (2003)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espessura (m)	r_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	G ₀ (Kpa)	$\gamma_{eff}(\frac{G_{eff}}{G_{max}})$ (%)	γ (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-10	1	318	2.3	1.000	17.636	40.563	181795.772	0.000066714	8.3999E-03	1.0000E-04	7.2000E-05	0.0001	0.0003
	2	575	16.8	1.000	20.854	390.917	702852.757	0.000166301	2.3104E-02	1.2500E-02	9.0000E-03	0.0180	0.3024
	3	843	10.9	0.954	23.239	644.224	1683476.337	0.000109158	1.2808E-02	1.0000E-02	7.2000E-03	0.0144	0.1570
													0.4597

MASW-14 (Cañete 2022)

Tokimatsu & Seed (1987)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espessura (m)	r_d	N	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 KN/m ²	σ_0 PSF	Gmax (psf)	$\gamma_{eff}(\frac{G_{eff}}{G_{max}})$ (%)	γ_{eff} (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-14	1	195	2	1	10	15.35647248	30.71294497	641.4532	1190478.83	1.40E-04	3.80E-04	0.09	0.0423	0.0846	0.1692
	2	318	25	0.95	20	17.63593729	471.6113771	9849.808	3635915.438	6.69E-04	1.30E-03	0.13	0.0611	0.1222	3.055
	3	410	3	0.9	38	18.95088527	528.4640329	11037.2	6494686.674	3.98E-04	5.10E-04	0.01	0.0047	0.0094	0.0282
															3.2524

Pradel (1998)

Stewart & Whang (2003)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espezzura (m)	τ_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	$\gamma_{eff} \left(\frac{G_{eff}}{G_{max}} \right)$ (%)	γ (%)	$\epsilon_{C,M=7,5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-01	1	170	2	1.008	14.772	29.543	43516.860	0.000293663	7.7694E-01	1.5000E+00	1.5900E+00	3.18	6.36
	2	260	5	1.006	16.659	112.838	114796.016	0.000424217	6.2286E-01	4.5000E-01	4.7700E-01	0.954	4.77
	3	330	5	1.006	17.822	201.947	197838.125	0.000440358	3.4088E-01	3.1000E-01	3.2860E-01	0.6572	3.286
	4	360	10	0.996	18.266	384.608	241313.308	0.000681218	7.0000E-01	4.0000E-01	4.2400E-01	0.848	8.48
	5	440	8	0.960	19.333	539.275	381544.435	0.000581795	3.6195E-01	3.1000E-01	3.2860E-01	0.6572	5.2576
													28.1536

A-02 (Lima 1966)

Tokimatsu & Seed (1987)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espezzura (m)	τ_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	σ_0 PSF	Gmax (psf)	$\gamma_{eff} \left(\frac{G_{eff}}{G_{max}} \right)$ (%)	γ_{eff} (%)	$\epsilon_{C,M=7,5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-02	1	200	5	1	15.467	77.334	1615.164	1261316.681	5.16E-04	1.00E-02	1.6	1.8336	3.6672	18.3360
	2	450	10	0.99	19.457	271.902	5678.796	8032612.71	2.82E-04	4.50E-04	0.008	0.0092	0.0183	0.1834
	3	600	10	0.95	21.107	482.973	10087.104	15491446.22	2.49E-04	3.20E-04	0.0065	0.0074	0.0149	0.1490
	4	750	5	0.9	22.483	595.388	12434.939	25783241.92	1.75E-04	2.00E-04	0.004	0.0046	0.0092	0.0458
														18.7142

Pradel (1998)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espezzura (m)	τ_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	τ_{av} (KN/m ²)	C_0 (kpa)	γ (%)	N	$\epsilon_{C,M=7,5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-02	1	200	5	0.9738	15.4669	77.3345	30.3502	63065.8340	5.7134E-01	10	1.3126E+00	1.5391	3.0783	15.3913
	2	450	10	0.9029	19.4568	271.9022	88.2351	401630.6355	3.1414E-02	48	1.0987E-02	0.0126	0.0252	0.2518
	3	600	10	0.9029	21.1071	482.9732	116.4200	774572.3112	1.9891E-02	50	6.6240E-03	0.0076	0.0152	0.1518
	4	750	5	0.9738	22.4830	595.3881	121.9536	1289162.0958	1.2181E-02	50	4.0566E-03	0.0046	0.0093	0.0465
													15.8414	

Yi (2010)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espessura (m)	rd	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	τ_{av} (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	γ (%)	N	Dr (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-02	1	200	5	0.978	15.467	77.334	30.493	63065.834	6.4899E-01	10	43.8529	1.9448E+00	2.2288	4.4575	22.2875
	2	450	10	0.938	19.457	271.902	102.790	401630.636	3.8682E-02	48	96.07689	1.4167E-02	0.0162	0.0325	0.3247
	3	600	10	0.938	21.107	482.973	182.584	774572.311	3.3506E-02	50	98.05807	1.1618E-02	0.0133	0.0266	0.2663
	4	750	5	0.978	22.483	595.388	234.759	1289162.096	2.4816E-02	50	98.05807	8.6051E-03	0.0099	0.0197	0.0986
															22.9771

Stewart & Whang (2003)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espessura (m)	τ_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	$\gamma_{eff}(\frac{G_{eff}}{G_{max}})$ (%)	γ (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-02	1	200	5	1.0024	15.4669	77.3345	63065.834	0.000495385	3.2023E+00	1.5000E+00	1.8750E+00	3.75	18.75
	2	450	10	1.0021	19.4568	271.9022	401630.636	0.000273396	6.1427E-02	1.5000E-02	1.8750E-02	0.0375	0.375
	3	600	10	0.9791	21.1071	482.9732	774572.311	0.000246024	4.1450E-02	1.2000E-02	1.5000E-02	0.03	0.3
	4	750	5	0.9561	22.4830	595.3881	1289162.096	0.000177945	2.4131E-02	1.0000E-03	1.2500E-03	0.0025	0.0125
													19.4375

MASW-10 (Lima 1966)

Tokimatsu & Seed (1987)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espessura (m)	τ_d	N	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	σ_0 PSF	Gmax (psf)	$\gamma_{eff}(\frac{G_{eff}}{G_{max}})$ (%)	γ_{eff} (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-10	1	318	2.3	1	20	17.636	40.563	847.16868	3635915.438	7.27E-05	1.20E-04	0.012	0.014	0.028	0.063
	2	575	16.8	0.95	48	20.854	390.917	8164.462	14057055.15	1.72E-04	2.20E-04	0.0047	0.005	0.011	0.181
	3	843	10.9	0.9	50	23.239	644.224	13454.891	33669526.74	1.12E-04	1.40E-04	0.0029	0.003	0.007	0.072
															0.317

Pradel (1998)

Stewart & Whang (2003)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espessura (m)	r_d	Peso específico (KN/m ³)	(KN/m ²)	(kPa)	$\gamma_{eff} \left(\frac{G_{eff}}{G_{max}} \right)$	(%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-01	1	170	2	1.008	14.772	29.543	43516.860	0.000244729	2.8104E-01	4.2000E-01	4.2000E-01	0.84	1.68
	2	260	5	1.006	16.659	112.838	114796.016	0.000353524	2.6445E-01	2.2000E-01	2.2000E-01	0.44	2.2
	3	330	5	1.006	17.822	201.947	197838.125	0.000366975	1.6932E-01	1.7000E-01	1.7000E-01	0.34	1.7
	4	360	10	0.996	18.266	384.608	2411313.308	0.000567697	4.7197E-01	2.5000E-01	2.5000E-01	0.5	5
	5	440	8	0.960	19.333	539.275	381544.435	0.000484842	1.9298E-01	1.6000E-01	1.6000E-01	0.32	2.56
													13.14

A-02 (Lima 1974)

Tokimatsu & Seed (1987)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espessura (m)	r_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	σ_0 (kPa)	Gmax (psf)	$\gamma_{eff} \left(\frac{G_{eff}}{G_{max}} \right)$ (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-02	1	200	5	1	15.467	77.334	1615.164	1261316.681	3.66E-04	3.20E-03	0.850	0.886	1.771
	2	450	10	0.99	19.457	271.902	5678.796	8032612.71	2.00E-04	3.00E-04	0.006	0.006	0.013
	3	600	10	0.95	21.107	482.973	10087.1	15491446.22	1.77E-04	2.05E-04	0.004	0.004	0.008
	4	750	5	0.9	22.483	595.388	12434.94	25783241.92	1.24E-04	1.40E-04	0.003	0.003	0.006
													9.095

Pradel (1998)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espessura (m)	r_d	Peso específico (KN/m ³)	(KN/m ²)	(kPa)	(%)	N	$\epsilon_{C,M}$ (%)	ϵ_C (%)	$2\epsilon_C$ (%)	Recalque (cm)
A-02	1	200	5	0.974	15.467	77.334	63065.834	1.3610E-01	10	3.1267E-01	0.332	0.663	3.317
	2	450	10	0.903	19.457	271.902	401630.636	2.0669E-02	48	7.2289E-03	0.008	0.015	0.151
	3	600	10	0.903	21.107	482.973	774572.311	1.3682E-02	50	4.5564E-03	0.005	0.009	0.095
	4	750	5	0.974	22.483	595.388	1289162.096	8.5057E-03	50	2.8326E-03	0.003	0.006	0.030
													3.592

Yi (2010)

Yi (2010)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espessura (m)	rd	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	τ_{av} (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	γ (%)	N	Dr (%)	$\epsilon_{C,M=7,5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-10	1	318	2.3	0.9905	17.6359	40.5627	9.9242	181795.7719	6.8483E-03	20	62.017	8.1067E-03	0.0084	0.0169	0.0389
	2	575	16.8	0.8194	20.8544	390.9166	79.1183	702852.7573	1.4364E-02	48	96.077	5.2610E-03	0.0055	0.0110	0.1842
	3	843	10.9	0.8984	23.2392	644.2237	142.9595	1683476.3371	1.0897E-02	50	98.058	3.7786E-03	0.0039	0.0079	0.0858
															0.3089

Stewart & Whang (2003)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espessura (m)	r_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	$\gamma_{eff}(\frac{G_{eff}}{G_{max}})$ (%)	γ (%)	$\epsilon_{C,M=7,5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-10	1	318	2.3	1.000	17.636	40.563	181795.772	0.000055112	6.5720E-03	1.0000E-04	1.0100E-04	0.00020	0.00046
	2	575	16.8	1.000	20.854	390.917	702852.757	0.000137379	1.7719E-02	1.2000E-02	1.2120E-02	0.02424	0.40723
	3	843	10.9	0.954	23.239	644.224	1683476.337	0.000090173	1.0243E-02	5.0000E-03	5.0500E-03	0.01010	0.11009
													0.51779

MASW-14 (Lima 1974)

Tokimatsu & Seed (1987)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espessura (m)	r_d	N	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 KN/m ²	σ_0 PSF	G_{max} (psf)	$\gamma_{eff}(\frac{G_{eff}}{G_{max}})$ (%)	γ_{eff} (%)	$\epsilon_{C,M=7,5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-14	1	195	2	1	10	15.356	30.713	641.4532	1190478.83	1.19E-04	3.05E-04	0.075	0.078	0.156	0.313
	2	318	25	0.95	20	17.636	471.611	9849.808	3635915.438	5.69E-04	1.03E-03	0.11	0.115	0.229	5.731
	3	410	3	0.9	38	18.951	528.464	11037.2	6494686.674	3.38E-04	4.40E-04	0.018	0.019	0.038	0.113
															6.156

Pradel (1998)

A-01 (Moquegua 2001)

Tokimatsu & Seed (1987)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espezzura (m)	N	r _d	Peso específico (KN/m ³)	σ ₀ (KN/m ²)	σ ₀ PSF	G _{max} (psf)	Y _{eff} ($\frac{G_{eff}}{G_{max}}$)	Y _{eff} (%)	ε _{C,M=7,5} (%)	ε _{C,M} (%)	2ε _{C,M} (%)	Recalque (cm)
A-01	1	170	2	5	1	14.772	29.543	617.024	870337.200	2.30E-04	3.00E-03	1.4	1.350	2.699	5.398
	2	260	5	11	0.999	16.659	112.838	2356.677	2295920.324	3.33E-04	1.05E-03	0.21	0.202	0.405	2.024
	3	330	5	22	0.99	17.822	201.947	4217.756	3956762.508	3.43E-04	7.00E-04	0.054	0.052	0.104	0.521
	4	360	10	28	0.9	18.266	384.608	8032.705	4826266.155	4.87E-04	8.10E-04	0.057	0.055	0.110	1.099
	5	440	8	48	0.9	19.333	539.275	11263.001	7630888.706	4.32E-04	7.00E-04	0.013	0.013	0.025	0.201
															9.243

Pradel (1998)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espezzura (m)	r _d	Peso específico (KN/m ³)	σ ₀ (KN/m ²)	T _{av} (KN/m ²)	G ₀ (Kpa)	γ (%)	N	ε _{C,M=7,5} (%)	ε _{C,M} (%)	2ε _{C,M} (%)	Recalque (cm)
A-01	1	170	2	0.996	14.772	29.543	9.560	43516.860	1.1771E-01	5	6.2130E-01	0.6068	1.2136	2.4272
	2	260	5	0.974	16.659	112.838	34.837	114796.016	6.8470E-02	11	1.4030E-01	0.1370	0.2741	1.3703
	3	330	5	0.974	17.822	201.947	56.835	197838.125	4.8159E-02	22	4.2954E-02	0.0420	0.0839	0.4195
	4	360	10	0.903	18.266	384.608	82.220	241313.308	5.5210E-02	28	3.6869E-02	0.0360	0.0720	0.7202
	5	440	8	0.936	19.333	539.275	89.081	381544.435	3.3098E-02	48	1.1576E-02	0.0113	0.0226	0.1809
														5.1181

Yi (2010)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espesura (m)	rd	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	τ_{av} (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	γ (%)	N	Dr (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-01	1	170	2	0.990	14.772	29.543	9.507	43516.860	1.2418E-01	5	31.009	9.4208E-01	0.9082	1.8163	3.6327
	2	260	5	0.958	16.659	112.838	35.131	114796.016	7.1873E-02	11	46.993	1.8956E-01	0.1827	0.3655	1.8273
	3	330	5	0.958	17.822	201.947	62.873	197838.125	5.7803E-02	22	65.044	6.0221E-02	0.0581	0.1161	0.5805
	4	360	10	0.889	18.266	384.608	111.160	241313.308	9.0916E-02	28	73.380	6.8563E-02	0.0661	0.1322	1.3219
	5	440	8	0.918	19.333	539.275	160.974	381544.435	7.2975E-02	48	96.077	2.6727E-02	0.0258	0.0515	0.4122
															7.7747

Stewart & Whang (2003)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espesura (m)	τ_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	$\gamma_{eff}(\frac{G_{eff}}{G_{max}})$ (%)	γ (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-01	1	170	2	1.008	14.772	29.543	43516.860	0.000222499	1.7769E-01	2.0000E-01	1.9600E-01	0.392	0.784
	2	260	5	1.006	16.659	112.838	114796.016	0.000321405	1.7982E-01	2.2000E-01	2.1560E-01	0.431	2.156
	3	330	5	1.006	17.822	201.947	197838.125	0.000333632	1.2366E-01	1.3000E-01	1.2740E-01	0.255	1.274
	4	360	10	0.996	18.266	384.608	241313.308	0.000516117	3.2162E-01	2.2000E-01	2.1560E-01	0.431	4.312
	5	440	8	0.960	19.333	539.275	381544.435	0.000440791	1.4520E-01	1.4000E-01	1.3720E-01	0.274	2.195
													10.721

A-02 (Moquegua 2001)

Tokimatsu & Seed (1987)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espesura (m)	τ_d	N	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	σ_0 PSF	Gmax (psf)	$\gamma_{eff}(\frac{G_{eff}}{G_{max}})$ (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-02	1	200	5	1	10	15.467	77.334	1615.164	1261316.681	3.50E-04	2.80E-03	0.65	0.627	1.253
	2	450	10	0.99	48	19.457	271.902	5678.796	8032612.710	1.91E-04	2.80E-04	0.0051	0.005	0.098
	3	600	10	0.95	50	21.107	482.973	10087.104	15491446.224	1.69E-04	1.95E-04	0.0034	0.003	0.066
	4	750	5	0.9	50	22.483	595.388	12434.939	25783241.915	1.18E-04	1.40E-04	0.0028	0.003	0.005
														6.457

Pradel (1998)

MASW-10 (Moquegua 2001)

Tokimatsu & Seed (1987)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espezzura (m)	r_d	N	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	σ_0 PSF	Gmax (psf)	$\gamma_{eff} \left(\frac{G_{eff}}{G_{max}} \right)$ (%)	γ_{eff} (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-10	1	318	2.3	1	20	17.636	40.563	847.1687	3635915.438	6.97E-05	1.10E-04	0.01	0.010	0.019	0.044
	2	575	16.8	0.95	48	20.854	390.917	8164.462	14057055.15	1.65E-04	2.20E-04	0.005	0.005	0.010	0.162
	3	843	10.9	0.9	50	23.239	644.224	13454.89	33669526.74	1.08E-04	1.30E-04	0.0029	0.003	0.006	0.061
															0.267

Pradel (1998)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espezzura (m)	r_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	τ_{av} (KN/m ²)	G_0 (kpa)	γ (%)	N	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-10	1	318	2.3	0.994	17.636	40.563	12.060	181795.772	8.5824E-03	20	8.5824E-03	0.0084	0.0168	0.0386
	2	575	16.8	0.767	20.854	390.917	83.959	702852.757	1.5343E-02	48	5.3661E-03	0.0052	0.0105	0.1761
	3	843	10.9	0.887	23.239	644.224	97.903	1683476.337	7.3734E-03	50	2.4555E-03	0.0024	0.0048	0.0523
														0.2669

Yi (2010)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espezzura (m)	rd	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	τ_{av} (KN/m ²)	G_0 (kpa)	γ (%)	N	Dr (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-10	1	318	2.3	0.9873	17.6359	40.5627	11.9743	181795.7719	8.5493E-03	20	62.017	1.0120E-02	0.0098	0.0195	0.0449
	2	575	16.8	0.7842	20.8544	390.9166	91.6632	702852.7573	1.6880E-02	48	96.077	6.1824E-03	0.0060	0.0119	0.2003
	3	843	10.9	0.8757	23.2392	644.2237	168.6753	1683476.3371	1.2975E-02	50	98.058	4.4992E-03	0.0043	0.0087	0.0946
															0.3397

Stewart & Whang (2003)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espesura (m)	r_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	$\gamma_{eff} \left(\frac{G_{eff}}{G_{max}} \right)$ (%)	γ (%)	$\epsilon_{C,M=7,5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-10	1	318	2.3	1.000	17.636	40.563	181795.772	0.000066714	8.3999E-03	1.0000E-03	9.0000E-04	0.002	0.004
	2	575	16.8	1.000	20.854	390.917	702852.757	0.000166301	2.3104E-02	1.2500E-02	1.1250E-02	0.023	0.378
	3	843	10.9	0.954	23.239	644.224	1683476.337	0.000109157	1.2808E-02	1.0000E-02	9.0000E-03	0.018	0.196
													0.578

MASW-14 (Moquegua 2001)

Tokimatsu & Seed (1987)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espesura (m)	r_d	N	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	σ_0 PSF	Gmax (psf)	$\gamma_{eff} \left(\frac{G_{eff}}{G_{max}} \right)$ (%)	γ_{eff} (%)	$\epsilon_{C,M=7,5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-14	1	195	2	1	10	15.356	30.713	641.453	1190478.83	1.44E-04	3.95E-04	0.095	0.092	0.183	0.366
	2	318	25	0.95	20	17.636	471.611	9849.808	3635915.438	6.86E-04	1.80E-03	0.18	0.174	0.347	8.676
	3	410	3	0.9	38	18.951	528.464	11037.201	6494686.674	4.08E-04	6.10E-04	0.022	0.021	0.042	9.170

Pradel (1998)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espesura (m)	r_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	τ_{av} (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	γ (%)	N	$\epsilon_{C,M=7,5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-14	1	195	2	0.996	15.356	30.713	8.150	59523.942	2.8201E-02	10	6.4790E-02	0.0633	0.1266	0.2531
	2	318	25	0.598	17.636	471.611	70.464	181795.772	6.5003E-02	20	6.5003E-02	0.0635	0.1270	3.1743
	3	410	3	0.990	18.951	528.464	71.582	324734.334	3.0908E-02	38	1.4307E-02	0.0140	0.0279	0.0838
														3.5113

Yi (2010)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espesura (m)	rd	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	τ_{av} (KN/m ²)	G ₀ (Kpa)	γ (%)	N	Dr (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-14	1	195	2	0.990	15.356	30.713	8.104	59523.942	2.8677E-02	10	43.8529	8.5936E-02	0.083	0.166	0.331
	2	318	25	0.673	17.636	471.611	84.644	181795.772	8.7640E-02	20	62.01737	1.0374E-01	0.100	0.200	5.000
	3	410	3	0.980	18.951	528.464	138.070	324734.334	7.4062E-02	38	85.48504	3.7096E-02	0.036	0.072	0.215
															5.546

Stewart & Whang (2003)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espesura (m)	T_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	G ₀ (Kpa)	$\gamma_{eff}(\frac{G_{eff}}{G_{max}})$ (%)	γ (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-14	1	195	2	1.004	15.356	30.713	59523.942	0.000138044	3.2842E-02	1.2000E-02	1.1520E-02	0.023	0.046
	2	318	25	0.970	17.636	471.611	181795.772	0.000670879	1.8000E-01	1.6000E-01	1.5360E-01	0.307	7.680
	3	410	3	0.957	18.951	528.464	324734.334	0.000414869	1.2427E-01	1.0000E-03	9.6000E-04	0.002	0.006
													7.732

A-01 (Moquegua 2003)

Tokimatsu & Seed (1987)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espesura (m)	N	T_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 KN/m ²	σ_0 PSF	Gmax (psf)	$\gamma_{eff}(\frac{G_{eff}}{G_{max}})$ (%)	γ_{eff} (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-01	1	170	2	5	1	14.772	29.543	617.024	870337.200	3.04E-04	1.00E-02	2.7	1.620	3.240	6.480
	2	260	5	11	0.999	16.659	112.838	2356.677	2295920.324	4.40E-04	2.30E-03	0.5	0.300	0.600	3.000
	3	330	5	22	0.99	17.822	201.947	4217.756	3956762.508	4.53E-04	1.20E-03	0.108	0.065	0.130	0.648
	4	360	10	28	0.9	18.266	384.608	8032.705	4826266.155	6.43E-04	1.70E-03	0.108	0.065	0.130	1.296
	5	440	8	48	0.9	19.333	539.275	11263.001	7630888.706	5.70E-04	1.00E-03	0.027	0.016	0.032	0.259
															11.683

Pradel (1998)

A-02 (Moquegua 2003)

Tokimatsu & Seed (1987)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espesura (m)	r_d	N	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	σ_0 PSF	Gmax (psf)	$\gamma_{eff}(\frac{G_{eff}}{G_{max}})$ (%)	γ_{eff} (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-02	1	200	5	1	10	15.467	77.334	1615.164	1261316.681	5.16E-04	1.00E-02	1.5	0.9	1.8	9
	2	450	10	0.99	48	19.457	271.902	5678.796	8032612.710	2.82E-04	3.90E-04	0.007	0.0042	0.0084	0.084
	3	600	10	0.95	50	21.107	482.973	10087.104	15491446.224	2.49E-04	3.10E-04	0.0045	0.0027	0.0054	0.054
	4	750	5	0.9	50	22.483	595.388	12434.939	25783241.915	1.75E-04	1.90E-04	0.004	0.0024	0.0048	0.024
9.162															

Pradel (1998)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espesura (m)	r_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	τ_{av} (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	γ (%)	N	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-02	1	200	5	0.974	15.467	77.334	30.350	63065.834	5.7134E-01	10	1.3126E+00	0.764	1.527	7.636
	2	450	10	0.903	19.457	271.902	88.235	401630.636	3.1414E-02	48	1.0987E-02	0.007	0.013	0.132
	3	600	10	0.903	21.107	482.973	116.420	774572.311	1.9891E-02	50	6.6240E-03	0.004	0.008	0.079
	4	750	5	0.974	22.483	595.388	121.954	1289162.096	1.2181E-02	50	4.0566E-03	0.002	0.005	0.024
7.871														

Yi (2010)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espesura (m)	rd	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	τ_{av} (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	γ (%)	N	Dr (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-02	1	200	5	0.918	15.467	77.334	28.621	63065.834	4.7068E-01	10	43.8529	1.4105E+00	0.846	1.693	8.463
	2	450	10	0.799	19.457	271.902	87.577	401630.636	3.1221E-02	48	96.07689	1.1435E-02	0.007	0.014	0.137
	3	600	10	0.799	21.107	482.973	155.560	774572.311	2.7663E-02	50	98.05807	9.5921E-03	0.006	0.012	0.115
	4	750	5	0.918	22.483	595.388	220.346	1289162.096	2.3102E-02	50	98.06807	8.0108E-03	0.005	0.010	0.048
8.763															

Stewart & Whang (2003)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espesura (m)	τ_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	$\gamma_{eff} \left(\frac{C_{eff}}{G_{max}} \right)$	γ	$\epsilon_{c,M=7,5}$ (%)	$\epsilon_{c,M}$ (%)	$2\epsilon_{c,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-02	1	200	5	1.003	15.467	77.334	63065.834	0.000495552	3.5000E-01	9.0000E-01	7.3800E-01	1.476	7.38
	2	450	10	1.002	19.457	271.902	401630.636	0.000273474	6.1467E-02	1.5000E-02	1.2300E-02	0.0246	0.246
	3	600	10	0.979	21.107	482.973	774572.311	0.000246096	4.1472E-02	1.3000E-02	1.0660E-02	0.02132	0.2132
	4	750	5	0.956	22.483	595.388	1289162.096	0.000177998	2.4141E-02	1.1000E-02	9.0200E-03	0.01804	0.0902
													7.9294

MASW-10 (Moquegua 2003)

Tokimatsu & Seed (1987)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espesura (m)	τ_d	N	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	σ_0 PSF	Gmax (psf)	$\gamma_{eff} \left(\frac{C_{eff}}{G_{max}} \right)$	γ_{eff} (%)	$\epsilon_{c,M=7,5}$ (%)	$\epsilon_{c,M}$ (%)	$2\epsilon_{c,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-10	1	318	2.3	1	20	17.636	40.563	847.169	3635915.438	6.66E-05	9.00E-05	0.009	0.0054	0.0108	0.02484
	2	575	16.8	0.95	48	20.854	390.917	8164.462	14057055.146	1.58E-04	2.00E-04	0.0041	0.00246	0.00492	0.082656
	3	843	10.9	0.9	50	23.239	644.224	13454.891	33669526.743	1.03E-04	1.30E-04	0.0029	0.00174	0.00348	0.037932
															0.145428

Pradel (1998)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espesura (m)	τ_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	τ_{av} (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	γ (%)	N	$\epsilon_{c,M=7,5}$ (%)	$\epsilon_{c,M}$ (%)	$2\epsilon_{c,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-10	1	318	2.3	0.994	17.636	40.563	11.535	181795.772	8.1374E-03	20	8.1374E-03	0.0047	0.0095	0.0218
	2	575	16.8	0.767	20.854	390.917	80.308	702852.757	1.4617E-02	48	5.1123E-03	0.0030	0.0059	0.0999
	3	843	10.9	0.887	23.239	644.224	93.647	1683476.337	7.0431E-03	50	2.3455E-03	0.0014	0.0027	0.0297
														0.1514

Yi (2010)

Stewart & Whang (2003)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espesura (m)	τ_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	$\gamma_{eff}(\frac{G_{eff}}{G_{max}})$	γ (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-01	1	170	2	1.0096	14.7716	29.5433	43516.860	0.000365317	3.3000E-01	1.5000E+00	1.1250E+00	2.25	4.5
	2	260	5	1.0069	16.6590	112.8383	114796.016	0.000527542	1.0000E+00	8.0000E-01	6.0000E-01	1.2	6
	3	330	5	1.0065	17.8218	201.9472	197838.125	0.000547580	9.5629E-01	8.0000E-01	6.0000E-01	1.2	6
	4	360	10	0.9972	18.2661	384.6080	241313.308	0.000847082	3.7511E+00	8.0000E-01	6.0000E-01	1.2	12
	5	440	8	0.9604	19.3334	539.2754	381544.435	0.000723474	9.1099E-01	7.5000E-01	5.6250E-01	1.125	9
													37.5

A-02 (Tacna 2010)

Tokimatsu & Seed (1987)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espesura (m)	τ_d	N	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 KN/m ²	σ_0 PSF	Gmax (psf)	$\gamma_{eff}(\frac{G_{eff}}{G_{max}})$	γ_{eff} (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-02	1	200	5	1	10	15.467	77.334	1615.164	1261316.681	5.66E-04	1.00E-02	1.600	1.043	2.086	10.432
	2	450	10	0.99	48	19.457	271.902	5678.796	8032612.710	3.09E-04	5.90E-04	0.009	0.006	0.011	0.111
	3	600	10	0.95	50	21.107	482.973	10087.104	15491446.224	2.73E-04	3.40E-04	0.007	0.004	0.009	0.087
	4	750	5	0.9	50	22.483	595.388	12434.939	25783241.915	1.92E-04	2.10E-04	0.004	0.003	0.005	0.027
															10.658

Pradel (1998)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espesura (m)	τ_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	τ_{av} (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	γ (%)	N	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-02	1	200	5	0.974	15.467	77.334	33.287	63065.834	9.3571E-01	10	2.1497E+00	1.3725	2.7450	13.7250
	2	450	10	0.903	19.457	271.902	96.774	401630.636	3.5458E-02	48	1.2401E-02	0.0081	0.0162	0.1617
	3	600	10	0.903	21.107	482.973	127.886	774572.311	2.2060E-02	50	7.3465E-03	0.0048	0.0096	0.0958
	4	750	5	0.974	22.483	595.388	133.756	1289162.096	1.3435E-02	50	4.4742E-03	0.0029	0.0058	0.0292
													14.0116	

Yi (2010)

Yi (2010)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espessura (m)	rd	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	τ_{av} (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	γ (%)	N	Dr (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-10	1	318	2.3	0.9745	17.6359	40.5627	14.3881	181795.7719	1.0754E-02	20	62.017	1.2730E-02	0.0083	0.0166	0.0382
	2	575	16.8	0.6580	20.8544	390.9166	93.6271	702852.7573	1.7282E-02	48	96.077	6.3294E-03	0.0041	0.0083	0.1387
	3	843	10.9	0.7903	23.2392	644.2237	185.3271	1683476.3371	1.4343E-02	50	98.058	4.9734E-03	0.0032	0.0065	0.0707
															0.2475

Stewart & Whang (2003)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espessura (m)	Prof. (m)	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	$\gamma_{eff} \left(\frac{G_{eff}}{G_{max}} \right)$ (%)	γ (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-10	1	318	2.3	1.000	17.636	40.563	181795.772	0.000081218	1.1058E-02	9.0000E-03	6.7500E-03	0.0135	0.0311
	2	575	16.8	1.000	20.854	390.917	702852.757	0.000202454	3.1215E-02	8.0000E-03	6.0000E-03	0.0120	0.2016
	3	843	10.9	0.954	23.239	644.224	1683476.337	0.000132887	1.6286E-02	1.0000E-02	7.5000E-03	0.0150	0.1635
													0.3962

MASW-14 (Tacna 2010)

Tokimatsu & Seed (1987)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espessura (m)	r_d	N	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 KN/m ²	σ_0 PSF	$\gamma_{eff} \left(\frac{G_{eff}}{G_{max}} \right)$ (%)	γ_{eff} (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)	
Masw-14	1	195	2	1	10	15.356	30.713	641.453	1.190478.830	1.44E-04	3.90E-04	0.095	0.062	0.124	0.248
	2	318	25	0.95	20	17.636	471.611	9849.808	3635915.438	6.86E-04	1.70E-03	0.180	0.117	0.235	5.868
	3	410	3	0.9	38	18.951	528.464	11037.201	6494686.674	4.08E-04	7.00E-04	0.023	0.015	0.030	0.090
														6.206	

Pradel (1998)

A-01 (Tacna 2012)

Tokimatsu & Seed (1987)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espezzura (m)	N	τ_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	σ_0 PSF	Gmax (psf)	$\frac{C_{eff}}{G_{max}}$	γ_{eff} (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-01	1	170	2	5	1	14.772	29.543	617.024	870337.200	3.78E-04	1.00E-02	2.7	1.831	3.661	7.322
	2	260	5	11	0.999	16.659	112.838	2356.677	2295920.324	5.47E-04	5.40E-03	1.3	0.881	1.763	8.814
	3	330	5	22	0.99	17.822	201.947	4217.756	3956762.508	5.62E-04	2.00E-03	0.19	0.129	0.258	1.288
	4	360	10	28	0.9	18.266	384.608	8032.705	4826266.155	7.98E-04	2.70E-03	0.19	0.129	0.258	2.576
	5	440	8	48	0.9	19.333	539.275	11263.001	7630888.706	7.08E-04	1.80E-03	0.037	0.025	0.050	0.401
															20.402

Pradel (1998)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espezzura (m)	τ_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	τ_{av} (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	γ (%)	N	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-01	1	170	2	0.996	14.772	29.543	15.679	43516.860	1.6294E+00	5	8.6001E+00	5.7344	11.4689	22.9378
	2	260	5	0.974	16.659	112.838	57.133	114796.016	3.1166E-01	11	6.3863E-01	0.4258	0.8517	4.2583
	3	330	5	0.974	17.822	201.947	93.209	197838.125	1.3003E-01	22	1.1598E-01	0.0773	0.1547	0.7733
	4	360	10	0.903	18.266	384.608	134.840	241313.308	1.3079E-01	28	8.7343E-02	0.0582	0.1165	1.1648
	5	440	8	0.936	19.333	539.275	146.092	381544.435	6.3267E-02	48	2.2127E-02	0.0148	0.0295	0.2361
														29.3703

Yi (2010)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espeessura (m)	rd	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	τ_{av} (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	γ (%)	N	Dr (%)	$\epsilon_{C,M=7,5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-01	1	170	2	0.9803	14.7716	29.5433	15.4364	43516.8600	1.7007E+00	5	31.009	1.2902E+01	8.7476	17.4952	34.9905
	2	260	5	0.9267	16.6590	112.8383	55.7334	114796.0162	3.0327E-01	11	45.993	7.9984E-01	0.5423	1.0846	5.4229
	3	330	5	0.9267	17.8218	201.9472	99.7463	197838.1254	1.6207E-01	22	65.044	1.8886E-01	0.1145	0.2290	1.1448
	4	360	10	0.8177	18.2661	384.6080	167.6309	241313.3078	2.2751E-01	28	73.380	1.7157E-01	0.1163	0.2327	2.3265
	5	440	8	0.8630	19.3334	539.2754	248.0620	381544.4353	1.5827E-01	48	96.077	5.7966E-02	0.0393	0.0786	0.6288
															44.5136

Stewart & Whang (2003)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espeessura (m)	r_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	$\gamma_{eff} \left(\frac{G_{eff}}{G_{max}} \right)$ (%)	γ (%)	$\epsilon_{C,M=7,5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-01	1	170	2	1.010	14.772	29.543	43516.860	0.000365297	3.0000E-01	4.6000E-01	3.7720E-01	0.7544	1.5088
	2	260	5	1.007	16.659	112.838	114796.016	0.000527521	1.0000E+00	8.0000E-01	6.5600E-01	1.312	6.56
	3	330	5	1.006	17.822	201.947	197838.125	0.000547561	9.5611E-01	7.5000E-01	6.1500E-01	1.23	6.15
	4	360	10	0.997	18.266	384.608	241313.308	0.000847052	1.0000E+00	8.0000E-01	6.5600E-01	1.312	13.12
	5	440	8	0.960	19.333	539.275	381544.435	0.000723447	9.1083E-01	7.5000E-01	6.1500E-01	1.23	9.84
													37.1788

A-02 (Tacna 2012)

Tokimatsu & Seed (1987)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espeessura (m)	r_d	N	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 KN/m ²	σ_0 PSF	Gmax (psf)	$\gamma_{eff} \left(\frac{G_{eff}}{G_{max}} \right)$ (%)	γ_{eff} (%)	$\epsilon_{C,M=7,5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
A-02	1	200	5	1	10	15.467	77.334	1615.164	1261316.681	4.99E-04	1.00E-02	1.45	0.9831	1.9662	9.831
	2	450	10	0.99	48	19.457	271.902	5678.796	8032612.710	2.73E-04	4.00E-04	0.0075	0.005085	0.01017	0.1017
	3	600	10	0.95	50	21.107	482.973	10087.104	15491446.224	2.41E-04	3.02E-04	0.006	0.004068	0.008136	0.08136
	4	750	5	0.9	50	22.483	595.388	12434.939	25783241.915	1.69E-04	2.00E-04	0.004	0.002712	0.005424	0.02712
															10.04118

Pradel (1998)

MASW-10 (Tacna 2012)

Tokimatsu & Seed (1987)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Especcura (m)	r_d	N	Peso especifico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	σ_0 (PSF)	Gmax (psf)	$\gamma_{eff} \left(\frac{C_{eff}}{G_{max}} \right)$	γ_{eff} (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-10	1	318	2.3	1	20	17.63593729	40.56265576	847.168679	3635915.438	8.78E-05	1.40E-04	0.014	0.009	0.019	0.044
	2	575	16.8	0.95	48	20.85439864	390.9165528	8164.46196	1.4057055.15	2.08E-04	3.00E-04	0.006	0.004	0.008	0.137
	3	843	10.9	0.9	50	23.239184	644.2236584	13454.8908	33669526.74	1.36E-04	1.70E-04	0.0034	0.002	0.005	0.050
															0.231

Pradel (1998)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Especcura (m)	r_d	Peso especifico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	τ_{av} (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	γ (%)	N	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-10	1	318	2.3	0.994	17.636	40.563	15.206	181795.772	1.1475E-02	20	1.1475E-02	0.0077	0.0153	0.0352
	2	575	16.8	0.767	20.854	390.917	105.861	702852.757	1.9839E-02	48	6.9386E-03	0.0046	0.0093	0.1555
	3	843	10.9	0.887	23.239	644.224	123.443	1683476.337	9.3757E-03	50	3.1223E-03	0.0021	0.0042	0.0454
														0.2360

Yi (2010)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Especcura (m)	rd	Peso especifico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	τ_{av} (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	γ (%)	N	Dr (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-10	1	318	2.3	0.9755	17.6359	40.5627	14.9182	181795.7719	1.1273E-02	20	62.017	1.3344E-02	0.0090	0.0181	0.0416
	2	575	16.8	0.6677	20.8544	390.9166	98.3996	702852.7573	1.8265E-02	48	96.077	6.6896E-03	0.0045	0.0091	0.1524
	3	843	10.9	0.7971	23.2392	644.2237	193.5935	1683476.3371	1.5028E-02	50	98.058	5.2111E-03	0.0035	0.0071	0.0770
															0.2710

Stewart & Whang (2003)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espesura (m)	r _d	Peso específico (KN/m ³)	σ ₀ (KN/m ²)	G ₀ (Kpa)	$\gamma_{eff} \left(\frac{G_{eff}}{G_{max}} \right)$ (%)	γ (%)	ε _{c,M=7,5} (%)	ε _{c,M} (%)	2ε _{c,M} (%)	Recalque (cm)
Masw-10	1	318	2.3	1.000	17.636	40.563	181795.772	0.000084118	1.1650E-02	9.0000E-03	7.2000E-03	0.014	0.033
	2	575	16.8	1.000	20.854	390.917	702852.757	0.000209684	2.0000E-02	1.0000E-02	8.0000E-03	0.016	0.269
	3	843	10.9	0.954	23.239	644.224	1683476.337	0.000137633	1.7021E-02	1.0000E-02	8.0000E-03	0.016	0.174
													0.476

MASW-14 (Tacna 2012)

Tokimatsu & Seed (1987)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espesura (m)	r _d	N	Peso específico (KN/m ³)	σ ₀ (KN/m ²)	σ ₀ (PSF)	G _{max} (psf)	$\gamma_{eff} \left(\frac{G_{eff}}{G_{max}} \right)$ (%)	γ _{eff} (%)	ε _{c,M=7,5} (%)	ε _{c,M} (%)	2ε _{c,M} (%)	Recalque (cm)
Masw-14	1	195	2	1	10	15.356	30.713	641.453	1190478.83	1.05E-04	2.05E-04	0.051	0.035	0.069	0.138
	2	318	25	0.95	20	17.636	471.611	9849.808	3635915.438	5.02E-04	1.00E-03	0.1	0.068	0.136	3.390
	3	410	3	0.9	38	18.951	528.464	11037.201	6494686.674	2.98E-04	3.80E-04	0.012	0.008	0.016	0.049
															3.577

Pradel (1998)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espesura (m)	r _d	Peso específico (KN/m ³)	σ ₀ (KN/m ²)	τ _{av} (KN/m ²)	G ₀ (Kpa)	γ (%)	N	ε _{c,M=7,5} (%)	ε _{c,M} (%)	2ε _{c,M} (%)	Recalque (cm)
Masw-14	1	195	2	0.996	15.356	30.713	5.963	59523.942	1.5895E-02	10	3.6517E-02	0.0243	0.0487	0.0974
	2	318	25	0.598	17.636	471.611	51.559	181795.772	4.2233E-02	20	4.2233E-02	0.0282	0.0563	1.4080
	3	410	3	0.990	18.951	528.464	52.377	324734.334	2.1586E-02	38	9.9926E-03	0.0067	0.0133	0.0400
														1.5454

Yi (2010)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espesura (m)	rd	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	τ_{av} (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	γ (%)	N	Dr (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-14	1	195	2	0.980	15.356	30.713	5.871	59523.942	1.5733E-02	10	43.8529	4.7147E-02	0.032	0.064	0.128
	2	318	25	0.535	17.636	471.611	49.171	181795.772	3.9806E-02	20	62.01737	4.7120E-02	0.032	0.064	1.597
	3	410	3	0.964	18.951	528.464	99.329	324734.334	4.6458E-02	38	85.48504	2.3270E-02	0.016	0.032	0.095
1.820															

Stewart & Whang (2003)

Perfil	Camada	Vs (m/s)	Espesura (m)	τ_d	Peso específico (KN/m ³)	σ_0 (KN/m ²)	G_0 (Kpa)	$\gamma_{eff} \left(\frac{G_{eff}}{G_{max}} \right)$ (%)	γ (%)	$\epsilon_{C,M=7.5}$ (%)	$\epsilon_{C,M}$ (%)	$2\epsilon_{C,M}$ (%)	Recalque (cm)
Masw-14	1	195	2	1.004	15.356	30.713	59523.942	0.000101028	1.6702E-02	1.2000E-02	8.7600E-03	0.018	0.035
	2	318	25	0.971	17.636	471.611	181795.772	0.000490954	2.0000E-01	1.0000E-01	7.3000E-02	0.146	3.650
	3	410	3	0.957	18.951	528.464	324734.334	0.000303604	6.0030E-02	1.4000E-02	1.0220E-02	0.020	0.061
													3.746