



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



ENZO SILVA DIAS

**ANÁLISE DE SUSCEPTIBILIDADE À LIQUEFAÇÃO
DINÂMICA COM USO DE TÉCNICAS ESTATÍSTICAS
MULTIVARIADAS**

Ouro Preto

2023

ANÁLISE DE SUSCEPTIBILIDADE À LIQUEFAÇÃO DINÂMICA COM USO DE
TÉCNICAS ESTATÍSTICA MULTIVARIADA

ENZO SILVA DIAS

Trabalho Final de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção
do Grau de Engenheiro Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 24/03/2023

Área de concentração: Geotecnia de Barragens e Rejeitos

Orientador: Prof. D.Sc. Tatiana Barreto dos Santos - UFOP

Co-orientador: Co-orientador: M.Sc. Luciano Souza Junior - (COPPE - UFRJ)

Ouro Preto

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

D541a Dias, Enzo Silva.
Análise de susceptibilidade à liquefação dinâmica com uso de técnicas estatísticas multivariadas. [manuscrito] / Enzo Silva Dias. - 2023.
96 f.: il.: color., gráf., tab.. + Código de Programação em Linguagem R.

Orientadora: Profa. Dra. Tatiana Barreto dos Santos.
Coorientador: Me. Luciano Souza Junior.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Aprendizado de Máquina. 2. Técnicas estatísticas multivariadas. 3. Sismologia - Liquefação Dinâmica. 4. Regressão Logística (Estatística). I. Santos, Tatiana Barreto dos. II. Souza Junior, Luciano. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Enzo Silva Dias

Análise de susceptibilidade à liquefação dinâmica com uso de técnicas estatísticas multivariadas

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia civil

Aprovada em 24 de março de 2023

Membros da banca

Drª. Tatiana Barreto dos Santos - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
Msc. Luciano Souza Junior - Coorientador (Klohn Crippen Berger)
Dr. Adilson do Lago Leite - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Tatiana Barreto dos Santos, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 17/04/2023



Documento assinado eletronicamente por **Tatiana Barreto dos Santos, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/04/2023, às 16:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0510670** e o código CRC **C7D787E4**.

Dedico este trabalho a todos que me apoiaram ao longo dessa caminhada, em especial: à minha orientadora Tatiana Barreto e ao meu co-orientador Luciano Souza por todo o suporte no desenvolvimento deste trabalho; à minha família por todo incentivo ao longo dessa graduação; e por fim, mas não menos importante à minha namorada, Nádia Fonseca por sempre estar ao meu lado no enfrentamento de todo e qualquer desafio; sem vocês nada disso seria realidade.

*“Não há nada como o sonho para criar o futuro.
Utopia hoje, carne e osso amanhã.”*

Victor Hugo

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à Deus por todas as forças concedidas para enfrentar e vencer todas as batalhas com ânimo. Agradeço aos meus pais, Julio Dias Neto e Maria dos Anjos, e aos meus irmãos Mardone Dias e Luiza Dias, por sempre guiarem meus passos na busca pela melhoria contínua. Agradeço à minha namorada, Nádia Fonseca, por estar presente em todos momentos que precisei. Agradeço aos meus sogros, Kátia e Elvande por todo acolhimento.

Agradeço à minha orientadora Tatiana Barreto e ao meu co-orientador Luciano Souza, por toda atenção e suporte no desenvolvimento deste trabalho. Agradeço às entidades LAGEM (Liga Acadêmica de Geotecnia da Escola de Minas) e PET CIVIL UFOP (Programa de Educação Tutorial da Engenharia Civil - UFOP) por tantos aprendizados. Agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG, Brazil - APQ00501-21) pelo apoio provido no desenvolvimento deste trabalho. Agradeço às empresas Klohn Crippen Berger, Pimenta de Ávila: ENGENHARIA E CONSULTORIA e Vale S.A. pelas oportunidades de desenvolvimento profissional durante a minha graduação.

Agradeço à instituição República Acrópole e à cidade de Ouro Preto, MG, por ter feito desses anos de graduação os melhores anos da minha vida. Agradeço à UFOP e ao corpo docente pelo ensino gratuito e de qualidade, e à Fundação Gorceix pelo suporte complementar à minha formação. Por fim, agradeço à todas amigas que me apoiaram do início ao fim nessa jornada.

RESUMO

O presente trabalho objetivou a aplicação de técnicas estáticas multivariadas e de aprendizado de máquina (Análise de Componentes Principais e Regressão Logística) para proposição de modelos preditivos capazes de determinar a susceptibilidade à liquefação dinâmica, a partir do banco de dados apresentado em 2014 no estudo "*CPT and SPT Based Liquefaction Triggering Procedures*" de Boulanger & Idriss. As duas componentes principais de maiores autovalores associados juntas conseguiram explicar aproximadamente 58,56% dos casos apresentados. A aplicação da técnica de componentes principais, a partir das duas componentes principais de maiores autovalores não resultou em uma separação eficiente dos dados, quanto à susceptibilidade ou não à liquefação dinâmica. Quanto à avaliação da susceptibilidade à liquefação dinâmica pela aplicação da técnica de regressão logística, o modelo logístico foi capaz de predizer cerca de 82,6% dos casos, com uma taxa de erro aparente de 17,39%. Tendo em vista o dano potencial catastrófico associado ao fenômeno da liquefação dinâmica, essa taxa de erro aparente confere ao modelo um uso como ferramenta complementar, não descartando a possibilidade de uso de outras metodologias em paralelo, que auxiliem na avaliação da susceptibilidade à liquefação dinâmica.

Palavras-chaves: liquefação dinâmica, liquefação cíclica, susceptibilidade, regressão logística, componentes principais, técnicas estatísticas multivariadas.

ABSTRACT

The present work aimed to apply multivariate static and machine learning techniques (Principal Component Analysis and Logistic Regression) to propose predictive models capable of determining the susceptibility to the occurrence of dynamic liquefaction, from the database presented in 2014 in the study "CPT and SPT Based Liquefaction Triggering Procedures" by Boulanger & Idriss. The two principal components with the highest associated eigenvalues together were able to explain approximately 58.56% of the cases presented. The application of the principal components technique, based on the two principal components with the highest eigenvalues did not result in an efficient separation of the data. As for the evaluation of susceptibility to dynamic liquefaction by applying the logistic regression technique, the logistic model was able to predict about 82.6% of the cases, with an apparent error rate of 17.39%. Considering the potential catastrophic damage associated with the phenomenon of dynamic liquefaction, this apparent error rate gives the model a use as a complementary tool, not ruling out the possibility of using other methodologies in parallel, which assist in the evaluation of susceptibility to dynamic liquefaction.

Keywords: dynamic liquefaction, cyclic liquefaction, susceptibility, logistic regression, principal components, multivariate statistical techniques.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Prédios inclinados em razão de liquefação induzida por sismo, após terremoto de 1964 em Niigata, Japão.	5
Figura 2 - Prédios inclinados em razão de liquefação induzida por sismo, após terremoto de 1964 em Niigata, Japão.	6
Figura 3 - Exemplo de gráfico <i>Scree-plot</i>	17
Figura 4 - Exemplo de gráfico de regressão logística.	21
Figura 5 - Fluxograma resumo da metodologia aplicada.	26
Figura 6 - Casos históricos e distância de Mahalanobis.	29
Figura 7 - Matriz de correlação das variáveis do banco de dados elaborado.	30
Figura 8 - Histograma da variável V1 (Magnitude de momento do sismo em Mw)	33
Figura 9 - Histograma da variável V2 (Aceleração horizontal máxima induzida pelo sismo).....	33
Figura 10 - Histograma da variável V3 (Profundidade crítica média (m))	34
Figura 11 - Histograma da variável V4 (Profundidade da linha freática (m))	34
Figura 12 - Histograma da variável V5 (Tensão vertical efetiva (kPa))	35
Figura 13 - Histograma da variável V6 (Resistência média de ponta do cone para pressão atmosférica = 1 atm).....	35
Figura 14 - Histograma da variável V7 (Atrito lateral médio)	36
Figura 15 - Histograma da variável V8 (Concentração de finos representativa para cada caso em porcentagem).....	36
Figura 16 - Histograma da variável V9 (coeficiente de redução de tensão de cisalhamento).....	37
Figura 17 - <i>Boxplot</i> das variáveis via matriz de covariâncias.....	38
Figura 18 - <i>Boxplot</i> das variáveis via matriz de correlação.....	39

Figura 19 - Gráfico das componentes principais de maiores autovalores e dos scores dos casos históricos obtidos.	42
Figura 20 - Modelo logístico referente ao banco de dados casos com os 227 casos históricos de liquefação dinâmica.....	44
Figura 21 - Fluxograma resumo - Regressão logística	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Interpretação dos valores do coeficiente de correlação linear de Pearson.....	12
Tabela 2 - Matriz de confusão para as duas classes.....	25
Tabela 3 - Casos presentes no banco de dados.....	28
Tabela 4 - IDs e respectivas distâncias de Mahalanobis dos casos removidos do banco.	29
Tabela 5 - Resultados da aplicação do Teste de Esfericidade de Bartlett.....	31
Tabela 6 - Mínimo, mediana, média e máximo das variáveis do banco em estudo	32
Tabela 7 - Variância explicada pelas componentes principais geradas na análise.	40
Tabela 8 - Escores obtidos por meio das componentes principais para 5 casos do banco de dados.....	41
Tabela 9 - Parâmetros do teste de Wald.	43
Tabela 10 – Matriz de confusão.....	45

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	Objetivos Gerais	3
2.2	Objetivos Específicos	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1	Liquefação	4
3.2	Liquefação Dinâmica	4
3.2.1	Metodologia de Boulanger & Idriss (2014)	7
3.3	Análise Multivariada de Dados	9
3.3.1	Preparo dos Dados para Utilização de Técnicas Multivariadas	10
3.3.2	Teste de Esfericidade de Bartlett	11
3.3.3	Identificação de Outliers Multivariados.....	13
3.3.4	Técnica de Análise de Componentes Principais	14
3.3.5	Regressão Logística	18
4	METODOLOGIA	23
4.1	Construção do banco de dados e seleção de variáveis.....	23
4.2	Análise descritiva de variáveis e matriz de correlação das variáveis.....	23
4.3	Identificação de outliers multivariado.....	24
4.4	Teste de Esfericidade de Bartlett.....	24
4.5	Análise de Componentes Principais	24

4.6	Separação dos dados componentes principais	24
4.7	Obtenção de modelo via regressão logística	25
4.8	Validação e avaliação do modelo obtido via regressão logística	25
4.9	Resumo da Metodologia Aplicada	26
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
5.1	Seleção de Variáveis	27
5.2	Identificação e Remoção de <i>Outliers</i>	28
5.3	Teste de Esfericidade de Bartlett e Análise Descritiva do Banco de Dados 30	
5.4	Análise Descritiva das Variáveis.....	32
5.5	Aplicação de Componentes Principais	37
5.6	Gráfico das Componentes Principais 1 e 2.....	41
5.7	Obtenção do Modelo Logístico e Validação	42
6	CONCLUSÃO	46
6.1	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	47
	REFERÊNCIAS	48
	APÊNDICE A: Banco de Dados deste Trabalho.....	54
	APÊNDICE B: Script do R para Metodologia de Avaliação da Susceptibilidade por meio de Componentes Principais.....	58
	APÊNDICE C: Escores Obtidos por meio das Componentes Principais.	66
	APÊNDICE D: Script do R para Metodologia de avaliação da Susceptibilidade à Liquefação Dinâmica por meio de Regressão Logística	72
	ANEXO A: Banco de dados de Boulanger & Idriss (2014).....	77

1 INTRODUÇÃO

A liquefação é um fenômeno que consiste na perda abrupta de resistência e rigidez de um solo, pelo acréscimo súbito e intenso de poropressões, durante cisalhamento não drenado que resulta em redução significativa das tensões efetivas instaladas (ROBERTSON, 2022).

Os danos potenciais associados a falhas por liquefação, com destaque para estruturas de mineração como barragens e pilhas, se estendem desde perdas sociais, ambientais e econômicas a perdas de vidas humanas (CANADIAN DAM ASSOCIATION, 2019). A sismologia brasileira é marcada pela incidência de sismos decorrentes da subducção da placa de Nazca sob a Sul-Americana, porém com sismos de baixa magnitude (ASSUMPÇÃO, 1992 e 2016).

Segundo Assumpção (2016), no Brasil há em média um sismo de magnitude 5 (na escala Richter) a cada 5 anos. Em contraste, na região dos Andes, sismo de magnitude 5 (na escala Richter) ocorrem em média duas vezes por semana, o que ressalta a maior estabilidade do Brasil em comparação com regiões mais ativas (ASSUMPÇÃO, 2016). O autor também afirma que no Brasil é estimado ocorrerem dois sismos de magnitude 6 (na escala Richter) ou maior por século, enquanto na região andina, sismos de magnitude 6 ocorrem uma vez por mês.

ASSUMPÇÃO (2016) afirma que embora a atividade sísmica do Brasil seja significativamente mais baixa do que a de outros países de borda de placa, ainda assim não podemos afirmar que somos totalmente imunes a tremores. Apesar de apresentar um risco sísmico muito baixo, este não é nulo.

No âmbito da engenharia, um dos grandes desafios enfrentados, relaciona-se às incertezas associadas e a capacidade de estimar e avaliar a resposta dinâmica de estruturas durante um evento sísmico (BRADLEY, 2013).

O uso de técnicas de estatística multivariadas pode ser realizado em diversas áreas na geotecnia tais como: estabilidade de taludes, túneis, escavações e etc (ZHANG *et al.*, 2023). Conforme ZHANG *et al.* (2023), o princípio chave do aprendizado de máquina reside em aprender com a experiência histórica de maneira

automática e racional, através de algoritmos computacionais, e então aplicar o que se aprendeu na resolução de novos problemas, isto é, uma capacidade de generalização.

No campo da engenharia geotécnica, o uso de aprendizado de máquina se torna uma ferramenta versátil ao revelar e lidar com incertezas e aleatoriedades, que são frequentemente enfrentadas por engenheiros geotécnicos e pesquisadores (ZHANG *et al.*, 2023; SHI & WANG, 2020).

A relevância deste trabalho reside na atual obrigatoriedade legislativa da avaliação a riscos sísmicos para estruturas de mineração. A exemplo, a resolução ANM nº95, de 07 de fevereiro de 2022, exige a avaliação dos estudos sísmicos de barragens de mineração com base na Norma Brasileira ABNT NBR 13.028 e ou norma que venha a sucedê-la, na elaboração de Planos de Segurança de Barragem (PSB).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

O presente trabalho objetiva aplicar técnicas estatísticas multivariadas e de aprendizado de máquina (Análise de Componentes Principais e Regressão Logística) para proposta de modelos preditivos capazes de determinar a susceptibilidade à liquefação dinâmica, a partir do banco de dados apresentado em 2014 no estudo “*CPT and SPT Based Liquefaction Triggering Procedures*” de BOULANGER & IDRIS.

2.2 Objetivos Específicos

Entre os objetivos específicos pode se elencar:

- Selecionar as variáveis geotécnicas do banco de dados que melhor descrevem o fenômeno da liquefação cíclica;
- Aplicar a técnica estatística multivariada denominada Análise de Componentes Principais com o objetivo de reduzir a dimensionalidade do problema e avaliar se as novas variáveis denominadas componente principal 1 e 2 são capazes de promover separação entre os grupos “liquefaz” e “não liquefaz”;
- Aplicar a técnica denominada Regressão Logística com o objetivo de propor um modelo capaz de prever a probabilidade de “liquefazer” e “não liquefazer”;
- Avaliar a capacidade de generalização e acurácia do modelo obtido por meio de regressão logística
- Discorrer os resultados obtidos pela aplicação das técnicas estatísticas multivariadas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Liquefação

HAZEN (1920) é citado por diversos autores como o primeiro pesquisador a utilizar o termo “liquefação”, durante o processo de avaliação da ruptura da barragem de Calaveras, em 1918, situada na Califórnia, Estados Unidos da América, construída pela técnica de aterro hidráulico.

O fenômeno de liquefação (ou mais precisamente, fluxo por liquefação) é caracterizado por ROBERTSON (2022), como a redução drástica e abrupta da resistência e rigidez de solos granulares fofos, de comportamento contrátil, ou argilas sensíveis, quando submetidos a cisalhamento não drenado sob volume constante em condições de carregamento monotônicos, dinâmicos ou cíclicos.

A liquefação em solos arenosos pode ser classificada conforme o carregamento desencadeador, em liquefação estática e dinâmica. De acordo com KRAMER *et al.* (1988) esses carregamentos irão acionar o processo denominado gatilho (*trigger*), podendo este ser estático (como peso próprio de aterros ou novas construções sob a estrutura em análise, variações de poropressões) ou dinâmicos (como por sismos, vibrações e detonações).

Ao término da ocorrência de liquefação, o solo tende a apresentar deformação permanente, no qual há continuidade da deformação permanecendo constante seu volume e tensões efetivas normal e de cisalhamento. Cabe ressaltar que esse estado é atingido após a estrutura do solo ter sido totalmente remoldada, assim resultando na perda de todo seu histórico de tensões (CASAGRANDE, 1976; POULOS *et al.*, 1985).

3.2 Liquefação Dinâmica

A liquefação dinâmica em depósitos de areias saturadas é associada a danos severos em estruturas. Ao sofrer carregamento cíclico induzido por sismos, areias fofas tendem a contrair, se o solo estiver saturado e com capacidade insuficiente de

drenagem durante o abalo sísmico, pode ocorrer a transmissão de tensões normais da matriz arenosa para a poropressão do solo (KRAMER *et al.*, 1988). As consequências de uma maneira geral dependem da magnitude e duração do sismo. O resultado é a deformação permanente do solo, pela redução das suas tensões efetivas instaladas, o que resulta em perda abrupta de rigidez e resistência da massa de solo (KRAMER, 1996).

IDRISS & BOULANGER (2008) apresenta em seu livro “*Soil Liquefaction during Earthquake*”, alguns dos registros mais emblemáticos dos danos relacionados à liquefação induzida por sismos, como exemplo, os registros da infraestrutura civil da cidade de Niigata, Japão, após o terremoto ocorrido em 1964. Essas imagens exibem desde colapsos acentuados de fundações de prédios resultando em inclinações elevadas de edifícios (Figura 1) bem como o colapso da ponte Showa (Figura 2), pelo fenômeno da liquefação dinâmica.

Figura 1 - Prédios inclinados em razão de liquefação induzida por sismo, após terremoto de 1964 em Niigata, Japão.



Fonte: Penzien, Joseph. *National Information Service for Earthquake Engineering, EERC, University of California, Berkeley*. 1964. Disponível em: https://nisee.berkeley.edu/elibrary/files/thumbnail/2350_1031_1518/IMG0044.jpg. Acesso em 20 de fevereiro de 2023.

Figura 2 - Prédios inclinados em razão de liquefação induzida por sismo, após terremoto de 1964 em Niigata, Japão.



Fonte: Bertero, Vitelmo V..National Information Service for Earthquake Engineering, EERC, University of California, Berkeley. 1964. Disponível em: https://nisee.berkeley.edu/elibrary/files/thumbnail/6257_3021_0662/IMG0014.jpg. Acesso em 20 de fevereiro de 2023.

Além do evento sísmico de 1964 com ocorrência de liquefação em Niigata, Japão, diversos outros terremotos forneceram observações similares e adicionais relevantes à relacionadas à liquefação cíclica, como os terremotos de: *Prince William Sound*, Alaska em 1964; *San Fernando*, Califórnia nos Estados Unidos em 1971; *Loma Prieta*, Califórnia nos Estados Unidos em 1989; *Kobe*, Japão em 1995; *Kocaeli*, Turquia em 1999; *Chi-Chi*, Taiwan em 1999; entre outros (IDRISS e BOULANGER, 2008).

Todas essas ocorrências sísmicas e o dano potencial catastrófico associado à liquefação contribuíram para a fomentação do desenvolvimento de metodologias de avaliação da susceptibilidade à liquefação dinâmica na engenharia sísmica, tanto empíricas quanto teóricas (IDRISS e BOULANGER, 2008).

Diversas correlações, empíricas e teóricas, já foram propostas para avaliação do potencial para desencadear (“*triggering*”) a liquefação, algumas delas citadas em MOSS *et al.* (2006), tais como: SEED *et al.* (1983); OLSEN (1984); ISHIHARA (1985);

JAMIOLKOWSKI *et al.* (1985); ROBERTSON & CAMPANELLA (1985); FRANKLIN (1986); SEED & DE ALBA (1986); SHIBATA & TEPARASKA (1988); SUGAWARA (1989); MITCHELL & TSENG (1990); REYNA (1991); OLSEN & KOESTER (1995); STARK & OLSON (1995); RONGXIANG & ZHAOJI (1995); SUZUKI *et al.* (1995); ROBERTSON & WRIDE (1998); TOPRAK *et al.* (1999); JUANG *et al.* (2003); IDRIS & BOULANGER (2004).

Cabe ressaltar que na avaliação do potencial para desencadear a liquefação dinâmica é importante identificar meios adequados para aferir ou estimar a resistência do solo à liquefação sob carregamento dinâmico.

Uma das maneiras mais confiáveis reside na obtenção de amostras indeformadas de alta qualidade, geralmente associado a elevados custos. Assim, em razão de viabilidade de custos, para estimativa da resistência de areias e outros solos não coesivos, geralmente se opta por ensaios *in-situ* como ensaios de piezocone (CPTU) e medidas de velocidade de onda cisalhante (V_s) (IDRIS & BOULANGER, 2008).

Além dessas metodologias, cabe citar BOULANGER & IDRIS (2014) derivada de um banco de casos históricos sobre liquefação dinâmica, focada na avaliação do potencial de liquefação desencadeada a partir de eventos sísmicos, com base em dados de ensaios *in-situ*.

3.2.1 Metodologia de Boulanger & Idriss (2014)

A avaliação da susceptibilidade à liquefação dinâmica pode ser realizada por diferentes procedimentos, sendo a mais comum a formulada inicialmente por SEED & IDRIS (1971), o “Procedimento Simplificado”. SEED & IDRIS (1971) nessa abordagem são comparadas as razões de tensão cíclica induzidas por sismos (“*Cyclic Stress Ratio*” - CSR) em relação às razões de resistência cíclica do solo (“*Cyclic Resistance Ratio*” - CRR).

- Razão de tensão cíclica (CSR), que é uma medida ou estimativa da carga cíclica imposta ao solo pelo sismo.

- Razão de resistência cíclica à liquefação (CRR), que é uma medida ou estimativa da capacidade do solo resistir à liquefação dinâmica.

Essa abordagem requer o cálculo ou estimativa das duas variáveis apresentadas na Equação (1)(CSR e CRR). As equações de CSR e CRR variam conforme registros de liquefação dinâmica utilizados e métodos empregados por cada autor na obtenção dessas equações. A metodologia de BOULANGER & IDRIS (2014) define as equações para as variáveis mencionadas conforme as Equações (1) e (2).

$$CSR_{M=7.5-\sigma_V=1atm} = 0.65 * \frac{\sigma_V}{\sigma'_V} * \frac{a_{max}}{g} * r_d * \frac{1}{MSF * K_\sigma} \quad (1)$$

Sendo,

- σ_V : Tensão geostática vertical total;
- σ'_V : Tensão geostática vertical efetiva;
- a_{max} : Aceleração horizontal máxima induzida por sismos;
- g : aceleração da gravidade;
- r_d : coeficiente de redução de tensão de cisalhamento;
- MSF: fator de escala de magnitude;
- K_σ : fator de correção de sobrecarga.

$$CRR_{M=7.5-\sigma_V=1atm} = \exp \left[\frac{q_{c1Ncs}}{113} + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{1000} \right)^2 - \left(\frac{q_{c1Ncs}}{140} \right)^3 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{137} \right)^4 - 2.8 \right] \quad (2)$$

Sendo,

- q_{c1Ncs} : Resistência de ponta normalizada e corrigida equivalente a uma areia limpa.

O valor de CSR é expresso como um valor representativo de 65% da tensão cíclica máxima (SEED & IDRIS, 1971). O coeficiente de redução de tensão, r_d , fornece uma correção da flexibilidade do perfil de solo como uma função da resposta

não-rígida do solo analisado, para consideração da deformação das camadas de solo (BOULANGER & IDRIS, 2014). O fator de escala de magnitude (MSF) reflete a duração e o número de carregamentos cíclicos associados ao terremoto analisado, já o fator de sobrecarga (K_{σ}) é um fator de correção em relação ao carregamento do solo (BOULANGER e IDRIS, 2014).

Os valores de CRR são normalizados para um sismo de magnitude de momento 7.5 e tensão vertical efetiva de 1 atm (BOULANGER e IDRIS, 2014). Os valores de q_{c1ncs} advém da resistência de ponta de ensaios de piezocone (CPTU), normalizada e corrigida equivalente para uma areia limpa (BOULANGER e IDRIS, 2014).

Da razão entre o CRR e o CSR é obtido o fator de segurança à liquefação (“*factor of safety against liquefaction*”), FS_{liq} , conforme a Equação (3) se o CSR, carregamento, for superior ao CRR, resistência, o material é considerado susceptível à liquefação cíclica (SEED e IDRIS, 1971).

$$FS_{liq} = \frac{\text{Tensão cíclica requerida para ocorrência de liquefação dinâmica}}{\text{Tensão cisalhante cíclica equivalente induzida por sismo}} = \frac{CRR}{CSR} \quad (3)$$

No passado, análise de dados era realizada de forma manual. Contudo, com o avanço tecnológico, os processos tornaram-se cada vez mais ágeis e práticos. A aplicação de técnicas estatísticas multivariadas na geotecnia, como ferramenta complementar, permite a avaliação de grandes quantidades de dados na busca por correlações que possam auxiliar na produção de conhecimentos geotécnicos e tomada de decisões.

3.3 Análise Multivariada de Dados

De acordo com HAIR *et al.* (2009), a análise multivariada é uma poderosa ferramenta para pesquisadores e pode ser definida como o conjunto de todas as técnicas estatísticas que permite a análise simultânea de múltiplas medidas (variáveis) em objetos de investigação ou indivíduos (elementos amostrais). Esse tipo de

aplicação pode revelar relações entre variáveis que de outra forma não seriam identificadas (HAIR *et al.*, 2009).

De modo geral, as técnicas estatísticas multivariadas visam simplificar e facilitar a interpretação do fenômeno em estudo (SANTOS, 2019). Isto é feito por meio da criação de índices ou variáveis alternativas que condensam a informação original dos dados (SANTOS, 2019). Essas técnicas podem agrupar os elementos amostrais com base em sua similaridade, permitindo assim a segmentação dos conjuntos de dados originais (SANTOS, 2019). Além disso, a aplicação das técnicas de estatística multivariada também envolve a análise das relações entre as variáveis respostas vinculadas ao fenômeno em estudo e outros aspectos (MINGOTI, 2013).

Com o avanço da tecnologia e a necessidade de produção de conhecimento, a partir de informações, as técnicas de análise estatística multivariada ganham cada vez mais notoriedade por viabilizarem uma organização mais eficiente do conhecimento e melhora na tomada de decisões com base em dados (HAIR *et al.*, 2009).

3.3.1 Preparo dos Dados para Utilização de Técnicas Multivariadas

Conforme SANTOS (2019), antes da aplicação de técnicas estatísticas multivariadas têm se a necessidade de realizar um estudo exploratório desses dados. É ressaltado ainda pela autora que esse estudo exploratório deve ser aplicado em cada uma das variáveis que compõem o vetor aleatório. SANTOS (2019) apresenta alguns pontos importantes a seguir em relação ao banco de dados a ser utilizado:

- Conhecer as medidas de tendência central dos dados como média e mediana e dispersão como o desvio padrão e a variância;
- Elaboração de *boxplot* das variáveis, para visualização da variabilidade dos dados;
- Elaboração de histogramas, para visualização da distribuição e curvas densidade de probabilidade dos dados;
- Elaboração de gráficos de dispersão das variáveis duas a duas, para verificação visual da existência de relação linear entre os dados analisados;

- Conhecer as covariância e correlação entre as variáveis do caso em estudo.

Além disso, é importante ter atenção aos testes necessários para determinar se o banco de dados é adequado para o uso de técnicas estatísticas multivariadas. SANTOS (2019) ressalta que é imprescindível que as técnicas estatísticas multivariadas sejam empregadas somente em bancos de dados que apresentem correlações significativas entre os seus dados. Nesse contexto destaca-se o “Teste de Esfericidade de Bartlett”, o qual deve ser aplicado antes do uso de qualquer análise estatística multivariada dos dados. Ele verifica a correlação entre as variáveis presentes do banco em estudo.

3.3.2 Teste de Esfericidade de Bartlett

A correlação é uma medida normalizada da covariância entre duas variáveis que é capaz de determinar a relação linear entre as mesmas. Ela varia de -1 a 1. Quanto mais próximo de 0 for o valor da correlação, menor será a relação entre as variáveis. Ao passo que a correlação se aproxima de 1, indica uma relação positiva entre as variáveis, enquanto uma correlação próxima a -1 indica uma relação negativa entre elas (SANTOS, 2009).

Há diversos tipos de coeficientes de correlação disponíveis para análise. Para este trabalho será apresentado o Coeficiente de Correlação Linear de Pearson, tendo em vista que este método é adequado para medir a correlação entre duas variáveis e é indicado para variáveis quantitativas (LIRA, 2004). Este coeficiente foi proposto por Francis Galton e Karl Pearson em 1897 (LIRA, 2004).

O estimador do Coeficiente de Correlação de Pearson é calculado por meio da Equação (4).

$$\rho_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sqrt{\sigma_{ii}\sigma_{jj}}} \quad (4)$$

Sendo,

- σ_{ij} é a covariância entre as variáveis i e j ;
- σ_{ii} é a variância da variável i ;
- σ_{jj} é a variância da variável j .

Para utilização deste coeficiente, são pressupostos que haja uma relação linear entre as duas variáveis e que essas variáveis sejam aleatórias (LIRA, 2004)

Conforme CALLEGARI-JAQUES (2003) a correlação entre duas variáveis pode ser classificada de acordo com o exposto na Tabela 1.

Tabela 1 - Interpretação dos valores do coeficiente de correlação linear de Pearson.

Correlação	Descrição
$0 < \rho < 0,30$	Fraca correlação linear
$0,30 < \rho < 0,60$	Moderada correlação linear
$0,60 < \rho < 0,90$	Forte correlação linear
$0,90 < \rho < 1,00$	Correlação linear muito forte

O Teste de Esfericidade de Bartlett fornece qual a significância estatística nas correlações entre as variáveis em análise. Esse teste compara a matriz de correlação das variáveis com a matriz identidade, conforme demonstrado na Equação (5).

$$\begin{bmatrix} 1 & \rho_{12} & \rho_{13} & \cdots & \rho_{1p} \\ \rho_{21} & 1 & \rho_{23} & \cdots & \rho_{2p} \\ \rho_{31} & \rho_{32} & 1 & \cdots & \rho_{3p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{p1} & \rho_{p2} & \rho_{p3} & \cdots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Sendo,

- ρ_{ij} , $i = 1, 2, \dots, p$ e $j = 1, 2, \dots, p$ é a correlação entre as variáveis i e j ;
- p é o número de variáveis.

Uma vez que a hipótese básica parte do pressuposto de que a matriz de correlações é idêntica à matriz Identidade, podemos afirmar que:

- $H_0: R=0$, não há correlação suficiente para aplicação de técnica multivariada;
- $H_a: R \neq I$, há correlação suficiente para aplicação de técnica multivariada.

A estatística do teste é fornecida pela Equação (6)(BARTLETT, 1951).

$$\chi^2 = - \left[(n - 1) - \frac{2p + 5}{6} \right] \ln|\mathbf{R}| \quad (6)$$

Sendo,

- n é o tamanho da amostra;
- p é o número de variáveis;
- $|\mathbf{R}|$ é o determinante da matriz de correlação.

A estatística do teste segue uma distribuição qui-quadrado (χ^2) com graus de liberdade, conforme a Equação (7).

$$df = \frac{p(p - 1)}{2} \quad (7)$$

- df são os graus de liberdade;
- p é o número de variáveis.

Para que as correlações na matriz de correlação sejam consideradas significativas, com um nível de confiança de 95%, o p-valor deve ser menor que 0.05.

3.3.3 Identificação de Outliers Multivariados

Nos dias atuais, é comum lidar com dados multidimensionais, o que pode elevar as chances de ocorrerem valores atípicos (GHORBANI, 2019). A presença de alguns poucos *outliers*, pode ser suficiente para distorcer os resultados dos dados, pela alteração da performance média, aumento da variabilidade, etc (GHORBANI, 2019).

No campo da estatística multivariada, a distância de Mahalanobis tem uma aplicação importante na detecção de *outliers* (MAJEWSKA, 2015). A distância de Mahalanobis mede o número de desvios-padrão que um elemento apresenta da média de uma distribuição (GHORBANI, 2019). Como os *outliers* geralmente não seguem o comportamento típico dos demais elementos em pelo menos uma

dimensão, a distância de Mahalanobis pode ser empregada na identificação desses outliers (GHORBANI, 2019).

Para um conjunto de dados com n elementos amostrais e p variáveis (de dimensão p), com um conjunto de valores com média $\mu = (\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_p)^T$ e matriz de covariância S para um vetor multivariado $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_p)^T$. A distância de Mahalanobis para cada caso multivariado $i, i = 1, \dots, n$, é dada por M_i , conforme a Equação (8).

$$M_i = \left(\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^T S^{-1} (x_i - \mu)^2 \right)^{1/2} \quad (8)$$

Conseqüentemente, os elementos amostrais, com grandes valores de distância de Mahalanobis em relação ao vetor de médias dos dados, podem ser indicativos de outliers (AGUINIS *et al.*, 2013). Para dados com distribuição normal, a distância de Mahalanobis é aproximadamente o qui-quadrado distribuído com p graus de liberdade (MAJEWSKA, 2015). Os potenciais outliers multivariados x_i apresentaram tipicamente grandes valores de M_i , e nesta situação uma comparação com χ_p^2 poderá ser feita (MAJEWSKA, 2015).

3.3.4 Técnica de Análise de Componentes Principais

A Técnica de Análise de Componentes Principais foi proposta por Pearson em 1901 e fundamentada em 1933 no artigo de Hotelling. Seu principal objetivo, de acordo com MINGOTI (2013), é descrever a estrutura de variância e covariância de um vetor aleatório composto por p variáveis aleatórias, por meio da construção de combinações lineares das variáveis originais. Essas combinações lineares, chamadas de componentes principais, não possuem correlação entre si.

A Técnica de Análise de Componentes Principais pode ser empregada para redução de p variáveis para k variáveis, onde $p > k$, e para quantificar variáveis qualitativas.

A Análise de Componentes Principais não exige a suposição de normalidade multivariada para sua utilização e, portanto, pode ser utilizada em qualquer conjunto de variáveis, desde que haja correlação entre elas. Além disso, a técnica pode ser aplicada apenas a variáveis quantitativas e qualitativas ordinais.

Tanto a matriz de covariância quanto a de correlação pode ser usada na análise de componentes principais, mas quando as variáveis apresentam variabilidades muito diferentes, a matriz de correlação deve ser usada para evitar que a variável com maior variância resulte em viés na análise.

3.3.4.1 Componentes Principais Extraídas Via Matriz de Correlações

Considere um vetor aleatório x com p variáveis. A variável padronizada Z_i , com $i = 1, 2, \dots, p$, é obtida através da fórmula $Z_i = (X_i - \mu_i)/\sigma_i$, em que μ_i é a média e σ_i é o desvio padrão da variável i . A matriz $P_{p \times p}$ representa a matriz de covariâncias das variáveis padronizadas Z_i , que também pode ser definida como a matriz de correlação das variáveis X_i . Os autovalores da matriz de correlações, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_p$, são ordenados de forma decrescente, e os respectivos autovetores normalizados correspondentes, $e_1, e_2, e_3, \dots, e_p$, são obtidos.

É possível a criação de novas variáveis não correlacionadas entre si, denominadas componentes principais, cujas variâncias decresçam da primeira para a última. A i -ésima componente principal, tal que $i = 1, 2, 3, \dots, p$, é fornecida pela Equação (9).

$$Y_i = e_i^t Z = [e_1 \quad e_2 \quad e_3 \quad \dots \quad e_p] \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ \vdots \\ Z_p \end{bmatrix} = e_{i1}z_1 + e_{i2}z_2 + e_{i3}z_3 + \dots + e_{ip}z_p \quad (9)$$

Sendo,

- Y_i : i -ésima componente principal;

- e_i : i -ésimo autovetor normalizado;
- Z : vetor aleatório padronizado.

Ao observar a Equação (10), pode-se perceber que as componentes principais são combinações lineares das variáveis padronizadas X , em que os autovetores da matriz de correlações são os coeficientes para os termos de Y_i .

A variância de Y_i é fornecida pela Equação (10).

$$Var[Y_i] = Var[e_i^t Z] = e_i^t Var[Z] e_i = e_i^t \sum e_i = e_i^t \lambda_i e_i = e_i^t e_i \lambda_i = \lambda_i \quad (10)$$

Sendo,

- $\Sigma e_i = \lambda_i e_i$.

Portanto, o autovalor λ_i corresponde à variância associada à componente principal Y_i .

A Equação (11) fornece a proporção da variância total de X que é explicada pela i -ésima componente principal. Em outros termos, essa equação nos informa sobre a importância relativa da i -ésima componente principal na explicação da variação total dos dados.

$$\frac{Var[Y_i]}{Variance\ total\ de\ X} = \frac{\lambda_i}{traço(\Sigma_{p \times p})} = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^p \lambda_i} \quad (11)$$

3.3.4.2 Critérios para Determinação do Número de Componentes Principais a serem Retidas na Análise

A técnica de componentes principais pode ser empregada para reduzir a dimensionalidade dos dados, e existem critérios que auxiliam na seleção do número de componentes principais a serem utilizados na análise de dados.

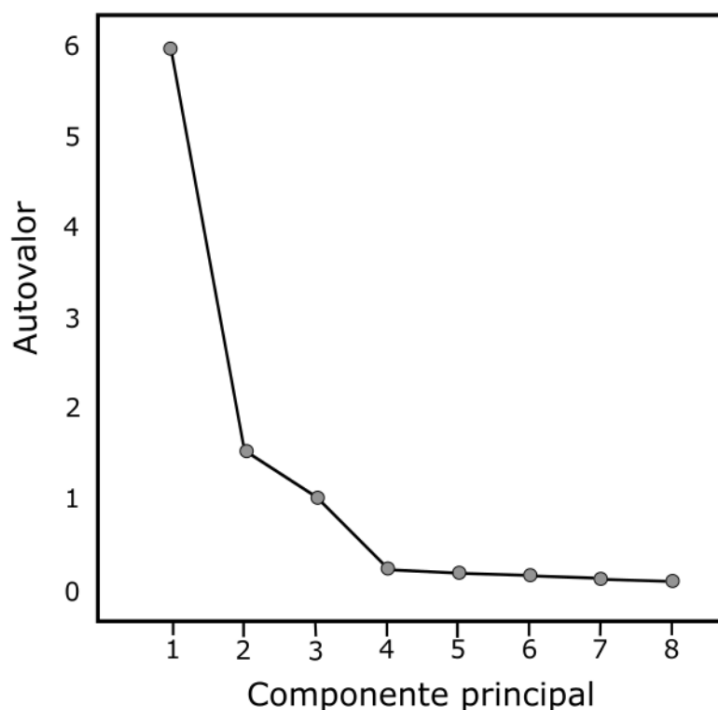
Dentre os critérios disponíveis, destaca-se o critério proposto por KAISER (1970), que sugere reter as componentes principais com autovalores acima da média, caso a

análise seja baseada em matriz de covariâncias, ou acima de 1, caso a análise seja baseada em matriz de correlações.

A determinação do número de componentes a serem mantidas pode ser baseada na análise da proporção acumulada da variância explicada pelas componentes. Não há um valor pré-definido para essa proporção e sua escolha deve ser feita considerando o fenômeno em estudo. Em alguns casos, é possível explicar mais de 90% da variância total com uma ou duas componentes principais, enquanto em outros casos pode ser necessário um número maior de componentes (MINGOTI, 2013).

Um outro critério disponível é o *Scree-plot* proposto por CATTELL (1966), que consiste em um gráfico dos autovalores (Figura 3) utilizado para auxiliar na escolha do número de componentes principais a serem mantidas na análise. Geralmente, os primeiros autovalores apresentam diferenças expressivas, que diminuem para os últimos. A sugestão é determinar o número de componentes no ponto em que a variação dos autovalores passa a ser pequena (PEREIRA, 2015).

Figura 3 - Exemplo de gráfico *Scree-plot*.



Fonte: SANTOS (2019).

3.3.5 Regressão Logística

A regressão logística é uma técnica multivariada que permite a classificação de indivíduos em diferentes grupos ou populações (HAIR *et al.*, 2009). Essa técnica é especialmente útil quando se trabalha com variáveis do tipo qualitativas ou quantitativas (HAIR *et al.*, 2009). A regra de classificação se baseia em uma ou mais funções que são capazes de distinguir indivíduos pertencentes a duas ou mais populações distintas usando variáveis independentes (HAIR *et al.*, 2009).

Essa técnica é útil na classificação de indivíduos com base em características específicas e na identificação das variáveis de maior relevância na distinção entre as populações. É pré-requisito para aplicação da técnica o conhecimento da variável dependente (variável classificatória) para todos os indivíduos. A aplicação da técnica de regressão logística gera uma regra de classificação que pode ser utilizada para classificar indivíduos com população desconhecida (HOSMER & LEMESHOW, 2000; MINGOTI, 2013).

A regressão logística permite a estimativa da probabilidade de ocorrência de um evento. Suponha que tenhamos amostrado duas populações (população 1 e população 2) e, para cada elemento amostral, tenhamos observado o vetor $x = (x_1, x_2, \dots, x_p)$. No modelo logístico, é possível estimar as probabilidades de um elemento com vetor de observações x pertencer a cada uma das duas populações pelas Equações (12) e (13)

$$\hat{p}(1) = \text{prob}(1|x) = \frac{e^{g(x)}}{1 + e^{g(x)}} \quad (12)$$

$$\hat{p}(2) = \text{prob}(2|x) = \frac{1}{1 + e^{g(x)}} \quad (13)$$

Sendo,

- $\hat{p}(1)$ a probabilidade do indivíduo x de pertencer à população 1;
- $\hat{p}(2)$ a probabilidade do indivíduo x de pertencer à população 2;

- $g(x) = \beta_0 + \beta^t X = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p$ é a função classificatória;
- $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ são os coeficientes da regressão logística.

A obtenção dos coeficientes β do modelo é realizada a partir do conjunto de dados, pela maximização da função de máxima verossimilhança, conforme a Equação (14)

$$\log L(\beta) = \sum_{i=1}^p y_i (\beta_0 + \hat{\beta}^t x_i) - \sum_{i=1}^p \log_e (1 + e^{\beta_0 + \hat{\beta}^t x_i}) \quad (14)$$

Sendo,

- y_i , o número de ocorrências do evento.

Não há uma solução analítica para a equação que maximiza a função da máxima verossimilhança (SANTOS, 2019). Conforme MESQUITA (2014), valores arbitrários são atribuídos aos coeficientes de regressão logística, a fim de criar um modelo inicial para a predição dos dados observados. Após essa etapa inicial, procede-se à avaliação dos erros da previsão e ajustam-se os coeficientes de regressão, com o objetivo de aumentar a probabilidade dos dados observados sob o novo modelo. Esse processo é repetido iterativamente até que as diferenças entre o modelo mais novo e o modelo anterior sejam estatisticamente não significativas.

De acordo com MESQUITA (2014), diferentemente da regressão linear, a interpretação dos coeficientes β em regressão logística não é tão simples nem diretamente compreensível, já que se trata de uma função de resposta não linear. Os coeficientes $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ têm um impacto direto sobre a variação da probabilidade de ocorrência de um evento específico (SANTOS, 2019).

Existem vários testes estatísticos disponíveis para avaliar o impacto de cada coeficiente na regressão logística, permitindo verificar a significância de cada variável independente em relação à variável dependente de um modelo logístico (SANTOS, 2019). Entre eles, cabe destacar o teste de Wald, esse teste é utilizado para avaliação da significação estatística de cada coeficiente presente no modelo, sendo calculado

pela razão entre o coeficiente da regressão logística e o seu respectivo desvio padrão, conforme Equação (15). O objetivo é avaliar a hipótese de que o coeficiente de uma variável independente no modelo não apresenta diferença significativa em relação a zero (SANTOS, 2019). Caso o teste falhe em rejeitar a hipótese nula, isso sugere que a remoção da variável do modelo não terá um impacto significativo no ajuste do modelo logístico (SANTOS, 2019).

A hipótese do teste é expressa por:

- $H_0: \beta_i = 0$;
- $H_a: \beta_i \neq 0$.

$$W = \frac{\beta_i}{DP(\beta_i)} \quad (15)$$

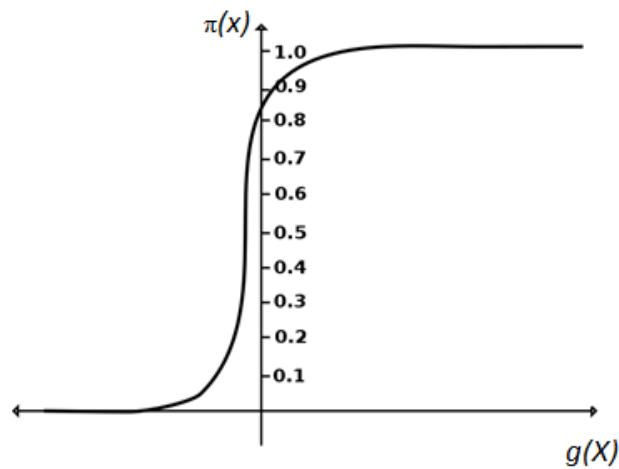
Sendo,

- $\beta_i, i = 1, 2, \dots, p$ é o i -ésimo coeficiente do modelo logístico;
- $DP(\beta_i)$ é o desvio padrão do i -ésimo coeficiente do modelo logístico.

A estatística do teste segue uma distribuição normal. Para que o coeficiente da regressão logística seja estatisticamente significativo a um nível de confiança de 95%, o valor de p deve ser inferior a 0.05. Já em um nível de confiança de 90%, o p -valor deve ser inferior a 0.1.

Graficamente, a regressão logística apresenta comportamento semelhante ao formato da letra S (Figura 4). Quando $g(X) \rightarrow +\infty$, a probabilidade de o indivíduo pertencer à população i é igual a 100%. Quando $g(X) \rightarrow -\infty$, a probabilidade é igual a 0%.

Figura 4 - Exemplo de gráfico de regressão logística.



Fonte: SANTOS (2019).

3.3.5.1 Validação de regras de classificação (regressão logística) e obtenção da probabilidade de classificação incorreta

A validação das regras de classificação envolve a estimativa das probabilidades de classificação incorreta (SANTOS, 2019). No caso de duas populações, é necessário avaliar dois tipos de erros: o erro tipo 1 e o erro tipo 2 (SANTOS, 2019). O erro tipo 1 ocorre quando a regra classificatória classifica um elemento na população 2, quando na verdade ele pertence à população 1 (SANTOS, 2019). Já o erro tipo 2 ocorre quando a regra classificatória classifica um elemento na população 1, quando na verdade ele pertence à população 2 (SANTOS, 2019).

As probabilidades de ocorrência de erros tipo 1 e tipo 2 são representadas por $P(1|2)$ e $P(2|1)$ (SANTOS, 2019), respectivamente e são calculadas por meio das Equações (16) e (17).

$$P(1|2) = \frac{n_{12}}{n_1} \quad (16)$$

$$P(2|1) = \frac{n_{21}}{n_2} \quad (17)$$

Sendo,

- n_{12} é o número de elementos da população 1 que foram erroneamente classificados como pertencentes à população 2 pela regra de classificação;
- n_1 é o número total de elementos da população 1;
- n_{21} é o número de elementos da população 2 que foram erroneamente classificados como pertencentes à população 1 pela regra de classificação;
- n_2 é o número total de elementos da população 2.

Quanto menores forem as probabilidades de ocorrência de erros tipo 1 e tipo 2, melhor será a regra de classificação.

Um dos procedimentos mais utilizados determinação dessas probabilidades é o método da ressubstituição com divisão amostral (MINGOTI, 2013). A técnica de ressubstituição com divisão amostral envolve a aleatória divisão dos dados amostrais em duas partes: uma amostra de treino e outra amostra de teste (SANTOS, 2019). A amostra de treino é usada para estimar a regra de classificação, enquanto a amostra de teste é usada para avaliar os erros (SANTOS, 2019). Este método é amplamente considerado o mais indicado e confiável, pois não utiliza os mesmos elementos amostrais que foram usados para estimar a probabilidade de erro na função de classificação (SANTOS, 2019).

Além disso, é possível estimar a probabilidade geral de acerto (P_{acerto}) e a taxa de erro aparente (T_{EA}) da regra de classificação. A P_{acerto} é calculada a partir da Equação (18) e a T_{EA} é obtida por meio da Equação (19).

$$P_{acerto} = \frac{n_{11} + n_{22}}{n_1 + n_2} \quad (18)$$

$$T_{EA} = \frac{n_{12} + n_{21}}{n_1 + n_2} \quad (19)$$

O conteúdo abordado neste tópico pode ser facilmente generalizado para k populações.

4 METODOLOGIA

4.1 Construção do banco de dados e seleção de variáveis

O banco de dados utilizado é composto pelos casos históricos de liquefação de solos levantados por BOULANGER & IDRIS (2014) no seu estudo “CPT AND SPT BASED LIQUEFACTION TRIGGERING PROCEDURES”. Ao total, os autores compilaram 253 casos históricos de falhas de estruturas geotécnicas, sendo:

- 180 deles com evidências de manifestação em superfície de liquefação;
- 71 sem apresentação de evidências de manifestação em superfície de liquefação;
- 2 desses casos considerados como situados no limiar entre se liquefazer e não liquefazer.

A seleção inicial das variáveis para o banco de dados, deste trabalho foi realizada de maneira a utilizar somente as variáveis que apresentavam dados para todos os casos históricos compilados em BOULANGER & IDRIS (2014). Além disso, os dois casos considerados como liquefação marginal foram removidos das análises tendo em vista a presença pouco expressiva em relação ao total de casos.

Na existência de variáveis que são derivadas de outras, somente as variáveis independentes foram utilizadas. Quanto ao tipo de variáveis, com exceção do status (susceptível ou não susceptível à liquefação cíclica), as demais variáveis consideradas para a elaboração desse banco de dados são todas quantitativas. Cabe ressaltar que as variáveis selecionadas também foram escolhidas pela sua possibilidade de obtenção por meios de ensaios de campo como ensaios CPTU, ensaios de laboratório de caracterização e estudos de resposta sísmica local.

O banco de dados obtido para esse trabalho é apresentado no APÊNDICE A, enquanto o banco de dados original desenvolvido por BOULANGER & IDRIS (2014) e utilizado como fonte é apresentado no ANEXO A.

4.2 Análise descritiva de variáveis e matriz de correlação das variáveis

A análise descritiva dos dados foi realizada por meio da análise individual de cada variável (do banco de dados apresentado no APÊNDICE A) por meio de suas medidas

de tendência central, histogramas e *boxplots*. por meio da matriz de correlação das variáveis, buscando encontrar associações geotécnicas possíveis para os valores de correlação apresentados na matriz.

4.3 Identificação de outliers multivariado

Foi aplicada distância de Mahalanobis entre todas as amostras do banco de dados até o vetor de médias dos dados. Aqueles que apresentaram valores discrepantes para essa métrica foram removidos do banco.

4.4 Teste de Esfericidade de Bartlett

Tendo em vista que se objetiva aplicação de técnica multivariada, foi utilizado o Teste de Esfericidade de Bartlett para verificar a existência de correlações significativas para o banco de dados elaborados para esse trabalho.

4.5 Análise de Componentes Principais

Foi realizada a análise de componentes principais no banco de dados elaborado objetivando a redução da dimensionalidade dos dados originais por meio da conversão das variáveis originais em novas variáveis denominadas componentes principais (combinação linear das variáveis originais). Foi empregada a análise de componentes principais via matriz de correlação em função da grande variabilidade das variâncias dos parâmetros (variáveis) utilizados, identificado mediante *boxplot* das variáveis.

A metodologia para obtenção da regra de predição com base em regressão logística foi implementada no Software R (R Core Team, 2022), cujo script é apresentado no APÊNDICE B.

4.6 Separação dos dados componentes principais

Plotou-se um gráfico *biplot* das duas componentes principais dos maiores autovalores associados em conjunto dos escores dos casos históricos obtidos.

4.7 Obtenção de modelo via regressão logística

Para obtenção do modelo de avaliação da susceptibilidade à liquefação dinâmica foi utilizado o banco de dados citado no item 4.1 e apresentado em sua totalidade no APÊNDICE A, foi aplicada a análise de regressão logística. A condição quanto a ocorrência de liquefação com manifestação em superfície é conhecida, a saber: Liquefaz e Não Liquefaz. O teste de Wald foi realizado para determinar as variáveis de maior significância no modelo logístico gerado.

A metodologia para obtenção da regra de predição com base em regressão logística foi implementada no *Software R* (*R Core Team, 2022*), cujo script é apresentado no APÊNDICE D.

4.8 Validação e avaliação do modelo obtido via regressão logística

O modelo de predição obtido foi validado por meio do método de ressubstituição com divisão amostral. O banco de dados foi subdividido em amostra de treino (80%) e teste (20%). A taxa de erro aparente do modelo foi obtida por meio da amostra de teste e da Equação (20) a partir da matriz de confusão apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Matriz de confusão para as duas classes.

	Classificação obtida a partir do modelo de predição			
	População	Liquefaz	Não Liquefaz	Total
Classe Real	Liquefaz	n_{11}	n_{12}	n_1
	Não Liquefaz	n_{21}	n_{22}	n_2

$$T_{EA} = \frac{n_{12} + n_{21}}{n_1 + n_2} \quad (20)$$

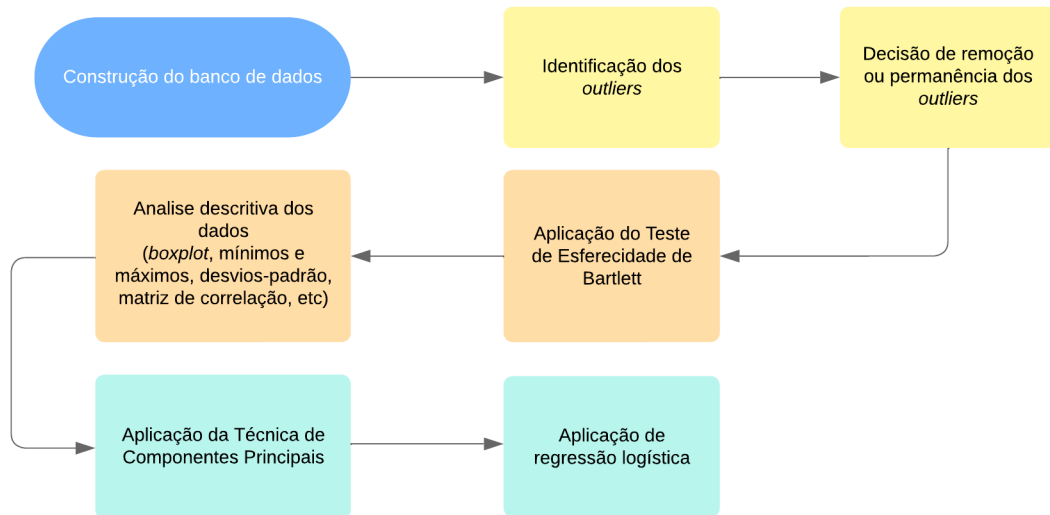
Sendo,

- n_1 é o número de casos que liquefaz;
- n_2 é número de casos que não liquefaz;

- n_{ij} , $i = 1,2$ e $j = 1,2$ é o número de casos da amostra de teste que foram classificados na população i sendo que eles são da população j .

4.9 Resumo da Metodologia Aplicada

Figura 5 - Fluxograma resumo da metodologia aplicada.



5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Seleção de Variáveis

As variáveis consideradas no banco deste trabalho são listadas a seguir. Entre chaves é apresentado a nomenclatura original utilizada por BOULANGER & IDRIS (2014). O ANEXO A apresenta o banco de dados original.

- V1: Magnitude de momento do sismo em M_w [Mag (M)]
- V2: Aceleração horizontal máxima induzida pelo sismo [a_{max} (g)]
- V3: Profundidade crítica média (m) [Avg depth (m)]
- V4: Profundidade da linha freática (m) [Depth to GWT (m)]
- V5: Tensão vertical efetiva (kPa) [σ'_{vc} (kPa)]
- V6: Resistência média de ponta do cone para pressão atmosférica = 1 atm [Tip (q_{cN})_{aver}]
- V7: Atrito lateral médio [Sleeve (f_{sN})_{aver}]
- V8: Concentração de finos (% passante na peneira #200) representativa para cada caso em porcentagem [Repr.FC (%)]
- V9: coeficiente de redução de tensão de cisalhamento [r_d]

É importante destacar que as variáveis selecionadas foram escolhidas não apenas por sua relevância geotécnica, mas também pela possibilidade de obtenção dos parâmetros escolhidos por meio de ensaios CPTU (V3, V4, V6, V7), ensaios de laboratório de caracterização (V5, V8) e estudos de resposta sísmica local (V1, V2 e V9).

Quanto ao sentido físico e geotécnico da variável V3 (“Profundidade crítica média (m) [Avg depth (m)]”), grandes deformações superficiais devidas à liquefação têm sido observadas em muitos depósitos de solo que parecem apresentar boas características geotécnicas (HOSSEINI *et al*, 2010). Estas deformações são frequentemente associadas a liquefação de camadas de areia envoltas por solos argilosos ou siltosos chamadas "lentes de areia" (HOSSEINI *et al*, 2010). O potencial de liquefação diminui frequentemente com o aumento da profundidade (HOSSEINI *et al*, 2010). Assim, pode ser definida uma profundidade específica de incorporação das lentes de areia abaixo

da qual a liquefação seria improvável ou a consequente deformação da superfície seria insignificante (HOSSEINI *et al*, 2010). Esta profundidade é denominada profundidade crítica (HOSSEINI *et al*, 2010).

A condição de cada caso que compõe o banco de dados se divide em duas situações ocorrência de liquefação dinâmica (Yes), não ocorrência de liquefação dinâmica (No).

A Tabela 2 apresenta 5 casos utilizados pertencentes ao banco de dados utilizado neste trabalho. Os casos constituintes em sua totalidade podem ser conferidos ao fim desse documento no APÊNDICE A

Tabela 3 - Casos presentes no banco de dados.

ID	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	Status
1	7.60	0.162	4.4	1.1	49	39.8	0.39	3	0.97	Yes
2	7.60	0.162	3.1	1.4	40	30.0	0.30	5	0.98	Yes
3	7.60	0.162	5.5	1.7	61	124.0	1.60	5	0.96	No
4	7.20	0.600	2.9	3.1	50	20.0	0.10	18	0.98	Yes
5	7.20	0.300	1.4	1.4	24	8.0	0.02	16	0.99	Yes

5.2 Identificação e Remoção de *Outliers*

Foi calculada a distância de Mahalanobis dos elementos amostrais pertencentes ao banco de dados até o centro dos dados. Considerando uma distribuição qui-quadrado com 9 graus de liberdade (quantidade de variáveis quantitativas utilizadas no banco de dados), a máxima distância aceitável de um dado até o centro dos dados é igual a 16,9. Elementos amostrais que apresentam valor superior a 16,9 são classificados como *outliers*. A Figura 6, apresenta os casos históricos, bem como suas posições em relação a esse limiar estabelecido para a distribuição dos dados. Assim, todos os casos com valores superiores a esse limiar foram retirados da análise. Ao total foram removidos 24 dos 251 casos do banco. A ID desses casos e suas respectivas distâncias de Mahalanobis são apresentadas na Tabela 4.

Figura 6 - Casos históricos e distância de Mahalanobis.

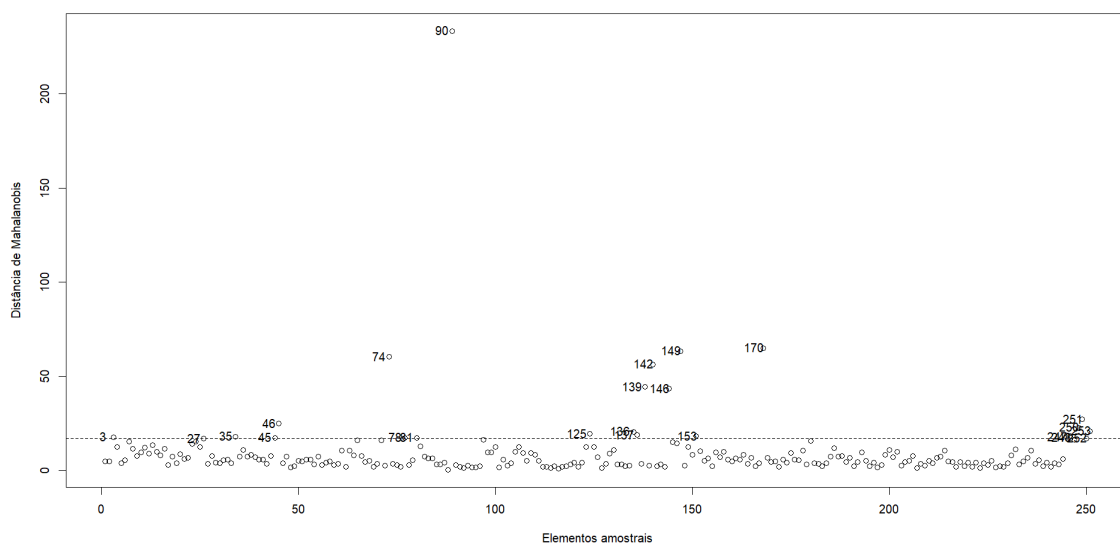


Tabela 4 - IDs e respectivas distâncias de Mahalanobis dos casos removidos do banco.

ID	distância de Mahalanobis
3	17.78
27	16.94
35	18.05
45	17.46
46	24.99
74	60.40
78	17.51
81	17.48
90	233.16
125	19.55
136	20.55
137	18.88
139	44.41
142	56.39
146	43.50
149	63.48
153	18.19
170	64.90
247	17.73
248	17.38
250	22.89

ID	distância de Mahalanobis
251	27.11
252	17.03
253	21.03

5.3 Teste de Esfericidade de Bartlett e Análise Descritiva do Banco de Dados

Para verificar se os dados apresentavam correlações significativas e permitiam a aplicação de técnicas multivariadas, foi realizado o Teste de Esfericidade de Bartlett. Inicialmente, foi realizada a análise de correlação entre as nove variáveis, utilizando o coeficiente de correlação de Pearson. Essa escolha se deve ao fato de todas as variáveis presentes no banco de dados serem do tipo quantitativas. A matriz de correlações entre as variáveis é apresentada na Figura 7.

Figura 7 - Matriz de correlação das variáveis do banco de dados elaborado.

1.00	0.14	0.02	-0.09	-0.03	-0.02	0.11	0.08	0.34
0.14	1.00	0.03	0.06	0.03	0.19	0.37	-0.05	0.01
0.02	0.03	1.00	0.45	0.93	0.26	0.26	-0.06	-0.90
-0.09	0.06	0.45	1.00	0.74	0.24	0.13	-0.10	-0.43
-0.03	0.03	0.93	0.74	1.00	0.29	0.24	-0.08	-0.86
-0.02	0.19	0.26	0.24	0.29	1.00	0.55	-0.54	-0.20
0.11	0.37	0.26	0.13	0.24	0.55	1.00	-0.17	-0.15
0.08	-0.05	-0.06	-0.10	-0.08	-0.54	-0.17	1.00	0.07
0.34	0.01	-0.90	-0.43	-0.86	-0.20	-0.15	0.07	1.00

Dentre as correlações vale a pena destacar a possível influência geotécnica e sísmica de algumas correlações obtidas via matriz de correlação. As correlações entre a variável V1 (Magnitude de momento do sismo em Mw), bem como da variável V2 (Aceleração horizontal máxima induzida pelo sismo) com as demais variáveis apresentam de fraca a moderada correlação linear, o que aparenta fazer sentido tendo em vista que a ocorrência de um terremoto não é previsível, sendo um evento que independe das características geotécnicas apresentadas, estando atreladas a energia

liberada proveniente da movimentação de placas tectônicas (GELLER, 1997; MINSON *et al.*, 2018).

A relação da variável V3 (Profundidade crítica média (m)) com a V5 (Tensão vertical efetiva (kPa)) apresenta a maior correlação do banco de dados com um valor de 0.93, as tensões verticais efetivas aumentam em função da profundidade.

A variável V8 (Concentração de finos representativa para cada caso em porcentagem) com a variável V3 (Profundidade crítica média (m)) apresentou fraca correlação linear, o que faz sentido tendo em vista que a concentração de finos estaria mais ligada ao intemperismo e pedogênese do solo, não a dados os quais se relacionam apenas com profundidades.

A correlação positiva entre as variáveis V4 (Profundidade da linha freática (m)) e V5 (Tensão vertical efetiva (kPa)) pode estar ligada ao fato de que a tensão vertical efetiva aumenta com a profundidade. Em casos históricos com linhas freáticas mais profundas, uma maior porção de solo precisa ser considerada no cálculo da tensão geostática, podendo ser essa uma possível explicação para o valor de 0.74 observado na matriz de correlação.

Em seguida, o Teste de Esfericidade de Bartlett foi realizado de acordo com o item 3.3.2. Os resultados do teste estatístico podem ser encontrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados da aplicação do Teste de Esfericidade de Bartlett

Parâmetro estatístico	Valor
χ^2	2537.35
df	36
p -valor	0

Uma vez que o p -valor obtido é nulo, menor que 0.05, pode-se rejeitar a hipótese nula $H_0 (R = I)$, o que indica que há uma correlação significativa entre as variáveis e torna viável a aplicação de técnicas estatísticas multivariadas.

5.4 Análise Descritiva das Variáveis

A Tabela 6 apresenta os valores aproximados de mínimo, máximo, média e mediana das nove variáveis (V1: Magnitude de momento do sismo (Mw); V2: Aceleração horizontal máxima induzida pelo sismo em g; V3: Profundidade crítica média (m); V4: Profundidade da linha freática (m); V5: Tensão vertical efetiva (kPa), V6: Resistência média de ponta do cone para pressão atmosférica = 1 atm; V7: Atrito lateral médio; V8: Concentração de finos (%) representativa para cada caso; V9: coeficiente de redução de tensão de cisalhamento):

Tabela 6 - Mínimo, mediana, média e máximo das variáveis do banco em estudo

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
Mínimo	5.900	0.0900	1.400	0.200	19.0	8.00	0.0100	0.00	0.8400
Mediana	6.930	0.2800	3.900	1.800	50.0	45.90	0.2500	10.00	0.9600
Média	6.937	0.3198	4.266	1.913	55.0	53.15	0.3335	17.12	0.9546
Máximo	9.000	0.8000	11.000	5.600	128.0	163.00	1.5000	85.00	1.0100

Os histogramas das variáveis geotécnicas são apresentados da Figura 8 a Figura 16. Observar esses dados se torna importante para verificar as limitações dos dados quanto e, portanto, o qual generalizável um modelo preditivo obtido por meio deste banco de dados pode ser. Por exemplo, conforme a Figura 8, a variável V1 (Magnitude de momento do sismo em Mw) não apresenta dados para sismos com magnitude inferiores a 5.5Mw e para o intervalo entre 8.0Mw e 8.5Mw, exibindo uma concentração de casos na faixa compreendida entre 6.5 e 7.0Mw.

Figura 8 - Histograma da variável V1 (Magnitude de momento do sismo em Mw)

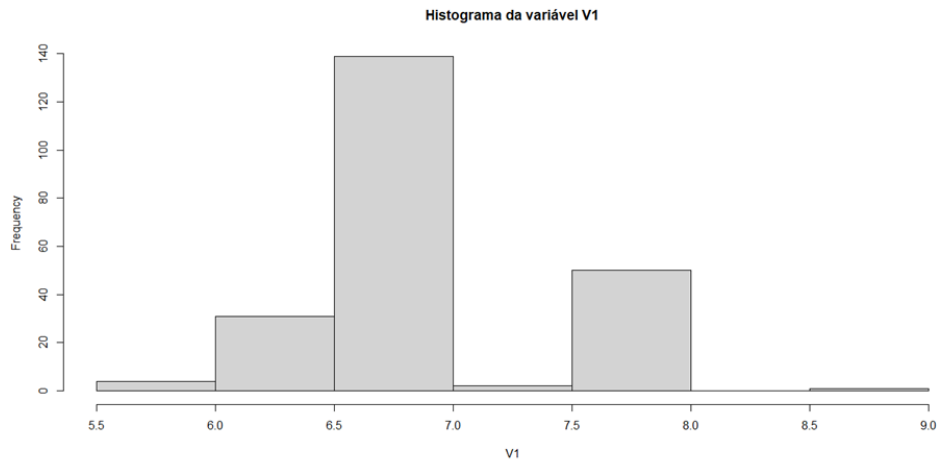


Figura 9 - Histograma da variável V2 (Aceleração horizontal máxima induzida pelo sismo)

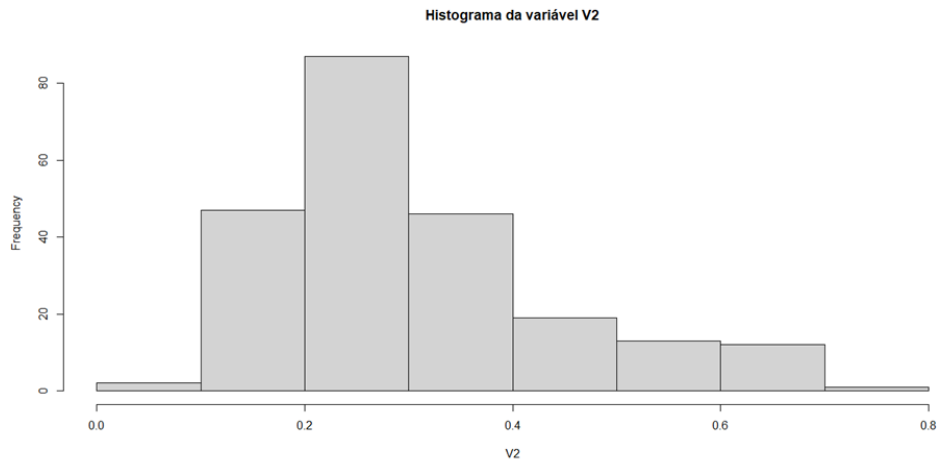


Figura 10 - Histograma da variável V3 (Profundidade crítica média (m))

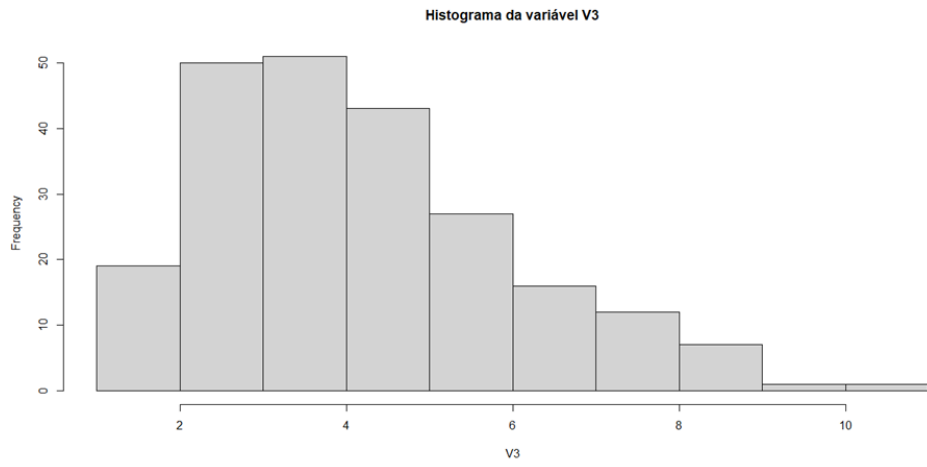


Figura 11 - Histograma da variável V4 (Profundidade da linha freática (m))

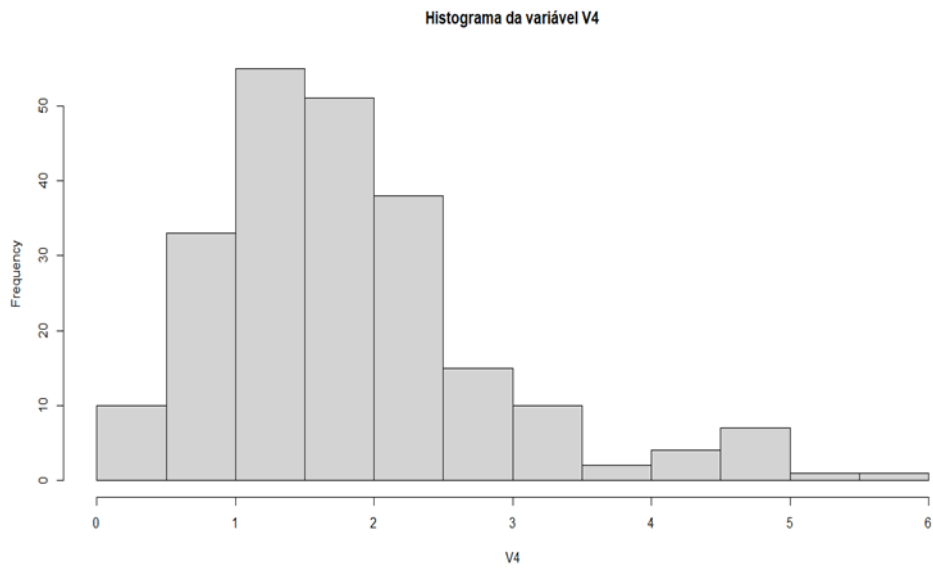


Figura 12 - Histograma da variável V5 (Tensão vertical efetiva (kPa))

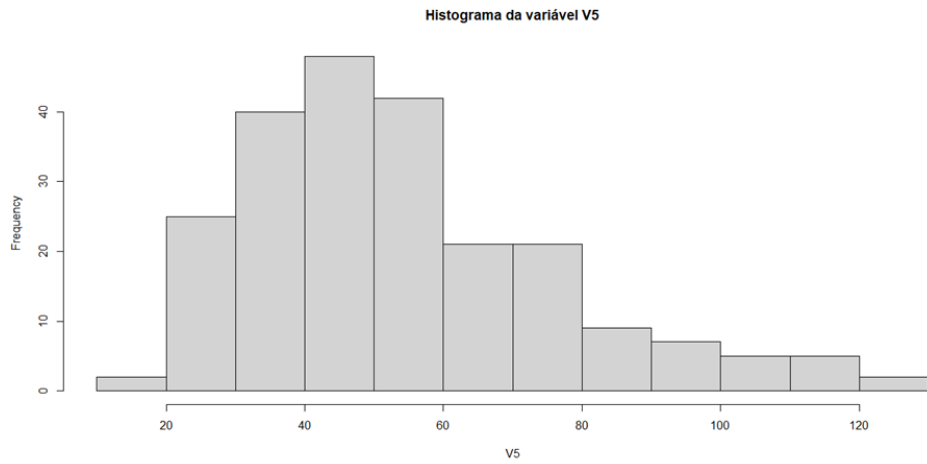


Figura 13 - Histograma da variável V6 (Resistência média de ponta do cone para pressão atmosférica = 1 atm)

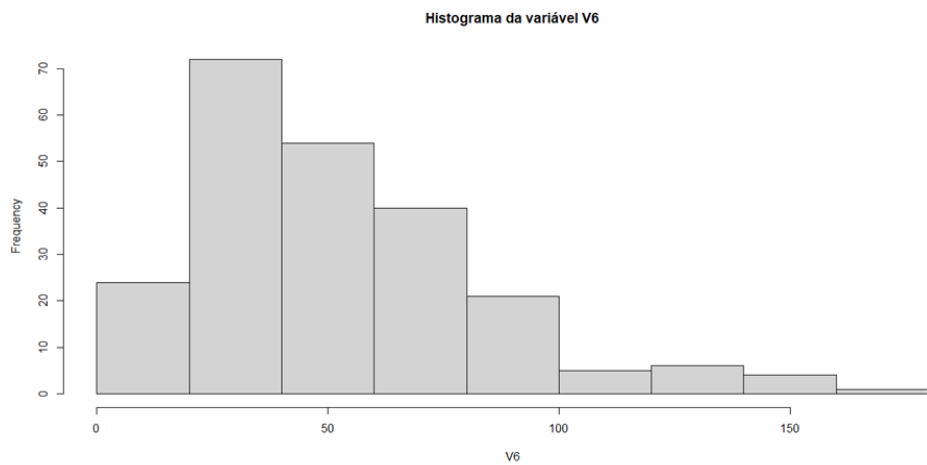


Figura 14 - Histograma da variável V7 (Atrito lateral médio)

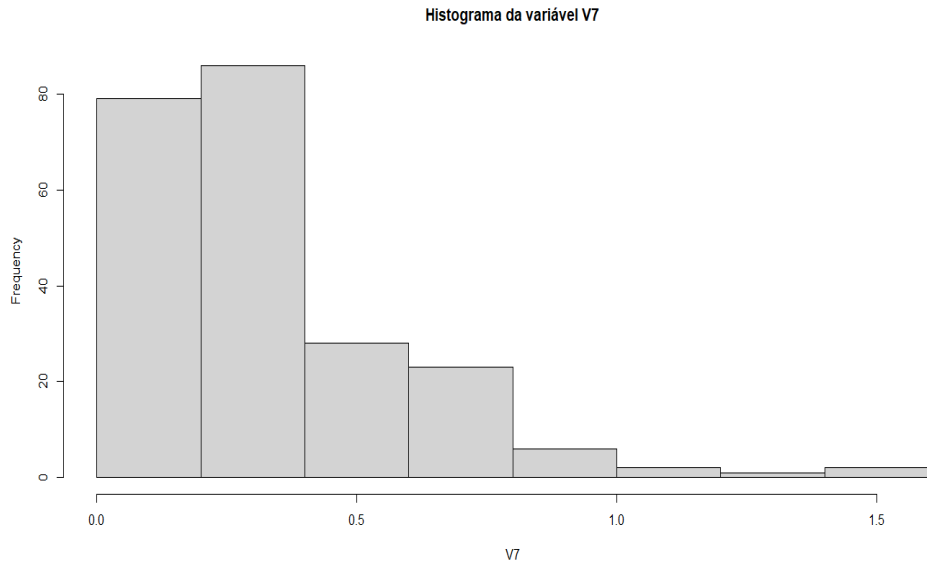


Figura 15 - Histograma da variável V8 (Concentração de finos representativa para cada caso em porcentagem)

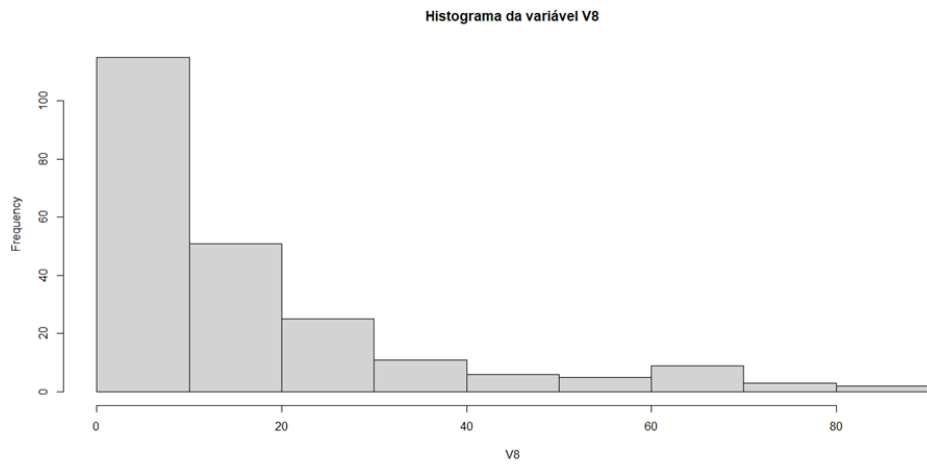
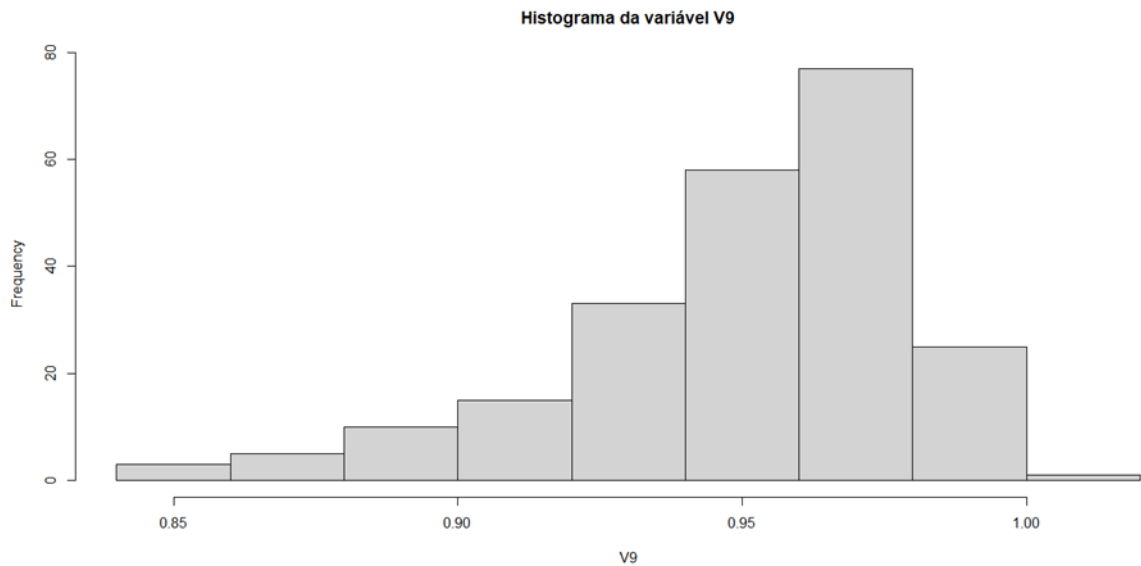


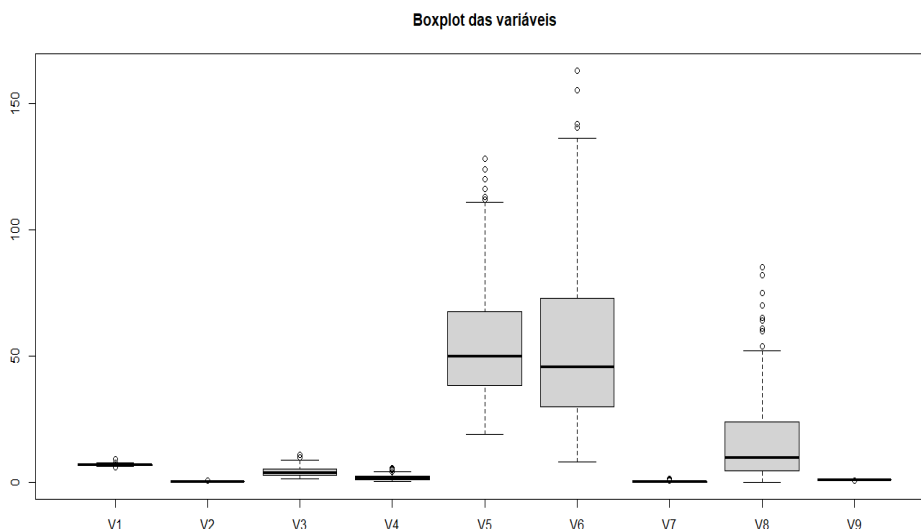
Figura 16 - Histograma da variável V9 (coeficiente de redução de tensão de cisalhamento)



5.5 Aplicação de Componentes Principais

Inicialmente, é preciso decidir se a análise de componentes principais será realizada com base na matriz de covariância ou na matriz de correlação dos dados. Essa decisão é tomada com base na observação da variabilidade das escalas das variáveis, sendo o *boxplot* uma ferramenta comumente utilizada. Quando as variáveis apresentam uma grande variabilidade em suas escalas, conforme demonstrado na Figura 17, é recomendado o uso da matriz de correlação. Ao utilizar essa matriz, os dados são normalizados, o que evita o viés que pode ser causado pela grande discrepância na variabilidade dos dados.

Figura 17 - Boxplot das variáveis via matriz de covariâncias



LEGENDA

V1: Magnitude de momento do sismo (M_w) [Mag (M)]

V6: Resistência média de ponta do cone para pressão atmosférica = 1 atm [$T_{ip} (q_{cN})_{aver}$]

V2: Aceleração horizontal máxima induzida pelo sismo [$a_{max} (g)$]

V7: Atrito lateral médio [$(f_{sN})_{aver}$]

V3: Profundidade crítica média (m) [Avg depth (m)]

V8: Concentração de finos representativa para cada caso em percentagem [Repr.FC (%)]

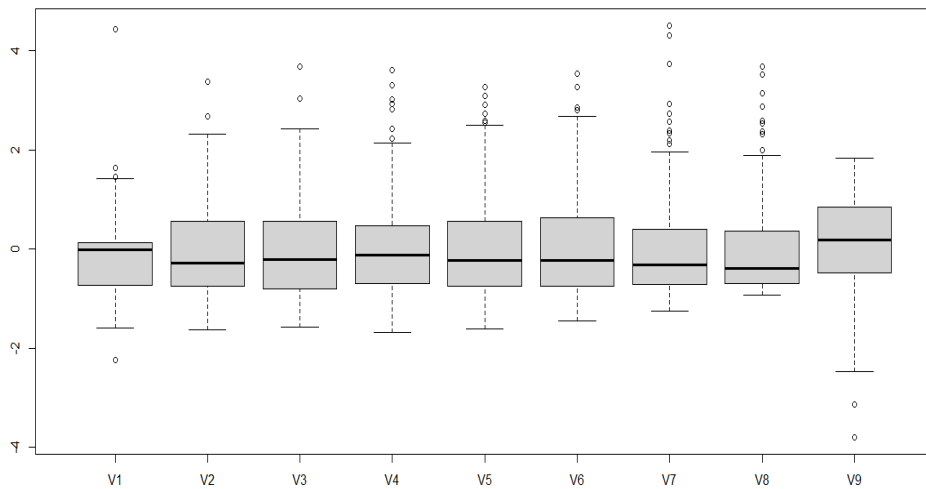
V4: Profundidade da linha freática (m) [Depth to GWT (m)]

V9: coeficiente de redução de tensão de cisalhamento [r_d]

V5: Tensão vertical efetiva (kPa) [$\sigma'_{vc}(kPa)$]

A Figura 18 apresenta o gráfico *boxplot* das variáveis normalizadas. Percebe-se que a normalização dos dados obteve melhora significativa quanto a redução da possibilidade de enviesamento dos dados em razão das escalas das variáveis.

Figura 18 - Boxplot das variáveis via matriz de correlação



LEGENDA

- | | |
|---|---|
| V1: Magnitude de momento do sismo (M_w) [Mag (M)] | V6: Resistência média de ponta do cone para pressão atmosférica = 1 atm [$Tip (q_{cN})_{aver}$] |
| V2: Aceleração horizontal máxima induzida pelo sismo [a_{max} (g)] | V7: Atrito lateral médio [Sleeve ($f_{sN})_{aver}$] |
| V3: Profundidade crítica média (m) [Avg depth (m)] | V8: Concentração de finos representativa para cada caso em percentagem [Repr.FC (%)] |
| V4: Profundidade da linha freática (m) [Depth to GWT (m)] | V9: coeficiente de redução de tensão de cisalhamento [r_d] |
| V5: Tensão vertical efetiva (kPa) [σ'_{vc} (kPa)] | |

A análise de componentes principais gera novas variáveis por meio da combinação linear dos autovetores da matriz de correlação dos dados originais. É importante destacar que essas novas variáveis não apresentam correlação entre si. No presente estudo, foram geradas 9 componentes principais, cada uma explicando uma determinada percentagem dos dados originais. A Tabela 7 apresenta a proporção das variâncias explicadas por cada uma das componentes geradas.

Tabela 7 - Variância explicada pelas componentes principais geradas na análise.

	Proporção da variância explicada	Proporção da variância acumulada
Comp.1	38.66%	38.66%
Comp.2	19.89%	58.56%
Comp.3	13.71%	72.27%
Comp.4	9.68%	81.95%
Comp.5	7.91%	89.86%
Comp.6	6.58%	96.45%
Comp.7	3.23%	99.68%
Comp.8	0.31%	99.98%
Comp.9	0.02%	100.00%

As equações (21) a (29) apresentam as componentes principais obtidas.

$$CP1 = 0.0709V1 - 0.0713V2 - 0.4839V3 - 0.3682V4 - 0.5123V5 - 0.2675V6 - 0.2231V7 + 0.1337V8 + 0.4674V9 \quad (21)$$

$$CP2 = 0.2080V1 + 0.4060V2 - 0.1608V3 - 0.0946V4 - 0.1662V5 + 0.5112V6 + 0.4954V7 - 0.3998V8 + 0.2507V9 \quad (22)$$

$$CP3 = 0.6357V1 + 0.3895V2 + 0.1656V3 + 0.0246V4 + 0.1234V5 - 0.2598V6 + 0.1832V7 + 0.5428V8 + 0.0725V9 \quad (23)$$

$$CP4 = 0.6704V1 - 0.5629V2 + 0.0908V3 + 0.1033V4 + 0.1130V5 + 0.1287V6 - 0.2184V7 - 0.3274V8 + 0.1747V9 \quad (24)$$

$$CP5 = 0.0313V1 - 0.3376V2 + 0.2966V3 - 0.7655V4 - 0.0742V5 + 0.0822V6 + 0.3384V7 + 0.1268V8 - 0.2612V9 \quad (25)$$

$$CP6 = 0.1409V1 + 0.4850V2 + 0.2158V3 - 0.3696V4 + 0.0135V5 - 0.2091V6 - 0.4995V7 - 0.4666V8 - 0.2250V9 \quad (26)$$

$$CP7 = 0.0153V1 + 0.1056V2 + 0.0222V3 - 0.1040V4 - 0.0215V5 + 0.7293V6 - 0.5081V7 + 0.4319V8 - 0.0174V9 \quad (27)$$

$$CP8 = 0.2776V1 - 0.0322V2 - 0.5051V3 + 0.1350V4 - 0.2884V5 + 0.0261V6 + 0.0373V7 + 0.0117V8 - 0.7504V9 \quad (28)$$

$$CP9 = 0.0032V1 - 0.0102V2 + 0.5605V3 - 0.3042V4 - 0.7698V5 + 0.0032V6 - 0.0023V7 - 0.0006V8 - 0.0251V9 \quad (29)$$

Sendo, CP_i a componente principal i , tal que $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$.

Em seguida, os escores das 9 componentes principais foram calculados para os 227 casos (quantidade de casos após remoção dos outliers) em estudo. A Tabela 8 apresenta os escores das componentes principais para cinco casos do banco de dados, os escores em sua totalidade podem ser conferidos no APÊNDICE C.

Tabela 8 - Escores obtidos por meio das componentes principais para 5 casos do banco de dados.

	ID	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9
CASOS	1	0.7789	0.2770	0.2047	1.7137	0.8799	0.1918	-0.7706	-0.0318	0.0072
	2	1.5541	0.1364	0.1454	1.6917	0.2562	0.0387	-0.8202	0.2153	-0.0011
	4	0.8364	0.1651	1.2043	-0.5134	-2.3538	0.9059	-0.2287	-0.0005	0.0655
	5	2.9090	-0.4345	0.0684	0.4099	-0.7588	0.5150	-0.4489	0.3219	0.0069
	7	1.7580	-1.1784	1.3622	-0.7797	0.6621	-0.6972	0.5118	-0.0636	-0.0055

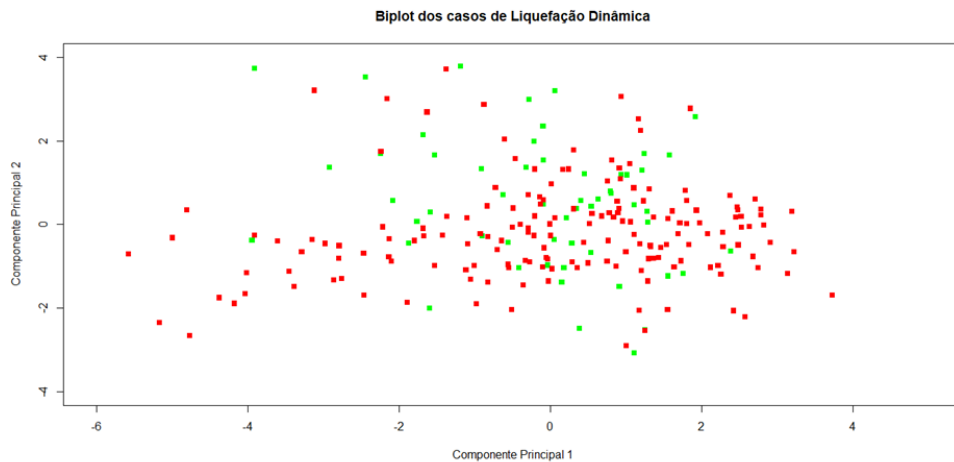
Nesse ponto, a meta de obter novas variáveis que consistem em combinações lineares das variáveis originais foi alcançada. Isso se faz necessário para que seja possível realizar a redução da dimensionalidade para duas variáveis e para que seja possível plotar os dados em um gráfico bidimensional.

5.6 Gráfico das Componentes Principais 1 e 2

O gráfico foi elaborado com base nas duas componentes principais com maior variabilidade explicada, considerando os escores dos dados originais (Equações (21) e (22)), apresentados no APÊNDICE C.

Na Figura 19, os pontos em vermelho indicam os casos com ocorrência de liquefação dinâmica, os pontos em verde sem ocorrência de liquefação dinâmica. Pelos dados apresentados no gráfico não foi possível identificar uma separação eficiente, somente com base nas duas componentes principais de maiores autovalores. Assim, deu-se prosseguimento a aplicação da regressão logística no banco de dados deste trabalho.

Figura 19 - Gráfico das componentes principais de maiores autovalores e dos scores dos casos históricos obtidos.



5.7 Obtenção do Modelo Logístico e Validação

Foi utilizado o mesmo banco de dados para criar um modelo preditivo por meio da regressão logística, na qual a variável classificatória está relacionada à susceptibilidade à liquefação dinâmica. Os casos históricos foram classificados como susceptível (1) ou não susceptível à liquefação dinâmica (0).

Com base em 80% dos dados com fixação da semente e sorteados aleatoriamente, a regressão logística gerou a função classificatória, que pode ser apresentada tanto pela Equação (12), como pela Equação (13).

$$\hat{p}(1 = \text{susceptível à liquefação dinâmica}) = \frac{e^{g(x)}}{1 + e^{g(x)}} \quad (30)$$

$$\hat{p}(0 = \text{não susceptível à liquefação dinâmica}) = \frac{1}{1 + e^{g(x)}} \quad (31)$$

Sendo $g(x) = +13.28174 + 0.73493V1 + 8.20663V2 + 0.75260V3 - 0.17526V4 - 0.04613V5 - 0.05954V6 - 1.53752V7 - 0.02697V8 - 0.02697V9$.

O teste de Wald foi realizado para verificar quais variáveis apresentavam maior significância no modelo logístico. A tabela abaixo apresenta os valores dos coeficientes, os desvios padrões, os valores de W e o p -valor associado a cada uma das variáveis.

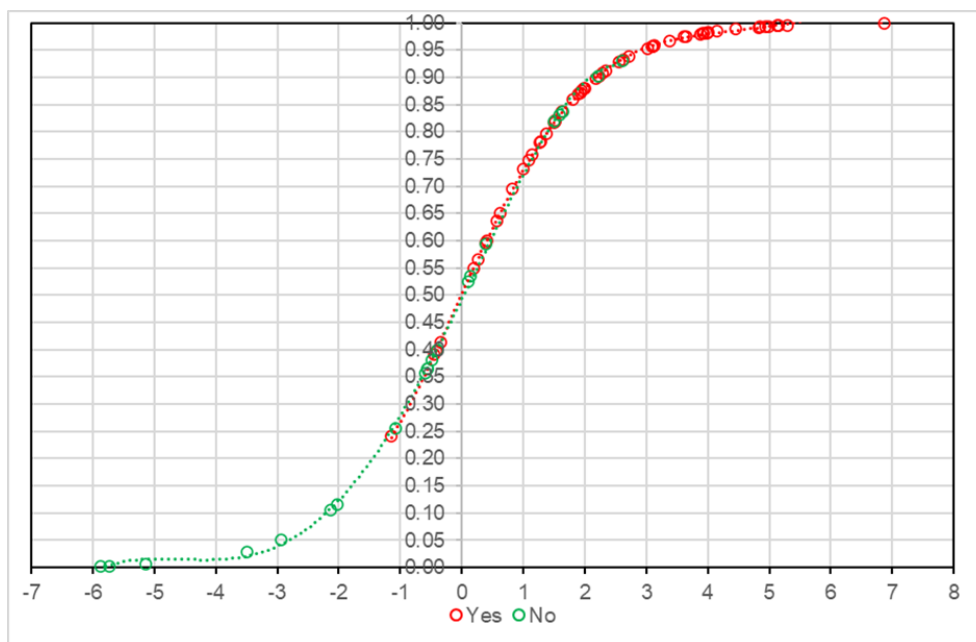
Tabela 9 - Parâmetros do teste de Wald.

Variável	Coefficiente β_i	Desvio padrão DP(β_i)	W_i	p -valor
V1	0.73	0.97	0.76	0.449638
V2	8.21	2.22	3.70	0.000215
V3	0.75	1.87	0.40	0.687032
V4	-0.18	1.74	-0.10	0.919806
V5	-0.05	0.20	-0.23	0.819239
V6	-0.06	0.01	-4.46	0.000008
V7	-1.54	1.19	-1.30	0.194578
V8	-0.03	0.02	-1.65	0.099648
V9	-16.20	36.90	-0.44	0.660663
<i>Termo Independente</i> (β_0)	13.28	31.98	0.42	0.677907

Quanto menor o p -valor, maior a significância da variável. Em caso de consideração de aproximadamente 99,9% de confiança somente as variáveis “resistência média de ponta do cone para pressão atmosférica = 1 atm” (V1) e “aceleração horizontal máxima induzida pelo sismo” (V2). Já para 95% de confiança, somente as variáveis V1, V2 e V8 (“concentração de finos representativa para cada caso em porcentagem”) poderiam ser consideradas. No entanto têm-se conhecimento que somente essas três variáveis são insuficientes para se explicar a susceptibilidade à liquefação dinâmica pela quantidade de parâmetros chaves elencados por BOULANGER & IDRIS (2014). Alguns parâmetros chaves na análise de susceptibilidade à liquefação dinâmica por BOULANGER & IDRIS (2014), não foram apontados pelo Teste de Wald (profundidade crítica, profundidade da freática, etc) como significantes. Seria necessário estudos mais aprofundados para verificação do quanto a variabilidade de cada variável afeta na significância quanto ao nível de confiança para o modelo logístico. Assim, para este modelo logístico, foram consideradas todas as variáveis do banco de dados.

A Figura 20 apresenta o modelo logístico resultante do banco de dados composto pelos 227 casos históricos (181 amostras de treinamento e 46 amostras de teste).

Figura 20 - Modelo logístico referente ao banco de dados casos com os 227 casos históricos de liquefação dinâmica.



O modelo logístico obtido foi analisado e validado por meio da amostra de teste. A Tabela 10 exibe as classificações corretas e incorretas. Considerando a amostra de teste (46 elementos amostrais), 6 casos não susceptíveis à liquefação dinâmica foram incorretamente preditos como susceptíveis à liquefação dinâmica pelo modelo, já 2 casos considerados susceptíveis à liquefação dinâmica foram incorretamente preditos como não susceptíveis à liquefação dinâmica pelo modelo. Portanto, a taxa de erro aparente (T_{EA}) do modelo logístico é igual a 17,39% e a probabilidade geral de acerto do modelo (P_{acerto}) é igual a 82,61%. Tendo em vista o dano potencial catastrófico associado ao fenômeno da liquefação dinâmica, esse erro confere a ferramenta um uso como ferramenta complementar, não descartando a possibilidade de uso de outras metodologias em paralelo, que auxiliem na avaliação da susceptibilidade à liquefação cíclica.

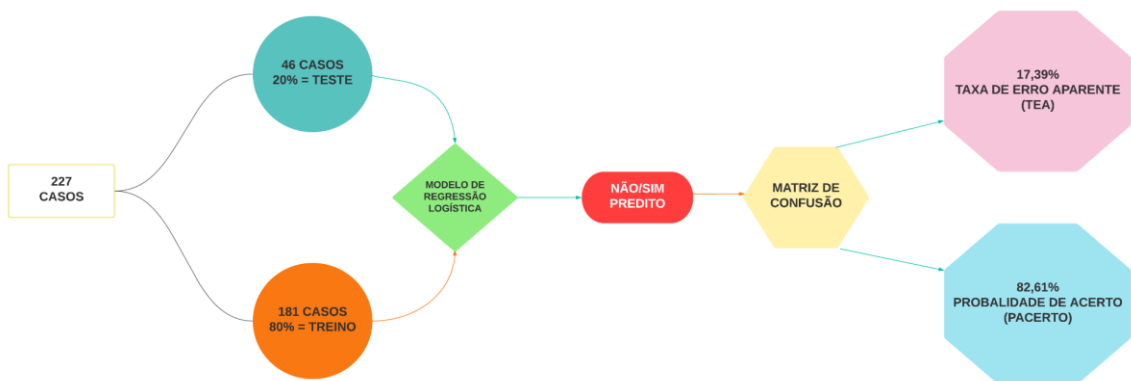
Tabela 10 – Matriz de confusão

	Classificação obtida a partir do modelo de predição			
	População	Liquefaz	Não Liquefaz	Total
Classificação baseada na situação real	Liquefaz	34	2	36
	Não Liquefaz	6	4	10
	Total	40	6	46

Em relação à leitura da curva do modelo logístico, para $g(X) \rightarrow +\infty$, a probabilidade do caso pertencer à população dos casos onde ocorreram liquefação dinâmica é igual a 100%. Quando $g(X) \rightarrow -\infty$, a probabilidade é igual a 0%.

A Figura 21 apresenta um fluxograma resumo da regressão logística aplicada neste trabalho.

Figura 21 - Fluxograma resumo - Regressão logística



6 CONCLUSÃO

A aplicação de técnicas quantitativas não paramétricas, incluindo estatística multivariada, se mostrou efetiva na criação de uma ferramenta para avaliação da susceptibilidade à liquefação dinâmica por meio da regressão logística. Em geral, essas técnicas têm sido utilizadas de maneira eficiente para quantificar fenômenos em diversas áreas da ciência, pois fornecem métodos quantitativos de avaliação.

Neste trabalho, a técnica de regressão logística forneceu um modelo capaz de prever de forma rápida e efetiva a susceptibilidade à liquefação dinâmica em 82,6% dos casos. Para isso, foi utilizado um banco de dados histórico com parâmetros geotécnicos e sísmicos relevantes e bem documentados dos seus casos e respectivas condições quanto à liquefação dinâmica.

A análise de componentes principais foi utilizada no banco de dados de 253 casos históricos, o qual se reduziu a 227 casos após remoção dos *outliers* e dos casos definidos como liquefação “Marginal”. As duas componentes principais de maiores autovalores associadas juntas conseguiram explicar aproximadamente 58,56% dos casos apresentados. Em relação à avaliação quanto à susceptibilidade à liquefação dinâmica por meio da técnica de análise de componentes principais. No entanto, a separação visual entre os casos que liquefaz e não liquefaz, considerando as duas primeiras componentes principais, não foi possível por meio de gráfico de dispersão dessas componentes, tendo em vista que os casos não apresentaram uma separação visível para essas duas classes.

O modelo logístico gerado é de fácil e rápido uso e apresenta a vantagem de necessitar somente de dados geotécnicos e sísmicos que são plausíveis de obtenção no mundo da geotecnia (ensaios CPTU, dados de caracterização de concentração de finos e estudos de resposta sísmica local). Além disso, a técnica de regressão logística é não paramétrica, ou seja, independente do conhecimento da distribuição estatística dos dados. A metodologia proposta pode ser utilizada em outras áreas da engenharia geotécnica, desde que as variáveis estejam relacionadas com o fenômeno que se pretenda avaliar.

A relevância deste trabalho também se encontra ao introduzir o conceito probabilístico de determinado evento pertencer a classe dos eventos que sofreram liquefação dinâmica ou não, por meio da regressão logística, podendo ser útil na elaboração de estudos de liquefação dinâmica e definição de risco associados para os casos avaliados em relação a probabilidade de pertencimento à cada classe.

Cabe ressaltar que foi fundamental para o trabalho a utilização de um software estatístico livre e que os scripts para futura reprodução e aperfeiçoamento do método aplicado estejam disponíveis. O modelo inicial foi desenvolvido para 227 casos. Esse banco pode ser alimentado de maneira que a metodologia proposta se torne mais representativa com a adição de dados que favoreça a maior variabilidade nas variáveis estudadas dos casos históricos registrados.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Neste trabalho o banco de dados utilizados apresenta diferenças entre a quantidade de casos com ocorrência de liquefação com manifestação em superfície do que em relação a não ocorrência com manifestação em superfície, o que pode resultar em um enviesamento no caso da aplicação da regressão logística. Assim, como sugestão de trabalho, pode-se realizar a aplicação de um balanceamento entre os casos utilizados para o modelo e o treino, visando descartar a possibilidade deste viés.

REFERÊNCIAS

AGUINIS, Herman; GOTTFREDSON, Ryan K.; JOO, Harry. Best-practice recommendations for defining, identifying, and handling outliers. *Organizational Research Methods*, v. 16, n. 2, p. 270-301, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Resolução n. 95, de 7 de fevereiro de 2022. Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-95-de-7-de-fevereiro-de-2022-380760962>. Acesso em: 20 mar. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13.028: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - Requisitos. Rio de Janeiro, 2017.

ASSUMPÇÃO, Marcelo. The regional intraplate stress field in South America. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 97, n. B8, p. 11889-11903, 1992.

ASSUMPÇÃO, Marcelo de Sousa et al. Terremotos no Brasil: preparando-se para eventos raros. *Boletim SBGf*, n. 96, p. 25-29, 2016.

BOULANGER, Ross W.; IDRIS, I. M.. CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. Report No. UCD/CGM.-14, v. 1, 2014.

BRADLEY, Brendon A. A critical examination of seismic response uncertainty analysis in earthquake engineering. *Earthquake engineering & structural dynamics*, v. 42, n. 11, p. 1717-1729, 2013.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. Bioestatística: princípios e aplicações. Porto Alegre: Artemed, p.255, 2003.

CANADIAN DAM ASSOCIATION (CDA). Technical Bulletin: Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams, 2019 Edition. Canadá, 2019.

CASAGRANDE, Arthur. Liquefaction and cyclic deformation of sands-a critical review. *Harvard Soil Mechanics Series*, Harvard University, Cambridge, Massachusetts., n. 88, 1976.

CATTELL, R. B. The screen test for the number of factors. *Multivariate Behavioral*

Research, 1, p. 140-161, 1966.

FRANKLIN, A. G.. Use of the piezocone for evaluating soil liquefaction potential. Proc., 8th European Conf. on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, p. 33-40, 1986.

GELLER, Robert J. et al. Earthquakes cannot be predicted. Science, v. 275, n. 5306, p. 1616-1616, 1997.

GHORBANI, Hamid. Mahalanobis distance and its application for detecting multivariate outliers. Facta Universitatis, Series: Mathematics and Informatics, p. 583-595, 2019.

HAIR, Joseph F. et al.. Análise multivariada de dados. Bookman editora, 2009.

HAZEN, A. Hydraulic fill dams. Transactions, ASCE, n. 83, p. 1713-1745, 1920.

HOSMER, D.W.; LEMESHOW, S. Applied Logistic Regression. New York: John Wiley, 2ª Edição, 2000.

HOSSEINI, M. M. et al. Effect of density on critical depth of liquefaction in a soil deposit containing double loose sand lenses. In: International conferences on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics, San Diego, California, Paper. 2010. p. 1-7.

HOTELLING, Harold. Analysis of a complex of statistical variables into principal components. Journal of educational psychology, v. 24, n. 6, p. 417-441 e 498-520, 1933.

IDRISS, I. M.; BOULANGER, R. W.. Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes. Soil dynamics and earthquake engineering, 2006, vol. 26, no 2-4, p. 115-130, 2004.

IDRISS, I. M.; BOULANGER, R. W.. Soil Liquefaction during Earthquake. EERI Publication, Monograph MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, 2008.

ISHIHARA, Kenji. Stability of natural deposits during earthquakes. Proc., 11th Int. Conf. of Soil Mechanics and Foundation Engineering. AA Balkema Publishers, v. 1, p. 321-376, 1985.

JAMIOLKOWSKI, M. et al. Penetration Resistance and Liquefaction of Sands. Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, 12-16 AUGUST 1985. Publication of: Balkema (AA), 1985.

KAISER, H. F. A second generation little Jiffy. *Psychometrika*, v. 35, n. 4, p. 401-415, 1970.

KRAMER, Steven L. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, Inc. 1996.

KRAMER, Steven L.; SEED, H. Bolton. Initiation of soil liquefaction under static loading conditions. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 114, n. 4, p. 412-430, 1988.

LIRA, S. A. Análise de correlação: abordagem teórica e de construção dos coeficientes com aplicações. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, p.196, 2004.

MAJEWSKA J.. Identification of multivariate outliers problems and challenges of visualization methods. *Informatyka i Ekonometria* 4, p.69-83, 2015.

MESQUITA, P. S. B. Um modelo de regressão logística para avaliação dos programas de pós-graduação no Brasil. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense, p.86, 2014.

MINGOTI, S. A.. Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada. Belo Horizonte: Editora UFMG, p. 295, 2013.

MINSON, Sarah E. et al. The limits of earthquake early warning: Timeliness of ground motion estimates. *Science advances*, v. 4, n. 3, p. eaaq0504, 2018.

MITCHEL, J. K.; TSENG, D. J.. Assessment of liquefaction potential by cone penetration resistance." Proc., H. Bolton Seed Memorial Symp. Duncan, J. M. BiTech, Vancouver, Canada, p. 335-350, 1990

MOSS, R. E., et al.. CPT-based probabilistic and deterministic assessment of in situ seismic soil liquefaction potential. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, vol. 132, no 8, p. 1032-1051, 2006.

OLSEN, Richard S.. Liquefaction analysis using the cone penetrometer test. In: Proc., 8th World Conf. on Earthquake Engineering. San Francisco: EERI, 1984. p. 247-254, 1984.

OLSEN, R. S.; KOESTER, J. P.. Prediction of liquefaction resistance using the CPT. Proc., Int. Symp. on Cone Penetration Testing, CPT 95, Linköping, Sweden, p. 251-256, 1995.

PEREIRA, T. M. Análise Fatorial (Notas de aula). p.70, 2016.

POULOS, Steve J.; CASTRO, Gonzalo; FRANCE, John W. Liquefaction evaluation procedure. Journal of Geotechnical Engineering, v. 111, n. 6, p. 772-792, 1985.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>, 2022.

REYNA, Fernando Alfonso Maria. In situ tests for liquefaction potential evaluation: Application to California data including data from the 1989 Loma Prieta Earthquake. Purdue University, 1991.

ROBERTSON, Peter K.; CAMPANELLA, Richard G. Liquefaction potential of sands using the CPT. Journal of geotechnical engineering, v. 111, n. 3, p. 384-403, 1985.

ROBERTSON, Peter K.. Evaluation of flow liquefaction and liquefied strength using the cone penetration test: an update. Canadian Geotechnical Journal, v. 59, n. 4, p. 620-624, 2022.

ROBERTSON, Peter K.; WRIDE, C. E.. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. Canadian geotechnical journal, v. 35, n. 3, p. 442-459, 1998.

SANTOS, Tatiana Barreto dos. Análise de risco geotécnico em taludes rochosos de mina com uso de técnicas estatísticas multivariadas e de aprendizado de máquina. 2019. 106 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

SEED, H. Bolton; DE ALBA, Pedro. Use of SPT and CPT tests for evaluating the liquefaction resistance of sands. In: Use of in situ tests in geotechnical engineering. ASCE, 1986. p. 281-302, 1986.

SEED, H. Bolton; IDRIS, Izzat M.; ARANGO, Ignacio. Evaluation of liquefaction potential using field performance data. Journal of geotechnical engineering, v. 109, n. 3, p. 458-482, 1983.

SEED, H. Bolton; IDRIS, Izzat M.. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. Journal of the Soil Mechanics and Foundations division, v. 97, n. 9, p. 1249-1273, 1971.

SHI, Chao; WANG, Yu.. Non-parametric machine learning methods for interpolation of spatially varying non-stationary and non-Gaussian geotechnical properties. Geoscience Frontiers, v. 12, n. 1, p. 339-350, 2021.

STARK, Timothy D.; OLSON, Scott M.. Liquefaction resistance using CPT and field case histories. Journal of geotechnical engineering, v. 121, n. 12, p. 856-869, 1995.

SUGAWARA, N.. Empirical correlation of liquefaction potential using CPT. Proc., 12th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, Brazil, p. 335-338, 1989.

SUZUKI *et al.*. Empirical correlation of soil liquefaction based on cone penetration test. Proc., 1st Int. Conf. Geotechnical Earthquake Engineering, K. Ishihara, ed., A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, p. 369-374, 1995.

TOPRAK, S.; HOLZER, T. L.; BENNETT, M. J.; TINSLEY, J. C. I.. CPT-and SPT-based probabilistic assessment of liquefaction. Proc., 7th U.S.-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures against Liquefaction, MCEER, Seattle, p. 69-86, 1999.

ZHANG, Rongxiang; SHI, Zhaoji. Liquefaction prediction based on qc and D₅₀ (in Chinese). In: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts. 1996. p. 122A, 1996.

ZHANG, Wengang *et al.*. Comprehensive review of machine learning in geotechnical reliability analysis: Algorithms, applications and further challenges. *Applied Soft Computing*, p. 110066, 2023.

APÊNDICE A: Banco de Dados deste Trabalho.

ID	Mag_(M)	a _{max} _(g)	Avg_depth (m)	Depth_to_GWT_(m)	sefativa _{vc} _(kPa)	Tip_(q _{cn}) _{aver}	Sleeve_(f _{sn}) _{aver}	Repr.FC_(%)	r _d	Liq (Yes, No)
Caso	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	Status
1	7.60	0.162	4.4	1.1	49	39.8	0.39	3	0.97	Yes
2	7.60	0.162	3.1	1.4	40	30.0	0.30	5	0.98	Yes
3	7.60	0.162	5.5	1.7	61	124.0	1.60	5	0.96	No
4	7.20	0.600	2.9	3.1	50	20.0	0.10	18	0.98	Yes
5	7.20	0.300	1.4	1.4	24	8.0	0.02	16	0.99	Yes
6	7.00	0.300	3.0	1.5	40	14.6	0.19	60	0.97	Marginal
7	7.00	0.300	3.5	1.0	40	23.5	0.27	60	0.97	No
8	7.60	0.640	6.2	3.7	85	64.0	1.45	5	0.95	Yes
9	7.60	0.640	4.7	1.1	49	120.0	1.30	4	0.97	No
10	7.60	0.640	2.7	1.5	36	76.0	0.65	6	0.99	Yes
11	7.60	0.640	3.4	3.0	55	42.0	0.65	41	0.98	Yes
12	7.60	0.640	6.3	2.2	72	100.0	0.90	3	0.95	Yes
13	7.60	0.640	4.8	1.1	50	85.0	0.80	10	0.97	No
14	7.60	0.640	5.3	1.5	57	60.0	1.00	4	0.96	Yes
15	7.60	0.610	2.0	0.9	24	38.0	0.80	9	0.99	Yes
16	7.60	0.580	5.6	1.1	60	113.0	1.09	5	0.96	Yes
17	7.60	0.260	6.6	3.5	89	155.0	1.50	2	0.95	No
18	7.60	0.250	3.3	1.1	39	41.0	0.16	5	0.98	Yes
19	7.60	0.250	3.6	3.1	58	100.0	0.38	5	0.98	No
20	7.60	0.250	2.3	0.8	27	45.0	0.17	5	0.99	Yes
21	7.60	0.200	6.3	2.5	78	141.8	0.54	2	0.95	No
22	7.60	0.180	3.3	2.3	48	33.0	0.13	5	0.98	Yes
23	7.60	0.160	7.4	2.3	86	66.0	0.25	2	0.94	No
24	7.60	0.120	4.0	0.2	38	18.0	0.13	75	0.97	Yes
25	7.60	0.120	2.0	0.2	20	13.8	0.11	75	0.99	Yes
26	7.60	0.120	3.3	1.0	38	9.7	0.09	75	0.98	Yes
27	6.53	0.130	3.9	2.7	57	21.4	0.44	85	0.95	No
28	6.53	0.510	3.2	1.5	41	32.2	0.25	20	0.96	Yes
29	6.53	0.200	3.5	2.1	49	14.0	0.08	64	0.96	Yes
30	6.53	0.200	2.4	2.1	39	64.0	0.69	18	0.98	No
31	6.33	0.190	2.7	2.2	43	31.0	0.01	8	0.97	Yes
32	6.33	0.190	2.9	2.0	43	17.0	0.13	51	0.97	Yes
33	6.33	0.190	3.0	2.2	46	19.0	0.18	52	0.96	Yes
34	6.33	0.190	2.3	2.0	38	30.0	0.24	32	0.98	Yes
35	5.90	0.320	3.9	2.7	57	21.4	0.44	85	0.94	Yes
36	5.90	0.090	3.2	1.5	41	32.2	0.25	20	0.95	No
37	5.90	0.200	3.5	2.1	49	14.0	0.08	64	0.95	Yes
38	5.90	0.200	2.4	2.1	39	64.0	0.69	18	0.97	No
39	5.90	0.260	4.8	1.2	54	53.3	0.79	30	0.92	Yes
40	7.70	0.170	1.8	0.8	23	22.0	0.25	5	0.99	Yes
41	7.70	0.170	4.5	1.0	49	21.0	0.15	5	0.97	Yes
42	7.70	0.170	2.9	2.4	47	39.0	0.38	5	0.99	No
43	6.88	0.300	2.8	1.6	38	49.1	0.68	2	0.98	Yes
44	6.88	0.500	2.4	0.8	29	56.9	1.04	20	0.98	Yes
45	6.88	0.500	3.4	2.4	51	70.0	2.00	30	0.97	Yes
46	6.88	0.500	7.3	6.8	124	81.9	2.11	20	0.90	Yes
47	6.60	0.370	2.8	1.2	35	67.3	0.74	35	0.97	Yes
48	6.60	0.400	7.2	1.7	79	23.1	0.22	30	0.89	Yes
49	6.60	0.400	4.2	1.5	51	75.3	0.31	15	0.95	No
50	6.60	0.390	5.5	2.5	71	59.5	0.23	5	0.93	Yes
51	6.60	0.430	2.7	0.5	29	33.4	0.22	1	0.97	Yes
52	6.60	0.370	1.9	0.9	25	92.0	0.30	1	0.98	No
53	6.60	0.280	5.1	1.2	54	60.0	0.30	1	0.93	Yes
54	6.60	0.310	8.0	2.5	94	72.0	0.22	5	0.88	Yes
55	6.60	0.270	5.5	1.2	60	59.9	0.19	1	0.93	Yes
56	6.60	0.420	7.8	1.6	84	75.1	0.28	5	0.88	Yes
57	6.60	0.410	5.9	2.1	72	79.1	0.25	5	0.92	No
58	6.60	0.440	3.8	0.8	41	36.0	0.12	5	0.96	Yes
59	6.60	0.440	1.9	0.6	22	36.1	0.01	5	0.98	Yes
60	6.60	0.260	5.0	1.3	56	39.8	0.12	5	0.94	Yes
61	6.60	0.270	4.4	1.4	51	30.0	0.30	5	0.95	No
62	6.60	0.260	4.7	4.4	80	136.2	0.66	5	0.94	No
63	6.60	0.270	4.1	2.4	57	43.0	0.12	10	0.95	Yes
64	6.22	0.090	3.5	2.1	49	14.0	0.08	64	0.95	No
65	6.22	0.133	4.8	1.2	54	53.3	0.79	30	0.93	No

ID	Mag_(M)	a _{max} (g)	Avg_depth (m)	Depth_to_GWT_(m)	sefativa _{vc} (kPa)	Tip_(q _{cN}) _{aver}	Sleeve_(f _{sN}) _{aver}	Repr.FC_(%)	r _d	Liq (Yes, No)
Caso	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	Status
66	6.54	0.174	3.9	2.7	57	21.4	0.44	85	0.95	No
67	6.54	0.200	3.5	2.1	49	14.0	0.08	64	0.96	No
68	6.54	0.180	2.4	2.1	39	64.0	0.69	18	0.98	No
69	6.54	0.206	4.8	1.2	54	53.3	0.79	30	0.94	Yes
70	6.93	0.280	3.6	1.8	47	47.5	0.23	1	0.97	Yes
71	6.93	0.280	3.3	2.5	50	90.0	0.30	1	0.97	Yes
72	6.93	0.280	3.9	3.4	63	163.0	0.45	1	0.96	No
73	6.93	0.280	2.5	1.8	38	77.0	0.21	2	0.98	Yes
74	6.93	0.280	8.0	1.8	87	300.0	0.81	4	0.89	No
75	6.93	0.280	1.4	1.4	24	30.0	0.11	4	0.99	Yes
76	6.93	0.280	3.5	1.4	43	100.0	0.30	4	0.97	No
77	6.93	0.280	5.0	1.8	60	90.0	0.27	4	0.94	Yes
78	6.93	0.280	7.0	1.8	78	190.0	0.57	1	0.91	No
79	6.93	0.280	2.5	1.7	37	87.0	0.30	4	0.98	No
80	6.93	0.280	2.0	1.7	32	104.0	0.33	4	0.99	No
81	6.93	0.280	6.5	1.7	73	182.0	0.31	1	0.92	No
82	6.93	0.280	3.5	1.8	47	155.0	0.23	1	0.97	No
83	6.93	0.280	4.1	2.6	59	130.0	0.26	1	0.96	No
84	6.93	0.280	4.7	3.7	73	92.0	0.23	1	0.95	No
85	6.93	0.280	3.5	2.0	48	124.0	0.31	4	0.97	No
86	6.93	0.280	3.1	1.9	44	87.7	0.10	4	0.97	No
87	6.93	0.280	2.1	1.5	31	25.0	0.05	4	0.98	Yes
88	6.93	0.280	2.6	1.7	38	100.0	0.20	4	0.98	No
89	6.93	0.280	4.1	1.9	53	62.0	0.56	15	0.96	Yes
90	6.93	0.280	4.1	1.9	53	43.0	0.43	15	0.36	Yes
91	6.93	0.280	4.7	3.0	67	41.0	0.24	10	0.95	Yes
92	6.93	0.280	4.2	2.7	60	49.0	0.24	10	0.96	Yes
93	6.93	0.280	2.9	1.2	36	66.0	0.20	5	0.97	Yes
94	6.93	0.280	2.0	1.0	26	31.0	0.12	5	0.99	Yes
95	6.93	0.280	2.2	1.0	28	31.0	0.11	15	0.98	Yes
96	6.93	0.280	2.9	1.3	37	51.0	0.11	3	0.97	Yes
97	6.93	0.280	3.6	1.2	43	78.0	0.04	3	0.97	Yes
98	6.93	0.280	11.0	2.4	120	46.0	0.46	30	0.84	Yes
99	6.93	0.280	8.3	1.4	87	43.0	0.77	30	0.89	Yes
100	6.93	0.280	8.6	1.3	89	43.0	0.56	30	0.88	Yes
101	6.93	0.280	9.8	2.2	107	38.0	0.53	27	0.86	Yes
102	6.93	0.280	4.4	1.5	52	82.0	0.23	3	0.95	Yes
103	6.93	0.280	5.5	2.8	73	19.0	0.04	3	0.94	Yes
104	6.93	0.260	2.8	2.4	47	18.0	0.18	23	0.98	Yes
105	6.93	0.260	2.6	2.4	45	21.0	0.08	5	0.98	Yes
106	6.93	0.360	5.8	4.9	97	35.7	0.14	27	0.93	Yes
107	6.93	0.360	6.7	4.9	100	78.0	0.39	13	0.92	Yes
108	6.93	0.360	6.0	4.9	99	47.3	0.24	25	0.93	Yes
109	6.93	0.360	8.2	3.0	102	68.0	0.68	20	0.89	No
110	6.93	0.360	7.4	4.8	111	110.7	0.55	4	0.90	Yes
111	6.93	0.360	8.0	4.8	116	94.0	0.47	7	0.89	Yes
112	6.93	0.360	7.4	4.2	105	77.5	0.50	11	0.91	Yes
113	6.93	0.220	4.9	2.5	67	34.5	0.17	12	0.95	No
114	6.93	0.220	2.9	1.9	43	24.7	0.06	11	0.97	Yes
115	6.93	0.220	4.7	1.8	59	45.0	0.23	10	0.95	Yes
116	6.93	0.220	3.2	2.7	53	60.0	0.36	12	0.97	No
117	6.93	0.220	4.3	2.1	58	52.0	0.26	9	0.96	Yes
118	6.93	0.220	3.5	0.8	39	25.0	0.13	24	0.97	Yes
119	6.93	0.210	6.0	2.1	73	42.0	0.21	10	0.93	Yes
120	6.93	0.210	7.3	3.0	93	85.0	0.43	5	0.91	Yes
121	6.93	0.220	4.5	3.4	72	78.0	0.39	4	0.95	Yes
122	6.93	0.380	5.3	3.5	79	77.3	0.52	9	0.94	No
123	6.93	0.380	6.0	4.1	91	50.0	0.35	18	0.93	Yes
124	6.93	0.400	8.5	5.6	128	76.0	0.53	12	0.89	Yes
125	6.93	0.400	6.5	6.2	115	144.0	1.15	15	0.92	No
126	6.93	0.130	8.7	5.0	124	40.0	0.24	13	0.88	Yes
127	6.93	0.130	5.3	4.2	86	38.0	0.19	30	0.94	No
128	6.93	0.260	4.0	2.4	58	40.0	0.32	15	0.96	No
129	6.93	0.260	2.9	1.8	43	21.7	0.15	42	0.97	No
130	6.93	0.340	7.5	5.0	113	44.0	0.29	18	0.90	Yes
131	6.93	0.330	7.0	5.3	112	51.3	0.39	13	0.91	Yes
132	6.93	0.380	5.2	3.5	79	56.0	0.36	18	0.94	Yes
133	6.93	0.470	2.7	1.5	38	48.0	0.62	15	0.98	Yes
134	6.93	0.130	4.5	1.8	57	36.0	0.22	14	0.95	No

ID	Mag_(M)		Avg_depth		Depth_to_GWT_(m)			sefetiva _{vc} (kPa)		Tip_(q _{cn}) _{aver}		Sleeve_(f _{sn}) _{aver}		Repr.FC_(%)		r _d	Liq (Yes, No)	Status
	Caso	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9								
135	6.93	0.130	4.0	1.7	52	40.0	0.24	10	0.96	No								
136	6.93	0.120	6.9	6.4	120	40.0	0.92	7	0.91	No								
137	6.93	0.120	7.2	6.4	123	56.0	0.90	9	0.91	No								
138	6.93	0.240	3.8	3.0	59	60.0	0.22	4	0.96	Yes								
139	6.93	0.240	6.2	5.5	102	105.0	2.94	10	0.93	No								
140	6.93	0.280	6.3	3.0	84	55.0	0.22	3	0.92	Yes								
141	6.93	0.280	6.3	3.0	84	56.0	0.84	3	0.92	Marginal								
142	6.93	0.180	5.5	3.5	70	19.0	0.11	52	0.94	Yes								
143	6.93	0.280	6.3	3.0	84	52.0	0.25	8	0.92	Yes								
144	6.93	0.280	7.5	3.0	95	81.0	0.35	12	0.90	Yes								
145	6.93	0.160	5.0	1.5	59	40.0	0.28	20	0.94	Yes								
146	6.69	0.840	8.9	7.2	147	76.0	1.86	50	0.86	Yes								
147	6.69	0.800	3.9	3.4	66	80.0	0.95	20	0.96	Yes								
148	6.90	0.370	7.0	2.0	76	75.0	0.28	2	0.91	Yes								
149	6.90	0.650	11.8	3.1	125	178.7	2.54	13	0.82	No								
150	6.90	0.500	3.8	2.0	50	45.9	0.30	20	0.96	Yes								
151	6.90	0.700	5.0	2.5	68	140.4	0.84	0	0.94	No								
152	6.90	0.600	4.6	1.4	54	100.0	0.15	0	0.95	Yes								
153	6.90	0.500	3.4	3.0	58	128.3	1.98	13	0.97	No								
154	6.90	0.600	6.5	1.8	75	23.2	0.09	41	0.92	Yes								
155	6.90	0.600	4.5	1.8	57	50.2	0.44	25	0.95	Yes								
156	6.90	0.600	4.0	2.5	57	37.9	0.11	15	0.96	Yes								
157	6.90	0.450	4.8	2.1	60	42.8	0.33	28	0.95	Yes								
158	6.90	0.450	6.0	2.6	76	20.0	0.34	70	0.93	Yes								
159	6.90	0.65	4.3	2.0	55	88.0	0.40	0	0.96	Yes								
160	6.90	0.65	1.4	1.0	21	79.0	0.31	0	0.99	No								
161	6.90	0.60	4.5	2.5	61	62.1	0.27	7	0.95	Yes								
162	6.90	0.45	3.5	2.6	53	23.0	0.22	48	0.97	Yes								
163	6.90	0.60	5.5	2.4	69	40.2	0.24	28	0.94	Yes								
164	6.90	0.60	5.5	2.4	69	47.9	0.35	26	0.94	Yes								
165	6.90	0.65	3.8	2.0	51	126.8	0.94	0	0.96	No								
166	6.90	0.40	5.5	1.5	62	24.8	0.10	36	0.94	Yes								
167	6.90	0.60	2.8	1.9	41	110.0	0.67	0	0.98	No								
168	6.90	0.45	3.7	1.6	47	25.0	0.10	30	0.96	Yes								
169	6.90	0.50	5.2	2.0	64	29.6	0.13	31	0.94	Yes								
170	6.90	0.50	4.1	3.0	62	128.0	3.70	31	0.96	No								
171	7.51	0.37	1.6	0.5	19	9.4	0.04	5	0.99	Yes								
172	7.51	0.37	1.8	1.0	25	12.8	0.15	16	0.99	Yes								
173	7.51	0.40	2.3	1.0	29	11.4	0.21	12	0.99	Yes								
174	7.51	0.37	3.6	1.0	41	54.0	0.23	9	0.98	Yes								
175	7.51	0.40	3.8	3.3	63	62.0	0.32	35	0.97	Yes								
176	7.51	0.40	3.7	0.4	37	29.0	0.23	35	0.98	Yes								
177	7.51	0.40	2.2	1.5	32	12.5	0.07	65	0.99	Yes								
178	7.51	0.40	2.3	0.5	25	20.0	0.08	2	0.99	Yes								
179	7.51	0.40	2.4	0.5	26	33.2	0.10	42	0.99	Yes								
180	7.51	0.40	2.1	0.5	23	24.9	0.08	65	0.99	Yes								
181	7.51	0.40	2.5	1.7	37	26.0	0.15	15	0.99	Yes								
182	7.51	0.40	2.5	0.6	28	15.0	0.13	82	0.99	Yes								
183	7.51	0.40	2.2	1.7	34	71.1	0.70	12	0.99	Yes								
184	7.51	0.40	3.2	2.5	50	78.0	0.88	12	0.98	No								
185	7.51	0.30	4.9	0.8	51	52.3	0.24	11	0.96	Yes								
186	7.62	0.38	2.5	1.0	31	20.0	0.20	38	0.99	Yes								
187	7.62	0.38	3.5	1.0	40	11.0	0.06	60	0.98	Yes								
188	7.62	0.38	7.0	1.0	72	27.2	0.56	65	0.94	Yes								
189	7.62	0.60	3.0	1.1	36	30.0	0.30	35	0.98	Yes								
190	7.62	0.60	4.5	1.2	51	35.0	0.70	14	0.97	Yes								
191	7.62	0.250	4.5	0.7	46	30.0	0.38	45	0.97	Yes								
192	7.62	0.250	5.0	0.6	50	20.0	0.20	54	0.96	Yes								
193	7.62	0.250	3.5	1.1	41	27.0	0.12	27	0.98	Yes								
194	7.62	0.250	6.5	1.2	69	38.0	0.23	30	0.95	Yes								
195	7.62	0.250	5.5	3.5	79	20.0	0.20	61	0.96	Yes								
196	7.62	0.250	6.0	0.7	61	34.0	0.21	32	0.95	Yes								
197	7.00	0.187	4.8	2.0	61	37.0	0.07	4	0.95	No								
198	6.20	0.347	4.8	2.0	61	37.0	0.07	4	0.93	Yes								
199	7.00	0.183	3.7	1.7	48	69.0	0.44	7	0.97	No								
200	6.20	0.396	3.7	1.7	48	69.0	0.44	7	0.95	Yes								
201	7.00	0.167	7.3	1.3	80	73.7	0.44	4	0.91	Yes								
202	6.20	0.323	7.3	1.3	80	73.7	0.44	4	0.88	Yes								
203	7.00	0.219	5.5	1.4	64	120.9	0.69	0	0.94	No								

ID	Mag_(M)	a _{max} _(g)	Avg_depth (m)	Depth_to_GWT_(m)	sefetiva _{vc} _(kPa)	Tip_(q _{cn}) _{aver}	Sleeve_(f _{sn}) _{aver}	Repr.FC_(%)	r _d	Liq (Yes, No)
Caso	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	Status
204	6.20	0.460	5.5	1.4	64	120.9	0.69	0	0.91	Yes
205	7.00	0.199	3.8	1.8	48	28.0	0.19	24	0.96	Yes
206	6.20	0.382	3.8	1.8	48	28.0	0.19	24	0.95	Yes
207	7.00	0.237	5.2	1.0	58	82.1	0.31	3	0.94	Yes
208	6.20	0.188	5.2	1.0	58	82.1	0.31	3	0.92	No
209	7.00	0.227	3.6	2.0	50	37.8	0.17	8	0.97	Yes
210	6.20	0.183	3.6	2.0	50	37.8	0.17	8	0.95	Yes
211	7.00	0.239	1.9	0.9	25	28.9	0.10	9	0.99	Yes
212	6.20	0.186	1.9	0.9	25	28.9	0.10	9	0.98	No
213	7.00	0.234	3.7	0.8	42	77.5	0.41	2	0.97	Yes
214	6.20	0.187	3.7	0.8	42	77.5	0.41	2	0.95	No
215	7.00	0.216	4.8	0.5	50	93.3	0.58	0	0.95	Yes
216	6.20	0.186	4.8	0.5	50	93.3	0.58	0	0.93	No
217	7.00	0.231	6.5	1.5	74	78.5	0.33	3	0.92	Yes
218	6.20	0.181	2.0	1.5	30	25.1	0.14	22	0.98	Yes
219	7.00	0.231	2.6	1.4	35	41.7	0.14	5	0.98	Yes
220	6.20	0.182	2.6	1.4	35	41.7	0.14	5	0.97	Yes
221	7.00	0.204	2.0	1.3	29	23.9	0.13	20	0.99	Yes
222	6.20	0.186	2.0	1.3	29	23.9	0.13	20	0.98	Yes
223	7.00	0.211	2.6	1.2	34	39.0	0.23	10	0.98	Yes
224	6.20	0.186	2.6	1.2	34	39.0	0.23	10	0.97	Yes
225	7.00	0.211	4.3	1.6	53	45.9	0.15	6	0.96	Yes
226	6.20	0.172	4.3	1.6	53	45.9	0.15	6	0.94	Yes
227	7.00	0.224	2.3	1.9	36	35.2	0.12	8	0.98	Yes
228	6.20	0.177	2.3	1.9	36	35.2	0.12	8	0.97	Yes
229	7.00	0.170	3.6	2.0	50	53.7	0.34	9	0.97	Yes
230	6.20	0.351	3.6	2.0	50	53.7	0.34	9	0.95	Yes
231	7.00	0.170	5.8	2.0	70	48.6	0.25	12	0.93	Yes
232	6.20	0.354	5.8	2.0	70	48.6	0.25	12	0.91	Yes
233	7.00	0.168	8.6	2.4	101	60.2	0.32	11	0.89	Yes
234	6.20	0.346	8.6	2.4	101	60.2	0.32	11	0.84	Yes
235	7.00	0.183	4.5	2.3	60	23.8	0.01	7	0.95	No
236	6.20	0.339	4.5	2.3	60	23.8	0.01	7	0.93	Yes
237	7.00	0.217	6.1	1.4	70	51.5	0.57	26	0.93	Yes
238	6.20	0.455	6.1	1.4	70	51.5	0.57	26	0.90	Yes
239	7.00	0.210	2.8	1.0	34	64.2	0.69	11	0.98	No
240	6.20	0.447	2.8	1.0	34	64.2	0.69	11	0.97	Yes
241	7.00	0.214	2.4	2.0	38	47.0	0.42	16	0.98	No
242	6.20	0.451	2.4	2.0	38	47.0	0.42	16	0.97	Yes
243	7.00	0.215	2.6	2.0	40	41.2	0.37	18	0.98	No
244	6.20	0.450	2.6	2.0	40	41.2	0.37	18	0.97	Yes
245	7.00	0.219	1.7	1.4	27	23.0	0.17	39	0.99	Yes
246	6.20	0.453	1.7	1.4	27	23.0	0.17	39	0.98	Yes
247	9.00	0.170	4.8	1.1	53	101.0	0.82	3	1.01	No
248	9.00	0.180	4.2	2.5	60	66.0	0.29	5	1.01	No
249	9.00	0.210	6.8	1.1	71	67.0	0.46	15	1.01	Yes
250	9.00	0.220	9.0	1.3	93	95.0	0.45	2	1.01	Yes
251	9.00	0.169	10.1	1.2	102	83.0	0.48	11	1.00	No
252	9.00	0.199	2.8	1.2	36	34.0	0.24	25	1.00	Yes
253	9.00	0.256	6.3	1.6	71	20.0	0.28	66	1.01	Yes

APÊNDICE B: Script do R para Metodologia de Avaliação da Susceptibilidade por meio de Componentes Principais.

```
citation()
```

```
## Carregando o arquivo de dados
```

```
dados1=read.table("banco.txt", header=TRUE,row.names = 1, dec = '.')
```

```
View(dados1)
```

```
## CONHECENDO MEU BANCO DE DADOS
```

```
## dimensao dos dados
```

```
dim(dados1) ## n = 251, p = 10
```

```
dados = cbind(dados1[,1:9])
```

```
dados
```

```
status <- as.data.frame(dados1[,10])
```

```
status
```

```
##Identificacao de outlier multivariado
```

```
maha2 <- mahalanobis(dados, center = colMeans(dados), cov = cov(dados))
```

```
maha2
```



```
# para calcular o  $c^2$ , lembre-se que os graus de liberdade agora são 9
```

```
quant2 <- qchisq(0.95, dim(dados)[2])
```

```
quant2
```

```
plot(1:length(maha2), maha2, xlab = "Elementos amostrais",
```

```
      ylab = "Distância de Mahalanobis")
```

```
abline(h=quant2, lty=2)
```

```
text(row.names(out2), out2$out2, row.names(out2), pos = 2 )
```

```
out2 <- maha2[maha2 > quant2]
```

```
out2
```

```
out2 = as.data.frame(out2)
```

```
out2
```

```
dim(out2)
```

```
## Outliers multivariados: elementos
```

```
## Removendo os outliers do banco de dados a ser analisado
```

```
ifelse(maha2 > quant2, FALSE, TRUE)
```

```
row_to_keep = ifelse(maha2>quant2, FALSE, TRUE)
```

```
dados_s_out1 = dados1[row_to_keep,]
```

```
View(dados_s_out1)
```

```
dados_s_out = cbind(dados_s_out1[,1:9])
```

```
View(dados_s_out)
```

```
status <- as.data.frame(dados_s_out1[,10])
```

```
View(status)
```

```
## estrutura do conjunto de dados
```

```
str(dados_s_out)
```

```
## matriz de covariancias
```

```
S = var(dados_s_out)
```

```
S
```

```
## CORRELAÇÃO DOS DADOS
```

```
R= cor(dados_s_out)
```

```
View(R)
```

```
##ESTATÍSTICA BÁSICA
```

```
summary(dados_s_out)
```

```
##BOXPLOT
```

```
X11()
```

```
boxplot(dados_s_out, main = "Boxplot das variáveis")
```

```
X11()
```

```
boxplot(scale(dados_s_out))
```

```
##HISTOGRAMA
```

```
X11()
```

```
hist(dados_s_out$V1, xlab = "V1", main = "Histograma da variável V1")
```

```
X11()
```

```
hist(dados_s_out$V2, xlab = "V2", main = "Histograma da variável V2")
```

```
X11()
```

```
hist(dados_s_out$V3, xlab = "V3", main = "Histograma da variável V3")
```

```
X11()
```

```
hist(dados_s_out$V4, xlab = "V4", main = "Histograma da variável V4")
```

```
X11()
```

```
hist(dados_s_out$V5, xlab = "V5", main = "Histograma da variável V5")
```

```
X11()
```

```
hist(dados_s_out$V6, xlab = "V6", main = "Histograma da variável V6")
```

```
X11()
```

```
hist(dados_s_out$V7, xlab = "V7", main = "Histograma da variável V7")
```

```
X11()
```

```
hist(dados_s_out$V8, xlab = "V8", main = "Histograma da variável V8")
```

```
X11()
```

```
hist(dados_s_out$V9, xlab = "V9", main = "Histograma da variável V9")
```

```
## scatterplot matrix
```

```
pairs(dados_s_out) #verifica??o da dispers?o dos dados
```

```
## scatterplot matrix com correlacoes
```

```
## funcao para personalizacao do painel
```

```
painel.pearson <- function(x, y, ...) {
```

```
  horizontal <- (par("usr")[1] + par("usr")[2]) / 2;
```

```
  vertical <- (par("usr")[3] + par("usr")[4]) / 2;
```

```
  text(horizontal, vertical, format(abs(cor(x,y)), digits=2), cex = 1.2,
```

```
        font = 1)
```

```
}
```

```
x11()
```

```
pairs(dados_s_out, main = "Conjunto de Dados", pch = 21,
```

```
      upper.panel = painel.pearson)
```

```
## Teste de espericidade de Bartlett
```

```
## H0: R = I (nao existe correlacao suficiente para aplicacao da tecnica multivariada)
```

```
## Ha: R <> I (existe correlacao suficiente para aplicacao da tecnica multivariada)
```

```
library(psych)
```

```
n=dim(dados)[1]
```

```
cortest.bartlett(R,n)
```

```
## Analise de Componentes Principais utilizando a matriz de correla??es
```

```
?princomp
```

```
acp = princomp(dados_s_out, cor = TRUE, scores = TRUE)
```

```
## Proporcão da variacao explicada
```

```
summary(acp)
```

```
## Loadings (cargas)
```

```
loadings(acp)
```

```
## Para aparecer as cargas suprimidas
```

```
unclass(loadings(acp))
```

```
View(unclass(loadings(acp)))
```

```
## Escores
```

```

Y = acp$scores
View(Y)

## Screeplot e Kaiser

k = sum(eigen(R)$values>=1)
k

plot(acp, type = "l")
abline(h=1, col='blue') ## criterio de kaiser no scree-plot

## Grafico dos escores

plot(acp$scores, pch=16)
text(acp$scores, rownames(acp$scores),pos=2)
abline(h = 0, v = 0, col='blue')

## Grafico biplot

biplot(acp)
abline(h = 0, v = 0, col='blue')

## Grafico dos escores (com filtro das classes)

```

```
escores = as.data.frame(cbind(acp$escores[,1:2]))
```

```
escores
```

```
escores1 = as.data.frame(cbind(escores,dados_s_out1[,10]))
```

```
escores1
```

```
summary(escores1)
```

```
escoresliq = escores1[escores1$dados_s_out1[, 10]=='1',]
```

```
escoresliq
```

```
escoresnoliq = escores1[escores1$dados_s_out1[, 10]=='0',]
```

```
escoresnoliq
```

```
x11()
```

```
plot(escoresnoliq$Comp.1,escoresnoliq$Comp.2, xlim=c(-6,5),ylim=c(-4,4), xlab =  
"Componente Principal 1", ylab = "Componente Principal 2",pch = 15,col =  
"green",main = "Biplot dos casos de Liquefação Dinâmica")
```

```
points(escoresliq$Comp.1,escoresliq$Comp.2, pch = 15, col = "red")
```

```
text(acp$escores, rownames(acp$escores),pos=2)
```

APÊNDICE C: Escores Obtidos por meio das Componentes Principais.

ID	Comp. 1	Comp. 2	Comp. 3	Comp. 4	Comp. 5	Comp. 6	Comp. 7	Comp. 8	Comp. 9
1	0.7789	0.27703	0.20472	1.71368	0.87991	0.19184	-0.7706	-0.0318	0.00719
2	1.55412	0.13636	0.14535	1.69175	0.25624	0.03865	-0.8202	0.21531	-0.0011
4	0.83636	0.16506	1.20433	-0.5134	-2.3538	0.90589	-0.2287	-0.0005	0.06546
5	2.90898	-0.4345	0.06841	0.4099	-0.7588	0.51496	-0.4489	0.32193	0.00695
7	1.75802	-1.1784	1.36224	-0.7797	0.66207	-0.6972	0.51182	-0.0636	-0.0055
8	-3.1249	3.20092	2.5031	-0.5963	-0.3942	-0.9981	-2.1531	-0.0868	0.06927
9	-1.0117	4.66486	1.54855	-0.6237	1.20425	-0.466	-0.2954	-0.0238	0.06485
10	0.93912	3.05111	1.31865	-0.3003	-0.5069	0.49916	-0.0663	0.12343	0.00238
11	0.16789	1.30503	2.81659	-0.8389	-1.3441	-0.534	-0.2005	0.12546	0.0133
12	-2.1607	3.00839	1.65336	-0.1586	0.15134	0.42249	-0.1044	-0.1957	0.10977
13	-0.2836	2.98172	1.67814	-0.4421	0.51003	0.59808	0.00802	-0.1623	0.06184
14	-0.8776	2.86784	1.92201	-0.5655	0.50929	0.52458	-1.1497	-0.0851	0.09754
15	1.85168	2.76892	1.60488	-0.6755	0.0576	0.41348	-1.1421	0.39147	0.0189
16	-1.3788	3.70847	1.44132	-0.2121	1.25649	-0.0549	-0.0614	-0.1882	-0.0241
17	-3.9091	3.72703	0.69896	1.31954	0.99787	-2.8086	-0.4454	-0.1079	0.03108
18	1.61434	0.31819	0.20089	1.48123	0.15341	0.6682	-0.1866	0.10214	0.00141
19	-0.3222	1.35893	0.04393	1.8532	-0.9172	-0.833	0.54773	0.11968	0.03893
20	2.3755	0.69182	0.03418	1.4064	0.19279	0.53032	-0.088	0.25024	0.01041
21	-2.2419	1.69577	-0.149	2.14373	0.58489	-0.746	1.19917	-0.1513	0.03169
22	1.10455	-0.2498	0.13312	1.91831	-0.6712	0.1114	-0.4986	0.14957	0.05342
23	-1.8763	-0.4452	0.28487	2.25082	0.48806	0.47151	-0.0086	-0.4334	0.04031
24	2.41948	-2.0654	2.09266	0.56221	1.7244	-0.8551	0.98578	0.10148	-0.0041
25	3.7272	-1.6962	1.88061	0.48699	1.24809	-1.1851	0.90797	0.38358	-0.0149
26	2.57767	-2.2081	2.11355	0.66583	0.84889	-1.1693	0.77365	0.13951	0.01056
28	0.95346	0.07581	-0.0047	-1.5431	-0.4889	0.73128	-0.0924	-0.0274	0.00916
29	1.25292	-2.5352	0.56	-0.9114	-0.1472	-1.1696	0.55169	-0.076	0.02502
30	0.79203	0.79697	-0.8896	-0.3916	0.14909	-1.8065	-0.57	-0.0393	0.01626
31	1.20358	-1.1017	-1.6644	-0.0361	-0.8416	-0.0326	-0.2597	-0.1613	0.01111
32	1.55208	-2.0354	-0.1801	-0.9711	-0.2423	-1.1648	0.20742	-0.2102	0.00898
33	1.17613	-2.0611	-0.1254	-1.0405	-0.2216	-1.2846	0.16313	0.00841	0.00394
34	1.636	-1.0238	-0.8294	-0.6695	-0.3622	-1.1323	-0.1581	-0.2138	-0.0104
36	0.91325	-1.4911	-2.0432	-0.8432	0.55485	-0.8207	-0.42	-0.0592	0.0434
37	1.00169	-2.9003	-0.3254	-1.8779	-0.1029	-1.2858	0.53676	-0.203	0.02893
38	0.54079	0.43191	-1.775	-1.358	0.19342	-1.9227	-0.5849	-0.1664	0.02017
39	-0.8284	-0.2973	-0.937	-2.1242	1.6858	-1.1506	-0.5714	0.10063	0.00702
40	2.78453	0.35628	0.13302	1.6598	0.36582	0.22561	-0.8444	0.51055	-0.002
41	1.18378	-0.4688	0.41604	1.91068	0.60813	0.83813	-0.6721	-0.0641	0.0084
42	1.1051	0.46181	0.35429	1.95852	-0.5204	-0.5758	-0.874	0.14061	-0.0138

ID	Comp. 1	Comp. 2	Comp. 3	Comp. 4	Comp. 5	Comp. 6	Comp. 7	Comp. 8	Comp. 9
43	0.9133	1.34134	-0.4723	-0.088	0.21549	-0.6052	-1.1332	-0.0413	0.01889
44	1.16669	2.51868	0.69271	-1.6208	0.92181	-0.8903	-1.002	0.10456	-0.0498
47	0.92461	1.09048	0.15064	-1.4457	0.78139	-1.3085	0.04334	0.0555	0.0046
48	-1.8955	-1.8691	0.54856	-1.1901	0.76431	1.18904	-0.0599	0.20453	0.05349
49	-0.0904	0.48025	-0.5546	-0.7465	0.15217	0.29585	0.61338	-0.0762	-0.0075
50	-1.4281	-0.2676	-0.597	-0.3754	-0.4719	0.72948	0.06357	-0.0932	0.01737
51	1.80619	0.56264	-0.8324	-0.8853	0.1615	1.23212	-0.4067	-0.0709	-0.0299
52	1.57694	1.65614	-1.4917	-0.4337	0.06067	0.1606	0.71541	0.08071	-0.0173
53	-0.5009	-0.0704	-1.1332	-0.1626	0.82258	0.72953	-0.0942	0.09811	0.10048
54	-3.454	-1.1176	-0.6945	-0.0467	0.50223	1.07443	0.35451	0.18961	0.04136
55	-0.6438	-0.3918	-1.1684	0.02007	0.74697	0.95995	0.11172	-0.104	0.01822
56	-2.9803	-0.461	-0.4711	-0.6728	1.00362	1.60989	0.49008	0.24139	0.04818
57	-1.7642	0.06201	-0.6838	-0.4639	0.00735	0.89471	0.55005	-0.006	-0.0048
58	1.06346	0.05778	-0.6302	-0.8128	0.04161	1.44436	-0.0704	-0.2539	-0.0076
59	2.48055	0.34218	-0.9434	-0.8143	-0.3716	1.34337	0.15262	-0.0224	-0.0116
60	-0.0324	-0.825	-1.0004	-0.0125	0.42346	0.92271	-0.1544	-0.1718	0.02314
61	0.28442	-0.4481	-0.8188	-0.2323	0.36703	0.48947	-0.7501	-0.1612	0.02928
62	-2.9207	1.35979	-1.2434	0.3504	-1.0683	-1.9166	0.70413	0.17072	0.03278
63	-0.0548	-0.7992	-0.8777	0.00175	-0.6195	0.22926	-0.0843	-0.0352	0.03119
64	1.10577	-3.0719	-0.1899	-0.98	0.18035	-1.5649	0.4654	0.01296	0.03911
65	-0.5606	-0.4343	-0.824	-1.1009	1.92282	-1.5625	-0.6612	0.07139	0.01011
66	0.3835	-2.4821	1.38648	-1.3784	0.22666	-2.6254	0.43236	0.12185	0.05807
67	1.25444	-2.5308	0.57368	-0.897	-0.1466	-1.1666	0.55202	-0.07	0.02509
68	0.8036	0.74422	-0.9308	-0.2978	0.19735	-1.8719	-0.5845	-0.0288	0.01777
69	-0.3933	0.00097	-0.162	-0.8711	1.68394	-1.2907	-0.6021	-0.0032	-0.0012
70	0.68033	0.19852	-0.6912	0.50327	-0.2981	0.35123	-0.335	-0.1363	0.02814
71	0.01152	0.9721	-0.9909	0.6913	-0.6778	-0.358	0.44777	0.0465	0.04497
72	-1.6851	2.14606	-1.3713	0.99573	-0.8221	-1.3128	1.77623	0.16352	0.06395
73	1.10428	0.87147	-1.0484	0.58232	-0.475	-0.0445	0.41051	0.05813	-0.0047
75	2.52321	0.18343	-0.8299	0.32841	-0.6358	0.34664	-0.4147	0.1891	0.00835
76	0.45188	1.20813	-1.0332	0.54248	0.25078	-0.0833	0.87452	-0.0538	0.02072
77	-0.8341	0.44025	-0.8032	0.55376	0.33233	0.30906	0.67704	0.09843	0.03901
79	1.01387	1.18224	-1.0171	0.49679	-0.2383	-0.3011	0.52635	0.08049	7.5E-05
80	1.244	1.68437	-1.187	0.54962	-0.3053	-0.6106	0.85964	0.05315	0.01198
82	-0.2197	1.97791	-1.5999	0.94384	-0.0295	-0.3848	2.18947	-0.0184	0.00847
83	-0.9088	1.32408	-1.2533	0.9285	-0.5124	-0.4114	1.46294	-0.0013	0.02312
84	-1.5882	0.29822	-0.8222	0.95058	-1.3403	-0.3419	0.5166	0.01006	0.05746
85	-0.095	1.52974	-1.1848	0.71957	-0.1395	-0.4788	1.35268	-0.0174	0.02961
86	0.6335	0.60297	-1.091	0.69661	-0.4878	0.15878	0.92254	0.07106	0.01295
87	2.08049	-0.2205	-0.7501	0.38093	-0.6255	0.62202	-0.4167	0.15417	0.02028
88	0.93879	1.18809	-1.1823	0.64538	-0.3221	-0.1827	1.02894	0.03633	-0.0014
89	-0.0899	0.58549	-0.1083	0.04229	0.34271	-0.6391	-0.3196	-0.0213	0.01107

ID	Comp. 1	Comp. 2	Comp. 3	Comp. 4	Comp. 5	Comp. 6	Comp. 7	Comp. 8	Comp. 9
91	-0.7014	-0.6085	-0.1729	0.46933	-0.855	0.00419	-0.4128	-0.0407	0.04998
92	-0.2136	-0.2695	-0.3071	0.46974	-0.7534	-0.0791	-0.1994	-0.0939	0.04073
93	1.23078	0.55797	-0.8882	0.38286	0.1122	0.3112	0.31596	0.13402	0.01543
94	2.45249	0.16668	-0.7458	0.30579	-0.2219	0.51239	-0.3413	-0.053	0.00449
95	2.27968	-0.1856	-0.4527	0.09842	-0.0535	0.37774	-0.0805	0.11974	0.00507
96	1.36429	0.16484	-0.8776	0.44766	-0.1378	0.60157	0.08265	0.10746	0.0101
97	0.90471	0.37803	-1.0589	0.67393	0.01097	0.67792	0.86776	-0.1647	-0.0081
98	-5.1678	-2.3481	1.11737	-0.1686	1.83753	0.85424	-0.1088	0.2382	0.06908
99	-2.7992	-0.8098	1.03111	-0.5564	2.22368	-0.0763	-0.7176	0.07711	0.03426
100	-2.8622	-1.3283	0.89384	-0.4216	2.15217	0.47795	-0.2864	0.17364	0.03791
101	-4.1818	-1.8927	1.00797	-0.2375	1.71217	0.6219	-0.4982	0.21548	0.07091
102	-0.1315	0.47692	-0.876	0.52948	0.31923	0.42393	0.56961	0.06609	0.03226
103	-0.8227	-1.3827	-0.2604	0.66399	-0.8768	0.96259	-0.6701	-0.1692	0.03741
104	1.29856	-0.8206	0.08025	0.19014	-0.9098	-0.3663	-0.5047	-0.0978	-0.049
105	1.32735	-0.5395	-0.5761	0.58744	-1.183	0.23862	-0.6604	-0.0399	-0.0397
106	-2.4628	-1.6913	0.78518	0.19526	-2.2468	-0.315	-0.0796	-0.0096	-0.0692
107	-3.6081	-0.3953	0.26986	0.41005	-1.6802	-0.5459	0.10709	0.01411	0.11485
108	-2.7627	-1.2973	0.72931	0.21435	-2.0728	-0.5112	-0.0504	-0.0679	-0.0764
109	-3.9452	-0.3759	0.79509	-0.283	0.64553	-0.126	-0.3071	0.10633	-0.0387
110	-4.8061	0.34529	-0.0819	0.53472	-1.1199	-0.5726	0.36868	0.2078	-0.0603
111	-5.0003	-0.3219	0.14761	0.47707	-1.0807	-0.2326	0.21253	0.20237	-0.0411
112	-3.9164	-0.2661	0.34335	0.28173	-0.8416	-0.2905	-0.0873	-0.0738	-0.0439
113	-0.4128	-1.0364	-0.2678	0.66343	-0.3996	0.13256	-0.372	-0.1631	-0.0334
114	1.36813	-0.8102	-0.574	0.56784	-0.5454	0.25373	-0.3606	0.09878	-0.0161
115	-0.0802	-0.5627	-0.4514	0.57038	0.21258	0.22158	-0.2137	-0.0808	-0.0272
116	0.21376	0.15039	-0.5251	0.58895	-0.6364	-0.8386	-0.1861	0.06603	-0.0293
117	0.00217	-0.27	-0.5287	0.65517	-0.11	-0.0897	-0.1721	-0.1568	-0.034
118	1.72922	-0.8744	-0.1375	0.17672	0.57337	0.2538	-0.0629	-0.1428	-0.0228
119	-1.117	-1.0922	-0.3134	0.66459	0.31538	0.44931	-0.269	-0.0871	-0.0037
120	-3.1535	-0.3664	-0.4623	0.8867	0.32629	-0.1503	0.10695	-0.0236	-0.0062
121	-1.3696	0.19087	-0.6986	0.89636	-0.8082	-0.754	-0.0725	0.06556	-0.0577
122	-2.0843	0.563	0.07598	0.08705	-0.8672	-0.4435	-0.1099	0.0009	-0.028
123	-2.4696	-0.6986	0.56962	0.05608	-1.3902	-0.2113	-0.2637	-0.0613	-0.041
124	-5.5778	-0.705	0.72925	0.27067	-1.6695	-0.441	-0.2685	0.0024	-0.0681
126	-4.7736	-2.6645	0.0704	1.29138	-0.913	-0.272	-0.6474	0.15803	-0.0209
127	-1.5954	-2.0067	0.15947	0.92811	-1.2132	-1.1765	-0.1546	-0.0075	-0.0443
128	0.04853	-0.3697	-0.1189	0.30463	-0.3909	-0.2846	-0.4358	-0.0406	-0.0416
129	1.55744	-1.2367	0.53695	-0.2412	-0.2417	-0.5134	0.1594	0.10672	-0.0509
130	-4.0393	-1.6562	0.6748	0.344	-1.6341	-0.1027	-0.3938	0.10061	-0.0424
131	-4.0175	-1.157	0.49012	0.47664	-1.8842	-0.4961	-0.5855	0.06237	-0.0798
132	-1.6704	-0.2818	0.39709	-0.0309	-1.0878	-0.2303	-0.0852	-0.0067	-0.0598
133	1.05397	1.45246	0.40144	-0.8906	-0.1189	-0.1906	-0.5985	-0.0369	-0.0536

ID	Comp. 1	Comp. 2	Comp. 3	Comp. 4	Comp. 5	Comp. 6	Comp. 7	Comp. 8	Comp. 9
134	0.17927	-1.0421	-0.5414	0.80737	0.39146	-0.1324	-0.3791	0.01446	-0.0142
135	0.53714	-0.677	-0.7301	0.87583	0.32435	-0.1973	-0.4152	-0.041	-0.0332
138	-0.2938	-0.096	-0.7348	0.80313	-0.9836	-0.2557	-0.1067	0.0812	0.04614
140	-2.1359	-0.7815	-0.3437	0.66063	-0.4284	0.54985	-0.1885	0.04796	-0.0177
143	-2.0997	-0.882	-0.1498	0.53383	-0.3626	0.38519	-0.2006	0.05297	-0.0184
144	-3.2883	-0.6534	-0.0818	0.49768	0.20505	0.19287	0.39323	0.11788	-0.0103
145	-0.104	-1.0199	-0.2478	0.49402	0.8373	-0.0813	-0.1995	0.0685	-0.0131
147	-1.6307	2.68449	1.35476	-2.5037	-1.5187	-0.4967	-0.3361	-0.1217	-0.0925
148	-2.2135	-0.0637	-0.3208	0.14528	0.45793	1.13802	0.3298	0.06057	0.17831
150	0.30726	0.36808	0.51088	-0.8294	-0.6459	0.51535	0.08333	-0.0019	0.03659
151	-2.4424	3.51566	0.2348	-1.247	-0.3675	0.14529	0.87735	0.09675	-0.0585
152	-0.4675	1.56401	-0.3077	-0.5777	-0.4212	1.67957	1.32751	-0.1173	-0.0257
154	-1.0519	-1.3177	1.72816	-1.5073	-0.2216	1.5901	0.5832	-0.1618	-0.0304
155	-0.2941	0.70672	1.06969	-1.4238	-0.3269	0.66467	0.12843	-0.0593	-0.0492
156	0.05963	0.15019	0.6389	-0.9134	-1.5547	1.2524	0.17125	-0.1416	-0.0004
157	-0.2949	-0.1974	0.78133	-0.759	-0.2995	0.26722	0.10011	-0.1276	0.04
158	-0.9783	-1.9041	2.37975	-1.5339	-0.1172	-0.5437	0.49047	-0.0934	0.01899
159	-0.6102	2.03603	0.12433	-0.9286	-0.8332	1.12029	0.51891	-0.202	0.01111
160	1.92168	2.56621	-0.2675	-1.1336	-0.8434	1.1297	0.56688	0.14059	-0.031
161	-0.7251	0.87274	0.35739	-0.8191	-1.1811	1.11878	0.24494	-0.0443	0.02499
162	0.75165	-0.8825	1.36248	-1.0374	-1.0953	-0.3823	0.24944	-0.1288	0.01259
163	-0.9258	-0.2236	1.24749	-1.2359	-0.8359	1.026	0.30291	-0.1983	0.03229
164	-1.1018	0.15793	1.20214	-1.2616	-0.685	0.81189	0.22026	-0.1772	0.03215
165	-1.187	3.78577	0.11544	-1.2701	-0.0902	-0.2481	0.36494	0.09888	-0.0055
166	-0.0278	-1.3566	0.90351	-0.6567	0.1695	0.83617	0.35427	-0.2097	0.01915
167	0.05765	3.1859	-0.1733	-0.9074	-0.5977	-0.0207	0.46081	-0.0481	-0.0102
168	0.99793	-0.6523	0.66625	-0.7869	-0.4817	0.75015	0.22615	-0.0171	-0.007
169	-0.3285	-0.8599	1.00754	-0.9241	-0.4816	0.99888	0.30845	-0.1037	0.00025
171	3.19844	0.30809	0.33114	0.65729	-0.2257	1.42581	-0.5523	0.3782	-0.0301
172	2.78263	0.22758	0.76873	0.4735	-0.3593	0.75709	-0.4851	0.33724	-0.0275
173	2.47417	0.41864	0.85491	0.41419	-0.3153	0.91595	-0.7055	0.14517	-0.0144
174	1.30739	0.85085	0.50207	0.81373	0.13286	0.79959	0.17322	-0.0774	-0.0139
175	-0.2091	0.19829	1.51975	0.48534	-1.3003	-0.7072	0.56906	0.16603	-0.0199
176	1.97863	0.03657	1.53321	0.05242	0.65437	0.63812	0.28484	-0.1441	-0.0297
177	2.74801	-1.0437	2.32959	-0.3449	-0.5322	-0.3557	0.78514	0.21478	0.00011
178	2.71212	0.60413	0.36142	0.66694	-0.1433	1.54207	-0.4274	0.1127	-0.0232
179	2.82223	-0.0255	1.45991	0.00302	0.20655	0.41253	0.78266	0.11154	-0.0271
180	3.22667	-0.6516	2.14992	-0.4538	0.27804	-0.1134	1.16624	0.23822	-0.0173
181	1.93256	0.33658	0.85795	0.59348	-0.8541	0.63248	-0.2506	0.08458	-0.0181
182	3.13526	-1.1699	2.83621	-0.7843	0.40796	-0.5605	1.22413	0.08579	-0.039
183	1.19498	2.24941	0.73863	0.33801	-0.0727	-0.6974	-0.3452	0.32191	-0.0072
184	-0.0968	2.34396	0.98319	0.36806	-0.2226	-1.1795	-0.6166	0.22495	-0.0056
185	0.55049	0.26133	0.5106	1.0195	0.82359	0.88346	0.14656	-0.078	0.00255
186	2.52546	-0.0644	1.66765	0.25373	-0.0455	0.2079	0.11584	0.15647	-0.0196

ID	Comp. 1	Comp. 2	Comp. 3	Comp. 4	Comp. 5	Comp. 6	Comp. 7	Comp. 8	Comp. 9
187	2.25683	-1.1979	2.40916	-0.0191	0.11816	0.18017	0.70581	-0.0016	-0.0147
188	-0.5627	-0.9594	3.17453	-0.3599	1.66118	-0.2914	0.25403	-0.2993	-0.0122
189	1.78177	0.81319	2.22179	-0.6066	-0.3556	0.87573	0.24403	0.18671	-0.0159
190	0.30659	1.78349	2.04182	-0.4481	0.2433	0.82525	-0.9198	-0.1117	-0.0364
191	1.32278	-0.5049	1.77055	0.56319	1.24876	-0.3259	0.11592	-0.0647	0.01357
192	1.28646	-1.3586	2.03302	0.49104	1.27803	0.0342	0.46491	-0.0477	0.00811
193	1.83352	-0.4908	0.9953	1.11455	0.24273	0.31301	0.08093	0.02931	-0.0078
194	-0.275	-0.8955	1.42729	1.14095	1.01687	0.50972	0.2098	-0.3761	0.00357
195	-0.5081	-2.0397	2.51535	0.83191	-0.8655	-1.1176	0.31156	-0.1725	0.02634
196	0.28816	-0.8933	1.40385	0.98968	1.31436	0.64188	0.25479	-0.2054	-0.0236
197	-0.0339	-0.9766	-0.645	1.04668	-0.1171	0.58633	-0.2708	-0.0922	-0.0021
198	-0.5466	-1.0431	-1.3477	-0.8577	-0.3782	1.04029	-0.1665	-0.1079	-0.0026
199	0.40308	0.57222	-0.7034	0.79353	0.3992	-0.614	-0.1619	-0.0742	0.00216
200	-0.1362	0.65741	-1.2606	-1.3211	0.01197	0.02113	-0.0181	-0.1019	-0.0022
201	-2.1275	-0.3488	-0.5255	0.88274	1.72881	0.4143	-0.0455	-0.0379	-0.0625
202	-2.7933	-0.5099	-1.2632	-1.0637	1.56391	0.92928	0.06169	0.19639	-0.0544
203	-1.5314	1.66254	-0.8955	0.74501	1.45563	-0.5915	0.48199	-0.005	-0.0602
204	-2.2399	1.74463	-1.3999	-1.5387	1.08848	0.21404	0.65241	0.20997	-0.0582
205	0.87033	-1.008	-0.0049	0.42642	0.0697	-0.1799	-0.2251	0.09707	0.06737
206	0.50121	-0.9255	-0.6204	-1.5112	-0.3329	0.27796	-0.1094	-0.1729	0.05689
207	-0.4939	0.3884	-0.7727	0.6953	1.10365	0.49682	0.44544	0.01298	-0.0667
208	-0.9016	-0.2761	-2.0492	-0.3799	1.33984	0.23633	0.39423	0.04465	-0.0521
209	0.76292	-0.3898	-0.4745	0.73597	-0.3835	0.12458	-0.3408	-0.1072	-0.0121
210	0.35273	-1.04	-1.7372	-0.359	-0.1592	-0.1188	-0.3883	-0.0766	0.00217
211	2.63383	-0.0537	-0.6583	0.48628	-0.0618	0.36867	-0.2756	0.02335	-0.0183
212	2.38329	-0.6465	-1.9217	-0.515	0.09723	0.0198	-0.3356	-0.1931	-0.0117
213	0.75647	1.03737	-0.8583	0.61925	0.92202	0.01051	0.115	-0.1278	-0.0617
214	0.34779	0.37854	-2.1293	-0.4638	1.15346	-0.2432	0.06528	-0.0966	-0.0473
215	-0.2097	1.32081	-0.8895	0.59675	1.76685	-0.0427	0.13892	-0.0368	-0.0709
216	-0.6269	0.71063	-2.1138	-0.5538	1.95783	-0.2383	0.10186	-0.0095	-0.0577
217	-1.6802	-0.0962	-0.5744	0.76766	1.09105	0.59356	0.27795	0.01167	-0.0532
218	2.1205	-1.0308	-1.4404	-0.6851	-0.2096	-0.5814	-0.2669	-0.194	0.02467
219	1.7129	0.03219	-0.7701	0.68652	-0.1919	0.26147	-0.1998	0.03129	0.0111
220	1.46035	-0.5491	-2.0225	-0.3307	-0.0424	-0.0737	-0.2568	-0.1861	0.01736
221	2.48572	-0.4933	-0.3258	0.44904	-0.1738	-0.185	-0.2634	0.01202	-0.0048
222	2.21761	-0.986	-1.4931	-0.6911	-0.0981	-0.4143	-0.2973	-0.2124	-0.0008
223	1.7999	0.02064	-0.6014	0.5642	0.1545	-0.0179	-0.3166	0.03619	-0.0139
224	1.5353	-0.492	-1.7879	-0.5482	0.24688	-0.271	-0.3558	-0.1867	-0.0093
225	0.43855	-0.4273	-0.613	0.83709	0.12687	0.40909	-0.1178	-0.1375	-0.0091
226	0.02585	-1.0632	-1.862	-0.2777	0.33927	0.18277	-0.1616	-0.1081	0.00478
227	1.68767	-0.2259	-0.6703	0.69168	-0.6254	0.02785	-0.3036	0.16284	0.03343
228	1.43412	-0.8015	-1.9172	-0.3334	-0.4807	-0.3005	-0.3591	-0.055	0.03955
229	0.51479	0.01366	-0.6138	0.8663	0.02413	-0.5319	-0.321	-0.0557	-0.0079
230	-0.0084	0.00727	-1.2589	-1.1214	-0.287	-0.0061	-0.201	-0.0762	-0.0099

ID	Comp. 1	Comp. 2	Comp. 3	Comp. 4	Comp. 5	Comp. 6	Comp. 7	Comp. 8	Comp. 9
231	-1.0051	-0.9841	-0.3325	0.84686	0.5515	0.17192	-0.1626	0.05732	0.01209
232	-1.5299	-0.9819	-0.9693	-1.1527	0.23327	0.70793	-0.0403	0.03616	0.00985
233	-3.3915	-1.4902	-0.0758	0.96636	1.07097	0.48074	-0.0664	-0.05	-0.043
234	-4.3787	-1.7549	-0.8013	-1.1834	1.02714	1.22033	0.06874	0.67742	-0.0199
235	0.14979	-1.3798	-0.5251	1.01564	-0.4712	0.55682	-0.4286	0.02662	0.02905
236	-0.3609	-1.4578	-1.2388	-0.8729	-0.7228	0.99711	-0.3273	0.0118	0.02884
237	-1.0917	-0.4624	0.42525	0.10655	1.46271	-0.4085	-0.296	-0.0583	-0.0811
238	-1.7987	-0.3889	-0.0874	-2.1653	1.1027	0.3868	-0.1279	0.15738	-0.0789
239	1.21187	1.29525	-0.4456	0.25508	1.01652	-1.0108	-0.5848	0.04281	-0.0136
240	0.81563	1.53233	-0.9129	-1.8968	0.48548	-0.3683	-0.4289	-0.2395	-0.028
241	1.28118	0.30907	-0.3249	0.40916	-0.1872	-0.8927	-0.4476	0.18317	0.02396
242	0.88494	0.54614	-0.7922	-1.7427	-0.7182	-0.2502	-0.2917	-0.0991	0.00958
243	1.28945	0.04441	-0.2209	0.40798	-0.2308	-0.7792	-0.4372	0.09087	0.01619
244	0.89421	0.27577	-0.6936	-1.736	-0.7571	-0.1436	-0.2828	-0.1909	0.00195
245	2.67884	-0.7692	0.27596	-0.0011	-0.1457	-0.7599	0.08199	0.14795	-0.0004
246	2.28411	-0.5407	-0.1995	-2.1411	-0.6696	-0.1277	0.23565	-0.1336	-0.0146
249	0.23919	1.31982	2.86265	3.8448	1.07697	0.15563	0.07891	-1.1118	-0.039

APÊNDICE D: Script do R para Metodologia de avaliação da Susceptibilidade à Liquefação Dinâmica por meio de Regressão Logística

```
## Carregando o arquivo de dados
```

```
dados1=read.table("banco.txt", header=TRUE,row.names = 1, dec = '.')
```

```
View(dados1)
```

```
## CONHECENDO MEU BANCO DE DADOS
```

```
## dimensao dos dados
```

```
dim(dados1) ## n = 251, p = 10
```

```
dados = cbind(dados1[,1:9])
```

```
dados
```

```
status <- as.data.frame(dados1[,10])
```

```
status
```

```
##Identificacao de outlier multivariado
```

```
maha2 <- mahalanobis(dados, center = colMeans(dados), cov = cov(dados))
```

```
maha2
```

```
# para calcular o  $c^2$ , lembre-se que os graus de liberdade agora são 9
```

```
quant2 <- qchisq(0.95, dim(dados)[2])
```

```
quant2
```

```
plot(1:length(maha2), maha2, xlab = "Elementos amostrais",
```

```
      ylab = "Distância de Mahalanobis")
```

```
abline(h=quant2, lty=2)
```

```
out2 <- maha2[maha2>quant2]
```

```
out2
```

```
out2 = as.data.frame(out2)
```

```
out2
```

```
dim(out2)
```

```
text(row.names(out2), out2$out2, row.names(out2), pos = 2 )
```

```
## Outliers multivariados: elementos
```

```
## Removendo os outliers do banco de dados a ser analisado
```

```
ifelse(maha2>quant2, FALSE, TRUE)
```

```
row_to_keep = ifelse(maha2>quant2, FALSE, TRUE)
dados_s_out1 = dados1[row_to_keep,]
View(dados_s_out1)
```

```
#####
```

```
#Separação da amostra treino e teste#
```

```
#####
```

```
#COMPOSICAO DAS AMOSTRAS TREINO E TESTE
```

```
set.seed(0000) #fixar semente
```

```
nT = dim(dados_s_out1)[1]
```

```
nT
```

```
p=0.80
```

```
trind = sample(1:nT,floor(p*nT),FALSE)
```

```
trind
```

```
treino = dados_s_out1[trind,]
```

```
View(treino)
```

```
Xtreino = treino[,1:9]
```

```
View(Xtreino)
```



```
Ytreino = treino[,10]
```

```
Ytreino
```

```
teind = setdiff(1:nT,trind)
```

```
teind
```

```
teste = dados_s_out1[teind,]
```

```
View(teste)
```

```
Xteste = teste[,1:9]
```

```
Xteste
```

```
Yteste = teste[,10]
```

```
Yteste
```

```
## Construcao do modelo logistico
```

```
model <- glm(Status ~ .,family=binomial(link='logit'),data=treino)
```

```
summary(model)
```

```
predicted <- as.data.frame(predict(model, teste, type="response"))
```

```
predicted
```

```
pred1 <- ifelse(predicted>0.5, 1, 0)
```

```
View(pred1)
```

```
tab1 <- table(Predicted = pred1, Real = teste$Status)
```

```
tab1
```

```
erro = 1 - sum(diag(tab1))/sum(tab1)
```

```
erro
```

```
PGA = sum(diag(tab1))/sum(tab1)
```

```
PGA
```

ANEXO A: Banco de dados de Boulanger & Idriss (2014)

Earthquake	Site	Mag (M)	a _{max} (g)	Liq (Yes, No)	Critical depth interval (m)	Avg depth (m)	Depth to GWT (m)	σ _{vc} (Kpa)	σ _{vc} (kPa)	Tip (q _{tip}) _{aver}	Sleeve (f _{sl}) _{aver}	Friction ratio (F) _{aver} (%)	n	Q	I _e	PI	Lab FC (%)	I _e est. FC (%)	Repr. FC (%)	C _u	q _{tip}	Δq _{tip}	q _{tip} NC5	f _d	CSR	K _c	MSF	CSR for M=7.5, K _c =1	References
1964 M=7.6 Niigata - June 16	D - Kawagisho-cho	7.60	0.162	Yes	3.0-6.0	4.4	1.1	82	49	39.8	0.39	1.00	0.5	55.8	2.11	-	3	32	3	1.54	61.2	0.0	61.2	0.97	0.170	1.06	1.00	0.161	Ishihara and Koga (1981), Farrar (1990), Moss et al. 2003
1964 M=7.6 Niigata - June 16	E - Showa bridge (left bank)	7.60	0.162	Yes	1.6-4.6	3.1	1.4	56	40	30.0	0.30	1.02	0.5	47.0	2.18	-	5	37	5	1.70	51.0	0.1	51.1	0.98	0.147	1.07	1.00	0.138	Ishihara and Koga (1981), Farrar (1990), Moss et al. 2003
1964 M=7.6 Niigata - June 16	F - Show Bridge (right bank)	7.60	0.162	No	5.0-6.0	5.5	1.7	98	61	124.0	1.60	1.30	0.5	158.4	1.84	-	5	10	5	1.23	152.0	0.2	152.1	0.96	0.163	1.08	0.98	0.154	Ishihara and Koga (1981), Farrar (1990), Moss et al. 2003
1968 Inangahua, New Zealand - May 23	Three Channel Flat	7.20	0.600	Yes	2.3-3.5	2.9	3.1	50	50	20.0	0.10	0.51	0.5	27.7	2.23	-	18	41	18	1.55	31.0	23.8	54.7	0.98	0.382	1.05	1.01	0.358	Ooi (1987) as reproduced in Moss et al. (2003), Carr & Berrill (2004), Berrill et al. (1988)
1968 Inangahua, New Zealand - May 23	Reedy's Farm	7.20	0.300	Yes	1.2-1.8	1.4	1.4	24	24	8.0	0.02	0.26	0.5	15.8	2.36	-	16	51	16	1.70	13.6	17.9	31.5	0.99	0.194	1.09	1.01	0.177	Ooi (1987) as reproduced in Moss et al. (2003), Carr & Berrill (2004), Berrill et al. (1988)
1975 M=7.0 Haicheng - Feb 4	Chemical Fiber Site	7.00	0.300	Marginal	1.5-4.5	3.0	1.5	54	40	14.6	0.19	1.37	0.5	22.5	2.51	8.00	60	60	60	1.67	24.4	55.6	80.0	0.97	0.261	1.09	1.03	0.233	Arulanandan et al. (1986), Earth Tech (1985), Worden et al. (2010)
1975 M=7.0 Haicheng - Feb 4	17th Middle School	7.00	0.300	No	3.0-4.0	3.5	1.0	65	40	23.5	0.27	1.18	0.5	36.3	2.31	9.00	60	47	60	1.60	37.6	59.2	96.8	0.97	0.304	1.10	1.04	0.266	Arulanandan et al. (1986), Earth Tech (1985), Worden et al. (2010)
1976 M=7.6 Tangshan - July 27	T1 - Tangshan	7.60	0.640	Yes	5.4-6.5	6.2	3.7	109	85	64.0	1.45	2.30	0.5	68.7	2.27	-	5	45	5	1.11	70.9	0.1	71.0	0.95	0.510	1.02	1.00	0.505	Moss et al. (2009, 2011), Zhou & Zhang (1979), Shibata & Teperaska (1988)
1976 M=7.6 Tangshan - July 27	T4 - Tangshan	7.60	0.640	No	4.4-5.0	4.7	1.1	84	49	120.0	1.30	1.09	0.5	171.3	1.76	-	-	4	4	1.33	159.3	0.0	159.3	0.97	0.693	1.10	0.97	0.646	Moss et al. (2009, 2011), Zhou & Zhang (1979), Shibata & Teperaska (1988)
1976 M=7.6 Tangshan - July 27	T6 - Tangshan	7.60	0.640	Yes	2.4-3.0	2.7	1.5	48	36	76.0	0.65	0.86	0.5	126.7	1.79	-	-	6	6	1.60	121.5	0.8	122.3	0.99	0.545	1.10	0.99	0.502	Moss et al. (2009, 2011), Zhou & Zhang (1979), Shibata & Teperaska (1988)
1976 M=7.6 Tangshan - July 27	T7 - Tangshan	7.60	0.640	Yes	3.0-3.8	3.4	3.0	59	55	42.0	0.65	1.57	0.5	56.0	2.23	-	-	41	41	1.33	55.9	56.3	112.2	0.98	0.437	1.07	0.99	0.412	Moss et al. (2009, 2011), Zhou & Zhang (1979), Shibata & Teperaska (1988)
1976 M=7.6 Tangshan - July 27	T8 - Tangshan	7.60	0.640	Yes	5.2-7.4	6.3	2.2	112	72	100.0	0.90	0.91	0.5	117.1	1.83	-	3	10	3	1.17	117.1	0.0	117.1	0.95	0.615	1.04	0.99	0.598	Moss et al. (2009, 2011), Zhou & Zhang (1979), Shibata & Teperaska (1988)
1976 M=7.6 Tangshan - July 27	T9 - Tangshan	7.60	0.640	No	4.2-5.4	4.8	1.1	86	50	85.0	0.80	0.95	0.5	120.0	1.84	-	10	10	10	1.37	116.9	8.2	125.0	0.97	0.695	1.09	0.99	0.645	Moss et al. (2009, 2011), Zhou & Zhang (1979), Shibata & Teperaska (1988)
1976 M=7.6 Tangshan - July 27	T10 - Tangshan	7.60	0.640	Yes	5.0-6.6	5.3	1.5	95	57	60.0	1.00	1.69	0.5	78.6	2.14	-	4	34	4	1.37	81.9	0.0	81.9	0.96	0.664	1.05	0.99	0.635	Moss et al. (2009, 2011), Zhou & Zhang (1979), Shibata & Teperaska (1988)
1976 M=7.6 Tangshan - July 27	T11 - Tangshan	7.60	0.610	Yes	1.4-2.6	2.0	0.9	36	24	38.0	0.80	2.12	0.5	76.9	2.21	-	9	40	9	1.70	64.6	4.5	69.1	0.99	0.576	1.10	1.00	0.526	Moss et al. (2009, 2011), Zhou & Zhang (1979), Shibata & Teperaska (1988)
1976 M=7.6 Tangshan - July 27	T13 - Tangshan	7.60	0.580	Yes	4.8-6.4	5.6	1.1	104	60	113.0	1.09	0.97	0.5	145.9	1.78	-	-	5	5	1.25	141.1	0.3	141.4	0.96	0.632	1.08	0.98	0.597	Moss et al. (2009, 2011), Zhou & Zhang (1979), Shibata & Teperaska (1988)
1976 M=7.6 Tangshan - July 27	T16 - Tangshan	7.60	0.260	No	6.0-7.2	6.6	3.5	119	89	155.0	1.50	0.98	0.5	164.1	1.74	-	-	2	2	1.05	163.1	0.0	163.1	0.95	0.215	1.02	0.97	0.216	Moss et al. (2009, 2011), Zhou & Zhang (1979), Shibata & Teperaska (1988)
1976 M=7.6 Tangshan - July 27	T19 - Tangshan	7.60	0.250	Yes	2.0-4.5	3.3	1.1	60	39	41.0	0.16	0.40	0.5	65.4	1.85	-	5	11	5	1.70	69.7	0.1	69.8	0.98	0.247	1.08	1.00	0.229	Moss et al. (2003, 2011), Zhou & Zhang (1979), Shibata & Teperaska (1988)
1976 M=7.6 Tangshan - July 27	T21 - Tangshan	7.60	0.250	No	3.1-4.0	3.6	3.1	62	58	100.0	0.38	0.38	0.5	131.5	1.57	-	5	0	5	1.28	128.2	0.2	128.3	0.98	0.171	1.07	0.99	0.162	Moss et al. (2003, 2011), Zhou & Zhang (1979), Shibata & Teperaska (1988)
1976 M=7.6 Tangshan - July 27	T22 - Tangshan	7.60	0.250	Yes	0.8-1.7	2.3	0.8	42	27	45.0	0.17	0.38	0.5	85.5	1.73	-	5	2	5	1.70	76.5	0.1	76.6	0.99	0.247	1.10	0.99	0.226	Moss et al. (2003, 2011), Zhou & Zhang (1979), Shibata & Teperaska (1988)
1976 M=7.6 Tangshan - July 27	T30 - Tangshan	7.60	0.200	No	4.6-8.0	6.3	2.5	115	78	141.8	0.54	0.38	0.5	160.5	1.50	-	2	0	2	1.11	157.4	0.0	157.4	0.95	0.182	1.05	0.98	0.179	Moss et al. (2003, 2011), Zhou & Zhang (1979), Shibata & Teperaska (1988)
1976 M=7.6 Tangshan - July 27	T32 - Tangshan	7.60	0.180	Yes	2.6-3.9	3.3	2.3	58	48	33.0	0.13	0.39	0.5	46.8	1.97	-	5	21	5	1.59	52.5	0.1	52.6	0.98	0.137	1.05	1.00	0.130	Moss et al. (2003, 2011), Zhou & Zhang (1979), Shibata & Teperaska (1988)
1976 M=7.6 Tangshan - July 27	T36 - Tangshan	7.60	0.160	No	5.7-9.0	7.4	2.3	135	86	66.0	0.25	0.39	0.5	70.2	1.81	-	2	8	2	1.10	72.6	0.0	72.6	0.94	0.154	1.01	0.99	0.152	Moss et al. (2003, 2011), Zhou & Zhang (1979), Shibata & Teperaska (1988)
1976 M=7.6 Tangshan - July 27	Y24 - Tangshan	7.60	0.120	Yes	3.5-4.5	4.0	0.2	75	38	18.0	0.13	0.75	0.5	28.1	2.30	10	75	47	75	1.67	30.0	60.2	90.2	0.97	0.150	1.10	0.99	0.138	Arulanandan et al. (1982), Moss et al. (2003, 2011)
1976 M=7.6 Tangshan - July 27	Y28 - Tangshan	7.60	0.120	Yes	1.0-3.0	2.0	0.2	37	20	13.8	0.11	0.78	0.5	30.3	2.28	10	75	45	75	1.70	23.5	58.3	81.8	0.99	0.146	1.10	0.99	0.134	Arulanandan et al. (1982), Moss et al. (2003, 2011)
1976 M=7.6 Tangshan - July 27	Y29 - Tangshan	7.60	0.120	Yes	2.8-3.8	3.3	1.0	61	38	9.7	0.09	0.93	0.5	14.8	2.59	10	75	70	75	1.70	16.5	56.2	72.7	0.98	0.122	1.08	0.99	0.113	Arulanandan et al. (1982), Moss et al. (2003, 2011)
1979 M=6.5 Imperial Valley - Oct 15	Kornbloom Rd (K4)	6.53	0.130	No	2.7-5.3	3.9	2.7	69	57	21.4	0.44	2.12	0.5	27.5	2.55	-	85	67	85	1.35	28.8	61.3	90.1	0.95	0.097	1.06	1.08	0.085	Bennett et al. (1984), Moss et al. (1984)
1979 M=6.5 Imperial Valley - Oct 15	McKim Ranch - Unit A (M7)	6.53	0.510	Yes	1.6-4.8	3.2	1.5	58	41	32.2	0.25	0.80	0.5	49.4	2.10	-	20	31	20	1.62	52.1	30.5	82.7	0.96	0.448	1.08	1.07	0.388	Bennett et al. (1984), Seed et al. (1984)
1979 M=6.5 Imperial Valley - Oct 15	Radio Tower - Unit B (R2)	6.53	0.200	Yes	3.0-4.0	3.5	2.1	62	49	14.0	0.08	0.61	0.5	19.3	2.41	-	64	55	64	1.50	21.0	55.6	76.6	0.96	0.159	1.06	1.06	0.141	Bennett et al. (1984), Seed et al. (1984)
1979 M=6.5 Imperial Valley - Oct 15	Radio Tower - Unit B (R4)	6.53	0.200	No	2.1-2.7	2.4	2.1	42	39	64.0	0.69	1.08	0.5	102.3	1.92	-	18	17	18	1.52	97.4	31.5	128.9	0.98	0.137	1.10	1.17	0.106	Bennett et al. (1984), Seed et al. (1984)
1980 M=6.3 Victoria (Mexicali) - June 9	Delta Site 2	6.33	0.190	Yes	2.2-3.2	2.7	2.2	48	43	31.0	0.01	0.04	0.5	46.6	1.81	-	-	8	8	1.70	52.6	2.3	54.9	0.97	0.133	1.06	1.05	0.119	Diaz-Rodriguez (1984), Diaz-Rodriguez & Armijo-Palacio (1991), Moss et al. (2003)
1980 M=6.3 Victoria (Mexicali) - June 9	Delta Site 3	6.33	0.190	Yes	2.0-3.8	2.9	2.0	52	43	17.0	0.13	0.79	0.5	25.2	2.35	-	-	51	51	1.59	27.0	53.6	80.6	0.97	0.144	1.08	1.08	0.123	Diaz-Rodriguez (1984), Diaz-Rodriguez & Armijo-Palacio (1991), Moss et al. (2003)
1980 M=6.3 Victoria (Mexicali) - June 9	Delta Site 3p	6.33	0.190	Yes	1.6-4.8	3.0	2.2	54	46	19.0	0.18	0.97	0.5	27.4	2.37	-	-	52	52	1.53	29.0	54.5	83.5	0.96	0.139	1.07	1.09	0.120	Diaz-Rodriguez (1984), Diaz-Rodriguez & Armijo-Palacio (1991), Moss et al. (2003)
1980 M=6.3 Victoria (Mexicali) - June 9	Delta Site 4	6.33	0.190	Yes	2.0-2.6	2.3	2.0	41	38	30.0	0.24	0.81	0.5	48.3	2.11	-	-	32	32	1.64	49.3	47.4	96.7	0.98	0.130	1.10	1.11	0.106	Diaz-Rodriguez (1984), Diaz-Rodriguez & Armijo-Palacio (1991), Moss et al. (2003)
1981 M=5.9 WestMorland - April 26	Kornbloom Rd (K4)	5.90	0.320	Yes	2.7-5.3	3.9	2.7	69	57	21.4	0.44	2.12	0.5	27.5	2.55	-	85	67	85	1.35	28.8	61.3	90.1	0.94	0.235	1.06	1.14	0.195	Bennett et al. (1984), Seed et al. (1984)
1981 M=5.9 WestMorland - April 26	McKim Ranch - Unit A (M7)	5.90	0.090	No	1.6-4.8	3.2	1.5	58	41	32.2	0.2																		

Earthquake	Site	Mag (M)	a _{max} (g)	Liq (Yes, No)	Critical depth interval (m)	Avg depth (m)	Depth to GWT (m)	σ _{vc} (Kpa)	σ _{vc} (KPa)	Tip (q _{tip}) _{norm}	Sleeve (f _s) _{norm}	Friction ratio (F) _{norm} (%)	n	Q	I _c	PI	Lab FC (%)	I _c est. FC (%)	Repr. FC (%)	C _u	q _{tip}	Δq _{tip}	q _{tip,CS}	r _e	CSR	K _v	MSF	CSR for M=7.5, K _v =1	References
1983 M=7.7 Nihonkai-Chubu - May 26	Akita C	7.70	0.170	No	2.4-34	2.9	2.4	52	47	39.0	0.38	0.99	0.5	56.6	2.10	-	5	31	5	1.59	61.9	0.1	62.0	0.99	0.120	1.06	0.99	0.114	Farrar (1990)
1983 M=6.9 Borah Peak - Oct 28	Pence Ranch 1 & 2	6.88	0.300	Yes	1.5-4.0	2.8	1.6	50	38	49.1	0.68	1.40	0.5	79.0	2.08	-	2	30	2	1.69	83.0	0.0	83.0	0.98	0.249	1.09	1.04	0.219	Andrus et al. (1991), Moss et al. (2003)
1983 M=6.9 Borah Peak - Oct 28	Whiskey Springs Site 1	6.88	0.500	Yes	1.6-3.2	2.4	0.8	44	29	56.9	1.04	1.85	0.5	106.0	2.07	-	20	29	20	1.70	96.7	36.6	133.2	0.98	0.493	1.10	1.11	0.404	Andrus & Youd (1987), Moss et al. (2003)
1983 M=6.9 Borah Peak - Oct 28	Whiskey Springs Site 2	6.88	0.500	Yes	2.4-4.3	3.4	2.4	60	51	70.0	2.00	2.88	0.5	97.8	2.24	-	30	42	30	1.32	92.7	54.1	146.8	0.97	0.372	1.10	1.14	0.297	Andrus & Youd (1987), Moss et al. (2003)
1983 M=6.9 Borah Peak - Oct 28	Whiskey Springs Site 3	6.88	0.500	Yes	6.8-7.8	7.3	6.8	129	124	81.9	2.11	2.62	0.5	72.7	2.30	-	20	47	20	0.91	74.3	33.5	107.8	0.90	0.306	0.98	1.07	0.293	Andrus & Youd (1987), Moss et al. (2003)
1987 M=6.6 Edgecumbe, NZ - Mar 2	Awaroa Farm AWA001	6.60	0.370	Yes	2.3-3.3	2.8	1.2	51	35	67.3	0.74	1.11	0.5	113.1	1.90	-	35	15	35	1.50	100.9	61.7	162.6	0.97	0.341	1.10	1.28	0.243	Christensen (1995), Moss et al. (2003)
1987 M=6.6 Edgecumbe, NZ - Mar 2	Brady Farm BDY001	6.60	0.400	Yes	6.4-8.0	7.2	1.7	134	79	23.1	0.22	1.00	0.5	24.5	2.41	-	30	56	30	1.15	26.6	40.7	67.3	0.89	0.392	1.02	1.05	0.366	Christensen (1995), Moss et al. (2003)
1987 M=6.6 Edgecumbe, NZ - Mar 2	Brady Farm BDY004	6.60	0.400	No	3.4-5.0	4.2	1.5	77	51	75.3	0.31	0.41	0.5	104.7	1.67	-	15	0	15	1.36	102.1	23.2	125.4	0.95	0.373	1.09	1.14	0.300	Christensen (1995), Moss et al. (2003)
1987 M=6.6 Edgecumbe, NZ - Mar 2	Edgecumbe Pipe Breaks EPB001	6.60	0.390	Yes	5.0-5.9	5.5	2.5	100	71	59.5	0.23	0.39	0.5	69.9	1.82	-	5	8	5	1.22	72.9	0.1	73.0	0.93	0.331	1.03	1.05	0.305	Christensen (1995), Moss et al. (2003)
1987 M=6.6 Edgecumbe, NZ - Mar 2	Gordon Farm GDN001	6.60	0.430	Yes	1.2-4.2	2.7	0.5	50	29	33.4	0.22	0.65	0.5	61.9	1.97	-	1	21	1	1.70	56.8	0.0	56.8	0.97	0.480	1.10	1.04	0.421	Christensen (1995), Moss et al. (2003)
1987 M=6.6 Edgecumbe, NZ - Mar 2	Gordon Farm GDN002	6.60	0.370	No	1.7-2.2	1.9	0.9	35	25	92.0	0.30	0.33	0.5	184.5	1.41	-	1	0	1	1.70	156.4	0.0	156.4	0.98	0.330	1.10	1.25	0.240	Christensen (1995), Moss et al. (2003)
1987 M=6.6 Edgecumbe, NZ - Mar 2	James Street Loop JSL007	6.60	0.280	Yes	3.4-6.8	5.1	1.2	93	54	60.0	0.30	0.51	0.5	80.6	1.82	-	1	8	1	1.40	83.9	0.0	83.9	0.93	0.291	1.06	1.06	0.259	Christensen (1995), Moss et al. (2003)
1987 M=6.6 Edgecumbe, NZ - Mar 2	Keir Farm KER001	6.60	0.310	Yes	6.5-9.5	8.0	2.5	148	94	72.0	0.22	0.31	0.5	73.0	1.76	-	5	4	5	1.04	74.9	0.1	75.1	0.88	0.277	1.01	1.05	0.261	Christensen (1995), Moss et al. (2003)
1987 M=6.6 Edgecumbe, NZ - Mar 2	Landing Rd. Bridge LRB007	6.60	0.270	Yes	4.8-6.2	5.5	1.2	102	60	59.9	0.19	0.32	0.5	76.5	1.75	-	1	3	1	1.33	79.9	0.0	79.9	0.93	0.279	1.05	1.06	0.251	Christensen (1995), Moss et al. (2003)
1987 M=6.6 Edgecumbe, NZ - Mar 2	Morris Farm MRS001	6.60	0.420	Yes	7.0-8.5	7.8	1.6	144	84	75.1	0.28	0.38	0.5	80.6	1.76	-	5	3	5	1.10	82.9	0.1	83.0	0.88	0.413	1.02	1.06	0.382	Christensen (1995), Moss et al. (2003)
1987 M=6.6 Edgecumbe, NZ - Mar 2	Morris Farm MRS003	6.60	0.410	No	5.2-6.6	5.9	2.1	109	72	79.1	0.25	0.32	0.5	92.7	1.67	-	5	0	5	1.19	94.5	0.2	94.6	0.92	0.372	1.04	1.08	0.333	Christensen (1995), Moss et al. (2003)
1987 M=6.6 Edgecumbe, NZ - Mar 2	Robinson Farm East Side RBN001	6.60	0.440	Yes	2.0-5.5	3.8	0.8	70	41	36.0	0.12	0.34	0.5	55.7	1.88	-	5	13	5	1.70	61.2	0.1	61.3	0.96	0.471	1.07	1.04	0.422	Christensen (1995), Moss et al. (2003)
1987 M=6.6 Edgecumbe, NZ - Mar 2	Robinson Farm West Side RBN004	6.60	0.440	Yes	1.0-2.8	1.9	0.6	35	22	36.1	0.01	0.03	0.5	75.8	1.62	-	5	0	5	1.70	61.4	0.1	61.5	0.98	0.440	1.10	1.04	0.383	Christensen (1995), Moss et al. (2003)
1987 M=6.6 Edgecumbe, NZ - Mar 2	Sewage Pumping Station SPS001	6.60	0.260	Yes	2.0-8.2	1.9	1.3	93	56	39.8	0.12	0.31	0.5	52.0	1.89	-	5	14	5	1.43	57.0	0.1	57.1	0.94	0.260	1.04	1.04	0.239	Christensen (1995), Moss et al. (2003)
1987 M=6.6 Edgecumbe, NZ - Mar 2	Whakatane Board Mill WBM001&2	6.60	0.270	No	3.5-5.3	4.4	1.4	80	51	30.0	0.30	1.03	0.5	41.1	2.23	-	5	41	5	1.56	46.8	0.1	47.0	0.95	0.260	1.05	1.04	0.240	Christensen (1995), Moss et al. (2003)
1987 M=6.6 Edgecumbe, NZ - Mar 2	Whakatane Hospital HSP001	6.60	0.260	No	44-5.0	4.7	4.4	83	80	136.2	0.66	0.49	0.5	152.0	1.58	-	5	0	5	1.10	149.7	0.2	149.9	0.94	0.165	1.04	1.22	0.130	Christensen (1995), Moss et al. (2003)
1987 M=6.6 Edgecumbe, NZ - Mar 2	Whakatane Pony Club WPC001	6.60	0.270	Yes	3.6-4.6	4.1	2.4	74	57	43.0	0.12	0.28	0.5	56.1	1.85	-	10	11	10	1.40	60.0	6.6	66.6	0.95	0.217	1.05	1.05	0.198	Christensen (1995), Moss et al. (2003)
1987 M=6.2 Superstition Hills 01 - Nov 24	Radio Tower - Unit B (R2)	6.22	0.090	No	3.0-4.0	3.5	2.1	62	49	14.0	0.08	0.61	0.5	19.3	2.41	-	64	55	64	1.50	21.0	55.6	76.6	0.95	0.071	1.06	1.08	0.062	Bennett et al. (1984)
1987 M=6.2 Superstition Hills 01 - Nov 24	Wildlife B	6.22	0.133	No	2.6-7.0	4.8	1.2	90	54	53.3	0.79	1.50	0.5	71.6	2.13	NIP	30	34	30	1.33	70.9	49.7	120.6	0.93	0.133	1.08	1.20	0.103	Bennett et al. (1984), Porcella et al. (1987)
1987 M=6.5 Superstition Hills 02 - Nov 24	Kornbloom Rd (K4)	6.54	0.174	No	2.7-5.3	3.9	2.7	69	57	21.4	0.44	2.12	0.5	27.5	2.55	-	85	67	85	1.35	28.8	61.3	90.1	0.95	0.129	1.06	1.08	0.114	Bennett et al. (1984), Cetin et al. (2000)
1987 M=6.5 Superstition Hills 02 - Nov 24	Radio Tower - Unit B (R2)	6.54	0.200	No	3.0-4.0	3.5	2.1	62	49	14.0	0.08	0.61	0.5	19.3	2.41	-	64	55	64	1.50	21.0	55.6	76.6	0.96	0.159	1.06	1.06	0.141	Bennett et al. (1984), Cetin et al. (2000)
1987 M=6.5 Superstition Hills 02 - Nov 24	Radio Tower - Unit B (R4)	6.54	0.180	No	2.1-2.7	2.4	2.1	42	39	64.0	0.69	1.08	0.5	102.3	1.92	-	18	17	18	1.52	97.4	31.5	128.9	0.98	0.123	1.10	1.16	0.096	Bennett et al. (1984), Cetin et al. (2000)
1987 M=6.5 Superstition Hills 02 - Nov 24	Wildlife B	6.54	0.206	Yes	2.6-7.0	4.8	1.2	90	54	53.3	0.79	1.50	0.5	71.6	2.13	NP	30	34	30	1.33	70.9	49.7	120.6	0.94	0.208	1.08	1.14	0.169	Bennett et al. (1984), Porcella et al. (1987)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	State Beach Kiosk	6.93	0.280	Yes	1.8-5.4	3.6	1.8	64	47	47.5	0.23	0.49	0.5	68.7	1.87	-	1	13	1	1.54	73.2	0.0	73.2	0.97	0.240	1.07	1.03	0.218	Boulangier et al. (1997)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	State Beach Pathway	6.93	0.280	Yes	2.3-5.0	3.3	2.5	58	50	90.0	0.30	0.34	0.5	127.0	1.56	-	1	0	1	1.37	123.5	0.0	123.5	0.97	0.206	1.09	1.08	0.174	Boulangier et al. (1997)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	State Beach (UC-18)	6.93	0.280	No	3.4-4.4	3.9	3.4	68	63	163.0	0.45	0.28	0.5	204.9	1.33	-	1	-	1	1.17	191.3	0.0	191.3	0.96	0.188	1.10	1.24	0.138	Boulangier et al. (1997)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Sandhold Road SI-2 (deformed)	6.93	0.280	Yes	2.0-3.0	2.5	1.8	44	38	77.0	0.21	0.27	0.5	125.6	1.52	-	2	-	2	1.57	121.0	0.0	121.0	0.98	0.211	1.10	1.08	0.178	Boulangier et al. (1997)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Sandhold Road SI-2 (undeformed)	6.93	0.280	No	6.0-10.0	8.0	1.8	148	87	300.0	0.81	0.27	0.5	320.7	1.16	-	4	-	4	1.04	311.8	0.0	311.9	0.89	0.276	1.04	1.24	0.213	Boulangier et al. (1997)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Sandhold Road SI-4 (deformed)	6.93	0.280	Yes	1.1-1.7	1.4	24	24	30.0	0.11	0.36	0.5	60.8	1.86	-	4	12	4	1.70	51.0	0.0	51.0	0.99	0.181	1.10	1.02	0.161	Boulangier et al. (1997)	
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Sandhold Road SI-4 (undeformed)	6.93	0.280	No	3.0-4.0	3.5	1.4	64	43	100.0	0.30	0.30	0.5	151.7	1.47	-	4	-	4	1.42	142.4	0.0	142.4	0.97	0.260	1.10	1.12	0.211	Boulangier et al. (1997)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Sandhold Road SI-5 (deformed)	6.93	0.280	Yes	4.7-5.3	5.0	1.8	92	60	90.0	0.27	0.30	0.5	115.4	1.57	-	4	-	4	1.27	114.7	0.0	114.8	0.94	0.261	1.06	1.07	0.230	Boulangier et al. (1997)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Sandhold Road SI-5 (undeformed)	6.93	0.280	No	6.0-8.0	7.0	1.8	129	78	190.0	0.57	0.30	0.5	214.2	1.34	-	1	-	1	1.09	206.3	0.0	206.3	0.91	0.274	1.07	1.24	0.205	Boulangier et al. (1997)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Sandhold Road UC-3	6.93	0.280	No																									

Earthquake	Site	Mag (M)	a _{max} (g)	Liq (Yes, No)	Critical depth interval (m)	Avg depth (m)	Depth to GWT (m)	σ _{vc} (Kpa)	σ _{vc} (KPa)	Tip (q _{tip}) _{ave}	Sleeve (f _{sl}) _{ave}	Friction ratio (F) _{ave} (%)	n	Q	I _c	PI	Lab FC (%)	I _c est. FC (%)	Repr. FC (%)	C _u	q _{tip}	Δq _{tip}	q _{tip} CS	r _e	CSR	K _v	MSF	CSR for M=7.5, K _v =1	References
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Farris Farm (FAR-58)	6.93	0.360	Yes	5.0-9.5	7.4	4.8	136	111	110.7	0.55	0.51	0.5	104.5	1.72	-	4	1	4	0.96	106.1	0.0	106.1	0.90	0.261	0.99	1.06	0.248	Bennett & Tinsley (1995), Toprak & Holzer (2003)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Farris Farm (FAR-59)	6.93	0.360	Yes	5.5-10.5	8.0	4.8	147	116	94.0	0.47	0.51	0.5	86.4	1.79	-	7	6	7	0.93	87.6	1.5	89.1	0.89	0.266	0.99	1.04	0.258	Bennett & Tinsley (1995), Toprak & Holzer (2003)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Farris Farm (FAR-61)	6.93	0.360	Yes	5.0-10.0	7.4	4.2	136	105	77.5	0.50	0.65	0.5	74.8	1.90	-	11	15	11	0.98	76.2	10.3	86.5	0.91	0.275	1.00	1.04	0.265	Bennett & Tinsley (1995), Toprak & Holzer (2003)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Leonardini (LEN-37)	6.93	0.220	No	2.5-7.5	4.9	2.5	91	67	34.5	0.17	0.51	0.5	41.2	2.08	-	12	29	12	1.29	44.6	10.2	54.8	0.95	0.183	1.03	1.02	0.173	Bennett & Tinsley (1995), Toprak & Holzer (2003)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Leonardini (LEN-39)	6.93	0.220	Yes	1.9-4.5	2.9	1.9	53	43	24.7	0.06	0.24	0.5	36.8	2.00	-	11	23	11	1.70	41.9	8.3	50.2	0.97	0.171	1.06	1.02	0.158	Bennett & Tinsley (1995), Toprak & Holzer (2003)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Leonardini (LEN-51)	6.93	0.220	Yes	3.7-5.7	4.7	1.8	87	59	45.0	0.23	0.51	0.5	57.8	1.94	-	10	19	10	1.37	61.6	6.6	68.2	0.95	0.201	1.04	1.03	0.187	Bennett & Tinsley (1995), Toprak & Holzer (2003)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Leonardini (LEN-52a)	6.93	0.220	No	2.9-3.6	3.2	2.7	58	53	60.0	0.36	0.61	0.5	81.7	1.85	-	12	11	12	1.38	83.0	12.8	95.8	0.97	0.152	1.07	1.05	0.136	Bennett & Tinsley (1995), Toprak & Holzer (2003)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Leonardini (LEN-53)	6.93	0.220	Yes	2.1-6.5	4.3	2.1	79	58	52.0	0.26	0.51	0.5	67.9	1.88	-	9	14	9	1.37	71.4	3.6	75.0	0.96	0.187	1.05	1.03	0.172	Bennett & Tinsley (1995), Toprak & Holzer (2003)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Sea Mist (SEA-31)	6.93	0.220	Yes	1.5-5.5	3.5	0.8	66	39	25.0	0.13	0.51	0.5	39.2	2.09	-	24	31	24	1.69	42.3	36.1	78.4	0.97	0.232	1.09	1.04	0.206	Bennett & Tinsley (1995), Toprak & Holzer (2003)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Jefferson Ranch (JRR-141)	6.93	0.210	Yes	3.8-8.0	6.0	2.1	112	73	42.0	0.21	0.51	0.5	48.0	2.02	-	10	24	10	1.22	51.1	6.3	57.5	0.93	0.193	1.02	1.02	0.184	Bennett & Tinsley (1995), Toprak & Holzer (2003)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Jefferson Ranch (JRR-148)	6.93	0.210	Yes	6.4-8.0	7.3	3.0	135	93	85.0	0.43	0.51	0.5	87.2	1.79	-	5	6	5	1.05	88.9	0.2	89.1	0.91	0.179	1.01	1.04	0.171	Bennett & Tinsley (1995), Toprak & Holzer (2003)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Pajaro Dunes (PD1-44)	6.93	0.220	Yes	3.4-5.5	4.5	3.4	82	72	78.0	0.39	0.51	0.5	91.7	1.77	-	4	4	4	1.20	93.3	0.0	93.3	0.95	0.157	1.04	1.05	0.145	Bennett & Tinsley (1995), Toprak & Holzer (2003)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Radovich (RAD-98)	6.93	0.380	No	3.5-7.5	5.3	3.5	97	79	77.3	0.52	0.67	0.5	86.1	1.86	-	9	12	9	1.13	87.6	5.7	93.3	0.94	0.283	1.02	1.05	0.264	Bennett & Tinsley (1995), Toprak & Holzer (2003)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Radovich (RAD-99)	6.93	0.380	Yes	4.6-7.2	6.0	4.1	110	91	50.0	0.35	0.72	0.5	51.4	2.06	-	18	28	18	1.06	52.9	26.3	79.2	0.93	0.276	1.01	1.04	0.264	Bennett & Tinsley (1995), Toprak & Holzer (2003)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Marinovich (MRR-65)	6.93	0.400	Yes	6.5-10.5	8.5	5.6	156	128	76.0	0.53	0.71	0.5	66.2	1.97	-	12	20	12	0.88	66.9	12.0	78.9	0.89	0.281	0.98	1.04	0.278	Bennett & Tinsley (1995), Toprak & Holzer (2003)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Marinovich (MRR-67)	6.93	0.400	No	5.8-7.0	6.5	6.2	118	115	144.0	1.15	0.81	0.5	133.9	1.75	-	15	3	15	0.95	137.2	26.2	163.4	0.92	0.245	0.98	1.17	0.215	Bennett & Tinsley (1995), Toprak & Holzer (2003)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Tanimura (TAN-103)	6.93	0.130	Yes	8.0-9.4	8.7	5.0	160	124	40.0	0.24	0.62	0.5	34.6	2.18	-	13	38	13	0.88	35.1	12.8	47.9	0.88	0.096	0.99	1.02	0.096	Bennett & Tinsley (1995), Toprak & Holzer (2003)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Tanimura (TAN-105)	6.93	0.130	No	4.2-6.4	5.3	4.2	97	86	38.0	0.19	0.51	0.5	40.1	2.09	-	30	30	30	1.09	41.5	43.7	85.1	0.94	0.089	1.02	1.04	0.085	Bennett & Tinsley (1995), Toprak & Holzer (2003)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	McGowan Farm (MCG-136)	6.93	0.260	No	2.4-5.5	4.0	2.4	74	58	40.0	0.32	0.81	0.5	51.8	2.09	-	15	30	15	1.37	54.7	19.2	74.0	0.96	0.206	1.05	1.03	0.190	Bennett & Tinsley (1995), Toprak & Holzer (2003)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	McGowan Farm (MCG-138)	6.93	0.260	No	1.8-4.5	2.9	1.8	53	43	21.7	0.15	0.72	0.5	32.6	2.23	-	42	42	42	1.59	34.3	51.4	85.7	0.97	0.206	1.08	1.04	0.183	Bennett & Tinsley (1995), Toprak & Holzer (2003)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Granite (GRA-123)	6.93	0.340	Yes	7.0-8.0	7.5	5.0	138	113	44.0	0.29	0.67	0.5	40.3	2.14	-	18	34	18	0.94	41.2	25.0	66.2	0.90	0.243	0.99	1.03	0.238	Bennett & Tinsley (1995), Toprak & Holzer (2003)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Southern Pacific Bridge (SPR-48)	6.93	0.330	Yes	5.4-9.0	7.0	5.3	129	112	51.3	0.39	0.79	0.5	47.6	2.11	-	13	32	13	0.94	48.4	13.6	62.0	0.91	0.225	0.99	1.03	0.221	Bennett & Tinsley (1995), Toprak & Holzer (2003)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Silliman (SIL-68)	6.93	0.380	Yes	3.5-7.0	5.2	3.5	95	79	56.0	0.36	0.66	0.5	62.3	1.97	-	18	21	18	1.14	63.8	27.6	91.4	0.94	0.282	1.02	1.04	0.263	Bennett & Tinsley (1995), Toprak & Holzer (2003)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	KETT (KET-74)	6.93	0.470	Yes	2.2-3.2	2.7	1.5	50	38	48.0	0.62	1.31	0.5	77.4	2.07	-	15	29	15	1.63	78.3	21.2	99.5	0.98	0.391	1.10	1.05	0.338	Bennett & Tinsley (1995), Toprak & Holzer (2003)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Martella (MAR-110)	6.93	0.130	No	3.4-5.7	4.5	1.8	84	57	36.0	0.22	0.61	0.5	46.8	2.06	-	14	28	14	1.40	50.3	16.3	66.6	0.95	0.118	1.05	1.03	0.109	Bennett & Tinsley (1995), Toprak & Holzer (2003)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Martella (MAR-111)	6.93	0.130	No	1.7-6.5	4.0	1.7	74	52	40.0	0.24	0.61	0.5	54.9	2.00	-	10	23	10	1.48	59.3	6.6	65.9	0.96	0.116	1.05	1.03	0.107	Bennett & Tinsley (1995), Toprak & Holzer (2003)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Salinas River Bridge (SRB-116)	6.93	0.120	No	6.4-7.4	6.9	6.4	125	120	40.0	0.92	2.37	0.5	35.5	2.50	-	7	63	7	0.89	35.5	1.2	36.7	0.91	0.074	0.99	1.02	0.074	Bennett & Tinsley (1995), Toprak & Holzer (2003)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Salinas River Bridge (SRB-117)	6.93	0.120	No	6.4-8.0	7.2	6.4	131	123	56.0	0.90	1.64	0.5	49.5	2.28	-	9	46	9	0.89	49.6	4.2	53.8	0.91	0.075	0.99	1.02	0.075	Bennett & Tinsley (1995), Toprak & Holzer (2003)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Alameda Bay Farm Isl. (HBI-P6)	6.93	0.240	Yes	3.0-4.5	3.8	3.0	66	59	60.0	0.22	0.37	0.5	77.8	1.77	-	0	4	4	1.35	80.7	0.0	80.8	0.96	0.169	1.05	1.04	0.155	Mitchell et al. (1994)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Alameda Bay Farm Isl. (Dike)	6.93	0.240	No	5.5-6.8	6.2	5.5	108	102	105.0	2.94	2.83	0.5	103.7	2.22	-	10	40	10	1.00	104.9	7.8	112.7	0.93	0.154	1.00	1.07	0.144	Mitchell et al. (1994)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	POO7-2	6.93	0.280	Yes	5.5-7.0	6.3	3.0	116	84	55.0	0.22	0.41	0.5	59.1	1.89	-	3	14	3	1.12	61.6	0.0	61.6	0.92	0.232	1.01	1.03	0.223	Mitchell et al. (1994), Kayen et al. (1998)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	POO7-3	6.93	0.280	Marginal	5.5-7.0	6.3	3.0	116	84	56.0	0.84	1.53	0.5	60.2	2.20	-	3	39	3	1.12	62.7	0.0	62.7	0.92	0.232	1.01	1.03	0.223	Mitchell et al. (1994), Kayen et al. (1998)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	POR-2&3&4	6.93	0.180	Yes	4.0-7.5	5.5	3.5	89	70	19.0	0.11	0.58	0.5	21.8	2.35	-	52	51	52	1.23	23.4	52.9	76.3	0.94	0.140	1.03	1.03	0.131	Mitchell et al. (1994), Kayen et al. (1998)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	SFOBB-1	6.93	0.280	Yes	5.0-7.5	6.3	3.0	117	84	52.0	0.25	0.49	0.5	55.7	1.95	-	8	19	8	1.12	58.1	2.6	60.7	0.92	0.233	1.01	1.03	0.224	Mitchell et al. (1994), Kayen et al. (1998)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	SFOBB-2	6.93	0.280	Yes	6.0-9.0	7.5	3.0	139	95	81.0	0.35	0.44	0.5	82.0	1.78	-	12	5	12	1.03	83.6	12.8	96.4	0.90	0.241	1.01	1.05	0.228	Mitchell et al. (1994), Kayen et al. (1998)
1989 M=6.9 Loma Prieta - Oct 18	Treasure Island Fire Station	6.93	0.160	Yes	3.0-7.0	5.0	1.5	93	59	40.0	0.28	0.72	0.5	51.1	2.06	-	20	28	20	1.34	53.3	30.7	84.2	0.94	0.155	1.05	1.04	0.142	Pass (1994), Youd and Carter (2005)
1994 M=6.7 Northridge - Jan 17	Balboa Blvd Unit C (BAL-10)	6.69	0.																										

Earthquake	Site	Mag (M)	a _{max} (g)	Liq (Yes, No)	Critical depth interval (m)	Avg depth (m)	Depth to GWT (m)	σ _{vc} (Kpa)	σ _{vc} (KPa)	Tip (q _{tip}) _{meas}	Sleeve (f _s) _{meas}	Friction ratio (F) _{meas} (%)	n	Q	I _c	PI	Lab FC (%)	I _c est. FC (%)	Repr. FC (%)	C _u	q _{tip}	Δq _{tip}	q _{tip} /C _u	r _e	CSR	K _e	MSF	CSR for M=7.5, K _e =1	References
1995 M=6.9 Hyogoken-Nambu - Jan 16	Kobe Customs Maya Office B	6.90	0.600	Yes	3.0-6.0	4.5	1.8	84	57	50.2	0.44	0.89	0.5	65.7	2.02	-	-	25	25	1.32	66.2	41.6	107.8	0.95	0.543	1.06	1.07	0.479	Suzuki et al. (2003)
1995 M=6.9 Hyogoken-Nambu - Jan 16	Kobe Port Const. Office	6.90	0.600	Yes	3.0-5.0	4.0	2.5	72	57	37.9	0.11	0.30	0.5	49.6	1.91	-	-	15	15	1.39	52.5	20.3	72.8	0.96	0.471	1.05	1.03	0.434	Suzuki et al. (2003)
1995 M=6.9 Hyogoken-Nambu - Jan 16	Kobe Wharf Public Co.	6.90	0.450	Yes	4.0-5.5	4.8	2.1	86	60	42.8	0.33	0.79	0.5	54.3	2.06	-	-	28	28	1.29	55.4	44.3	99.8	0.95	0.396	1.05	1.06	0.356	Suzuki et al. (2003)
1995 M=6.9 Hyogoken-Nambu - Jan 16	Koyo Pump Station	6.90	0.450	Yes	5.0-7.0	6.0	2.6	109	76	20.0	0.34	1.80	0.5	21.8	2.59	-	-	70	70	1.17	23.4	57.5	80.9	0.93	0.391	1.03	1.04	0.366	Suzuki et al. (2003)
1995 M=6.9 Hyogoken-Nambu - Jan 16	Mizukasa Park	6.90	0.65	Yes	4.0-4.5	4.3	2.0	77	55	88.0	0.40	0.46	0.5	118.2	1.65	-	-	0	0	1.33	116.7	0	116.7	0.96	0.565	1.07	1.08	0.488	Suzuki et al. (2003)
1995 M=6.9 Hyogoken-Nambu - Jan 16	Nagashi Park	6.90	0.65	No	1.1-1.8	1.4	1.0	25	21	79.0	0.31	0.39	0.5	173.0	1.48	-	-	0	0	1.70	134.3	0	134.3	0.99	0.498	1.10	1.11	0.409	Suzuki et al. (2003)
1995 M=6.9 Hyogoken-Nambu - Jan 16	New Port No. 6 Pier	6.90	0.60	Yes	3.5-5.5	4.5	2.5	81	61	62.1	0.27	0.44	0.5	78.6	1.79	-	-	7	7	1.31	81.4	1	82.3	0.95	0.490	1.05	1.04	0.450	Suzuki et al. (2003)
1995 M=6.9 Hyogoken-Nambu - Jan 16	New Wharf Const. Offices	6.90	0.45	Yes	3.2-3.8	3.5	2.6	62	53	23.0	0.22	0.96	0.5	30.9	2.32	-	-	48	48	1.41	32.4	54	86.3	0.97	0.329	1.06	1.04	0.298	Suzuki et al. (2003)
1995 M=6.9 Hyogoken-Nambu - Jan 16	Nisseki Kobe Oil Tank A	6.90	0.60	Yes	4.8-6.1	5.5	2.4	99	69	40.2	0.24	0.62	0.5	47.3	2.06	-	-	28	28	1.22	48.9	43	91.6	0.94	0.523	1.04	1.05	0.481	Suzuki et al. (2003)
1995 M=6.9 Hyogoken-Nambu - Jan 16	Nisseki Kobe Oil Tank A	6.90	0.60	Yes	5.0-6.0	5.5	2.4	99	69	47.9	0.35	0.75	0.5	56.6	2.04	-	-	26	26	1.21	57.9	42	99.7	0.94	0.523	1.04	1.06	0.476	Suzuki et al. (2003)
1995 M=6.9 Hyogoken-Nambu - Jan 16	Shimonakajima Park	6.90	0.65	No	3.2-4.5	3.8	2.0	68	51	126.8	0.94	0.75	0.5	178.4	1.64	-	-	0	0	1.30	165.1	0	165.1	0.96	0.545	1.10	1.18	0.418	Suzuki et al. (2003)
1995 M=6.9 Hyogoken-Nambu - Jan 16	Shiporex Kogyo Osaka Factory	6.90	0.40	Yes	4.0-7.0	5.5	1.5	102	62	24.8	0.10	0.43	0.5	30.3	2.17	-	-	36	36	1.30	32.3	47	79.5	0.94	0.396	1.04	1.04	0.366	Suzuki et al. (2003)
1995 M=6.9 Hyogoken-Nambu - Jan 16	Sumiyoshi Elementary	6.90	0.60	No	2.4-3.2	2.8	1.9	50	41	110.0	0.67	0.61	0.5	171.8	1.59	-	-	0	0	1.43	156.8	0	156.8	0.98	0.462	1.10	1.16	0.362	Suzuki et al. (2003)
1995 M=6.9 Hyogoken-Nambu - Jan 16	Sumiyoshi Elementary	6.90	0.45	Yes	3.2-4.2	3.7	1.6	67	47	25.0	0.10	0.41	0.5	35.7	2.09	-	-	30	30	1.52	38	43	81.1	0.96	0.406	1.07	1.04	0.365	Suzuki et al. (2003)
1995 M=6.9 Hyogoken-Nambu - Jan 16	Tokuyama Concrete Factory	6.90	0.50	Yes	4.0-6.2	5.2	2.0	95	64	29.6	0.13	0.44	0.5	36.1	2.10	-	-	31	31	1.29	38	44	82.0	0.94	0.456	1.04	1.04	0.421	Suzuki et al. (2003)
1995 M=6.9 Hyogoken-Nambu - Jan 16	Yoshida Kogyo Factory	6.90	0.50	No	3.6-4.2	4.1	3.0	73	62	128.0	3.70	2.91	0.5	162.6	2.10	-	-	31	31	1.16	149	67	216.3	0.96	0.365	1.10	1.26	0.264	Suzuki et al. (2003)
1999 M=7.5 Kocaeli - Aug 17	Hotel Sapanca SH-4	7.51	0.37	Yes	0.8-2.4	1.6	0.5	30	19	9.4	0.04	0.46	0.5	21.1	2.32	NP	5	49	5	1.70	15.9	0	16.1	0.99	0.376	1.08	1.00	0.347	PEER (2000a), Moss et al. (2003)
1999 M=7.5 Kocaeli - Aug 17	Soccer Field SF-5	7.51	0.37	Yes	1.2-2.4	1.8	1.0	33	25	12.8	0.15	1.20	0.5	25.2	2.44	NP	16	58	16	1.70	21.8	19	40.5	0.99	0.314	1.09	1.00	0.288	PEER (2000a), Moss et al. (2003)
1999 M=7.5 Kocaeli - Aug 17	Police Station Site, PS-1	7.51	0.40	Yes	1.8-2.8	2.3	1.0	42	29	11.4	0.21	1.95	0.7	25.9	2.55	NP	12	67	12	1.70	19.3	10	28.9	0.99	0.368	1.07	1.00	0.344	PEER (2000a), Moss et al. (2003)
1999 M=7.5 Kocaeli - Aug 17	Yalova Harbor YH-3	7.51	0.37	Yes	1.2-6.0	3.6	1.0	67	41	54.0	0.23	0.43	0.5	83.5	1.77	NP	9	4	9	1.59	86.1	5	91.0	0.98	0.380	1.09	1.00	0.349	PEER (2000a), Moss et al. (2003)
1999 M=7.5 Kocaeli - Aug 17	Adapazari Site B	7.51	0.40	Yes	3.3-4.3	3.8	3.3	68	63	62.0	0.32	0.52	0.5	77.9	1.84	-	35	10	35	1.23	76.4	56	132.5	0.97	0.273	1.07	1.00	0.257	PEER (2000a), Sancio (2003), Moss et al. (2003), Bray et al. (2004)
1999 M=7.5 Kocaeli - Aug 17	Adapazari Site C2	7.51	0.40	Yes	3.3-4.0	3.7	0.4	69	37	29.0	0.23	0.81	0.5	46.5	2.13	-	35	33	35	1.65	47.9	50	97.7	0.98	0.470	1.10	1.00	0.428	PEER (2000a), Sancio (2003), Moss et al. (2003), Bray et al. (2004)
1999 M=7.5 Kocaeli - Aug 17	Adapazari Site D	7.51	0.40	Yes	1.8-2.5	2.2	1.5	39	32	12.5	0.07	0.59	0.5	21.5	2.36	-	65	52	65	1.70	21.3	56	77.2	0.99	0.308	1.10	1.00	0.280	PEER (2000a), Sancio (2003), Moss et al. (2003), Bray et al. (2004)
1999 M=7.5 Kocaeli - Aug 17	Adapazari Site E	7.51	0.40	Yes	1.5-3.0	2.3	0.5	42	25	20.0	0.08	0.41	0.5	39.7	2.05	-	2	27	2	1.70	34.1	0	34.1	0.99	0.436	1.09	1.00	0.401	PEER (2000a), Sancio (2003), Moss et al. (2003), Bray et al. (2004)
1999 M=7.5 Kocaeli - Aug 17	Adapazari Site F	7.51	0.40	Yes	1.8-3.0	2.4	0.5	45	26	33.2	0.10	0.30	0.5	64.4	1.80	-	42	7	42	1.70	56.4	57	113.2	0.99	0.440	1.10	1.00	0.401	PEER (2000a), Sancio (2003), Moss et al. (2003), Bray et al. (2004)
1999 M=7.5 Kocaeli - Aug 17	Adapazari Site G	7.51	0.40	Yes	1.5-2.7	2.1	0.5	39	23	24.9	0.08	0.32	0.5	51.4	1.90	-	65	15	65	1.70	42.3	62	104.1	0.99	0.439	1.10	1.00	0.400	PEER (2000a), Sancio (2003), Moss et al. (2003), Bray et al. (2004)
1999 M=7.5 Kocaeli - Aug 17	Adapazari Site H	7.51	0.40	Yes	2.0-3.0	2.5	1.7	45	37	26.0	0.15	0.59	0.5	42.0	2.10	-	15	31	15	1.70	44.1	18	62.5	0.99	0.311	1.08	1.00	0.288	PEER (2000a), Sancio (2003), Moss et al. (2003), Bray et al. (2004)
1999 M=7.5 Kocaeli - Aug 17	Adapazari Site J	7.51	0.40	Yes	1.5-3.5	2.5	0.6	46	28	15.0	0.13	0.87	0.5	27.7	2.34	3	82	50	82	1.70	25.5	60	85.4	0.99	0.428	1.10	1.00	0.390	PEER (2000a), Sancio (2003), Moss et al. (2003), Bray et al. (2004)
1999 M=7.5 Kocaeli - Aug 17	Degirmendere DN-1	7.51	0.40	Yes	1.7-2.6	2.2	1.7	38	34	71.1	0.70	0.99	0.5	122.5	1.84	-	12	10	12	1.62	115.3	14	129.6	0.99	0.291	1.10	1.00	0.265	Youd et al. (2009)
1999 M=7.5 Kocaeli - Aug 17	Degirmendere DN-2	7.51	0.40	No	2.7-3.7	3.2	2.5	57	50	78.0	0.88	1.13	0.5	110.3	1.91	-	12	16	12	1.38	107.6	14	121.6	0.98	0.290	1.09	1.00	0.266	Youd et al. (2009)
1999 M=7.5 Kocaeli - Aug 17	Yalova Harbor	7.51	0.30	Yes	3.4-6.4	4.9	0.8	92	51	52.3	0.24	0.47	0.5	72.4	1.84	-	11	10	11	1.44	75.5	10	85.1	0.96	0.338	1.07	1.00	0.317	Cetin et al. (2004b)
1999 M=7.5 Kocaeli - Aug 17	Yalova Harbor	7.62	0.38	Yes	2.0-3.0	2.5	1.0	46	31	20.0	0.20	1.02	0.5	35.3	2.28	-	38	46	38	1.70	34	49	82.8	0.99	0.360	1.10	0.99	0.330	PEER (2000b), Moss et al. (2003)
1999 M=7.6 Chi-Chi - Sept 20	Nantou Site C-7	7.62	0.38	Yes	2.5-4.5	3.5	1.0	65	40	11.0	0.06	0.58	0.5	16.5	2.46	-	-	60	60	1.69	18.6	54	72.5	0.98	0.390	1.08	0.99	0.364	PEER (2000b), Moss et al. (2003)
1999 M=7.6 Chi-Chi - Sept 20	Nantou Site C-8	7.62	0.38	Yes	5.0-9.0	7.0	1.0	131	72	27.2	0.56	2.16	0.5	30.7	2.52	-	-	65	65	1.19	32.5	59	91.4	0.94	0.423	1.03	0.99	0.413	PEER (2000b), Moss et al. (2003)
1999 M=7.6 Chi-Chi - Sept 20	WuFeng Site B	7.62	0.60	Yes	2.0-4.0	3.0	1.1	55	36	30.0	0.30	1.02	0.5	49.0	2.16	-	35	36	35	1.66	49.9	50	100.1	0.98	0.578	1.10	0.99	0.531	PEER (2000b), Moss et al. (2003)
1999 M=7.6 Chi-Chi - Sept 20	WuFeng Site C	7.62	0.60	Yes	4.0-5.0	4.5	1.2	83	51	35.0	0.70	2.05	0.5	48.2	2.35	-	14	51	14	1.49	52.2	16	68.6	0.97	0.619	1.06	0.99	0.589	PEER (2000b), Moss et al. (2003)
1999 M=7.6 Chi-Chi - Sept 20	Yuanlin C-4	7.62	0.250	Yes	3.0-6.0	4.5	0.7	84	46	30.0	0.38	1.30	0.5	43.1	2.27	-	-	45	45	1.48	44.3	55.3	99.6	0.97	0.286	1.08	0.99	0.266	PEER (2000b), Moss et al. (2003)
1999 M=7.6 Chi-Chi - Sept 20	Yuanlin C-19	7.62	0.250	Yes	4.5-5.5	5.0	0.6	94	50	20.0	0.20	1.05	0.5	27.1	2.39	-	-	54	54	1.46	29.1	55.1	84.2	0.96	0.293	1.07	0.99	0.276	PEER (2000b), Moss et al. (2003)
1999 M=7.6 Chi-Chi - Sept 20	Yuanlin C-22	7.62	0.250	Yes	2.8-4.2	3.5	1.1	64	41	27.0	0.12	0.46	0.5	41.3	2.05	-	-	27	27	1.62	43.7	40.7	84.5	0.98	0.249	1.08	0.99	0.231	PEER (2000b), Moss et al. (2003)
1999 M=7.6 Chi-Chi - Sept 20	Yuanlin C-24	7.62	0.250	Yes	5.2-7.8	6.5	1.2	121	69	38.0	0.23	0.62	0.5	44.5	2.09	-	-	30	30	1.22	46.4	44.5	90.9	0.95	0.270	1.04	0.99	0.263	PEER (2000b), Moss et al. (2003)
1999 M=7.6 Chi-Chi - Sept 20	Yuanlin C-25	7.62	0.250	Yes	4.0-7.0	5.5	3.5	98	79	20.0	0.20	1.05	0.5	21.5	2.47	-	-	61	61	1.15	23.0	55.3	78.3	0.96	0.195	1.02	0.99	0.192	PEER (2000b), Moss et al. (2003)
1999 M=7.6 Chi-Chi - Sept 20	Yuanlin C-32	7.62	0.250	Yes	4.5-7.5	6.0	0.7	112	61	34.0	0.21	0.64	0.5	42.5	2.11	-	-	32	32										

Earthquake	Site	Mag (M)	a _{max} (g)	Liq (Yes, No)	Critical depth interval (m)	Avg depth (m)	Depth to GWT (m)	σ _{vc} (Kpa)	σ _{vc} (KPa)	Tip (q _{tip}) _{aver}	Sleeve (f _{sl}) _{aver}	Friction ratio (F) _{aver} (%)	n	Q	I _c	PI	Lab FC (%)	I _c est. FC (%)	Repr. FC (%)	C _u	q _{tip}	Δq _{tip}	q _{tip} /CS	r _e	CSR	K _v	MSF	CSR for M=7.5, K _v =1	References
2010 M=7.1 Darfield - Sept 4	KAS-11	7.00	0.211	Yes	2.0-3.1	2.6	1.2	47	34	39.0	0.23	0.60	0.5	67.00	1.92	-	-	10	10	1.70	66.4	7.2	73.6	0.98	0.187	1.10	1.03	0.166	Green et al. (2014)
2011 M-6.2 Christchurch - Feb 22	KAS-11	6.20	0.186	Yes	2.0-3.1	2.6	1.2	47	34	39.0	0.23	0.60	0.5	67.00	1.92	-	-	10	10	1.70	66.4	7.2	73.6	0.97	0.164	1.10	1.08	0.138	Green et al. (2014)
2010 M=7.1 Darfield - Sept 4	KAS-20	7.00	0.211	Yes	3.5-5.0	4.3	1.6	79	53	45.9	0.15	0.33	0.5	62.40	1.83	-	-	6	6	1.46	67.0	0.4	67.4	0.96	0.196	1.05	1.03	0.181	Green et al. (2014)
2011 M-6.2 Christchurch - Feb 22	KAS-20	6.20	0.172	Yes	3.5-5.0	4.3	1.6	79	53	45.9	0.15	0.33	0.5	62.40	1.83	-	-	6	6	1.46	67.0	0.4	67.4	0.94	0.157	1.05	1.07	0.139	Green et al. (2014)
2010 M=7.1 Darfield - Sept 4	KAS-40	7.00	0.224	Yes	1.9-2.75	2.3	1.9	41	36	35.2	0.12	0.35	0.5	57.90	1.87	-	-	8	8	1.70	59.8	2.2	62.0	0.98	0.160	1.08	1.02	0.144	Green et al. (2014)
2011 M-6.2 Christchurch - Feb 22	KAS-40	6.20	0.177	Yes	1.9-2.75	2.3	1.9	41	36	35.2	0.12	0.35	0.5	57.90	1.87	-	-	8	8	1.70	59.8	2.2	62.0	0.97	0.125	1.08	1.07	0.109	Green et al. (2014)
2010 M=7.1 Darfield - Sept 4	SNB-01	7.00	0.170	Yes	2.25-5.0	3.6	2.0	66	50	53.7	0.34	0.65	0.5	75.60	1.90	-	-	9	9	1.47	78.7	4.8	83.5	0.97	0.141	1.07	1.03	0.128	Green et al. (2014)
2011 M-6.2 Christchurch - Feb 22	SNB-01	6.20	0.351	Yes	2.25-5.0	3.6	2.0	66	50	53.7	0.34	0.65	0.5	75.60	1.90	-	-	9	9	1.47	78.7	4.8	83.5	0.95	0.287	1.07	1.10	0.245	Green et al. (2014)
2010 M=7.1 Darfield - Sept 4	NBT-02	7.00	0.170	Yes	4.8-6.7	5.8	2.0	107	70	48.6	0.25	0.53	0.5	57.00	1.96	-	-	12	12	1.23	59.8	11.6	71.5	0.93	0.157	1.03	1.03	0.149	Green et al. (2014)
2011 M-6.2 Christchurch - Feb 22	NBT-02	6.20	0.354	Yes	4.8-6.7	5.8	2.0	107	70	48.6	0.25	0.53	0.5	57.00	1.96	-	-	12	12	1.23	59.8	11.6	71.5	0.91	0.318	1.03	1.08	0.287	Green et al. (2014)
2010 M=7.1 Darfield - Sept 4	NBT-03	7.00	0.168	Yes	7.0-10.2	8.6	2.4	162	101	60.2	0.32	0.54	0.5	58.70	1.95	-	-	11	11	1.00	60.4	10.1	70.4	0.89	0.155	1.00	1.03	0.151	Green et al. (2014)
2011 M-6.2 Christchurch - Feb 22	NBT-03	6.20	0.346	Yes	7.0-10.2	8.6	2.4	162	101	60.2	0.32	0.54	0.5	58.70	1.95	-	-	11	11	1.00	60.4	10.1	70.4	0.84	0.304	1.00	1.08	0.283	Green et al. (2014)
2010 M=7.1 Darfield - Sept 4	RCH-14	7.00	0.183	No	3.5-5.5	4.5	2.3	81	60	23.8	0.01	0.03	0.5	29.80	2.01	-	-	7	7	1.45	34.4	0.9	35.3	0.95	0.154	1.03	1.02	0.146	Green et al. (2014)
2011 M-6.2 Christchurch - Feb 22	RCH-14	6.20	0.339	Yes	3.5-5.5	4.5	2.3	81	60	23.8	0.01	0.03	0.5	29.80	2.01	-	-	7	7	1.45	34.4	0.9	35.3	0.93	0.279	1.03	1.05	0.257	Green et al. (2014)
2010 M=7.1 Darfield - Sept 4	Z1-3	7.00	0.217	Yes	4.0-8.25	6.1	1.4	116	70	51.5	0.57	1.13	0.5	60.70	2.11	-	-	26	26	1.20	61.9	42.2	104.1	0.93	0.218	1.04	1.05	0.200	Green et al. (2014)
2011 M-6.2 Christchurch - Feb 22	Z1-3	6.20	0.455	Yes	4.0-8.25	6.1	1.4	116	70	51.5	0.57	1.13	0.5	60.70	2.11	-	-	26	26	1.20	61.9	42.2	104.1	0.90	0.444	1.04	1.14	0.372	Green et al. (2014)
2010 M=7.1 Darfield - Sept 4	Z2-11	7.00	0.210	No	2.2-3.3	2.8	1.0	51	34	64.2	0.69	1.09	0.5	109.70	1.90	-	-	11	11	1.66	106.4	10.2	116.6	0.98	0.201	1.10	1.06	0.171	Green et al. (2014)
2010 M=7.1 Darfield - Sept 4	Z2-11	6.20	0.447	Yes	2.2-3.3	2.8	1.0	51	34	64.2	0.69	1.09	0.5	109.70	1.90	-	-	11	11	1.66	106.4	10.2	116.6	0.97	0.422	1.10	1.18	0.324	Green et al. (2014)
2010 M=7.1 Darfield - Sept 4	Z2-6	7.00	0.214	No	2.0-2.85	2.4	2.0	42	38	47.0	0.42	0.90	0.5	75.90	1.98	-	-	16	16	1.63	76.5	23.8	100.3	0.98	0.152	1.10	1.05	0.132	Green et al. (2014)
2011 M-6.2 Christchurch - Feb 22	Z2-6	6.20	0.451	Yes	2.0-2.85	2.4	2.0	42	38	47.0	0.42	0.90	0.5	75.90	1.98	-	-	16	16	1.63	76.5	23.8	100.3	0.97	0.317	1.10	1.13	0.254	Green et al. (2014)
2010 M=7.1 Darfield - Sept 4	Z4-4	7.00	0.215	No	2.0-3.25	2.6	2.0	46	40	41.2	0.37	0.91	0.5	64.70	2.03	-	-	18	18	1.60	66.2	28.4	94.5	0.98	0.158	1.09	1.04	0.138	Green et al. (2014)
2011 M-6.2 Christchurch - Feb 22	Z4-4	6.20	0.450	Yes	2.0-3.25	2.6	2.0	46	40	41.2	0.37	0.91	0.5	64.70	2.03	-	-	18	18	1.60	66.2	28.4	94.5	0.97	0.327	1.09	1.12	0.267	Green et al. (2014)
2010 M=7.1 Darfield - Sept 4	Z8-11	7.00	0.219	Yes	1.4-2.0	1.7	1.4	30	27	23.0	0.17	0.75	0.5	43.90	2.13	-	-	39	39	1.70	39.1	50.7	89.8	0.99	0.157	1.10	1.04	0.137	Green et al. (2014)
2011 M-6.2 Christchurch - Feb 22	Z8-11	6.20	0.453	Yes	1.4-2.0	1.7	1.4	30	27	23.0	0.17	0.75	0.5	43.90	2.13	-	-	39	39	1.70	39.1	50.7	89.8	0.98	0.322	1.10	1.11	0.264	Green et al. (2014)
2011 M=9.0 Tohoku - Mar 11	Hinode Minami ES	9.00	0.170	No	4.0-5.6	4.8	1.1	89	53	101.0	0.82	0.80	0.5	138.10	1.75	-	-	3	3	1.32	133.5	0.0	133.5	1.01	0.187	1.09	0.79	0.216	Cox et al. (2013)
2011 M=9.0 Tohoku - Mar 11	Hosoyama Nekki	9.00	0.180	No	3.8-4.6	4.2	2.5	76	60	66.0	0.29	0.40	0.5	84.90	1.77	-	-	5	5	1.32	87.2	0.1	87.3	1.01	0.150	1.05	0.92	0.156	Cox et al. (2013)
2011 M=9.0 Tohoku - Mar 11	Takasu Chuou Park	9.00	0.210	Yes	6.3-7.3	6.8	1.1	127	71	67.0	0.46	0.70	0.5	78.30	1.90	-	-	15	15	1.19	79.7	21.9	101.6	1.01	0.245	1.04	0.89	0.266	Cox et al. (2013)
2011 M=9.0 Tohoku - Mar 11	Takasu Kaihin Park	9.00	0.220	Yes	8.4-9.6	9.0	1.3	169	93	95.0	0.45	0.50	0.5	97.30	1.74	-	-	2	2	1.04	99.1	0.0	99.1	1.01	0.261	1.01	0.89	0.289	Cox et al. (2013)
2011 M=9.0 Tohoku - Mar 11	Akemi ES	9.00	0.169	No	7.5-14	10.1	1.2	189	102	83.0	0.48	0.60	0.5	80.70	1.85	-	-	11	11	1.00	82.7	10.2	92.9	1.00	0.205	1.00	0.91	0.226	Cox et al. (2013)
2011 M=9.0 Tohoku - Mar 11	Hinode ES	9.00	0.199	Yes	2.0-3.6	2.8	1.2	51	36	34.0	0.24	0.70	0.5	56.30	2.03	-	-	25	25	1.69	57.4	40.6	98.0	1.00	0.187	1.10	0.90	0.190	Cox et al. (2013)
2011 M=9.0 Tohoku - Mar 11	Irifune NS	9.00	0.256	Yes	5.5-7.1	6.3	1.6	117	71	20.0	0.28	1.50	0.5	22.50	2.53	-	-	66	66	1.21	24.3	56.9	81.1	1.01	0.276	1.03	0.92	0.289	Cox et al. (2013)