

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE CONTRUCCIONES MASIVAS DE  
TIERRA UTILIZANDO MODELOS NUMÉRICOS AVANZADOS:  
EL CASO DE LA HUACA DE LA LUNA**

Tesis para optar por el título profesional de Ingeniero Civil

**Autor: Gonzalo André Lozano Chávez**

**Asesor: Dr. Ing. Rafael Aguilar Vélez**

Lima, 2020

## Resumen:

En el Perú, una cantidad significativa de construcciones de gran valor histórico poseen una estructura de tierra. Estas construcciones son parte de nuestro patrimonio cultural y son una fuente importante de ingresos para el país debido a su valor turístico. Por estas razones es importante su preservación y asegurar un adecuado nivel de seguridad frente a eventuales movimientos sísmicos mediante una correcta evaluación de su comportamiento estructural.

La presente investigación busca realizar un análisis preliminar del comportamiento estructural de una de las estructuras patrimoniales más importantes de la costa norte del Perú: la Huaca de la Luna. El estudio contempla la implementación de modelos numéricos en elementos finitos, tanto de la pirámide principal como del suelo sobre el cual se encuentra cimentada, la selección de materiales y leyes constitutivas apropiadas y la ejecución de un análisis no lineal bajo cargas de gravedad y de un análisis lineal tiempo-historia para determinar el efecto de amplificación de una señal sísmica al propagarse por los estratos de suelo. Se desarrollará un análisis paramétrico para evaluar la influencia de los cambios en la geometría causados por los daños que ha sufrido la construcción, así como de las condiciones geotécnicas de la Huaca al considerar la interacción del suelo y la estructura. La contribución de este trabajo será determinar las zonas vulnerables debido a los esfuerzos ocasionados por cargas de gravedad, y a la realización de un diagnóstico preliminar del estado de daño, así como entender el fenómeno de amplificación de ondas sísmicas en estructuras masivas de tierra. Esto se traducirá en estrategias optimizadas de intervención en el futuro.

La evaluación estructural de una construcción histórica como la estudiada es un problema complejo debido al poco conocimiento de los procesos constructivos de la época, así como por la variabilidad de las propiedades mecánicas de los materiales y el deterioro sufrido con el paso de los años. Por esta razón, se tomarán como base estudios experimentales previos hechos en la Huaca, entre los que se encuentran la caracterización mecánica de los materiales, estudios geotécnicos y geofísicos, y ensayos de identificación modal. Los resultados de estos estudios serán complementados con modelos numéricos en elementos finitos. Se espera que estos modelos ayuden a identificar las zonas vulnerables en el caso de estudio, así como a comprender el estado actual de daño, y a predecir la amplificación de la aceleración experimentada en el suelo firme a través de la propagación de ondas en el sistema suelo-estructura. Posteriormente, se podrá cuantificar el efecto que produce considerar los cambios en la geometría debido al daño y la interacción suelo-estructura al evaluar su vulnerabilidad sísmica.

## **Abstract:**

In Peru, a significant number of constructions of great historical value have an earthen structure. These constructions are part of our cultural heritage and are an important source of income for the country due to its touristic value. For these reasons, it is important to preserve them and to ensure an adequate safety level against possible seismic activity through a correct assessment of their structural behavior.

This research seeks to perform a preliminary analysis of the structural behavior of one of the most important heritage structures of the northern coast of Peru: la Huaca de la Luna. The study contemplates the implementation of numerical models in finite elements, both of the main pyramid and the underlying soil, the selection of appropriate materials and constitutive laws. The performance of a non-linear analysis under gravity loads and a Time-history linear analysis to determine the amplification effect of a seismic signal as it propagates through the soil strata. A parametric analysis will be performed to assess the influence of the changes in geometry caused by the damages that the structure has suffered, as well as the geotechnical conditions of the Huaca when considering the soil-structure interaction. The contribution of this work will be to determine the vulnerable zones due to the stresses caused by gravity loads, and to carry out a preliminary diagnosis of the state of damage, as well as to understand the seismic wave's amplification phenomena in massive earthen structures. This will result in optimized intervention strategies in the future.

The structural assessment of a historical construction like the one studied is a complex problem due to the little knowledge of the constructive processes of the time, as well as the variability of the mechanical properties of the materials and the deterioration suffered over the years. For this reason, previous experimental studies in the Huaca will be considered, among which are the mechanical characterization of the materials, geotechnical and geophysical studies, and modal identification tests. The results of these studies will be complemented with numerical models in finite elements. It is expected that these models will help to identify the vulnerable zones in the case study, as well as to understand the current state of damage, and to predict the amplification of the acceleration experienced in the firm soil through the propagation of waves in the soil-structure system. Subsequently, the effect of considering changes in geometry due to damage and the soil-structure interaction when evaluating its seismic vulnerability will be quantified.

## **Agradecimientos:**

Agradezco a mis padres por el apoyo incondicional durante mis años de estudio y por la formación que me brindaron a lo largo de mi vida, gracias a la cual ahora puedo cumplir mis metas. Asimismo, agradezco a mi asesor de tesis, Dr. Rafael Aguilar, por su apoyo y guía durante el proceso de desarrollo de esta tesis. Agradezco, también, a mis compañeros del grupo de investigación Engineering & Heritage por su ayuda desinteresada, y en particular a Carolina Briceño, quien me brindó su orientación constante. Finalmente, agradezco a mis profesores por los conocimientos y la formación recibida durante mi etapa universitaria.



# Índice

Resumen: .....	1
Abstract:.....	2
Agradecimientos: .....	3
Índice .....	4
Lista de Figuras.....	6
Lista de Tablas .....	8
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Justificación.....	2
1.2. Hipótesis .....	2
1.3. Objetivos .....	2
1.4. Metodología .....	3
<b>CAPÍTULO 2. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DEL Y MARCO TEÓRICO . 5</b>	<b>5</b>
Resumen:.....	5
2.1. Introducción.....	6
2.2. Marco Teórico .....	6
2.2.1. Análisis de Construcciones Existentes y Patrimoniales en el Mundo.....	6
2.2.2. Método de los Elementos Finitos .....	7
2.4. Amplificación Sísmica.....	11
2.5. Análisis Numérico de Suelos Sometidos a Movimientos Sísmicos. 14	14
2.5.1. Consideraciones en el Modelamiento .....	15
2.5.2. Casos de Estudio.....	15
2.6. Análisis Numérico de un Sistema Suelo-Estructura Sometido a Movimientos Sísmicos .....	20
2.6.1. Consideraciones en el Modelamiento .....	20
2.6.2. Casos de Estudio.....	22
2.7. Conclusiones .....	33
<b>CAPÍTULO 3. EL CASO DE ESTUDIO .....</b>	<b>34</b>
Resumen:.....	34
3.1. Introducción.....	35
3.2. Reseña Histórica de la Huaca.....	35
3.3. Descripción Arquitectónica .....	35
3.4. Estudios Geométricos.....	37
3.5. Características Geotécnicas.....	38
3.5.1. Ensayos Realizados .....	38
3.5.2. Propiedades Mecánicas del Suelo .....	41
3.6. Características del Adobe.....	41
3.6.1. Ensayos Realizados .....	41
3.6.2. Propiedades Mecánicas del Adobe .....	42
3.5. Peligro Sísmico en la Huaca de la Luna.....	42
3.5.1. Sismicidad Histórica .....	43
3.6. Conclusiones .....	46
<b>CAPÍTULO 4. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA PIRÁMIDE PRINCIPAL DE LA HUACA DE LA LUNA .....</b>	<b>47</b>

Resumen:.....	47
4.1. Introducción.....	48
4.2. Descripción del Modelo.....	48
4.2.1. Modelamiento del Suelo.....	48
4.2.1.1. Propiedades Mecánicas Consideradas .....	49
4.2.1.2. Condiciones de Borde .....	49
4.2.2. Modelamiento de la estructura .....	49
4.2.2.1. Propiedades Mecánicas Consideradas .....	50
4.2.2.2. Interacción con el Suelo.....	51
4.3. Resultados del análisis estático .....	52
4.4. Análisis dinámico lineal .....	54
4.4.1. Registros Sísmicos .....	54
4.4.2. Acelerogramas Compatibles con la Norma E.030 .....	55
4.5. Resultados del análisis dinámico.....	58
4.6. Conclusiones .....	62
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....	63
Bibliografía.....	66



## Lista de Figuras

Figura 2.1. Ejemplo de modelo y enmallado (Fish & Ted Belytschko, 2007) .....	8
Figura 2.2. (a) Aproximación de un borde curvo usando elementos triangulares y (b) elemento finito triangular de 3 nodos (Fish & Ted Belytschko, 2007) .....	9
Figura 2.3. Elemento rectangular de 4 nodos (DIANA FEA, 2013a) .....	9
Figura 2.4. Elemento tetraédrico de 4 nodos (DIANA FEA, 2013a) .....	10
Figura 2.5. Estructura de un grado de libertad .....	11
Figura 2.6. Factor de Amplificación dinámica para carga armónica .....	12
Figura 2.7. Variación de la señal sísmica al pasar por (a) diferentes estratos de suelo y (b) por suelo blando (Astwood Rojas, 2013).....	14
Figura 2.8. Modelo Bidimensional del suelo en una pendiente (Di Fiore, 2010).....	16
Figura 2.9. Amplificaciones producidas para una pendiente de 41° (Di Fiore, 2010) .....	16
Figura 2.10. Espectro de Respuesta al considerar un enfoque probabilístico (Wang & Hao, 2002) .....	17
Figura 2.11. Degradación de la rigidez del suelo con la deformación (DIANA FEA & Garofano, 2016) .....	18
Figura 2.12. Espectros de respuesta (a) en la parte superior de la columna de suelo y (b) de la señal de entrada (DIANA FEA & Garofano, 2016) .....	18
Figura 2.13. Enmallado bidimensional de un suelo de arcilla (Zhang et al., 2017).....	19
Figura 2.14. Registros de aceleraciones completo y truncado para el análisis dinámico del suelo (Zhang et al., 2017).....	19
Figura 2.15. Comparación entre el espectro de respuesta de completo y truncado de la aceleración de entrada y su correspondiente respuesta superficial, medida y predicha con el método de elementos finitos (Zhang et al., 2017). .....	20
Figura 2.16. Modelamiento de la interacción: (a) como sistema continuo; (b) considerando la interfaz (DIANA FEA, 2013a) .....	21
Figura 2.17. Estructura idealizada utilizada en el análisis (Botero, 2002) .....	22
Figura 2.18. Modelamiento bidimensional del sistema suelo-estructura (Matinmanesh & Asheghabadi, 2011) .....	23
Figura 2.19. Modelo bidimensional y discretización para el sistema suelo-estructura (Çelebi et al., 2012).....	25
Figura 2.20. Desplazamientos máximos para una esbeltez estructural igual a 2. (Çelebi et al., 2012).....	26
Figura 2.21. Modelo del muro de corte cimentado sobre estratos de suelo (Liang et al., 2016).....	27
Figura 2.22. (a) Fijo en la base, (b) cimentación con resortes, (c) cimentación con pilotes (Mitropoulou et al., 2016) .....	28
Figura 2.23. Extensión de la malla del sistema (Mitropoulou et al., 2016) .....	28
Figura 2.24. Modelo suelo-estructura de un edificio aislado (Krishnamoorthy & Anita, 2016).....	30
Figura 2.25. Respuesta de desplazamientos sobre el aislamiento para el sismo de El Centro (Krishnamoorthy & Anita, 2016).....	30
Figura 2.26. Amplificación de la respuesta para los diferentes sismos (Krishnamoorthy & Anita, 2016).....	31
Figura 2.27. Modelo de elementos finitos para el sistema suelo estructura de una planta nuclear (Bolisetti et al., 2018) .....	31
Figura 2.28. Aceleración espectral para los diferentes modelos de elementos finitos para el sistema suelo estructura de una planta nuclear (Bolisetti et al., 2018).....	32
Figura 3.1. (a) Vista de la distribución de áreas del complejo (Chácara, Zvietcovich, Briceño, et al., 2014) y (b) Vista general desde el este de la Huaca de la Luna .....	36
Figura 3.2. Etapas Constructivas de la Huaca de la Luna: (a) línea de tiempo (Adaptado de Tavera Vega, 2011), y (b) corte transversal de la pirámide principal (Chácara, Zvietcovich, Aguilar, et al., 2014). (c) Fachada norte de la Plataforma 1 donde se observa el estado actual de daño.....	37
Figura 3.3. (a) Nube de puntos, (b) modelo enmallado y (c) modelo texturizado de la	

Huaca de la Luna (Aguilar et al., 2015) .....	38
Figura 3.4. Localización de los ensayos geofísicos en la Huaca de la Luna (G. Zavala et al., 2014).....	39
Figura 3.5. Perfil de velocidades de onda de corte (G. Zavala et al., 2014).....	39
Figura 3.6. Resistencia en la punta – SCPTu para los 4 ensayos realizados (G. Zavala et al., 2014).....	40
Figura 3.7. Extracción de (a) bloques de adobe y (b) mortero para su caracterización mecánica y (c) prismas construidos para ensayos de compresión (Ramírez et al., 2015) .....	41
Figura 3.8. Fuentes Sísmicas en el Perú (Rubén Boroschek y Asociados Ltda., 2016). 43	43
Figura 3.9. Distribución de los terremotos ocurridos en el Perú entre los años 1513 y 1959 con intensidad mayor o igual a VIII MM (Silgado Ferro, 1978).....	44
Figura 3.10. Zonas Sísmicas en el Perú (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, 2018).....	45
Figura 4.1. Estratos de suelo bajo la Huaca de la Luna.....	48
Figura 4.2. Modelo bidimensional de la Huaca de la Luna: (a) H1, (b) H2 y (c) H3.....	50
Figura 4.3. Leyes constitutivas del adobe en (a) tracción y (b) compresión (Chácara, Zvietcovich, Briceño, et al., 2014) .....	51
Figura 4.4. Modelo bidimensional de la Huaca de la luna considerando la interacción con el suelo: (a) H1S, (b) H2S y (c) H3S.....	52
Figura 4.5. Desplazamientos (a) absolutos y (b) relativos de la parte superior de la pirámide .....	52
Figura 4.6. Distribución de esfuerzos principales de tracción (a), (b) y (c) sin considerar ISS y (d), (e) y (f) considerando ISS.....	53
Figura 4.7. Distribución de esfuerzos principales de tracción (a), (b) y (c) sin considerar ISS y (d), (e) y (f) considerando ISS.....	53
Figura 4.8. Ancho de grietas (a), (b) y (c) sin considerar ISS y (d), (e) y (f) considerando ISS.....	54
Figura 4.9. Resultados del análisis paramétrico bajo cargas de gravedad: (a) ancho máximo de grieta y (b) deformación vertical en la base .....	54
Figura 4.10. Error de línea base en un acelerograma (Hudson, 1979) .....	55
Figura 4.11. Perfil de velocidades de corte en la Fachada Norte. Área superior (a) e inferior (b) (Guillermo Zavala et al., 2015) .....	56
Figura 4.12. Comparación del espectro original y el espectro ajustado .....	57
Figura 4.13. Acelerograma original y acelerograma escalado .....	58
Figura 4.14. Principales modos identificados sin considerar ISS en el modelo H1. Frecuencias de vibración y porcentajes de masa participativa .....	59
Figura 4.15. Principales modos identificados sin considerar ISS en el modelo H2. Frecuencias de vibración y porcentajes de masa participativa .....	59
Figura 4.16. Principales modos identificados sin considerar ISS en el modelo H3. Frecuencias de vibración y porcentajes de masa participativa .....	59
Figura 4.17. Principales modos identificados considerando en el modelo H1S. Frecuencias de vibración y porcentajes de masa participativa .....	60
Figura 4.18. Principales modos identificados considerando en el modelo H2S. Frecuencias de vibración y porcentajes de masa participativa .....	60
Figura 4.19. Principales modos identificados considerando ISS en el modelo H3S. Frecuencias de vibración y porcentajes de masa participativa .....	60
Figura 4.20. Desplazamientos máximos relativos vs la altura de los distintos modelos. 61	61
Figura 4.21. Amplificación de la aceleración vs la altura de los distintos modelos.....	61

### Lista de Tablas

Tabla 2.1. Resultados obtenidos para los casos estudiados (Botero, 2002).....	23
Tabla 2.2. Propiedades de los materiales (Matinmanesh & Asheghabadi, 2011) .....	24
Tabla 2.3. Propiedades de los terremotos (Matinmanesh & Asheghabadi, 2011).....	24
Tabla 2.4. Propiedades del suelo consideradas en el estudio (Krishnamoorthy & Anita, 2016).....	29
Tabla 2.5. Lista de sismos considerados en el estudio (Krishnamoorthy & Anita, 2016)...	29
Tabla 2.6. Sismos de entrada para el análisis del sistema suelo-estructura (Bolisetti et al., 2018).....	32
Tabla 3.1. Propiedades mecánicas de los estratos de suelo (Aguilar et al., 2015).....	41
Tabla 3.2. Propiedades mecánicas lineales del adobe de la Huaca (Aguilar et al., 2015)	42
Tabla 3.3. Propiedades mecánicas no lineales del adobe de la Huaca (Aguilar et al., 2015).....	42
Tabla 4.1. Parámetros utilizados para obtener el espectro de la norma.....	57





## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## **1.1. Justificación**

El problema de evaluación estructural de construcciones históricas de tierra es de gran importancia debido al valor turístico y cultural que poseen. Este problema es, además, altamente complejo debido al poco conocimiento que se tiene sobre los procesos constructivos y las propiedades mecánicas y geométricas que caracterizan a dichas estructuras. Debido a que el Perú se encuentra en una zona altamente sísmica, la conservación de las estructuras patrimoniales y la determinación de su seguridad estructural es un problema importante al considerar el riesgo al que están expuestas.

La determinación de los esfuerzos, deformaciones y los patrones de agrietamiento producidos debido al peso propio, permitirá identificar las zonas vulnerables y con posibles daños dentro de la estructura. Además, el estudio del efecto de amplificación sísmica, afectado por la interacción suelo-estructura, permitirá tener un mejor entendimiento de lo que ocurre en estructuras de tierra al recibir una aceleración en su base. De esta manera, se logrará una más adecuada estimación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras patrimoniales hechas de tierra, en particular de una de las construcciones históricas más importantes del país: la Huaca de la Luna. Conseguir dicho objetivo permitirá un mejor diagnóstico del estado de daño actual y posterior propuesta de intervención que contribuya a su preservación.

## **1.2. Hipótesis**

El estado de daño bajo cargas de gravedad, así como el efecto de amplificación sísmica en construcciones masivas de tierra puede estimarse mediante la combinación de modelos numéricos en elementos finitos, análisis estático no lineal y análisis lineal tiempo-historia.

## **1.3. Objetivos**

El objetivo general del presente trabajo es la evaluación estructural de una estructura patrimonial mediante el método de elementos finitos, y aportar en el entendimiento del efecto de amplificación sísmica en construcciones masivas de tierra a partir del análisis de su respuesta frente a un registro de aceleraciones.

Para lograr este objetivo, se realizarán los siguientes objetivos específicos:

- Recopilar la información existente a partir de estudios previos de las características de la estructura y materiales que conforman la Huaca de la Luna, así como del suelo sobre el cual está construido y la sismicidad histórica de la zona.
- Recopilar información sobre la realización de análisis estático no lineal usando el método de elementos finitos.
- Recopilar información de estudios previos sobre análisis lineal tiempo historia considerando la interacción del suelo y la estructura para la determinación de la amplificación sísmica.

- Implementar modelos numéricos del suelo y la estructura de la sección frontal y de una sección intermedia de la Pirámide Principal (Plataforma I) de la Huaca de la Luna.
- Determinar cuantitativamente la respuesta estructural de la Huaca de la Luna a través de un análisis paramétrico considerando geometría y condiciones geotécnicas para diferentes secciones en su estado original y en su estado actual.
- Realizar un análisis de los resultados y un diagnóstico preliminar del estado de daño en la estructura del caso de estudio.

#### 1.4. Metodología

Para conseguir los objetivos específicos se realizarán las siguientes actividades y tareas.

- Documentación de las técnicas utilizadas para el análisis estático no lineal bajo cargas de gravedad utilizando el método de elementos finitos.
  - Recopilar las consideraciones que se tienen al momento de realizar el modelamiento y análisis estructural estático no lineal.
- Documentación de las técnicas utilizadas para el análisis numérico de la amplificación sísmica empleando un análisis sísmico tiempo-historia.
  - Realizar una lectura y resumen de artículos científicos en los que se realiza el modelamiento y análisis numérico de un suelo para ser sometido a una historia de aceleraciones.
  - Realizar una lectura y resumen de artículos científicos en los que se realiza el modelamiento y análisis numérico de un suelo y una estructura cimentada sobre este para someter al conjunto a una historia de aceleraciones.
  - Clasificar los distintos tipos de análisis y consideraciones que se tienen al momento de realizar el modelamiento, identificando sus ventajas y desventajas.
- Documentación de la información existente de las propiedades y características de la Huaca de la Luna obtenida en estudios previos, así como de los procesos constructivos de la época.
  - Realizar una lectura y resumen de artículos científicos en los que se expongan los resultados de una investigación de la arquitectura y materiales de la Huaca de la Luna.
  - Organizar las propiedades mecánicas y geométricas de la Huaca y los materiales que la constituyen.
- Documentación de la información existente de las propiedades del suelo de la zona de estudio.
  - Realizar una lectura y resumen de artículos científicos en los que se expongan los resultados de investigaciones de campo en el suelo de la zona de estudio.
  - Organizar las propiedades geotécnicas del suelo sobre el que se encuentra cimentada la Huaca de la Luna.
- Documentación de la sismicidad histórica de la zona.

- Realizar una investigación sobre los movimientos sísmicos registrados en la zona de estudio y sus características.
  - Recopilar los acelerogramas existentes que registren sismos en zonas cercanas a la estudiada.
- Realización del modelamiento numérico bidimensional de la sección frontal y de una sección intermedia de la Pirámide Principal de la Huaca de la Luna en su estado original y actual, considerando su interacción con el suelo.
  - Estudiar las posibilidades que brinda el software de elementos finitos DIANA y su aplicación en el tipo de problema afrontado.
  - Estudiar los criterios de discretización (meshing) de elementos bidimensionales sometidos a movimientos sísmicos.
  - Aprender a modelar suelos y estructuras bidimensionales mediante ejemplos aplicativos, y a realizar un análisis no lineal estático y lineal tiempo historia en dichos modelos.
  - Realizar el modelamiento del suelo de la zona, seleccionando sus propiedades adecuadamente, así como las condiciones de borde apropiadas.
  - Realizar el modelamiento de las secciones a estudiar en su estado original y actual sobre el modelo del suelo de la zona.
- Realización del análisis paramétrico de la respuesta estructural de la construcción mediante análisis no lineal bajo cargas de gravedad y análisis lineal tiempo-historia.
  - Comparación de la respuesta estructural al considerar la interacción con el suelo.
  - Comparación de la respuesta estructural al variar las características geométricas de la estructura considerando su estado original, su estado actual y una sección intermedia.
  - Diagnóstico preliminar del estado de daño actual de la estructura.
  - Evaluación preliminar del efecto de amplificación sísmica en la estructura.

## CAPÍTULO 2. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DEL Y MARCO TEÓRICO

### **Resumen:**

En este capítulo se resumen los métodos para la evaluación estructural de construcciones históricas. Se detalla el método de elementos finitos para el análisis estático no lineal y dinámico lineal en el dominio del tiempo, así como las consideraciones para la evaluación del efecto de amplificación sísmica y el efecto de la interacción suelo-estructura. Finalmente, se recopilan diferentes casos de estudio donde se emplea el modelamiento numérico para el análisis estático y dinámico de estructuras en interacción con el suelo.

## **2.1. Introducción**

La evaluación estructural de construcciones históricas es un problema de alta complejidad, debido a la gran incertidumbre que existe al determinar las propiedades mecánicas y a la poca información de los procesos constructivos de la época. Las consideraciones tomadas para evaluar edificaciones ya construidas son tomadas en cuenta por diferentes códigos en el mundo, algunos de las cuales se mencionarán en este capítulo y se comentará cómo pueden ser aplicados en construcciones patrimoniales.

En el caso de estudio del presente trabajo se realizará un análisis numérico en elementos finitos, por lo que se hará una introducción a dicho método. Se estudiarán las consideraciones al realizar un análisis no lineal bajo cargas de gravedad, mediante un análisis de carga incremental. Finalmente, Se estudiarán los diversos factores que afectan la amplificación sísmica, como el contenido de frecuencias del sismo y los períodos naturales de vibración del suelo y de la estructura.

## **2.2. Marco Teórico**

### **2.2.1. Análisis de Construcciones Existentes y Patrimoniales en el Mundo**

Para poder determinar la seguridad estructural de una construcción patrimonial, es conveniente primero conocer las consideraciones que se toman en cuenta en diferentes reglamentos. Las normativas existentes para la evaluación estructural de construcciones existentes, buscan estandarizar el proceso de determinación del nivel de seguridad de una construcción, usualmente en caso de sismos. Se debe tomar en cuenta que muchas de estas edificaciones fueron construidas en épocas donde los reglamentos eran diferentes o no existían, por lo que se utilizaron diferentes materiales y criterios de diseño.

En Estados Unidos, los primeros códigos para la evaluación de estructuras existentes fueron creados por el Applied Technology Council (ATC-14 y ATC-22). Se basaron en asegurar un nivel de rendimiento de resguardo de la vida en un terremoto con probabilidad de excedencia de 10% en 50 años (Applied Technology Council, 1980, 1989). Tomando como base este primer código, el Federal Emergency Management Agency publicó el FEMA 310, que se basa en un terremoto con probabilidad de excedencia de 2% en 50 años. Este documento introduce el concepto de nivel de desempeño debido a la importancia de la construcción, considerando el de ocupación inmediata (Federal Emergency Management Agency, 1998). Años después, la American Society of Civil Engineers publicó el manual ASCE 31, el cual es una metodología para la evaluación estructural de edificaciones existentes, no necesariamente patrimoniales, frente a acciones sísmicas. Se basa en el nivel de desempeño y analiza progresivamente y con complejidad creciente las posibles deficiencias que presentan los sistemas estructurales. Esto se logra mediante tres fases diferenciadas: inspección, evaluación y evaluación detallada (ASCE 31-03, 2003).

Por otra parte, el Eurocódigo emitió en 1998 su propia normativa para la evaluación e intervención de estructuras existentes. Esta se basa en obtener un determinado

nivel de daño para un sismo de cierta intensidad. Es decir, busca asegurar que para un sismo frecuente la estructura reciba poco daño ( $T_r=225$  años), para un sismo raro ( $T_r=475$  años) la estructura reciba daño significativo, y para un sismo muy raro ( $T_r=2475$ ) la estructura se encuentre en un estado cercano al colapso, pero aún en pie (Eurocode, 1998).

En cuanto a construcciones históricas, para la realización del análisis y conservación del patrimonio arquitectónico, (ICOMOS, 2003) propone una serie de principios y directrices que buscan dar recomendaciones que garanticen la aplicación de procedimientos que afecten en la menor medida como sea posible al valor histórico y cultural de dichas estructuras.

Actualmente, al realizarse la evaluación estructural de una construcción histórica en distintas partes del mundo, el proceso de estudio inicia con la recolección de información preliminar, seguido de una campaña experimental in-situ y en laboratorio en la cual se realizan diferentes ensayos que pueden ser clasificados, según su nivel de intrusividad (Eslami et al., 2012), en: no destructivos (por ejemplo: ensayos con radar, ensayos sísmicos, termografía, monitoreo dinámico, etc.), medianamente destructivos (por ejemplo: extracción de muestras, ensayo Flat-Jack, ensayos con penetrómetro, boroscopia, etc.), y destructivos (por ejemplo: ensayo de corte in-situ) (Bosiljkov et al., 2010), esto con el fin de determinar las propiedades geométricas, mecánicas y físicas de la estructura en estudio, así como su estado actual de conservación. Finalmente, se realiza un análisis numérico utilizando los datos y parámetros obtenidos de las fases previas, y calibrando los modelos numéricos con los resultados de los estudios in situ (Ascione et al., 2015). Se analiza la seguridad estructural de la edificación frente a sollicitaciones sísmicas y se interpretan los resultados, verificando su validez y coherencia, para poder realizar las conclusiones del estudio.

### **2.2.2. Método de los Elementos Finitos**

El método de los elementos finitos fue desarrollado para afrontar problemas que involucren la determinación de la distribución de esfuerzos y deformaciones en sistemas en los que su nivel de complejidad haga imposible su desarrollo mediante métodos clásicos. Con la aparición de las computadoras a principios de la década de 1950, los métodos de análisis estructural que involucran la resolución de un gran número de ecuaciones mediante rutinas repetitivas y programables ganaron popularidad (McGuire, Gallagher & Ziemann, 2000).

La idea básica del método es la de dividir una estructura en *elementos finitos*, conectados entre sí mediante *nodos*. El proceso de división o discretización de la estructura es denominado enmallado (meshing) (Fish & Ted Belytschko, 2007) y se muestra un ejemplo en la Figura 2.1. En los elementos generados se plantean y resuelven ecuaciones de equilibrio y compatibilidad de manera sistemática.

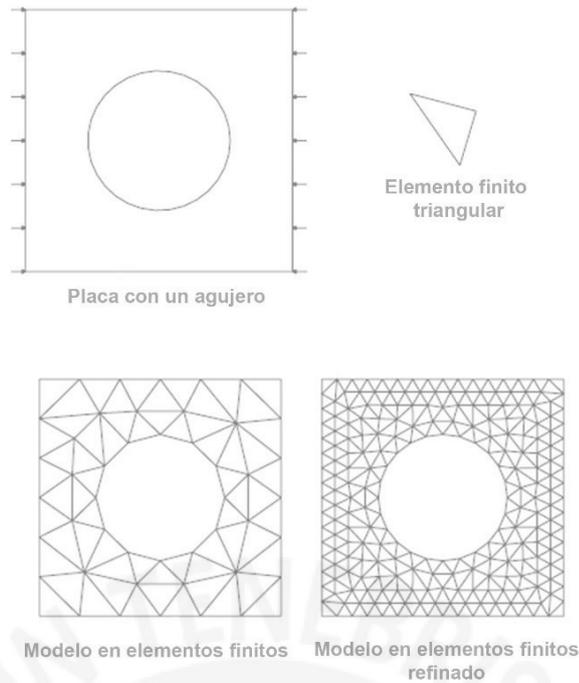


Figura 2.1. Ejemplo de modelo y enmallado (Fish & Ted Belytschko, 2007)

Para una estructura continua, la solución por elementos finitos no es exacta. Entre los elementos se pueden producir discontinuidades entre los bordes, debido a que la unión entre los elementos se produce en los nodos y es en estos donde las ecuaciones aseguran la compatibilidad de desplazamientos. De la misma manera, las fuerzas que soporta el sistema son traducidas en fuerzas equivalentes en los nodos, y es en estos donde se desarrollan las ecuaciones de equilibrio.

Al utilizar una malla más fina y elementos más pequeños, la diferencia entre los desplazamientos de los bordes de los elementos se ve reducida y el error en la solución es más pequeño. Sin embargo, utilizar elementos más pequeños involucra una mayor cantidad de operaciones matemáticas para la resolución de la estructura, lo que conlleva a un mayor tiempo de cálculo. Debido a que el número de elementos en los que se divide la estructura es finito, las condiciones de equilibrio y compatibilidad únicamente se cumplen en puntos discretos de la estructura. Otra manera de reducir el error es refinando las hipótesis utilizadas en el comportamiento de los elementos. Este tipo de elementos con formulaciones más complejas son denominados elementos de orden superior (Gallagher, 1975).

En cuanto al análisis bidimensional es importante diferenciar dos tipos de elementos: los de esfuerzo plano, y los de deformación plana. Los primeros, únicamente consideran un estado de esfuerzos plano en sus elementos, lo que se traduce en una deformación existente en la tercera dimensión, debido al efecto Poisson. Los últimos restringen las deformaciones en la tercera dimensión, creando un esfuerzo de confinamiento en esta (Burkardt, 2011; DIANA FEA, 2013a).

Podemos diferenciar dos tipos de elementos finitos comúnmente usados en el análisis de esfuerzos planos y de deformaciones planas: los elementos triangulares y los elementos rectangulares. Los elementos triangulares pueden representarse bajo la hipótesis de desplazamientos lineales, cuadráticos y cúbicos. Cada uno de estos elementos poseen matrices de rigidez diferentes y con complejidad incremental. El elemento más básico es el triángulo con grados de libertad únicamente en sus vértices, bajo la hipótesis de deformaciones constantes. Es simple y versátil, pues se

puede representar casi cualquier geometría con estos elementos. El uso de elementos triangulares se observa en la Figura 2.2., donde se muestra cómo se pueden aproximar elementos con bordes curvos mediante este tipo de elementos.

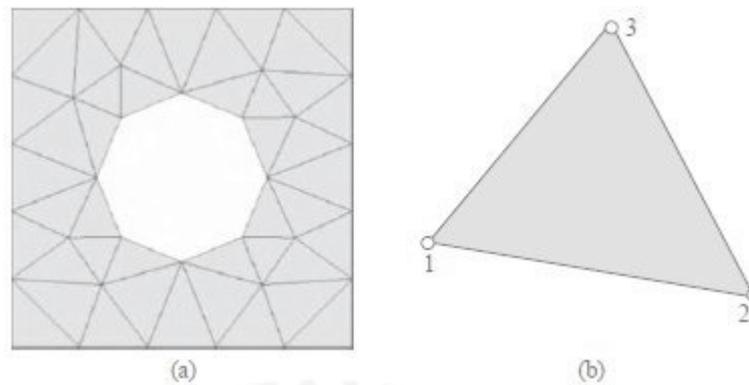


Figura 2.2. (a) Aproximación de un borde curvo usando elementos triangulares y (b) elemento finito triangular de 3 nodos (Fish & Ted Belytschko, 2007)

El siguiente elemento en complejidad es el triángulo de seis nodos, cuya formulación está basada en polinomios cuadráticos. Este elemento produce esfuerzos y deformaciones lineales y un estado de esfuerzos continuo en el elemento.

El que sigue en cuanto a complejidad es el triángulo basado en desplazamientos cúbicos, conformado por 10 nodos. Este tipo de elemento tiene un uso difundido en triángulos sometidos a flexión (Vásquez & López, 2001). Los elementos triangulares son populares debido a la simplicidad de su formulación y a su utilidad en la descripción de la geometría de estructuras complejas. Debido a la inconsistencia de los resultados al usar diferentes tipos de elementos, es conveniente utilizar una malla fina de elementos simples o utilizar elementos más complejos (Fish & Ted Belytschko, 2007).

Los elementos rectangulares son más complejos. Incluso en el caso más simple, de un elemento rectangular con nodos en sus vértices, diferentes matrices de rigidez pueden ser formuladas. La figura 2.3. muestra un elemento rectangular de 4 nodos, y la enumeración de sus coordenadas (Gallagher, 1975).

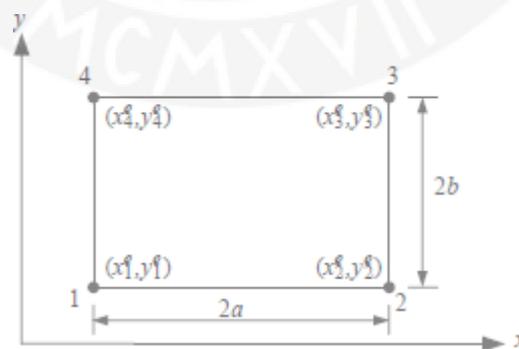


Figura 2.3. Elemento rectangular de 4 nodos (DIANA FEA, 2013a)

El análisis con elementos tridimensionales posee un nivel mayor de complejidad debido al mayor número de incógnitas y funciones de desplazamiento que se ven involucradas, lo que se traduce en un mayor tiempo de ejecución del análisis. El elemento más simple y comúnmente usado es el tetraédrico debido a su versatilidad y simplicidad en su formulación, y se muestra en la Figura 2.4. Al igual que con los elementos bidimensionales, se obtiene un mayor nivel de precisión al incluir nodos intermedios en las aristas, dando lugar a elementos de segundo orden (Fish & Ted Belytschko, 2007).

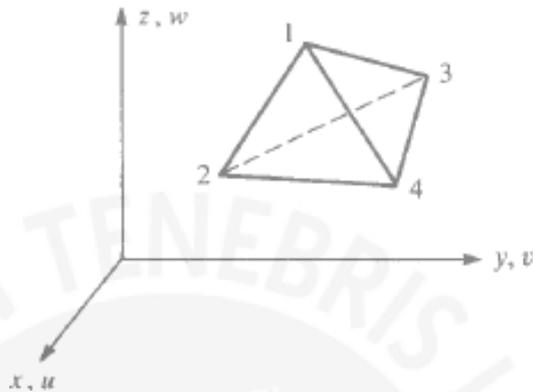


Figura 2.4. Elemento tetraédrico de 4 nodos (DIANA FEA, 2013a)

### 2.3. Análisis estático no lineal

En primer lugar, es importante definir dos tipos de no linealidad: geométrica y del material. La no linealidad geométrica ocurre cuando las deformaciones son muy grandes y ya no es válida la hipótesis de desplazamientos pequeños, por lo que es necesario resolver la estructura con una nueva configuración deformada en cada paso de aplicación de la carga. Un caso familiar de este tipo de no linealidad es el pandeo de columnas, donde las deformaciones laterales hacen que el momento flector se incremente y, por lo tanto, lo hagan también las deformaciones. La no linealidad del material es cuando la estructura analizada experimenta deformaciones que superan el límite elástico, por lo que la ley de Hooke deja de cumplirse, al cambiar el módulo de elasticidad (McGuire et al., 2000).

Para analizar estructuras con comportamiento no lineal mediante un método numérico se utilizan procedimientos incrementales en los que esta se resuelve varias veces, dividiendo la aplicación de la carga o desplazamiento en pasos. Cada paso genera un conjunto de ecuaciones que se resuelven utilizando algoritmos de aproximación numérica iterativa a las soluciones como el de Newton-Raphson (DIANA FEA, 2013a). De esta manera, para resolver la estructura se puede incrementar la carga, los desplazamientos o la energía interna de la estructura. En cada aplicación de carga, se resuelve la estructura por métodos iterativos, obteniendo los desplazamientos y determinando si se han producido incursiones en el rango inelástico en alguna parte, como la formación de rótulas plásticas o agrietamientos. Al aplicar el siguiente paso, se considera la rigidez de la estructura afectada por los daños que ha experimentado. Esto se repite hasta el colapso o hasta llegar a una deformación o nivel de carga esperado (Guevara Morales, Osorio Rodríguez & Vargas, 2006). Para analizar una estructura sometida a cargas de peso propio, se incrementa el valor de la aceleración de la gravedad hasta llegar a 1g.

## 2.4. Amplificación Sísmica

La amplificación sísmica es el incremento en la amplitud de las ondas sísmicas debido a su paso por diferentes medios. Las ondas sísmicas se producen en el interior de la litósfera y viajan hasta la superficie a través del suelo. Luego, se produce una amplificación de las ondas recibidas en la base al viajar a través de la estructura.

Las estructuras pueden ser modeladas como sistemas mecánicos que poseen masa, rigidez y amortiguamiento. Este es producido por la fricción interna, efectos térmicos, interacción con el entorno, entre otros (Muñoz, 2015).

En el caso de estructuras de un grado de libertad, como la que se muestra en la Figura 2.5., al estar sometida a una fuerza dinámica externa  $p(t)$  en la dirección de este, la ecuación que gobierna el movimiento del sistema es la siguiente:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = p(t) \quad \text{Ecuación 2.1.}$$

Donde  $m$  es la masa de la estructura,  $c$  es el coeficiente de amortiguamiento viscoso y  $k$  es la rigidez de la estructura.



Figura 2.5. Estructura de un grado de libertad

Los sismos son movimientos en la corteza terrestre, que ocasionan aceleraciones en las estructuras que se traducen en fuerzas de inercia desde el enfoque del equilibrio dinámico. Cuando la estructura recibe una aceleración en la base, dicha aceleración puede ser reemplazada por una fuerza sísmica efectiva que produce los mismos desplazamientos relativos al suelo:

$$p_{eff}(t) = -m\ddot{x}_g \quad \text{Ecuación 2.2.}$$

Esta fuerza es igual a la masa por la aceleración en la base de la estructura (Chopra, 2007).

La respuesta de la estructura sometida a una fuerza armónica externa  $p(t)=P_0\text{sen}(\omega t)$  tiene por solución de su ecuación diferencial del movimiento a la siguiente expresión:

$$x(t) = e^{-\xi\omega t}[A\text{sen}(\omega_D t) + B\text{cos}(\omega_D t)] + \frac{1}{[(1-\beta^2)^2+(2\xi\beta)^2]} \frac{P_0}{k} [(1-\beta^2)\text{sen}(\omega t) - 2\xi\beta\text{cos}(\omega t)] \quad \text{Ecuación 2.3.}$$

Donde  $\beta$  es la relación entre la frecuencia de la fuerza externa y la frecuencia natural del sistema,  $\xi$  es la relación entre el amortiguamiento del sistema y su amortiguamiento crítico conocida como ratio de amortiguamiento y  $\omega_D$  es igual a  $\omega\sqrt{1-\xi^2}$ . Usualmente el ratio de amortiguamiento de una estructura como la de un edificio posee valores pequeños, entre 2 y 15 por ciento, mientras que para un suelo pueden oscilar entre 10 y 20 por ciento (Botero, 2002). El primer término de la ecuación es transitorio y se va disipando debido al amortiguamiento y el segundo término es la componente estacionaria y su amplitud no disminuye con el tiempo. La parte estacionaria es la de mayor interés debido a que la parte transitoria rápidamente tiene a cero y puede expresarse como:

$$x(t) = \delta_{est} D \text{sen}(\omega t - \varphi) \quad \text{Ecuación 2.4.}$$

Donde  $\delta_{est}$  es el desplazamiento que tendría la estructura si se aplicara la carga de manera estática, por lo que el factor D puede ser entendido como un factor de amplificación dinámica. Este factor, en función de  $\beta$  es graficado en la Figura 2.6. para distintos valores de amortiguamiento.

$$D = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2+(2\xi\beta)^2}} \quad \text{Ecuación 2.5.}$$

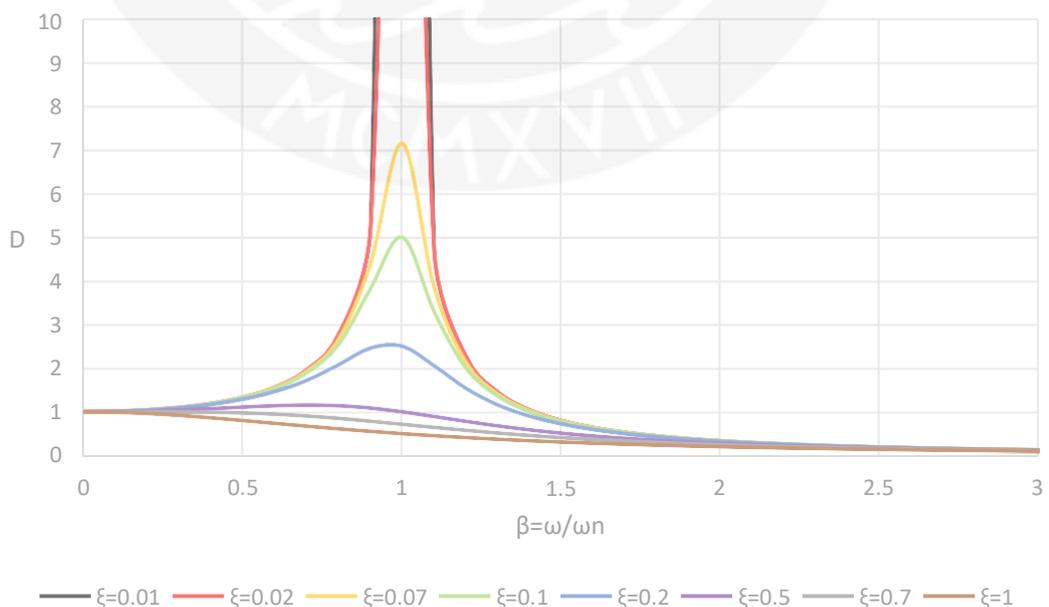


Figura 2.6. Factor de Amplificación dinámica para carga armónica

Se puede observar que en este caso la amplificación máxima del desplazamiento se da cuando la frecuencia de la carga aplicada, o de la aceleración en la base se aproxima a la frecuencia natural del sistema. Este fenómeno es denominado resonancia y las frecuencias angulares resonantes con sus correspondientes amplificaciones máximas para el desplazamiento, velocidad y aceleración son las siguientes (Chopra, 2007):

$$\text{Frecuencia resonante de desplazamiento: } \omega_n \sqrt{1 - 2\xi^2}; \quad D_{max} = \frac{1}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}}$$

Ecuación 2.6.a

$$\text{Frecuencia resonante de velocidad: } \omega_n; \quad Dv_{max} = \frac{1}{2\xi}$$

Ecuación 2.6.b

$$\text{Frecuencia resonante de aceleración: } \frac{\omega_n}{\sqrt{1-2\xi^2}}; \quad Da_{max} = \frac{1}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}}$$

Ecuación 2.6.c

Estos resultados pueden ser extendidos a sistemas de varios grados de libertad. Dichos sistemas tienen varias frecuencias naturales asociadas a sus diferentes modos de vibración (Chopra, 2005). Cada dirección de análisis en una estructura de varios grados de libertad puede tener frecuencias de vibración que se ven excitadas en diferentes medidas por el movimiento del suelo o la carga aplicada cuando la frecuencia de la excitación se aproxima a la del modo de vibración.

Para el caso de una señal sísmica, el problema no puede ser resuelto de manera analítica debido a que la historia de aceleraciones en la base es demasiado compleja para ser representada como una función. Estas señales poseen un gran número de frecuencias que dependen de la zona, la forma de falla y la geología del lugar. El problema debe ser resuelto utilizando métodos numéricos.

Los resultados experimentales y numéricos muestran que las estructuras sometidas a movimientos del terreno con un intervalo amplio de frecuencias tienden a vibrar con una frecuencia similar a la natural de la estructura. Esto se debe a que el sistema responde amplificando las frecuencias cercanas a su frecuencia fundamental. Sin embargo, algunas señales poseen pocos armónicos predominantes, lo que ocasiona que la estructura no pueda amplificar las frecuencias cercanas a su frecuencia natural y únicamente amplifique las frecuencias contenidas en la señal. Por estas razones, podemos concluir que la amplificación producida en la estructura se ve afectada por el contenido de frecuencias de la señal sísmica (Chopra, 2007; Muñoz, 2015).

En la norma E.030 de diseño sismorresistente (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2016) se considera la aceleración producida en el emplazamiento a través del factor Z. Este factor depende de la ubicación de la estructura a analizar y cuantifica la aceleración máxima esperada para la cual se debe diseñar. La amplificación producida por el suelo es considerada a través del factor S. Los suelos son clasificados a partir de sus propiedades mecánicas, espesor del estrato, período fundamental de vibración y la velocidad de propagación de ondas de corte. La norma no considera amplificación para suelos muy rígidos en los que las ondas se propagan de manera similar a como ocurre en una roca. Conforme aumenta la flexibilidad y el período fundamental del suelo, el factor incrementa a 1.2, 1.4 o más en condiciones

excepcionalmente desfavorables. Por otro lado, la amplificación producida por la estructura con respecto a la aceleración en el suelo se toma en cuenta a través del factor C. Este factor es variable y depende del período fundamental del suelo y del período de la estructura:

$$T < T_p, \quad C = 2.5 \quad \text{Ecuación 2.7.a}$$

$$T < T_p, \quad C = 2.5 \cdot \frac{T_p}{T} \quad \text{Ecuación 2.7.b}$$

$$T < T_p, \quad C = 2.5 \cdot \frac{T_p \cdot T_L}{T^2} \quad \text{Ecuación 2.7.c}$$

Donde  $T$  es el período de la estructura,  $T_p$  es el período que define la plataforma del factor C y  $T_L$  es el período que define el inicio de la zona del factor C con desplazamiento constante.  $T_p$  y  $T_L$  dependen del tipo de suelo.

## 2.5. Análisis Numérico de Suelos Sometidos a Movimientos Sísmicos

Cuando se produce la liberación de energía en las placas tectónicas, las ondas sísmicas se generan en un punto de la corteza terrestre denominado foco o hipocentro e irradian en todas las direcciones y llegan a la superficie luego de atravesar los estratos de suelo (Muñoz, 2015).

La señal producida en el foco se ve modificada al llegar a la superficie debido a su paso por el suelo. Cada tipo de suelo responde de manera distinta al estar sometido a aceleraciones, por tener distintas frecuencias naturales de vibración. Los registros muestran que los suelos blandos amplifican el movimiento con respecto al suelo firme o rocoso, como se muestra en la Figura 2.7. (Astwood Rojas, 2013). Las medidas fueron tomadas por acelerogramas ubicados en Urasayo, Japón. Además de la amplitud del movimiento, las frecuencias altas contenidas en una señal sísmica se ven atenuadas más rápidamente que las frecuencias bajas, por lo que el paso por el suelo también puede variar el contenido de frecuencias experimentado en las estructuras ubicadas en la superficie (Muñoz, 2015).

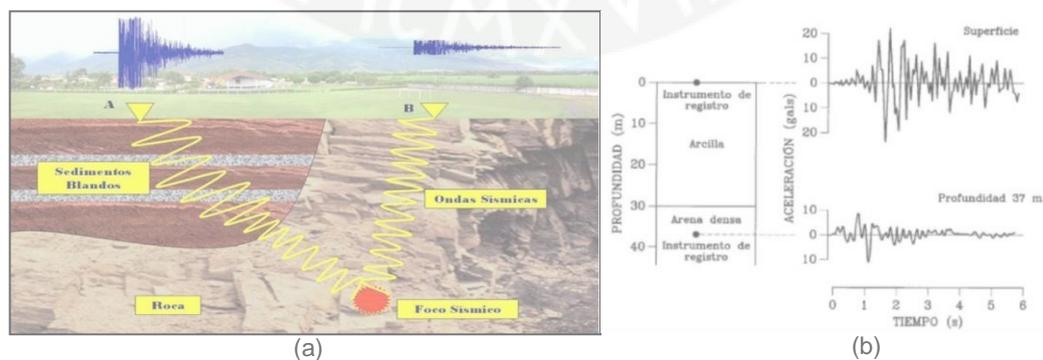


Figura 2.7. Variación de la señal sísmica al pasar por (a) diferentes estratos de suelo y (b) por suelo blando (Astwood Rojas, 2013)

El comportamiento del suelo al someterse a cargas dinámicas presenta gran complejidad debido a que las relaciones esfuerzo deformación son no lineales y las

propiedades están afectadas por un gran número de parámetros y que presentan alta variabilidad (Colindres Selva, 1983). La respuesta dinámica del suelo, al igual que la de una estructura, depende de su masa, rigidez y amortiguamiento, sin embargo, en el caso del suelo estos parámetros poseen una mayor complejidad (Alva Hurtado, 2006). La rigidez del suelo depende del esfuerzo efectivo, la relación de vacíos, el grado de saturación, la amplitud de deformación, la frecuencia de vibración, el ángulo de reposo, la cohesión y la temperatura (Colindres Selva, 1983). El amortiguamiento del suelo también es altamente complejo, usualmente se considera como una función de la masa y la rigidez, por lo que al variar estos al incurrir en el rango inelástico, el amortiguamiento también varía. Para movimientos sísmicos de gran amplitud, la respuesta del suelo es marcadamente no lineal y se ve altamente influenciada por la degradación de la rigidez y la resistencia (Bottero et al., 1980).

Numerosos estudios han sido realizados en la amplificación de la aceleración producida por estratos de suelo. Los denominados efectos de sitio hacen referencia a la variación de la vibración en la roca madre al pasar por el suelo, y dependen de diversos factores que han sido estudiados y que pueden ser cuantificados mediante análisis numéricos en elementos finitos, como se muestra en la sección 2.5.2.

### **2.5.1. Consideraciones en el Modelamiento**

Al realizar el modelamiento de un suelo en elementos finitos, es determinante definir de manera correcta las condiciones de borde. La extensión del suelo usualmente es demasiado grande para poder ser modelada, por lo que el modelo debe representar que el suelo continúa más allá de los extremos (Wolf, 1997). Esto se puede hacer mediante la implementación de resortes y amortiguadores que simulen la condición restringida en los extremos del suelo. Otra forma de simular esta condición de una manera más simple, es utilizando una unión rígida entre ambos extremos del suelo a la misma altura (tying), haciendo que el desplazamiento lateral de cualquier punto del suelo sea el mismo en un determinado nivel (DIANA FEA & Garofano, 2016).

En cuanto a la discretización (meshing) del suelo en elementos finitos, al modelar suelos es común utilizar elementos rectangulares y triangulares. La forma y tamaño de los elementos es importante debido a que en cada nudo generado se formularán las ecuaciones de equilibrio y compatibilidad que llevarán a los resultados deseados. Se pueden utilizar elementos cuadráticos, es decir, con nodos intermedios ubicados entre las esquinas de los elementos generados con el fin de obtener cálculos más refinados. En el caso de un modelamiento bidimensional, en cada nodo generado en la discretización se consideran dos grados de libertad traslacionales en elementos sometidos a deformaciones planas (Çelebi, Göktepe & Karahan, 2012). El tipo de elementos deben cumplir con las condiciones requeridas en el caso de estudio. Debido a que la sección del suelo está restringida y confinada a ambos lados, será conveniente utilizar elementos de deformación plana que restrinjan la deformación en la dirección perpendicular al plano.

### **2.5.2. Casos de Estudio**

Di Fiore (2010) investigó el efecto producido por las irregularidades topográficas en una pendiente y la propagación de las ondas sísmicas. Se utilizó un modelo

bidimensional de un suelo en una pendiente, considerando una extensión al infinito en los lados para simular las condiciones de borde. La discretización utilizada se realizó con elementos cuadrangulares y triangulares como se muestra en la Figura 2.8.

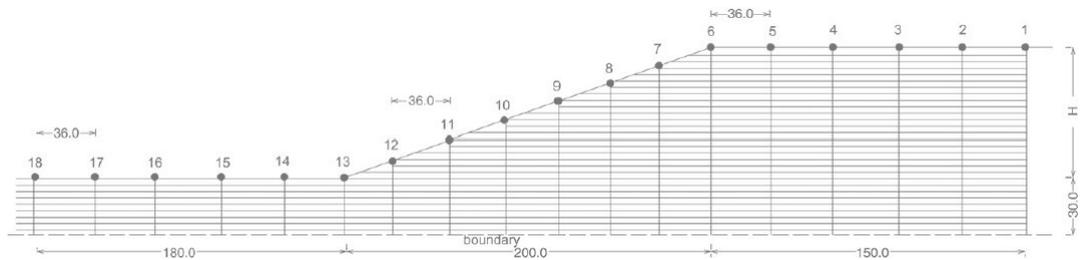


Figura 2.8. Modelo Bidimensional del suelo en una pendiente (Di Fiore, 2010)

Para el análisis tiempo-historia se generó artificialmente una señal sísmica de entrada, y se analizó la respuesta al variar la pendiente de 14 a 41°. Se concluyó de dicho estudio que el efecto de amplificación siempre es mayor en la parte superior de la pendiente. La Figura 2.9. muestra la amplificación para una pendiente de 41°. Se puede apreciar que el movimiento se ve amplificado debido a la concentración de las ondas en las esquinas. La amplificación es más significativa para pendientes entre 28 y 41°, y esta es una función lineal de la inclinación en la zona de la pendiente y muestra una relación no lineal en las zonas de la cresta y el valle. Mientras más pronunciada sea la pendiente, mayor será la amplificación experimentada.

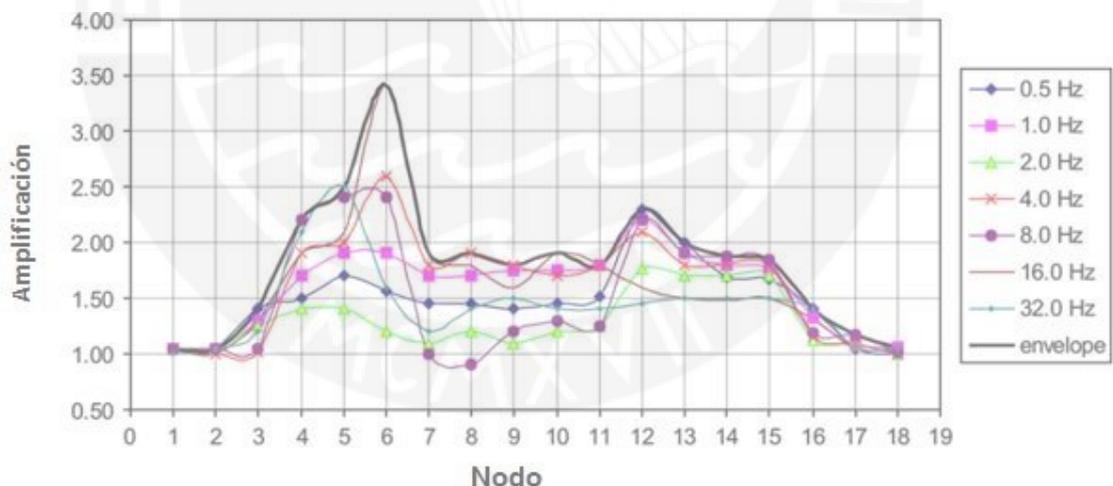


Figura 2.9. Amplificaciones producidas para una pendiente de 41° (Di Fiore, 2010)

La amplificación producida por el suelo también se ve afectada debido a las variaciones en sus propiedades, debido a que estas son difíciles de determinar y presentan un alto grado de aleatoriedad. Usualmente las características del suelo tienen una variación espacial aleatoria, así como el nivel de saturación y la ubicación de la napa freática. Al realizar un análisis determinístico se debe asumir ciertos parámetros que al no ser reales pueden llevar a subestimar el efecto de la amplificación. Por estas razones, algunos autores sugieren tomar un enfoque probabilístico del problema. En el estudio de las variaciones espaciales aleatorias de las propiedades del suelo (Wang & Haob, 2002) se simuló el movimiento producido

por un sismo de magnitud 8, a una distancia epicentral de 200 km. Se utilizaron coeficientes de variación de 20 y 60% para el módulo de corte del suelo y la razón de amortiguamiento respectivamente. Se concluyó que cuando se incluyen las variaciones de las propiedades, el espectro de amplificación cambia como se muestra en la Figura 2.10. El movimiento superficial tiene una mayor amplitud y un mayor rango de frecuencias.

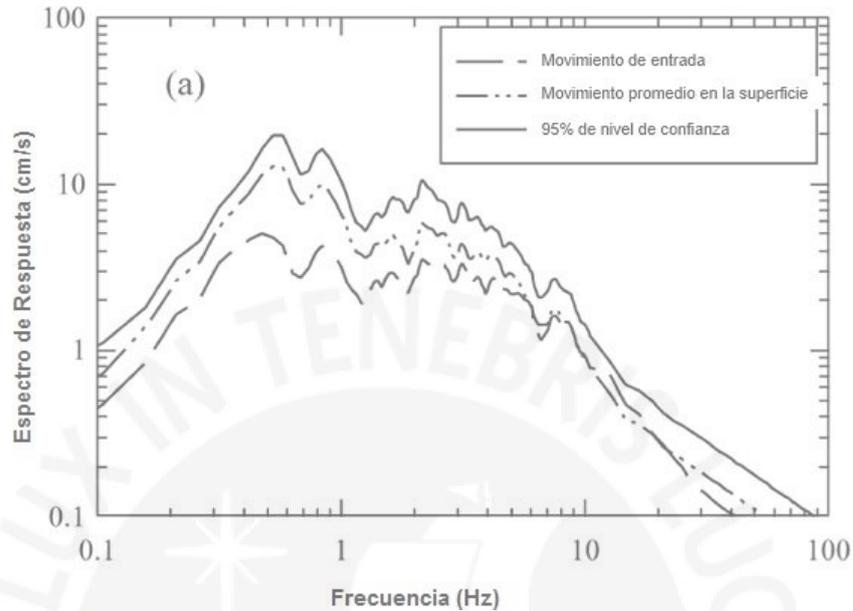


Figura 2.10. Espectro de Respuesta al considerar un enfoque probabilístico (Wang & Hao, 2002)

En el seminario técnico en línea a cargo de (DIANA FEA & Garofano, 2016), se expuso el estudio de la amplificación de ondas sísmicas en una columna de suelo formado por numerosos estratos. Para simular las condiciones de borde de la columna de suelo se crearon restricciones entre los nodos del suelo a un mismo nivel. En la base se aplicó una fuerza equivalente a la aceleración producida en la roca madre en las tres direcciones. También se incluyeron amortiguadores de fluido viscoso en la base.

Los parámetros no lineales del suelo considerados fueron tomados en cuenta a través de la degradación de la rigidez al corte al aumentar la deformación unitaria en corte ( $\gamma$ ) como se muestra en la Figura 2.11. En dicha imagen,  $\beta = G/G_0$ ,  $G$  es el módulo de corte del suelo en un instante determinado y  $G_0$  es el módulo de corte inicial del suelo para el caso de una deformación por corte igual a cero.

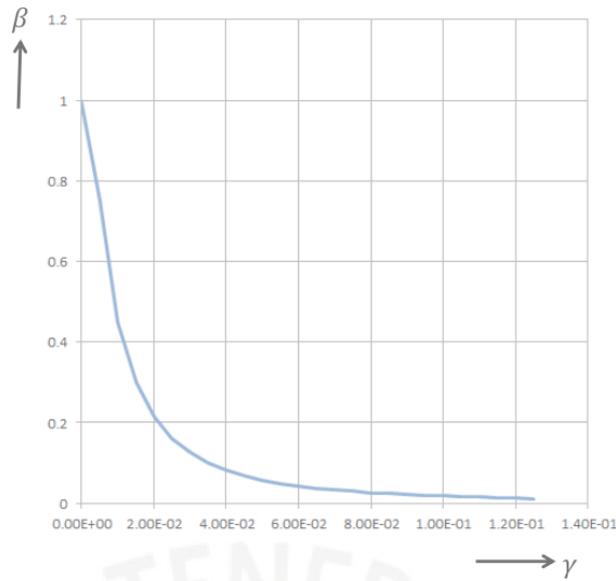


Figura 2.11. Degradación de la rigidez del suelo con la deformación (DIANA FEA & Garofano, 2016)

Luego del análisis tiempo-historia, se obtuvo comparando el espectro de respuesta de la señal de entrada y el espectro de respuesta obtenido en la parte superior de la columna de suelo, que se observan en la Figura 2.12. Se produjo una atenuación de la aceleración para períodos bajos, mientras que para períodos altos se produce una amplificación de la aceleración máxima en las direcciones X e Y. En la dirección Z ambos espectros son muy similares debido a que en este eje se mantuvieron propiedades elásticas.

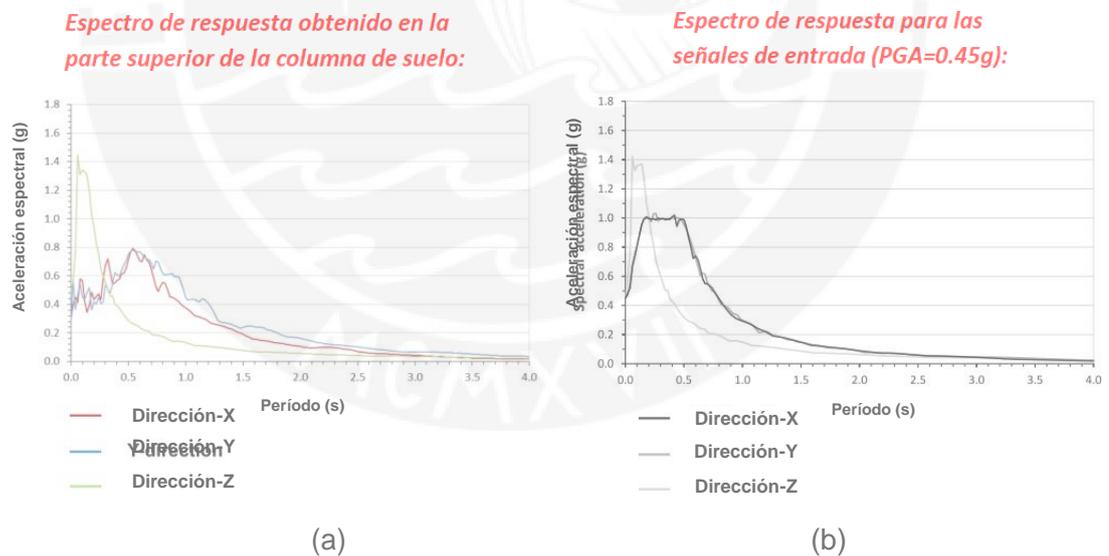


Figura 2.12. Espectros de respuesta (a) en la parte superior de la columna de suelo y (b) de la señal de entrada (DIANA FEA & Garofano, 2016)

En (Zhang, Goh & Liu, 2017) se estudió la respuesta sísmica de un suelo de arcilla blanda de caolinita, con el fin de estudiar el comportamiento de pilotes. En este estudio, se modeló el suelo de arcilla en ABAQUS utilizando elementos bidimensionales de deformación plana. El enmallado del modelo se observa en la figura 2.13. El punto A indica la posición en la que se medirá la respuesta de aceleración luego de ser amplificada por el suelo. En este modelo, las fronteras laterales fueron ubicadas lo suficientemente alejadas de la zona de estudio donde se

colocaría la estructura para evitar la reflexión de ondas sísmicas. Además, para evitar usar fronteras transmisoras, que a veces fallan en la predicción al incursionar en el rango inelástico, el artículo propone la utilización de uniones rígidas entre los nudos a la misma altura, de manera perpendicular a la dirección de movimiento de la base. Además, el artículo sugiere que, para modelar la propagación de las ondas sin comprometer la eficiencia computacional, el tamaño de los elementos finitos debe estar relacionado con la longitud de onda de la señal excitadora. Recomienda elementos de un tamaño de 5 a 10 veces la longitud de onda predominante.

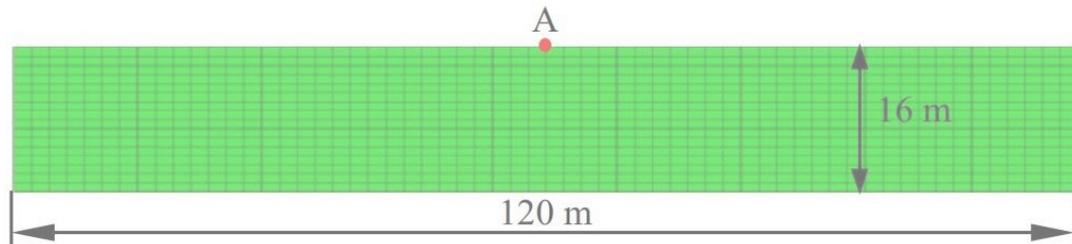


Figura 2.13. Enmallado bidimensional de un suelo de arcilla (Zhang et al., 2017).

Este modelo bidimensional fue sometido a un movimiento horizontal en la base. Se utilizó un registro completo de 800 segundos de duración y a un registro truncado de 180 segundos correspondiente a la parte de mayor intensidad del sismo. Estos registros de aceleraciones se muestran en la figura 2.14. El espectro de aceleraciones máximas del registro y de la respuesta del suelo en el punto A se muestra en la figura 2.15. Además, se compara con los resultados obtenidos de mediciones experimentales. Se observa que se obtiene una amplificación de la aceleración de más de tres veces la aceleración espectral de entrada. Además, se observa que la respuesta experimental es bastante similar a la obtenida por el método de elementos finitos. Este artículo tiene gran valor debido a que presenta consideraciones en el modelamiento que pueden ser fácilmente aplicadas al realizar el análisis dinámico de un suelo usando el método de elementos finitos.

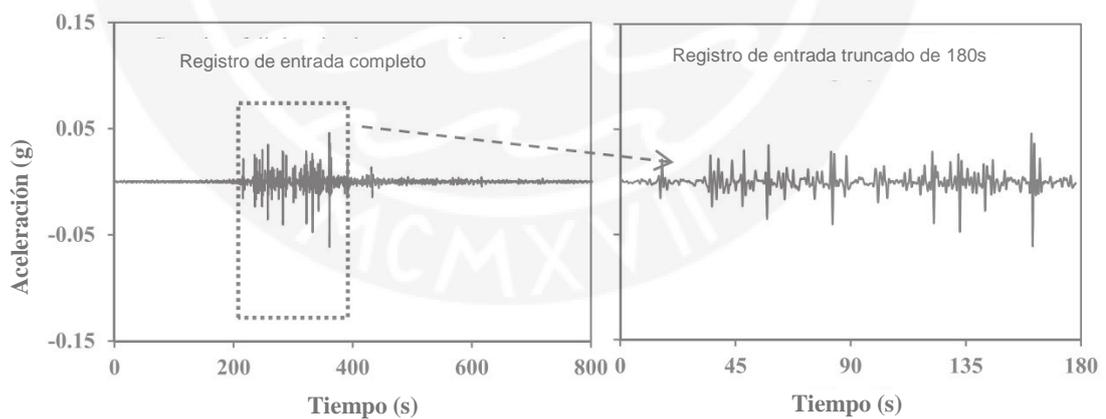


Figura 2.14. Registros de aceleraciones completo y truncado para el análisis dinámico del suelo (Zhang et al., 2017).

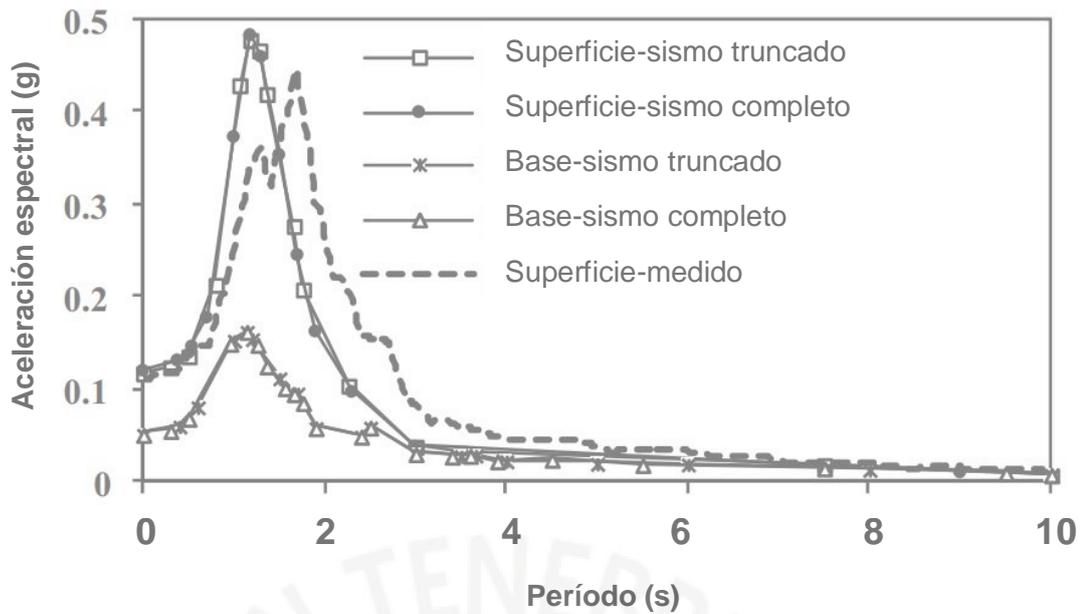


Figura 2.15. Comparación entre el espectro de respuesta de completo y truncado de la aceleración de entrada y su correspondiente respuesta superficial, medida y predicha con el método de elementos finitos (Zhang et al., 2017).

## 2.6. Análisis Numérico de un Sistema Suelo-Estructura Sometido a Movimientos Sísmicos

El efecto de la amplificación sísmica en una estructura, se ve afectado por el paso de las ondas por el suelo, la transmisión hacia la cimentación y el viaje desde esta hacia la superestructura. Las ondas sísmicas recibidas en la base de la estructura se ven amplificadas nuevamente al pasar por la esta. La amplificación producida se ve influenciada por el contenido de frecuencias de las ondas y por los períodos naturales de vibración de la estructura (Chopra, 2007).

La respuesta sísmica de muchas estructuras puede ser significativamente afectada por la deformabilidad del medio subyacente de cimentación. Las respuestas máximas, frecuencias y formas modales pueden ser bastante diferentes al considerar la interacción con el suelo (Botero, 2002). Es por esto que el análisis del fenómeno de interacción dinámica suelo-estructura se hace cada vez más importante para estructuras masivas a gran escala y sus cimentaciones, especialmente para las que están localizadas en suelos relativamente blandos y en zonas de alta sismicidad (Çelebi et al., 2012).

### 2.6.1. Consideraciones en el Modelamiento

Al realizar el modelamiento, es conveniente considerar una extensión de suelo varias veces mayor a la de la estructura para simular de la manera más precisa el viaje de las ondas sísmicas. En cuanto a la discretización, en la zona más próxima a la estructura se requiere un mayor número de elementos finitos, debido a que en esa zona la solución es más variable (Burkardt, 2011).

No es correcto modelar la estructura y el suelo de manera continua, debido a que en la realidad es posible que ocurra movimiento relativo entre la estructura con respecto al suelo. El uso de elementos continuos prohíbe dicho movimiento debido a que la compatibilidad nodal del método de elementos finitos restringe a los elementos estructurales y del suelo a moverse juntos. Estas formas de modelamiento se esquematizan en la Figura 2.16. Por estas razones, es conveniente modelar una interfaz con espesor cero que simule la interacción (DIANA FEA, 2013a).

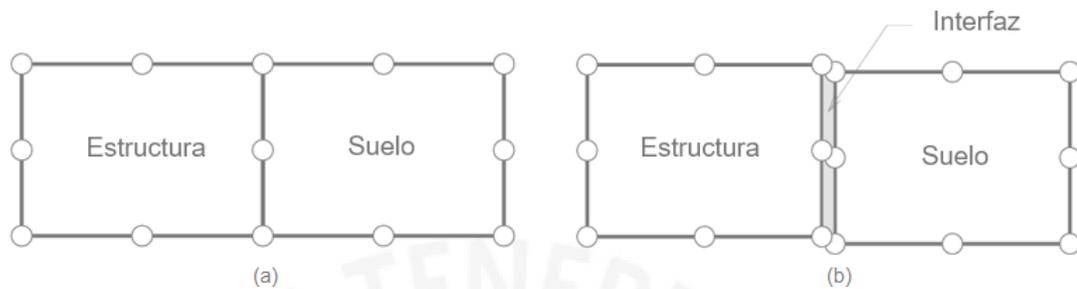


Figura 2.16. Modelamiento de la interacción: (a) como sistema continuo; (b) considerando la interfaz (DIANA FEA, 2013a)

Los valores de la rigidez de la interfaz deben ser elegidos de tal manera que las pendientes iniciales de las curvas fuerza desplazamiento sean similares a las obtenidas al modelar el sistema de manera continua. Esto se debe a que la interfaz únicamente afecta al comportamiento para el caso de cargas altas en las que se incurre en el rango plástico y se producen deslizamientos y aberturas. La rigidez al corte de la interfaz es igual a la del suelo multiplicada por un factor de reducción  $A$  que considera a la interfaz más flexible que el suelo que la rodea y dividida entre el espesor de la interfaz. Esta rigidez no debe ser innecesariamente grande para minimizar la oscilación del esfuerzo cortante y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$D_{tt} = \frac{A^2}{t} \frac{E_{suelo}}{2(1+\nu_{suelo})} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

El valor de  $A$  varía entre 0.5 y 1. En (Çelebi et al., 2012) se considera un valor de  $A$  de 0.67. Las propiedades de la fricción de Coulomb, cohesión y ángulo de fricción en la interfaz entre el suelo y la estructura se definen a continuación:

$$c = A c_{suelo} \quad \text{Ecuación 2.9.}$$

$$\tan \varphi = A \tan \varphi_{suelo} \quad \text{Ecuación 2.10.}$$

Por otro lado, la rigidez normal es igual a la rigidez al corte de la interfaz multiplicada por un factor que varía entre 10 y 100. El valor de esta rigidez debe ser alto para evitar la penetración de la estructura en el suelo, pero evitando que sea demasiado alto pues esto se traduce en un mal acondicionamiento numérico (DIANA FEA, 2013a).

Se considera, además, se considera que en la interfaz no se produce dilatación, pues esto generaría cambios volumétricos poco realistas durante el corte. Finalmente, se especifica que la interfaz no puede desarrollar esfuerzos de tracción, y cuando el esfuerzo tiende a volverse positivo se producen aberturas.

Por otra parte, para modelar la superestructura se deben utilizar elementos que sean capaces de reproducir de manera aproximada la geometría. Si la estructura estudiada se encuentra confinada lateralmente, impidiendo así su deformación transversal por el efecto Poisson, se deberán utilizar elementos planos de deformación plana, que permitan esta restricción (Fish & Ted Belytschko, 2007)

## 2.6.2. Casos de Estudio

(Botero, 2002) investigó el fenómeno de interacción suelo-estructura y comparó la respuesta sin interacción y con interacción, y considerando y sin considerar amortiguamiento. El sistema estructural idealizado se muestra en la Figura 2.17, donde se muestran los parámetros considerados en el modelamiento, como la masa, rigidez y amortiguamiento de la estructura y el suelo.

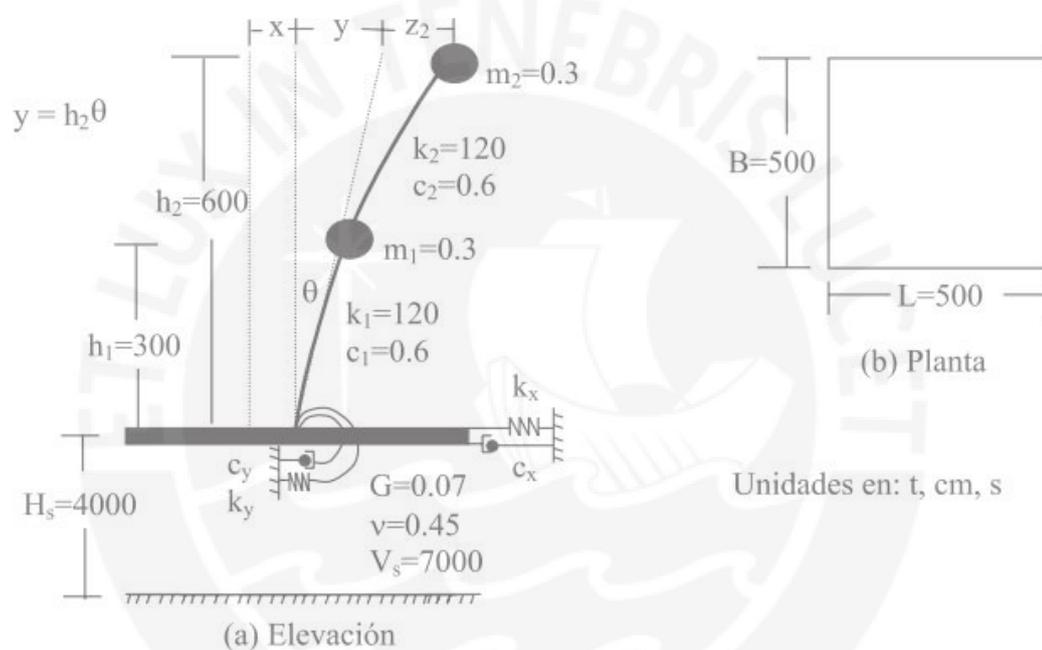


Figura 2.17. Estructura idealizada utilizada en el análisis (Botero, 2002)

Se concluyó que, al considerar la interacción con el suelo, la respuesta obtenida puede ser considerablemente distinta. Además, no siempre se presentan modos clásicos de vibración, debido a que como el suelo y la estructura tienen amortiguamientos diferentes, la matriz de amortiguamiento del sistema no es proporcional a la rigidez y la masa, obteniéndose modos con una parte imaginaria. Esta parte imaginaria positiva significa que la respuesta modal del sistema posee cierto desfase en comparación a la respuesta modal que se obtendría si no se considera amortiguamiento, a pesar de que los valores de las frecuencias en ambos casos sean similares. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 2.1:

Tabla 2.1. Resultados obtenidos para los casos estudiados (Botero, 2002)

Casos		$\omega_1$	$\omega_2$	$\phi_{21}$	$\phi_{22}$	$\xi_1$	$\xi_2$
Sin interacción	Sin amortiguamiento	12.36	32.36	0.618	-1.618	0.00	0.00
	Con amortiguamiento	12.54	33.59	0.618	-1.618	0.03	0.08
Con interacción	Sin amortiguamiento	5.8	26.81	0.615	-1.984	0.00	0.00
	Con amortiguamiento	5.99	30.99	0.651+0.168i	-1.665+1.132i	0.06	0.15

En (Matinmanesh & Asheghabadi, 2011) se investigó la aceleración de respuesta del sistema suelo-estructura y la propagación de esfuerzos en la interfaz en arena densa y suelta, considerando 3 registros de aceleraciones con diferente contenido de frecuencias.

La Figura 2.18. muestra el modelo realizado. La extensión del suelo considerada fue de 600 m de ancho y 50 m de profundidad. Encima de este suelo, se modelaron edificaciones de pórticos de concreto armado de 5 y 20 pisos. La cimentación considerada es una platea de concreto de 1 m de espesor y que se extiende 2.5 m desde los ejes de las columnas. Se puede apreciar la extensión del suelo con respecto a la de la edificación, así como el mayor número de elementos finitos en la zona debajo de la edificación.

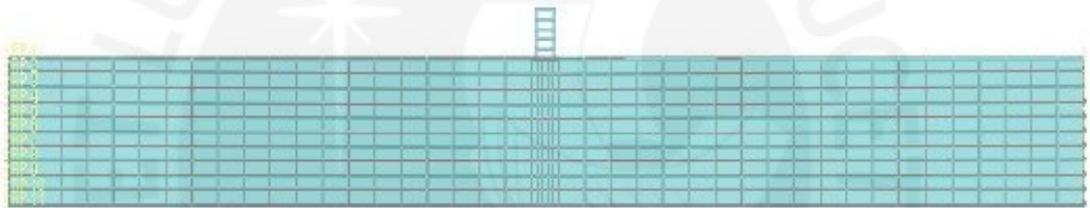


Figura 2.18. Modelamiento bidimensional del sistema suelo-estructura (Matinmanesh & Asheghabadi, 2011)

El análisis realizado fue no lineal. Los modelos constitutivos tanto para el suelo como el concreto son visco-elásticos. Se consideró un amortiguamiento de Rayleigh, es decir, una matriz de amortiguamiento que es una combinación lineal de las matrices de masa y rigidez (Adhikari & Phani, 2007). Los coeficientes utilizados fueron extraídos de un análisis de frecuencias. La formulación de la matriz de amortiguamiento en términos de los coeficientes de Rayleigh se muestra en la ecuación 2.11.

$$[C] = a[M] + b[K] \quad \text{Ecuación 2.11.}$$

La discretización se hizo a base de elementos cuadrangulares para el suelo y la cimentación de concreto y elementos lineales para las vigas y columnas. Para evitar la reflexión de las ondas debido a las fronteras laterales, estas son modeladas usando un sistema de resortes/amortiguadores que absorban las ondas sísmicas como una frontera viscosa. Para obtener el coeficiente de fricción entre las superficies se utilizó la teoría de Coulomb que se indica en la ecuación 2.12.

$$\mu = \delta \tan \phi \approx 0.6 \tan \phi \quad \text{Ecuación 2.12.}$$

Las propiedades de los materiales utilizadas en el análisis paramétrico se resumen en la tabla 2.2:

Tabla 2.2. Propiedades de los materiales (Matinmanesh & Asheghabadi, 2011)

Tipo de material	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de Elasticidad (MPa)	Ratio de amortiguamiento <i>a</i>	Ratio de amortiguamiento <i>b</i>	Módulo de Poisson	$\xi$
Arena densa	1840	100	0.566351	0.0014813	0.3	0.005
Arena suelta	1470	25	0.268412	0.00312554	0.3	0.005
Concreto (5 pisos)	2400	25000	0.38832	0.00424	0.2	0.005
Concreto (20 pisos)	2400	25000	0.11817	0.01335	0.2	0.005

Se consideraron 3 sismos con diferentes contenidos de frecuencias (altas, intermedias y altas). La clasificación se hizo en base a la relación entre la aceleración máxima y la velocidad máxima del movimiento. Las propiedades de los terremotos se muestran en la tabla 2.3 a continuación:

Tabla 2.3. Propiedades de los terremotos (Matinmanesh & Asheghabadi, 2011)

Contenido de Frecuencias	Criterio de clasificación	Localización	Fecha	Magnitud	Aceleración máxima (g)	Velocidad máxima (m/s)	<i>a/v</i>
Altas	$a/v > 1.2$	Lytle Creek	12/09/1970	5.4	0.198	0.096	2.03
Intermedias	$0.8 < a/v < 1.2$	Japón	16/11/1974	6.1	0.07	0.072	0.97
Bajas	$a/v < 0.8$	California	9/02/1971	6.4	0.101	0.193	0.52

Se obtuvo que, en el sismo de baja frecuencia, el edificio de 20 pisos tiene la mayor aceleración. Esto es debido a que un edificio alto, sobre un suelo blando tienen los períodos más largos, por lo que amplifican el contenido bajo de frecuencias. En caso contrario, la menor amplificación para dicho sismo se obtuvo en el edificio de 5 pisos sobre arena densa. El edificio de 5 pisos en arena suelta presentó una mayor aceleración en la interfaz en comparación con el edificio de 20 pisos sobre arena densa, por lo que se concluye que en este caso el tipo de suelo influye más en la amplificación que la altura de la edificación. Para el terremoto de frecuencias intermedias la mayor amplificación se dio en el edificio de 5 pisos sobre arena suelta. En el terremoto de frecuencias altas, la mayor amplificación se dio en el edificio de 5 pisos sobre arena densa.

Por otro lado, (Çelebi et al., 2012) realizó un análisis paramétrico de la amplificación sísmica considerando una edificación empotrada en la base (sin interacción con el suelo), un modelo del suelo lineal elástico y un modelo elasto-plástico del suelo (Mohr-Coulomb). Se utilizaron diferentes estados de compacidad del suelo (suelto, medio y firme), diferentes valores de la esbeltez de la estructura y tres señales de entrada (Loma Prieta, Ko-Caeli y Erzincan).

La Figura 2.19. muestra el modelo en elementos finitos del sistema suelo-estructura. En el modelamiento, se utilizaron fronteras viscosas artificiales para simular el proceso de transmisión de ondas. Se utilizaron elementos triangulares para discretización con nodos intermedios bajo un estado de deformaciones planas. Podemos observar, nuevamente, que la extensión del suelo es bastante más grande que la de la estructura, y que el enmallado realizado en la zona cercana a la edificación fue mucho más fino.

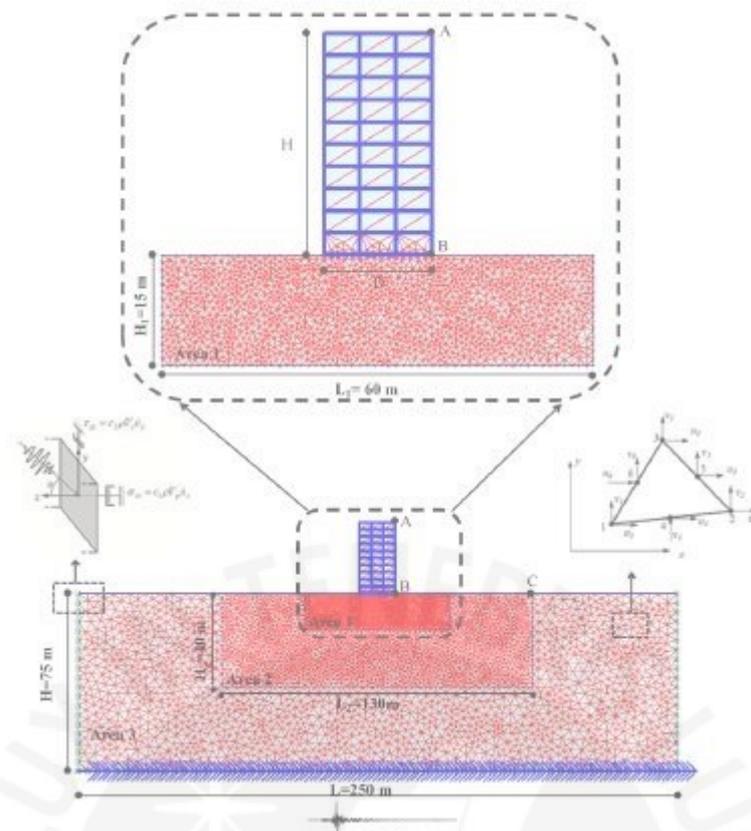


Figura 2.19. Modelo bidimensional y discretización para el sistema suelo-estructura (Çelebi et al., 2012)

Al considerar la interacción con el suelo, se obtiene un incremento de hasta 2.6 veces el desplazamiento lateral en comparación con un modelo de base empotrada. La respuesta máxima ocurre para una esbeltez intermedia de 2, lo que significa que la respuesta estructural será amplificada cuando el contenido de frecuencias del movimiento sísmico sea cercano al del sistema suelo-estructura. En el caso de un suelo firme no se observan cambios significativos.

En la Figura 2.20. se muestran los desplazamientos máximos para el caso del edificio de esbeltez igual a 2, correspondiente a una edificación de 10 pisos. Se puede apreciar cómo aumenta la amplificación al considerarse suelo suave, y disminuye al realizar un análisis no lineal.

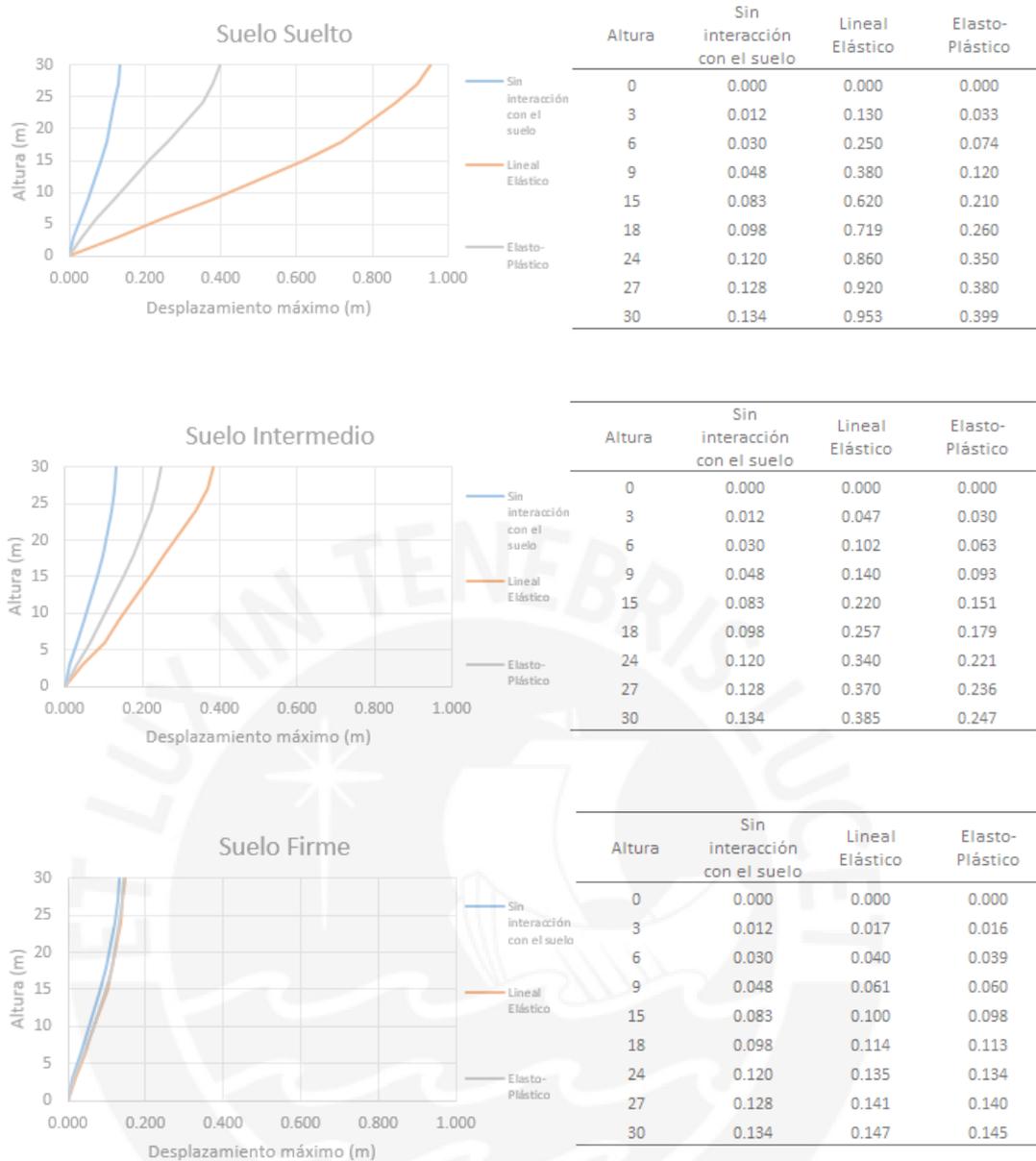


Figura 2.20. Desplazamientos máximos para una esbeltez estructural igual a 2. (Çelebi et al., 2012)

La amplificación afectada por la interacción suelo-estructura también se puede ver influenciada por otros parámetros. En (Liang et al., 2016) se estudió la respuesta a ondas P y ondas S verticales en un muro de corte con cimentación semicircular rígida para analizar el efecto de la saturación del suelo en la amplificación sísmica producida. El modelo numérico realizado se muestra en la Figura 2.21, donde se aprecia el sistema suelo-estructura.

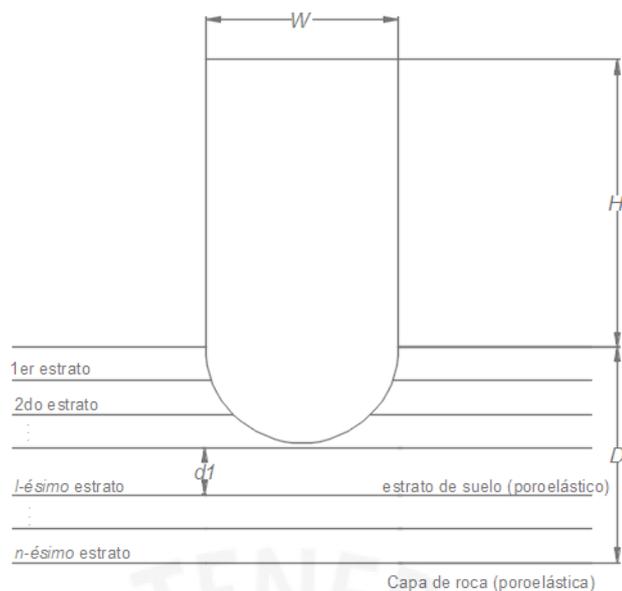


Figura 2.21. Modelo del muro de corte cimentado sobre estratos de suelo (Liang et al., 2016)

Se observó que el agua subterránea tiene un mayor efecto en la respuesta del sistema cuando se tienen estratos superiores a cuando se tiene un suelo homogéneo y cuando la diferencia de rigideces es mayor. El desplazamiento del sistema experimenta resonancias en el caso del suelo seco y saturado, pero con un cambio a frecuencias más bajas.

Se determinó que la frecuencia natural del sistema puede incrementar cuando el suelo se encuentra saturado. En el caso de estudio del presente proyecto, esto puede ocurrir en el caso de fuertes lluvias ocasionadas por el fenómeno del niño. Además, mientras mayor es la porosidad del suelo, la respuesta del sistema se ve más afectada por los efectos de la saturación.

(Mitropoulou et al., 2016) destacaron la importancia de la interacción suelo estructura en la evaluación estructural y reducción del riesgo sísmico. Se modelaron estructuras de concreto armado y de acero con 3 condiciones de cimentación diferentes: fijo en la base, con resortes que buscan simular la rigidez del suelo, y con una cimentación de pilotes sobre un modelo de suelo en elementos finitos. Estas condiciones se muestran en la Figura 2.22.

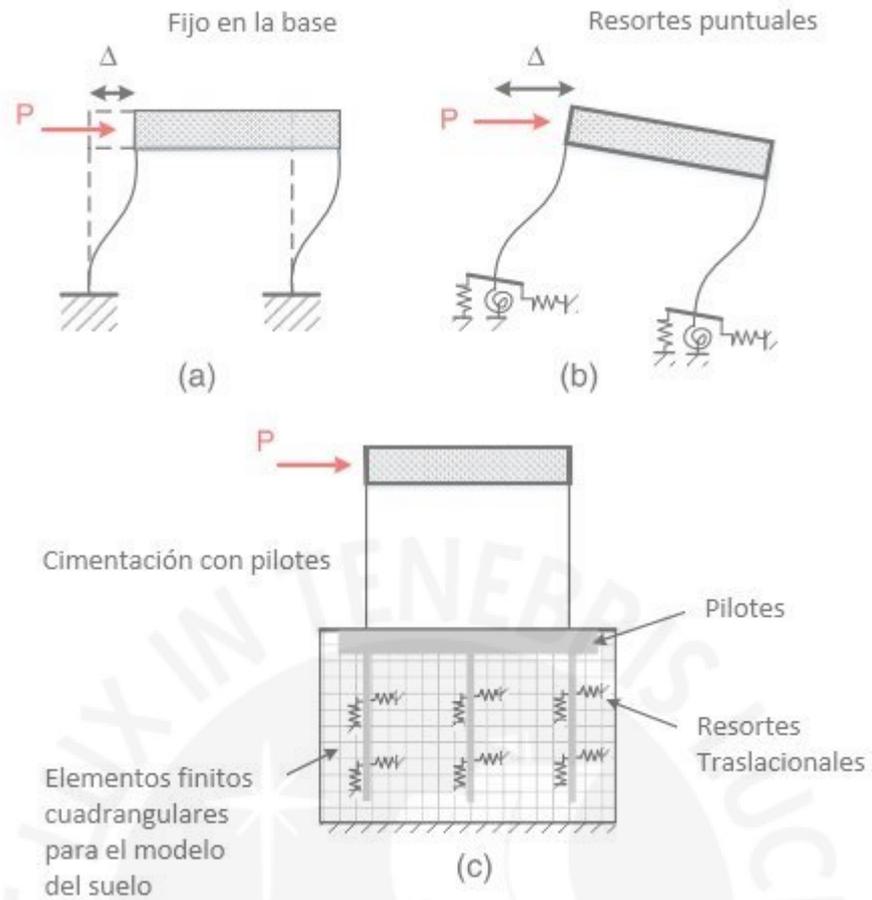


Figura 2.22. (a) Fijo en la base, (b) cimentación con resortes, (c) cimentación con pilotes (Mitropoulou et al., 2016)

Para el caso de la cimentación con pilotes, las dimensiones consideradas en la extensión del sistema se muestran en la figura 2.23. Nuevamente, podemos observar que el modelo del suelo es bastante más extenso que el de la superestructura para simular correctamente las condiciones de cimentación.

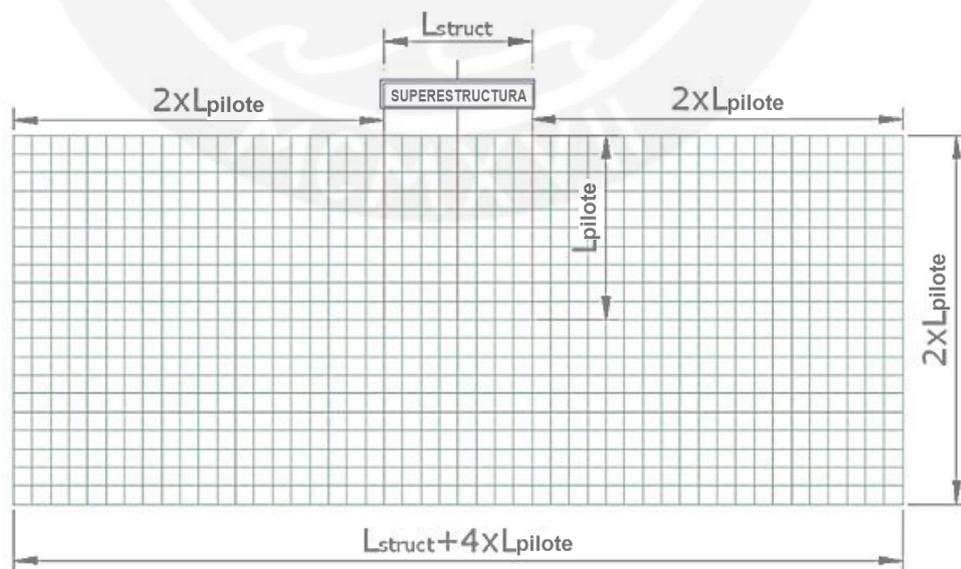


Figura 2.23. Extensión de la malla del sistema (Mitropoulou et al., 2016)

Se concluyó que para el caso de estructuras de 2 y 4 pisos, la forma de la cimentación no afecta significativamente la respuesta estructural. En el caso de las edificaciones de 8 pisos, la cimentación con pilotes gobierna la respuesta de las edificaciones de concreto armado, mientras que las edificaciones de acero se ven gobernadas por el caso fijo en la base.

Por otro lado, la interacción suelo estructura puede ser utilizada para abordar problemas especiales. Por ejemplo, en (Krishnamoorthy & Anita, 2016), se estudió la influencia de considerar la interacción suelo-estructura en un edificio aislado en la base con un sistema de péndulo de fricción (FPS). En este caso, se estudió la respuesta del edificio aislado al modelar debajo de este, suelos con distintas propiedades, que se muestran en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Propiedades del suelo consideradas en el estudio (Krishnamoorthy & Anita, 2016)

Tipo de Suelo	E (kN/m <sup>2</sup> )	$\mu$	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\zeta$
S1	5000	0.4	18	0.05
S2	50 000	0.35	19	0.05
S3	500 000	0.3	20	0.05

En este estudio se analizó la estructura sometida a 8 registros de aceleraciones diferentes, con diferente contenido de frecuencias y amplitudes, los cuales se indican en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Lista de sismos considerados en el estudio (Krishnamoorthy & Anita, 2016)

ID del Registro	Terremoto	PGA (g)
1	1995 Kobe	0.616
2	1979 Imperial Valley	0.419
3	1999 Chi Chi	0.333
4	1994 Northridge	0.843
5	1992 Landers	0.818
6	1971 San Fernando	0.21
7	1940 El Centro	0.313
8	1989 Loma Prieta	0.411

En este caso, las fronteras laterales del suelo se modelaron como elementos Kelvin, que son resortes con rigidez y amortiguamiento dependientes de la frecuencia de la excitación de entrada. El modelo de elementos finitos se muestra en la figura 2.24. Esta estructura fue sometida a diferentes registros de aceleraciones para observar la influencia de la amplificación del suelo. La respuesta de la estructura considerando el suelo y sobre base rígida para el terremoto de El Centro se muestra en la figura 2.25. La amplificación máxima obtenida para 8 registros diferentes de aceleraciones se muestra en la figura 2.26. Podemos observar que el suelo puede amplificar la respuesta sísmica, pero, dependiendo del registro sísmico y del tipo de suelo, también puede amortiguarla. En este caso, los sismos con energía a altas frecuencias han amortiguado la respuesta al pasar sobre suelo blando, debido a que el suelo blando resuena a frecuencias bajas.

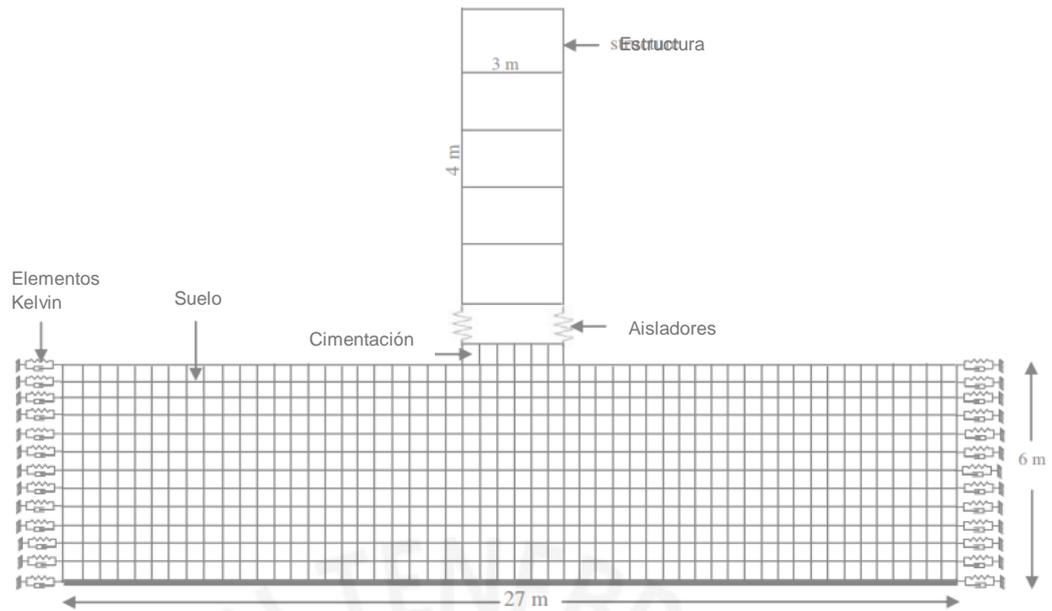


Figura 2.24. Modelo suelo-estructura de un edificio aislado (Krishnamoorthy & Anita, 2016)

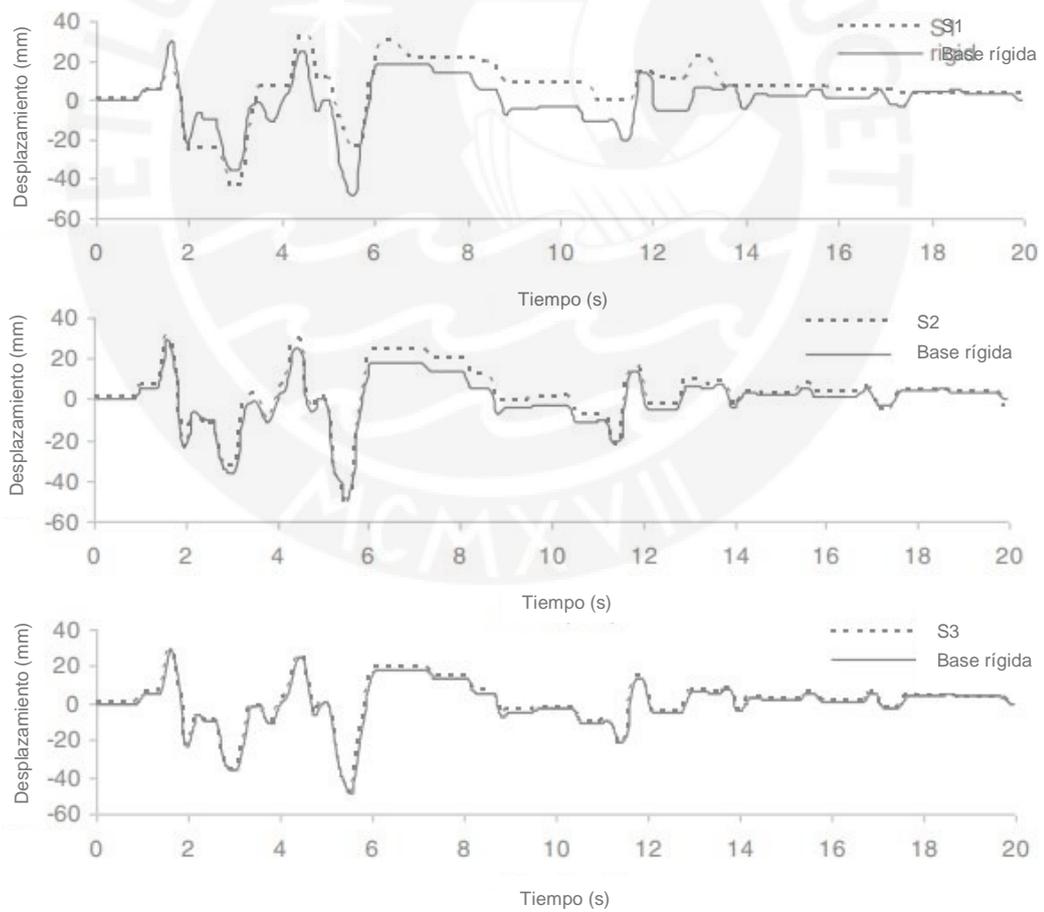


Figura 2.25. Respuesta de desplazamientos sobre el aislamiento para el sismo de El Centro (Krishnamoorthy & Anita, 2016)

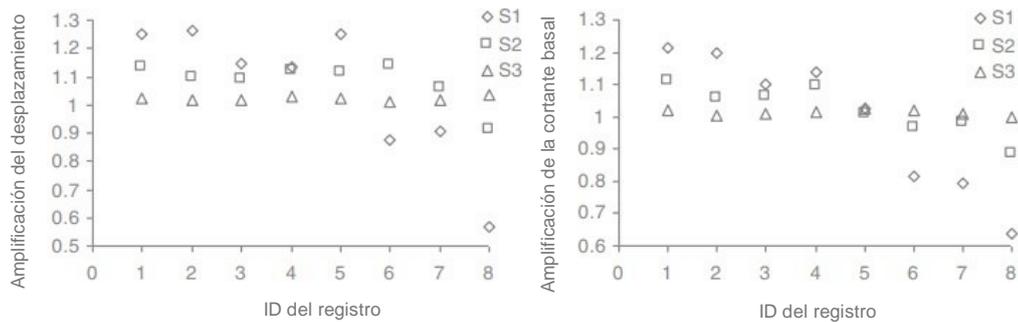


Figura 2.26. Amplificación de la respuesta para los diferentes sismos (Krishnamoorthy & Anita, 2016)

Otro tipo de estructura especial donde se ha analizado el efecto de la interacción suelo estructura es en estructuras nucleares por (Bolisetti, Whittaker & Coleman, 2018). En este estudio, se analizó una de estas estructuras y su interacción con el suelo subyacente. Se comparó la respuesta obtenida al utilizar el análisis espectral común y ampliamente usado con el software SASSI (System for Analysis of Soil-Structure Interaction), con el equivalente análisis no lineal en el dominio del tiempo utilizando el software LS-DYNA. El modelo de la estructura nuclear y el suelo se muestra en la figura 2.27. Al igual que en otros casos de estudio, se ha considerado suficiente distancia a los lados para que las ondas se disipen, y se ha restringido los extremos para que trabajen únicamente en cortante.



Figura 2.27. Modelo de elementos finitos para el sistema suelo estructura de una planta nuclear (Bolisetti et al., 2018)

Este sistema fue analizado utilizando los terremotos que se muestran en la tabla 2.6. Los resultados muestran que, mientras el comportamiento se mantiene lineal, el análisis espectral provee de resultados muy similares a los obtenidos por un análisis en el dominio del tiempo. Sin embargo, cuando la no linealidad es considerada, los resultados pueden diferir considerablemente, principalmente por la no linealidad de la cimentación, deslizamientos y levantamientos de la cimentación. Cuando la cimentación es superficial, la no linealidad de la interacción suelo-estructura ocasiona una mayor amplificación y consecuente demanda de la superestructura. Estos resultados se analizaron obteniendo los espectros de respuesta de la aceleración de balanceo y total en el techo de la estructura, y se muestran en la figura 2.28. En esta imagen se comparan los resultados obtenidos por el método espectral con SASSI y los obtenidos por el análisis en el dominio del tiempo con LS-DYNA, con la base unida al suelo y permitiendo separación.

Tabla 2.6. Sismos de entrada para el análisis del sistema suelo-estructura (Bolisetti et al., 2018)

ID del sismo	Terremoto	Estación	PGA
JOS_L	92 Landers	Joshua Tree 090	0.06
LCN	92 Landers	Lucerne 260	0.26
SCS_H	94 Northridge	Sylmar Conv Sta. 052	0.58
PRI_H	95 Kobe	Port Island-Mod 79m	0.64

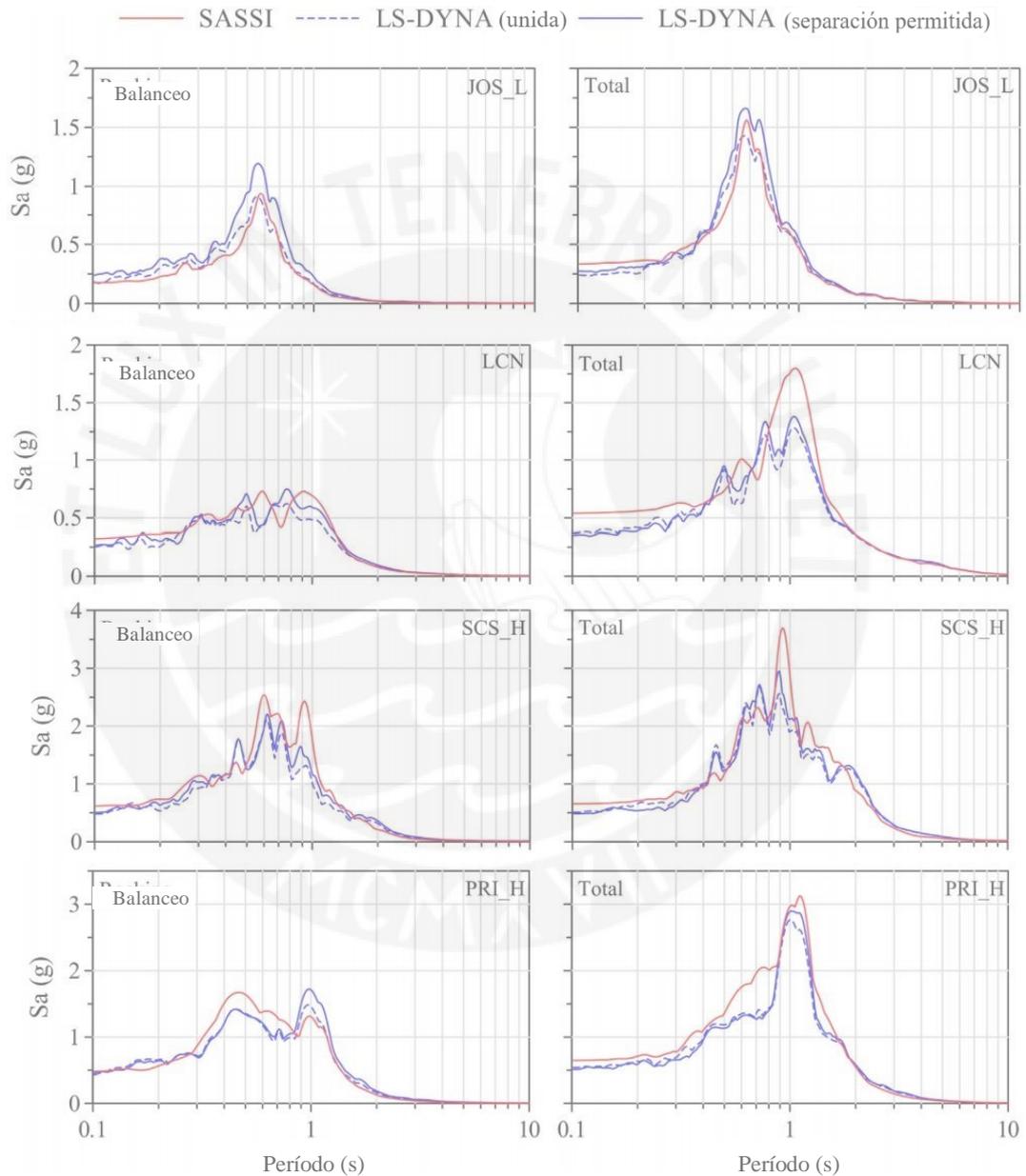


Figura 2.28. Aceleración espectral para los diferentes modelos de elementos finitos para el sistema suelo estructura de una planta nuclear (Bolisetti et al., 2018)

## 2.7. Conclusiones

En este capítulo se realizó una introducción al problema de evaluación estructural de construcciones históricas, mostrando algunas consideraciones y recomendaciones dadas por códigos extranjeros, así como las metodologías generales empleadas en algunos casos de estudio. Se expuso el marco teórico del análisis numérico por elementos finitos, así como el método de análisis no lineal por carga incremental, que será aplicado para determinar las zonas dañadas o vulnerables por cargas de peso propio de la estructura.

Luego, se realizó una introducción al fenómeno de amplificación sísmica producida por el suelo y la estructura. La respuesta estructural en un movimiento sísmico se puede ver altamente influenciada por las condiciones de cimentación y la interacción de la estructura con el suelo. Se han recopilado diferentes estudios de la influencia de diversos parámetros en la amplificación experimentada, así como consideraciones para el modelamiento. El nivel de compacidad del suelo, las irregularidades topográficas, los períodos naturales de vibración del suelo y de la superestructura y los modelos constitutivos considerados pueden producir variaciones considerables en la respuesta estructural.

Se concluye que el método de elementos finitos puede utilizarse para evaluar la respuesta estática y dinámica de una estructura existente, si el modelamiento representa adecuadamente las condiciones de esta. Además, la interacción con el suelo puede ser un factor que afecte de manera importante los resultados.



## CAPÍTULO 3. EL CASO DE ESTUDIO

### **Resumen:**

En este capítulo se realiza la descripción del caso de estudio: la Huaca de la Luna. Se empieza con una reseña histórica de la construcción, seguida de la descripción arquitectónica: la distribución de espacios en la estructura y las fases constructivas por las que ha pasado. Luego, se hace una descripción de las campañas experimentales que han sido realizadas previamente en el caso de estudio, y los ensayos en los que se han determinado las propiedades mecánicas y características geotécnicas. Finalmente, se realiza un estudio sobre el peligro sísmico en la zona de estudio y los registros sísmicos históricos.

### 3.1. Introducción

La Huaca de la Luna fue construida por la cultura Moche hace más de 1500 años y es considerada una de las estructuras patrimoniales más importantes de la costa del Perú. Ha sido objeto de importantes trabajos de investigación y conservación arqueológica, y actualmente es de gran valor turístico debido a que se encuentra abierta al público, siendo posible visitar sus patios y plazas y un museo de sitio (World Monument Foundation, 2016). Asimismo, se han conducido diferentes campañas experimentales para determinar las características geométricas y mecánicas de la Huaca y del suelo sobre el que se encuentra cimentada, las cuales proveerán de información importante para la evaluación estructural. Esta información será complementada con estudios sobre la sismicidad histórica y el peligro sísmico al que está expuesta la estructura.

### 3.2. Reseña Histórica de la Huaca

La cultura Moche se desarrolló entre los siglos I y VIII d.C. a lo largo de los valles de la costa norte del Perú. Inicialmente, se desarrolló como un único reino, que posteriormente se dividió en dos imperios: Mochica Norte y Mochica Sur (Castillo Butters & Donnan, 2009). En este último es donde se realizaron las construcciones correspondientes al complejo de las Huacas del Sol y de la Luna, las cuales se encuentran separadas por un centro urbano. La última es la que actualmente está abierta al público y recibe una gran afluencia de turistas, y donde se están realizando estudios de diagnóstico y conservación.

Se ubica a 8 km al sur del centro de la ciudad de Trujillo, en el departamento de la Libertad. Fue construida por la cultura Moche entre los años 50 y 650 d.C. y era utilizada como un centro ceremonial y religioso (Tavera Vega, 2011). Se encuentra a las faldas de Cerro Blanco, considerada una montaña sagrada para los Moches. Las pinturas murales que adornan la Huaca representan los rituales y sacrificios humanos que en ella se realizaban. Los prisioneros eran encerrados para, luego de un ritual de purificación, ser degollados y ofrecer su sangre al dios de la montaña *Aiapaec* (Patronato Huacas del Valle de Moche, 2011).

### 3.3. Descripción Arquitectónica

La Huaca está constituida por tres plataformas (I, II, III) y tres plazas adyacentes a las estas (1, 2, 3a y 3b). La Plataforma I, en forma de pirámide trunca, posee un amplio espacio en frente denominado como Plaza 1 con una extensión de 180x90 m. Esta plataforma es la más amplia y está ubicada en la esquina suroeste. La Plataforma II, de menor extensión, se encuentra en la esquina sureste y la Plataforma III en la esquina noroeste, separada de la estructura principal y sobre terreno elevado (S Uceda, Mujica & Morales, 2001). Las plazas se encuentran delimitadas por muros altos y gruesos de adobe. La distribución de las áreas del complejo se muestra en la Figura 3.1 (a) y una vista general desde el este se muestra en la Figura 3.1 (b).

La Plataforma I, la cual será el lugar de estudio del presente proyecto, es una estructura conformada por bloques de adobe, es decir, ladrillos de barro secados al sol. Posee una base cuadrada de 95x95 m y exterior escalonado. La altura total de

dicha pirámide es de 25m y para acceder a su cima se utiliza una larga rampa que se ubica entre las Plazas 1 y 2. La rampa de acceso tiene una inclinación de 45°, un ancho de 3.5 m y una longitud aproximada de 60 m (Santiago Uceda, 2001).

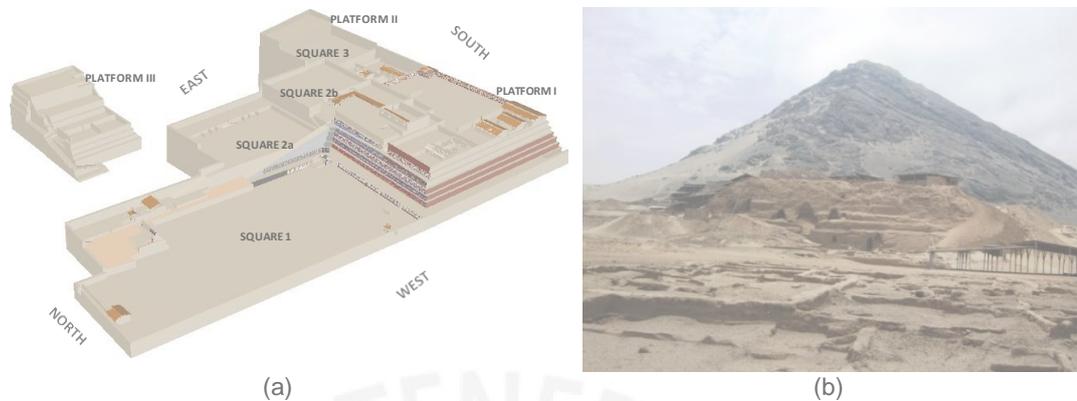
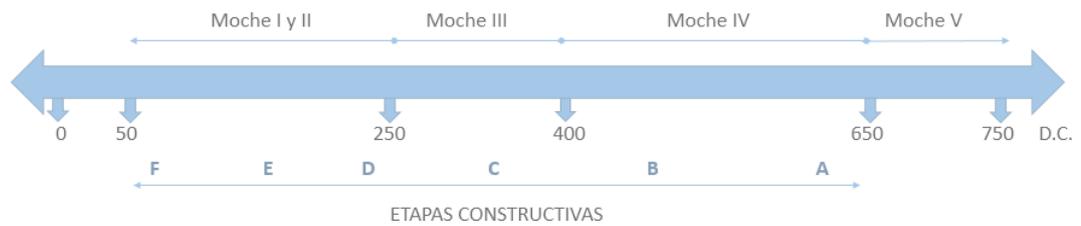


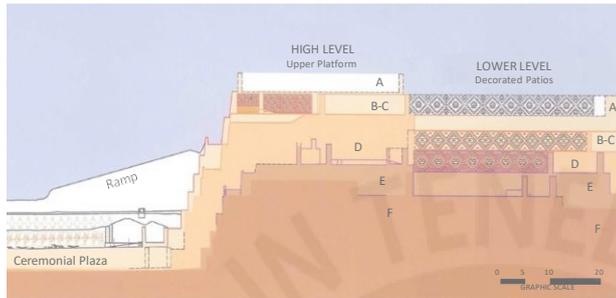
Figura 3.1. (a) Vista de la distribución de áreas del complejo (Chácara, Zvietcovich, Briceño, et al., 2014) y (b) Vista general desde el este de la Huaca de la Luna

Las excavaciones realizadas en la Huaca de la Luna revelan que ha pasado por al menos seis etapas durante su construcción (Chácara, Zvietcovich, Aguilar, et al., 2014; Santiago Uceda, 2001). Se aprecia que dichas etapas, o renovaciones del templo, fueron planificadas y demandaron mucha energía y recursos. Según los arqueólogos que estudiaron la Huaca (S Uceda et al., 2001), estas renovaciones pueden haber sido parte de un calendario ritual a largo plazo. Los lugares utilizados para la realización de rituales debieron ser reemplazados mientras se realizaban las labores de renovación, para lo cual se utilizaba un ambiente denominado edificio menor. El período en el que se realizó la construcción de cada etapa puede ser determinado con ayuda del estilo del arte que caracteriza sus cinco períodos culturales (Bernat, n.d.; Tavera Vega, 2011), distinguiéndose etapas constructivas de la A a la F, siendo la A la más reciente, y la que se ubica en la parte superior de la estructura. Esto se resume en la línea de tiempo de la Figura 3.2 (a), y en un corte transversal mostrando las diferentes etapas constructivas en la pirámide principal de la Huaca se muestra en la Figura 3.2 (b)

Actualmente, la Huaca de la Luna presenta zonas con extenso daño. Una de estas es la Plataforma I, la cual presenta una gran abertura, probablemente debido a las excavaciones perpetradas por los conquistadores españoles (Aguilar et al., 2015). En la figura 3.2 (c) se muestran las etapas constructivas y el estado actual de la Plataforma 1. Estos cambios en la estructura debidos a los daños se considerarán en el modelamiento para analizar cómo afectan en la respuesta estructural en relación a la Huaca en su estado intacto. Este aforado es irregular y de tamaño variable y se muestra en la reconstrucción realizada mediante fotogrametría y que se muestra a continuación:



(a)



(b)



(c)

Figura 3.2. Etapas Constructivas de la Huaca de la Luna: (a) línea de tiempo (Adaptado de Tavera Vega, 2011), y (b) corte transversal de la pirámide principal (Chácara, Zvietcovich, Aguilar, et al., 2014). (c) Fachada norte de la Plataforma 1 donde se observa el estado actual de daño.

### 3.4. Estudios Geométricos

Las características geométricas de la pirámide principal de la Huaca de la Luna, siendo muy irregular, se obtuvieron mediante una reconstrucción tridimensional, desarrollando un modelo sólido mediante la utilización de Escáner Laser Terrestre, debido a su alta rapidez y precisión (Aguilar et al., 2015).. Se realizaron un total de 64 escaneos parciales de la estructura, que luego fueron procesados utilizando el software libre Meshlab. Las Figuras 3.3. muestran el proceso de generación de los modelos.

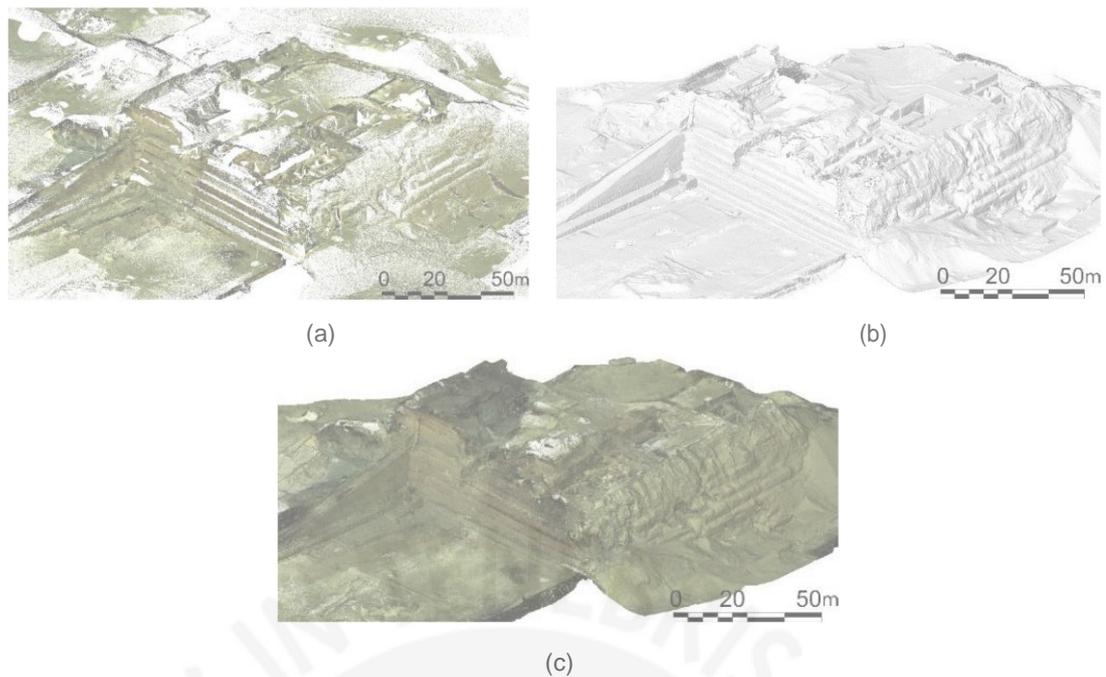


Figura 3.3. (a) Nube de puntos, (b) modelo enmallado y (c) modelo texturizado de la Huaca de la Luna (Aguilar et al., 2015)

De esta manera, se pudo obtener una representación precisa de la geometría de la pirámide principal, usando métodos modernos. El daño que presenta esta parte de la estructura es muy irregular, por lo que esta técnica se utilizó para obtener las características geométricas del aforado y de la estructura completa. Estos resultados se utilizarán para la realización de los modelos numéricos, y para estudiar la influencia del daño presente en la respuesta estructural de la Huaca.

### 3.5. Características Geotécnicas

El suelo de la ciudad de Trujillo es, en general, homogéneo; está conformado por arena pobremente graduada de grano fino a medio (SP) y arena limosa (Rubén Boroschek y Asociados Ltda., 2016). El primer estrato con una profundidad media de 2 m es considerado material de relleno y los estratos sucesivos son una combinación de arena pobremente graduada con pequeños porcentajes de arcilla y limo. La capacidad portante del suelo de Trujillo tiene un promedio de  $1 \text{ kg/cm}^2$ , variando entre  $0.5 \text{ kg/cm}^2$  en la zona de Buenos Aires (ubicada al norte de la ciudad) y a un máximo de  $3.5 \text{ kg/cm}^2$  en la zona del Parque Industrial de Trujillo (ubicado al sur) (Instituto de Investigación en Desastres Y Medio Ambiente IIDMA, 2002).

#### 3.5.1. Ensayos Realizados

En (G. Zavala et al., 2014) se hizo un estudio geofísico para determinar las condiciones geotécnicas de la Huaca de la Luna. Se hizo un análisis multicanal de ondas superficiales (MASW), ensayos de cono de penetración sísmico (SCPTu), radar de penetración terrestre, también conocido como georradar (técnica no destructiva utilizada para investigar por debajo del nivel del suelo) y gradiómetro

magnético (utilizado para detectar objetos o anomalías bajo el suelo). Esto con el objetivo de estimar propiedades del suelo en el que se encuentra la Huaca como la resistencia al corte, velocidad de onda de corte y módulos de deformación. Los lugares donde se realizaron los ensayos se muestran en la Figura 3.4.

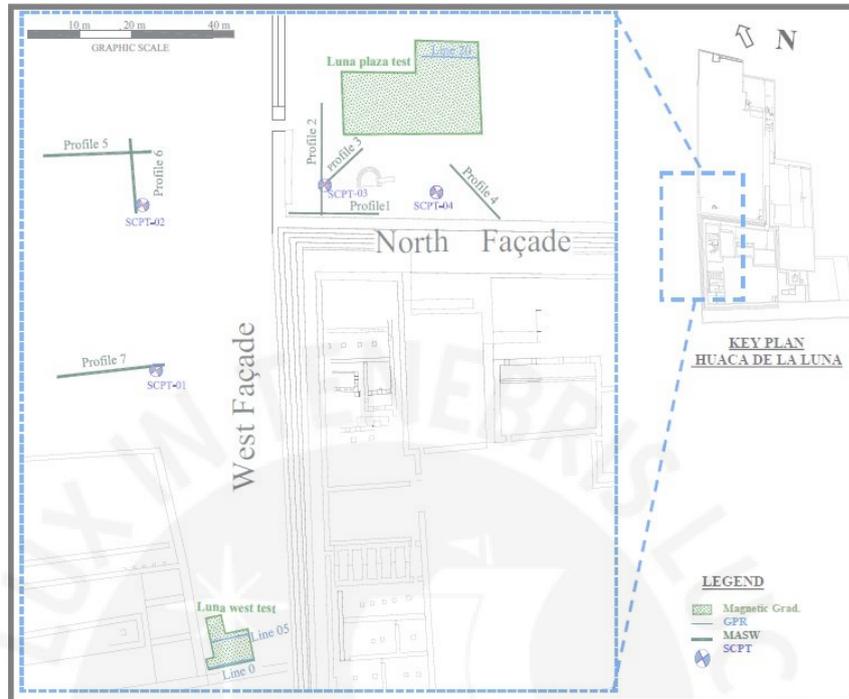


Figura 3.4. Localización de los ensayos geofísicos en la Huaca de la Luna (G. Zavala et al., 2014)

Se obtuvo a partir de los resultados del MASW el perfil de velocidades de propagación de onda que se muestra en la Figura 3.5. Estas velocidades se pueden utilizar para determinar la rigidez del suelo, así como para determinar donde hay cambios de estrato y dónde se encuentra el suelo firme o la roca.

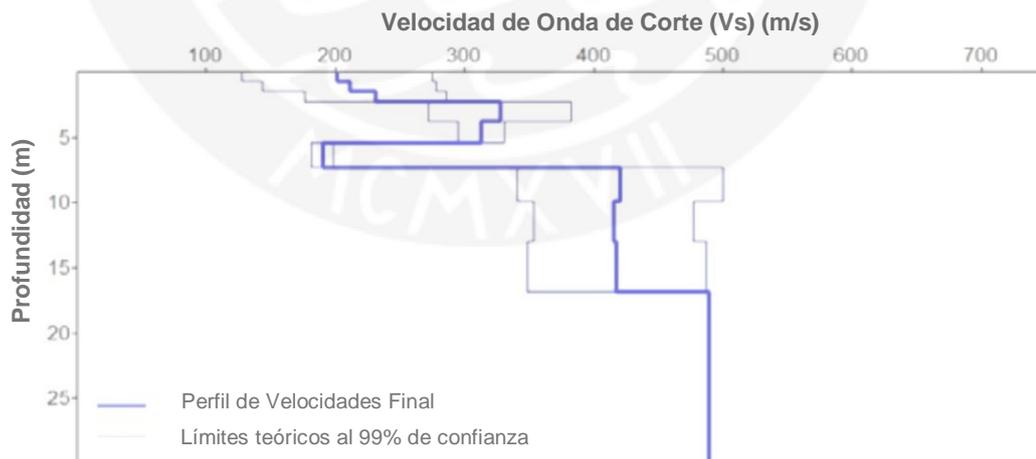


Figura 3.5. Perfil de velocidades de onda de corte (G. Zavala et al., 2014)

Los resultados obtenidos en los ensayos de SCPTu muestran que cerca de la fachada norte el rechace se produce a profundidades entre 6 y 12 m, lo cual evidencia la posibilidad de que el estrato duro siga la misma pendiente que la colina de granito localizada al este de la Huaca. Los valores de la resistencia en la punta obtenida del ensayo SCPTu se muestran en la Figura 3.6.

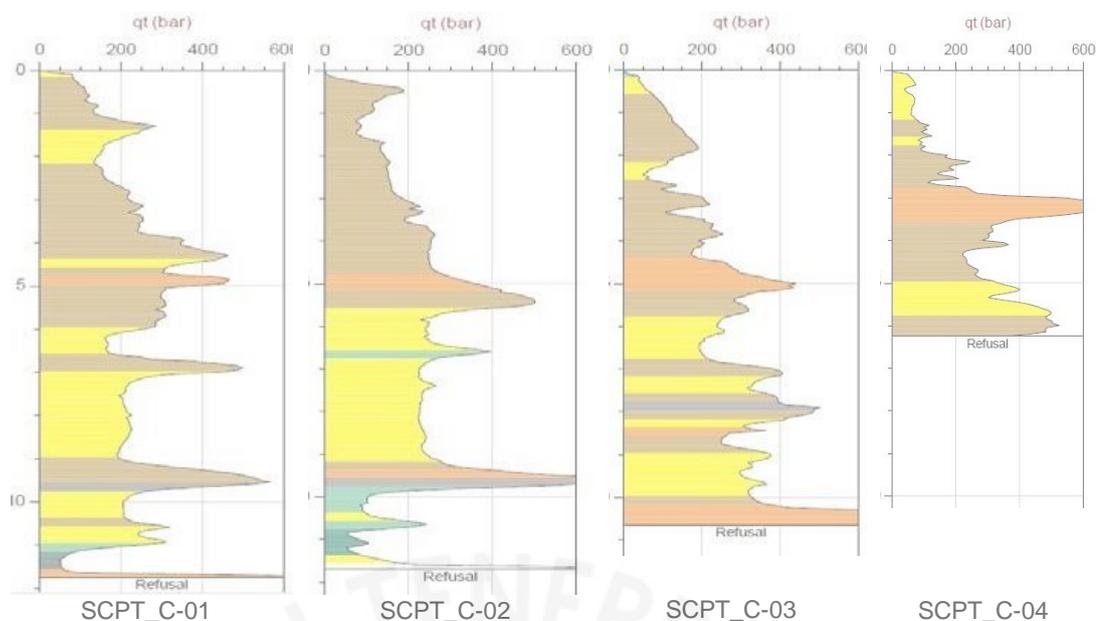


Figura 3.6. Resistencia en la punta – SCPTu para los 4 ensayos realizados (G. Zavala et al., 2014)

Se obtuvo que el suelo sobre el cual se encuentra cimentada la Huaca está conformado por estratos de arena medianamente densa a densa de aproximadamente 5.5 m de espesor, con una capa intermedia de arena gravosa, seguida por estratos de arena densa a muy densa con una profundidad entre 6 a 11 m, que se encuentran sobre un estrato duro. El perfil obtenido en la fachada norte consta de cuatro capas de arena. La capa 1 tiene una resistencia promedio en la punta proveniente del ensayo SCPTu de entre 70 a 110 bar (arena medianamente densa). La capa 2 tiene una resistencia promedio en la punta entre 175 a 240 bar (arena densa a muy densa). La capa 3 tiene una resistencia promedio entre 225 a 250 bar (arena muy densa). Finalmente, la capa 4 posee una resistencia en la punta promedio entre 210 a 375 bar (arena muy densa) y se encuentra sobre un estrato duro en el cual se produjo el rechace (Aguilar et al., 2015). Dicho estrato es considerado como roca basal y está constituido, probablemente, por conglomerado y/o areniscas (Rubén Boroschek y Asociados Ltda., 2016).

El módulo de elasticidad del suelo de la Huaca se obtuvo mediante correlaciones empíricas sugeridas por (Das & Sivakugan, 2007). Entre estas, se utilizó la correlación de Schmertmann que se aplica para suelos arenosos y señala que el módulo de elasticidad puede ser estimado como el doble de la resistencia promedio del cono  $q_t$ . El módulo de Poisson (Das & Sivakugan, 2007) fue obtenido a partir de los ensayos de MASW. La densidad del suelo fue asumida a partir de la literatura (Aguilar et al., 2015). Con los resultados de los ensayos geofísicos se pudo obtener un perfil estratigráfico del suelo sobre el cual se encuentra cimentada la Huaca de la Luna. Estos resultados muestran una estratigrafía variable, la cual fue dividida en 4 capas definidas aproximadamente con las propiedades que se indican en la siguiente sección, para poder realizar el modelamiento del suelo debajo de la pirámide.

### 3.5.2. Propiedades Mecánicas del Suelo

A partir de los ensayos realizados, descritos anteriormente se determinaron las propiedades mecánicas descritas a continuación y que servirán para la definición de los modelos numéricos.

Las propiedades mecánicas del suelo consideradas serán únicamente las lineales. Estas han sido determinadas en (Aguilar et al., 2015). El módulo de elasticidad fue determinado como una función de la resistencia del cono de penetración. Esta correlación es sugerida por (Das & Sivakugan, 2007). El módulo de Poisson fue determinado mediante iteraciones de los resultados obtenidos a través del MASW. Por su parte, la densidad de masa del suelo fue asumida de la literatura (Aguilar et al., 2015). Estas propiedades resumidas en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Propiedades mecánicas de los estratos de suelo (Aguilar et al., 2015)

Estrato	Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3	Estrato 4
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1900	2000	2000	2250
E (Mpa)	17	43	57	58
$\nu$	0.43	0.43	0.42	0.41

### 3.6. Características del Adobe

Los bloques de adobe del complejo arqueológico han sido elaborados en distintas épocas de acuerdo a la secuencia constructiva. Estos difieren en la composición de la tierra y dimensiones, así como la forma de fabricación y los moldes utilizados. Se estima que en la Huaca de la Luna se utilizaron aproximadamente 50 millones de bloques de adobe. Estos fueron fabricados, en su mayoría, utilizando limo marrón, que se encuentra en los alrededores de la Huaca, mezclado con agua (Mansfield Hastings & Moseley, 1975).

#### 3.6.1. Ensayos Realizados

Para la caracterización mecánica del adobe, se realizó extrayendo bloques del complejo arqueológico y ensayándolos en el laboratorio de estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Este proceso se muestra en la Figura 3.7.



Figura 3.7. Extracción de (a) bloques de adobe y (b) mortero para su caracterización mecánica y (c) prismas construidos para ensayos de compresión (Ramírez et al., 2015)

Con los bloques extraídos se fabricaron prismas siguiendo los lineamientos de la norma E.080 (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, 2017). Se utilizó mortero de aproximadamente 2.5 cm de espesor y se construyeron los prismas manteniendo una geometría irregular, tal como se observa en el complejo arqueológico.

Se instalaron LVDT (medidores de deformación) en los prismas y se realizaron ensayos de compresión uniaxial de velocidad controlada hasta la rotura. De esta manera, se obtuvieron curvas de esfuerzo deformación donde se pudieron determinar propiedades como el módulo de elasticidad y resistencia a la compresión. El comportamiento en tracción fue aproximado considerando que la resistencia en tracción es aproximadamente la décima parte de la resistencia en compresión. El módulo de Poisson fue obtenido de la literatura. La energía de fractura en compresión y tracción fue estimada considerando un factor de ductilidad de 1.6 mm y 0.029 mm respectivamente.

### 3.6.2. Propiedades Mecánicas del Adobe

Con base en los ensayos anteriormente descritos, se resumen las propiedades mecánicas obtenidas para el adobe en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Propiedades mecánicas lineales del adobe de la Huaca (Aguilar et al., 2015)

Parámetro	Unidad	Magnitud
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1735
E	MPa	115
v	-	0.2

Como se desea conocer las zonas de concentración de esfuerzos y las zonas de agrietamiento para el caso de las cargas de gravedad, las propiedades no lineales se muestran en la tabla 3.3. La energía de fractura se obtiene multiplicando la ductilidad considerada por la resistencia.

Tabla 3.3. Propiedades mecánicas no lineales del adobe de la Huaca (Aguilar et al., 2015)

Parámetro	Unidad	Magnitud
Resistencia en Compresión	MPa	0.36
Resistencia en Tracción	MPa	0.036
Energía de fractura en compresión	N/m	576
Energía de fractura en tracción	N/m	1.044

### 3.5. Peligro Sísmico en la Huaca de la Luna

Para poder realizar una correcta evaluación del peligro sísmico en el caso de estudio, es importante conocer las condiciones de la zona en la que se encuentra la construcción. Esto incluye, las condiciones geotécnicas y geológicas, la historia de sismos y desastres naturales, el contenido de frecuencias y las aceleraciones máximas esperadas en el lugar de estudio.

La corteza terrestre es la capa externa y más dinámica, conformada por una docena

de placas rígidas en constante movimiento (Bernal & Tavera, 2002). La Huaca de la Luna está ubicada en la costa del Perú, la cual es una de las zonas con mayor actividad sísmica del mundo, en el límite de subducción entre las placas de Nazca y la Continental. Este tipo de interacción, la cual es responsable de la mayor parte de la actividad sísmica en el país, se produce al introducirse la placa de Nazca por debajo de la placa Continental. Dicha interacción se da de manera horizontal en la región norte-centro del país a una profundidad de 100 a 120 km y con un ángulo de inclinación de 30° hasta profundidades de 300 km en la región sur (Tavera & Buforn, 1998).

Además de este proceso de subducción, existen otras fuentes sísmicas que se ubican a lo largo de las placas. Estas fuentes son la de subducción intermedia, la de subducción profunda y las fuentes continentales, las cuales se encuentran asociadas a la actividad sísmica superficial (Rubén Boroschek y Asociados Ltda., 2016). Las fuentes sísmicas se muestran en el Perú se muestran en el esquema de la Figura 3.8.

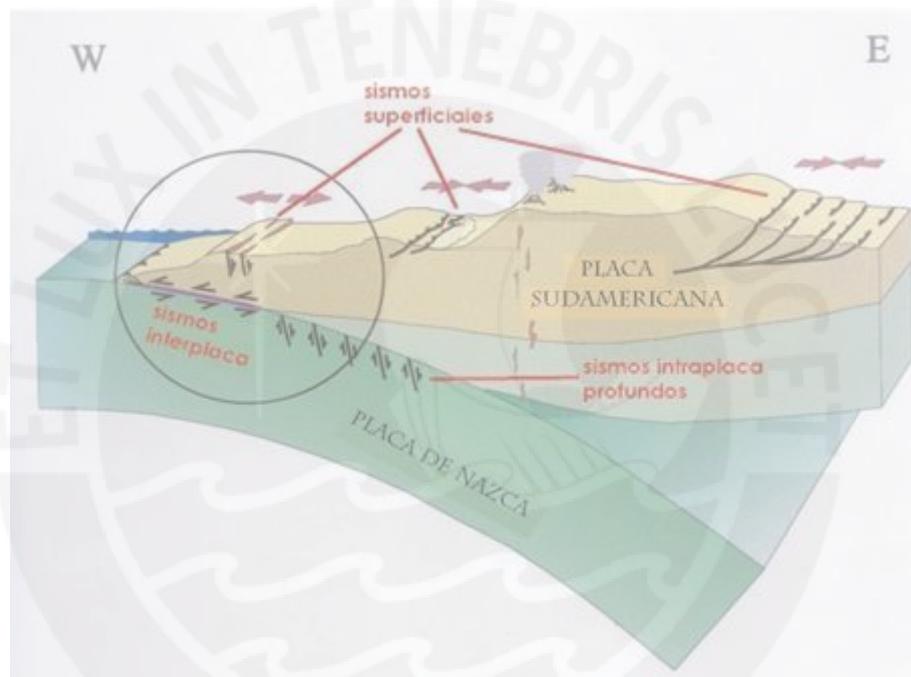


Figura 3.8. Fuentes Sísmicas en el Perú (Rubén Boroschek y Asociados Ltda., 2016).

En el estudio de la amplificación sísmica, las condiciones geotécnicas de la zona son importantes debido a las variaciones en la amplitud y contenido de frecuencias que se pueden producir al recibir la excitación producto de un sismo. En la investigación realizada sobre amenaza sísmica en la zona de la Huaca de la Luna por (Rubén Boroschek y Asociados Ltda., 2016) se determinó que se pueden producir amplificaciones de hasta 2.5 veces la señal de entrada en el caso de roca ubicada a 50 m de profundidad, de 1.5 veces cuando se encuentra a 10 m de profundidad

### 3.5.1. Sismicidad Histórica

Los registros más antiguos de movimientos sísmicos en la costa del Perú datan de la época de la conquista y colonización. Es importante reconocer que la información disponible sobre los sismos ocurridos depende de la densidad poblacional de las

zonas, ya que un sismo ocurrida en una zona poco poblada o con localidades con las que la comunicación era difícil es más probable que haya quedado sin ser registrado (Bernal & Tavera, 2002).

Se tiene poca información sobre los sismos ocurridos en la costa norte del Perú que es donde se realiza el estudio del presente proyecto. Sin embargo, se ha comprobado que esta zona también es muy activa sísmicamente (Tavera & Buforn, 1998). En la imagen se muestran los sismos registrados en el Perú en el período de 1513 a 1959 con intensidad mayor o igual a VIII en la escala de Mercalli Modificada. Esta escala mide la intensidad de los terremotos en una escala de doce grados, de acuerdo a sus consecuencias y daños producidos, observados empíricamente (USGS, 2015). Podemos observar en la Figura 3.9. que los sismos más importantes de los que se tiene registro en la costa norte del Perú han ocurrido en los años 1619, 1946 y 1953, con intensidades en la escala de Mercalli de IX, X y VIII respectivamente (Tavera & Buforn, 1998).

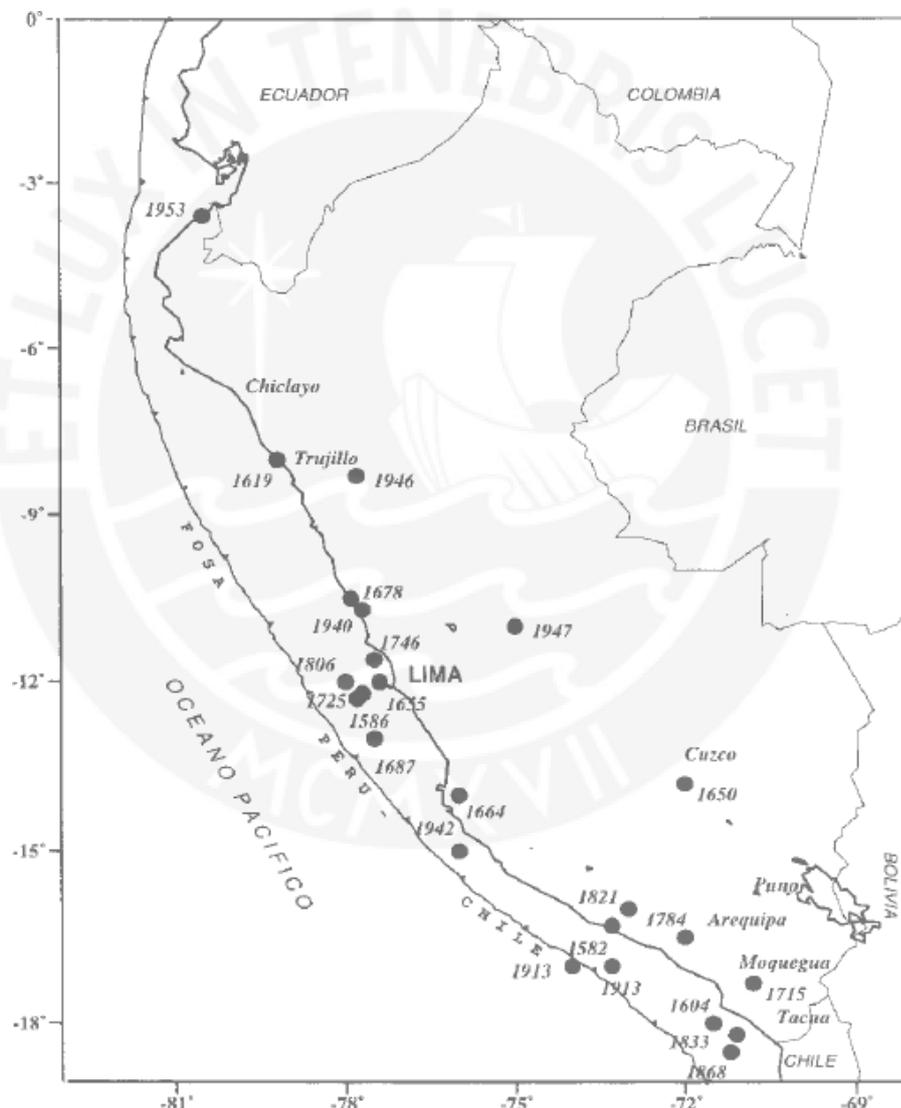


Figura 3.9. Distribución de los terremotos ocurridos en el Perú entre los años 1513 y 1959 con intensidad mayor o igual a VIII MM (Silgado Ferro, 1978)

El terremoto ocurrido en 1619 causó destrucción total en la ciudad de Trujillo. Iglesias y casas hechas de mampostería se derrumbaron y sepultaron a los habitantes. Los registros de la época informan que ocasionó la muerte de 350 personas y cientos

quedaron heridos (Silgado Ferro, 1978). Los daños fueron tan grandes que muchos pobladores abandonaron la ciudad y se pensó en reconstruirla en un lugar más alejado. El virrey tuvo que enviar ayuda a la ciudad para su reconstrucción mediante mano de obra, reducción de impuestos y donativos (Irigoyen, 1931).

En el año 1946, se produjo el terremoto de Quiches, en Ancash. Es uno de los terremotos más fuertes y destructores registrados en los andes. Es asociado a un caso de dislocación tectónica. La magnitud estimada del sismo fue de 7.5  $M_w$ . Se produjeron enormes agrietamientos y derrumbes.

El siguiente sismo de gran intensidad que afectó la zona de interés fue en el año 1953, con epicentro en Tumbes. Se dañaron las construcciones recientes de concreto armado y las de adobe y ladrillo. Se produjeron largas grietas en los terrenos húmedos.

La norma de diseño sismorresistente (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, 2018) clasifica al lugar donde se encuentra la Huaca de la Luna en la Zona 4, la de mayor sismicidad en el territorio peruano, la cual presenta una aceleración máxima esperada de 0.45g en un período de retorno de 475 años. La distribución de zonas sísmicas especificada por la norma, así como la magnitud en g del sismo de diseño se muestra en la Figura 3.10.

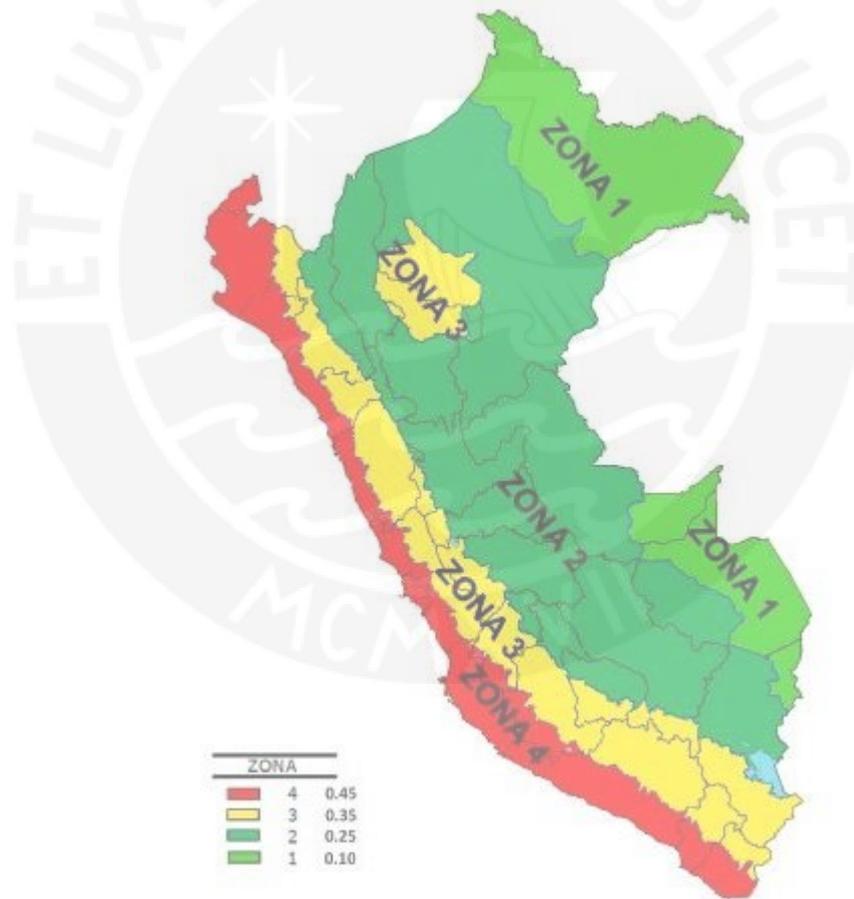


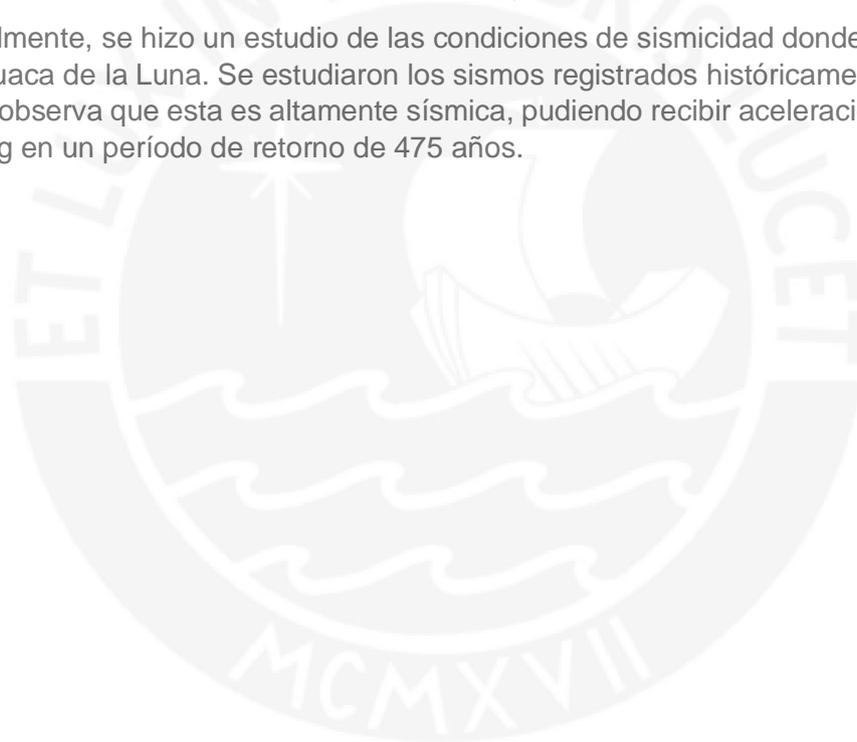
Figura 3.10. Zonas Sísmicas en el Perú (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, 2018)

### 3.6. Conclusiones

Se realizó una descripción del complejo arqueológico de la Huaca de la Luna, el caso de estudio del presente trabajo, que ayuda a entender la gran importancia histórica y cultural que posee dicha construcción. Luego, se expusieron los resultados de ensayos y estudios geotécnicos en la zona en la que se encuentra cimentada la estructura y del adobe con el que está construida. En estos estudios se pudieron determinar las propiedades mecánicas y geométricas que servirán para realizar el modelamiento numérico.

Existe una gran variabilidad de las propiedades de los materiales, y por el valor patrimonial de la estructura no es posible realizar ensayos invasivos que ocasionen daños. Por este motivo los ensayos que se realizaron fueron poco invasivos en el caso del suelo, en el que las propiedades mecánicas fueron determinadas por ensayos de análisis de ondas superficiales, georradar y gardiómetro magnético, así como SCPTu. En el caso de los bloques de adobe, se tomaron algunas muestras y se ensayaron en el laboratorio en forma de prismas. Se debe tomar en cuenta la variabilidad en las propiedades de los bloques debido a su fabricación artesanal y por haber sido construidos en diferentes épocas y con diferentes materiales.

Finalmente, se hizo un estudio de las condiciones de sismicidad donde se encuentra la Huaca de la Luna. Se estudiaron los sismos registrados históricamente en la zona y se observa que esta es altamente sísmica, pudiendo recibir aceleraciones de hasta 0.45g en un período de retorno de 475 años.



## CAPÍTULO 4. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA PIRÁMIDE PRINCIPAL DE LA HUACA DE LA LUNA

### Resumen:

En este capítulo se describen los análisis no lineales bajo cargas de gravedad y lineales tiempo-historia de la construcción en estudio. Se detallan las consideraciones en el modelamiento usando elementos finitos y las propiedades mecánicas y geométricas utilizadas y los métodos de análisis empleados. Finalmente, se discuten los resultados obtenidos, los cuales son capaces de proporcionar información sobre la naturaleza de los daños que presenta la estructura, y sobre la amplificación de la aceleración sísmica que recibe la construcción en la base.

## 4.1. Introducción

La Huaca de la Luna, ubicada al sur de la ciudad de Trujillo es una de las estructuras patrimoniales más importantes de la costa del Perú. Construida por la cultura Moche, ocupa un área de más de 9000 m<sup>2</sup> y llega a una altura de más de 25 m. La estructura fue construida durante aproximadamente 600 años en diferentes etapas, y ha estado expuesta a daños ocasionados por el ambiente y fenómenos naturales.

Para estudiar el estado de esfuerzos al que se encuentra sometida debido a su propio peso, se consideró el modelamiento de la pirámide principal y se realizó el análisis paramétrico no lineal bajo cargas de gravedad. Se consideró el estado intacto de la estructura, así como su estado actual, en una sección con una perforación y otra con dos perforaciones. Se tomó en cuenta también la influencia de considerar el suelo en el análisis. Con este análisis se busca determinar las zonas vulnerables en las que se ha producido agrietamiento debido al peso propio, las zonas de mayores deformaciones y de concentración de esfuerzos.

Adicionalmente, se analizó la amplificación sísmica utilizando un análisis dinámico lineal en el dominio del tiempo. Se seleccionaron acelerogramas y escalaron al espectro de diseño de la norma peruana (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, 2018). Se consideró el modelamiento de la pirámide principal y se realizó el análisis paramétrico tiempo historia con los acelerogramas definidos. De esta manera, se pudo determinar cuantitativamente cómo se amplifican o atenúan las ondas sísmicas al considerar diferentes condiciones para la estructura.

## 4.2. Descripción del Modelo

Se realizó el modelamiento del suelo y la estructura con base en las reconstrucciones y modelos realizados por (Aguilar et al., 2015), para los diferentes estados considerados. A continuación, se realiza la descripción del modelo en elementos finitos realizado utilizando el software DIANA 9.8.

### 4.2.1. Modelamiento del Suelo

El suelo de la Huaca de la Luna presenta una estratigrafía con la inclinación de una colina de granito ubicada al este de la estructura. Los ensayos geofísicos realizados por (Guillermo Zavala et al., 2015) muestran la pendiente de los estratos y la profundidad a la cual se encuentra la roca sana. Para realizar el modelamiento numérico, se siguieron las coordenadas calculadas mediante los ensayos de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW). Con estas coordenadas se modela la geometría de los estratos como se muestra en la Figura 4.1. Para el modelamiento se utilizaron elementos bidimensionales de deformaciones planas triangulares con nodos intermedios.



Figura 4.1. Estratos de suelo bajo la Huaca de la Luna

#### **4.2.1.1. Propiedades Mecánicas Consideradas**

Las propiedades mecánicas del suelo consideradas fueron únicamente las lineales. Estas han sido determinadas en (Aguilar et al., 2015). El módulo de elasticidad y el módulo de Poisson considerados se determinaron como se explicó en el capítulo anterior y las propiedades de la *Tabla 3.1* se introdujeron en el modelo.

#### **4.2.1.2. Condiciones de Borde**

Debido a que, para obtener una respuesta más acertada del comportamiento de la estructura sobre el suelo, sin que se vea afectada por las condiciones de contorno se debe tener una amplia extensión de suelo en comparación a la estructura, las coordenadas obtenidas de ensayos han sido extendidas, asumiendo que los estratos siguen la misma pendiente que la colina de granito.

Los desplazamientos de los nodos extremos ubicados a la misma altura fueron relacionados mediante uniones rígidas para simular la condición de continuidad.

#### **4.2.2. Modelamiento de la estructura**

El modelamiento fue realizado a través del pre y post procesador FX+ para DIANA, desarrollado por MIDAS Engineering Software. Este procesador provee de una interfaz amigable al usuario para el modelamiento en elementos finitos, pues dispone de comandos similares a los utilizados en programas CAD.

Una vez realizado el modelamiento geométrico, generado el enmallado de elementos finitos, seleccionado las propiedades mecánicas básicas, y definido las solicitaciones a las que se someterá a la estructura, se ejecuta el Mesh Editor en donde se define el tipo de análisis y se ejecuta posteriormente. Para todos los casos de modelamiento bidimensional de la estructura, se utilizaron elementos triangulares planos de deformaciones planas. Este tipo de elementos se eligió debido a que al ser una sección de la estructura que se encuentra confinada hacia un lado por el terreno y hacia el otro por el resto de la estructura, no permite deformaciones en el eje perpendicular, pero sí permite esfuerzos en este, a diferencia de los elementos planos de deformaciones planas, como se explicó detalladamente en la sección 2.2.2. La forma triangular fue escogida por la facilidad que tiene para representar formas complejas como las de las secciones dañadas de la Huaca.

Para el modelamiento de la estructura de la Huaca de la Luna, la geometría actual de la fachada frontal ha sido obtenida mediante el estudio realizado por (Aguilar et al., 2015). En esta investigación se realizó una reconstrucción de la estructura de la Huaca de la Luna mediante el uso de escáner láser terrestre, debido a su rapidez y alta precisión, como se describió en la sección 3.4. El proceso de generación de los modelos geométricos de la estructura se muestra en la figura 3.3 del capítulo anterior. A partir de esta reconstrucción de la geometría de la Huaca de la Luna, se pudieron obtener las coordenadas de la fachada frontal de la Pirámide principal en un plano, con lo que se realizaron los modelos bidimensionales mostrados en la Figura 4.2.

Para poder determinar la forma cómo este agujero ocasionado por los daños en la Huaca afecta a la amplificación sísmica, se realizó el modelamiento de la estructura en su estado intacto, que se muestra en la figura 4.2 (a). La parte más clara de la estructura es la fachada norte de la pirámide principal, mientras que la parte de un color más oscuro se encuentra tapada por la rampa y la fachada oeste. Esta última tiene una inclinación que sigue la pendiente de la colina de granito. Se puede observar que en este caso el enmallado es simple y uniforme. El tamaño de los elementos en los que se discretizó la estructura es de 1 m como máximo y debe ser lo suficientemente pequeño para representar las irregularidades de la geometría. Los elementos utilizados son triangulares con nodos intermedios y en estado de deformaciones planas.

Actualmente, esta zona muestra una gran abertura que se atribuye a excavaciones realizadas por los conquistadores españoles (Aguilar et al., 2015). Para analizar el efecto que tiene este agujero en el comportamiento estructural de la Huaca, se realizó un modelo en elementos finitos de la estructura en su estado actual, con los daños existentes, en una sección con un agujero, como se muestra en la Figura 4.2 (b), y en una sección con dos aforados, como se muestra en la Figura 4.2 (c).

Al modelo de la Huaca en su estado intacto se le abreviará como H1 a partir de ahora, la sección en estado actual con un agujero será H2 y la sección intermedia con dos aforados será H3.

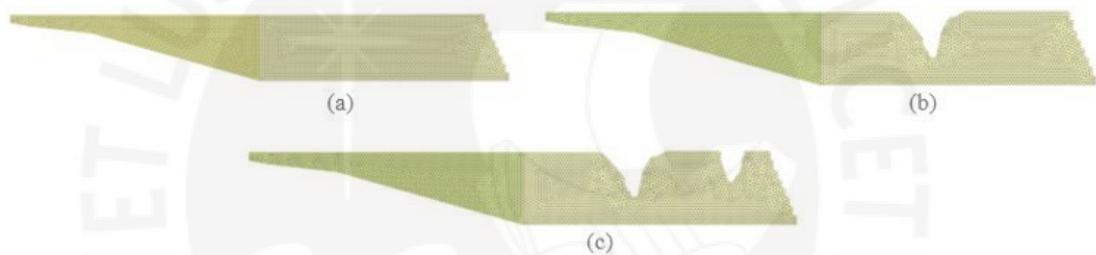


Figura 4.2. Modelo bidimensional de la Huaca de la Luna: (a) H1, (b) H2 y (c) H3

#### 4.2.2.1. Propiedades Mecánicas Consideradas

Las propiedades mecánicas para la estructura de la Huaca de la Luna fueron obtenidas en (Aguilar et al., 2015) tal como es descrito en el capítulo anterior y como se resume en la Tabla 3.2 para los parámetros lineales, y en la Tabla 3.3 para los parámetros no lineales.

Con estos parámetros se modelaron los modelos constitutivos no lineales utilizando el *total strain crack model*, el cual se encuentra disponible en DIANA 9.8. Este es un modelo simplificado y de alta recurrencia, que describe el comportamiento en tensión y compresión mediante una única relación de esfuerzo-deformación (DIANA FEA, 2013b). Los modelos constitutivos para tracción (exponencial) y compresión (parabólico) se muestran en la Figura 4.3.

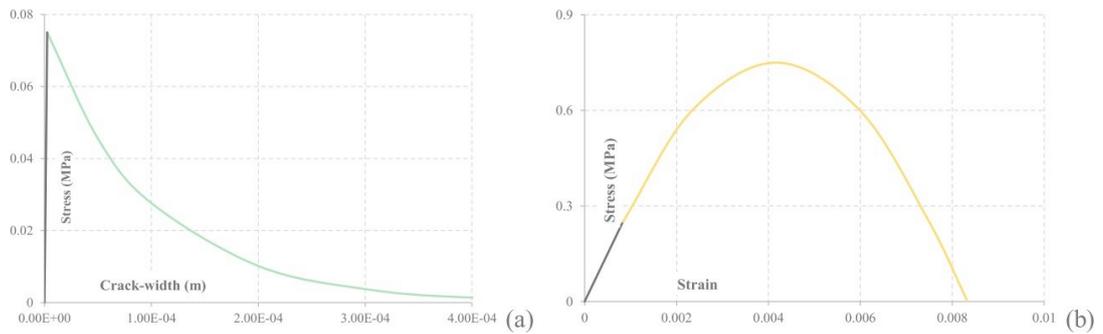


Figura 4.3. Leyes constitutivas del adobe en (a) tracción y (b) compresión (Chácara, Zvietcovich, Briceño, et al., 2014)

Una de las limitaciones del análisis que se está realizando, es que las propiedades mecánicas obtenidas a partir de los bloques de adobe estudiando se están considerando como iguales para toda la estructura, lo cual no es cierto, pues la Huaca de la Luna ha sido construida durante diversas etapas y los bloques de adobe poseen gran variación en sus propiedades mecánicas.

#### 4.2.2.2. Interacción con el Suelo

Se realizó el modelamiento de la estructura en conjunto con el suelo, para realizar el análisis de la interacción con el suelo. En los estudios previos no existe mayor información sobre las condiciones de cimentación de la Huaca, por lo que no fue posible modelar la interacción y la interfaz. En la presente investigación se modeló a la estructura sobre el suelo, considerando la unión entre los nodos de ambos. Debido a que el análisis dinámico a realizarse es únicamente lineal, se considera que esta simplificación no afectará de manera importante los resultados que se obtendrán.

El modelo en elementos finitos de la estructura sobre los estratos de suelo fue realizado para el caso de la estructura en su estado actual con una perforación, una sección intermedia con dos perforaciones y para el caso de la estructura intacta. Los modelos se muestran en la figura 4.4. En total, el modelo de la Huaca en su estado actual posee 6686 elementos, el de la sección intermedia posee 6535, y el de la Huaca en su estado intacto posee 7101 elementos, y el suelo subyacente posee en total 8666 elementos. Además, se han generado 17 elementos de unión rígida en el suelo.

Al modelo con suelo de la Huaca en su estado intacto se le abreviará como H1S a partir de ahora, la sección en estado actual con un agujero será H2S y la sección intermedia con dos aforados será H3S. Estos modelos se muestran en la Figura 4.4.

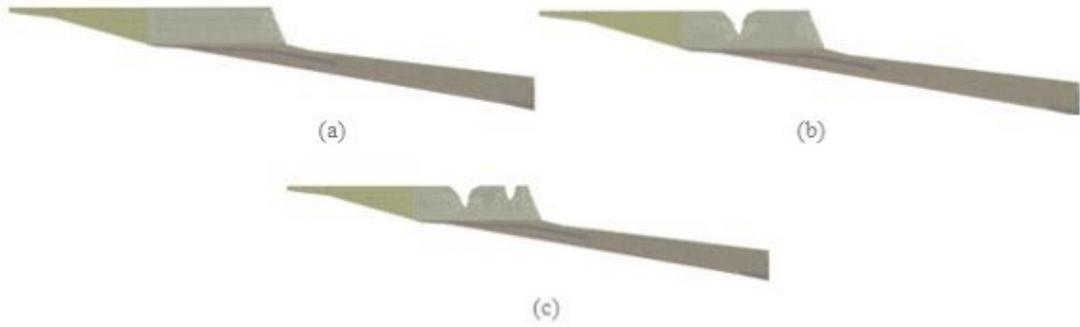


Figura 4.4. Modelo bidimensional de la Huaca de la luna considerando la interacción con el suelo: (a) H1S, (b) H2S y (c) H3S

### 4.3. Resultados del análisis estático

Se realizó el análisis no lineal por cargas de gravedad, aumentando estas en 100 pasos de 0.01g. En las Figuras 4.5. (a) y (b) podemos observar los desplazamientos absolutos y relativos, respectivamente, de la esquina superior derecha de la estructura al aumentar la aceleración de la gravedad hasta 1g. Se observa que los desplazamientos absolutos son del orden de 3 veces mayores al considerar el suelo en el modelo debido a la deformación de este. Sin embargo, si se considera únicamente el desplazamiento relativo de la parte superior con respecto a la base, los resultados son bastante similares, con mayores deformaciones en el caso de la sección en estado actual con un agujero sobre el suelo (H2S). El caso de la sección intermedia es el que presenta la menor deformación, posiblemente debido a que posee menos masa debido al segundo aforado, pero este no es tan grande como para permitir mayores deflexiones. El comportamiento de la estructura se mantiene mayormente lineal, aunque se observa una ligera curvatura al acercarse a 1g.

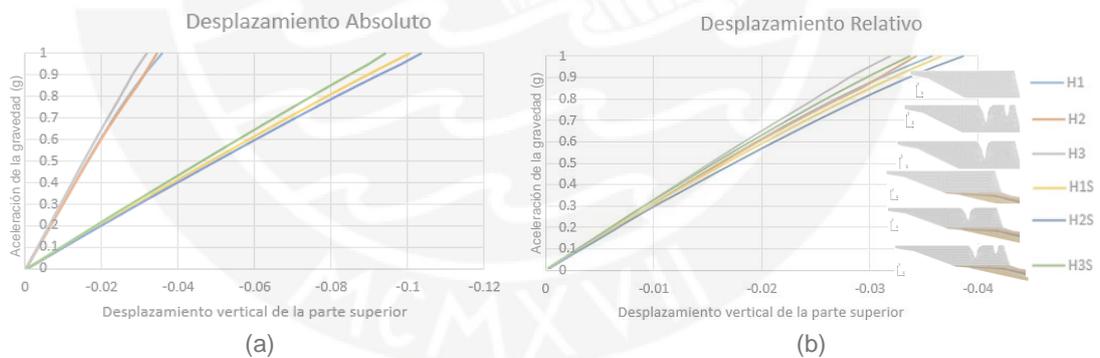


Figura 4.5. Desplazamientos (a) absolutos y (b) relativos de la parte superior de la pirámide

En las figuras 4.6 y 4.7 se muestran los esfuerzos principales de tracción y de compresión para los seis casos estudiados al alcanzar una aceleración de la gravedad igual a 1g. Se observa cómo varía la distribución de esfuerzos al considerar el estado de daño y la interacción con el suelo.

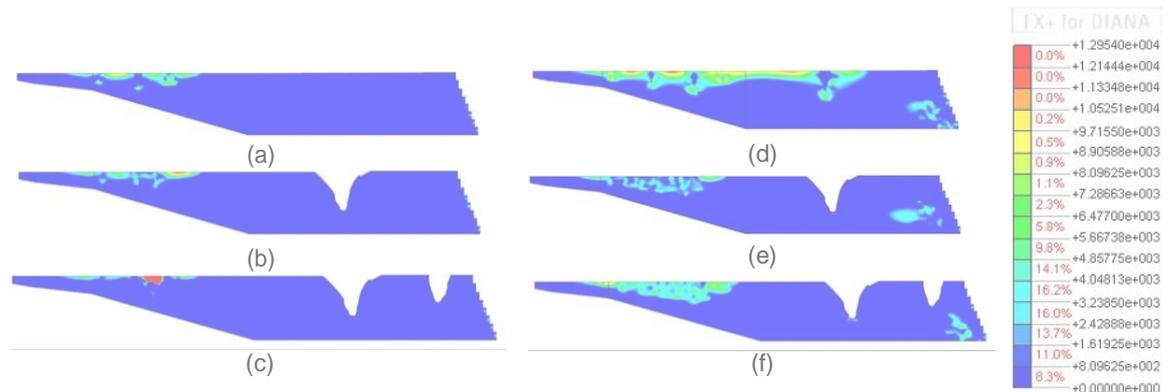


Figura 4.6. Distribución de esfuerzos principales de tracción (a), (b) y (c) sin considerar ISS y (d), (e) y (f) considerando ISS

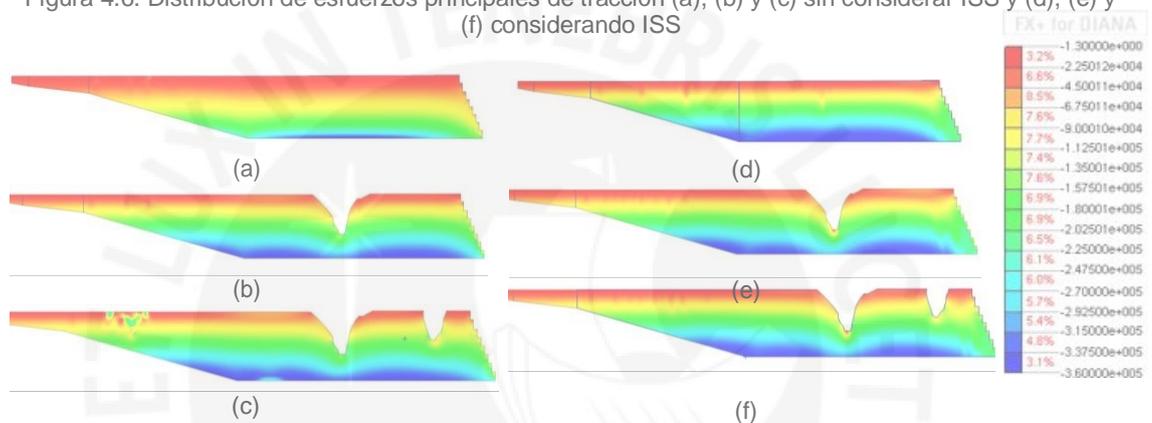


Figura 4.7. Distribución de esfuerzos principales de tracción (a), (b) y (c) sin considerar ISS y (d), (e) y (f) considerando ISS

En la Figura 4.8. se observan las zonas vulnerables debido a la aparición de las grietas en los distintos modelos, junto con el ancho máximo de grieta. En este caso, se observa claramente que, al considerar el suelo, se obtienen anchos de grieta del orden del doble del caso de la estructura fija en la base, debido a que el suelo permite que la estructura se deforme más. Además, al considerar la estructura fija, la mayor parte de las grietas ocurren en la zona que se encuentra dentro de la fachada oeste, mientras que, al considerar el suelo, se observan grietas considerables en la esquina inferior derecha de la estructura. Se puede observar también que la estructura en su estado intacto presentaba un agrietamiento en la parte superior central de la fachada, que no existe al presentar el aforado.

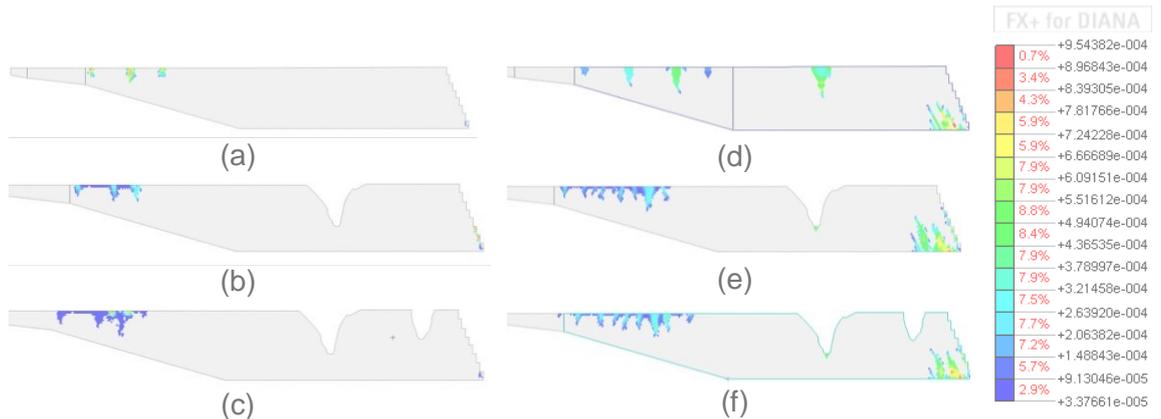


Figura 4.8. Ancho de grietas (a), (b) y (c) sin considerar ISS y (d), (e) y (f) considerando ISS

La comparación de los anchos máximos de grieta en los diferentes modelos se observa en la Figura 4.9 (a). Se puede notar que el ancho de grietas se duplica al considerar la interacción suelo estructura, debido a los mayores desplazamientos.

Por otro lado, las deformaciones verticales experimentadas en el suelo en la base de la pirámide para los modelos H1S, H2S y H3S se muestran en la Figura 4.9 (b). Se observa que las deformaciones son similares, y que el modelo H1S tiene una mayor deformación cerca a la mitad de la pirámide, probablemente debido a que posee una mayor masa al no presentar el aforado.

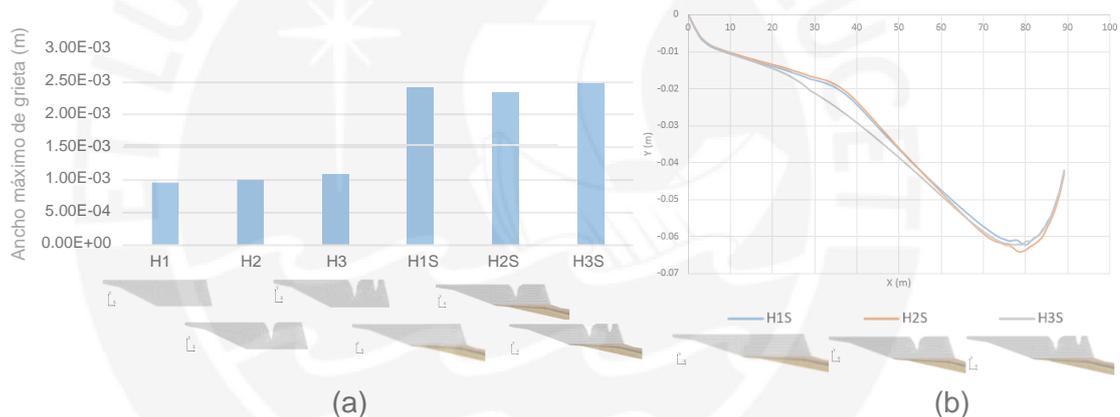


Figura 4.9. Resultados del análisis paramétrico bajo cargas de gravedad: (a) ancho máximo de grieta y (b) deformación vertical en la base

#### 4.4. Análisis dinámico lineal

##### 4.4.1. Registros Sísmicos

Los registros de acelerogramas registrados en la zona de Trujillo y que están disponibles al público en general pueden ser obtenidos de la Red acelerográfica del Cismid (Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres). Los acelerogramas disponibles actualmente cerca de la zona son los de los sismos del 26 de abril del 2015, de magnitud 5.7 y el del sismo del 13 de abril del 2015 de magnitud 5.

Las señales obtenidas fueron luego procesadas para su utilización en el software SeismoSignal (SeismoSoft, 2016). El programa permite adecuar la señal, a los intervalos de tiempo deseados; aplicar las correcciones necesarias como un filtro y la corrección de línea base.

Para la utilización de un acelerograma, (UNI & SENCICO, 2013) indica que se debe aplicar una corrección de línea base. Esto con el motivo de eliminar los desplazamientos con respecto al eje cero del acelerograma. Este problema ocurre cuando el acelerograma no está perfectamente nivelado en su emplazamiento y se traduce en errores importantes al obtener la velocidad o el desplazamiento. Este error se ve esquematizado en la Figura 4.10.

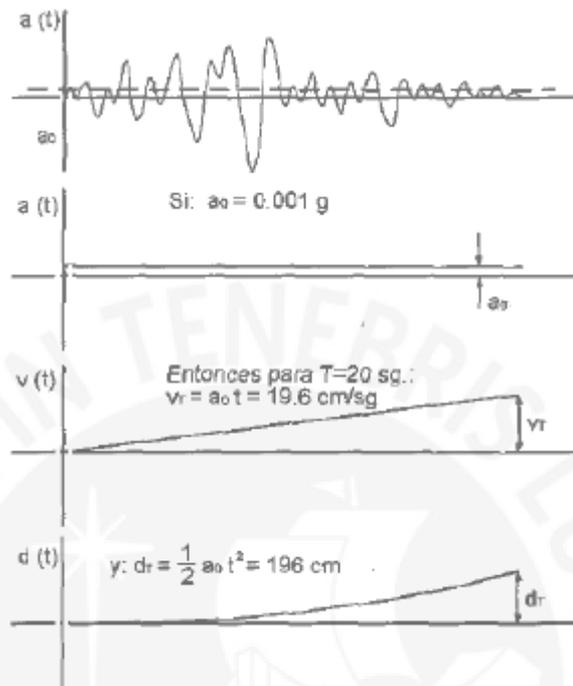


Figura 4.10. Error de línea base en un acelerograma (Hudson, 1979)

El software SeismoSignal (SeismoSoft, 2016) permite también obtener la velocidad, aceleración y desplazamiento del acelerograma, así como los espectros de respuesta y de Fourier para obtener las frecuencias predominantes en el sismo.

#### 4.4.2. Acelerogramas Compatibles con la Norma E.030

Los acelerogramas obtenidos de la red sismográfica del CISMID, para el departamento de La Libertad han sido escalados de manera que el espectro de respuesta se aproxime al espectro de la norma E.030 de diseño sismorresistente. Esto se basa en el hecho de que los registros usualmente no cubren todos los máximos de respuesta en la banda de frecuencias de interés (Bonnet & Plujades, 2002). Este escalamiento se realiza mediante el método de ajuste espectral, el cual

es un método numérico e iterativo en el que se ajusta el espectro de respuesta de un acelerograma ingresado para asemejarse al espectro de diseño del código local. Para realizarlo, se ingresa un registro de aceleraciones y se obtiene el espectro de respuesta de dicho registro. Luego, se identifican las diferencias comparando el espectro objetivo y el obtenido del registro. Finalmente, se adicionan fragmentos de ondas con amplitudes y fases adecuadas para lograr el ajuste deseado (UNI & SENCICO, 2013).

Este ajuste fue realizado con ayuda del software Seismo Match (SeismoSoft, 2016), el cual realiza el proceso iterativo al ingresar un acelerograma semilla, un espectro objetivo y definir los períodos mínimo y máximo para el cálculo, el factor de escala y la tolerancia.

Para el ajuste se utilizó un espectro de respuesta de la norma E.030 (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, 2018), en el que se consideraron los parámetros que se muestran en la tabla 5.1. El factor de zona para el lugar donde se encuentra la Huaca de la Luna es Z4 e igual a 0.45, representando la aceleración máxima esperada para un periodo de retorno de 475 años. El factor S del suelo se puede determinar analizando las velocidades de onda de corte obtenidos en los ensayos del análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) realizado por (Guillermo Zavala et al., 2015). Los resultados de dicho estudio se muestran en la Figura 4.11.

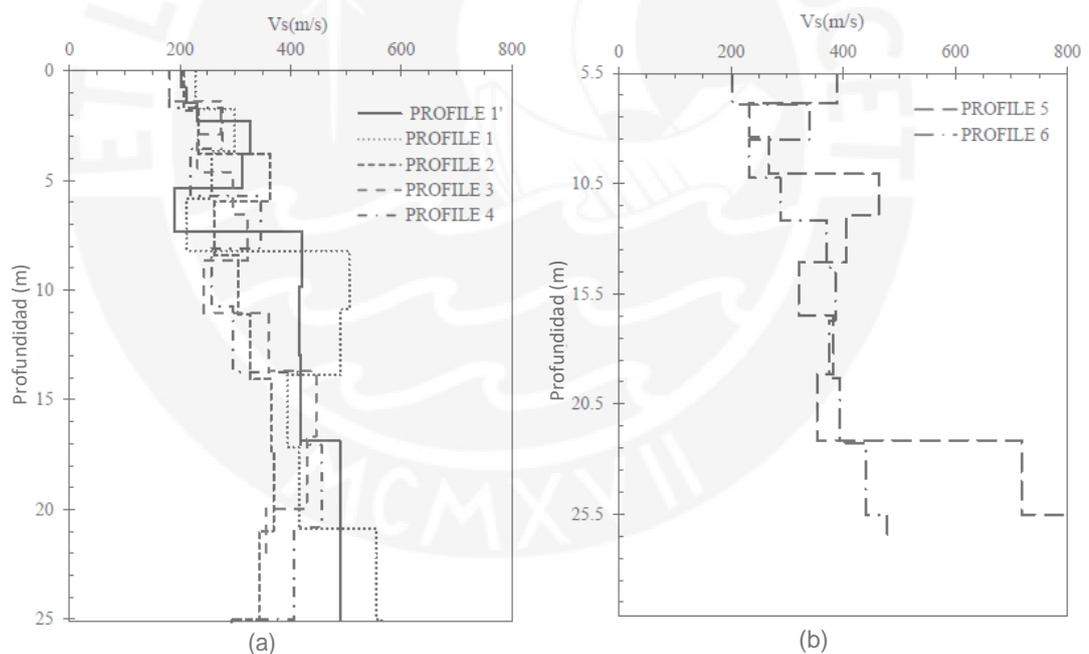


Figura 4.11. Perfil de velocidades de corte en la Fachada Norte. Área superior (a) e inferior (b) (Guillermo Zavala et al., 2015)

Se puede observar que las velocidades de onda de corte se encuentran entre aproximadamente 200 y 500 m/s, por lo que según la norma E.030, el suelo se clasificaría como S2 (velocidades de onda de corte entre 180 y 500 m/s). Este tipo de suelo, al ubicarse en una zona 4, produce un factor S de 1.05. Además, el período  $T_p$  del suelo considerado en la normal es de 0.6 s y el período largo  $T_L$  que define la zona con desplazamiento constante es de 2 s. Estos valores de períodos son particularmente importantes, debido a que definen la forma del espectro de respuesta objetivo, que determinará la amplitud de las frecuencias que estarán contenidas en el acelerograma que se utilizará para el análisis dinámico. Sin embargo, cuando se

analicen las estructuras considerando el suelo, no se considerará este factor S, debido a que el efecto de pasar por el suelo de la zona se considera en el modelo.

En este caso de análisis, lo importante es la forma del espectro de respuesta y no la magnitud de las aceleraciones, debido a que lo que se analiza es la amplificación de las ondas sísmicas al considerar las diferentes condiciones geométricas y el suelo.

Tabla 4.1. Parámetros utilizados para obtener el espectro de la norma

Parámetro	Valor
Z	0.45
S	1.05
Tp	0.6
TI	2
U	1
R	1

Luego de ingresar los acelerogramas en SeismoMatch y el espectro objetivo, se realiza el análisis para el ajuste y escalamiento. En la Figura 4.12. se observa el espectro objetivo, el espectro de respuesta del acelerograma original y el espectro luego del escalamiento. Se puede observar que luego del escalamiento el espectro sigue una tendencia mucho más similar a la del espectro de la norma E.030.

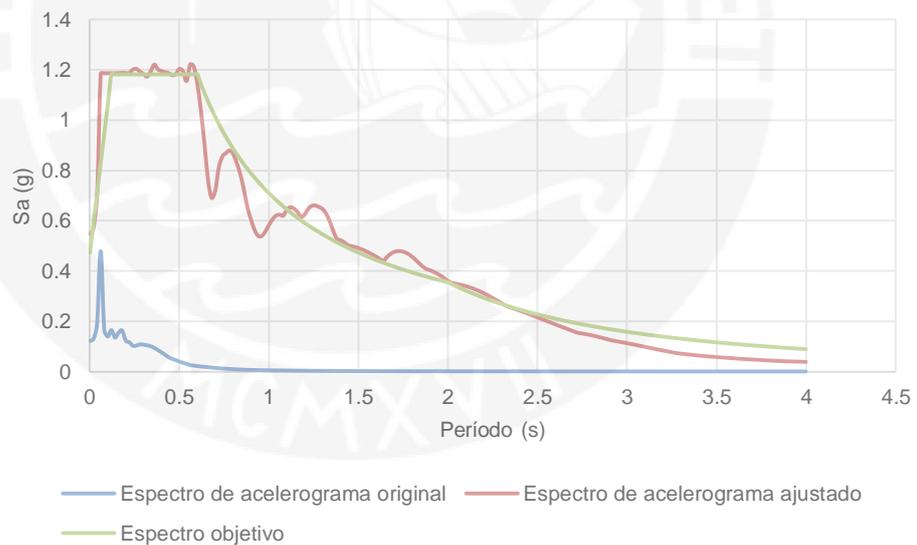


Figura 4.12. Comparación del espectro original y el espectro ajustado

De esta manera se genera un nuevo acelerograma a partir del original que será utilizado en el análisis tiempo historia para obtener resultados más satisfactorios (UNI & SENCICO, 2013). La comparación del acelerograma original y el escalado al espectro, con corrección de línea base, se muestra en la Figura 4.13.

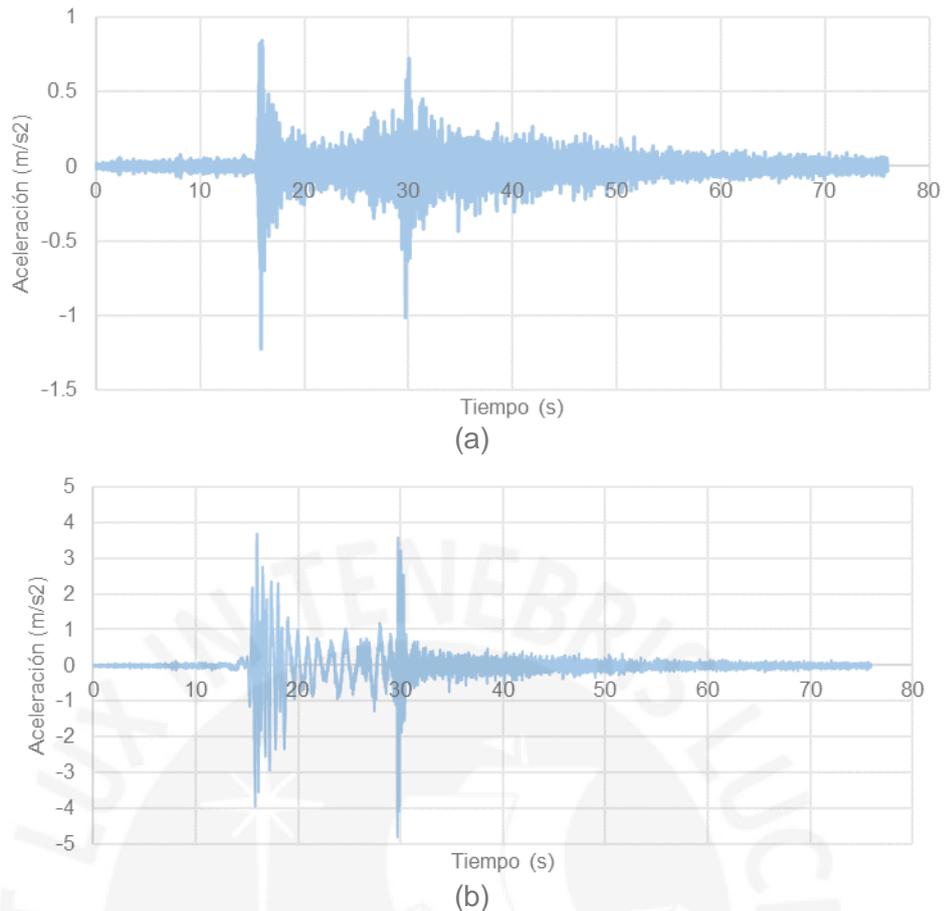


Figura 4.13. Acelerograma original y acelerograma escalado

Las señales introducidas se encuentran discretizadas en intervalos de tiempo de 0.01s. Esto cumple con las recomendaciones de Chopra (2007) para todos los casos, pues se cumple que el paso de tiempo es menor que el período fundamental de la estructura multiplicado por 0.1. Con los resultados del análisis modal, se obtiene que el paso elegido esta condición se cumple holgadamente en todos los casos.

#### 4.5. Resultados del análisis dinámico

Utilizando los métodos validados en el punto anterior, se realizó el modelamiento de la respuesta dinámica de la Huaca de la Luna. Se introdujo una señal sísmica horizontal correspondiente a la componente Este-Oeste (dirección de la pirámide principal) de un sismo registrado en la zona y escalado al espectro de la norma.

Se consideró un amortiguamiento de Rayleigh para la estructura de 5% del amortiguamiento crítico, basado en los dos primeros modos de vibración, los cuales deben ser los de mayor masa participativa en la dirección de análisis. Para esto, se realizó un análisis modal de la estructura, obteniéndose las frecuencias de vibración y los porcentajes de masa participativa en ambas direcciones. Los resultados del análisis modal se muestran en las Figuras 4.14 a 4.19. Finalmente, se consideraron las propiedades dinámicas, como la matriz de masa y amortiguamiento, y se realizó el análisis tiempo historia lineal.

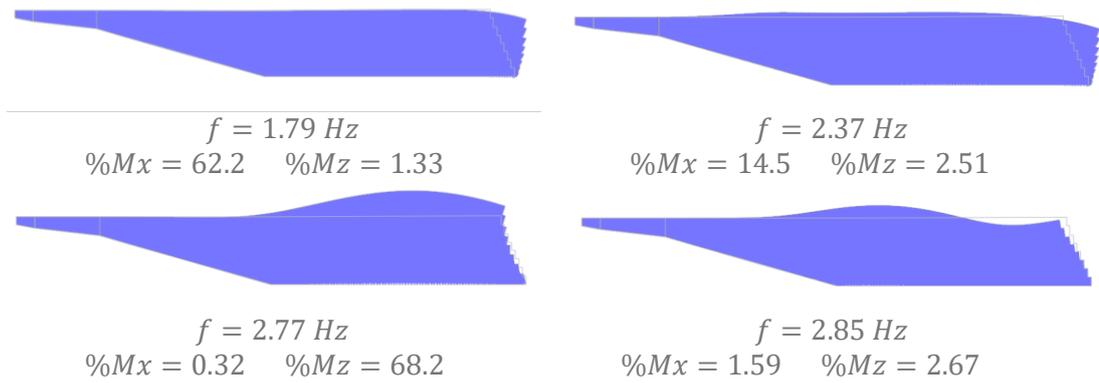


Figura 4.14. Principales modos identificados sin considerar ISS en el modelo H1. Frecuencias de vibración y porcentajes de masa participativa

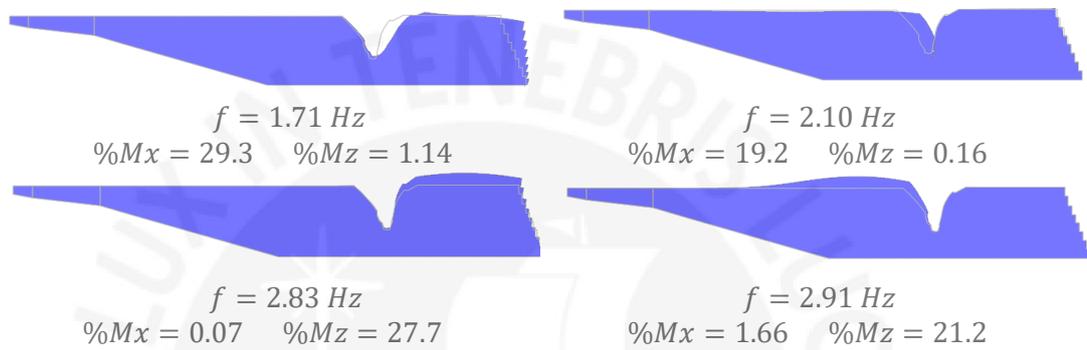


Figura 4.15. Principales modos identificados sin considerar ISS en el modelo H2. Frecuencias de vibración y porcentajes de masa participativa

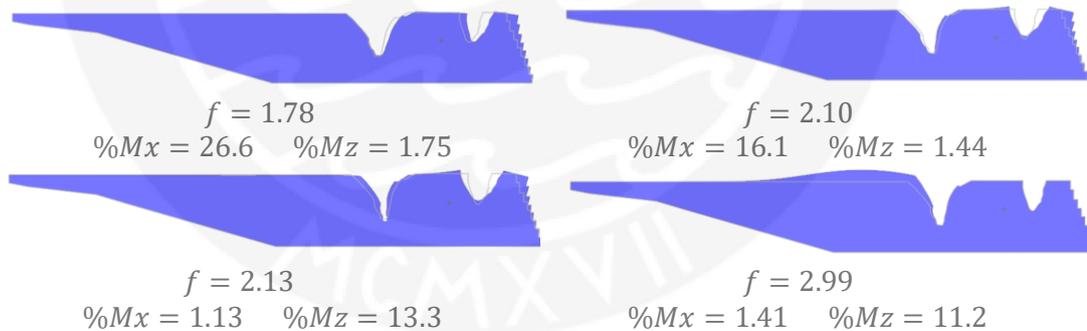


Figura 4.16. Principales modos identificados sin considerar ISS en el modelo H3. Frecuencias de vibración y porcentajes de masa participativa

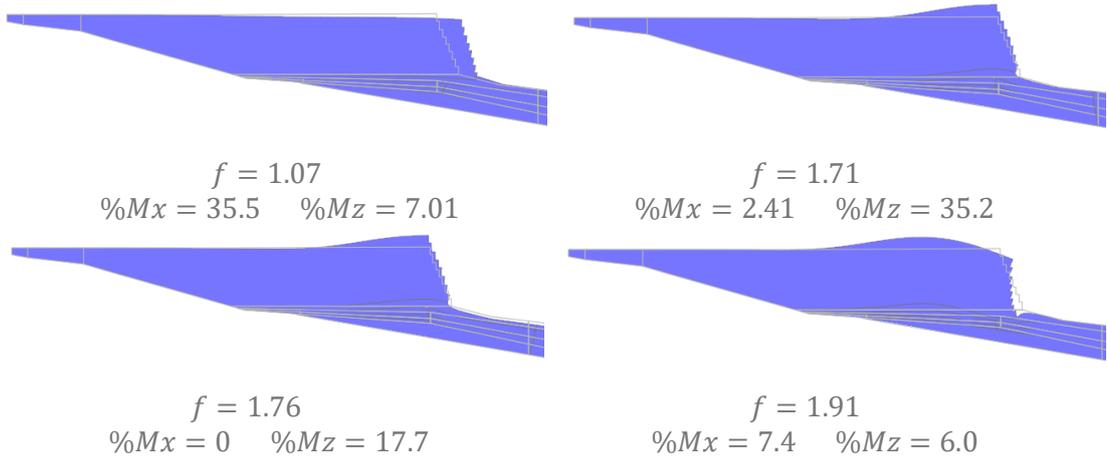


Figura 4.17. Principales modos identificados considerando en el modelo H1S. Frecuencias de vibración y porcentajes de masa participativa

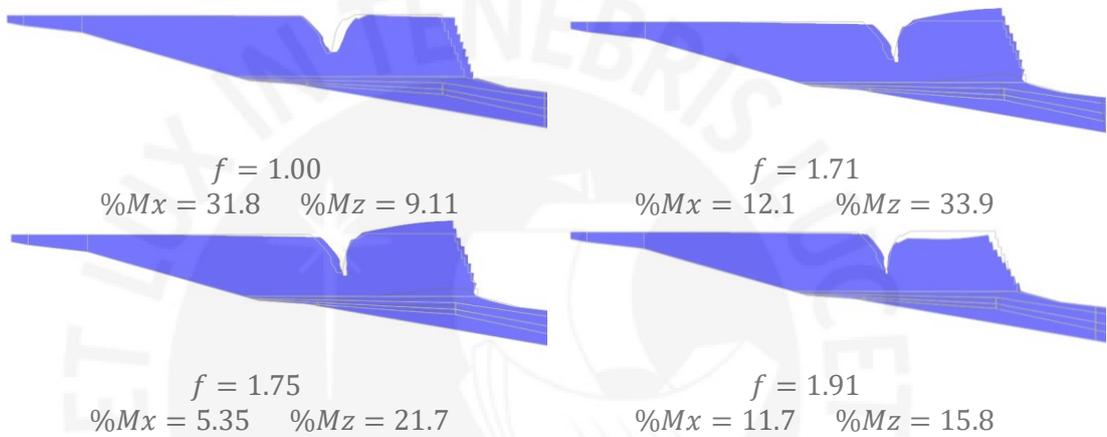


Figura 4.18. Principales modos identificados considerando en el modelo H2S. Frecuencias de vibración y porcentajes de masa participativa

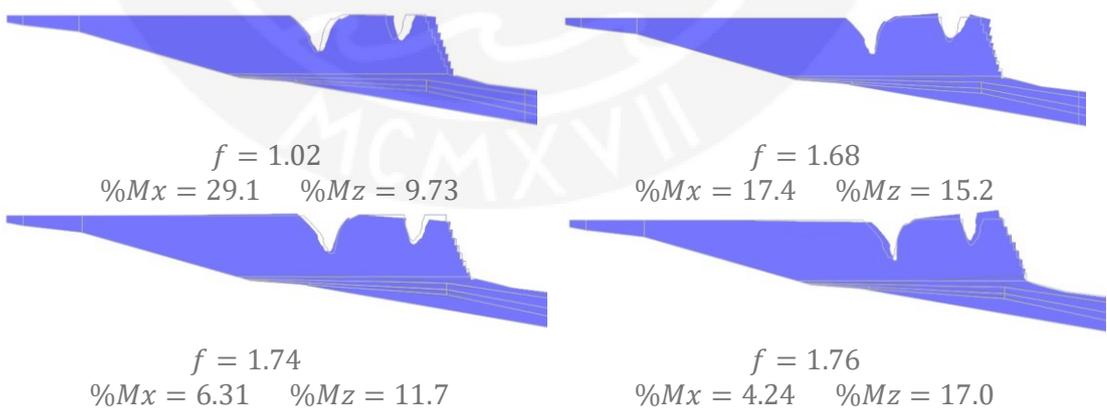


Figura 4.19. Principales modos identificados considerando ISS en el modelo H3S. Frecuencias de vibración y porcentajes de masa participativa

Al realizar el análisis tiempo historia, se obtuvieron resultados en el tiempo en los diferentes puntos de la estructura, de los cuales son de interés los valores máximos de aceleración y desplazamiento para cada uno de los casos. Los resultados de los desplazamientos máximos relativos (con respecto a la base de la estructura) del punto de la cara oeste se muestran en la Figura 4.20.

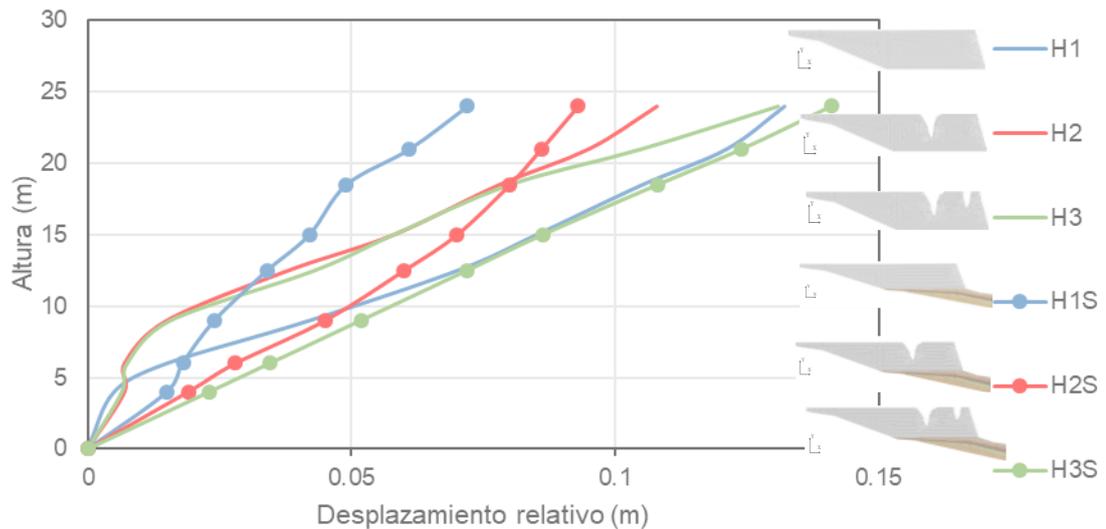


Figura 4.20. Desplazamientos máximos relativos vs la altura de los distintos modelos.

Se observa que considerar el suelo en el modelamiento no incrementa considerablemente los desplazamientos máximos relativos, en los casos de los modelos H1 y H2 incluso los atenúa. Esto se debe probablemente a las condiciones topográficas, que no amplifican las frecuencias contenidas en el sismo que recibe. En este caso, las variaciones en la respuesta dinámica debidas a los daños presentados y variaciones en la geometría que no siguen una misma tendencia.

Los resultados de la amplificación de la aceleración de la señal de salida con respecto a la de entrada se muestran en la Figura 4.21.

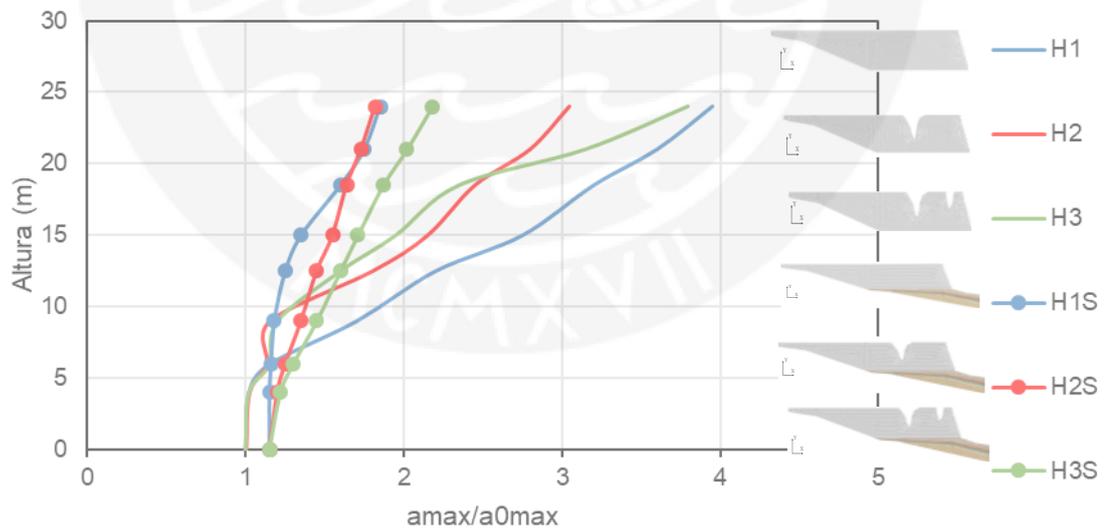


Figura 4.21. Amplificación de la aceleración vs la altura de los distintos modelos.

Se observa que la señal que recibe la estructura en la base se ve amplificada debido a su paso por el suelo, ya que, al considerar la interacción, la amplificación en el nivel de la base es mayor. Sin embargo, podemos observar que una vez que las ondas pasan del suelo a la estructura, la amplificación que se produce a lo largo de la altura de la construcción es menor en el caso de la Huaca interactuando con el suelo, ya que se obtiene una amplificación máxima de 2.12 en lugar del 3.96 obtenido al no

considerar el suelo. Esto significa una atenuación de la aceleración en el caso de la estructura con el suelo, y, por lo tanto, una fuerza sísmica menor. Nuevamente, las variaciones debido a la geometría no siguen una misma tendencia, pero hacen variar la magnitud de la aceleración debido a las diferentes frecuencias que posee la estructura al encontrarse dañada.

#### **4.6. Conclusiones**

Para realizar el modelo de la estructura en elementos finitos, primero se tuvieron que tener ciertas consideraciones para lograr que el modelo represente de manera adecuada la realidad. Se seleccionaron las propiedades mecánicas y leyes constitutivas en base a estudios previos realizados en la Huaca de la Luna.

Al realizar el análisis lineal bajo cargas de gravedad se pudo observar las zonas donde se concentran los esfuerzos y las formas de las deformadas. Por otro lado, al realizar el análisis no lineal se pudo observar la magnitud de los desplazamientos absolutos y relativos y las incursiones en el rango inelástico, así como las zonas vulnerables debido al agrietamiento y el ancho de grietas.

Podemos concluir que las variaciones en la geometría producen cambios en la respuesta sin una tendencia distinguible, en comparación con los cambios producidos al considerar la interacción con el suelo. Sin embargo, se observa que la distribución de esfuerzos y agrietamiento del estado intacto indica que la zona donde se encuentra el forado en el estado actual se dañaría bajo cargas de gravedad. Esto puede significar que cuando se realizaron las excavaciones esa zona ya se encontraba dañada, por lo que fue más fácil remover el material. Este es un resultado importante debido a que es consistente con las observaciones en campo de los daños en la estructura, y ayuda a explicar el estado actual debido a que la zona intermedia es donde se encuentra el forado y el borde derecho muestra un nivel de colapso.

Al considerar el suelo, la deformación de la estructura varía debido a la deformabilidad de este, cambiando las zonas de concentración de esfuerzos y las zonas vulnerables que se deben considerar al hacer una futura propuesta de intervención, en especial debido a la inclinación de los estratos de suelo. Además, al considerar el suelo las grietas obtenidas son aproximadamente el doble de anchas, lo cual indica que es importante considerar la interacción en el análisis.

En el caso del análisis dinámico, se obtuvieron acelerogramas de sismos reales de la red acelerográfica del CISMID y uno de estos fue escalado al espectro de la norma peruana para realizar un análisis tiempo historia.

Los resultados muestran que los desplazamientos relativos no incrementan considerablemente en el caso de estudio, e incluso pueden verse atenuados. Además, se obtuvo que la aceleración máxima obtenida en la parte más alta de la Huaca puede ser hasta 3.96 veces mayor a la recibida en la base sin considerar el suelo, y al considerarlo se obtiene una aceleración máxima menor, de hasta 2.12 veces la aceleración de la base. Los resultados sugieren que, en este caso de estudio, la topografía y las condiciones de cimentación ayudan a atenuar las fuerzas y deformaciones ocasionadas en la estructura al estar sometida a un movimiento sísmico. Sin embargo, como se puede comprobar en la literatura, esto no siempre es así, y es necesario realizar un estudio detallado para determinar el efecto de la compleja interacción dinámica entre el suelo y la estructura.



## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

Las conclusiones de la investigación son las siguientes:

- La Huaca de la Luna es una estructura patrimonial de gran importancia histórica y cultural. Por ello, los métodos de evaluación estructural deben respetar los principios de conservación y no ser invasivos en la medida de lo posible. Es por esto que para la evaluación estructural de dicha construcción se han realizado técnicas no invasivas como análisis de ondas superficiales en el suelo subyacente y fotogrametría y se planteó la realización del análisis sísmico mediante métodos numéricos que ayuden a predecir la respuesta de la estructura.
- El método de elementos finitos es una técnica numérica que permite la aproximación de problemas altamente complejos. Mediante este tipo de análisis numérico es posible resolver problemas estáticos y dinámicos de suelos, estructuras y su interacción. Para obtener una buena aproximación de la realidad mediante estos métodos, es importante considerar las diversas variables involucradas y definir de manera adecuada las propiedades mecánicas de los elementos.
- Al variar las condiciones geométricas debido a los daños sufridos en la estructura a lo largo de los años, se observa que la respuesta varía ligeramente. Sin embargo, se observa que, al considerar los cambios, existen diferentes zonas de concentración de esfuerzos al estar sometido a solicitaciones de peso propio, y diferentes magnitudes de amplificación sísmica en el caso de una aceleración en la base. Estas variaciones deberán tomarse en cuenta al realizar una futura propuesta de intervención. Además, al considerar la interacción con el suelo subyacente, se encuentran valores de la respuesta que difieren considerablemente. Usualmente, al realizar el análisis estructural se omite la interacción con el suelo y el efecto de amplificación que este produce. En la presente investigación se determinó que cuando se analiza una estructura de gran importancia como la Huaca de la Luna es importante considerar el efecto de la interacción con el suelo, pues de lo contrario no se podría conocer el efecto de amplificación o atenuación que este produce. Este efecto se puede traducir en un aumento de los esfuerzos a los que está sometida una estructura, pero, como se observa en este caso de estudio, en algunas situaciones también puede disminuir las solicitaciones.
- Cuando se realiza un análisis no lineal por cargas de peso propio, se puede observar la secuencia de aparición de grietas al incrementar la magnitud de la aceleración de la gravedad. Esto ayuda a identificar las zonas vulnerables y dónde se debe considerar realizar reparaciones o reforzamientos. El análisis por cargas de gravedad ayudó a determinar posibles razones de su estado actual de daño. Al analizar la estructura en su estado intacto se aprecia que la zona intermedia se daña, así como el borde derecho. Actualmente, la zona intermedia presenta un aforado debido a excavaciones, siendo probable que al realizarse estas excavaciones dicha zona ya haya estado dañada, facilitando la remoción del material. Por otro lado, el borde derecho se observa colapsado actualmente, lo que se puede deber a que se encontraba dañado debido a las grietas ocasionadas por las cargas de gravedad en el sistema suelo-estructura. Este importante resultado permite un diagnóstico preliminar del estado actual de daño de esta importante estructura patrimonial.

- Debido a que el análisis sísmico realizado en el presente trabajo es únicamente lineal, y los registros sísmicos empleados obligan a la estructura a incursiones en el rango no lineal, se puede concluir que los valores de desplazamientos y aceleraciones no son los que ocurrirían en la realidad, por lo que únicamente se analizan los cocientes entre desplazamientos y aceleraciones, que permiten analizar la amplificación producida. Artículos como el de (Çelebi et al., 2012) muestran que al realizar un análisis no lineal los desplazamientos y aceleraciones son menores, debido a que se producen fallas locales que impiden que la estructura pueda resistir más fuerza, y por lo tanto, más aceleraciones. Además, se han ignorado algunas variables que podrían influir considerablemente como la interacción con el resto de la estructura de la Huaca de la Luna. Sin embargo, los resultados obtenidos sirven para cuantificar la influencia de considerar la interacción con el suelo y las variaciones en la geometría.
- Para extender los resultados del presente trabajo, se podría realizar un análisis dinámico no lineal de la estructura para poder comparar la respuesta y determinar el daño que un sismo produciría en la estructura. Se debería también considerar la interacción con las otras partes de la estructura. Además, realizando una instrumentación de la Huaca de la Luna y tomando mediciones de su respuesta a vibraciones ambientales o de sismos, se puede realizar una calibración del modelo que permita obtener resultados más cercanos a la realidad.



## Bibliografía

- Aguilar, R., Zavala, G., Castañeda, B., Lopez, S., Retamozo, S., Montesinos, M., ... Perucchio, R. (2015). Structural Damage Assessment of Huaca de la Luna , Peru : Preliminary Results from Ongoing Multidisciplinary Study.
- Alva Hurtado, J. E. (2006). *Dinámica de Suelos*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Applied Technology Council. (1980). ATC- 14: Evaluating the Seismic Resistance of Existing Buildings.
- Applied Technology Council. (1989). ATC-22: A Handbook for Seismic Evaluation of Existing Buildings.
- ASCE 31-03. (2003). Seismic Evaluation of Existing Buildings, (Tier 1), 446.
- Ascione, F., Ceroni, F., De Masi, R. F., de' Rossi, F., & Pecce, M. R. (2015). Historical buildings: Multidisciplinary approach to structural/energy diagnosis and performance assessment. *Applied Energy*.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.089>
- Astwood Rojas, H. L. (2013). Efecto de los Suelos Blandos en el Comportamiento Estructural. Retrieved September 19, 2016, from  
<https://capacitacioneingenieria.wordpress.com/tag/estructuras-sismicas/>
- Bernal, I., & Tavera, H. (2002). Geodinamica, Sismicidad y Energia Sismica en Peru. *Instituto Geofísico Del Peru; Centro Nacional de Datos Geofísicos*.
- Bernat, G. (n.d.). Características de los distintos períodos de la cultura mochica. Retrieved from  
<http://www.gabrielbernat.es/peru/preinca/cultpreincaicas/dregionales/MOCHE/moche.html>
- Bolisetti, C., Whittaker, A. S., & Coleman, J. L. (2018). Linear and nonlinear soil-structure interaction analysis of buildings and safety-related nuclear structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 107(January 2016), 218–233.  
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.01.026>
- Bonnet, R., & Plujades, L. (2002). Generación de Acelerogramas Artificiales Compatibles con un Espectro de Respuesta. Aplicación a Eventos Recientes en Colombia y España. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 18, 297–308.
- Bosiljkov, V., Uranjek, M., Žarnić, R., & Bokan-Bosiljkov, V. (2010). An integrated diagnostic approach for the assessment of historic masonry structures. *Journal of Cultural Heritage*, 11(3), 239–249.  
<https://doi.org/10.1016/j.culher.2009.11.007>
- Botero, J. C. (2002). Respuesta de Sistemas Suelo-Estructura con Amortiguamiento en la Base. *Universidad EAFIT*, (125), 51–62.
- Bottero, A., Negre, R., Pastor, J., & Turgeman, S. (1980). Finite element method and limit analysis theory for soil mechanics problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 22(1), 131–149.  
[https://doi.org/10.1016/0045-7825\(80\)90055-9](https://doi.org/10.1016/0045-7825(80)90055-9)
- Burkardt, J. (2011). Meshing for the Finite Element Method. In *Advanced Graduate Seminar*. Department of Scientific Computing Florida State University.

- Castillo Butters, L. J., & Donnan, C. B. (2009). Los Mochicas del Norte y los Mochicas del Sur. *Programa Arqueológico San José de Moro*.
- Çelebi, E., Göktepe, F., & Karahan, N. (2012). Non-linear finite element analysis for prediction of seismic response of buildings considering soil-structure interaction. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(11), 3495–3505. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-3495-2012>
- Chácará, C., Zvietcovich, F., Aguilar, R., Perucchio, R., Marques, R., Castañeda, B., ... Morales, R. (2014). Preliminary structural assessment of adobe archaeological remains of “Huaca de la Luna” in Trujillo, Peru. *9th International Masonry Conference*, (July), 1–12. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2789.4809>
- Chácará, C., Zvietcovich, F., Briceño, C., Marques, R., Perucchio, R., Castañeda, B., ... Aguilar, R. (2014). On-site investigation and numerical analysis for structural assessment of the archaeological complex of Huaca de la Luna. In *9th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions*. Mexico City, Mexico. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2903.0562>
- Chopra, A. K. (2005). *Earthquake Dynamics of Structures, A Primer* (2nd ed.). Earthquake Engineering Research Institute.
- Chopra, A. K. (2007). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering* (3rd ed.). Prentice Hall.
- Colindres Selva, R. (1983). *Dinámica de Suelos y Estructuras Aplicadas a la Ingeniería Sísmica* (1era ed.). Mexico D. F., Mexico: LIMUSA S.A.
- Computers and Structures. (2016). Sap2000.
- Das, B. M., & Sivakugan, N. (2007). Settlements of shallow foundations on granular soil — an overview. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 1, 19–29.
- Di Fiore, V. (2010). Seismic site amplification induced by topographic irregularity: Results of a numerical analysis on 2D synthetic models. *Engineering Geology*, 114(3–4), 109–115. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.05.006>
- DIANA FEA. (2013a). Displacement method ANALyser, Release 9.4, User’s Manual. TNO DIANA BV, Delft.
- DIANA FEA. (2013b). Total Strain Crack Models. *Displacement Method ANALyser, Release 9.4, User’s Manual*. TNO DIANA BV, Delft.
- DIANA FEA, & Garofano, A. (2016). Seismic Soil Response Analysis with DIANA 10.
- Eslami, A., Ronagh, H. R., Mahini, S. S., & Morshed, R. (2012). Experimental investigation and nonlinear FE analysis of historical masonry buildings - A case study. *Construction and Building Materials*, 35, 251–260. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.002>
- Eurocode. (1998). Eurocode 8 part 3: Assessment and retrofitting of buildings.
- Federal Emergency Management Agency. (1998). FEMA 310: Handbook for the Seismic Evaluation of Buildings. Retrieved from <https://www.wbdg.org/ccb/DHS/ARCHIVES/fema310.pdf>
- Fish, J., & Ted Belytschko. (2007). *A First Course in Finite Elements* (1st ed.). England.

- Gallagher, R. H. (1975). *Finite Element Analysis Fundamentals*. Prentice Hall.
- Guevara Morales, N. E., Osorio Rodríguez, S. A., & Vargas, E. A. (2006). *Evaluación de la Capacidad Estructural del Edificio de la Biblioteca de las Ingenierías y Arquitectura, Utilizando Análisis Estático No Lineal (Pushover)*. Universidad de El Salvador.
- Hudson, D. E. (1979). *Reading and interpreting strong motion accelerograms*. (E. E. R. Institute, Ed.). Pasadena, California, USA.
- ICOMOS. (2003). Principles for the Analysis, Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage.
- Instituto de Investigación en Desastres Y Medio Ambiente IIDMA. (2002). Mapa de Peligros de la Ciudad de Trujillo y Zonas Aledañas.
- Irigoyen, G. (1931). *Monografía de la Dióc. de Trujillo* (Vol. 2). Trujillo.
- Krishnamoorthy, A., & Anita, S. (2016). Soil-structure interaction analysis of a FPS-isolated structure using finite element model. *Structures*, 5, 44–57. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2015.08.003>
- Liang, J., Fu, J., Todorovska, M. I., & Trifunac, M. D. (2016). In-plane soil-structure interaction in layered, fluid-saturated, poroelastic half-space I: Structural response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 81, 84–111. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.10.018>
- Libric, C. (2016). *Modelling of the seismic performance of a rammed earth building*. Universidade do Minho.
- Mansfield Hastings, C., & Moseley, M. E. (1975). The Adobes of Huaca del Sol and Huaca de La Luna. *Society for American Archaeology*, 40(2), 196–203.
- Matinmanesh, H., & Asheghabadi, M. S. (2011). Seismic analysis on soil-structure interaction of buildings over sandy soil.pdf. *Procedia Engineering*, (14), 1737–1743.
- McGuire, W., Gallagher, R. H., & Zienkiewicz, R. D. (2000). *Matrix Structural Analysis* (2nd ed.).
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. (2017). Norma E.080: Adobe. *Reglamento Nacional de Edificación (RNE)*.
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. (2018). Norma E.030: Diseño Sismorresistente. *Reglamento Nacional de Edificación (RNE)*.
- Mitropoulou, C. C., Kostopanagiotis, C., Kopanos, M., Ioakim, D., & Lagaros, N. D. (2016). Influence of soil-structure interaction on fragility assessment of building structures. *Structures*, (6), 85–98.
- Muñoz, A. (2015). *Ingeniería Sismorresistente*. Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Palm, R., & Hodgson, M. E. (1992). After a California Earthquake: Attitude and Behavior Change. *University of Chicago Press*, (233).
- Patronato Huacas del Valle de Moche. (2011). La Huaca de La Luna. Retrieved from <http://www.huacasdemoche.pe>
- Ramírez, E., Montesinos, M., Marques, R., Morales, R., Uceda, S., Lourenço, P. B., & Aguilar, R. (2015). Mechanical analysis of adobe archaeological masonry

- under uniaxial compressive loading: the case of Huaca de la Luna. In *3rd International Conference on Mechanical Models in Structural Engineering*. Seville, Spain. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3471.9445>
- Rubén Boroschek y Asociados Ltda. (2016). Estimación de Amenaza Sísmica: Huaca de la Luna, 1–136.
- SeismoSoft. (2016a). SeismoMatch.
- Silgado Ferro, E. (1978). Historia de los Sismos Más Notable Ocurridos en el Perú. *Serie C. Geodinámica e Ingeniería Geológica*, (3).
- Tavera, H., & Buforn, E. (1998). Sismicidad y sismotectónica del Perú. *Física de La Tierra*, 10, 187–219.
- Tavera Vega, L. (2011). Sitios Arqueológicos: Huaca de la Luna. Retrieved from <http://www.arqueologiadelperu.com.ar/laluna.htm>
- Uceda, S, Mujica, E., & Morales, R. (2001). Investigaciones en la Huaca de la Luna 2001. *Facultad de Ciencias Sociales Universidad Nacional de Trujillo*.
- Uceda, Santiago. (2001). Investigations at Huaca de la Luna , Moche Valley : An example of Moche religious architecture. *Studies in the History of Art*.
- UNI, & SENCICO. (2013). Generación de Acelerogramas Sintéticos para la Costa del Perú. *Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres CISMID*.
- USGS. (2015). The Modified Mercalli Scale. Retrieved from <http://earthquake.usgs.gov/learn/topics/mercalli.php>
- Vásquez, M., & López, E. (2001). *El Método de los Elementos Finitos Aplicado al Análisis Estructural*. Madrid.
- Wang, S., & Hao, H. (2002). Effects of random variations of soil properties on site amplification of seismic ground motions, 22, 551–564.
- Wolf, J. (1997). Spring-Dashpot-Mass Models For Foundation Vibration. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 26, 931–934.
- World Monument Foundation. (2016). Huaca de la Luna: Moche Temples and Gods. Retrieved from <https://www.wmf.org/publication/huaca-de-la-luna-moche-temples-and-gods-bilingual>
- Zavala, G., López, S., Ebinger, C., Pando, M., Lambert, C., Morales, R., ... Aguilar, R. (2014). Preliminary geophysical survey for assessing the geotechnical conditions and geohazards at Huaca de la Luna , Perú.
- Zavala, Guillermo, López, S., Pando, M., & Zegarra, J. (2015). Geotechnical and geophysical exploration in archaeological heritage : initial assessment at Huaca de la Luna. In *Proceeding of the 15th Pan- american Conference on Soil Mechanics and Geotechnical En- gineering*. (pp. 557–564). Buenos Aires, Argentina.
- Zhang, L., Goh, S. H., & Liu, H. (2017). Seismic response of pile-raft-clay system subjected to a long-duration earthquake: centrifuge test and finite element analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 92(November 2015), 488–502. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.10.018>