



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Pontificia Universidad Católica del Perú

Escuela de Posgrado

Metodología numérica automatizada para la evaluación de la
respuesta dinámica de construcciones prehispánicas de piedra de
junta seca en el Perú

Tesis para obtener el grado académico de Doctor en Ingeniería que presenta:

Leonel Lipa Cusi

Asesores:

Sabino Nicola Tarque Ruiz

Luca Pelà

Lima, 2024

Informe de Similitud

Yo, Sabino Nicola Tarque Ruíz, investigador de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada “Metodología numérica automatizada para la evaluación de la respuesta dinámica de construcciones prehispánicas de piedra de junta seca en el Perú”, del autor:

Leonel Lipa Cusi

dejo constancia de lo siguiente:

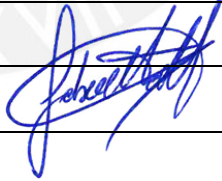
- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 9%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 01/04/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis, y no se advierte indicios de plagio. El sustento es el siguiente:

Que es un trabajo original y las referencias se encuentran citadas de forma correcta.

- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha:

Madrid, 01 de abril de 2024

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: Tarque Ruiz Sabino Nicola	
DNI: 40225394	Firma 
ORCID: 0000-0002-1029-9240	



DEDICATORIA

Con todo el cariño y amor a mi familia que siempre ha estado apoyándome en el transcurso de la tesis, a pesar de la distancia. Es gracias a ellos que he logrado llegar tan lejos en mi carrera profesional, muchas gracias por su apoyo y espero que este no sea el final de mis estudios, hay todo un mundo por conocer.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera agradecer a la Pontificia Universidad Católica del Perú, que gracias a todos los fondos que me han otorgado se ha podido lograr todo este gran proyecto. Esto no hubiera sido posible sin el apoyo constante de mi asesor, el profesor Nicola Tarque, quien me motivó a continuar y participar en todas estas oportunidades. Gracias al profesor Nicola es que he podido conocer el mundo, compartir y visitar muchas culturas que en mi vida no pensé conocer.

En segundo lugar, agradezco a la Universidad Politécnica de Cataluña de España, por acogerme entre sus aulas y darme la posibilidad de obtener el doble grado. Tampoco este gran logro hubiera sido posible sin el soporte de mi asesor, el profesor Luca Pelà, que gracias a sus consejos y apoyo incondicional he logrado transmitir mi proyecto en el ámbito internacional.

En tercer lugar, agradezco al profesor José María Goicolea y al Grupo de Mecánica Computacional de la Universidad Politécnica de Madrid por el apoyo con las facilidades del software Abaqus, y en la guía constante para la modelación numérica de estructuras.

Por otro lado, detallo a continuación los fondos obtenidos durante este proyecto:

- Fondos de Apoyo a la Investigación 2021 (FAI) de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP)
- Fondos de Apoyo a la Investigación 2022 (FAI) de la PUCP.
- Subvención Erasmus+ Educación Superior para la movilidad de estudiantes 2022.
- Fondo de Apoyo a la Movilidad Internacional Estudiantil de Posgrado 2022 de la PUCP.
- Fondo Concursable Marco Polo – Doctorados cotutelas de la Escuela de Posgrado PUCP.
- Fondo Concursable DARI para apoyo a los grupos de investigación PUCP.

RESUMEN

El estudio y la conservación del patrimonio de estructuras de piedra es una preocupación mundial, sobre todo, si estas construcciones están ubicadas en zonas sísmicas. En el Perú -debido a su gran variedad cultural e histórica- existe un gran número de construcciones de piedra en diferentes sitios arqueológicos, abarcando varias tipologías constructivas. Lamentablemente, gran parte de estas construcciones aún no han sido evaluadas estructuralmente, por lo que se desconoce su comportamiento estructural. También, no se cuenta con una taxonomía de tipologías estructurales y, por ende, diversas características de las construcciones existentes son desconocidas. Una forma de evaluar el comportamiento dinámico no lineal de estas estructuras es usando una rigurosa -pero rápida- metodología numérica que reproduzca adecuadamente los diferentes mecanismos de fallo, basada en la dinámica de cuerpos rígidos bajo el enfoque del método de elementos finitos.

Como una primera contribución, en este proyecto se presenta una clasificación taxonómica de construcciones prehispánicas de piedra en el Perú a partir de un estudio de campo. A partir de esta taxonomía, se clasificaron diversos sitios arqueológicos de las regiones de Puno y Cusco, y se identificaron las tipologías más recurrentes de estas regiones.

Por otro lado, se elaboraron novedosos códigos en Python, para la obtención del modelo geométrico de estructuras de junta seca, a partir de las imágenes tomadas por un cámara, o de una fotografía existente (incluyendo la identificación de las piedras y las juntas por medio de la segmentación de imágenes). Estas rutinas permiten crear el modelo 3D de cada bloque (piedra), ensamblarlos y exportarlos a un programa de análisis numérico para evaluaciones posteriores.

Para el desarrollo de la metodología numérica, se propone la dinámica de los cuerpos rígidos bajo el enfoque del método de los elementos finitos. Cada bloque de piedra se considera como un cuerpo rígido interconectado con otros bloques mediante interfaces no lineales. Esta metodología es validada usando Abaqus, basado en los resultados de ensayos experimentales en esta tesis. En la campaña experimental se construyeron tres muros con bloques de concreto simulando la geometría de estructuras Inca. Los muros fueron construidos sobre una mesa inclinable y fueron ensayados por volteo fuera de su plano. Luego, se elaboraron modelos numéricos de estos ensayos, en los cuales se calibraron las propiedades de contacto con tal que simulen correctamente el comportamiento experimental. Los resultados numéricos del peso, el ángulo de colapso, los desplazamientos relativos en distintos puntos de la estructura y los mecanismos de colapso fueron muy similares a los registrados experimentalmente.

Como caso de estudio, se evaluó numéricamente la sección de un muro de contención Inca de Sacsayhuamán, Cusco, frente a diversas acciones sísmicas. El modelo geométrico completo del muro de piedra se obtuvo mediante las rutinas de Python. El terreno contenido detrás del muro se representó por partículas de elementos discretos. Las propiedades del modelo numérico fueron tomadas de la campaña experimental y de calibración, y las frecuencias predominantes de la estructura se obtuvieron por medio del enfoque de vibraciones. Se verificó que la estructura puede soportar adecuadamente estos registros sísmicos escalados hasta una aceleración pico de 0.1 g; sin embargo, la estructura sufre desplazamientos remanentes considerables para registros escalados superiores o iguales a 0.2g.

Se concluye que la metodología planteada permite evaluar las estructuras piedra de junta seca de una manera rigurosa, y así conocer si la estructura debe ser intervenida para asegurar su funcionalidad. Se espera que los resultados de esta tesis doctoral puedan contribuir al estudio de las construcciones patrimoniales de piedra, y abrir posibilidades de mejora de la metodología ante diversas configuraciones estructurales.

ABSTRACT

The study and the conservation of stone heritage is a global concern, mainly when these constructions are in seismic zones. Due to its great cultural and historical diversity, Peru has many stone constructions in different archaeological sites, covering different construction typologies. Unfortunately, many of these constructions have not yet been structurally evaluated, so their structural behaviour is unknown. In addition, there is no classification of the stone structural typologies (taxonomy), so the different characteristics of existing constructions are unknown. One way to study the nonlinear dynamic behaviour of these stone structures is to use a rigorous -but fast- numerical methodology to adequately reproduce the different failure mechanisms based on the dynamics of rigid bodies within the finite element method.

Then, this work presents a taxonomic classification of prehispanic stone constructions in Peru, derived from a field study, as the first contribution. Based on this taxonomy, several archaeological sites in Puno and Cusco were classified, and the most common typologies of these regions were identified.

The research also proposes novel algorithms developed in Python to obtain the geometric model of dry-joint stone structures using images taken by a camera, a mobile phone, or an existing photograph (including identification of stones and joints, named image segmentation). These routines allow the creation of a 3D model of each block (stone), assembling them, and exporting them to a finite element program for further evaluation.

Regarding developing a numerical methodology, the dynamic of rigid bodies within the finite element method is proposed here. Each stone block is considered a rigid body interconnected with other blocks through nonlinear interfaces. This methodology was validated using Abaqus, based on the results of experimental tests developed in this thesis. The experimental campaign was carried out on three walls built with concrete blocks, simulating the geometry of the Inca structures. The walls were built on a tilting table and tested by rotating them out of the plane of the wall. Then, numerical models of the tests were developed by considering each stone as a rigid body and calibrating the contact properties to simulate the experimental behaviour correctly. The numerical results in weight, collapse angle, relative displacements at different points of the structure and collapse mechanisms were very similar to those obtained in the experimental campaign.

As a case study, a section of an Inca stone wall from Sacsayhuaman, Cusco, was numerically evaluated using various seismic records. The complete geometric model of the stone wall was automatically obtained using the Python routines. Furthermore, discrete element particles represented the soil behind the wall. The properties of the numerical model were obtained from the experimental campaign, and the predominant frequencies of the structure were obtained using the vibration approach. As a result, the structure can adequately support these seismic records scaled up to a peak acceleration of 0.1g. However, it suffers significant residual displacements for scaled records greater than 0.2 g.

The proposed numerical methodology allows the rigorous evaluation of dry-jointed stone structures, knowing if the structure should be intervened to ensure its functionality. Therefore, it is expected that the results of this research will be used to study other stone constructions, opening possibilities for improving the methodology for different structural configurations.

ÍNDICE

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación.....	4
1.3. Objetivos.....	5
1.3.1. <i>Objetivo general</i>	5
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i>	5
1.4. Metodología.....	5
1.5. Limitaciones.....	6
CAPITULO 2: ESTADO DEL ARTE.....	8
2.1. Generalidades.....	8
2.2. Construcciones de piedra en el Perú.....	8
2.2.1. <i>Evolución de los materiales según su cronología</i>	8
2.2.2. <i>Características de los sillares de piedra</i>	14
2.2.3. <i>Inclinación de muros prehispánicos</i>	16
2.2.4. <i>Muros de contención de piedra</i>	16
2.2.5. <i>Vibración ambiental en estructuras de piedra</i>	18
2.3. Método de elementos finitos (FEM).....	19
2.3.1. <i>Macro modelado</i>	19
2.3.2. <i>Modelado con propiedades de contacto</i>	22
2.3.3. <i>Modelado con propiedades de contacto y sólidos rígidos</i>	24
2.4. Método de elementos discretos (DEM).....	25
2.4.1. <i>Modelado con esferas y agrupamiento de esferas</i>	25
2.4.2. <i>Modelado con discretización de sólidos</i>	29
2.5. Método de elementos combinados finito-discretos (FDEM).....	31
2.6. Procesamiento de imágenes.....	34
2.7. Resumen.....	38
2.7.1. <i>Construcciones de piedra en el Perú</i>	38
2.7.2. <i>Modelación numérica</i>	38
2.7.3. <i>Procesamiento de imágenes</i>	40
CAPITULO 3: TAXONOMÍA DE TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES DE CONSTRUCCIONES PREHISPÁNICAS DE PIEDRA EN EL PERÚ.....	41
3.1. Generalidades.....	41
3.2. Sitios arqueológicos de acceso público.....	41

3.3.	Criterios taxonómicos	43
3.3.1.	<i>Clasificación según la época de construcción</i>	43
3.3.2.	<i>Clasificación según el uso de la construcción</i>	44
3.3.3.	<i>Clasificación según la altura actual de la construcción</i>	45
3.3.4.	<i>Clasificación según las características de la sección transversal de la estructura</i>	46
3.3.5.	<i>Clasificación según el tipo de aparejo</i>	48
3.3.6.	<i>Clasificación según el tipo de junta</i>	49
3.3.7.	<i>Clasificación según el tamaño de las piedras</i>	50
3.3.8.	<i>Clasificación según el acabado de las piedras</i>	51
3.4.	Evaluación de campo	52
3.5.	Caso de estudio 1: Muros de piedra en Puno	54
3.6.	Caso de estudio 2: Muros de piedra en Cusco	58
3.7.	Resumen.....	70
CAPITULO 4: PROCESAMIENTO DE IMÁGENES		72
4.1.	Generalidades.....	72
4.2.	Códigos o rutinas	72
4.3.	Segmentación de imágenes	72
4.4.	Códigos elaborados para la obtención del modelo geométrico 2D.....	73
4.5.	Código para la obtención del modelo geométrico 3D en Abaqus.....	77
4.6.	Resumen.....	78
CAPITULO 5: VERIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE SÓLIDOS RÍGIDOS EN ABAQUS		
	80	
5.1.	Generalidades.....	80
5.2.	Métodos de solución por integración directa en el tiempo	80
5.3.	Modelación de los muros por elementos finitos (FEM).....	81
5.3.1.	<i>Elementos finitos</i>	81
5.3.2.	<i>Comportamiento mecánico de los cuerpos rígidos</i>	81
5.3.3.	<i>Comportamiento mecánico de las juntas de contacto</i>	82
5.4.	Modelación del suelo por elementos discretos (DEM)	85
5.5.	Validación del software	86
5.6.	Resumen.....	89
CAPITULO 6: VERIFICACIÓN DEL ENFOQUE BASADO EN VIBRACIONES.....		90
6.1.	Generalidades.....	90

6.2.	Complejo arqueológico de Sacsayhuamán	90
6.3.	Modelación, evaluación y calibración de las propiedades de un estructura de junta seca	92
6.4.	Aplicación a un muro del sitio arqueológico de Sacsayhuamán.....	96
6.4.1.	<i>Modelación numérica FEM</i>	96
6.4.2.	<i>Enfoque basado en vibraciones</i>	98
6.4.3.	<i>Evaluación para diferentes registros sísmicos peruanos</i>	102
6.5.	Resumen.....	108
CAPITULO 7: CAMPAÑA EXPERIMENTAL DE ENSAYOS POR VOLTEO DE MUROS DE JUNTA SECA		110
7.1.	Generalidades.....	110
7.2.	Campaña experimental.....	110
7.2.1.	<i>Modelos elaborados</i>	110
7.2.2.	<i>Diseño de mezcla</i>	114
7.2.3.	<i>Propiedades del concreto fresco y endurecido</i>	117
7.3.	Construcción de los muros de bloques de concreto	118
7.3.1.	<i>Bloques de concreto</i>	118
7.3.2.	<i>Equipo mecánico para el volteo de muros</i>	118
7.3.3.	<i>Muros construidos</i>	119
7.3.4.	<i>Evaluación del desplazamiento del muro</i>	119
7.3.5.	<i>Cámaras</i>	120
7.4.	Resultados obtenidos	121
7.4.1.	<i>Evaluación de la densidad y el coeficiente de fricción</i>	121
7.4.2.	<i>Muro 0</i>	121
7.4.3.	<i>Muro 1</i>	124
7.4.4.	<i>Muro 2</i>	126
7.4.5.	<i>Desplazamientos relativos</i>	128
7.5.	Calibración de las propiedades de contacto mediante modelización numérica	131
7.5.1.	<i>Evaluación de los resultados de los modelos calibrados</i>	133
7.6.	Resumen.....	136
CAPITULO 8: MODELACIÓN NUMÉRICA FEM - DEM		137
8.1.	Generalidades.....	137
8.2.	Método de Mononobe-Okabe	137
8.3.	Modelación numérica de un muro del sitio arqueológico de Sacsayhuamán	138

8.4.	Evaluación numérica solo por gravedad	141
8.5.	Enfoque basado en vibraciones.....	143
8.6.	Evaluación de la sección del muro a diferentes registros sísmicos peruanos	145
8.6.1.	<i>Comportamiento estructural frente al registro sísmico de Paruro, Cusco 2014.....</i>	146
8.6.2.	<i>Comportamiento estructural frente al registro sísmico de cusco 2023</i>	150
8.6.3.	<i>Comportamiento estructural frente al registro sísmico de Áncash 1970.....</i>	153
8.6.4.	<i>Desplazamientos residuales de la estructura luego de la aplicación de cada registro sísmico</i> 155	
8.6.5.	<i>Comparación de las reacciones de la base.....</i>	156
8.7.	Resumen.....	157
CAPITULO 9: CONCLUSIONES		158
9.1.	Taxonomía de tipologías estructurales de construcciones de piedra en el Perú.....	158
9.2.	Procesamiento de imágenes	159
9.3.	Verificación del comportamiento de sólidos rígidos en Abaqus	159
9.4.	Verificación del enfoque basado en vibraciones.....	159
9.5.	Campaña experimental de ensayos por volteo de muros de junta seca.....	160
9.6.	Modelación numérica FEM – DEM.....	161
9.7.	Sugerencias para trabajo futuro.....	162
9.7.1.	<i>Taxonomía de tipologías estructurales de construcciones de piedra en el Perú.....</i>	162
9.7.2.	<i>Procesamiento de imágenes.....</i>	162
9.7.3.	<i>Verificación del comportamiento de sólidos rígidos en Abaqus.....</i>	163
9.7.4.	<i>Verificación del enfoque basado en vibraciones</i>	163
9.7.5.	<i>Campaña experimental de ensayos por volteo de muros de junta seca.....</i>	163
9.7.6.	<i>Modelación numérica FEM - DEM</i>	163
9.8.	Diseminación de los resultados de la investigación.....	163
10.	BIBLIOGRAFÍA	165

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1-1: Estructuras Inca con diferentes daños en el Perú</i>	2
<i>Figura 1-2: Ejemplos de estructuras de piedra en el Perú (a) Zurite, Cusco (b) Molloco, Puno (c) Rúpac, Lima</i>	3
<i>Figura 2-1: Cueva de Guitarrero, Áncash</i>	9
<i>Figura 2-2: Estructuras del periodo Arcaico (a) Cerro La Paloma, Lima (b) Caral, Lima (c) Sechín, Áncash</i>	10
<i>Figura 2-3: Estructuras del periodo Formativo (a) Kuntur Wasi, Cajamarca (b) Chavín de Huántar, Ancash</i>	11
<i>Figura 2-4: Estructuras del periodo Desarrollos Regionales Tempranos</i>	11
<i>Figura 2-5: Estructuras del periodo Wari (a) Wari, Ayacucho (b) Pikillacta, Cusco</i>	12
<i>Figura 2-6: Estructuras del periodo Wari (a) Kuélap, Chachapoyas (b) Sillustani, Puno</i>	13
<i>Figura 2-7: El Tahuantinsuyo</i>	14
<i>Figura 2-8: Estructuras Inca de piedra labrada en diferentes sitios arqueológicos</i>	14
<i>Figura 2-9: Tabla de clasificación arquitectónica de muros de piedra usado por Agurto, 1987</i>	15
<i>Figura 2-10: Detalles estructurales de muros Inca</i>	16
<i>Figura 2-11: Estructura transversal de un andén en Machupicchu</i>	17
<i>Figura 2-12: Estructura transversal de un andén de agricultura</i>	17
<i>Figura 2-13: Detalles estructurales en los baluartes de Sacsayhuamán (Tiito, 2018)</i>	18
<i>Figura 2-14: Evaluación de las frecuencias de la habitación en el Templo del Coricancha (Cuadra et al., 2005)</i>	18
<i>Figura 2-15: Estructuras evaluadas en Machupicchu (Cuadra, 2021) (a) Colca (b) Huayrana</i>	19
<i>Figura 2-16: Modelo numéricos de estructuras evaluadas en Machupicchu (Cuadra et al., 2005)</i>	20
<i>Figura 2-17: Modelación numérica del Templo San Juan Bautista de Huaytará (Cuadros, 2020; Cuadros et al. 2024)</i>	20
<i>Figura 2-18: Iglesia Saint Hripsime (Mutoh et al., 2023)</i>	21
<i>Figura 2-19: Iglesia San Giovanni Evangelista (Endo et al., 2023)</i>	22
<i>Figura 2-20: Evaluación numérica de sección de un muro de defensa, Messene (Papadopoulos, 2021)</i>	23
<i>Figura 2-21: Muro de neumáticos rellenos con arena (Xu et al., 2023)</i>	23
<i>Figura 2-22: Evaluación del puente de Alcántara por FEM (Suarez, 2021)</i>	24
<i>Figura 2-23: Evaluación del muro de la piedra de los 12 ángulos (Tarque et al., 2023)</i>	25
<i>Figura 2-24: Evaluación de la resistencia al suelo por desgarre (Shaikh et al., 2021)</i>	26
<i>Figura 2-25 Ensayos de vibración (Fukumoto et al., 2014)</i>	27
<i>Figura 2-26: Muros construidos para ensayos por volteo (Santa-Cruz et al., 2023)</i>	28
<i>Figura 2-27: Ensayo experimental de un muro tipo pirca al volteo (Ita et al., 2023)</i>	29
<i>Figura 2-28: Evaluación numérica del muro tipo pirca en DEM (Ita et al., 2023) (a) 7° (b) 15° (c) 20°</i>	29
<i>Figura 2-29: Estructuras con bloques de azúcar ensayadas por volteo (Bui et al., 2017)</i>	30
<i>Figura 2-30: Mecanismo de falla por asentamiento en bóveda (Foti et al., 2018)</i>	31
<i>Figura 2-31: Muro de contención hecho con bloques de arcilla cocida (Savalle et al., 2020)</i>	31
<i>Figura 2-32: Mecanismo de falla por asentamiento (Bui et al., 2017; Smoljanovic et al., 2018)</i>	32
<i>Figura 2-33: Portal ensayado por asentamiento (Chen et al., 2021) (a) Ensayo numérico (b) Ensayo experimental</i> ...	33
<i>Figura 2-34: Ensayo de asentamiento en fachada de parroquia (Ou et al., 2022)</i>	33
<i>Figura 2-35: Mecanismo de falla por impacto (Chen et al., 2023) (a y b) Ensayo experimental (c) Modelo FDEM</i>	34
<i>Figura 2-36: Imagen segmentada por diversos operadores (Maini y Aggarwal, 2009)</i>	36
<i>Figura 2-37: Obtención de los bordes de una imagen por medio de diferentes técnicas (Melin et al., 2014)</i>	36
<i>Figura 2-38: Red de convolución para la segmentación de imágenes (Elharrouss et al., 2023)</i>	37
<i>Figura 2-39: Segmentación de imágenes según los diversos autores (Elharrouss et al., 2023)</i>	37
<i>Figura 2-40: Obtención de bordes digital (Tian et al., 2023)</i>	38
<i>Figura 3-1: Ejemplos de estructuras de piedra con geometría irregular en el Perú</i>	41
<i>Figura 3-2: Sitios arqueológicos prehispánicos de piedra más conocidos por departamento del Perú</i>	43

<i>Figura 3-3: Clasificación según la época de su construcción</i>	44
<i>Figura 3-4: Clasificación según su uso</i>	45
<i>Figura 3-5: Clasificación según su altura</i>	46
<i>Figura 3-6: Clasificación según su estructura transversal</i>	47
<i>Figura 3-7: Clasificación según su estructura transversal - Ejemplos</i>	48
<i>Figura 3-8: Clasificación según su aparejo</i>	49
<i>Figura 3-9: Clasificación según el tipo de juntas</i>	50
<i>Figura 3-10: Clasificación según el tamaño de sus piedras – Ejemplos</i>	51
<i>Figura 3-11: Clasificación según el acabado de las piedras</i>	52
<i>Figura 3-12: Toma de fotos en un muro de gran longitud</i>	53
<i>Figura 3-13: Alineación 3D de 7 imágenes tomadas al muro del Templo Arzobispal, Cusco</i>	53
<i>Figura 3-14: Tabla de clasificación estructural de muros de piedra utilizado</i>	54
<i>Figura 3-15: Muros de piedra evaluados en Puno</i>	55
<i>Figura 3-16: Inca Uyo</i>	55
<i>Figura 3-17: Ccota</i>	56
<i>Figura 3-18: Molloco</i>	56
<i>Figura 3-19: Pukará</i>	56
<i>Figura 3-20: Sillustani (a) Tipología 1 (b) Tipología 2</i>	57
<i>Figura 3-21: Cutimbo (a) Tipología 1 (b) Tipología 2</i>	58
<i>Figura 3-22: Muros de piedra evaluados en Cusco</i>	59
<i>Figura 3-23: Sacsayhuamán (a) Tipología 1 (b) Tipología 2 (c) Tipología 3</i>	61
<i>Figura 3-24: Tambomachay (a) Tipología 1 (b) Tipología 2</i>	61
<i>Figura 3-25: Ollantaytambo (a) Tipología 1 (b) Tipología 2 (c) Tipología 3 (d) Tipología 4</i>	63
<i>Figura 3-26: Pisaq (a) Tipología 1 (b) Tipología 2 (c) Tipología 3 (d) Tipología 4</i>	64
<i>Figura 3-27: Pikillacta</i>	64
<i>Figura 3-28: Chinchero (a) Tipología 1 (b) Tipología 2 (c) Tipología 3</i>	65
<i>Figura 3-29: Puka Pukará (a) Tipología 1 (b) Tipología 2</i>	66
<i>Figura 3-30: Moray</i>	66
<i>Figura 3-31: Tipón (a) Tipología 1 (b) Tipología 2 (c) Tipología 3</i>	68
<i>Figura 3-32: Qoricancha</i>	68
<i>Figura 3-33: Machupicchu (a) Tipología 1 (b) Tipología 2 (c) Tipología 3 (d) Tipología 4</i>	69
<i>Figura 3-34: Muro de la piedra de los 12 ángulos</i>	70
<i>Figura 3-35: Q'enco</i>	70
<i>Figura 4-1: Procedimiento de segmentación de imágenes</i>	73
<i>Figura 4-2: Casos evaluados con el programa</i>	77
<i>Figura 4-3: Modelo en geométrico 2D de una sección de un muro Inca obtenido con el código 1</i>	78
<i>Figura 4-4: Modelo en Abaqus obtenido con el código 3</i>	78
<i>Figura 5-1: Método de penalización no lineal – Rigidez normal de contacto</i>	83
<i>Figura 5-2: Modelo de fricción de Coulomb</i>	84
<i>Figura 5-3: Fuerza normal y tangencial entre dos bloques</i>	84
<i>Figura 5-4: Leyes de contacto entre dos partículas</i>	85
<i>Figura 5-5: Modelo de dos bloques (a) Bosquejo (b) Modelo en Abaqus/Explicit</i>	86
<i>Figura 5-6: Tiempo (s) vs peso (N) de la evaluación de los dos bloques</i>	87
<i>Figura 5-7: Tiempo (s) vs penetración entre bloques (m)</i>	87
<i>Figura 5-8: Tiempo (s) vs Fuerza externa en X (N)</i>	88
<i>Figura 5-9: Tiempo (s) vs desplazamiento en X del bloque superior (m)</i>	88
<i>Figura 5-10: Estado de los dos bloques a diferentes tiempos (a) 0 s (b) 3 s (c) 3.5 s (d) 5 s</i>	89
<i>Figura 6-1: Sitio arqueológico de Sacsayhuamán (observe los muros de forma aserrada)</i>	91
<i>Figura 6-2: Sección colapsada de un muro en Sacsayhuamán</i>	91

Figura 6-3: Fallas activas de Coricocha, Pachatusan, Tambomachay y Cusco (Barrientos, 2021)	92
Figura 6-4: Santa Cruz et al. (2021) (a) Vista del muro ensayado (b) Dimensiones del muro	93
Figura 6-5: Modelo en Abaqus/Explicit (a) Sección transversal del muro (b) Vista 3D del muro.....	93
Figura 6-6: Estado del muro a diferentes tiempos y grados de inclinación	95
Figura 6-7: Tiempo versus reacción vertical en la base	96
Figura 6-8: Colapso del muro a 14.3° de inclinación (a) Caso experimental (b) Modelo Numérico	96
Figura 6-9: Estructura de Sacsayhuamán modelada	97
Figura 6-10: Ruido blanco (a) Señal del ruido blanco (b) Espectro de Fourier	98
Figura 6-11: Cociente espectral de los puntos A, B, C y D.....	99
Figura 6-12: Desplazamiento relativo del bloque A respecto a la base, para diferentes movimientos sinusoidales ...	100
Figura 6-13: Desplazamiento relativo del bloque A respecto a la base, para frecuencias obtenidas con el ruido blanco	101
Figura 6-14: Estado final de la estructura después del movimiento sinusoidal en la base con una frecuencia de 0.976.Hz, a diferentes PGA.....	101
Figura 6-15: Sismo de Paruro, Cusco, 2014 (a) Registro sísmico (b) Espectro de Fourier	103
Figura 6-16: Estados de la estructura después del registro sísmico de Paruro escalado a diferentes PGA	103
Figura 6-17: Desplazamientos relativos del punto A respecto a la base debido al sismo de Paruro con diferentes PGA	104
Figura 6-18: Sismo de Cusco, 2023 (a) Registro sísmico (b) Espectro de Fourier.....	104
Figura 6-19: Estados de la estructura después del registro sísmico de Cusco, 2023 escalado a diferentes PGA	105
Figura 6-20: Desplazamientos relativos del punto A respecto a la base debido al sismo de Cusco, 2023 con diferentes PGA	105
Figura 6-21: Sismo de mayo de 1970, Áncash (a) Registro sísmico (b) Espectro de Fourier.....	106
Figura 6-22: Estados de la estructura luego del registro sísmico de Áncash, 1970 escalado a diferentes PGA	107
Figura 6-23: Desplazamientos relativos del punto A respecto a la base debido al sismo de Áncash, 1970 con diferentes PGA	107
Figura 7-1: Templo del Coricancha (a) Vista externa (b) Vista interior.....	111
Figura 7-2: Templo del Coricancha	111
Figura 7-3: Dimensiones aproximadas del muro del Templo del Coricancha.....	112
Figura 7-4: Modelo inicial (a) Capa frontal (b) Capa posterior.....	113
Figura 7-5: Modelo inicial en 3D (a) Capa frontal (b) Modelo completo	113
Figura 7-6: Modelo final (a) Capa frontal (b) Capa posterior	114
Figura 7-7: Modelo final en 3D (a) Capa frontal (b) Modelo completo	114
Figura 7-8: Curvas granulométricas de la mezcla de agregados (azul) y la curva de Fuller (rojo).....	116
Figura 7-9: Elaboración de bloques de concreto (a) Colocado de concreto (b) Curado de concreto	118
Figura 7-10: Plataforma para ensayos de volteo (Rivas, 2019).....	118
Figura 7-11: Construcción del muro 0.....	119
Figura 7-12: Armado de muros terminado.....	119
Figura 7-13: Puntos evaluados (a) Muro 0 (b) Muro 1 y 2.....	120
Figura 7-14: Orden de las cámaras en el ensayo.....	120
Figura 7-15: Ensayo de volteo en bloques	121
Figura 7-16: Vistas del muro 0 en 0° de giro.....	121
Figura 7-17: Vistas del muro 0 en 5° de giro.....	122
Figura 7-18: Vistas del muro 0 en 7° de giro	122
Figura 7-19: Vistas del muro 0 justo antes de llegar a los 10° de giro.....	123
Figura 7-20: Vistas del muro 0 entre 10 a 12° de giro.....	124
Figura 7-21: Vistas del muro 1 en 0° de giro.....	124
Figura 7-22: Vistas del muro 1 en 7° de giro.....	125
Figura 7-23: Vistas del muro 1 en 10° de giro	125

Figura 7-24: Vistas del muro 1 entre 10 y 11° de giro.....	126
Figura 7-25: Vistas del muro 2 en 0° de giro.....	126
Figura 7-26: Vistas del muro 2 en 7° de giro.....	127
Figura 7-27: Vistas del muro 2 en 10° de giro.....	127
Figura 7-28: Vistas del muro 2 entre 10 y 11° de giro.....	128
Figura 7-29: Comportamiento de la estructura (a) Instante inicial (b) Instante de giro θ	128
Figura 7-30: Desplazamiento relativo del muro 0 (a) Columna A (b) Columna C (c) Columna E.....	129
Figura 7-31: Desplazamiento relativo del muro 1 (a) Columna A (b) Columna C (c) Columna E.....	130
Figura 7-32: Desplazamiento relativo del muro 2 (a) Columna A (b) Columna C (c) Columna E.....	130
Figura 7-33: Modelos en Abaqus/Explicit (a) Modelo inicial (muro 0) (b) Modelo final (muro 1 y 2).....	131
Figura 7-34: Estado del modelo inicial (muro 0) a distintos tiempos.....	134
Figura 7-35.- Estado del modelo inicial (vista posterior) a 9.6° de giro.....	134
Figura 7-36: Estado del modelo final (muro 1 y 2) a distintos tiempos.....	135
Figura 7-37: Estado del modelo final (vista posterior) a 10.6° de giro.....	135
Figura 8-1: Diagrama esquemático de las fuerzas actuantes por la cuña del suelo asumidas por el método de Mononobe-Okabe.....	138
Figura 8-2: Obtención del modelo geométrico (a) Muro real (b) Modelo geométrico en Python.....	139
Figura 8-3: Modelo realizado en Abaqus (a) Vista 3D (b) Bosquejo de la vista lateral.....	140
Figura 8-4: Comportamiento del peso del muro.....	142
Figura 8-5: Comportamiento del peso de las partículas.....	142
Figura 8-6: Fuerza de empuje de las partículas al muro.....	142
Figura 8-7: Desplazamiento relativo del punto A respecto a la base fuera del plano del muro.....	143
Figura 8-8: Cociente espectral de los puntos A, B, C, D y E respecto a la base.....	144
Figura 8-9: Desplazamientos relativos del punto A fuera del plano respecto de la base, para diferentes movimientos sinusoidales.....	145
Figura 8-10: Sismo de Paruro, Cusco, 2014 (recortado) (a) Registro sísmico (b) Espectro de Fourier.....	147
Figura 8-11: Estados de la estructura después del registro sísmico de Paruro escalado a diferentes PGA.....	148
Figura 8-12: Desplazamiento relativo del punto A respecto a la base debido al registro sísmico de Paruro.....	149
Figura 8-13: Desplazamiento relativo del punto E respecto a la base debido al registro sísmico de Paruro.....	149
Figura 8-14: Reacción fuera del plano de la base del muro para cada caso de PGA del sismo de Paruro.....	150
Figura 8-15: Estados de la estructura después del registro sísmico de Cusco, 2023 escalado a diferentes PGA.....	151
Figura 8-16: Desplazamiento relativo del punto A respecto a la base debido al registro sísmico de Cusco, 2023.....	151
Figura 8-17: Desplazamiento relativo del punto D respecto a la base debido al registro sísmico de Cusco, 2023.....	151
Figura 8-18: Reacción fuera del plano de la base del muro para cada caso de PGA del sismo de Cusco, 2023.....	152
Figura 8-19: Estados de la estructura después del registro sísmico de Áncash escalado a diferentes PGA.....	153
Figura 8-20: Desplazamiento relativo del punto A respecto a la base debido al registro sísmico de Áncash.....	154
Figura 8-21: Desplazamiento relativo del punto B respecto a la base debido al registro sísmico de Áncash.....	154
Figura 8-22: Reacción fuera del plano de la base del muro para cada caso de PGA del sismo de Áncash.....	155

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Secuencia cronológica cultural.....	8
Tabla 2-2: Propiedades de las rocas usadas en la cultura Inca (Agurto, 1987).....	15
Tabla 2-3: Métodos de detección de bordes según Jing et al., 2022	35
Tabla 2-4: Comparación de propiedades en las piedras (FEM).....	39
Tabla 2-5: Comparación de propiedades en las piedras (DEM)	39
Tabla 2-6: Comparación de propiedades en arena (DEM).....	40
Tabla 2-7: Comparación de propiedades en otros materiales (DEM).....	40
Tabla 3-1: Sitios arqueológicos prehispánicos de piedra más conocidos por cada departamento del Perú.....	42
Tabla 3-2: Altura actual de la estructura.....	45
Tabla 3-3: Clasificación según el tamaño de sus piedras.....	50
Tabla 6-1 Propiedades físicas y mecánicas de los bloques y las juntas	94
Tabla 6-2: Detalles de los registros sísmicos utilizados	102
Tabla 6-3: Máximo desplazamiento remanente después de cada evento (mm)	108
Tabla 7-1: Propiedades físicas de los insumos del concreto elaborado	115
Tabla 7-2: Granulometría de agregados	116
Tabla 7-3: Diseño de mezcla para 1m ³	116
Tabla 7-4: Corrección por humedad	117
Tabla 7-5: Volúmenes sueltos por bolsa de cemento	117
Tabla 7-6: Propiedades del concreto fresco y endurecido.....	117
Tabla 7-7: Comparación de los ángulos de colapso de los ensayos experimentales y numéricos.....	132
Tabla 7-8: Comparación del desplazamiento relativo de los ensayos experimentales y numéricos	133
Tabla 8-1: Propiedades del modelo numérico	141
Tabla 8-2: Propiedades de interacción	141
Tabla 8-3: Presiones y fuerzas por el terreno según la aceleración horizontal (Mononobe-Okabe).....	146
Tabla 8-4: Máximo desplazamiento remanente después de cada evento (mm).....	156
Tabla 8-5: Comparación de las reacciones de la base en el eje Z	157

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Los muros de piedra de junta seca son estructuras hechas con bloques de piedra colocados unos sobre otros sin junta de mortero. Este material ha sido utilizado por las civilizaciones más antiguas del planeta tales como los egipcios y los mesopotámicos, para la construcción de sus viviendas (Wright, 2009). Entre las construcciones más emblemáticas de piedra se tienen las pirámides de Giza en Egipto (alrededor de los 2550 a.C.), la ciudad antigua de Petra en Jordania (alrededor de los 2000 a.C.), la ciudad de Babilonia en Irak (alrededor de los 562 a.C), los templos de Artemisa en Turquía (alrededor de los 550 a.C.), la pirámide de Chichen Itzá en México (entre 400s a 900s d.C.), Machupicchu en Perú (alrededor de 1450 d.C.), la muralla China (Inició a construirse en 220 a.C., pero lo que existe se construyó realmente entre los 1400s y 1500s d.C.) y el Taj Mahal en India (de 1631 a 1653 d.C.) (Van, 2011).

En el Perú, se han construido estructuras de piedra desde los inicios de la civilización como es el caso de la cultura Caral, una de las cinco civilizaciones más importantes del planeta y la más antigua de América. Los pobladores de Caral cortaron millones de piedras que luego trasladaron a su ciudad para la construcción de sus edificaciones (Béarez y Miranda, 2000). Sin embargo, las construcciones más emblemáticas de piedra en el Perú fueron realizados por la cultura Inca, debido a que diversas de sus estructuras de piedra gozan de hermeticidad, complejidad y belleza arquitectónica (Agurto, 1987). Lamentablemente, debido a las condiciones ambientales, antigüedad y a una falta de mantenimiento adecuada, estas construcciones de piedra patrimoniales tienden a sufrir daños en su estructura (Savalle et al. 2022). Por ejemplo, en la *Figura 1-1* se muestran cuatro estructuras de diversos sitios arqueológicos del Perú con problemas estructurales. En la *Figura 1-1a* se aprecia una estructura funeraria en Sillustani, Puno, la cual por los fuertes vientos en el lugar tiene problemas de estabilidad; en la *Figura 1-1b*, una estructura funeraria en Cutimbo, Puno, al cual supuestamente le ha caído un rayo que hizo que gran parte de la zona superior colapse; en la *Figura 1-1c* un andén en Moray, Cusco, el cual por las lluvias y el asentamiento del suelo está por voltearse; y por último, en la *Figura 1-1d* una estructura Inca en Machupicchu, Cusco, con graves daños posiblemente debido a un sismo. Por lo tanto, es importante el estudio estructural de estas construcciones con el fin de diagnosticar e intervenir en ellas para preservar el patrimonio cultural de nuestros antecesores. De este modo, futuras generaciones puedan evidenciar las culturas y sociedades que nos preceden (Meli, 2000). Actualmente en el Perú, aún se sigue utilizando algunos muros de contención Inca escalonados con fines de agricultura, más conocidos como andenes.

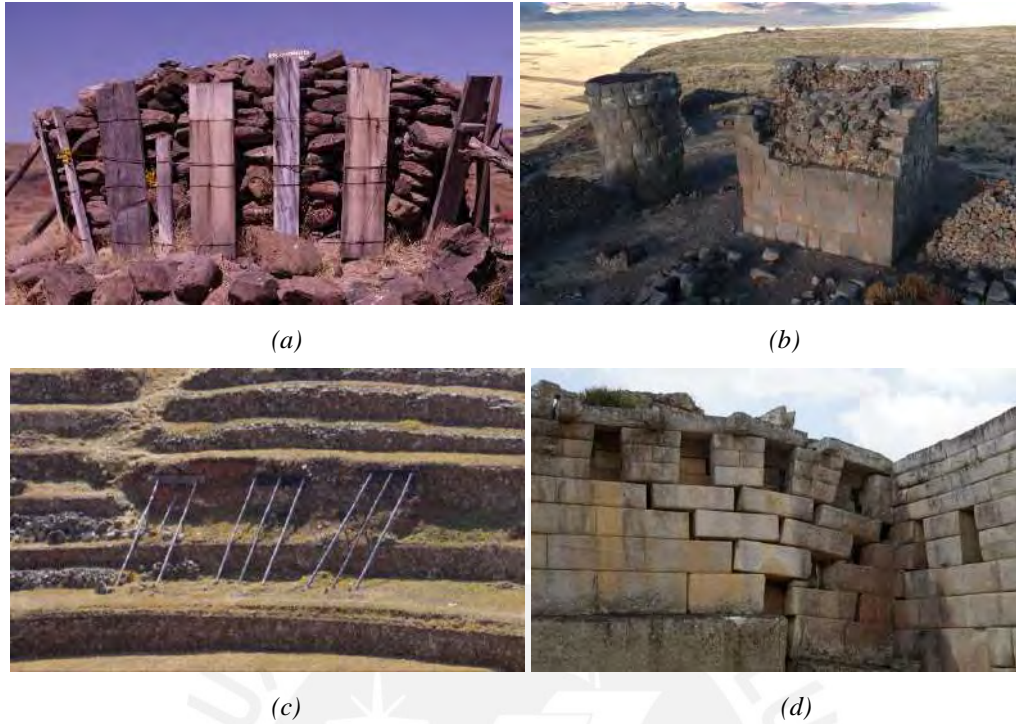


Figura 1-1: Estructuras Inca con diferentes daños en el Perú

(a) Sillustani, Puno (b) Cutimbo, Puno (c) Moray, Cusco (d) Machupicchu, Cusco

La evaluación de estas estructuras es muy compleja, debido a que cada construcción de piedra es diferente, por lo que es necesario una evaluación multidisciplinaria (Meli, 2000). Por ejemplo, la estructura puede tener una cierta cantidad de capas, relleno, piedras labradas o naturales, un ángulo de inclinación, entre otros, lo cual afecta drásticamente en su comportamiento estructural. En el Perú debido a su gran variedad cultural se tienen diferentes tipologías de construcciones. Según el Ministerio de Cultura, en el Perú existen 7359 monumentos arqueológicos prehispánicos (Geoportal 2.0), de los cuales gran parte de estos están hechos de piedra con sillares irregulares (*Figura 1-2*). Lamentablemente no se conoce mucho de su historia y construcción, ya que los pocos registros que se tienen de estas estructuras se realizaron recién a la llegada de los españoles (Bardales 2013). En 1987 se realizó uno de los primeros estudios arquitectónicos en estas construcciones, en el cual se caracterizaron algunas construcciones según su estado, valor social, dimensiones generales, cantidad de pisos, tipo de mortero, tipo de material usado, tipos de elementos, conservación y aparejo (Agurto). Por otro lado, se realizaron diversas investigaciones acerca de sitios arqueológicos prehispánicos por diversos autores (Wright y Zegarra, 2000; Canziani, 2012; Cuadra, 2013; Wright et al., 2016); sin embargo, no se continuó caracterizando los tipos de estructuras que tiene cada lugar y si existiese alguna similitud entre estas.



(a)

(b)

(c)

Figura 1-2: Ejemplos de estructuras de piedra en el Perú (a) Zurite, Cusco (b) Molloco, Puno (c) Rúpac, Lima

Una forma de evaluar el comportamiento estructural de estas construcciones de piedra de junta seca es por medio de ensayos experimentales, ya sea en escala natural o escala reducida (Bui et al., 2017; Quezada et al., 2016; Ita et al., 2023). Sin embargo, estos ensayos son limitados debido a que pueden ser muy complejos debido a la gran variedad de tipologías. Otra manera de evaluar estas construcciones es por medio de la modelación numérica usando elementos finitos: FEM (Bui et al., 2017; Papadopoulos et al., 2019), elementos discretos: DEM (Ita et al., 2023; Savalle et al. 2018) o una combinación de estos: FEM - DEM (Smoljanović et al., 2018; Haidar et al., 2023). En FEM los sillares de la estructura se dividen en subelementos y aplicando la mecánica del continuo, se evalúa el estado tensional del sistema (Lourenço, 1996). Las limitaciones de este método es que los modelos encuentran una limitante significativa en su capacidad de simular grandes desplazamientos entre los bloques (Smoljanović et al., 2018), por lo que se necesita incluir leyes de contacto para lograrlo. En DEM se idealiza la estructura como discontinua, en el que las juntas son modeladas como superficies que siguen leyes de contacto que describen su comportamiento normal y tangencial (Cundall y Strack, 1979). También, en DEM se suelen utilizar esferas o grupos de esferas para simular las piedras con el fin de reducir el tiempo computacional. Esto debido a que la geometría de la esfera es simple, el contacto entre estas es un punto y la dirección normal del plano de contacto es conocido (Ita et al., 2023; Santa-Cruz et al., 2021). En FEM – DEM se utiliza la combinación de ambos modelos en el cual los bloques son discretizados en elementos que siguen la mecánica del continuo, y los contactos siguen leyes de contacto superficial (Munjiza y Latham, 2004). Por otro lado, algunos autores idealizan las piedras como sólidos rígidos (Claxton et al., 2005; Gong et al., 2022), ya que tienen una resistencia y rigidez muy alta, y así reducir el tiempo computacional. Debe tenerse en cuenta que los análisis numéricos deben ser calibrados con ensayos experimentales con el fin de tener resultados más acertados. A partir de resultados de ensayos numéricos se ha demostrado que varios parámetros, tales como las propiedades de los materiales constituyentes, geometría del elemento estructural, condiciones de borde, entre otros, influyen en la rigidez lateral, resistencia y la capacidad de deformación de estas construcciones (Rezaie et al. 2020).

Para modelar adecuadamente una construcción de piedra es importante considerar un adecuado modelo físico de la estructura. Una manera de obtener este modelo es por medio del uso de instrumentos de medición; sin embargo, esto conlleva a un proceso lento y tedioso debido a la variabilidad y la cantidad de tipologías. Otra manera de obtener este modelo es a partir de imágenes fotográficas (Castro, 2017). Por ejemplo, se pueden obtener los bordes o trazos de los elementos constituyentes a partir del procesamiento digital de imágenes (Digital Image Processing, Maini y Aggarwal 2009, Lianheng 2021, Henriques 2021, Ali 2021). Este procedimiento implica una mayor obtención de información en menor tiempo. Lamentablemente, en cualquiera de las dos maneras solo se obtienen la forma y las dimensiones de las zonas que se encuentren a simple vista, y no de la parte interna de la construcción. No obstante, se puede estimar estas características a partir de estudios previos o la pseudo granulometría de las piedras externas. Sin embargo, se debe tener bastante cuidado con ello, ya que estas estimaciones podrían afectar los resultados del análisis estructural.

También, es importante evaluar las propiedades de la estructura de junta seca en conjunto, y en diversas ramas de la ingeniería estos se pueden medir por medio de tres enfoques (Vlachakis et al., 2023), basados respectivamente en deformación (Kartal et al., 2011), en vibraciones (Kim et al., 2021) y en ondas (Gonzales-Valadez et al., 2010). En el enfoque basado en deformación se mide directamente la deformación de la interfaz provocada ya sea por cargas o desplazamientos externos. Esta deformación está ligada a los esfuerzos normales, tangenciales y pérdidas de energía histerética en la interfaz. En el enfoque basado en vibraciones se miden las vibraciones de un sistema usando técnicas de identificación dinámica (provocadas o naturales), y así, estimar las propiedades de interfaz al describir su comportamiento (ejemplo: frecuencias de vibración, modos de vibración y amortiguamiento). Por último, el enfoque basado en ondas es un método no invasivo en el cual se emiten ondas entre dos cuerpos. En este enfoque se asume que la rigidez normal y tangencial es proporcional a la frecuencia de emisión, la velocidad de onda y la densidad del material.

1.2. Justificación

No se tiene una clasificación estructural de construcciones prehispánicas en el Perú, y por ende diversas características de estructuras existentes en diferentes sitios arqueológicos es desconocida. Por otro lado, realizar la modelación numérica de estructuras con piedras irregulares es muy compleja, debido a la variada geometría de los materiales constituyentes. Por último, aún no se ha realizado el análisis dinámico de estructuras prehispánicas en el Perú.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

El objetivo general de la tesis doctoral es realizar el estudio, modelación y simulación del comportamiento mecánico de construcciones de piedra de junta seca en el Perú (caso de estudio: muro de Sacsayhuamán, Cusco, Perú), por medio de una metodología de análisis numérico versátil usando modelos basados en elementos finitos y discretos (FEM – DEM), calibrados mediante ensayos experimentales en muros reproducidos en laboratorio.

1.3.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos de la tesis doctoral se detallan a continuación.

- Elaborar un modelo de clasificación estructural de construcciones de piedra prehispánicas, y clasificar diversos sitios arqueológicos de las regiones de Puno y Cusco.
- Desarrollar una interfaz dinámica en Python que permita obtener el modelo físico preliminar en 3D de construcciones de piedra de junta seca.
- Evaluar si es posible obtener las frecuencias predominantes de una estructura de junta seca, por medio del enfoque de vibraciones.
- Construir tres muros con bloques de concreto que simulen una estructura Inca del complejo arqueológico del Templo del Coricancha, Cusco. Luego, evaluar las propiedades físicas, y el comportamiento estructural por volteo de los muros construidos.
- Simular los ensayos por volteo por medio de un modelo numérico en Abaqus, usando las propiedades obtenidas en los ensayos experimentales. Después, calibrar las propiedades de contacto con tal de que la simulación sea idéntica a los ensayos de volteo experimentales.
- Realizar el modelo numérico de una sección de un muro de Sacsayhuamán, Cusco, usando las propiedades obtenidas en los ensayos experimentales y de calibración, y evaluar su comportamiento dinámico no lineal frente a diversos registros sísmicos peruanos.

1.4. Metodología

Después del capítulo 1 que consiste en la introducción del trabajo de tesis, en el capítulo 2 se muestra la revisión de las investigaciones previas más relevantes de las construcciones prehispánicas de piedra en el Perú, como sus tipologías estructurales, datos históricos, evolución de sus métodos de construcción, etc. También en este capítulo se estudia a fondo los ensayos experimentales y numéricos por medio de elementos finitos, discretos y una combinación de estos. Además, se realiza una investigación de los métodos y códigos de segmentación de imágenes. En el capítulo 3 se propone un modelo de clasificación estructural de

construcciones prehispánicas de piedra, y se clasifican diversos sitios arqueológicos de las regiones Puno y Cusco. En el capítulo 4 se desarrollan códigos en Python para obtener el modelo geométrico en 2D de estas construcciones a partir del procesamiento digital de imágenes. También se desarrolla un código para crear el modelo físico en 3D preliminar de las construcciones evaluadas, con base a la información recogida en los pasos anteriores. Estos códigos también permiten exportar los modelos a Abaqus como sólidos rígidos. En el capítulo 5 se explica la teoría de la modelación por elementos finitos y discretos, y se verifica en Abaqus que se cumpla esta teoría por medio de un modelo simple. En el capítulo 6 se analiza si se pueden evaluar las frecuencias predominantes de una estructura de junta seca, por medio del enfoque de vibraciones. Para este caso se elabora un modelo de una sección de un muro de contención de Sacsayhuamán, el cual es evaluado numéricamente por medio de vibraciones de ruido blanco y señales sinusoidales, y así, obtener sus frecuencias predominantes fuera del plano. Para la calibración de las propiedades de contacto se utiliza los ensayos experimentales de una autora del estado del arte. Luego de evaluar estas frecuencias, se evalúa el comportamiento de la estructura frente a diversos sismos del Perú que tienen diferentes rangos de frecuencias. En este caso el muro es dibujado en AutoCAD y no se considera el empuje del relleno. En el capítulo 7 se construyen y ensayan por volteo tres muros con características incaicas en una mesa inclinable, con el fin de analizar las propiedades de sus elementos constituyentes y su comportamiento estructural. También en este punto se realiza la modelación de las estructuras ensayadas, y se calibran las propiedades de contacto de los modelos, con tal de que el colapso y los desplazamientos se asemejen a los ensayos experimentales. En el capítulo 8 se realiza la evaluación del modelo numérico del muro de contención de Sacsayhuamán anterior, pero incluyendo el empuje del terreno. El modelo geométrico del muro es obtenido de una manera más sofisticada, usando el programa elaborado en Python. En este caso se utilizan las propiedades obtenidas en los ensayos experimentales del capítulo anterior, y se evalúa su comportamiento dinámico frente a los mismos registros sísmicos utilizados en el capítulo 6. Para todos los modelos numéricos se consideran a las piedras como cuerpos rígidos. Por último, en el capítulo 9 se presentan las conclusiones más relevantes de este estudio.

1.5. Limitaciones

Durante este proyecto se tuvieron las siguientes limitaciones:

- Acceso a todas las construcciones de los sitios arqueológicos, ya que para ingresar a zonas específicas para obtener información de campo se necesitaban permisos especiales, los cuales no se podían conseguir fácilmente.
- La poca información que se tienen de las construcciones prehispánicas de piedra en el Perú.

- El modelo físico de las construcciones se estimó a partir de la cara exterior de los muros; es decir, considerando la geometría 2D. Para evaluar el espesor de los muros haría falta el uso de técnicas de evaluación no invasivas.
- En primera instancia, en la campaña experimental se buscó construir los muros por medio de roca caliza; sin embargo, el corte y tallado de las piedras era muy costoso y a falta de fondos económicos se decidió construir los muros por medio de bloques de concreto.
- Los bloques de los muros construidos no son exactamente iguales al muro real, debido a que cada bloque en la estructura real del Templo del Coricancha tenía diferentes dimensiones, y realizar encofrados para cada tipo de bloque era costoso.



CAPITULO 2: ESTADO DEL ARTE

2.1. Generalidades

En este capítulo se presenta el estado del arte dividido en 5 partes referidos a: construcciones de piedra en el Perú, método de elementos finitos (FEM), método de elementos discretos (DEM), método combinado finito-discreto (FDEM), y procesamiento digital de imágenes.

El apartado de construcciones de piedra muestra la evolución cronológica de las construcciones en el Perú, las características de los sillares de piedra, la inclinación de los muros prehispánicos, detalles sobre muros de contención de piedra y ensayos de vibración ambiental en estructuras de piedra prehispánica.

En los apartados del método de elementos finitos (FEM), elementos discretos (DEM) y elementos combinados finito-discretos (FDEM) se muestran los diferentes enfoques al usar FEM, DEM, FDEM para la evaluación de construcciones de piedra. Para más información sobre la teoría FEM y DEM revisar el apartado 5.3 y 5.4.

Por último, en el apartado del procesamiento de imágenes se detallan los métodos utilizados para la segmentación de imágenes, y también las ventajas y desventajas de cada uno.

2.2. Construcciones de piedra en el Perú

2.2.1. Evolución de los materiales según su cronología

Existen diversos planteamientos para definir los periodos de la historia del Perú; sin embargo, las más aceptadas son la secuencia propuesta por Rowe (1962) y la secuencia propuesta por Lumbreras (1981). En la *Tabla 2-1* se muestra la secuencia propuesta por estos dos autores.

Tabla 2-1: Secuencia cronológica cultural

Fuente: Canziani (2012)

Cronología	Lumbreras (1981)	Rowe (1962)
10000 - 5000 a.C.	Lítico	Precerámico
5000 - 1800 a.C.	Arcaico	
1800 - 500 d.C.	Formativo	Periodo Inicial
		Horizonte Temprano
500 a.C. - 700 d.C.	Desarrollos Regionales Tempranos	Intermedio Temprano
600 - 1000 d.C.	Época Wari	Horizonte Medio
1000 - 1450 d.C.	Estados Regionales y Señoríos Tardíos	Intermedio Tardío
1450 - 1532 d.C.	Época Inca	Horizonte Tardío

Para esta evaluación se usa la secuencia cronológica planteada por Lumbreras, y se detalla cada periodo generalmente usando la ardua investigación realizada por Canziani (2012).

- Lítico (10000 a 5000 a.C.): Época de los primeros pobladores de los Andes. En este tiempo se utilizaban como viviendas ocasionales las cuevas rocosas, ya que los pobladores estaban en constante movimiento debido a la persecución de la fauna salvaje y a los cambios climáticos. Se conoce que los primeros pobladores se ubicaron aproximadamente desde Lambayeque hasta Ica, ya que en estos lugares se encontraron ciertos abrigos rocosos que se utilizaron como refugios, o en ocasiones como canteras para la fabricación de utensilios de piedra. Algunos lugares fueron modificados con el fin de hacerlos más cómodos, generalmente en zonas de la puna (Ejm: Pachamachay, Telasmachay y Guitarrero; Rick, 1983). En la *Figura 2-1* se aprecia la cueva de Guitarrero ubicada en Áncash, Perú.



Figura 2-1: Cueva de Guitarrero, Áncash

Fuente: Google Maps

- Arcaico (5000 a 1800 a.C.): Época de las comunidades aldeanas precerámicas que implica la creciente incorporación y domesticación de plantas y animales. En general estos refugios eran construidos por troncos y ramas de árboles, y en ocasiones costillares de ballenas. En la *Figura 2-2a* se muestra el Cerro La Paloma en Chilca, en donde se aprecia las bases de estructuras de viviendas. También en algunos lugares se construyeron, para vivienda o recintos ceremoniales, muros hechos de piedra y barro, que en ocasiones algunos fueron utilizados posteriormente como recintos funerarios. En la *Figura 2-2b* se muestra una estructura piramidal ceremonial en Caral, ubicado en el valle de Supe, Lima, el cual cuenta con escalinatas y muros construidos de barro y piedras. Por último, la cultura Sechín (*Figura 2-2c*) realizó construcciones de piedra y barro, en donde la piedra fue tallada finamente con relieves de escenas de guerra y sacrificios humanos (Protzen y Nair, 1997).



(a)



(b)



(c)

Figura 2-2: Estructuras del periodo Arcaico (a) Cerro La Paloma, Lima (b) Caral, Lima (c) Sechín, Áncash

Fuente: Google Maps

- Formativo (1800 a 500 a.C.): En este periodo se muestra la aparición de la cerámica y el surgimiento de las altas culturas. En esta etapa se inicia la modificación del paisaje natural con fines de canalización y riego, debido a un notable incremento poblacional. Los materiales más usados en construcción eran la piedra y barro, en el cual se realizan algunos avances tecnológicos, como por ejemplo el uso de piedras labradas, adobes, y la selección de la calidad de los materiales. En este periodo sobresalen las principales huacas como Huaca Lucía, Purulén y Montegrande, los cuales eran templos hechos con bloques de adobe de diferente geometría. También algunas construcciones fueron hechas de piedras, las cuales tenían sistemas de desagüe para el drenaje de las lluvias. En la *Figura 2-3a* se muestra la estructura del Kuntur Wasi, el cual presenta una plataforma principal de 145 m de longitud y 41 m de ancho, y terrazas escalonadas que cuentan con un gran muro de contención de lajas de granito blanco. Otro gran ejemplo es Chavín de Huántar (*Figura 2-3b*), el cual está compuesto por una gran cantidad de plataformas con galerías subterráneas, escalinatas y ductos de ventilación o drenaje. Es también en esta época que en el sur del Perú comienza a asentarse la cultura Tiahuanaco (1000 a.C.; Wright, 2006), en el cual sus pobladores comenzaron como un grupo de agricultores.



Figura 2-3: Estructuras del periodo Formativo (a) Kuntur Wasi, Cajamarca (b) Chavín de Huántar, Ancash

Fuente: Google Maps

- Desarrollos Regionales Tempranos (500 a.C. a 700 d.C.): Época del surgimiento de distintas formaciones regionales y la presencia de estados teocráticos. En general en esta época surgieron centros urbanos y ciudades dominados por sacerdotes. En este tiempo se desarrollaron proyectos de irrigación para mejorar la agricultura, construcción de templos, palacios, depósitos, viviendas, talleres de cerámica, etc. También se construyeron estructuras con tapia, y se fabricaron los adobes en moldes y de sección rectangular. En la *Figura 2-4a* se aprecia la Huaca de la Luna, en el departamento de La Libertad, la cual abarca un área de 6 hectáreas, y está construido con muros de varias capas y con un sinfín de adobes de sección rectangular unidos con mortero de barro. En la *Figura 2-4b* se muestra el templo del Kalasaya ubicado en Pucará, Puno (cultura Tiahuanaco), el cual fue construido como recinto ceremonial, con muros con diversas piedras unidas con mortero de barro.



Figura 2-4: Estructuras del periodo Desarrollos Regionales Tempranos

(a) Huaca de la Luna, La Libertad (b) Kalasaya, Puno

Fuente: Google Maps

- Wari (600 a 1000 d.C.): Época del primer desarrollo de una formación de carácter imperial en el área andina. En esta época se manifiesta una crisis de las formaciones teocráticas, dando lugar a nuevas

formaciones a lo que se conoce como Wari (Estado), presentando sociedades más civiles y políticas. En este tiempo hubo grandes cambios en la arquitectura, ya que se construyeron grandes muros con cimientos profundos. La técnica empleada fue de “Doble cara”, en el cual las piedras eran colocadas con sus caras planas hacia afuera y en su interior era relleno con piedra y/o barro. En la *Figura 2-5* se muestran muros del complejo arqueológico de Wari y Pikillacta, los cuales gozan de los muros de doble hoja con relleno intermedio. Por otro lado, la cultura Tiahuanaco se extendió por el sur de Perú y Bolivia, realizando construcciones arquitectónicas monumentales de piedra y barro, como templos subterráneos y puertas talladas en piedra como la Puerta del Sol (Wright, 2006).



(a)

(b)

Figura 2-5: Estructuras del periodo Wari (a) Wari, Ayacucho (b) Pikillacta, Cusco

Fuente: Google Maps

- Estados Regionales y Señoríos Tardíos (1000 a 1450 d.C.): Época del resurgimiento de las formaciones regionales y la presencia de distintos estados y señoríos. Esta etapa inicia con la declinación de la época Wari y Tiahuanaco. En la *Figura 2-6a* se muestra la ciudad de Kuélap, Chachapoyas, el cual posee una gran muralla exterior de contención hecho de piedras, con alrededor de 20 m de altura. También, en esta etapa aparecen los Reinos y Señoríos Aimaras en el sur del Perú: cultura Lupaka y Colla. En la *Figura 2-6b* se muestra un recinto funerario en Sillustani, Puno, conocido como Chullpa, el cual está construido con piedra labrada, por la cultura Colla.

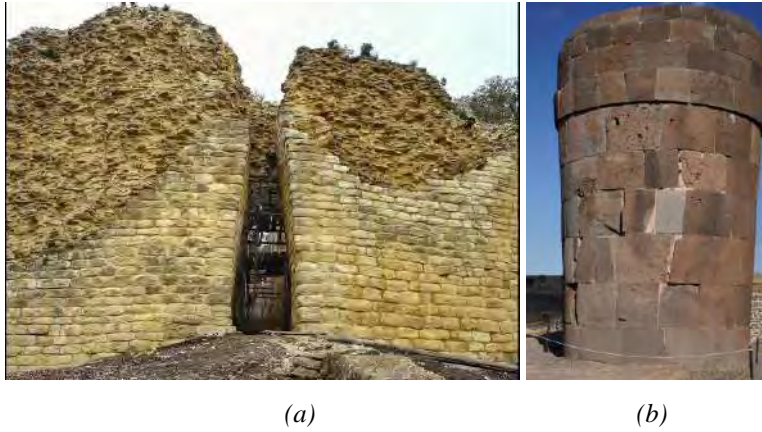


Figura 2-6: Estructuras del periodo Wari (a) Kuélap, Chachapoyas (b) Sillustani, Puno

Fuente: Google Maps

- Periodo Inca (1450 a 1532 d.C.): Imperio Inca o del Tahuantinsuyo. No se tiene claro en qué momento apareció esta cultura, pero tiene bastante influencia de la cultura Tiahuanaco y Wari (Hyslop, 1990). Sin embargo, se sabe que gracias a la victoria sobre los Chankas bajo el liderazgo de Pachacutec, el imperio incaico se convirtió en un estado con una expansión territorial inmensa alrededor de los años 1440 (Canziani, 2012). El Imperio Inca tenía una extensión de más de 5500 km desde aproximadamente el río Maule en Chile, hasta el río Ancasmayo en Colombia. Las fases de expansión fueron realizadas por los incas Pachacutec, Tupac Inca Yupanqui y Huayna Cápac (*Figura 2-7*). La capital era la ciudad del Cusco y el Templo del Coricancha era su principal Templo (Gasparini y Margolies, 1980), en el que resaltan las estructuras de piedra labrada que tenían un encaje preciso entre piedra y piedra. Sin embargo, esta forma de construcción fue llevada a cabo no solo en Cusco, sino en diversas construcciones Inca. En la *Figura 2-8*, se muestran algunos ejemplos de estos tipos de construcciones.

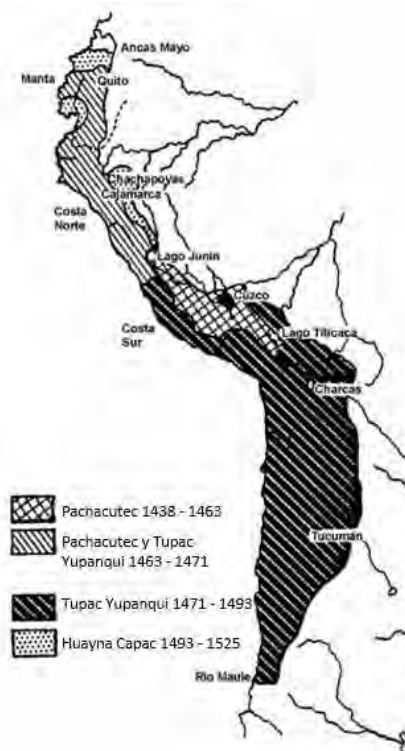


Figura 2-7: El Tahuantinsuyo
Fuente: modificado de Rowe (1946)



(a) (b) (c)

Figura 2-8: Estructuras Inca de piedra labrada en diferentes sitios arqueológicos

(a) Coricancha (b) Písaq (c) Ollantaytambo

2.2.2. Características de los sillares de piedra

En 1987, el arquitecto S. Agurto realizó estudios acerca de la construcción, arquitectura y planeamiento de construcciones Inca. Según esta investigación, las piedras más utilizadas en el imperio Inca fueron la roca caliza, andesita, diorita y granito. En la *Tabla 2-2* se muestran algunas propiedades de algunas piedras evaluadas por el autor. En la *Figura 2-9* se muestran las características consideradas por el autor para la clasificación arquitectónica de estructuras de piedra de la cultura Inca.

2.2.3. *Inclinación de muros prehispánicos*

Diversas construcciones de piedra prehispánicas en el Perú tienden a tener una ligera inclinación. Por ejemplo, Wright (2006) realizó una investigación en edificios Inca en Tipón y verificó que los muros externos hechos a base de roca diorita, tienen una inclinación entre 5 a 6° de la vertical, es decir, un 10% de inclinación (*Figura 2-10a*). Además, verificó que existe una separación constante entre nichos y ventanas, y también de clavijas en cada muro (*Figura 2-10b*). También, Gasparini y Margolies (1977) especifican que la inclinación de los muros Inca es del 10% por metro, con el fin de contrarrestar el empuje tangencial debido a los techos. Por otro parte, Protzen (2006) midió diversas construcciones en Ollantaytambo, las cuales tenían entre 3 y 7° de inclinación de la vertical. Por último, Farrington (2013) indica que los recintos Inca tienen una inclinación de 2 a 7° hacia adentro.

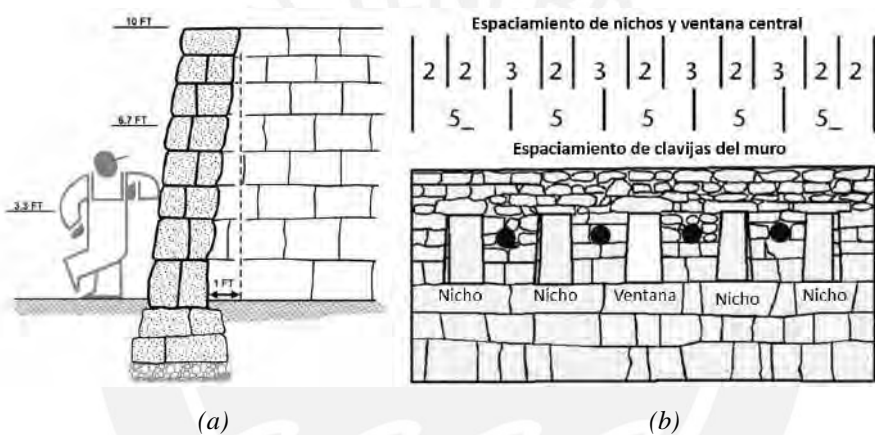


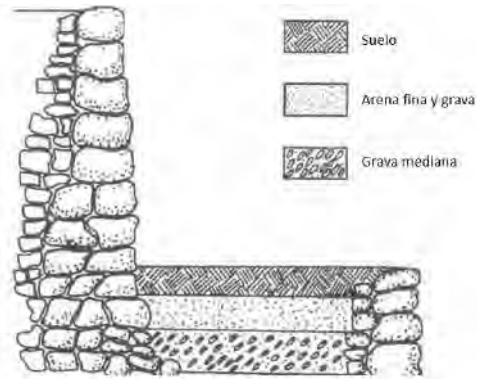
Figura 2-10: Detalles estructurales de muros Inca
Editado de Wright (2006)

Según Továr (2023) los muros con piedras encajadas en recintos Inca de la ciudad del Cusco generalmente tienen hasta 6° de inclinación. Sin embargo, hay casos en donde encontró inclinaciones de hasta 10°. También según la cantidad de hiladas en el muro, la inclinación varía de la siguiente manera: 6 hiladas, 2.3 a 6.1°; 7 hiladas, 2.4 a 6.3°; 8 hiladas: 2.4 a 6.4°; 9 hiladas, 2.5 a 6.6°; 10 hiladas, 2.6 a 6.8°; 12 hiladas, 2.8 a 7.3°; 13 hiladas, 2.9 a 7.6°; y 14 hiladas, 3.1 a 8.1°. Como se aprecia, mientras la estructura tiene una mayor cantidad de hiladas, la pendiente puede ser mayor. En específico, Továr indica que los muros del Coricancha tienen una inclinación de 1 a 4° respecto a la vertical.

2.2.4. *Muros de contención de piedra*

Diversos muros de contención de piedra prehispánica suelen ser utilizadas generalmente para agricultura, conocido como andenes. Por ejemplo, Wright y Zegarra (2000) evaluaron diversos andenes en Machupicchu, de los cuales realizaron un bosquejo de su sección transversal incluyendo los suelos que retienen (*Figura*

2-11). Como se aprecia, el andén está compuesto por una capa externa de piedras grandes, y dentro del relleno contenido se aprecian capas de piedras más pequeñas. Por último, el terreno está compuesto por una capa superior de suelo, luego una base de arena fina y grava, y una subbase de grava mediana. Por otro lado, los autores mencionan que el grosor de los muros comúnmente era de 0.80 m.



*Figura 2-11: Estructura transversal de un andén en Machupicchu
Editado de Wright y Zegarra (2000)*

También Wright (2011) realizó una evaluación de los andenes de Moray y verificó que estos tienen una altura entre 1 y 7.2 m, con un promedio aproximado de 5.6 m. En la *Figura 2-12* se muestra el bosquejo de cómo están contruidos los andenes en Moray. Como se aprecia, la técnica de construcción para este caso es ligeramente diferente a las de Tipón, y esto podría darse debido a la disponibilidad de los materiales, la pendiente del lugar y el empuje del terreno.



*Figura 2-12: Estructura transversal de un andén de agricultura
Editado de Wright (2011)*

En el caso de los muros de contención de Sacsayhuamán (baluartes), Tito (2018) verificó que existen zonas donde el muro cedió unos 3.6 cm fuera de su plano debido al empuje del terreno, y que algunos bloques están separados en su plano horizontal y vertical en 7 cm y 5 cm respectivamente (*Figura 2-13a*). También, Tito especifica que en una zona donde el muro colapsó, se encontró relleno de bolonería, arena arcillosa y grava.

Por otra parte, según Ttito el nivel del suelo del relleno se encuentra más bajo, ya que se aprecian canales en los muros muy encima del ras del terreno contenido (*Figura 2-13b*). Por último, en promedio obtiene que el relleno de los 3 baluartes tiene una densidad de 1500 kg/m^3 , un ángulo de fricción de 31° y una cohesión de 58.86 kN/m^2 .

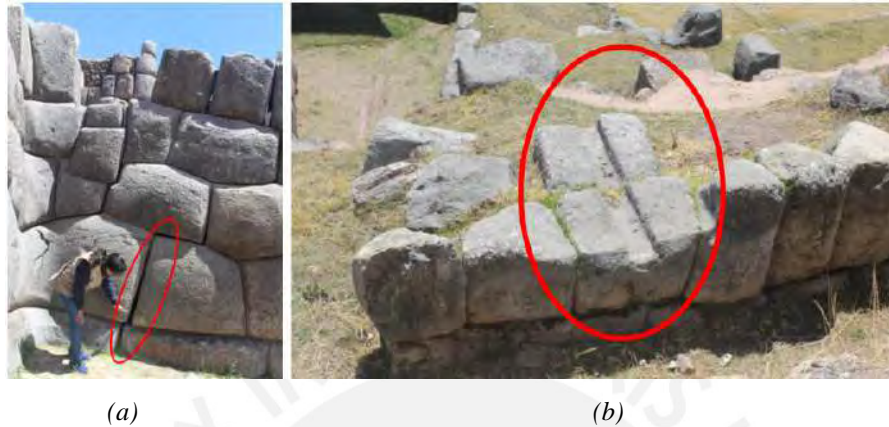


Figura 2-13: Detalles estructurales en los baluartes de Sacsayhuamán (Ttito, 2018)

(a) Daños estructurales (b) Disminución del relleno

2.2.5. Vibración ambiental en estructuras de piedra

Algunos autores evaluaron las frecuencias fundamentales de diversas construcciones de piedra prehispánicas usando microtemores (vibración ambiental). Por ejemplo, Cuadra et al. (2005) realizaron la evaluación de las frecuencias predominantes de la habitación de la estrellas en el Templo del Coricancha (*Figura 2-14a*). En el lugar se colocaron sensores de vibración ambiental en las direcciones Norte-Sur y Este-Oeste en los puntos indicados en la *Figura 2-14b*. Las frecuencias obtenidas del cociente espectral (fuera del plano) considerando Norte-Sur ch9/ch7 están entre 12 y 16 Hz, y en Este-Oeste ch8/ch7 están entre 14 a 17 Hz.

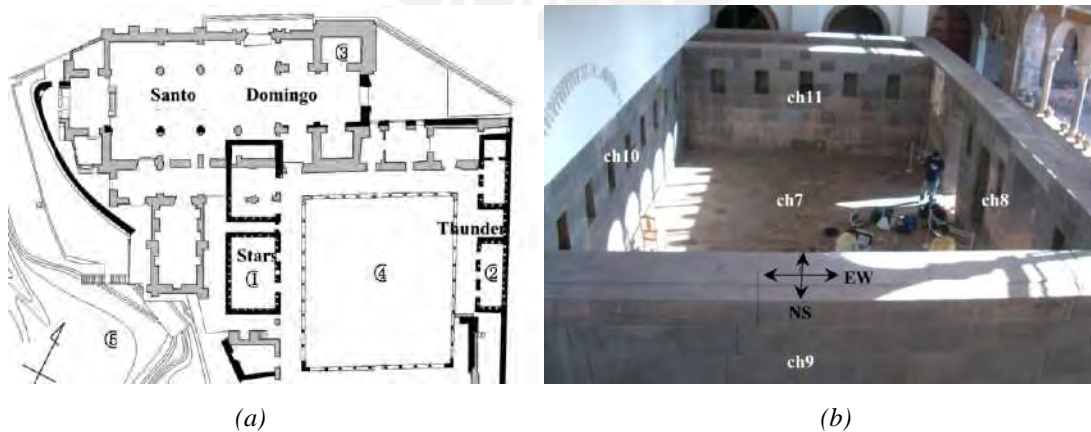


Figura 2-14: Evaluación de las frecuencias de la habitación en el Templo del Coricancha (Cuadra et al., 2005)

(a) Plano del Templo (b) Habitación de las estrellas

Cuadra (2021) también realizó el análisis por vibración ambiental de dos habitaciones inca en Machupicchu: Colca (*Figura 2-15a*) y Huayrana (*Figura 2-15b*), con el fin de evaluar las frecuencias predominantes de estas construcciones. A partir de las mediciones realizadas se obtuvo que la estructura del Colca tiene picos predominantes de frecuencia de 8 a 12 Hz (este-oeste) y 5.5 Hz (norte-sur); y Huayrana de 5.5 Hz (este-oeste) y 8.2 Hz (norte-sur). Tener en cuenta que estas frecuencias se obtuvieron realizando un cociente espectral de las mediciones obtenidas en la superficie superior de cada estructura y el ras del suelo.



Figura 2-15: Estructuras evaluadas en Machupicchu (Cuadra, 2021) (a) Colca (b) Huayrana

2.3. Método de elementos finitos (FEM)

2.3.1. Macro modelado

Debido a la complejidad del modelamiento de estas construcciones, algunos autores realizaron la evaluación de estructuras de piedra por medio de elementos finitos, considerando la estructura como un solo elemento o considerando un elemento por cada material que posee la estructura (macro modelado). Por ejemplo, Cuadra et al. (2005) realizó la modelación numérica de las dos construcciones de piedra del párrafo anterior por elementos finitos (FEM, *Figura 2-16*). El modelo consistió en estructuras con un módulo de elasticidad de 900 MPa y un coeficiente de Poisson de 0.3, con el cual el autor logra obtener los principales modos de vibración de las estructuras mencionadas en el párrafo anterior. En esta evaluación el autor hace énfasis que este modelo solo ayuda a identificar el comportamiento dinámico en el campo elástico, ya que, en una evaluación dinámica no lineal como es el caso de un sismo, se necesita que los bloques puedan desconectarse entre sí.

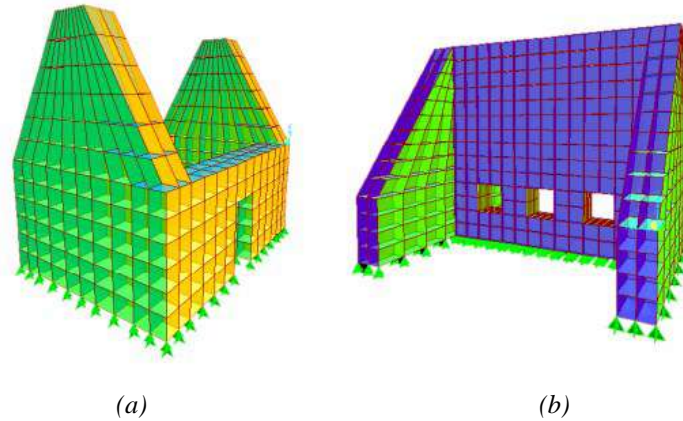


Figura 2-16: Modelo numéricos de estructuras evaluadas en Machupicchu (Cuadra et al., 2005)
(a) Colca (b) Huayrana

Por otro lado, se realizó la modelación numérica del Templo San Juan Bautista de Huaytará en Cusco, Perú (Cuadros, 2020; Cuadros et al. 2024) por medio de elementos finitos (FEM, Figura 2-17a). Esta estructura está construida con diversos materiales: ladrillo de arcilla cocida (antigua y contemporánea), adobe, piedra estilo inca, piedra estilo desordenado, piedra estilo colonial y concreto. En la modelación se consideraron las características de todos estos materiales (Figura 2-17b y Figura 2-17c). Es importante recalcar que se realizaron ensayos experimentales en piedras talladas Inca obtenidas cerca del lugar, del cual se obtuvieron las siguientes propiedades: densidad promedio de $2291.\text{kg}/\text{m}^3$ y resistencia a la compresión de 77.05 a 166.35 MPa. A partir de la modelación se calculó que los modos de vibración de la estructura se encuentran en las siguientes frecuencias: 2.69, 2.8, 2.99, 3.10, 3.43, 3.69, 3.79, 4.26 y 4.60 Hz.

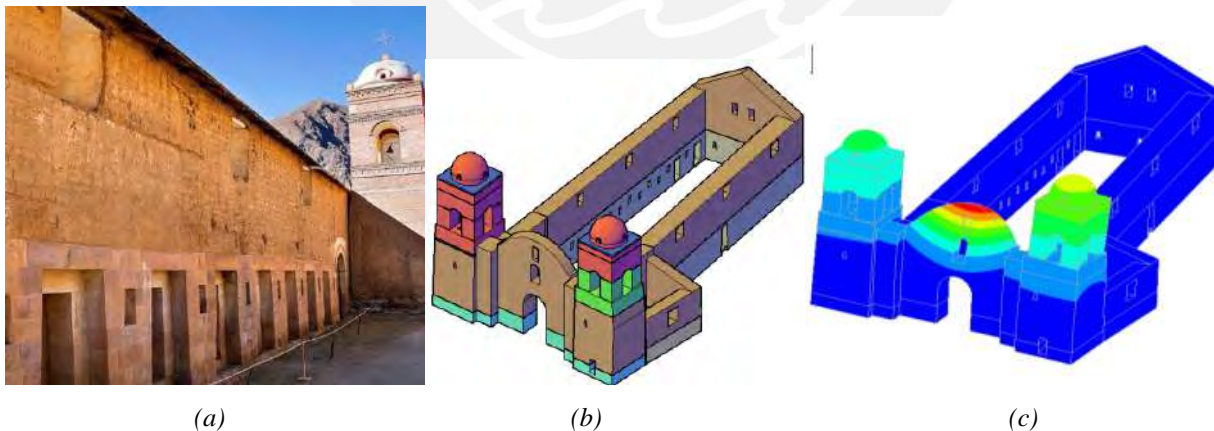


Figura 2-17: Modelación numérica del Templo San Juan Bautista de Huaytará (Cuadros, 2020; Cuadros et al. 2024)
(a) Vista de los diversos materiales del Templo (b) Modelo 3D de la iglesia (c) Primer modo de vibración: 2.69 Hz

También, Mutoh et al. (2023) realizaron la evaluación numérica de diversas iglesias en Armenia, las cuales tienen daños posiblemente debido a sismos. Uno de los casos presentados es la iglesia de Saint Hripsime

(Figura 2-22a), la cual está hecha de piedra y mortero y por medio de instrumentos de vibración se obtuvieron las frecuencias predominantes de la estructura que fueron 2.9, 3.7 y 4.8 Hz. La estructura se modeló con un módulo de Young de 491 N/mm^2 , un módulo de Poisson de 0.167, una densidad de 1080 kg/m^3 , una resistencia a la compresión de 2.1 N/mm^2 (criterio Drucker Prager), y un esfuerzo a la tracción de 0.21 N/mm^2 (Figura 2-22b). A partir del modelo también se obtuvieron las frecuencias de la estructura que son 3.116, 3.653 y 4.647 Hz, las cuales son muy similares a las obtenidas por los equipos de vibración. Por medio de cargas laterales incrementales en el eje Y, se pudo evaluar las posibles zonas de daño de la estructura (Figura 2-22c). Lo más interesante es que en la estructura se encuentra una fisura vertical en la misma zona roja que el modelo, la cual pudo ser ocasionada por un sismo pasado.

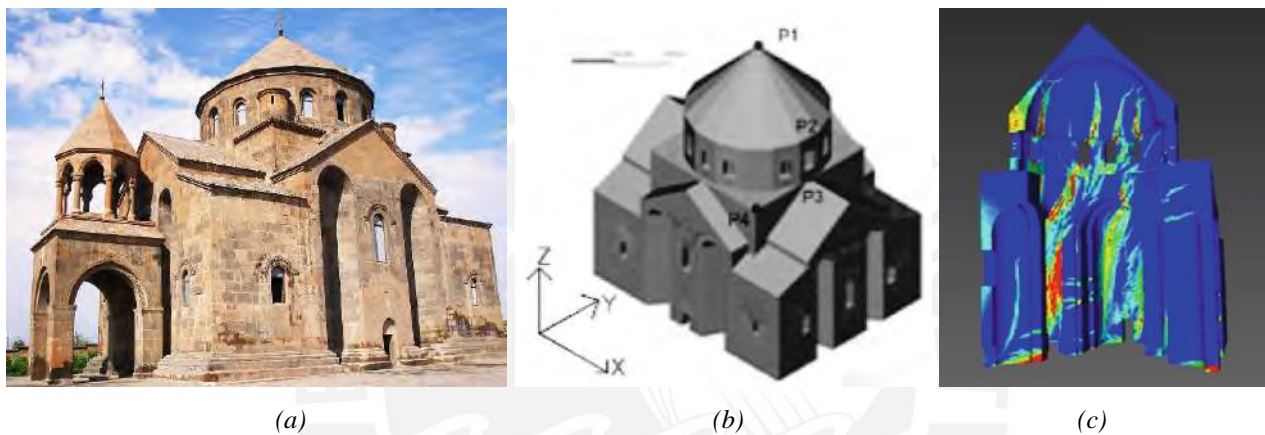


Figura 2-18: Iglesia Saint Hripsime (Mutoh et al., 2023)
 (a) Vista 3D de la iglesia (b) Modelo 3D (c) Daños debido a cargas laterales

Por último, Endo et al. (2023) realizaron la evaluación de la iglesia de San Giovanni Evangelista en Casentino, Italia, la cual fue dañada por diversos sismos (Figura 2-19a). La mampostería está construida por escombros y mortero de cal. Los muros son de 3 capas separadas, sin piedras que atraviesen las capas. Para evaluar la construcción se realizaron 2 modelos en DIANA FEA (Figura 2-19b y Figura 2-19c), uno en la que la base de la estructura estaba empotrada (modelo F), y otro en la que la base tenía propiedades de contacto de rigidez normal y tangencial (modelo SI). En ambos modelos, la energía de fractura fue de 20 N/m , la densidad de la albañilería de ladrillo, la albañilería de piedra y madera fue de 1800 , 2000 y 430 kg/m^3 respectivamente. Las propiedades de la albañilería de piedra o ladrillo, y madera fueron: Módulo de Elasticidad, 1000 y 7000 MPa ; resistencia a la compresión, 2 y 20 MPa ; módulo de Poisson, 0.2 y 0.3 ; y esfuerzo de tracción de 0.1 y 20 MPa respectivamente. La rigidez normal y tangencial para el modelo SI fue de 5×10^9 y $2.5 \times 10^9 \text{ N/m}^3$. También se consideró en el modelo SI un modelo resorte en la base con una rigidez normal y tangencial de 1×10^{10} y $0.5 \times 10^{10} \text{ N/m}^3$. En ambos modelos no se permitió la rotación de los elementos constituyentes. Las frecuencias predominantes de la estructura en el eje X para el modelo F y SI fueron de 2.27 y 2.43 Hz respectivamente,

y en el eje Y de 3.89 y 3.91 Hz respectivamente. Cuando se realizó el análisis pushover se verificó que la aceleración y los patrones de daños en ambos modelos era similar; sin embargo, en desplazamientos era diferente. Por otro lado, cuando se le colocó el registro sísmico de l'Aquila en las direcciones X e Y, los patrones de daño eran similares; sin embargo, las aceleraciones y desplazamientos variaban ligeramente.

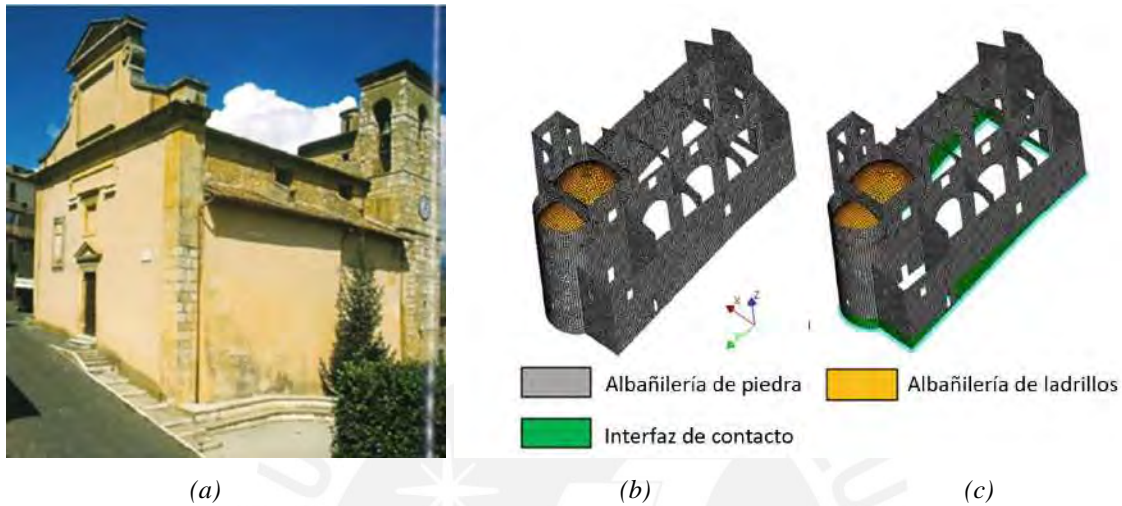


Figura 2-19: Iglesia San Giovanni Evangelista (Endo et al., 2023)

(a) Vista 3D de la iglesia (b) Modelo F (c) Modelo SI

2.3.2. Modelado con propiedades de contacto

Como se comentó, los macro modelados son muy útiles para conocer los posibles patrones de daño de las estructuras; sin embargo, si se desea conocer adecuadamente el comportamiento dinámico de estas estructuras, es necesario realizar un análisis dinámico en el cual los sillares se desconecten. Por este motivo, otros autores evaluaron este tipo de estructuras por medio de elementos finitos incluyendo propiedades de contacto.

Por ejemplo, Papadopoulos (2021) analizó el comportamiento no lineal de una sección de un muro de defensa, de la ciudad antigua de Messene, Grecia (Figura 2-20a). En general el muro está construido con roca caliza, y tiene de 7 a 9 m de altura. Se realizó la modelación numérica de una sección en Abaqus, considerando una densidad de bloques de 2650 kg/m^3 y un módulo de Elasticidad de 80 GPa. El contacto se consideró del tipo Hard Contact, en el cual Abaqus asume automáticamente la rigidez normal y tangencial de contacto; con un coeficiente de fricción de 0.7. Se sometió la estructura a diferentes registros sísmicos locales en el plano y perpendicular al plano. En la Figura 2-20b se muestra la estructura deformada, escalada por 3, para que se puedan notar los daños, luego del registro sísmico de Edessa (PGA de 0.1g) escalado en 3.75, aplicado en la base perpendicular al muro. Como se aprecia, los bloques que sufren más daño son los superiores.

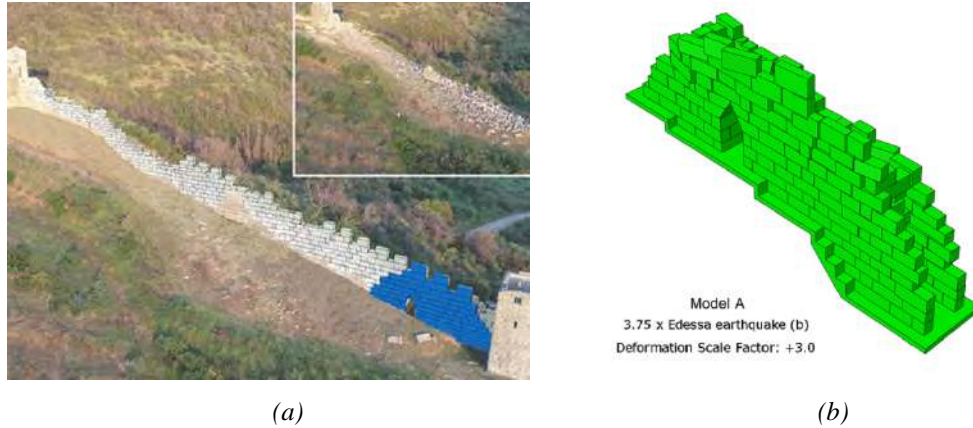
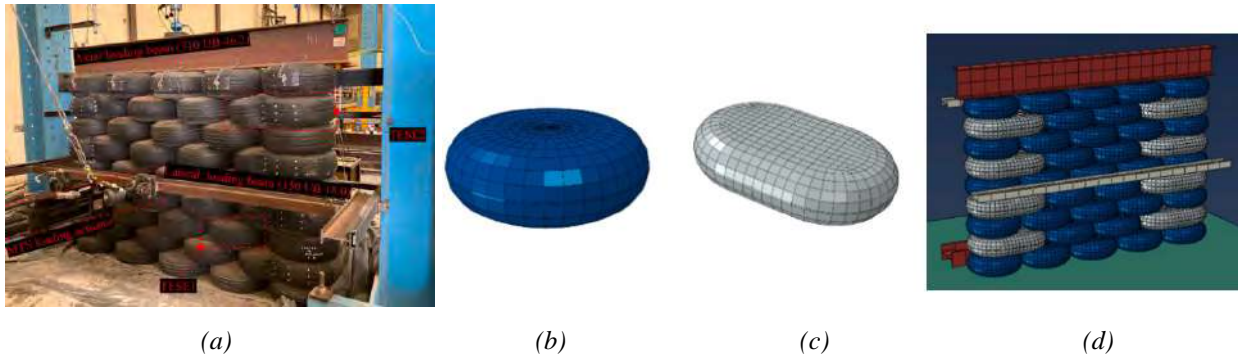


Figura 2-20: Evaluación numérica de sección de un muro de defensa, Messene (Papadopoulos, 2021)

(a) Estructura evaluada (b) Modelo luego del sismo

También, Xu et al. (2023) realizaron la evaluación de una pila de pared de neumáticos rellenos con arena, los cuales fueron colocados unos sobre otros. Se le llamó TESE1 a aquellos neumáticos individuales rellenos con arena, y los TESE2 son aquellos hechos con 1.5 neumáticos rellenos con arena (Figura 2-21a). Las dimensiones de este muro eran de 2855 mm (largo), 1855 mm (alto) y 570.7 mm de grosor. La resistencia a la tracción y el módulo de Elasticidad de tiras de estos neumáticos fue de 14 y 112 MPa respectivamente. El muro fue comprimido a 10 kN de manera monotónica y cíclica, y para evitar un volcamiento o pandeo del muro, se colocaron barras metálicas a los costados. El modelado se realizó en Abaqus, y TESE1 y TESE2 fueron modelados como en las Figura 2-21b y Figura 2-21c respectivamente. Los TESEs tenían una densidad de 1750 kg/m^3 , un Módulo de Young de 12 MPa y un coeficiente de Poisson de 0.15. Las barras metálicas tenían una densidad de 7792 kg/m^3 y eran rígidas. En este caso también se consideró el contacto del tipo Hard Contact, en el cual Abaqus asume automáticamente la rigidez normal y tangencial de contacto; con un coeficiente de fricción de 0.35. Los modos de falla en el caso experimental y numérico fueron similares; sin embargo, los desplazamientos del modelo numérico eran ligeramente mayores al experimental.



(a) Ensayo experimental a compresión (b) TESE1 (c) TESE2 (d) Modelo numérico

Figura 2-21: Muro de neumáticos rellenos con arena (Xu et al., 2023)

2.3.3. Modelado con propiedades de contacto y sólidos rígidos

En las investigaciones anteriores se consideró la capacidad de deformación a los materiales constituyentes; sin embargo, realizar este proceso conlleva a que el tiempo computacional en los modelos sea alto. Como se comentó en el capítulo 1, se sabe que las rocas tienen una rigidez muy alta, por lo que diversos autores consideraron a las piedras como sólidos rígidos, y así, reducir el tiempo computacional de los modelos evaluados.

Por ejemplo, Suarez (2021) realizó la evaluación numérica por medio de FEM de una pila del puente de Alcántara en España (Figura 2-22a), usando el software Abaqus. En el modelo se utilizaron sillares de roca granito de $0.6 \times 0.6 \times 1.2$ m con una densidad de 2500 kg/m^3 (Figura 2-22b). El relleno de la pila se representó usando el modelo constitutivo no lineal de Drucker-Prager. También se consideró la masa del tímpano y los arcos como masas concentradas. El contacto entre sillares tenía una rigidez normal de $5 \times 10^8 \text{ N/m}^3$, un coeficiente de fricción de 0.4 y un coeficiente de amortiguamiento crítico de 0.08. Se aplicó el registro sísmico de Northridge, 1994 en la dirección X multiplicada por factores de amplificación. Se aprecia que el pilar colapsa cuando se somete la estructura al sismo mencionado escalado en 1.5 (Figura 2-22c).

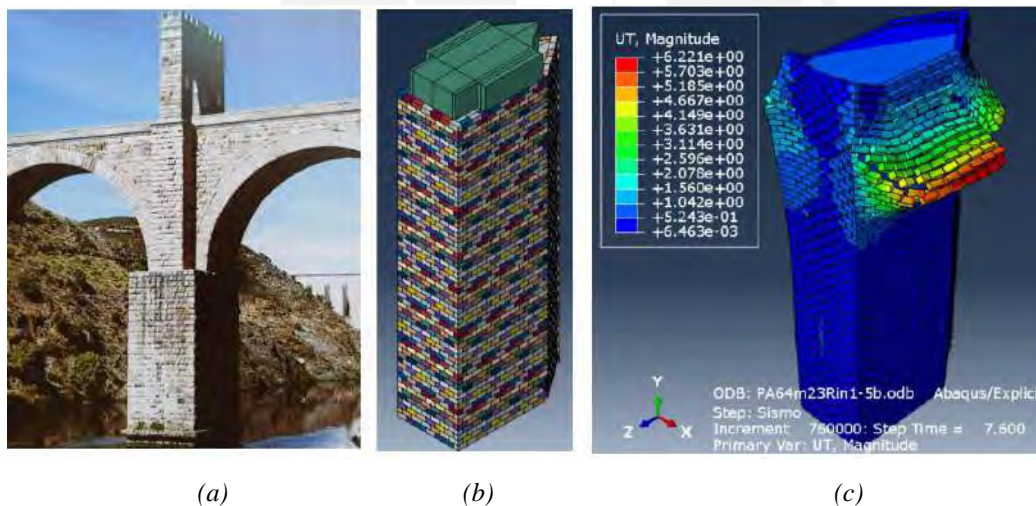


Figura 2-22: Evaluación del puente de Alcántara por FEM (Suarez, 2021)

(a) Pilar analizado (b) Modelo FEM (c) Colapso del pilar por el sismo escalado en 1.5

También, Tarque et al. (2023) realizaron la evaluación de una sección del muro de la piedra de los 12 ángulos en Cusco (Figura 2-23a), Perú. La modelación se realizó por elementos finitos en Abaqus. El muro está construido con piedras encajadas y por encima con adobe. En este caso se consideró la piedra como bloques rígidos y el adobe como un material deformable constituido por 4 bloques (Figura 2-23b). La densidad de la piedra y los adobes fueron de 2300 y 1631 kg/m^3 respectivamente. El módulo de Elasticidad del adobe se consideró de 200 MPa y un coeficiente de Poisson de 0.3. Para las propiedades de contacto se consideraron

una rigidez normal de contacto de $2 \times 10^7 \text{ N/m}^3$, y un coeficiente de fricción de 0.4. En el modelo se colocó el registro sísmico de Áncash, 1970, (PGA de 0.1g), en la base fuera del plano del muro a diferentes escalas. La estructura sufrió graves daños a partir del registro sísmico escalado a un PGA de 0.2g, y colapsó parcialmente cuando fue escalado a un PGA de 0.5g (*Figura 2-23c*).

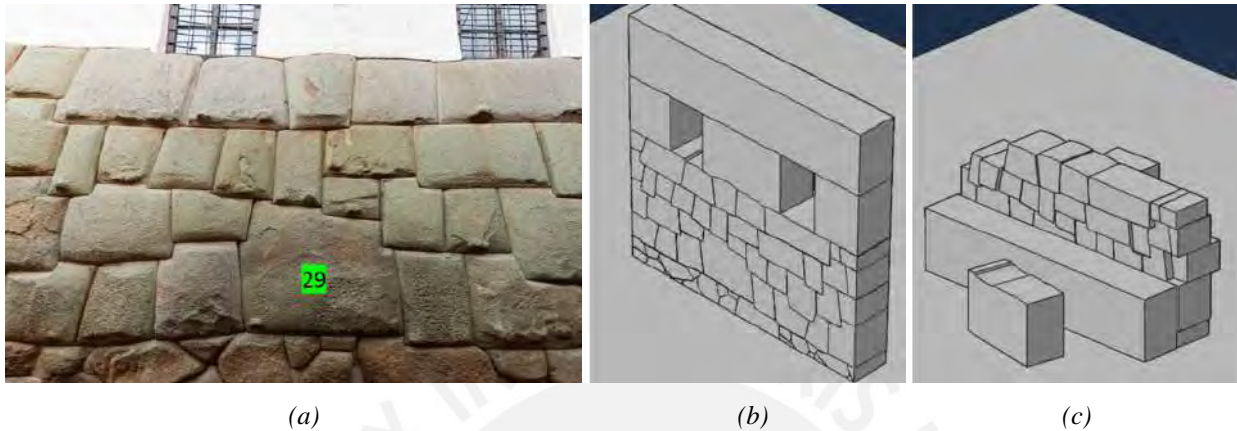


Figura 2-23: Evaluación del muro de la piedra de los 12 ángulos (Tarque et al., 2023)

(a) Estructura evaluada (b) Modelo numérico (c) Colapso del muro debido a un sismo con un PGA de 0.5g

2.4. Método de elementos discretos (DEM)

2.4.1. Modelado con esferas y agrupamiento de esferas

Otro modo de evaluar estas construcciones es por medio de elementos discretos (DEM), en el cual se modelan los sillares por medio de propiedades de contacto. Una ventaja de DEM es que se pueden modelar los suelos como una gran cantidad de partículas. En el caso de FEM, también es posible; sin embargo, al discretizar cada partícula, el tiempo computacional se incrementa drásticamente, por lo que no es recomendable.

Por ejemplo, Shaikh et al. (2021) evaluaron el comportamiento de un suelo a diferentes humedades: relativamente seco (7.5%), húmedo (21.5%) y mojado (38%) frente a cargas externas. Para esto utilizó una capa de suelo de 0.5.m de ancho, 1.5 m de largo y 0.5 m de profundidad, contenida en un recipiente. Se utilizó una zapata tipo garra con diferente altura de garra, el cual se penetraba en el suelo y se trasladaba a lo largo de la capa de suelo (*Figura 2-24a*). Se midió la fuerza necesaria para mover esta garra en toda la longitud, y se evaluó el comportamiento del suelo. Para la modelación numérica simularon el suelo por medio de esferas de 7 a 9 mm de diámetro usando DEM en el software EDEM 2018 (*Figura 2-24b*). Para las esferas usaron la teoría de contacto de Hertzian, el cual utiliza leyes de coulomb, y fricción tangencial y de giro. Las características de los modelos usados para los diversos ensayos fueron: densidad del suelo (1450, 2000 y 2650 kg/m^3), ratio de Poisson (0.25, 0.3, 0.42), módulos de corte (de 6×10^6 a 1.63×10^{10} Pa), coeficiente de restitución, coeficiente de fricción estática, coeficiente de fricción de giro, rigidez normal (5×10^7 Pa), rigidez

tangencial (5×10^7 Pa), esfuerzos normales y de corte. Los resultados del modelo mostraron que la fuerza experimental variaba al caso real en hasta 22.76%. Sin embargo, el comportamiento de falla del modelo era similar al suelo.

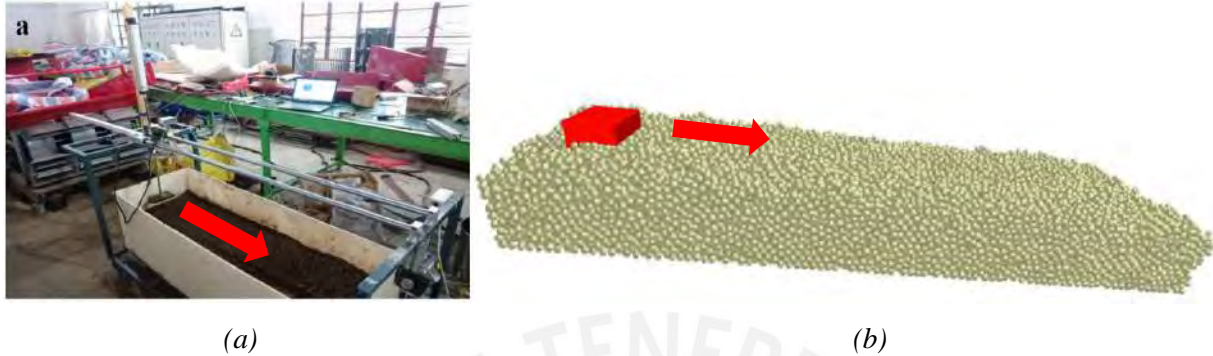


Figura 2-24: Evaluación de la resistencia al suelo por desgarre (Shaikh et al., 2021)

(a) Ensayo experimental (b) Modelo DEM

Por otro lado, en el caso de los sillares de las construcciones de piedra, diversos autores lo modelaron por medio de agrupamiento de esferas, los cuales se comportan como un solo bloque que se traslada y rota.

Por ejemplo, Fukumoto et al. (2014) realizó la construcción de muros de piedra de junta seca a escala 1/33 (Figura 2-25a), en el cual usaron roca granito. En total se usaron 25 bloques cúbicos de 3 cm de lado, con una densidad de 2650 kg/m^3 y un coeficiente de fricción de 0.6, los cuales estaban colocados sobre una capa de arena. También, este muro contenía grava y arena como se muestra en la Figura 2-25b. El muro comenzó a fallar en una aceleración de 6000 gal (6 m/s^2) con una frecuencia de 60 Hz (Figura 2-25c). Luego, por medio de DEM, con un software propio de este grupo de investigación, realizaron la modelación de esta estructura. Los bloques fueron simulados por paquetes agrupados de 706 esferas, los cuales se trasladaban como un bloque en sí. En cambio, la grava y arena fueron simulados con esferas sueltas. Las propiedades de contacto fueron la rigidez normal y tangencial de $1 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ y $0.25 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ respectivamente. Como se aprecia en la Figura 2-25d la estructura del modelo numérico comienza a rotar como un conjunto y es diferente al modo de colapso real de la estructura (Figura 2-25c).

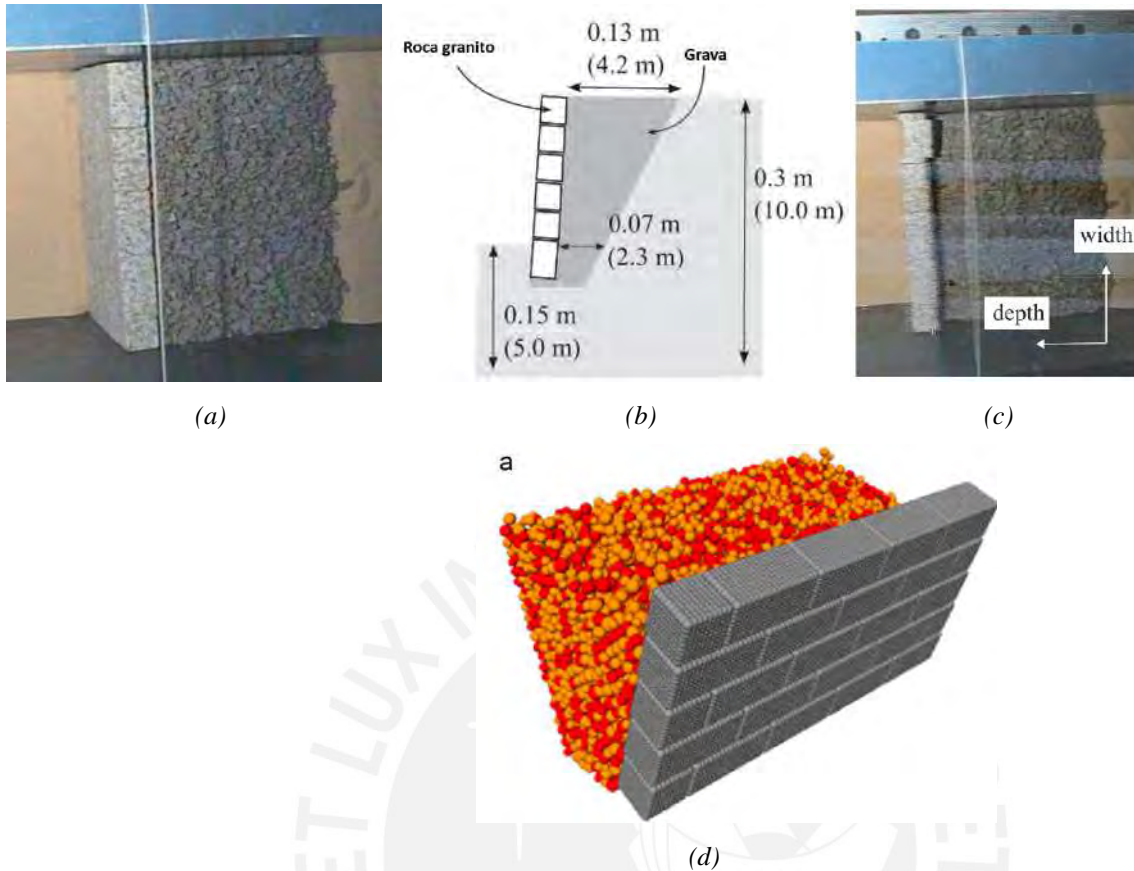


Figura 2-25: Ensayos de vibración (Fukumoto et al., 2014)
 (a) Vista superior del modelo experimental (b) Vista transversal del modelo
 (c) Falla de la estructura por la vibración (d) Modo de fallo del modelo DEM

También, Santa Cruz et al. (2021) realizaron un análisis por volteo de muros hechos con bloques de concreto de forma regular (Figura 2-26a) y muros hechos con bloques de piedra caliza irregular (Figura 2-26b). Los muros construidos tenían una longitud de 1500 mm, un grosor entre 60 y 150 mm, y una altura entre 375 y 400 mm. Estos muros fueron colocados sobre una plataforma giratoria de madera, donde la primera hilada de bloques estaba siempre restringida como se aprecia en la Figura 2-26a y Figura 2-26b. Los muros de bloques de concreto colapsaron en un ángulo promedio de 18.8° y los muros de piedra en un ángulo promedio de 14.3° . Para la modelación numérica por DEM de estas construcciones se utilizó el software YADE y las siguientes propiedades de los bloques: densidad de 2400 kg/m^3 , módulo de Young de $3.07 \times 10^{10} \text{ Pa}$ y módulo de Poisson de 0.18. Para las juntas se utilizó como rigidez de contacto normal y tangencial: $5 \times 10^7 \text{ Pa}$ y $2.5 \times 10^7 \text{ Pa}$ (caliza), $1.75 \times 10^8 \text{ Pa}$ y $0.86 \times 10^8 \text{ Pa}$ (concreto) respectivamente. El ángulo de fricción fue de 35° (caliza) y 32° (concreto), y el amortiguamiento de 0.8 para ambos casos. A partir de todas las propiedades mencionadas lograron un ángulo de colapso similar al experimental; sin embargo, los desplazamientos de los

bloques superiores de los modelos numéricos fueron mucho menores al ensayo real en el caso de los muros de piedra (*Figura 2-26c y Figura 2-26d*).

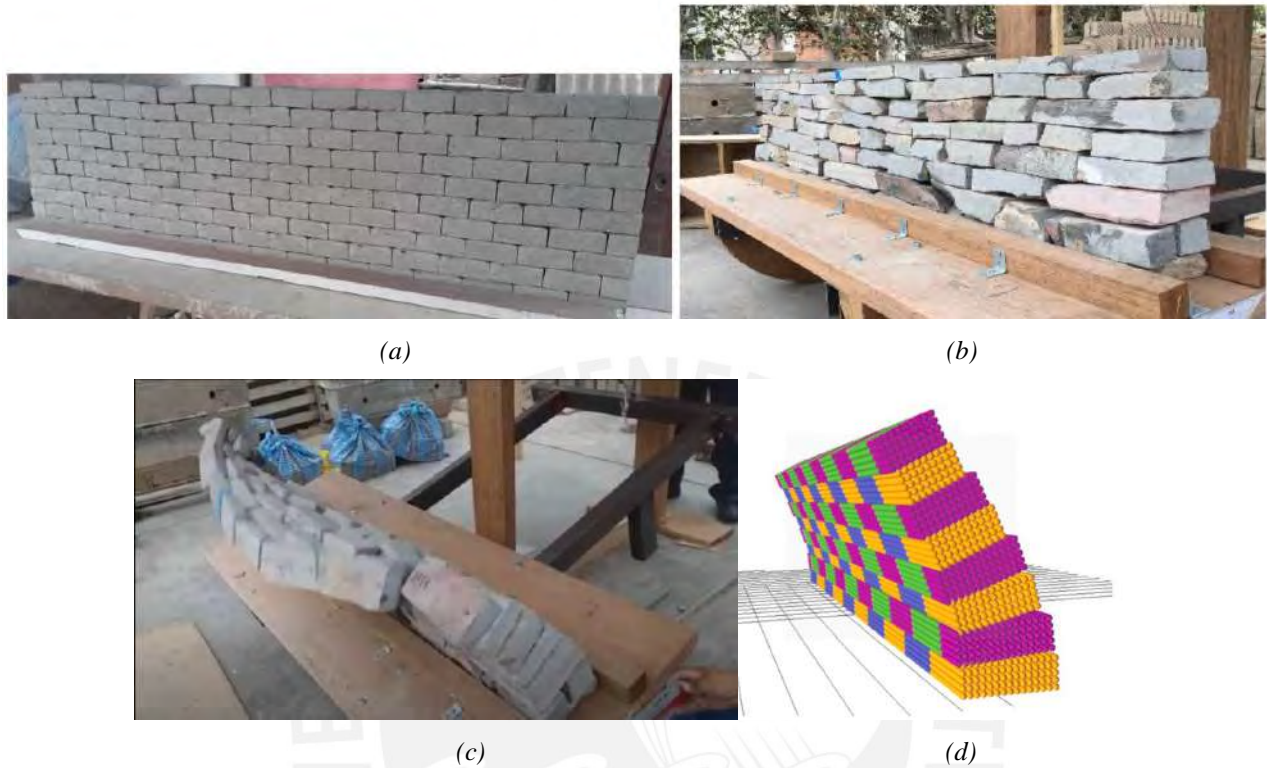


Figura 2-26: Muros construidos para ensayos por volteo (Santa-Cruz et al., 2023)

(a) Muro de bloques de concreto (b) Muro de bloques de piedra

(c) Colapso del muro de piedras (d) Colapso del modelo del muro de piedras

En otro caso, Ita et al. (2023) realizaron la construcción de seis muros tradicionales conocidos como pircas y las ensayaron por volteo. Las pircas son muros que tienen bloques de piedra irregular colocados unos sobre otros sin mortero. Los muros construidos eran de 4 metros de largo, 0.5 o 0.6 m de ancho y 1 o 1.5 m de alto. En la *Figura 2-27* se aprecia el comportamiento de uno de los muros al volteo en diferentes grados de inclinación. Los muros de 1 m de altura colapsaron a 16.6, 17.2 y 20°, y los de 1.5 m en 14, 14.2 y 15°. Para la evaluación numérica se utilizó DEM en el software YADE. En este caso se consideraron los bloques como regulares y como un agrupamiento de esferas (*Figura 2-28*). Los bloques tenían una densidad de 2767 kg/m³, una rigidez normal de 5×10^7 N/m³, una rigidez tangencial que era la mitad de la rigidez normal, y un ángulo de fricción de 20°. En la *Figura 2-28c*, se muestra el colapso de uno de los modelos realizados en 20°. Como se aprecia este tipo de estructuras es muy variable, ya que el sistema presenta bloques muy irregulares y de distintos tamaños. Esto hace que su evaluación sea muy compleja.

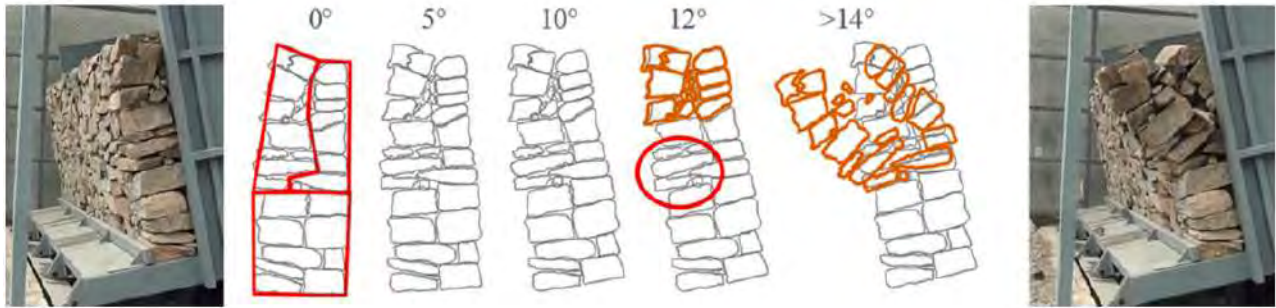


Figura 2-27: Ensayo experimental de un muro tipo pirca al volteo (Ita et al., 2023)

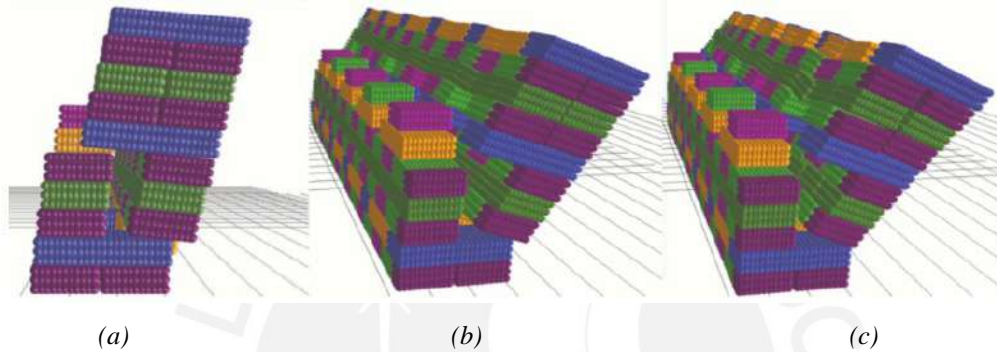


Figura 2-28: Evaluación numérica del muro tipo pirca en DEM (Ita et al., 2023) (a) 7° (b) 15° (c) 20°

2.4.2. Modelado con discretización de sólidos

Los modelos anteriores son muy útiles para simular el comportamiento de los sillares; sin embargo, como se aprecia en estos estudios, el contacto entre bloques son solo puntos, y en la realidad los bloques generalmente tienen un contacto de área. Por este motivo, otros autores evaluaron diversas construcciones de junta seca, pero en este caso, discretizaron los sillares en subelementos tipo poliedros, con el fin de que la geometría del sillar y el contacto se parezca más a la estructura real.

Por ejemplo, Bui et al. (2017) realizaron diversas construcciones a escala 1/10 de estructuras de junta seca, usando bloques de azúcar. Los bloques de azúcar tenían dimensiones de $27 \times 17 \times 12$ mm, con un peso específico de 1081 kg/m^3 . El ángulo de fricción entre estos bloques fue medido experimentalmente, dando como resultado un valor de 38° . Uno de los tantos ensayos que realizaron fue el de volteo, en la que construyeron muros con sección tipo “C” (Figura 2-29a), y en la que cada muro tenía una relación entre longitud del alma y la altura (L/H) variable. El colapso en los muros se dio en 20 , 12.5 , 10 y 9° aproximadamente, para las relaciones L/H de 1 , 2.3 , 2.8 y 3.25 respectivamente. También se realizó el ensayo de una habitación cerrada al volteo por una carga armónica en la base (Figura 2-29c). La estructura colapsa en una amplitud máxima de 3mm ; sin embargo, no se indica la frecuencia de colapso. Para la modelación numérica se utilizó DEM y se consideraron los bloques como sólidos rígidos, es decir que su módulo de

elasticidad es prácticamente infinito (*Figura 2-29b* y *Figura 2-29d*). Los resultados de los modelos numéricos variaban ligeramente a los resultados por volteo de los ensayos experimentales.

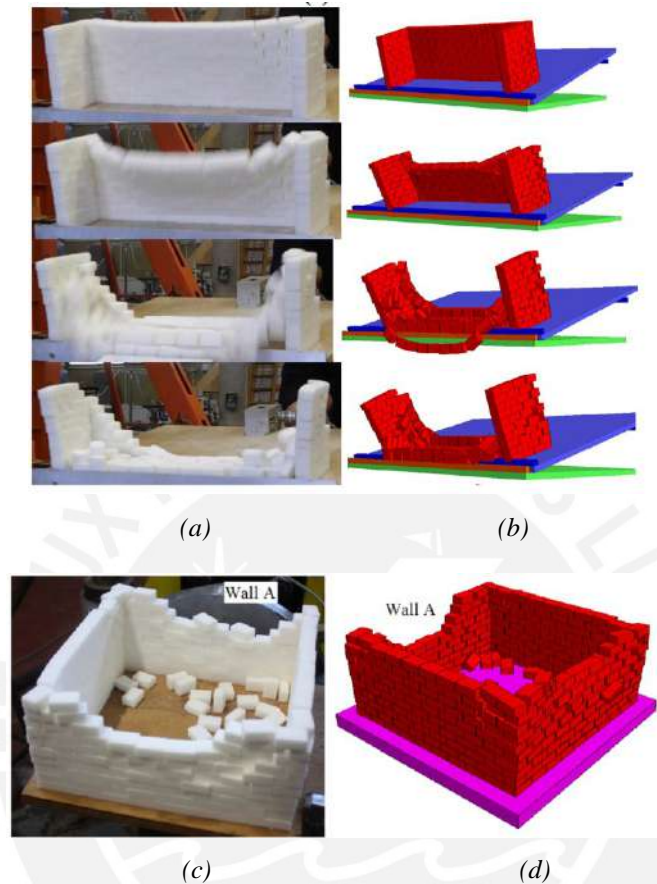


Figura 2-29: Estructuras con bloques de azúcar ensayadas por volteo (Bui et al., 2017)

(a) Muros ensayados (b) Modelos DEM de los muros (c) Habitación ensayada (d) Modelo DEM de la habitación

También, Foti et al. (2018) evaluaron el comportamiento de una bóveda cruzada a escala, y este se modeló usando DEM en el software 3DEC (*Figura 2-30*). Esta bóveda tenía un radio de 0.05 m y un espesor de 0.07 m, con una densidad de bloques de 649.5 kg/m^3 . Los bloques estuvieron hechos de mortero con tiza y con una superficie bañado en ácido poliláctico. Para el modelo se utilizó un coeficiente de fricción de 0.62 y una rigidez normal y tangencial de 900 GPa. En el ensayo experimental se realizó un asentamiento en una de las columnas para evaluar el comportamiento de toda la estructura. Como se aprecia en la *Figura 2-30*, el modo de falla en el modelo (*Figura 2-30b*) fue similar al ensayo experimental (*Figura 2-30a*). Sin embargo, la densidad de los bloques en el modelo tuvo que ser de 2200 kg/m^3 , para que se logre una similitud entre el modelo numérico y el experimental. Lamentablemente, este valor no concuerda con la verdadera densidad de los bloques (649.5 kg/m^3).

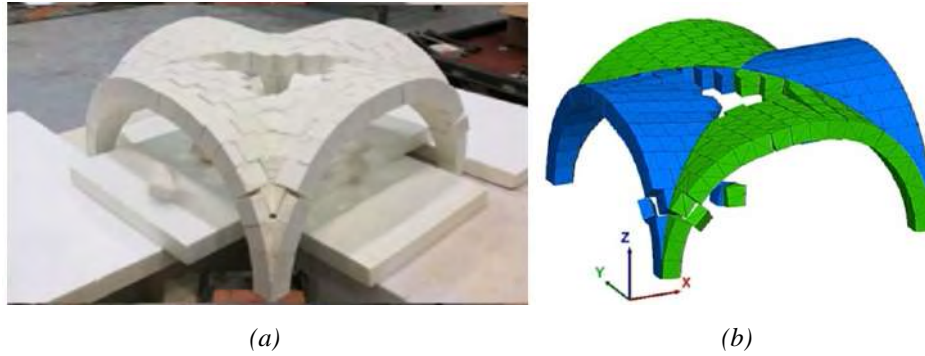


Figura 2-30: Mecanismo de falla por asentamiento en bóveda (Foti et al., 2018)

(a) Ensayo experimental (b) Modelo numérico

Por otro lado, Savalle et al. (2020) desarrollaron el análisis por volteo de muros de contención a escala, hecho con bloques de arcilla (Figura 2-31). En este caso, se utilizó arena seca como material de relleno. Los muros tenían una longitud de 400 mm, altura de 34 a 190 mm y un ancho de 34 a 85 mm. El contenedor de giro era de $400 \times 400 \times 250$ mm (L_0 , W_0 , H_0 respectivamente). En este caso, la primera fila de bloques estaba restringida y se realizó una comparación entre el ángulo de colapso y la esbeltez del muro (altura entre grosor). En general, para esbelteces de 1, 2, 3 y 4, el muro falló por volteo en 24 , 14.6 , 7.9 y 1.7° respectivamente. Por lo tanto, mientras la esbeltez es mayor, el ángulo de colapso es menor. Para la modelación se utilizaron las siguientes propiedades en los sillares y el relleno: densidad de 1440 y 1320 kg/m^3 ; rigidez normal de 5.56×10^8 y 8.33×10^6 MPa; rigidez tangencial de 4.17×10^8 y 3.85×10^6 MPa; y el ángulo de fricción de 32° y 32° respectivamente. Los modelos numéricos variaban ligeramente a los resultados por volteo de los ensayos experimentales.

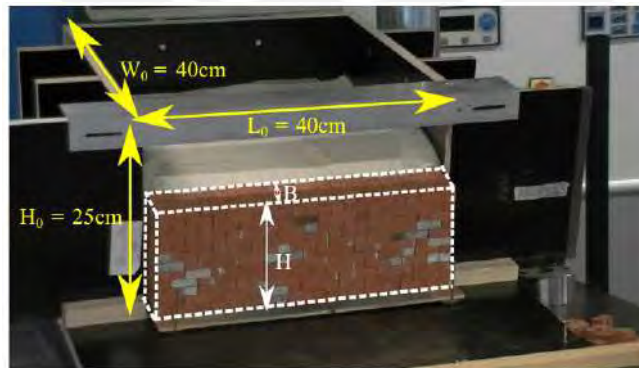


Figura 2-31: Muro de contención hecho con bloques de arcilla cocida (Savalle et al., 2020)

2.5. Método de elementos combinados finito-discretos (FDEM)

Por otro lado, Munjiza (2004) planteó un nuevo método llamado elementos combinados finito-discreto (FDEM), el cual incluía la falla y el colapso de sistemas estructurales. En este caso los sólidos son

discretizados como FEM; sin embargo, se asume que los sólidos puedan fallar, fracturarse o fragmentarse. Por otro lado, el contacto es definido con leyes de contacto al igual que en DEM, y en el caso de que un sólido se fracture, los fragmentos pueden interactuar con el todo y entre sí, y sus caras fracturadas también adquieren propiedades de contacto.

Smoljanovic et al (2018) utilizó este modelo FDEM, en el cual se discretiza una estructura por elementos finitos del tipo tetraedros, y en los contactos se incluye leyes de fricción y normal. También se incluyen leyes de fractura y fragmentación de elementos discretos, con el fin de predecir el comportamiento de corte de juntas secas entre bloques. Por ejemplo, en la *Figura 2-32a* se muestra el ensayo experimental realizado por Bui et al. (2017), quienes realizaron un caso de asentamiento de un muro de $1.575 \times 1 \times 0.22$ m, de bloques de arcilla cocida de dimensiones $0.05 \times 0.105 \times 0.22$ m, con un peso específico de 2200 kg/m^3 y un ángulo de fricción de 38° (estas propiedades fueron obtenidos en ensayos experimentales). Smoljanovic et al. en su modelo utilizaron un Módulo de Elasticidad y coeficiente de fricción de 9700 MPa y 0.2 respectivamente, y un esfuerzo de tracción y corte de 1.5 MPa con energía de fractura de 37.2 N/m . Por último, se utilizaron propiedades tipo penalty normal y fuerzas de contacto de fricción de 9.7 GPa y 40 GPa/m respectivamente. Los resultados del modelo demostraron un mecanismo de falla similar al caso experimental (*Figura 2-32b*). También, se aprecia como el bloque intermedio inferior del modelo sufre una fractura similar al ensayo experimental.

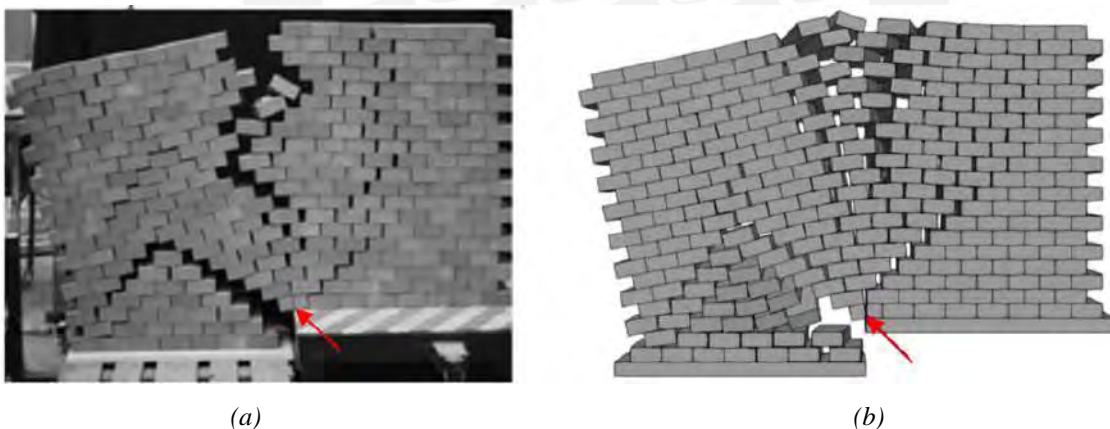


Figura 2-32: Mecanismo de falla por asentamiento (Bui et al., 2017; Smoljanovic et al., 2018)

(a) Ensayo experimental (b) Modelo FDEM

También, Chen et al. (2021) realizó la evaluación numérica de diversos ensayos experimentales usando FDEM. Lo interesante en esta investigación es que los autores utilizaron fuerzas de contacto potencial, para que, de este modo, las propiedades de contacto se vayan actualizando automáticamente en cada paso de tiempo evaluado. Uno de los casos de estudio que evalúan es un muro tipo portal, el cual fue ensayado por Portioli y Cascini (2017). Los bloques son de toba de $100 \times 100 \times 50$ mm, la viga es de madera y los muros

de grosor de 100 mm (Figura 2-33b). El coeficiente de fricción entre toba y toba es de 0.72, y entre madera y toba de 0.66. En la zona izquierda del portal se genera un asentamiento a una velocidad de 10 mm/s. Los resultados del modelo experimental y el modelo numérico son muy similares en un asentamiento de 100 mm (Figura 2-33a).



Figura 2-33: Portal ensayado por asentamiento (Chen et al., 2021) (a) Ensayo numérico (b) Ensayo experimental

Por otro lado, Ou et al. (2022) realizaron la evaluación de la fachada de la parroquia Natividad de María en Bondeno, Italia por medio del método FDEM (Figura 2-34a). La fachada es de 22 m de ancho y 19 m de alto. Para la modelación se utilizaron 1873 bloques. Los bloques tenían una densidad de 18 kN/m³, un coeficiente de Poisson de 0.2, un Módulo de Elasticidad de 10 GPa y un coeficiente de fricción de 0.6. En este caso, también las propiedades de contacto se actualizaban en cada intervalo de tiempo. Se realizó un asentamiento de la base derecha a una velocidad de 0.05 m/s. En la Figura 2-34b y Figura 2-34c se muestra la estructura asentada en la base derecha a 0.2 y 0.685 m respectivamente. Los autores mencionan que con estos resultados no solo se verifica el modo de falla de la estructura, sino predicen el proceso del colapso y los desplazamientos generados entre los bloques.

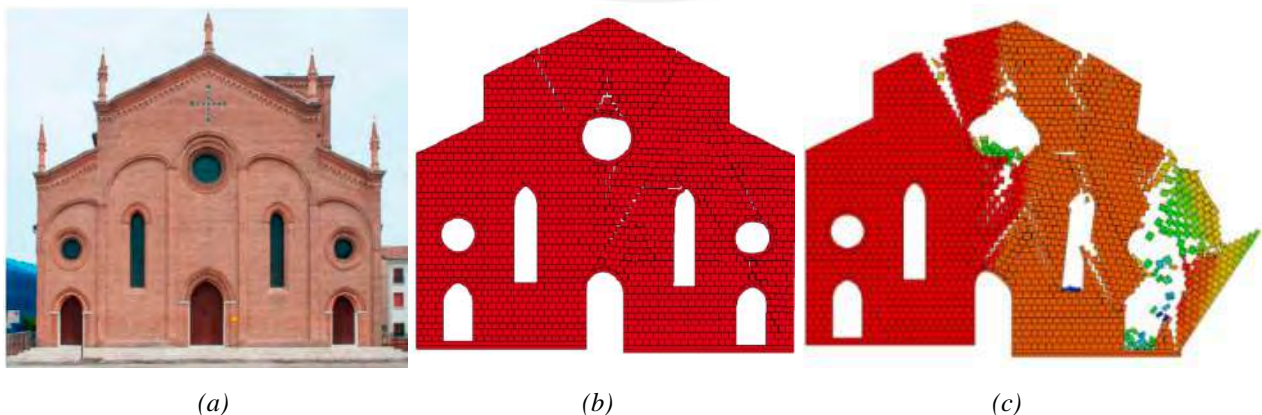


Figura 2-34: Ensayo de asentamiento en fachada de parroquia (Ou et al., 2022)
 (a) Foto de la fachada (b) Asentamiento de 0.2 m (c) Asentamiento de 0.685 m

Por último, Chen et al. (2023) realizaron la evaluación de un arco de piedra por medio del método FDEM. En la *Figura 2-35* se muestra el arco compuesto por 13 dovelas y 2 estribos de granito, con un grosor de 0.2 m, una densidad de 2400 kg/m^3 , un módulo de elasticidad de 50 GPa, un módulo de Poisson de 0.2 y un coeficiente de fricción de 0.53. Para los fines de empotramiento, se utilizaron cables de acero que restringían los estribos entre sí. Por medio de un bloque de madera y una cuña de masa total de 60.93 kg, se realizaron impactos verticales en distintas partes del arco, con el fin de evaluar su comportamiento. En la *Figura 2-35b* y *Figura 2-35c* se muestra como el arco sufre daños de rótulas (H) y deslizamientos (S). El modo de falla numérico era muy similar al experimental; sin embargo, los desplazamientos o aberturas eran ligeramente diferentes. Por último, realizaron nuevamente los ensayos con un mayor impacto, lo cual podría fracturar las dovelas. Para el modelo se consideró como energía liberada de $G_f = 148 \text{ J/m}^2$ y una resistencia de tracción de $f_t = 6.01 \text{ MPa}$. Con esto se pudo verificar el fallo de dos dovelas en el modelo numérico; sin embargo, en el estudio no se muestra si el modelo experimental sufrió los mismos daños.

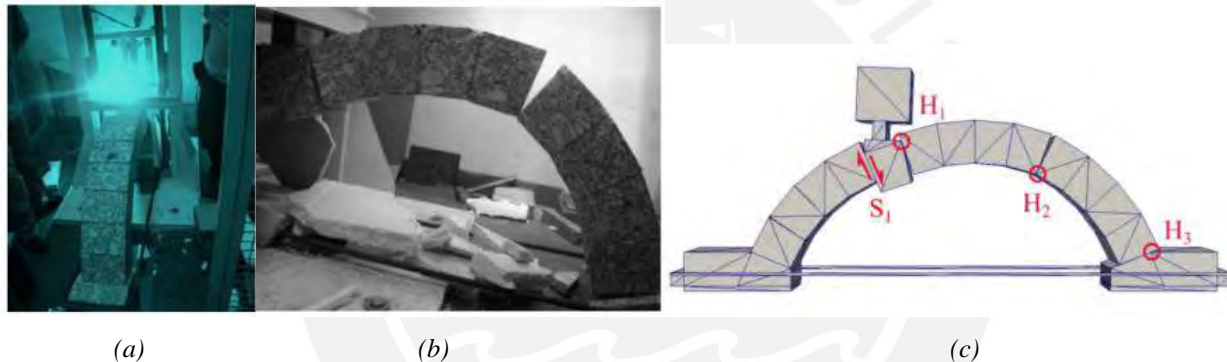


Figura 2-35: Mecanismo de falla por impacto (Chen et al., 2023) (a y b) Ensayo experimental (c) Modelo FDEM

2.6. Procesamiento de imágenes

Existen diversos métodos para la detección de bordes, y Jing et al. (2022) realizó una recopilación de estos (*Tabla 2-3*). Las técnicas más actuales y que dan los mejores resultados son aquellos que utilizan una supervisión aprendida del tipo Machine Learning o aún más avanzada, del tipo Deep Learning.

Tabla 2-3: Métodos de detección de bordes según Jing et al., 2022

Métodos	Características
Métodos basados en diferenciación	Los cuales utilizan la intensidad de las imágenes para obtener los bordes. En general se utilizan operadores tipo Sobel, Canny, Robert, entre otros, de diferente tamaño. Sin embargo, estos métodos producen estiramiento de la imagen, manchas en los bordes y en ocasiones resultados falsos.
Métodos estáticos	Esto métodos son muy buenos en suprimir texturas indeseables separando la imagen en capas. En este caso se utiliza el procedimiento de umbralización de bordes (thresholding) por medio de principios estadísticos.
Métodos Fuzzy (segmentación borrosa)	En este método se extrae los bordes de una imagen por medio de la conversión de la imagen real a una borrosa con bastante ruido.
Métodos basados en frecuencia espacial	En este caso se utiliza el dominio de la frecuencia para obtener los bordes.
Métodos de localización subpíxel	Para este método se reconstruye los bordes por medio de la interpolación entre píxeles luego de una obtención de bordes por medio de la posición, orientación, curvatura, etc.
Métodos basados en difusión anisotrópica	En este caso se realizan filtros de difusión para suavizar una imagen sin que los bordes se pierdan.
Métodos basados en contorno activo	Para este método se utilizan funciones que recrean la imagen original aproximadamente de manera continua, para luego realizar una derivación diferencial en esta para obtener los bordes.
Métodos basados en el aprendizaje supervisado (Machine learning)	Para este caso se necesita una red profunda neural para que el sistema comprenda las características correspondientes a un caso de estudio. El algoritmo aprende cómo realizar el proceso de detección de bordes a partir de la red neural. Es necesario supervisar los resultados.
Métodos basados en el aprendizaje no supervisado (Deep learning)	A diferencia del caso anterior no es necesario supervisar lo que realiza el programa. Para lograr esto se necesita una base de datos de gran tamaño.

Por ejemplo, en el caso de los métodos basados en diferenciación, Maini y Aggarwal (2009) realizaron una comparación de varias técnicas de detección de bordes con el fin de conocer con cual de estos se obtienen mejores resultados. Las técnicas u operadores utilizados fueron las siguientes: Sobel, Robert, Laplaciano, canny, Prewitt, entre otros (*Figura 2-36*). Los resultados mostraron que la técnica de Canny presenta ligeramente mejores resultados en la obtención de bordes; sin embargo, según el autor no se logra obtener completamente los bordes de una imagen y además depende de diversos parámetros de corrección.

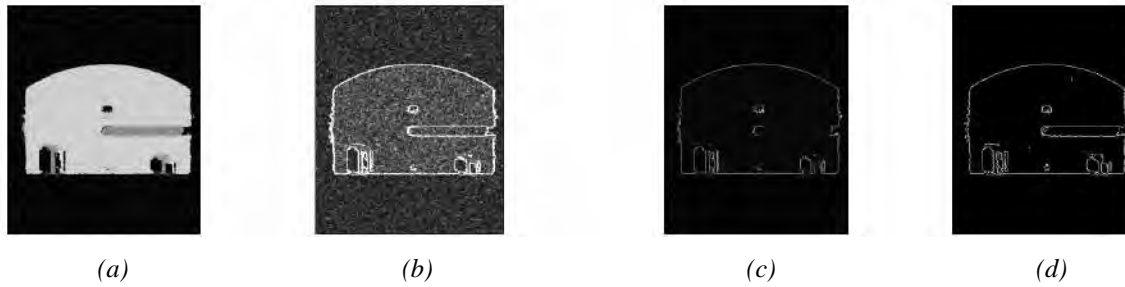


Figura 2-36: Imagen segmentada por diversos operadores (Maini y Aggarwal, 2009)

(a) Imagen original (b) Sobel (c) Robert (d) Canny

Por otro lado, Melin et al. (2014) presentan un método para obtener los bordes de imágenes a partir de la técnica generalizada fuzzy, usando imágenes sintéticas. En primera instancia se calcula la gradiente morfológica (MG) de la imagen en escala de grises, es decir la variación de intensidades entre píxeles vecinos. A partir de la gradiente, se aplica diversos sistemas como, por ejemplo: un sistema de interferencia generalizado tipo 1 fuzzy (T1FIS), tipo 2 fuzzy (IT2FIS) o tipo 2 generalizado fuzzy (GT2FIS). En la Figura 2-37 se muestran los resultados de estos sistemas aplicados en diversas imágenes. Como se aprecia la técnica MG + GT2FIS resalta de mejor manera los bordes de las imágenes; sin embargo, no se logra obtener completamente todos los bordes.

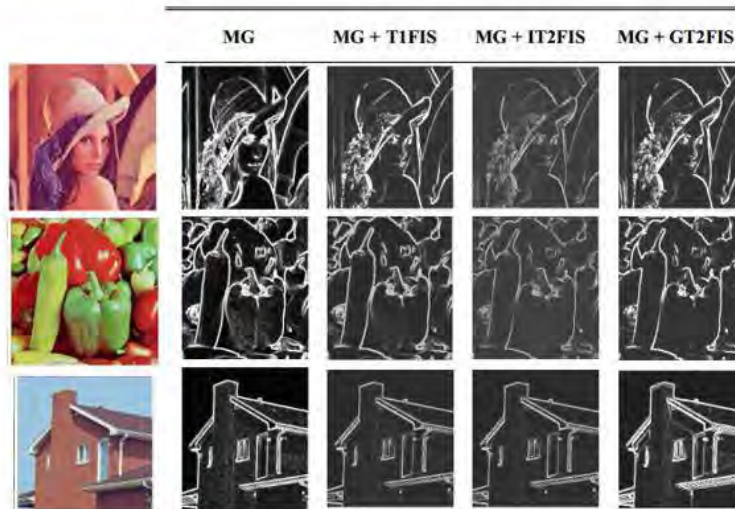


Figura 2-37: Obtención de los bordes de una imagen por medio de diferentes técnicas (Melin et al., 2014)

Por otro lado, Elharrouss et al. (2023) presenta una técnica refinada del tipo cascada, de detección de bordes usando una red de convolución de alta resolución (Método basado en el aprendizaje no supervisado). La técnica incluye una serie de convoluciones de una imagen con el fin de obtener los bordes a más detalle (Deep learning, Figura 2-38). Para evaluar el programa utiliza una serie de base de datos de BSDS500 y NYUD multicue. En la Figura 2-39 se muestra la comparación de la técnica usada con diferentes bibliografías: CED

(Wang et al., 2017), RCF (Liu et al., 2018), BDCN (Su et al., 2021), PidiNet (He et al., 2019) y del propio autor.

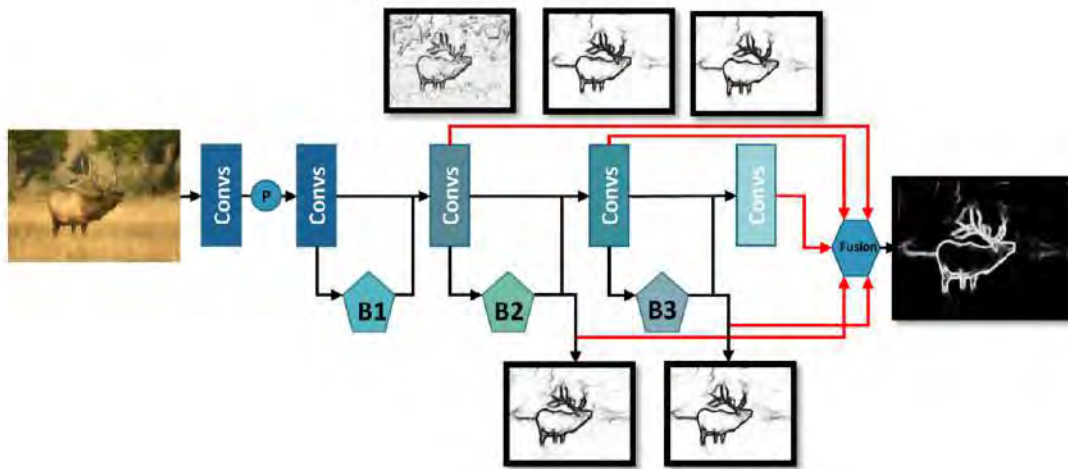


Figura 2-38: Red de convolución para la segmentación de imágenes (Elharrouss et al., 2023)

Nota: (P) Capa de agrupación (pooling layer) (B) Bloques de convolución y capas aplicadas

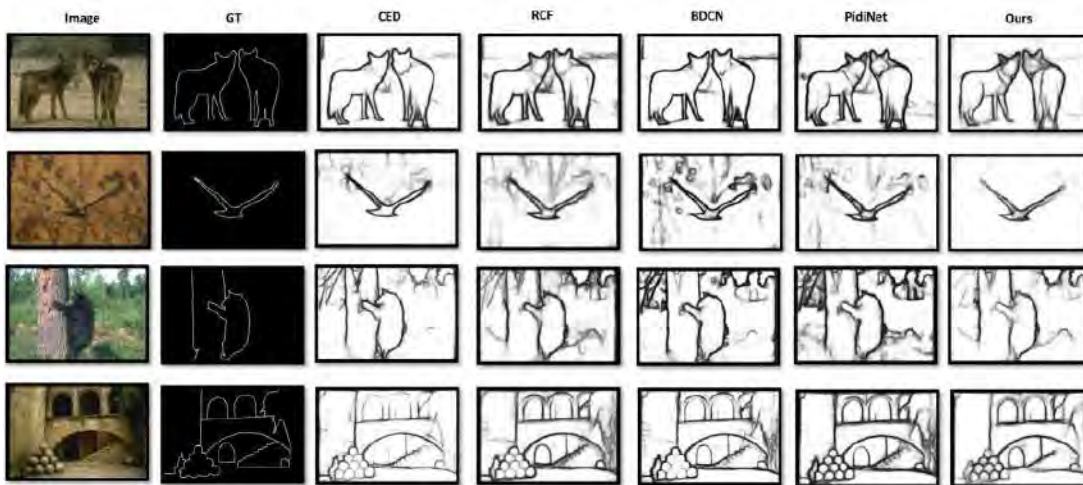


Figura 2-39: Segmentación de imágenes según los diversos autores (Elharrouss et al., 2023)

Por último, Tian et al. (2023) propusieron un método de desenfoco utilizando sensores inerciales en la detección de bordes de imágenes (Método basado en el aprendizaje). Como base de datos utiliza la BSDS500 y una base de datos independiente. Los autores utilizan los errores de medición de los sensores (Figura 2-40a), los cuales lo transforman en errores de desenfoco y, a partir del ello, aplican un esquema de optimización iterativo basado en mínimos cuadrados totales (TLS). De esta manera manejan el problema de desenfoco por movimiento de la imagen. Los resultados mejoran ligeramente respecto a otros, ya que los bordes oblicuos son más notorios (Figura 2-40b y Figura 2-40c).

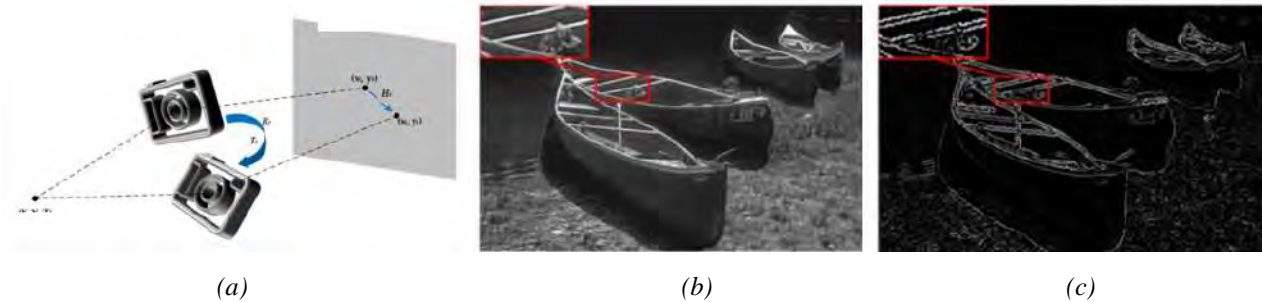


Figura 2-40: Obtención de bordes digital (Tian et al., 2023)

(a) Errores de medición de sensores (b) Imagen original (c) Bordes obtenidos

2.7. Resumen

2.7.1. Construcciones de piedra en el Perú

En el periodo Lítico (10000 a 5000 a.C.) se utilizaron las cavernas como refugio, los cuales algunos fueron modificados con el fin de satisfacer las necesidades básicas de los habitantes. En el periodo Arcaico (5000 a 1800 a.C.) se inicia la construcción de recintos de piedra y barro. En el periodo Formativo (1800 a 500 a.C.) se comienza a realizar construcciones con piedra labrada. En el periodo Desarrollos Regionales Tempranos (500 a.C. a 700 d.C.) no se aprecia una evolución en las construcciones de piedra. En el periodo Wari (600 a 1000 d.C.) se emplea la construcción de muros de doble cara, es decir, muros con capas externas de piedra y con un relleno intermedio de barro o piedras. En el periodo de Estados Regionales y Señoríos Tardíos (1000 a 1450 d.C.) se inicia la construcción de recintos funerarios con piedra labrada encajada casi a la perfección. Por último, en el periodo Inca (1450 a 1532 d.C.) se utilizan los diferentes tipos de construcción mencionados, y también el uso de estructuras con piedra labrada encajada en diferentes recintos, y usando piedras de hasta 9 m de tamaño.

Las piedras utilizadas generalmente en las construcciones prehispánicas son la roca caliza y diorita, con un peso específico entre 2200 y 3000 kg/m³ y un coeficiente de fricción aproximado de 0.48. Por último, la inclinación de los muros Inca es hacia adentro generalmente con un ángulo entre 2 a 7°.

2.7.2. Modelación numérica

El macro modelado en FEM es útil para ubicar posibles zonas de falla en la estructura; sin embargo, no permite ubicar daños entre bloques, ya que la estructura no se discretiza por sillares.

Los métodos FEM modelado con propiedades de contacto, y los métodos DEM modelado con discretización de sólidos, son modelos por así decirlo, combinados FEM – DEM; sin embargo, la diferencia radica en cómo realizan el discretizado de los sólidos, las leyes de contacto usadas o si se usan o no sólido rígidos. Los métodos planteados FDEM por Munjiza son una combinación de FEM y DEM; sin embargo, se han incluido

propiedades de fractura en los sólidos. En general, estas combinaciones FEM – DEM permiten tener resultados más precisos en los desplazamientos de los bloques; sin embargo, requieren de mayor tiempo computacional.

En la *Tabla 2-4* se muestran las propiedades utilizadas por diversos autores en la modelación de estructuras de piedra de junta seca por elementos finitos (FEM). Como se aprecia, la rigidez normal tiende a tener valores bastante grandes, entre 2×10^7 a 50×10^7 N/m³. Por otro lado, la densidad utilizada para la modelación de la piedra es muy similar. No se aprecia el uso de la rigidez tangencial en estos estudios.

Tabla 2-4: Comparación de propiedades en las piedras (FEM)

Propiedad	Papadopoulos (2020)	Suarez (2021)	Tarque et al. (2023)
Material	Roca caliza	Roca granito	Roda diorita
Densidad (kg/m ³)	2650	2500	2300
Rigidez Normal (N/m ³)	Hard Contact	5×10^8 N/m ³	2×10^7 N/m ³
Coef. De fricción	0.7	0.4	0.4

Por otro lado, en la *Tabla 2-5* se muestra las propiedades utilizadas por diversos autores en la modelación de estructuras de piedra de junta seca por elementos discretos (DEM). La densidad utilizada para la modelación de la piedra es muy similar, incluso parecido a lo obtenido en FEM (*Tabla 2-4*). Para este caso la rigidez tangencial utilizada siempre es una fracción de la rigidez normal. Por otro lado, la rigidez normal tiende a ser bastante grande, como el caso de FEM; sin embargo, las unidades de estos son variables, dependiendo a las leyes de contacto utilizadas.

Tabla 2-5: Comparación de propiedades en las piedras (DEM)

Propiedad	Fukumoto et al. (2014)	Santa-Cruz et al. (2021)	Ita et al. (2023)
Material	Roca granito	Roca caliza	Roca variable
Densidad (kg/m ³)	2650	2400	2767
Rigidez Normal	1×10^8 N/m ³	5×10^7 Pa	5×10^7 Pa/m
Rigidez Tangencial	0.25×10^8 N/m ³	2.5×10^7 Pa	2.5×10^7 Pa/m
Ángulo de fricción	-	35	20
Coef. De fricción	0.6	0.70	0.36

También, en la *Tabla 2-6* se muestra las propiedades utilizadas en la modelación de la arena contenida en muros de piedra por elementos discretos (DEM). Se aprecia que la densidad utilizada para las esferas es aproximadamente la mitad de lo usado en las piedras.

Tabla 2-6: Comparación de propiedades en arena (DEM)

Propiedad	Savalle et al. (2020)	Shaikh et al. (2021)
Material	Arena	Arena
Densidad (kg/m ³)	1320	1450 - 2650
Rigidez Normal	8.33×10^6 MPa	5×10^7 Pa
Rigidez Tangencial	3.85×10^6 MPa	5×10^7 Pa
Ángulo de fricción	32	-
Coef. De fricción	0.62	0.25 - 0.42

En la *Tabla 2-7* se muestran las propiedades usadas en la modelación de otros tipos de materiales por elementos discretos (DEM). Como se aprecia, a pesar de que estos son materiales diferentes, la rigidez normal y tangencial siempre es bastante alta. En este caso también se aprecia que, si la densidad es más baja, la rigidez del contacto también aumenta.

Tabla 2-7: Comparación de propiedades en otros materiales (DEM)

Propiedad	Bui et al. (2017)	Savalle et al. (2020)	Santa-Cruz et al. (2021)	Foti, Vacca y Facchini (2018)
Material	azúcar	Arcilla	Concreto	Mortero con tiza
Modelo	DEM	DEM	DEM	DEM
Densidad (kg/m ³)	1081	1440	2400	2200
Rigidez Normal	5.87×10^9 N/m ³	5.56×10^8 MPa	2.5×10^8 Pa	900×10^9 Pa
Rigidez Tangencial	2.45×10^9 N/m ³	4.17×10^8 MPa	0.86×10^8 Pa	900×10^9 Pa
Ángulo de fricción	38	32	32	-
Coef. De fricción	0.78	0.62	0.62	0.62

Por último, en el caso de FDEM de Munjiza, generalmente no consideran un comportamiento lineal con valor fijo para la rigidez normal y tangencial, sino una en forma exponencial.

2.7.3. Procesamiento de imágenes

La segmentación de imágenes comenzó con el uso de técnicas u operadores tipo Sobel, Robert, Laplaciano, canny, Prewitt, entre otros; sin embargo, métodos estáticos, fuzzy, frecuencia espacial, entre otros, permiten mejores resultados para casos en específico. Actualmente se están desarrollando métodos más avanzados como el aprendizaje supervisado (Machine Learning) y no supervisado (Deep Learning) que pueden aprender mediante base de datos y obtener mejores resultados. Lamentablemente según los estudios evaluados, todavía ningún método logra obtener los contornos de una imagen completamente.

CAPITULO 3: TAXONOMÍA DE TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES DE CONSTRUCCIONES PREHISPÁNICAS DE PIEDRA EN EL PERÚ

3.1. Generalidades

En este capítulo se propone un modelo de clasificación estructural con base a la información recogida en 2 visitas de campo en el Perú. Las regiones visitadas fueron Puno y Cusco donde se realizó el estudio de diversas construcciones prehispánicas de piedra. Para la elaboración de esta taxonomía se tuvo en cuenta 8 parámetros: la época de construcción, el uso de la estructura, la altura actual, las capas de los muros, el aparejo, el tipo de junta, los tamaños de las piedras y el acabado de la piedra. También en este capítulo se detalla el proceso realizado en la evaluación de campo, y la clasificación de las estructuras de piedra de 6 sitios arqueológicos de Puno, y 13 de Cusco.

3.2. Sitios arqueológicos de acceso público

Según el Ministerio de Cultura, en el Perú existen 7359 monumentos arqueológicos prehispánicos (Geoportal 2.0), de los cuales gran parte de estas estructuras están hechos de piedra con sillares irregulares (*Figura 3-1*).



*Figura 3-1: Ejemplos de estructuras de piedra con geometría irregular en el Perú
(a) Zurite, Cusco (b) Molloco, Puno (c) Rupac, Lima*

De estos monumentos arqueológicos se han ubicado 68 sitios arqueológicos prehispánicos de construcciones de piedra, los cuales son de acceso libre al público y contienen muros hechos de piedra. En la *Figura 3-2* se muestra la cantidad de estos sitios arqueológicos por cada departamento del Perú, en el cual los departamentos en color verde son aquellos que tienen igual o mayor a 5 sitios arqueológicos, de amarillo los que tienen de 1 a 4 sitios arqueológicos, y de rojo aquellos departamentos que no tienen sitios arqueológicos. Como se aprecia, las construcciones de piedra son más comunes en la zona central del país, y es casi nula en la zona

noreste del país, ya que esta zona es selva y los yacimientos de piedra son escasos en estas áreas. En la *Tabla 3-1* se identifican los sitios filtrados y como se aprecia Cusco, Ancash, Lima y Puno son los departamentos con mayores sitios arqueológicos de construcciones de piedra.

Tabla 3-1: Sitios arqueológicos prehispánicos de piedra más conocidos por cada departamento del Perú

Departamento del Perú (cantidad de sitios filtrados)	Sitios arqueológicos prehispánicos de piedra			
Cusco (16)	Sacsayhuamán	Chincheru	Raqchi	Huchuy Qosqo
	Tambomachay	Puca Pucara	Coricancha	Piquillacta
	Ollantaytambo	Moray	Machupicchu	Zurite
	Pisac	Tipón	Arzobispal temple	Choquequirao
Áncash (8)	Chavín	Wauillac	Galgada	Tumshukaiko
	Wilcahuafín	Pashash	Sechín	Yayno
Lima (8)	Pachacamac	Chingana	Cantamarca	Pampa de Cueva
	Cushpa	Rupac	Añay	Caral
Puno (6)	Inca Uyo	Sillustani	Molloco	Kalasaya
	Ccota	Tanka Tanka		
Junín (5)	Cachipozo	Arwaturu	Tutanmarca	Wariwilca
	Tarmatambo			
Cajamarca (4)	Layzón	Kuntur Wasi	Huacaloma	El cuarto del rescate
Amazonas (4)	Kuélap	Yalape	La congona	Yanayacu
Ayacucho (3)	Vilcashuamán	Pumacocha	Wari	Huaytará
Huancavelica (3)	Uchku Inkañan	Incahuasi	Huaytará	
Apurímac (2)	Sondor	Sayhuite		
Pasco (2)	Ichugan	Goñicutac		
Piura (1)	Aypate			
Huánuco (1)	Huánuco Pampa			

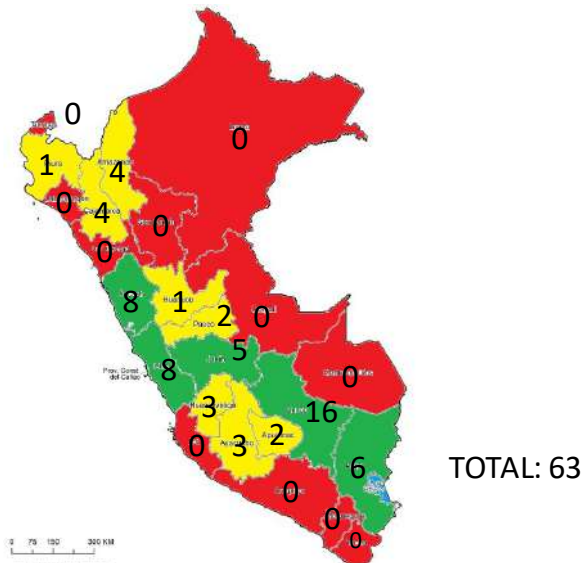


Figura 3-2: Sitios arqueológicos prehispanicos de piedra más conocidos por departamento del Perú

3.3. Criterios taxonómicos

Los criterios taxonómicos utilizados para el modelo de clasificación estructural incluyen la época de construcción, el uso, la altura actual, las características de la sección transversal, el tipo de aparejo, el tipo de junta, el tamaño de las piedras y el acabado de las piedras. Lo que se busca con este modelo es realizar un proyecto similar a la taxonomía de edificios GEM (Global Model Earthquake Model versión 2.0, Brzev et al. 2013), que es una base de datos global que describe y clasifica diversas estructuras según características que potencialmente podrían afectar su comportamiento ante sismos.

3.3.1. Clasificación según la época de construcción

Las estructuras de piedra se clasifican en preinca (PI, *Figura 3-3a*) o Inca (I, *Figura 3-3b*). El periodo preinca se lleva a cabo antes de 1450 y el periodo inca entre 1450 y 1532 (Canziani, 2012). En la etapa preinca se ha considerado las construcciones realizadas desde la Época Lítica (10000 a 5000 a.C.) hasta los Estados Regionales y Señoríos Tardíos (1000 a 1450 d.C.). Luego del año 1532, comienza el virreinato del Perú, en el cual también existen construcciones de piedra; sin embargo, en general son estructuras con junta de mortero que no serán tomados en cuenta en este estudio.



(a)

(b)

Figura 3-3: Clasificación según la época de su construcción
 (a) Preinca [PI] – Kalasaya, Puno (b) Inca [I] – Coricancha, Cusco

3.3.2. Clasificación según el uso de la construcción

En el caso de la clasificación según el uso de la construcción, las estructuras de piedra son clasificados en construcciones para vivienda o administrativa (HO, *Figura 3-4a*), funeraria (FU, *Figura 3-4b*), ceremonial (CE, *Figura 3-4c*), militar (MI, *Figura 3-4d*) y agricultura (AG, *Figura 3-4e*). Las estructuras de vivienda generalmente tienen un techo a dos aguas y entre 1 a 3 puertas. La mayoría de las construcciones tienen muro de 2 o más hojas con o sin relleno intermedio, y son de un piso (en raras ocasiones son de 2 pisos). Por otro lado, las estructuras funerarias generalmente tienen forma de torres conocidas como Chullpas, las cuales pueden tener una sección circular, rectangular o variable. Las estructuras ceremoniales o militares en común suelen tener muros de contención cerrados de varias plataformas. Por último, las estructuras de agricultura son comúnmente muros de contención conocidos como terrazas o andenes, los cuales son varios muros escalonados con plataformas, a lo largo de una pendiente.



(a)

(b)

(c)



(d)

(e)

Figura 3-4: Clasificación según su uso

(a) Vivienda o administrativa [HO] – Machupicchu, Cusco (b) Funeraria [FU] – Molloco, Puno

(c) Ceremonial [CE] – Kalasaya, Puno (d) Militar [MI] – Puka Pukará, Cusco

(e) Agricultura [AG] – Pisac, Cusco

3.3.3. Clasificación según la altura actual de la construcción

En esta etapa se clasifican las estructuras de piedra según la altura actual registrada en el lugar (Tabla 3-2). En la Figura 3-5 se aprecian algunos ejemplos de estructuras muy pequeñas (vsh, Figura 3-5a), pequeñas (sh, Figura 3-5b), medianas (mh, Figura 3-5c), altas (th, Figura 3-5d) y muy altas (vth, Figura 3-5e). Es cierto que estas estructuras al finalizar su construcción podrían haber sido de mayor tamaño; sin embargo, es importante también conocer la altura actual para realizar un diagnóstico adecuado.

Tabla 3-2: Altura actual de la estructura

Altura	Dimensiones
	mm
Muy pequeña (vsh)	Menos de 500
Pequeña (sh)	500 a 1000
Mediana (mh)	1000 a 2000
Alta (t)	2000 a 4000
Muy alta (vt)	4000 a 12000



(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

Figura 3-5: Clasificación según su altura

(a) Muy pequeña [vsh] – Puka Pukará, Cusco (b) Pequeña [sh] – Tambomachay, Cusco

(c) Mediana [mh] – Ollantaytambo, Cusco (d) Alta [th] – Písaq, Cusco

(e) Muy alta [vth] – Sacsayhuamán, Cusco

3.3.4. Clasificación según las características de la sección transversal de la estructura

La estructura transversal se clasifica según la cantidad de capas u hojas que tienen estas construcciones, si tiene relleno entre capas o si es un muro de contención con diversas capas. Para este caso la clasificación es

de una sola hoja (L1, *Figura 3-6a, Figura 3-7a*), de dos hojas (L2, *Figura 3-6b, Figura 3-7b*), de más de dos hojas (L3, *Figura 3-6c, Figura 3-7c*), de dos hojas con relleno intermedio (F2, *Figura 3-6d, Figura 3-7d*), de más de dos hojas con relleno intermedio (F3, *Figura 3-6e, Figura 3-7e*) y muros de contención o de soporte (S, *Figura 3-6f, Figura 3-7f*). Tener en cuenta que para L2, L3 y F3 se considera que las capas sucesivas tienen bloques entrelazados para mejorar el amarre de la estructura. F2 y F3 en general tienen barro como relleno intermedio y en el caso de S, en general son andenes o muros de contención de estructuras ceremoniales o militares, los cuales están compuestas de 1 o varias capas, en la que la capa externa es de mayor altura, y las capas internas son de menor altura según su profundidad (*Figura 3-6f*). Lamentablemente no hay estudios acerca de cuántas capas y hasta que profundidad se encuentran estos muros de contención según cada sitio arqueológico o cultura.

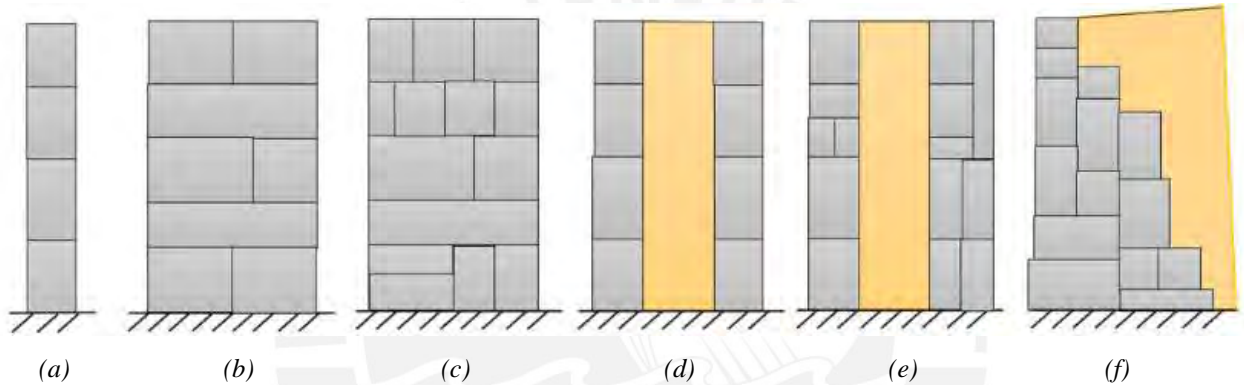


Figura 3-6: Clasificación según su estructura transversal
 (a) Una sola hoja [L1] (b) Dos hojas [L2] (c) Más de dos hojas [L3]
 (d) Dos hojas con relleno intermedio [F2] (e) Varias hojas con relleno intermedio [F3]
 (f) Muros de contención o soporte [S]



(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)

Figura 3-7: Clasificación según su estructura transversal - Ejemplos

(a) Una sola hoja – Machupicchu, Cusco (b) Dos hojas – Coricancha, Cusco

(c) Más de dos hojas – Ccota, Puno (d) Dos hojas con relleno intermedio – Písaq, Cusco

(e) Varias hojas con relleno intermedio – Pikillacta, Cusco

(f) Muros de contención o soporte – Chinchero, Cusco

3.3.5. Clasificación según el tipo de aparejo

Para este apartado se tomó como referencia la clasificación realizada por el arquitecto S. Agurto (1987). La clasificación según su aparejo es: rústico (RUST, *Figura 3-8a*), celular (CEL, *Figura 3-8b*), engastado (PZL, *Figura 3-8c*) y sedimentario (SED, *Figura 3-8d*). En el acabado rústico, las piedras son colocadas unas sobre otras con una configuración desorganizada y las piedras no son labradas. En el acabado celular, engastado y sedimentario las piedras suelen tener un acabado semi labrado o labrado con un encaje casi perfecto; sin embargo, la diferencia radica en la configuración de su colocación. En el aparejo celular, las piedras tienen formas poligonales y son colocadas como un panal de abejas. El arquitecto Agurto menciona que este aparejo se asemeja a sillares radiantes, como una flor y sus pétalos, o como un sol radiante. En el aparejo engastado, los bloques están colocados como un rompecabezas con una configuración desorganizada. En este caso el acabado y el encaje de las piedras suele ser de mejor calidad, ya que generalmente se usa piedra labrada. Por último, en el acabado sedimentario se tienen los bloques también como un rompecabezas; sin embargo, los bloques son prácticamente regulares colocados en filas.

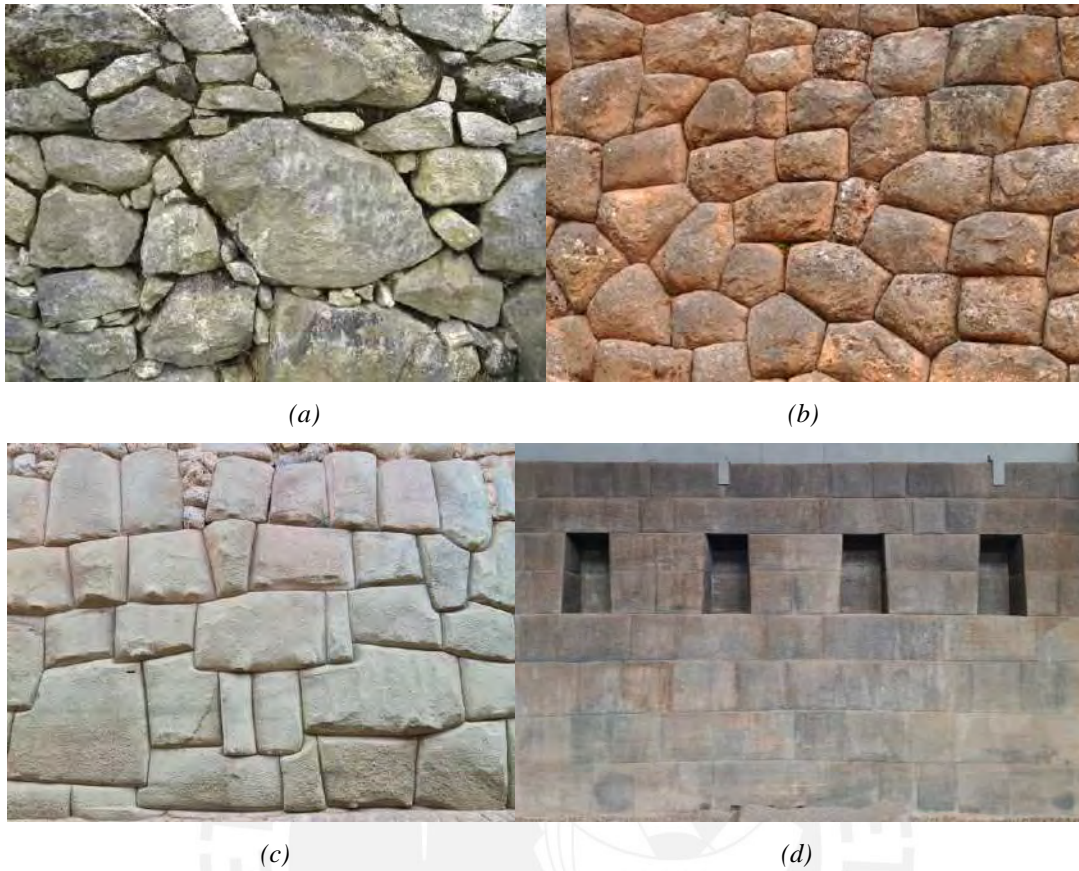


Figura 3-8: Clasificación según su aparejo

- (a) *Rústico [RUST] – Machupicchu, Cusco* (b) *Celular [CEL] – Chinchero, Cusco*
 (c) *Engastado [PZL] – Calle Hatunrumiyoc, Cusco* (d) *Sedimentario [SED] – Coricancha, Cusco*

3.3.6. Clasificación según el tipo de junta

Estas construcciones en general pueden tener o no una junta de mortero de barro u otro material. Por lo tanto, se clasifican en con junta de mortero (MJ, *Figura 3-9a*) o de junta seca (DJ, *Figura 3-9b*). En el de junta seca los bloques se colocan unos sobre otros sin ningún pegante. En general las construcciones de junta seca fueron usadas en estructuras funerarias en el sur del país en la época de los Estados Regionales y Señoríos Tardíos, y más adelante fueron usados en la cultura Inca, comúnmente en sus templos. Las estructuras con junta de mortero provienen desde la época Arcaica o posiblemente desde la época Lítica. Para esta clasificación, en DJ se han considerado también las estructuras que antes tuvieron junta de mortero, pero con el tiempo este ha desaparecido.



(a)

(b)

Figura 3-9: Clasificación según el tipo de juntas

(a) Junta de mortero [MJ] – Kalasaya, Puno (b) Junta seca [DJ] – Písaq, Cusco

3.3.7. Clasificación según el tamaño de las piedras

En este apartado se clasifican las estructuras según el tamaño de sus piedras en pequeño (S, Figura 3-10a), mediano (M, Figura 3-10b), grande (L, Figura 3-10c) y muy grande (VL, Figura 3-10d), Tabla 3-3. En el periodo Formativo es dónde se encuentran gran parte de estructuras construidas con piedras pequeñas, por otro lado, las construcciones con piedras muy grandes (VL) son comunes en estructuras de la cultura Inca. En general las piedras usadas eran calizas de peso específico de 2200 kg/m^3 , y dioritas de 3000 kg/m^3 (Agurto, 1970).

Tabla 3-3: Clasificación según el tamaño de sus piedras

Tamaño	Dimensiones	Peso
	m.	kN.
Pequeño (S)	Menor a 0.2	Menor a 0.3
Mediano (M)	0.2 a 0.5	0.3 a 3
Grande (L)	0.5 a 1.6	3 a 180
Muy grande (VL)	1.6 a 10	180 a 10000



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 3-10: Clasificación según el tamaño de sus piedras – Ejemplos

(a) Pequeño [S] – Rúpac, Lima (b) Mediano [M] – Ollantaytambo, Cusco

(c) Grande [L] – Molloco, Puno (d) Muy grande [VL] – Sacsayhuamán, Cusco

3.3.8. Clasificación según el acabado de las piedras

Para esta clasificación se utilizaron los acabados del tipo natural (NAT, *Figura 3-11a*), semi labrado (SHEW, *Figura 3-11b*) y labrado (HEW, *Figura 3-11c*). En el acabado natural, las piedras no han sido trabajadas y se utilizan como fueron encontradas o cortadas. En el acabado semi labrado, las piedras han sido trabajadas parcialmente. Finalmente, en el acabado labrado las piedras tienen un acabado suave en forma de poliedros que usualmente encajan con otras piedras milimétricamente.



(a)

(b)



(c)

Figura 3-11: Clasificación según el acabado de las piedras

(a) Natural [NAT] – Machupicchu, Cusco (b) Semi labrado [SHEW] – Inca Uyo, Puno

(c) Labrado [HEW] – Coricancha, Cusco

3.4. Evaluación de campo

Se visitaron 6 sitios arqueológicos en Puno y 13 en Cusco en donde se tomaron diversas fotografías a las estructuras de piedra. Se realizó la obtención de imágenes por medio de una cámara digital Sony A7RIV a 60 megapíxeles en formato JPG con un lente Sigma 14-24 mm f2.8. Todas las imágenes fueron tomadas con una distancia focal de 24 mm. Se tomaron fotos de los muros de manera frontal a las caras internas y/o externas. Generalmente las tomas se realizaron a una distancia frontal de 1 metro del muro y una altura de 1.5 m; sin embargo, cuando la longitud del muro no encajaba en una sola foto, se tomaban varias fotos a la estructura como se aprecia en la *Figura 3-12*. También se midieron varias piedras que aparecían en las fotos por medio de un flexómetro, con el fin de usar estas medidas como referencia para obtener las dimensiones de las otras piedras que aparecían en cada fotografía.



Figura 3-12: Toma de fotos en un muro de gran longitud

Las fotos de muros de gran longitud se unen por medio de alineaciones en 3D. Para esto se transforman cada dos o tres imágenes sucesivas en coordenadas esféricas y luego, se compara la proyección 2D de estas, para así alinearlos y encajarlos entre sí por medio de los píxeles (Szelizki, 1994; Chen, 1995). Se realiza lo mismo con las siguientes imágenes por superposición. Este método es más eficiente cuando se toman fotos sucesivas manteniendo la posición de la cámara en una misma altura, y rotando sobre una vertical; sin embargo, estos algoritmos funcionaron adecuadamente para la unión de las imágenes tomadas (*Figura 3-13*). Este proceso se realizó utilizando la aplicación PhotoStitcher 3.0.



Figura 3-13: Alineación 3D de 7 imágenes tomadas al muro del Templo Arzobispal, Cusco

Por otro lado, se utilizó un formato de toma de datos, con el cual se clasificaron los diferentes tipos de muros prehispánicos en cada lugar de estudio (*Figura 3-14*).

CLASIFICACIÓN ESTRUCTURAL DE MUROS PREHISPÁNICOS

Lugar:

Latitud: Longitud:

Responsable de la evaluación:

	ÉPOCA		USO				ALTURA ACTUAL				SECCIÓN TRANSVERSAL				APAREJO		JUNTA		TAM. PIEDRAS			ACABADO												
	Preinca [PI]	Inca [I]	vivienda o administrativa [HO]	Funeraria [FU]	Ceremonial [CE]	Militar [MI]	Agricultura [AG]	Muy pequeña [vsh] (0 a 500mm)	Pequeña [sh] (500 a 1000 mm)	Mediana [mh] (1000 a 2000 mm)	Alta [I] (2000 a 4000 mm)	Muy alta [vt] (4000 a 12000 mm)	Una hoja [L1]	Dos hojas amarradas [L2]	Varias hojas amarradas [L3]	Dos hojas con relleno [F2]	Varias hojas con relleno [F3]	Muros de soporte [S]	Rústico [RUST]	Celular [CEL]	Engastado [PZL]	Sedimentario [SED]	Junta seca [DJ]	Junta de mortero [MJ]	Pequeño [S] (<0.2 m)	Mediano [M] (0.2 a 0.5 m)	Grande [L] (0.5 a 1.6 m)	Muy grande [VL] (1.6 a 10 m)	Natural [NAT]	Seml labrado [SHEW]	Labrado [HEW]			
Taxonomía 1																																		
Taxonomía 2																																		
Taxonomía 3																																		
Taxonomía 4																																		
Taxonomía 5																																		
Taxonomía 6																																		
Taxonomía 7																																		
Taxonomía 8																																		
Taxonomía 9																																		
Taxonomía 10																																		

Figura 3-14: Tabla de clasificación estructural de muros de piedra utilizado

3.5. Caso de estudio 1: Muros de piedra en Puno

Puno es un departamento del Perú que cuenta con 331 monumentos arqueológicos prehispánicos según el Geoportal 2.0 del Ministerio de Cultura del Perú. Gran parte de estos monumentos arqueológicos están contruidos de piedra, y la mayoría de estos pertenecen a la época de Estados Regionales y Señores Tardíos. Las estructuras más predominantes son las Chullpas, las cuales son recintos funerarios en forma de torres contruidos por las culturas Lupaka y Colla (culturas posteriores a la de Tiahuanaco). Estos reinos eran dos de los grandes reinos aimaras que ocupó el Collao, y eran especialistas en la arquitectura y tallado de las piedras (Ruelas, 2020). Según Strecker et al. (2007), los Incas tuvieron violentas confrontaciones con los Collas para conquistarlos; sin embargo, los Lupakas eran pacifistas por lo que realizaron tratos con los Incas. En la *Figura 3-15* se muestra la ubicación de Puno y los sitios arqueológicos evaluados.



Figura 3-15: Muros de piedra evaluados en Puno

En los siguientes puntos se evalúan las taxonomías de los 6 sitios arqueológicos de Puno mencionados y una breve explicación del lugar. Tener en cuenta que estos datos fueron obtenidos de la inspección en campo y la bibliografía actual. Un detalle importante es que para el caso de Molloco, Sillustani y Cutimbo no se consideró la construcción interna de las chullpas, ya que estas construcciones suelen tener otra taxonomía interna, muy diferente a la que se aprecia de manera externa.

i) Inca Uyo (Latitud: -15.89224, Longitud: -69.88869)

Este sitio arqueológico se encuentra en Chucuito, a 18.km de la ciudad de Puno y también es conocido actualmente como el templo de la fertilidad. En el lugar se encuentra una habitación cerrada con muros de piedra semi labradas (Trutmann et al., 2012). Se cree que las piedras utilizadas para esta construcción fueron parte de antiguas estructuras funerarias preincas (Chullpas; Mamani, 2021). El lugar fue encontrado durante la época colonial y posiblemente fue construido por arquitectos



Figura 3-16: Inca Uyo

locales (Arkush, 2005). Los muros de piedra encontrados son de piedra labrada de junta seca y de dos hojas con relleno intermedio (tipología 1). El lugar se encuentra en muy buen estado de conservación.

Tipología 1: I - CE – mh, t – F2 - PZL –DJ – M, L - HEW (Figura 3-16)

ii) Ccota (Latitud: -15.90978, Longitud: -69.83113)

El lugar se encuentra a 40 km de la ciudad de Puno, sobre una montaña del mismo nombre. En el lugar se ubican diversas Chullpas rústicas de sección circular, los cuales se encuentran en el área de la cultura Lupaka (Arisaca, 2017). También, en el lugar aún se mantienen en buen estado algunas plataformas los cuales sirven hasta el día de hoy para acceder a las Chullpas (Ortiz del Carpio, 2013). Las chullpas están construidas con piedras semi labradas, generalmente planas, muros de varias capas y de junta seca (tipología 1). Las estructuras se encuentran en muy buen estado de conservación, a pesar de los fuertes vientos de la zona.



Figura 3-17: Ccota

Tipología 1: PI - FU – mh, t – L3 – RUST - DJ - S, M, L - SHEW (Figura 3-17)

iii) Molloco (Latitud: -16.00695, Longitud: -69.77300)

Este sitio arqueológico se encuentra ubicado a 35 km de la ciudad de Puno y pertenece también al área de la cultura Lupaka. En el lugar se encuentran diversas Chullpas pertenecientes a la época preinca. Las chullpas están construidas con piedras labradas con una planta rectangular o circular (Humpiri, 2015), de varias capas y con junta seca. Cuatro chullpas con planta rectangular y uno con planta circular se encuentran en muy buen estado de conservación, y dos de planta circular en un estado parcial de conservación. También en el lugar se aprecian zonas donde probablemente hubo otras chullpas construidas.



Figura 3-18: Molloco

Tipología 1: PI - FU – vt – L3 - PZL –DJ – S, M, L - HEW (Figura 3-18)

iv) Kalasaya (Latitud: -15.04488, Longitud: -70.37238)

El sitio arqueológico de Kalasaya se encuentra en la ciudad de Pucará, a 80 km de la ciudad de Puno. Este lugar fue un centro ceremonial y administrativo construido en el periodo Formativo (Cuyenet, 2012) y posiblemente en parte del periodo de Desarrollos Regionales Tempranos. También, se conoce que fue la ciudad capital de un estado prehispánico local (Tantaleán, 2009). En el lugar se encuentra un distrito central con construcciones monumentales de piedra y una extensa periferia



Figura 3-19: Pucará

de viviendas (Klarich, 2005). La mayor parte de los muros son de varias capas, de dos capas con relleno intermedio o de soporte, con juntas de mortero de barro, y con un aparejo rústico. El lugar se encuentra en buen estado de conservación; sin embargo, la zona sufre de lluvias constantes, lo cual podría generar asentamientos importantes en estas construcciones.

Tipología 1: PI - CE – vsh, sh, mh, t, vt – L3, F2, S – RUST –MJ - S, M, L - NAT (Figura 3-19)

v) Sillustani (Latitud: -15.72086, Longitud: -70.15884)

Este sitio arqueológico se encuentra a 30 km de la ciudad de Cusco, al costado del lago Umayo. En el lugar se encuentran diversas chullpas ubicadas principalmente sobre la península de Umayo (Tantaleán, 2006). Estas construcciones se encuentran en el área de la cultura Colla y posiblemente fueron construidos en el periodo de los Estados Regionales y Señores Tardíos; sin embargo, estas no fueron culminadas, ya que en el lugar se encuentran chullpas en construcción y diversas piedras que iban a ser colocadas en estas. Las chullpas con mejores acabados son de junta seca, varias hojas, y con piedras labradas (tipología 1). Dentro de algunas de estas chullpas se encontró una bóveda con una tipología diferente, ya que tenía piedras sin labrar y con junta de mortero. Esta tipología interna no fue considerada para este estudio. Por otro lado, también en el lugar existen chullpas con muros de junta seca, de varias capas y piedras sin labrar (tipología 2). Lamentablemente varias de estas chullpas están propensas a sufrir daños debido a los fuertes vientos del lugar, las lluvias, el ataque por hongos y asentamientos del terreno.

Tipología 1: PI, I - FU – vsh, sh, mh, t, vt – L3 - SED – DJ - M, L, VL - HEW (Figura 3-20a)

Tipología 2: PI - FU – vsh, sh, mh, t – L3 - RUST –MJ, DJ – S, M, L - NAT (Figura 3-20b)



(a)

(b)

Figura 3-20: Sillustani (a) Tipología 1 (b) Tipología 2

vi) Cutimbo (Latitud: -16.02019, Longitud: -70.00501)

Este sitio arqueológico se encuentra a 20 km de la ciudad de Puno y pertenece a la zona de los Lupakas, en frontera con los Collas (Sánchez y López, 2015). En el lugar se ubican dos chullpas de gran tamaño de plantas

rectangulares y una chullpa de planta circular con diseños zoomorfos en alto relieve. Estos recintos funerarios fueron hechos para albergar los cuerpos de los señores o jefes locales Lupakas (Hyslop, 1990). La forma del labrado de las piedras es muy similar a la de los incas, ya que presentan un encaje entre piedra y piedra preciso de junta seca (tipología 1). También, un dato curioso es que dentro de una de las chullpas de sección rectangular se encuentra un muro con hornacinas similar a la de las construcciones incas. Las chullpas se ubican sobre una meseta, y lamentablemente una de ellas tiene la sección superior destruida posiblemente por la caída de un rayo. Actualmente, el lugar cuenta con pararrayos con el fin de evitar futuros daños. Al igual que en Sillustani, también existen aquí pequeñas chullpas, pero en mal estado, con piedras planas y juntas de mortero (tipología 2).

Tipología 1: PI - FU - mh, t, vt - L3 - PZL -DJ - L - HEW (Figura 3-21a)

Tipología 2: PI - FU - vsh, sh, mh - L3 - RUST-MJ - S, M, L - NAT (Figura 3-21b)



(a)

(b)

Figura 3-21: Cutimbo (a) Tipología 1 (b) Tipología 2

3.6. Caso de estudio 2: Muros de piedra en Cusco

Cusco es un departamento en el centro del Perú que cuenta con 287 monumentos arqueológicos prehispánicos (Geportal 2.0). Gran parte de estos monumentos arqueológicos están contruidos en piedra, y la mayoría pertenecen a la época Inca debido a que Cusco fue el centro de la expansión de este Imperio. En Cusco se encuentran diversas tipologías, desde muros de piedra rústicos, hasta los elaborados muros con piedras labradas en palacios y templos. En la Figura 3-22 se muestra la ubicación de los sitios arqueológicos evaluados.



Figura 3-22: Muros de piedra evaluados en Cusco

En los siguientes puntos se evalúan las tipologías de los 13 sitios arqueológicos de Cusco mencionados y una breve explicación del lugar. Tener en cuenta que estos datos fueron obtenidos de la inspección en campo y la bibliografía actual.

i) Sacsayhuamán (Latitud: -13.50907, Longitud: -71.98167)

El término significa en quechua “Lugar donde se sacia el halcón”. Este sitio arqueológico está ubicado a 2 km de la ciudad del Cusco y fue construido por los Incas para tener como función no como fortaleza (Barreda y Valencia, 2007), sino posiblemente como centro ceremonial y templo del Sol (Silva, 2007). Los muros no llegaron a ser completados y se hallaban en construcción a la llegada de los españoles (Protzen, 1987). Los muros más resaltantes están colocados como soporte del terreno y están constituidos por piedras de tamaño mediano a muy grande, colocadas unas sobre otras sin mortero y con un aparejo engastado (tipología 1). Por otro lado, también se aprecian muros de contención de una sola capa con piedra labrada de tamaño mediano a grande con un aparejo sedimentario (tipología 2). Por último, también se encontraron muros con piedra labrada de dos capas con relleno intermedio y un aparejo engastado (tipología 3). Estas construcciones se encuentran en buen estado; sin embargo, se pudo apreciar algunos leves asentamientos que probablemente sucedieron por las lluvias o el mismo peso de estas enormes piedras.

Tipología 1: I – CE – vt – S – PZL – DJ – M, L, VL – HEW (*Figura 3-23a*)

Tipología 2: I – CE – t – S – SED – DJ – M, L – HEW (*Figura 3-23b*)

Tipología 3: I – CE – t – F3 – PZL – DJ – M, L – HEW (*Figura 3-23c*)



(a)



(b)

(c)

Figura 3-23: Sacsayhuamán (a) Tipología 1 (b) Tipología 2 (c) Tipología 3

ii) Tambomachay (Latitud: -13.47989, Longitud: -71.96643)

El término traducido del quechua significa “cueva de reposo”. El lugar se ubica a 7 km de la ciudad del Cusco. Se dice que era una casa de reposo del inca Tupac Yupanqui, donde se hospedaba cuando iba de caza (Cobo, 1956). El lugar muestra un excelente sistema hidráulico, en el que el agua sigue fluyendo hasta ahora. Los muros poseen piedras labradas de tamaño mediano a grande y son de doble hoja encajado (tipología 1). No se incluyeron para esta clasificación las piedras sobre las hornacinas y puertas ya que pueden tener tamaños hasta muy grandes. Por otro lado, también se aprecian en el lugar muros de contención con piedra semi labrada asentadas con mortero, que tienen piedras de tamaño entre pequeño a grande (tipología 2). Actualmente el lugar se encuentra en muy buen estado.

Tipología 1: I – HO – t, vt - L2, S – PZL – DJ - M, L – HEW (Figura 3-24a)

Tipología 2: I - HO – vsh, sh, mh – S – RUST – MJ - S, M, L - SHEW (Figura 3-24b)



(a)

(b)

Figura 3-24: Tambomachay (a) Tipología 1 (b) Tipología 2

iii) Ollantaytambo (Latitud: -13.25648, Longitud: -72.26566)

El término es de posible origen del idioma aimara que significa “Lugar de observación hacia abajo”. Ubicado en el sector del valle de Urubamba a 60 km de la ciudad del Cusco. La ciudad cuenta con el diseño de un sistema de andenes que se despliegan de forma radical en el fondo del valle, teniendo como centro un sector ceremonial (Canziani, 2012). Además, comprende un conjunto de depósitos, canales, fuentes, baños, entre otros. Una de las fuentes más hermosas de los Incas se encuentra en Ollantaytambo, conocido como el baño de la ñusta (princesa). En el lugar se pueden encontrar estructuras de hasta dos niveles (Olascoaga, 1999). Cerca de las fuentes ceremoniales se encuentran muros de piedras semi labradas asentadas con mortero, con dos o más hojas con relleno intermedio (tipología 1). Por otro lado, se tienen muros de andenería con piedras colocadas en estado natural de tamaños pequeño a grande, y con un aparejo rústico (tipología 2). En las zonas más altas de Ollantaytambo se encuentra la zona de los Templos, en donde se encuentran muros de soporte de piedra labrada de tamaños de mediano a grande, y con un aparejo engastado (tipología 3). Por último, varios muros de vivienda poseen dos hojas con relleno intermedio y con piedras en estado natural de tamaños de pequeño a grande (tipología 4). En general el lugar se encuentra en muy buen estado de conservación.

Tipología 1: I – CE – F2, F3 – vsh, sh, mh, t, vt - RUST– MJ – S, M, L – SHEW (Figura 3-25a)

Tipología 2: I - AG – S – sh, mh, t, vt - RUST– MJ – S, M, L - NAT (Figura 3-25b)

Tipología 3: I – CE – S – vsh, sh, mh, t, vt - PZL – DJ - M, L – HEW (Figura 3-25c)

Tipología 4: I – HO, MI – F2 – vsh, sh, mh, t, vt - RUST – MJ – S, M, L – NAT (Figura 3-25d)



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 3-25: Ollantaytambo (a) Tipología 1 (b) Tipología 2 (c) Tipología 3 (d) Tipología 4

iv) Písaq (Latitud: -13.40739, Longitud: -71.84416)

El término deriva posiblemente del origen quechua que significa “perdiz”. El sitio arqueológico está ubicado a 33 km de la ciudad del Cusco. Písaq era una ciudadela inca que tenía como fin la siembra de cultivos (Fatule, 2014). Sin embargo, también cuenta con un centro religioso en la parte alta adyacente a la ciudad, el cual fue construido en la época del inca Pachacútec (1438 – 1471; Niles, 1999). En el lugar se encuentran una gran cantidad de andenes, las cuales tienen piedras en estado natural de tamaño generalmente mediano (tipología 1). Por otro lado, los muros de vivienda tienen dos hojas con relleno intermedio, con piedras desde pequeñas a grandes (tipología 2). También, algunos muros de soporte o de doble hoja con relleno intermedio, tienen piedras semi labradas de tamaño generalmente mediano a grande, con un aparejo engastado (tipología 3). Por último, en el área ceremonial se encuentran muros con piedra labrada de doble hoja encajado o con relleno intermedio, con un aparejo sedimentario (tipología 4). Por ahora el lugar se encuentra en buen estado, pero debido a la magnitud de este lugar, su mantenimiento debe ser constante.

Tipología 1: I – AG – vsh, sh, mh, t, vt – S – RUST – MJ - M – NAT (Figura 3-26a)

Tipología 2: I – HO – vsh, sh, mh, t, vt – F2 – RUST – MJ - S, M, L – NAT (Figura 3-26b)

Tipología 3: I – HO – vsh, sh, mh, t, vt – F2, S – PZL– MJ - M, L – SHEW (Figura 3-26c)

Tipología 4: I – CE – vsh, sh, mh, t – L2, F2 – SED– MJ - M, L – HEW (Figura 3-26d)



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 3-26: Písaq (a) Tipología 1 (b) Tipología 2 (c) Tipología 3 (d) Tipología 4

v) Pikillacta (Latitud: -13.61278, Longitud: -71.71733)

El sitio arqueológico preinca está ubicado a 32 km de la ciudad del Cusco. El término pikillacta deriva del quechua como “Pueblo pequeño” o “Pueblo de las Pulgas”, el cual posiblemente fue usado en la época Inca (McEwan, 1985). Pikillacta fue una de las ciudades preinca de la expansión territorial Wari (Pozzi-Escot, 1991). Algunas construcciones en Pikillacta eran utilizados como obras defensivas y de control de circulación, los cuales luego fueron reutilizadas en la época Inca (McEwan, 1991). Algunos muros son de gran medida, ya que tienen longitudes de 40 a 50 m y otros hasta 12 m de altura (Pozzi-Escot, 1991). Los muros son de dos o más hojas con relleno intermedio, con piedras en estado natural asentadas con mortero, y de tamaños de pequeño a grande (tipología 1). Lamentablemente por las lluvias y la antigüedad de estas estructuras, algunos muros tienen problemas de asentamientos y están por voltearse.



Figura 3-27: Pikillacta

Tipología 1: PI, I – HO – vsh, sh, mh, t, vt – F2, F3 – RUST – MJ – S, M, L – NAT (Figura 3-27)

vi) Chinchero (Latitud: -13.38819, Longitud: -72.04668)

El sitio arqueológico está ubicado a 30 km de la ciudad del Cusco. Chinchero se edificó como un lugar de descanso para el inca Tupac Yupanqui y posiblemente la gente de Cusco pobló esta área para realizar actividades agrícolas (Huaillani, 2008). En la época colonial, diversas construcciones ceremoniales en el lugar sufrieron masivas modificaciones para construir templos cristianos (Nair, 2003), por lo que se perdieron diversas construcciones Incas. Sin embargo, en el lugar aún se encuentran recintos de vivienda y una gran cantidad de andenería Inca. Algunos muros de soporte para viviendas o para agricultura tienen un aparejo celular con piedra semi labrada, asentado con mortero (tipología 1). Otros muros tienen piedras labradas también con un aparejo celular, pero de dos capas con relleno intermedio y de junta seca (tipología 2). Como tercer tipo de muro se tienen los de soporte para viviendas o para agricultura, el cual posee un aparejo entre celular y engastado con piedra labrada (tipología 3). Al igual que en Pikillacta, los suelos se están asentando, lo que provoca que algunos muros estén por voltearse fuera de su plano.

Tipología 1: I – HO, AG – vsh, sh, mh, t, vt – S – CEL – MJ - M, L – SHEW (Figura 3-28a)

Tipología 2: I – HO – vsh, sh, mh, t, vt – F2 – CEL – DJ - M, L – HEW (Figura 3-28b)

Tipología 3: I – HO, AG – vsh, sh, mh, t, vt – S – CEL, PZL – DJ - M, L – HEW (Figura 3-28c)



(a)

(b)



(c)

Figura 3-28: Chinchero (a) Tipología 1 (b) Tipología 2 (c) Tipología 3

vii) Puka Pukará (Latitud: -13.48226, Longitud: -71.96253)

Este sitio arqueológico se encuentra a 7 km de la ciudad del Cusco, muy cerca de Tambomachay. También conocida como “Fortaleza Roja”, ya que las piedras se tornan rojizas en el crepúsculo (Khelladi, 2018). Puka Pukará funcionaba tal vez como un centro administrativo o militar; sin embargo, aún se desconoce su verdadera función. Tiene una similitud a la construcción de Sacsayhuamán, pero no se construyó con piedras de gran tamaño. En una investigación se realizó el análisis de tres piedras calizas del lugar y se obtuvo una densidad de 2.5 gr/cm³, porosidad de 5.186%, porcentaje de absorción de 2.074% y resistencia a la compresión de 264.5 kg/cm² en promedio (Huamán, 2021). En este lugar hay muros con un aparejo rústico y piedras semi labradas, de dos hojas y relleno intermedio (tipología 1); y muros con un aparejo celular y piedras labradas (tipología 2). El lugar se encuentra en buen estado de conservación.

Tipología 1: I – MI – vsh, sh, mh, t, vt – F2 – RUST – MJ – S, M, L – SHEW (Figura 3-29a)

Tipología 2: I – MI – vsh, sh, mh, t, vt – F2 – CEL – DJ – S, M, L – HEW (Figura 3-29b)



Figura 3-29: Puka Pukará (a) Tipología 1 (b) Tipología 2

viii) Moray (Latitud: -13.32779, Longitud: -72.19556)

En el lugar se encuentran andenes de forma circular que fueron utilizados principalmente para la agricultura del imperio Inca (Wright et al., 2011). Los andenes están ubicados a 35 km de la ciudad del Cusco y tienen forma curva, formando anillos de andenería. Se cree que todavía el lugar estaba en construcción en el periodo de Atahualpa, y debido a su muerte en Cajamarca, los constructores abandonaron el lugar (Earls y Cervantes, 2015). Los muros de estos andenes tienen un aparejo entre rústico y celular,



Figura 3-30: Moray

y tienen piedra en estado natural asentado con mortero (tipología 1). Debido a la forma de estos muros y el asentamiento del suelo, algunos muros están propensos al volteo.

Tipología 1: I – AG – vsh, sh, mh, t – S – RUST, CEL - MJ – S, M, L – NAT (*Figura 3-30*)

ix) Tipón (Latitud: -13.56704, Longitud -71.78292)

Este complejo arqueológico se encuentra a 21 km de la ciudad del Cusco y muestra la más impresionante tecnología hidráulica de los incas. Tipón puede provenir de la palabra “timpuj” que significa “Estar hirviendo”.(Pérez, 2012). Es probable que fue construido por el inca Wiracocha y mejorado en el tiempo; sin embargo, hay indicios de que parte de su arquitectura proviene de la cultura Wari (McEwan y Gibaja, 2003). En Tipón existe un gran muro, el cual su arquitectura es claramente preinca; por otro lado, está constituido por andenes, una plaza ceremonial, recintos de vivienda, fuentes de agua, acueductos y canales Inca (Wright, 2006). Se cree también que fue un laboratorio para perfeccionar la agricultura Inca. En el lugar hay muros de contención los cuales tienen un aparejo rústico con piedras con un acabado natural a semi labrado, asentadas con mortero (tipología 1). También se encuentran muros de contención con un aparejo engastado con piedras con un acabado entre semi labrado y labrado, asentadas con mortero (tipología 2). Por otro lado, los muros de las viviendas tienen un acabado rústico con piedras con un acabado natural, y dos hojas con un relleno intermedio (tipología 3). También en este caso se apreció problemas de asentamiento del terreno y algunos muros con problemas de volteo.

Tipología 1: I - AG - vsh, sh, mh, t, vt – S - RUST - MJ - S, M, L - NAT, SHEW (*Figura 3-31a*)

Tipología 2: I - AG - vsh, sh, mh, t, vt – S – PZL - DJ – S, M, L - SHEW, HEW (*Figura 3-31b*)

Tipología 3: I - HO - vsh, sh, mh, t – F2 – RUST - MJ – S, M, L – NAT (*Figura 3-31c*)



(a)

(b)



(c)

Figura 3-31: Tipón (a) Tipología 1 (b) Tipología 2 (c) Tipología 3

x) Cusco - Templo del Coricancha (Latitud: -13.52017, Longitud: -71.97521)

El Coricancha o Templo del Sol se encuentra en el centro de la ciudad del Cusco y se cree que fue el templo más importante del imperio Inca (Castro, 2020). En la época colonial se modificó la estructura para la construcción de la iglesia del convento de Santo Domingo; sin embargo, aún se mantienen diversas habitaciones y muros de piedra Inca que destacan de su calidad de labrado. Estos muros Inca son de doble hoja encajado, con un aparejo sedimentario y piedras labradas colocadas unas sobre otras. El lugar se encuentra en buen estado de conservación; sin embargo,

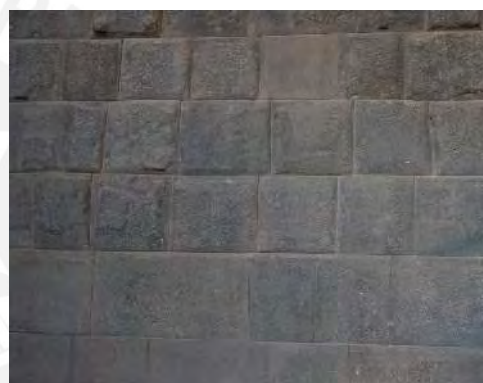


Figura 3-32: Qoricancha

se aprecian asentamientos en algunos muros causados tal vez por sismos ocurridos en la época inca o colonial.

Tipología 1: I - CE - vsh, sh, mh, t, vt – L2 – SED – DJ – M, L - HEW (*Figura 3-32*)

xi) Machupicchu (Latitud: -13.16139, Longitud: -72.54544)

Machupicchu es un antiguo poblado incaico ubicado a 80 km de Cusco. La construcción de este pueblo comenzó alrededor de los 1450, posiblemente quemado en 1562 y finalmente abandonado 10 años después (Maurtua, 1906; Rowe, 1990). Sin embargo, también es probable que haya sido abandonado en 1540 cuando el Imperio Inca cayó (Wright y Zegarra, 2000). El pueblo está constituido por viviendas, andenes, plazas, templos, etc. En el lugar existen viviendas con muros de soporte, o muros con dos hojas y relleno intermedio, con un aparejo rústico y piedras con un acabado natural asentado con mortero (tipología 1). También, se encuentran muros de dos hojas y relleno intermedio con piedras semi labradas en estructuras para vivienda (tipología 2). Por otro lado, se encuentran muros en templos de una y dos hojas encajadas, con un aparejo engastado (tipología 3). Por último, existen muros en algunas zonas ceremoniales con dos hojas y relleno intermedio, con un aparejo sedimentario y con piedras labradas (tipología 4). Al igual que el templo del

Coricancha, en Machupicchu se encuentran grandes asentamientos en algunos muros con piedra labrada, los cuales pudieron ser ocasionados por sismos durante la época Inca o colonial.

Tipología 1: I - HO – vsh, sh, mh, t, vt – S, F2 – RUST – MJ – S, M, L - NAT (*Figura 3-33a*)

Tipología 2: I - HO – vsh, sh, mh, t, vt – F2 – RUST – MJ – S, M, L, VL - SHEW (*Figura 3-33b*)

Tipología 3: I - CE – vsh, sh, mh, t, vt – L2 – PZL – DJ – M, L, VL - HEW (*Figura 3-33c*)

Tipología 4: I - CE – vsh, sh, mh, t, vt – F2 – SED – DJ – S, M, L - HEW (*Figura 3-33d*)

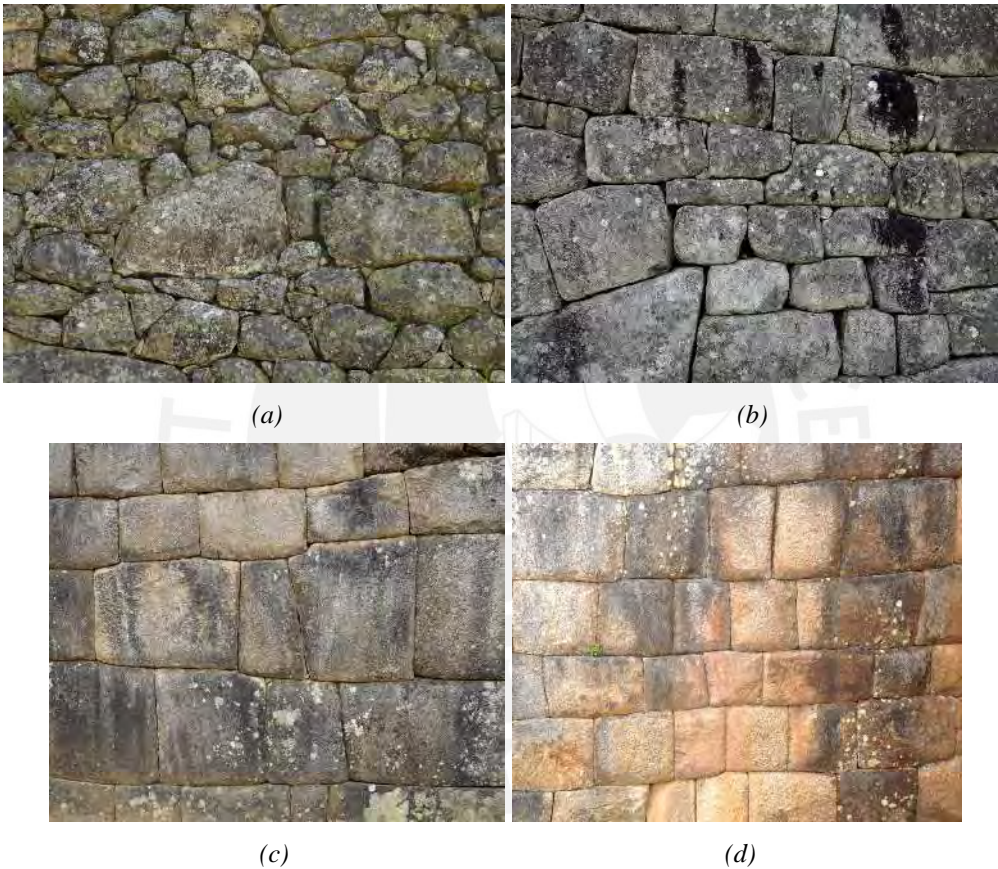


Figura 3-33: Machupicchu (a) Tipología 1 (b) Tipología 2 (c) Tipología 3 (d) Tipología 4

xii) Muro de la piedra de los 12 ángulos (Latitud: -13.51591, Longitud: -71.97625)

Este muro está ubicado en la calle Hatun Rumiyoq en la misma ciudad del Cusco, a unas 2 cuadras de la Plaza Mayor de Cusco. La estructura Inca formó parte del palacio del Inca Sinchi Roca y está hecho de diorita verde (Mar, Matos y Caballero, 2021). Actualmente, el muro forma parte del Museo Arzobispal que cuenta en total con tres muros Inca en su perímetro, y que se elevan 5 m por encima de las calles circundantes. Está construido con piedra y adobe, y es prescindible recalcar que la estructura simple de adobe sobre el muro de piedra fue construida luego de la época Inca. Estos muros son de aparejo engastado con piedra labrada, y no es posible distinguir si es de una o dos hojas encajadas, pero, lo más probable es que tenga una sección transversal similar al templo del Coricancha (tipología). El lugar se encuentra en buen estado, pero se aprecia ligera abrasión en las piedras.



Figura 3-34: Muro de la piedra de los 12 ángulos

Tipología 1: I - CE – mh, t, vt – PZL – DJ - L1, L2 - S, M, L - HEW (Figura 3-34)

xiii) Q'enco (Latitud: -13.50883, Longitud: -71.97065)

Este sitio arqueológico se encuentra a 2 km de la ciudad del Cusco y significa "Zigzag" o "laberinto". Es famoso por sus túneles en zigzag, los cuales ya no son accesibles al público en general (Foerster, 2012). En la superficie se encuentran algunos muros de contención, con un aparejo entre engastado y celular, con piedras labradas (tipología 1). El lugar se encuentra en buen estado de conservación.



Figura 3-35: Q'enco

Tipología 1: I - CE – vsh, sh, mh, t, vt – S – PZL, CEL - DJ - M, L - HEW (Figura 3-35)

3.7. Resumen

La taxonomía realizada es una iniciativa de la clasificación estructural de construcciones de piedra en el Perú. Como se comentó anteriormente, a futuro se debe completar esta clasificación con un procedimiento similar a la taxonomía de edificios Global Model Earthquake Model versión 2.0, para así poder relacionar el diagnóstico de la inspección con el nivel de riesgo sísmico de cada construcción de piedra en el Perú. En esta investigación solo se pudieron clasificar dos regiones del Perú, y únicamente las zonas más conocidas de estas

regiones; sin embargo, es importante clasificar todas las construcciones prehispánicas posibles en el Perú. Es muy probable que las tipologías encontradas en Puno y Cusco sean muy recurrentes en diversos sitios del país. De estas dos regiones se aprecia que las estructuras prehispánicas de Puno y Cusco tienen tipologías muy similares, siendo las siguientes taxonomías las más recurrentes según su uso:

- Para muros de agricultura:

I – AG – vsh, sh, mh, t – S – RUST – MJ – S, M, L – NAT

(Época inca – Agricultura – altura de muy pequeña a alta – muro de soporte – acabado rustico – junta de mortero – tamaños de piedra de pequeño a grande – acabado de piedra natural)

- Para muros de vivienda:

I – HO – mh, t, vt – F2 – RUST – MJ – S, M, L – NAT, SHEW

(Época inca – Vivienda – altura de mediana a muy alta – muro de doble hoja con relleno intermedio – acabado rustico – junta de mortero – tamaños de piedra de pequeño a grande – acabado de piedra natural y semi labrada)

- Para muros ceremoniales:

I – CE – mh, t, vt – L2, F2, S – SED, PZL – DJ – M, L – HEW

(Época inca – Ceremonial – altura de mediana a muy alta – muro de doble hoja, doble hoja con relleno intermedio o de soporte – acabado sedimentario o engastado – junta seca – tamaños de piedra de mediano a grande – acabado de piedra labrada)

- Para muros de recintos funerarios:

PI – FU – mh, t, vt – L3, F2 – SED, PZL – DJ – M, L – HEW

(Época preinca – Funeraria – altura de mediana a muy alta – muro de varias hojas o de doble hoja con relleno intermedio – acabado sedimentario o engastado – junta seca – tamaños de piedra de mediano a grande – acabado de piedra labrada)

CAPITULO 4: PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

4.1. Generalidades

En este capítulo se explica una alternativa para obtener el modelo geométrico de estructuras de piedra de junta seca a partir de la segmentación de imágenes, y exportarlos directamente (sillar por sillar) a un programa de elementos de finitos con todas sus propiedades, condiciones de contorno, secuencia de cargas, etc. Con este proceso se evita el uso de programas de dibujo donde se tenía que modelar cada uno de los sillares, y luego exportarlos al programa de cálculo.

En primera instancia se explica el concepto de códigos o rutinas, y segmentación de imágenes. Luego, se detallan los 3 códigos elaborados para la obtención del modelo geométrico en 3D de los muros de piedra. El primer y segundo código permiten obtener el modelo geométrico 2D de estructuras de piedra de junta seca; sin embargo, el primer código es adecuado para estructuras de piedra labrada y el segundo código para piedra no labrada. Por otro lado, el tercer código permite la creación de los sólidos en 3D, en base a lo obtenido con los códigos anteriores. Este último código permite también exportar los bloques a Abaqus como sólidos rígidos, y ensamblarlos para que la estructura pueda ser analizada.

4.2. Códigos o rutinas

Un código o rutina es un conjunto de instrucciones que se le da a un programa de computadora para que produzca un programa funcional como resultado (Lyman, 2019). En ocasiones es necesario incluir datos de entrada para obtener el resultado deseado. Estas instrucciones se escriben en un lenguaje de programación como Python, Visual Basic, Java, C++, entre otros. Los códigos son desarrollados con el fin de realizar tareas específicas o automatizar procesos.

4.3. Segmentación de imágenes

Se define a la segmentación de imagen como la separación de una imagen en regiones de interés para un fin específico (Dawant y Zigdenbos, 2000), como el del reconocimiento de objetos. Para realizar este procedimiento en una imagen, generalmente se incluyen en los códigos la intensidad de los píxeles, magnitud de la gradiente, medidas de la textura, ruido, entre otros. Los métodos mayormente usados para la segmentación de imágenes son del tipo: estáticos, Fuzzy, diferenciación, frecuencia espacial, localización subpíxel, difusión anisotrópica, contorno activo, aprendizaje supervisado (machine learning) y aprendizaje no supervisado (Deep learning; Jing et al., 2022). Debido a la resolución de la imagen, el contraste, el ruido, etc., la segmentación de imágenes puede ser una tarea muy compleja, por lo que la combinación de los métodos mencionados es una opción para lograr un mejor resultado.

Los códigos o rutinas realizados en este trabajo de tesis están basados en métodos estáticos, de Fuzzy y de difusión anisotrópica (Jing et al., 2022; *Tabla 2-3*). Así, de una imagen de un muro de piedra de junta seca, los códigos elaborados son capaces de identificar cada una de las piedras y sus bordes.

4.4. Códigos elaborados para la obtención del modelo geométrico 2D

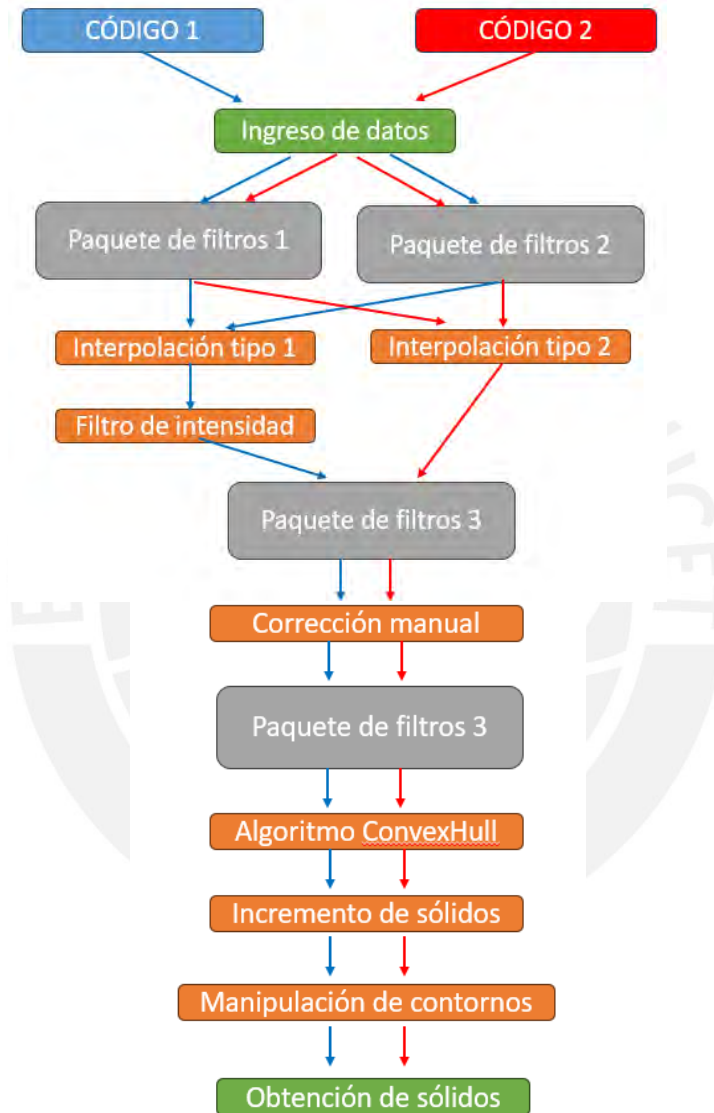


Figura 4-1: Procedimiento de segmentación de imágenes

En la *Figura 4-1* se muestra un diagrama con el proceso de segmentación de los códigos 1 y 2 elaborados. El código 1 es recomendable para imágenes de muros que no tienen vacíos entre sus piedras, en general muros de piedra labrada, y en algunos casos muros de piedra semi labrada. El código 2 es recomendable para muros que tienen vacíos entre sus piedras, es decir muros armados con piedra natural y en algunos casos muros de piedra semi labrada. Tener en cuenta que para la segmentación de imágenes se pueden utilizar fotografías

tomadas desde un teléfono móvil e incluso imágenes descargadas del internet. Las librerías utilizadas para los códigos 1 y 2 elaborados en Python son: OPENCV (Bradski, 2000), MATPLOTLIB (Hunter, 2007), NUMPY (Harris et al., 2020) y SHAPELY (Gillies, 2007). En la *Figura 4-1* se muestra el diagrama de flujo de los códigos 1 y 2 elaborados.

Como se indica en el diagrama de la *Figura 4-1*, la segmentación inicia con la carga de la imagen, donde el algoritmo reconoce las coordenadas horizontal y vertical de cada píxel de la imagen, y su coloración BRG (blue, green, red). Así, cada píxel se almacena en un vector con sus coordenadas y su color e intensidad. Luego, usando un algoritmo bilineal, la imagen es escalada para que tenga una altura de 720 píxeles; se puede siempre escalar a otra altura, pero se prefiere 720 píxeles para reducir el coste computacional. Esto se logra gracias al algoritmo bilineal que interpola los píxeles vecinos en diferentes direcciones (Kalamani et al., 2014).

El paquete de filtros 1 y 2 permiten obtener una imagen caricaturizada de diferente estilo, en el que se resaltan de mejor manera las juntas de una estructura de piedra de junta seca. Con el paquete de filtros 1, se aplica el filtro de estilización (método de difusión anisotrópica). Este filtro permite resaltar los bordes de la imagen. Aquí, se analizan dos parámetros. El primero (σ_s) indica el tamaño de suavizado de la imagen en una escala de 0 a 200 (cantidad de píxeles vecinos a utilizar). El segundo (σ_r) es para controlar este suavizado, es decir, que se promedien píxeles vecinos con similitud de color al píxel evaluado. La escala del primer parámetro es de 0 a 1, mientras este valor sea mayor, dará como resultados mayores regiones de color constante. Luego, se aplica un filtro de suavizado de imagen a color para quitar el ruido de la imagen por medio de un método de promedio no locales (Buades et al., 2011). Con este filtro se reemplaza el color de un píxel con un promedio de colores similares de los píxeles vecinos. Esto permite reducir las manchas de una imagen y también que cada piedra tenga un color similar por dentro. Después, y mediante métodos estáticos, se eliminan las capas de color rojo y verde, quedando únicamente la capa azul con intensidad entre 0 a 255 (imagen estilizada). También, se aplica un filtro de suavizado con un operador del tipo Gaussiano (método Fuzzy) como imagen base para el siguiente paquete de filtros. Por último, y para diferenciar mejor las piedras de las juntas y los vacíos, la imagen se caricaturiza realizando una división píxel a píxel entre la imagen estilizada y la imagen suavizada con el método Fuzzy. Por último, se realiza un filtrado de intensidad -sólo para el caso del código 1- en el que la imagen se convierte a una imagen en blanco y negro a partir de un punto fijo de intensidad.

En el caso del paquete de filtros 2, la imagen en su estado original, escalada a una altura de 720 píxeles, se convierte a una imagen en escala de grises. Se realiza también el filtrado suavizado con el operador del tipo Gaussiano (método Fuzzy) y se caricaturiza la imagen realizando una división píxel a píxel entre la imagen en escala de grises y la imagen suavizada con el método Fuzzy.

Finalmente, se realizan 2 tipos de interpolaciones para obtener los bordes de la imagen. Para la interpolación 1, se multiplica la intensidad de la imagen píxel a píxel de la imagen caricaturizada del paquete de filtros 1 y del paquete de filtros 2. Ya que en cada imagen el rango de intensidad es de 0 a 255, entonces se divide a cada multiplicación escalar entre 255, con el fin de que el producto mantenga todavía el rango de intensidad de 0 a 255. En la interpolación 2, y con el fin de resaltar mejor los bordes de la imagen, se procesa la imagen caricaturizada del paquete de filtros 1 en el que cada píxel se reemplaza por el píxel ubicado en la misma posición de la imagen caricaturizada del paquete de filtros 2, siempre y cuando el píxel de la imagen del paquete de filtros 1 tenga mayor o igual intensidad que el píxel de la imagen del paquete de filtros 2. En caso no sea así, entonces no se realiza el reemplazo.

Con el paquete de filtros 3, se ubica el contorno de cada piedra. En este caso se utiliza un algoritmo que evalúa los píxeles alrededor de cada píxel, los cuales tienen una misma intensidad de color, los encierra en un contorno, y entrega las coordenadas de este. Todas las coordenadas de cada contorno se almacenan en una lista. Es cierto que en este caso el algoritmo podría ubicar contornos dentro de otros contornos; por lo tanto, se procesan los contornos en el que si existen contornos dentro de otro, se eliminan los contornos internos de la lista. Los contornos de longitud menor a la indicada por el usuario se pueden eliminar, y también se pueden reducir las coordenadas en un contorno si existe un exceso. Esto último con la finalidad de no tener muchas coordenadas para definir los bordes de una piedra.

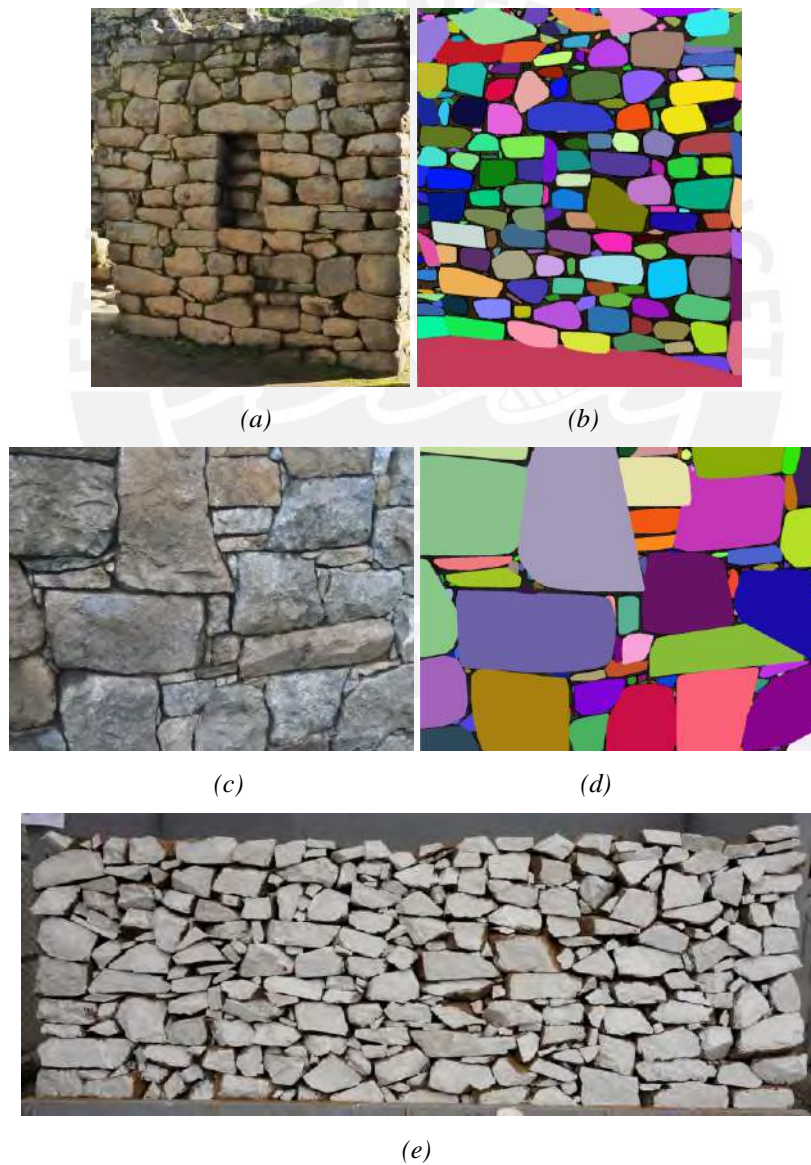
Es probable que en algunos casos el algoritmo tome dos o más piedras como un solo bloque, ya que en ocasiones los bordes de los sillares de la imagen no son tan notorios debido a la calidad de la imagen, condiciones de luz, ruido, etc. Por ello, y como parte del algoritmo de segmentación, se añade una corrección manual al resultado del paquete de filtros 3.

Luego de la corrección manual, se usa nuevamente el paquete de filtros 3. Así, se tiene ya una imagen con la correcta ubicación de los contornos de cada piedra. Pero, algunos contornos podrían tener imperfecciones dentro de cada piedra, como líneas y puntos debido a la rugosidad de los bloques. Para corregir estos contornos se utiliza el algoritmo ConvexHull que ubica los píxeles que tiene un mismo color y los encierra generando así nuevos contornos. En ocasiones existen huecos entre contornos, debido a todo este proceso. Por ello, se puede realizar un incremento de sólidos, en el que se incrementa cada contorno un porcentaje desde su centroide.

Debido al proceso del ConvexHull y el incremento de sólidos, algunos contornos pueden superponerse, por lo que se realiza una manipulación de contornos. En este proceso se eliminan aquellos contornos que tengan 1 o 2 coordenadas, ya que no son sólidos cerrados. Seguidamente, se ordenan los contornos de mayor a menor según su área. Luego se plotea el 1er contorno, y luego el 2do contorno. Si el segundo contorno interseca con

el primer contorno, entonces se modifica las coordenadas del primero con tal de que no se intersequen. Después, se coloca el 3er contorno y se modifica los contornos anteriores si hay intersección. Este procedimiento se realiza hasta finalizar el ploteo de todos los contornos. Por último, todos los contornos son escalados, con tal que la longitud horizontal de la imagen sea igual a la longitud real que aparece en el muro.

En el anexo 1 y 2 se muestran los códigos elaborados 1 y 2 respectivamente. En el anexo 3 se explica con un ejemplo el proceso de segmentación de imágenes paso a paso con estos códigos. En la Figura 4-2 se muestran tres casos de análisis. En la parte izquierda se observan fotografías de los muros de piedra analizados, y a la derecha las imágenes segmentadas, donde cada piedra (con sus bordes) ha sido reconocida, y los espacios vacíos entre piedras son pintados de color negro.





(f)

Figura 4-2: Casos evaluados con el programa

- (a) Estructura en Machu Picchu, Cusco (b) Imagen filtrada de "a" con el código 1
(c) Estructura irregular de piedra (d) Imagen filtrada de "c" con el código 1
(e) Muro tipo pircas en Lima (f) Imagen filtrada de "e" con el código 2

4.5. Código para la obtención del modelo geométrico 3D en Abaqus

Para esta fase se realizó el código 3, también en Python, con la finalidad de crear un modelo geométrico 3D del muro en análisis (con cada bloque respectivamente) a partir de los contornos en 2D obtenidos de los códigos 1 o 2; sin embargo, el muro generado es de una sola capa y cada bloque tiene un grosor constante. El código 3 permite también dibujar una plataforma discreta rígida en la base del muro, ingresar las propiedades mecánicas a todas las piedras (densidad, módulo de elasticidad y módulo de Poisson), generar el ensamblaje automático de los bloques para así formar el muro, convertir cada piedra en cuerpo rígido, generar las condiciones de contorno y de contacto general, y realizar el mallado de cada elemento. Además, se crean 3 pasos de análisis: gravedad, estabilidad y sismo. En la *Figura 4-3a* y *Figura 4-3b* se muestra una sección del muro de la piedra de los 12 ángulos y los sólidos obtenidos con el código 1, respectivamente. En la *Figura 4-4* se muestran las vistas 3D del modelo en Abaqus obtenido con el código 3. Notar que cada piedra en Abaqus se genera, en lo posible, con el menor número de líneas y así no tener más vértices de lo necesario. Por último, el código se muestra en el anexo 4.

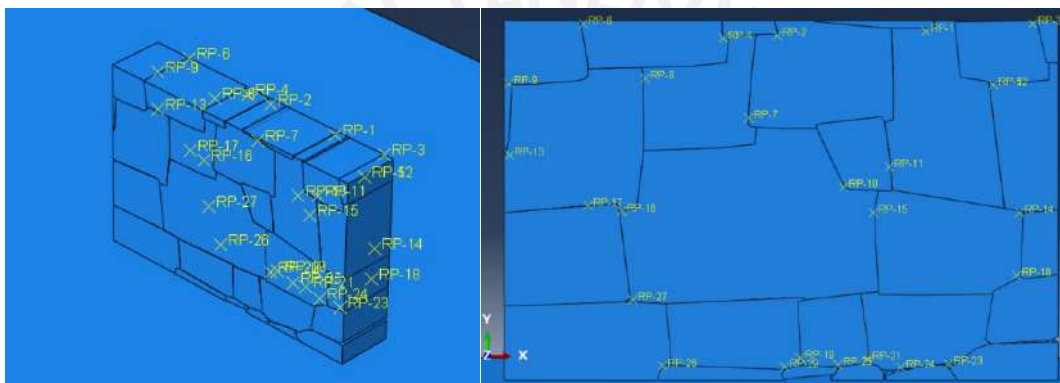


(a)

(b)

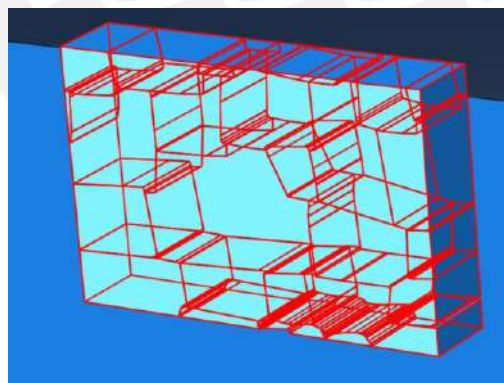
Figura 4-3: Modelo en geométrico 2D de una sección de un muro Inca obtenido con el código 1

(a) Fotografía de muro Inca (b) Obtención de contornos



(a)

(b)



(c)

Figura 4-4: Modelo en Abaqus obtenido con el código 3

(a) Vista 3D (d) Vista frontal (c) Vista de coordenadas de cada bloque

4.6. Resumen

El programa elaborado permite reducir el tiempo para la obtención del modelo geométrico de construcciones de piedra de junta seca; sin embargo, en ocasiones es necesario realizar correcciones manuales. A pesar de

estas limitación el programa es útil para generar modelos de los sillares de manera rápida y teniendo como base una imagen. Estos códigos no solamente pueden ser utilizados en construcciones prehispánicas de piedra de junta seca en el Perú, sino también en distintas construcciones de piedra de junta seca en el mundo.

Tener en cuenta que para el desarrollo de este programa se utilizaron métodos estáticos, de Fuzzy y de difusión anisotrópica; sin embargo, a futuro es importante implementar a estos códigos los métodos de aprendizaje supervisado (Machine Learning) y de aprendizaje no supervisado (Deep Learning) para la segmentación de imágenes. El nuevo algoritmo debe aprender cómo realizar el proceso de corrección de bordes sin necesidad de intervención alguna. Para esto es necesario elaborar una red neural de varias imágenes procesadas de diferentes muros con diferente tipología, para que el programa pueda afinar su algoritmo.



CAPITULO 5: VERIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE SÓLIDOS RÍGIDOS EN ABAQUS

5.1. Generalidades

En este capítulo se describen las bondades del programa Abaqus para modelar los cuerpos rígidos y el contacto entre ellos, usando los elementos finitos (FEM). También se muestra como en Abaqus se ha incorporado los elementos discretos (DEM) en forma de esferas, lo cual permite simular de manera eficaz suelos de relleno. Se verifica la compatibilidad y el equilibrio de los resultados en Abaqus/Explicit por medio de un modelo numérico sencillo.

El uso de este software representa una gran ventaja para esta investigación, ya que gran parte de las construcciones poseen bloques irregulares y están sometidas al empuje del terreno contenido, y Abaqus permite el modelado discontinuo de estas estructuras.

5.2. Métodos de solución por integración directa en el tiempo

En general para obtener la solución de la dinámica estructural se evalúa la siguiente ecuación:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \hat{\mathbf{p}}(\mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}}, \dots) = \mathbf{f}(t) \quad (5-1)$$

De las cuales $\mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}}, \ddot{\mathbf{u}}$ son el vector de desplazamiento, velocidad y aceleración nodal respectivamente; \mathbf{M} es la matriz de masa; $\mathbf{f}(t)$ es la fuerza externa en función del tiempo; y el término $\hat{\mathbf{p}}(\mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}}, \dots)$, es la fuerza restauradora que depende del amortiguamiento, rigidez, entre otros, de la estructura evaluada (Suárez, 2021).

La solución de la ecuación 5-1 se desarrolla numéricamente mediante algoritmos de integración paso a paso en el tiempo, como los métodos de integración directa. En estos métodos la respuesta dinámica del sistema se evalúa mediante esquemas de integración paso a paso y en instantes discretos de tiempo $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n, t_{n+1}$. La diferencia entre dos tiempos discretos consecutivos se conoce como paso de tiempo Δt . El objetivo de los métodos es que iniciando de un estado conocido $(\mathbf{u}_n, \dot{\mathbf{u}}_n)$ en el tiempo t_n , encontrar el nuevo estado $(\mathbf{u}_{n+1}, \dot{\mathbf{u}}_{n+1})$ en el tiempo t_{n+1} . Los algoritmos de solución se clasifican en métodos implícitos y explícitos.

En los métodos implícitos las variables $(\mathbf{u}_{n+1}, \dot{\mathbf{u}}_{n+1})$ se calculan considerando los valores actuales en t_n y la solución de la ecuación dinámica en t_{n+1} . En cada paso de tiempo se necesita resolver un sistema de ecuaciones acopladas no lineales que requieren de matrices de masa y rigidez tangente globales, lo que conlleva a un mayor coste computacional. La solución en estos métodos se define como incondicionalmente estable, pero en problemas altamente no lineales el algoritmo puede fallar debido a inestabilidades numéricas. En cambio, en los métodos explícitos las variables $(\mathbf{u}_{n+1}, \dot{\mathbf{u}}_{n+1})$ son calculadas considerando sólo la solución

de la ecuación dinámica en t_n y sin necesidad de iteración, ya que la solución se realiza a nivel local (sin resolver el conjunto global de ecuaciones). Para evitar la inestabilidad de la solución en los métodos explícitos, el paso de tiempo de cálculo Δt debe ser menor que el incremento de tiempo crítico Δt_{crit} (condición de Courant–Friedrichs–Lewy CFL), por lo que estas soluciones se definen como condicionalmente estables. El incremento de tiempo crítico está relacionado con el tiempo más corto que se necesita para que una onda elástica pueda viajar entre dos nodos de un elemento. En comparación con los métodos implícitos, los métodos explícitos tienen un elevado número de pasos de tiempo, pero con menor coste computacional para cada incremento de tiempo.

5.3. Modelación de los muros por elementos finitos (FEM)

5.3.1. Elementos finitos

En el análisis de elementos finitos por el método de desplazamientos, la estructura o elemento se divide en subelementos, en los cuales cada uno tiene sus propias propiedades, y existe una compatibilidad entre el desplazamiento y fuerzas nodales. El ensamblaje de los subelementos, considerando las fuerzas externas y las condiciones de borde resulta en un sistema de ecuaciones que describen el equilibrio de la estructura, los cuales tienen que ser resueltos para obtener los desplazamientos nodales de la estructura. De estos desplazamientos nodales es posible obtener deformaciones unitarias y esfuerzos en los puntos de integración (Lourenço, 1996). En Abaqus se utiliza la dinámica de sólidos rígidos, en un marco de elementos finitos, los cuales siguen leyes de contacto, para lograr grandes desplazamientos. Este sistema combina diversos métodos que permite evaluar estructuras de junta seca con mayor eficiencia.

5.3.2. Comportamiento mecánico de los cuerpos rígidos

Los cuerpos rígidos son elementos con múltiples nodos y superficies donde su movimiento es controlado por un punto de referencia, el cual, por conveniencia, suele ser ubicado en el centro de masa del sólido (ABAQUS rigid body definition, 2023). Los cuerpos rígidos permiten una reducción de los grados de libertad para así reducir tiempo computacional. Un cuerpo rígido posee 6 grados de libertad (DOFs): 3 de traslación \mathbf{u} (u_1, u_2, u_3) con respecto al punto de referencia, y 3 de rotación ϕ (ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3) que son componentes del vector de rotación finito de Euler, que definen la orientación. La consideración de rotaciones dinámicas finitas es altamente no lineal y no tan sencilla como son los grados de libertad de traslación. Los incrementos de las variables de rotación se calculan en Abaqus utilizando la exponencial de la matriz de rotación (ABAQUS rotation variables, 2023; ABAQUS rotaty inertia element, 2023). Los pequeños desplazamientos incrementales dan lugar a una matriz simétrica sesgada que se integra para cada incremento de tiempo utilizando un mapeo exponencial, para así, producir la matriz de rotación finita.

Las posiciones relativas de cada nodo siempre se mantienen constantes, por lo que no se deforman, permitiendo que el cuerpo sufra grandes desplazamientos y rotaciones.

La forma fuerte o local de resolver el equilibrio de los cuerpos es mediante la segunda ley de Newton y el momento dinámico angular (ecuaciones 5-2 y 5-3).

$$\mathbf{F} = m\ddot{\mathbf{u}}_c \quad (5-2)$$

$$\mathbf{M} = d\mathbf{L}/dt = d(\mathbf{I} \cdot \boldsymbol{\omega})/dt = \mathbf{I} \cdot \dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I} \cdot \boldsymbol{\omega} \quad (5-3)$$

Donde \mathbf{F} es la fuerza resultante, m es la masa, \mathbf{L} es el momento angular, \mathbf{M} es el torque resultante, \mathbf{I} es el tensor de inercia, \mathbf{u}_c es la traslación del cuerpo rígido, y $\boldsymbol{\omega}$ la velocidad angular que es la derivada del vector ϕ .

Abaqus usa la solución débil o variacional de equilibrio, que es: $\delta W_{\text{int}} + \delta W_{\text{ext}} = 0$, en el cual la contribución de inercia del trabajo virtual de cada cuerpo rígido δW_{int} puede ser calculado con el principio de D'Alembert en cada instante de tiempo:

$$\delta W_{\text{int}} = - \int_V \rho \delta \mathbf{u} \cdot \ddot{\mathbf{u}} dV = - m\ddot{\mathbf{u}}_c \cdot \delta \mathbf{u}_c - (\mathbf{I} \cdot \dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I} \cdot \boldsymbol{\omega}) \cdot \delta \boldsymbol{\phi} \quad (5-4)$$

Donde $\delta \mathbf{u} = \delta \mathbf{u}_c + \delta \boldsymbol{\phi} \times \mathbf{r}$, es la variación de la posición de cada punto del cuerpo rígido. $\delta \mathbf{u}_c$ y $\delta \boldsymbol{\phi}$ son la variación de la posición y la rotación del punto de referencia respectivamente. La contribución de la carga externa es entonces:

$$\delta W_{\text{ext}} = \mathbf{F} \cdot \delta \mathbf{u}_c + \mathbf{M} \cdot \delta \boldsymbol{\phi} \quad (5-5)$$

En el programa Abaqus, los cuerpos rígidos pueden ser modelados con elementos de formas arbitrarias, y las caras externas pueden discretizarse en varios parches de superficie, por lo que se puede realizar una evaluación rigurosa de la interfaz geométrica de contacto y de fuerzas con otras partes del modelo (ABAQUS rigid body definition, 2023).

5.3.3. Comportamiento mecánico de las juntas de contacto

El comportamiento mecánico de las juntas de contacto es muy complejo; por lo tanto, se han presentado varios modelos de contacto de superficie rugosa, como la solución de contacto de Hertz, el modelo estadístico de contacto de superficie rugosa, el criterio de rigidez de contacto, entre otros. En estos casos, se suele utilizar el contacto elástico-plástico entre superficies rugosas bajo carga normal y tangencial. Abaqus utiliza el algoritmo de aplicación de restricciones, que busca penetraciones de nodo a cara y de borde a borde en la configuración original, utilizando el método de contacto de penalización (penalty) en cada incremento de

tiempo (ABAQUS Defining general contact interactions in Abaqus/Explicit, 2023). Si el contacto es más discretizado, los resultados son más precisos.

En el método del contacto de penalización, el aumento de la fuerza normal puede obtenerse linealmente de la siguiente manera:

$$\Delta F_n = K_n \Delta u_n A_c \quad (5-6)$$

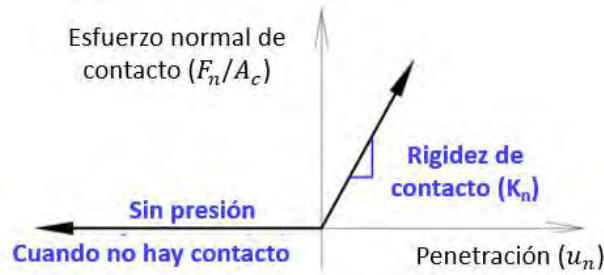


Figura 5-1: Método de penalización no lineal – Rigidez normal de contacto

Donde u_n es el desplazamiento relativo entre dos cuerpos en contacto (penetración entre bloques), K_n es la rigidez normal de contacto o rigidez resorte, y A_c es el área de contacto (Figura 5-1).

En el caso del comportamiento tangencial, el incremento del esfuerzo cortante se puede obtener linealmente de la siguiente manera:

$$\Delta F_t = K_t \Delta u_t A_c \quad (5-7)$$

Donde u_t es el desplazamiento relativo tangencial en el contacto entre dos cuerpos y K_t es la rigidez tangencial de contacto. La máxima fuerza cortante es obtenida con el concepto de Coulomb, en el que el deslizamiento ocurre cuando el esfuerzo máximo friccional posible o esfuerzo tangencial crítico es alcanzado (τ_{crit}):

$$F_{t\ crit} = \tau_{crit} A_c = F_n \tan \varphi = F_n \mu \quad (5-8)$$

Donde φ es el ángulo de fricción del contacto. En este caso $\mu = \tan \varphi$ es el coeficiente de fricción. Cuando esta fuerza de corte crítica es alcanzada en un contacto, se produce el deslizamiento (Quezada et al., 2016; Lemos, 2007; Figura 5-2).

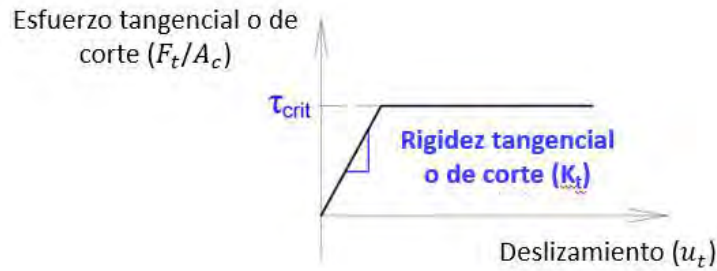


Figura 5-2: Modelo de fricción de Coulomb

En la *Figura 5-3* se muestra un diagrama del comportamiento entre dos bloques, A y B, solo por gravedad y colocados sobre una plataforma inclinada infinitamente rígida, sin capacidad de moverse o girar. La *Figura 5-3a* muestra el instante inicial, en el cual la gravedad todavía no está aplicada en los bloques. En la *Figura 5-3b* se muestra el momento en el que la gravedad ha sido aplicada completamente en los bloques, lo que genera una fuerza normal (f_n) y debido a la rigidez normal usada (K_n), el bloque B penetra en el bloque A un u_n . Por otro lado, ya que los bloques están inclinados, el bloque B trata de deslizarse respecto del bloque A por su peso propio, y en ese momento se genera una fuerza tangencial que evita esto (f_t). Debido a la rigidez tangencial usado (K_t), el bloque B se traslada tangencialmente respecto al bloque A en u_t . Si la fuerza tangencial alcanza el $F_{t\text{crit}}$ mencionado en la ecuación 5-8, el bloque B comienza a deslizarse. Para asegurarse que u_n y u_t sean muy pequeñas y no afecten significativamente los resultados, K_n y K_t deben ser muy grandes. Sin embargo, el tiempo computacional se incrementa demasiado si estas propiedades son extremadamente grandes.

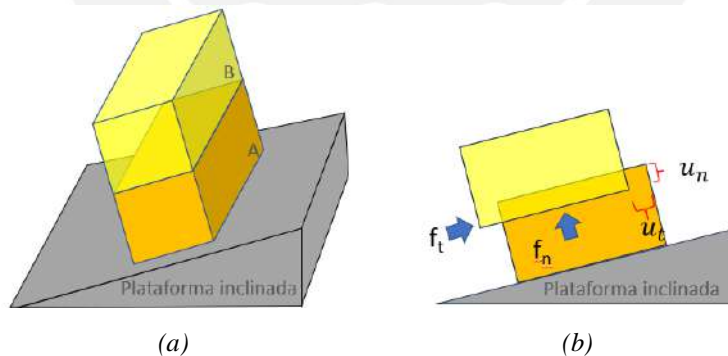


Figura 5-3: Fuerza normal y tangencial entre dos bloques

(a) Antes de aplicarse la gravedad (b) Luego de aplicarse la gravedad

Por último, se puede añadir un amortiguamiento ficticio en el contacto, para así modelar un mecanismo de disipación de energía en dicho contacto, y alcanzar el equilibrio estático en menos tiempo. De esta forma se puede reducir ligeramente el tiempo computacional. En Abaqus, se genera en el contacto una fuerza amortiguadora opuesta al movimiento que cumple la siguiente ecuación:

$$F_d = \mu_0 A_c v_{rel} \quad (5-9)$$

Donde μ_0 es el coeficiente de amortiguamiento, A_c es el área de contacto entre bloques, y v_{rel} es la velocidad relativa entre los bloques de contacto.

5.4. Modelación del suelo por elementos discretos (DEM)

La modelación de los elementos discretos es utilizada en general para predecir el comportamiento de una gran cantidad de partículas discretas. Estas partículas discretas pueden deformarse o comportarse como sólidos rígidos. En Abaqus únicamente se tiene el caso de esferas discretas rígidas, y estas partículas pueden interactuar con elementos finitos y otros cuerpos rígidos. Cada partícula discreta es modelada como un elemento de un solo nodo del tipo PD3D y estos tienen grados de libertad de traslación y rotación (ABAQUS Discrete element method, 2023).

Las leyes de contacto son muy similares al caso anterior, se tiene una rigidez de contacto normal, una rigidez tangencial, una penetración entre bloques, un amortiguamiento de contacto, entre otros. En la *Figura 5-4* se aprecia una representación gráfica de lo que sucede en el contacto entre dos partículas tipo DEM. En este caso C_n y C_t son el amortiguamiento normal y tangencial respectivamente. De igual modo se rigen las ecuaciones del apartado 5.3.2 y 5.3.3.

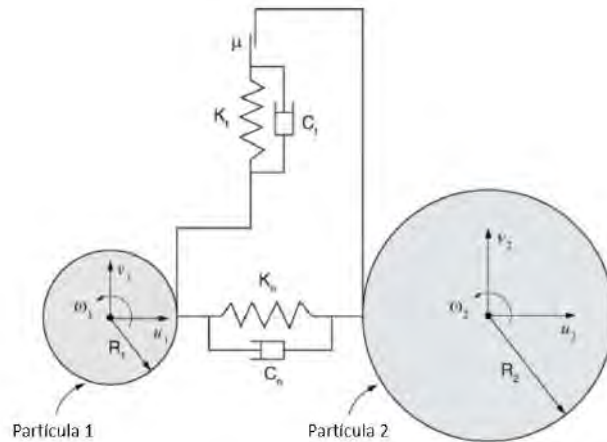


Figura 5-4: Leyes de contacto entre dos partículas

Fuente: ABAQUS Discrete element method, 2023

Como regla general el incremento de tiempo de análisis debe seguir la ecuación 5-10.

$$\Delta t \leq 0.4 \sqrt{m/k} \quad (5-10)$$

Donde m y k son la masa y la rigidez de contacto normal de una partícula. Sin embargo, para tener mejores resultados se puede considerar que $\Delta t \leq 0.1 \sqrt{m/k}$. Lamentablemente en Abaqus aún no está implementada la cohesión, condiciones térmicas y la fricción de rotación entre esferas, como tampoco los esfuerzos internos que podrían generarse en cada partícula. Por otro lado, tampoco está implementado este sistema a la fecha en la interfaz de Abaqus, por lo cual se debe generar las partículas por medio de un archivo INP. En el anexo 5 se muestra un ejemplo de cómo incorporar estas partículas tipo DEM en Abaqus.

5.5. Validación del software

Para verificar los parámetros de rigidez normal y tangencial (ecuaciones 5-6, 5-7 y 5-8), se realizó un modelo simple de 2 bloques rígidos de $10 \times 10 \times 10$ m, los cuales se encuentran uno sobre el otro. Se consideró que los bloques tengan una rigidez normal K_n de 2×10^8 N/m³, un K_t de 1×10^8 N/m³ y un coeficiente de fricción de 0.5. La densidad del bloque superior es de 1000 kg/m³ y el bloque inferior tiene una densidad de cero. Como condición de borde se consideró el bloque inferior empotrado, es decir, no puede trasladarse ni girar; y el bloque superior solo puede trasladarse en el eje X e Y, y no en Z, como tampoco puede girar en ninguna dirección (Figura 5-5b).

La evaluación se realizó en Abaqus/Explicit con un incremento de tiempo de 0.0001 s, y con los siguientes pasos:

- Paso 1 (0 a 2 s): En el primer segundo se aplica la gravedad de manera lineal y luego se mantiene constante hasta 2 s.
- Paso 2 (2 a 5 s): Se aplica una fuerza en el eje X de 14715000 N en el bloque superior de manera lineal de 3 s.

En la Figura 5-5a se muestra un bosquejo de los dos bloques mencionados y en la Figura 5-5b el modelo en Abaqus/Explicit.

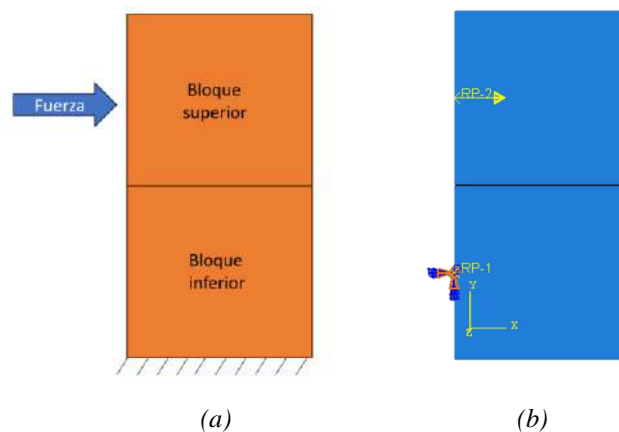


Figura 5-5: Modelo de dos bloques (a) Bosquejo (b) Modelo en Abaqus/Explicit

En primera instancia se calcula el peso total del bloque superior:

$$Peso (N) = 10 \times 10 \times 10 \times 1000 \times 9.81 = 9.81 \times 10^6 N$$

En la *Figura 5-6* se aprecia la gráfica del tiempo vs el peso total de los dos bloques. Como se aprecia el peso es prácticamente igual al calculado. También se aprecia una variación en 2 s, que es justo donde comienza a aplicarse la fuerza. Más adelante se aprecian otras vibraciones que posiblemente sea porque el bloque superior se está separando del bloque inferior.

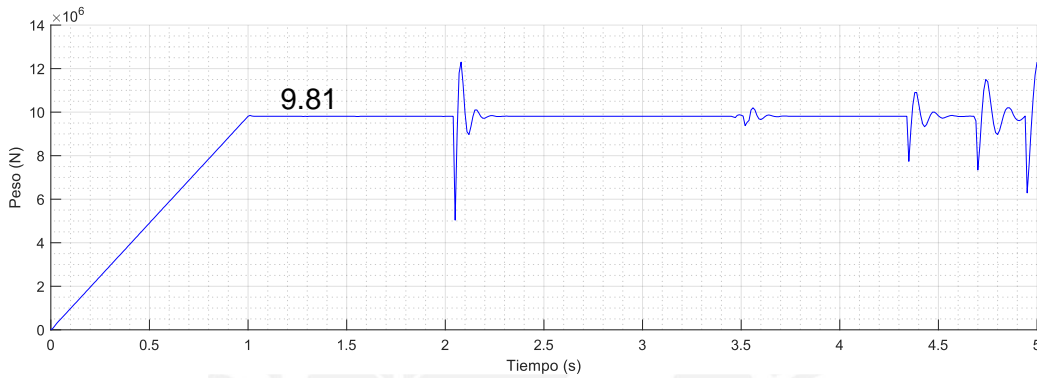


Figura 5-6: Tiempo (s) vs peso (N) de la evaluación de los dos bloques

También se puede calcular la penetración entre los bloques por medio de la ecuación 5-6, en la cual:

$$\Delta F_n = K_n \Delta u_n A_c$$

$$9.81 \times 10^6 N = 2 \times 10^8 \Delta u_n (10 \times 10)$$

$$\Delta u_n = 0.00049 m$$

En la *Figura 5-7* se aprecia el tiempo vs la penetración entre los dos bloques. La penetración del bloque superior al inferior en el instante de gravedad es de 0.00054 m (0.54×10^{-3} m) en el modelo, lo cual es muy similar al calculado manualmente que es de 0.00049 m. Posterior a la gravedad, se aprecia que la penetración entre bloques aumenta debido a que el área de contacto se reduce por la separación entre bloques.

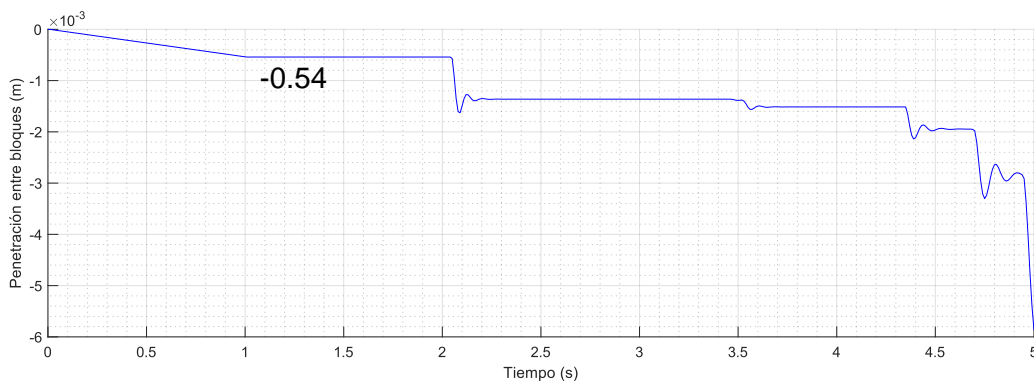


Figura 5-7: Tiempo (s) vs penetración entre bloques (m)

También se puede calcular la fuerza crítica para que se genere el desplazamiento por medio de la ecuación 5-8:

$$F_{t\text{ crit}} = F_n \mu = 9.81 \times 10^6 \text{ N} \times 0.5 = 4.905 \times 10^6 \text{ N}$$

En la *Figura 5-8* se muestra la gráfica de tiempo vs el incremento de la fuerza aplicada en el bloque superior, y en la *Figura 5-9* el tiempo vs el desplazamiento en el eje X del bloque superior. Como se aprecia el bloque superior comienza a moverse a partir del segundo 3. En este punto la fuerza ha llegado a una magnitud de $4.9 \times 10^6 \text{ N}$, el cual es similar al $F_{t\text{ crit}}$ calculado manualmente.

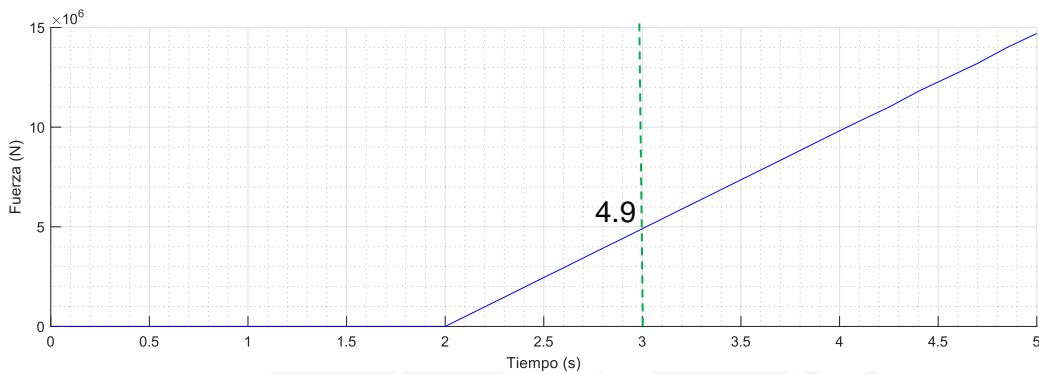


Figura 5-8: Tiempo (s) vs Fuerza externa en X (N)

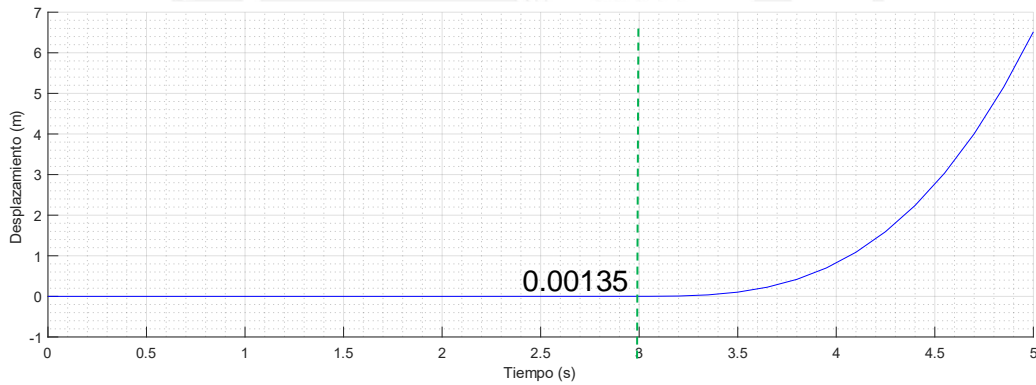


Figura 5-9: Tiempo (s) vs desplazamiento en X del bloque superior (m)

Por otro lado, si evaluamos un instante antes de suceder el movimiento del bloque superior, se puede obtener cuánto se ha desplazado ligeramente el bloque superior por medio de la ecuación 5-7:

$$\Delta F_t = K_t \Delta u_t A_c$$

$$4.905 \times 10^6 \text{ N} = 1 \times 10^7 \Delta u_t (10 \times 10)$$

$$\Delta u_t = 0.0049 \text{ m}$$

Como se aprecia en la *Figura 5-9*, el bloque superior en el instante 3 s, cuando inicia el movimiento, se ha desplazado ligeramente en 0.00135 m y no exactamente 0.0049 m. Esta variación puede darse debido al análisis explícito y además que el área de contacto también se reduce entre los cuerpos, ya que el bloque se ha trasladado ligeramente. A pesar de esto, el valor obtenido en el modelo es menor al valor calculado manualmente, por lo que el modelo es mucho más parecido a la realidad, en la que no existe un desplazamiento tangencial entre bloques debido al K_t .

Por último, en la *Figura 5-10* se muestra el estado de los dos bloques a distinto tiempo de análisis. Como se aprecia el deslizamiento comienza desde el tiempo 3 s.

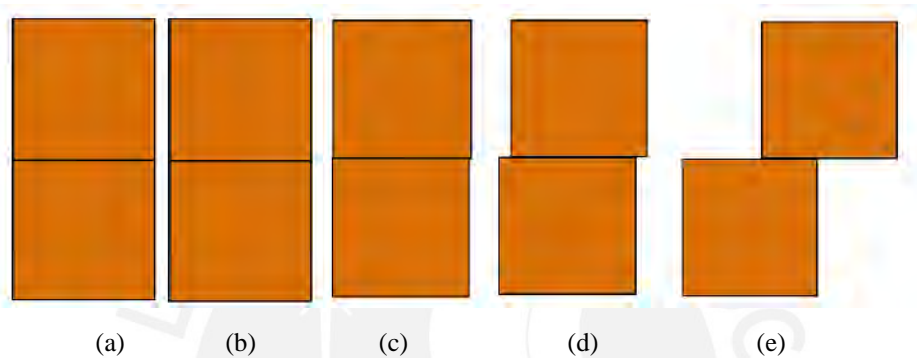


Figura 5-10: Estado de los dos bloques a diferentes tiempos (a) 0 s (b) 3 s (c) 3.5 s (d) 5 s

5.6. Resumen

La mecánica de los sólidos rígidos permite reducir el tiempo computacional debido a la reducción de los grados de libertad de cada elemento. Esto permite evaluar estructuras más complejas y una mayor cantidad de elementos. Por otro lado, modelar un suelo por medio de partículas tipo DEM, permite representar mejor su comportamiento. Como se comentó en el apartado 2.4.1, esto se podría realizar también con elementos finitos; sin embargo, se tendría que construir cada esfera por medio de hexaedros o tetraedros, y la cantidad de nodos en cada esfera sería notable, y así, el tiempo computacional se incrementaría de manera drástica. Una partícula tipo DEM posee únicamente un nodo, por lo que el tiempo computacional se reduce. Para modelar adecuadamente el suelo, estas esferas deberían ser lo más pequeño posible; sin embargo, mientras más esferas se utilicen, el tiempo computacional se incrementa.

Por otro lado, se verifica en el modelo simple de dos bloques la relación entre la densidad y el peso de los bloques, la rigidez normal y la penetración entre bloques, la rigidez tangencial y el desplazamiento cortante, el coeficiente de fricción y la fuerza tangencial crítica. En algunos casos de estos no se logró obtener el valor exacto calculado manualmente, y esto se debe a que Abaqus/Explicit no utiliza la convergencia de los cálculos entre un resultado y el resultado inmediato anterior en una fracción de tiempo.

CAPITULO 6: VERIFICACIÓN DEL ENFOQUE BASADO EN VIBRACIONES

6.1. Generalidades

Como se comentó en el capítulo 1, la dinámica de junta seca es altamente no lineal y esto no permite extraer las propiedades modales de la estructura (Vlachakis et al., 2023). Muchos autores eligen el enfoque basado en vibraciones cuando el análisis modal es complejo o imposible (Murano et al., 2023; Fritsch et al., 2018). Para verificar que el enfoque de vibraciones sea una herramienta adecuada para evaluar estructuras de junta seca, se realiza la evaluación estructural de una sección de un muro de Sacsayhuamán en Abaqus/Explicit.

En primera instancia se detalla más información del complejo arqueológico de Sacsayhuamán y los problemas actuales que afectan a su comportamiento estructural. Luego, se realiza la modelación numérica de una sección de un muro de Sacsayhuamán. Para la calibración del modelo se utilizaron los resultados de los ensayos experimentales realizados por Santa-Cruz et al. (2021). Después de la calibración, se evalúa el comportamiento de la sección del muro de Sacsayhuamán por medio del enfoque basado en vibraciones, con el fin de obtener las frecuencias predominantes de la estructura fuera del plano. Por último, se somete la estructura a diversos registros sísmicos peruanos en la dirección fuera del plano, para conocer el comportamiento de la estructura, y la influencia de sus frecuencias predominantes obtenidas por el método de vibraciones.

6.2. Complejo arqueológico de Sacsayhuamán

Sacsayhuamán es un sitio arqueológico con aparente función ceremonial y/o militar, ubicado en los cerros del extremo norte del Cusco, Perú (coordenadas: -13.508461, -71.981007). Este sitio arqueológico fue construido por la cultura Inca, y la característica más notable son los tres muros continuos paralelos con líneas dentadas que se encuentran sobre plataformas escalonadas (Canziani, 2012). Las piedras utilizadas para construir estas estructuras fueron generalmente de piedra caliza (Cárdenas et al, 2009). En el sitio, cada muro está compuesto por grandes piedras talladas colocadas una encima de otra sin uso de mortero (junta seca). Dado que cumplen la función de muros de contención, no es posible conocer con certeza el número de hojas o capas en esta construcción.



Figura 6-1: Sitio arqueológico de Sacsayhuamán (observe los muros de forma aserrada)

Actualmente, estas construcciones se encuentran en buen estado. Sin embargo, durante la inspección se observaron ligeros asentamientos en algunos muros de Sacsayhuamán. Por otro lado, en 2009 gran parte del muro de la tercera plataforma resultó dañado y el 14 de enero de 2010 un tramo se desplomó fuera de su plano (*Figura 6-2*). Se supone que la causa principal fue la presión lateral del suelo, producto del escurrimiento excesivo debido a las precipitaciones y movimientos sísmicos en el sitio (Alva et al., 2015). Debido a estos problemas, Alva evaluó la frecuencia de vibración del terreno de Sacsayhuamán mediante microtemblores (ruido blanco), obteniendo valores entre 1.75 y 2.86 Hz, y una amplificación de la aceleración de la capa de roca de 1.56 (Alva et al., 2016).



Figura 6-2: Sección colapsada de un muro en Sacsayhuamán

Fuente: Zora-Carvajal, F. (2010)

Asimismo, la región del Cusco se ubica en una zona de fallas corticales activas, generalmente orientadas en NW-SE con un movimiento normal N-S (Barrientos, 2021). Las principales fallas son Coricocha, Tambomachay, Pachatusan y Cusco (*Figura 6-3*). La extensión de las fallas parece deberse generalmente a las fuerzas de gravedad y flotabilidad ejercidas por la gruesa corteza elevada por encima de su profundidad de equilibrio isostático en la Cordillera. Se estima que la magnitud máxima de un sismo que se puede generar en este sitio es de Mw 7,2 (Combey et al., 2022). Sin embargo, la historia ha demostrado que movimientos

más pequeños tuvieron grandes consecuencias humanas y materiales, como los movimientos telúricos ocurridos en 1650, 1744 y 1950 (este último de magnitud Ms 6.8). Lamentablemente estos movimientos sísmicos no fueron registrados, ya que el primer acelerógrafo en el Perú fue instalado en el año 1944 y el segundo en 1972, en Lima, Perú, (Knudson y Perez, 1977); por lo que se desconoce cómo se comportó el terreno y las estructuras Inca durante esos años. Además, según las crónicas coloniales, se cree que entre 1438 y 1463 se produjo un terremoto de importante magnitud que pudo dañar varias estructuras incas; sin embargo, es sólo una hipótesis que todavía sigue en estudio (Combey et al., 2020). Cuadra (2021) menciona que para un periodo de retorno de 100 años con 10% de probabilidad de excedencia, es posible que se tenga una Aceleración Máxima del Terreno (PGA) de 0.25g para la región andina.



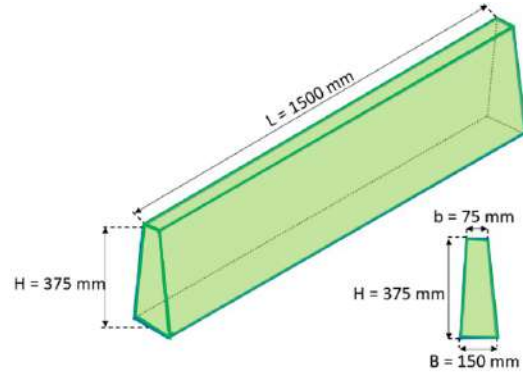
Figura 6-3: Fallas activas de Coricocha, Pachatusan, Tambomachay y Cusco (Barrientos, 2021)

6.3. Modelación, evaluación y calibración de las propiedades de un estructura de junta seca

Santa-Cruz et al. (2021) construyeron muros de bloques de piedra irregulares a escala reducida. Se construyeron en total tres muros con piedras irregulares y de junta seca. Las piedras usadas para estos ensayos eran esquistos y calizas. Cada muro era armado y ensayado por volteo, para luego armar el siguiente muro (Figura 6-4a). Los tres muros eran iguales, ya que cada uno fue armado con los mismos sillares ubicados en la misma posición que el muro anterior. Las piedras tenían unas dimensiones de aproximadamente de $100 \times 50 \times 150$ mm. El peso de cada muro era de unos 1371 N, con una longitud de 1500 mm y una altura de 375 mm. Los muros se ensayaron mediante rotación a través de una estructura de madera (Figura 6-4a). Como condición de borde la primera fila de bloques de cada ensayo no podía moverse o girar. Las dimensiones de los muros elaborados se muestran en la Figura 6-4b. Los muros colapsaron en un ángulo promedio de 14.33° con una desviación estándar de 0.76.



(a)

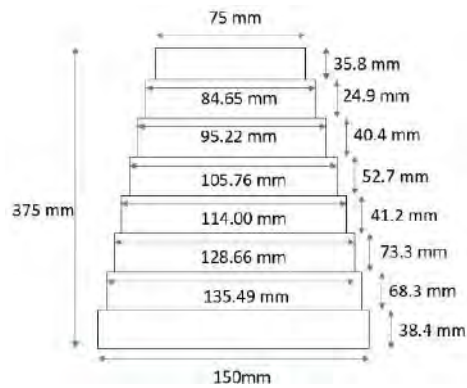


(b)

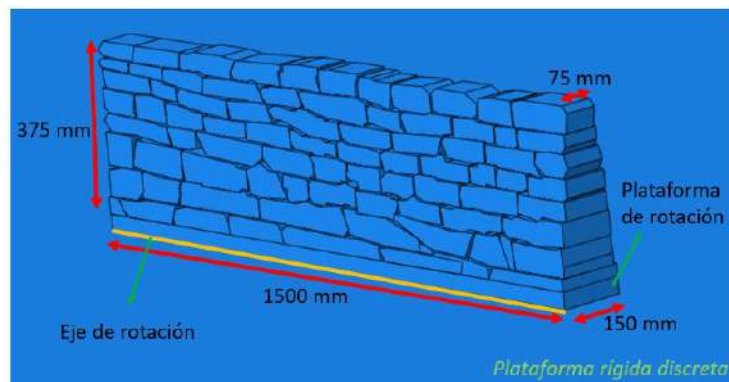
Figura 6-4: Santa Cruz et al. (2021) (a) Vista del muro ensayado (b) Dimensiones del muro

Para el modelado numérico se utilizó Abaqus/Explicit. La geometría de los bloques se aproximó mediante fotografías tomadas desde la parte frontal del muro. Para crear los bloques 3D, primero se dibujó la cara frontal en AutoCAD y cada bloque se extruyó al grosor deseado. Luego, los bloques 3D fueron exportados al programa Abaqus en formato SAT. Como se puede observar en la *Figura 6-4b*, el muro no tenía una sección transversal constante, por lo que el espesor del muro se estimó a partir de estas dimensiones (*Figura 6-5a*). Las dimensiones de las *Figura 6-5a* y *Figura 6-5b* son las utilizadas para la sección del modelo en Abaqus. Los sillares fueron considerados como cuerpos rígidos, y el mallado del tipo hexaedro C3D8R. En el modelo cada bloque tiene al menos tres hexaedros en cada cara.

El modelo incluyó una plataforma de rotación para simular la plataforma de madera, que gira desde un eje de rotación (*Figura 6-5b*). El muro y la plataforma rígida giratoria se colocaron sobre una plataforma rígida discreta que simula el suelo. La condición de borde es que la primera fila de bloques está empotrada a la plataforma giratoria. Esta condición de borde es idéntica a la utilizada por los autores en la prueba experimental. La densidad de ambas plataformas se consideró despreciable.



(a)



(b)

Figura 6-5: Modelo en Abaqus/Explicit (a) Sección transversal del muro (b) Vista 3D del muro

El modelo fue calibrado mediante un estudio paramétrico para encontrar las mejores propiedades de contacto que permitan una buena simulación del peso de la estructura y el ángulo de colapso, de los muros reales con el modelo numérico. Las propiedades de los bloques y de contacto obtenidos por Santa-Cruz et al. (2021) se utilizaron para iniciar la calibración con unidades prismáticas idénticas. Sin embargo, dado que el modelo evaluado por estos autores es analizado por DEM y con esferas agrupadas, las propiedades del modelo utilizado para este análisis son ligeramente diferentes, como se muestra en la *Tabla 6-1*.

Tabla 6-1 Propiedades físicas y mecánicas de los bloques y las juntas

	Propiedad	Símbolo	Calibración DEM (Santa Cruz et al., 2021)	Calibración FEM (propia)
Bloques	Densidad	ρ	2400 kg/m ³	2300 kg/m ³
Contacto	Rigidez Normal	K_n	5×10^7 N/m ³	2×10^8 N/m ³
	Rigidez Tangencial	K_t	2.5×10^7 N/m ³	1×10^8 N/m ³
	Coefficiente de fricción	$\mu = \tan \varphi$	0.7	0.4
	Coef. De amortiguamiento	μ_0	0.8	0.8

Las condiciones de borde fueron las siguientes:

- La plataforma rígida discreta no se traslada ni gira en ninguna dirección.
- Los sillares en contacto con la plataforma giratoria están empotrados a esta.
- La plataforma giratoria no puede moverse, solo puede girar a lo largo del eje de rotación que se muestra en la *Figura 6-5b*.

El paso de tiempo utilizado en este análisis explícito fue 1×10^{-4} s y se consideraron los siguientes pasos:

- Paso 1: En el primer segundo, la gravedad se aplicó linealmente y permaneció constante hasta 2 s.
- Paso 2: La plataforma giratoria comienza a girar a una velocidad de 1°/s hasta que la plataforma se inclina 10° (10 s). La velocidad en este paso es rápida para reducir el tiempo computacional.
- Paso 3: La plataforma giratoria rota a 0.2°/s. Esta rotación es más lenta para evaluar con más detalle el comportamiento de la estructura. Este proceso se lleva a cabo hasta el colapso de la estructura.

El tiempo de cálculo para este análisis fue de 65 minutos. El equipo que se utilizó para este análisis y para todos los siguientes es del Grupo de Mecánica Computacional de la Universidad Politécnica de Madrid. El computador es de 6 procesadores principales y 12 procesadores lógicos INTEL® Xe®(R) CPU E5-2643 v4 @ 3.40.GHz con 32 GB de memoria RAM y sistema operativo Windows 11.

La *Figura 6-6* muestra el comportamiento del muro en diferentes momentos y grados de inclinación. En la *Figura 6-6a*, el muro se encuentra en el instante inicial. En la *Figura 6-6b*, el muro ha girado 10° en 12 s. En la *Figura 6-6c*, se ve el muro con una inclinación de 13.6°, y se observa que aún mantiene su forma. En la

Figura 6-6d, con una inclinación de 14.3° , varios bloques superiores se desprenden de la estructura. En la Figura 6-6e, varios bloques comienzan a caer en un ángulo de 14.36° . Finalmente, la Figura 6-6f muestra lo que queda del muro después del colapso.

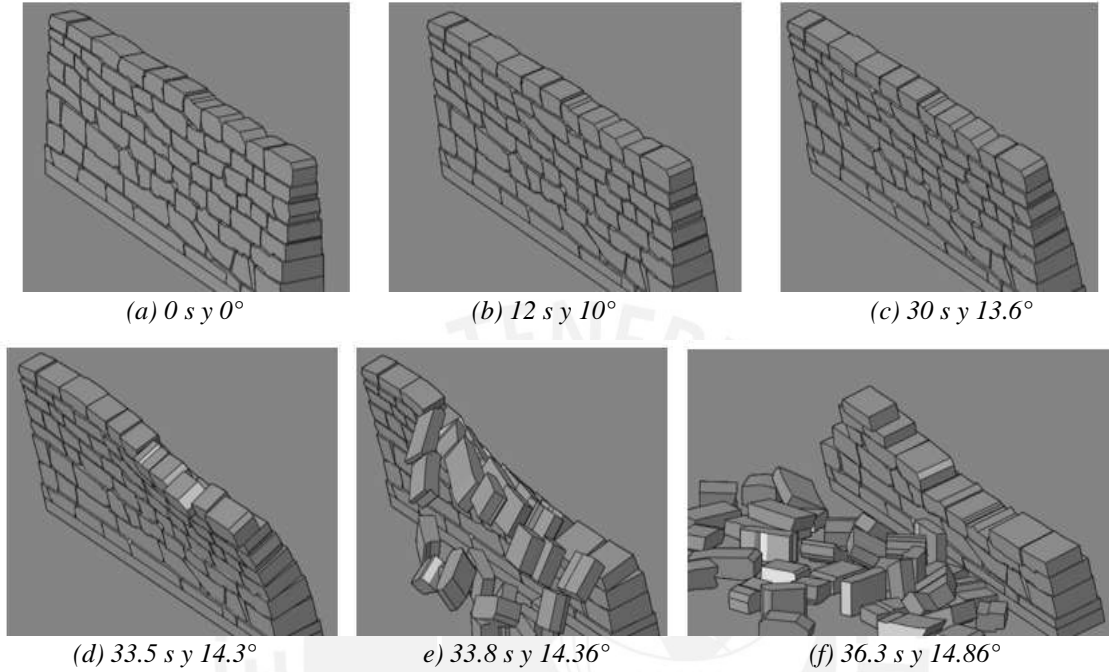


Figura 6-6: Estado del muro a diferentes tiempos y grados de inclinación

La Figura 6-7 muestra la reacción vertical sobre la plataforma giratoria en diferentes instantes de tiempo. Como se puede observar, el peso total de la estructura es de 1373.15 N, que es muy cercano de los 1371 N que es el peso real del muro. Por otro lado, la reacción vertical cae bruscamente en 33.5 s, lo que corresponde a una rotación de 14.3° . Como se muestra en la Figura 6-6d, es precisamente en este momento que los bloques superiores comienzan a separarse del muro. A partir de este punto, la estructura colapsa en el modelo, y este ángulo de 14.3° es muy similar al ángulo del colapso experimental de 14.33° . La Figura 6-8 muestra la comparación de los mecanismos de colapso de la prueba experimental y el modelo numérico, los cuales son muy similares.

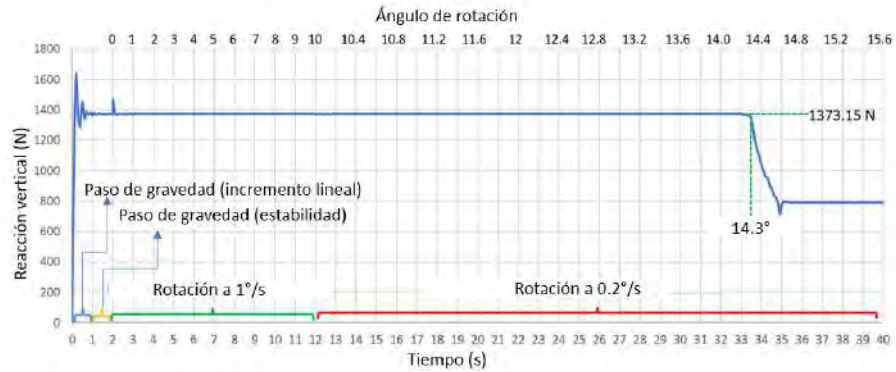


Figura 6-7: Tiempo versus reacción vertical en la base



Figura 6-8: Colapso del muro a 14.3° de inclinación (a) Caso experimental (b) Modelo Numérico

6.4. Aplicación a un muro del sitio arqueológico de Sacsayhuamán

6.4.1. Modelación numérica FEM

La Figura 6-9a muestra los baluartes de Sacsayhuamán, la Figura 6-9b la sección del muro de Sacsayhuamán a estudiar (círculo rojo en la Figura 6-9a), y la Figura 6-9c la sección modelada en Abaqus con 40 sillares numerados y 4 puntos de estudio en la parte superior. Los puntos A, B, C y D corresponden a los bloques 35, 38, 39 y 40, respectivamente. La malla de los sillares fue del tipo hexaedro C3D8R, y se buscó que cada cara de cada sillar tuviera al menos tres hexaedros. También se considera una plataforma sobre la que se apoya el muro, de peso despreciable y rigidez infinita. El muro evaluado tiene una longitud de 8.64 m y una altura variable. Para el modelado numérico, los bloques del muro se dibujaron en AutoCAD de acuerdo con la geometría de la cara frontal del muro (Figura 6-9b), y se consideró que cada bloque tenga un espesor de 0.8m. Finalmente, este dibujo fue exportado al programa Abaqus. Tener en cuenta que en la realidad el espesor de cada bloque no es necesariamente constante sino variable. Sin embargo, hasta la fecha, la geometría interna de las capas de estos muros es incierta, por lo que en este estudio solo se evaluó la capa externa del muro. Por otro lado, Ttito (2018) realizó algunas mediciones del grosor de la parte superior de algunos muros, obteniendo valores entre 0.55 a 0.60 m; sin embargo, en la visita de campo realizada al lugar se verificó que otros muros tenían un grosor de 0.80 m en la parte superior. Por eso en este capítulo se

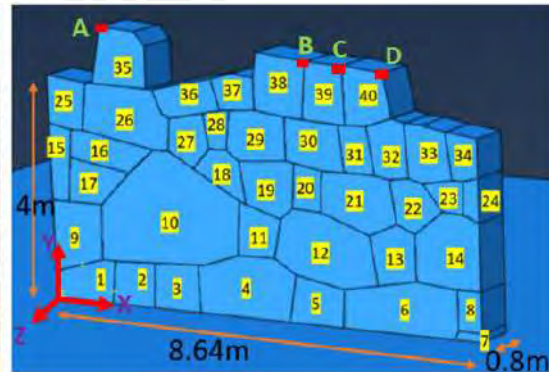
consideró que estos muros tengan un espesor de 0.8 m; sin embargo, se desconoce el espesor exacto de los muros de Sacsayhuamán, y lo más probable es que sean de mayor grosor en la base.



(a)



(b)



(c)

Figura 6-9: Estructura de Sacsayhuamán modelada
(a) Vista global (b) Vista del muro a evaluar (c) Modelo numérico

Para este modelo se utilizaron las propiedades físicas y mecánicas obtenidas en el modelo de calibración (apartado 6.3). Las condiciones de borde para este caso fueron las siguientes:

- La plataforma rígida no puede moverse ni girar durante el paso de gravedad. En los pasos de movimiento, la plataforma solo puede moverse en el eje perpendicular al muro.
- Dado que el muro se apoya directamente sobre la plataforma rígida (Figura 6-9c), se considera que cada bloque en contacto con la plataforma rígida está empotrado en ella (de los bloques 1 al 7 en la Figura 6-9c). Además, todo bloque en los extremos laterales del muro que no esté en contacto con la plataforma solo puede moverse verticalmente y en el eje perpendicular al muro, y solo puede girar en el eje X (bloques 9, 15, 25, 8, 14, 24, 34).

6.4.2. Enfoque basado en vibraciones

Para conocer las frecuencias predominantes del muro en el eje perpendicular a su plano, se realizó el movimiento de la base en el eje Z, según un registro de ruido blanco con un desplazamiento máximo menor a 1 mm y una frecuencia de muestreo de 1000 Hz (Figura 6-10a). La Figura 6-10b muestra el espectro de Fourier de esta señal, y las frecuencias predominantes van de 0 a 20 Hz.

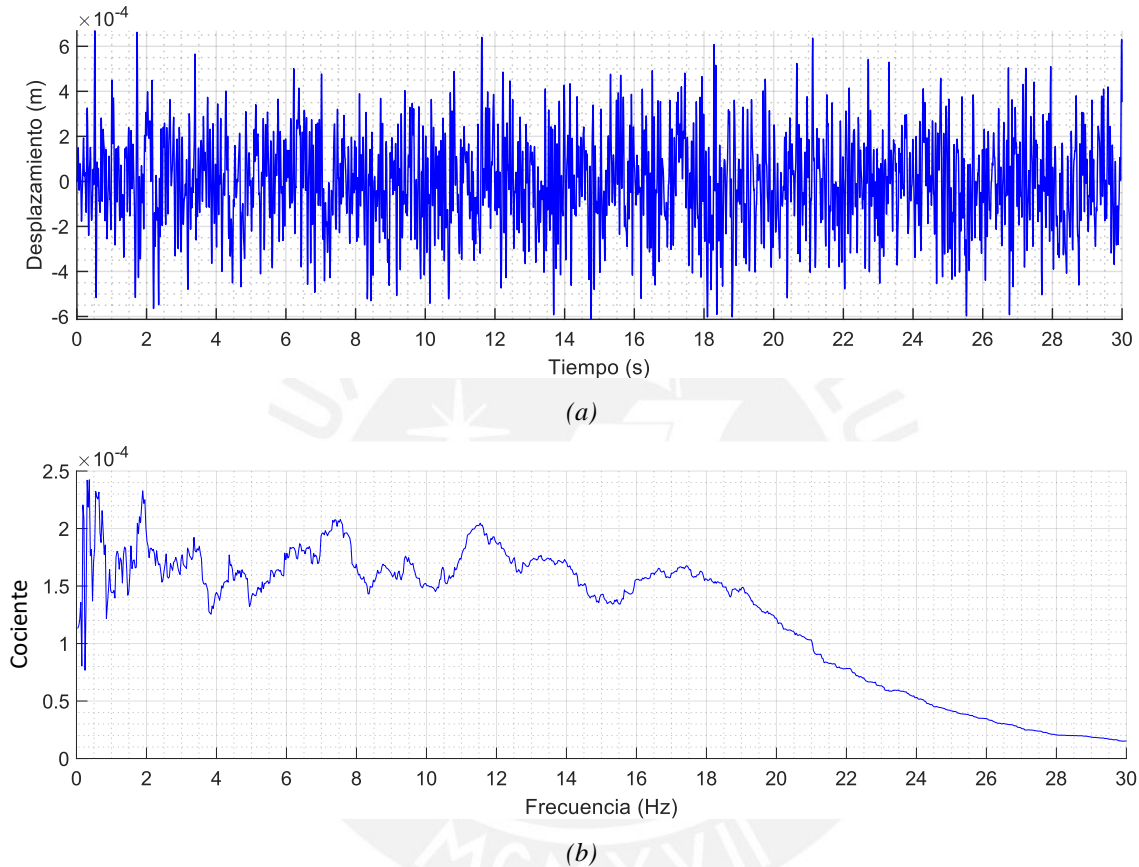


Figura 6-10: Ruido blanco (a) Señal del ruido blanco (b) Espectro de Fourier

El análisis se realizó mediante Abaqus/Explicit, con un paso de tiempo de 1×10^{-4} s. Para cada evaluación se consideraron los siguientes pasos:

- Gravedad (2 s): Se aplicó en 2 s, con un incremento lineal en 1 s y se mantuvo constante hasta 2 s.
- Ruido blanco (30 s): La plataforma se desplaza perpendicular al plano del muro, según el registro del ruido blanco.

El tiempo de cálculo para este análisis fue de 6 h y 48 min.

Luego del análisis, se evaluó el registro tiempo historia del desplazamiento en la base y los puntos A, B, C y D en el eje Z. Posteriormente, se obtuvo el espectro de Fourier de cada registro de desplazamiento. Luego, se

obtuvo el cociente espectral de los espectros de Fourier de los puntos A, B, C y D con el espectro de la base, para determinar las frecuencias predominantes del muro en el eje Z. La *Figura 6-11* muestra el cociente espectral de cada punto con respecto a la base y las frecuencias predominantes de este análisis. Como se puede observar, en los 4 puntos evaluados las frecuencias pico son similares, y son las siguientes: 0.488, 0.976, 1.464, 4.638, 9.520, 10.254, 13.428 y 14.893 Hz.

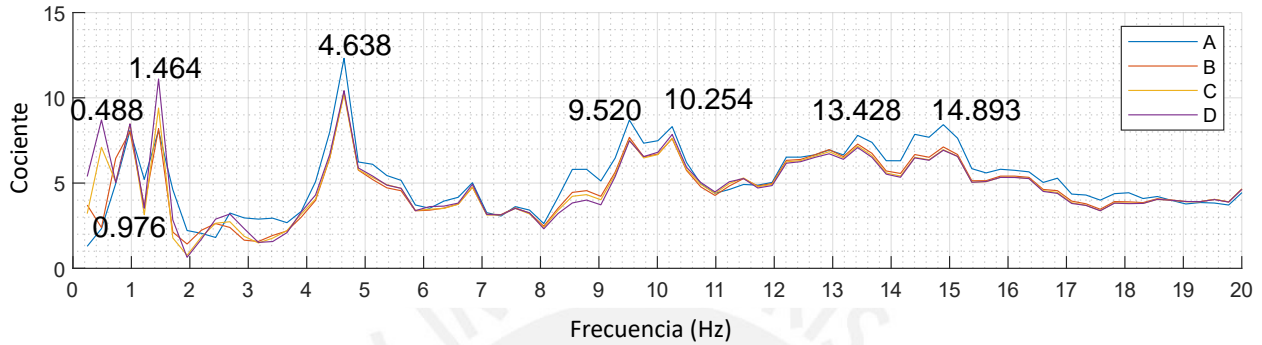


Figura 6-11: Cociente espectral de los puntos A, B, C y D

Dado que en la evaluación anterior se obtuvieron varias frecuencias predominantes, la estructura fue sometida en Abaqus a movimientos sinusoidales en el eje Z de la base, para conocer su comportamiento a diferentes frecuencias. El movimiento de la base en el tiempo fue el siguiente:

$$\text{Desplazamiento}(t) = 0.5/(\omega_n^2) \sin(\omega_n t) \quad (6.1)$$

Donde ω_n es la frecuencia angular, y si realizamos la segunda derivada de la ecuación anterior se obtiene que la aceleración es de $0.5 \sin(\omega_n t)$, con una aceleración máxima de 0.5 m/s^2 . Se utilizó esta aceleración máxima, ya que con esta se lograba tener una fuerza de fricción máxima en diversos contactos de la estructura, sin llegar al colapso parcial o total de la estructura para cualquier ω_n . La frecuencia del sistema se obtiene de la siguiente manera:

$$\text{Frecuencia} = \omega_n / (2\pi) \quad (6.2)$$

Se utilizó una señal de desplazamiento para el movimiento sinusoidal, ya que de este modo se obliga al comportamiento fuera del plano de la base en desplazamiento, velocidad y aceleración, a tener una magnitud igual a cero en el inicio de cada ciclo de movimiento.

La base del sistema fue sometida a diversos movimientos sinusoidales con frecuencias que oscilaban entre 0.1 y 20 Hz. En todos estos casos, la aceleración máxima fue de 0.5 m/s^2 . El análisis fue nuevamente en Abaqus/Explicit, con un paso de tiempo de $1 \times 10^{-4} \text{ s}$. Para cada evaluación se consideraron los siguientes pasos:

- Gravedad (2 s): Se aplicó en 2 s, con un incremento de 1 s y se mantuvo constante hasta los 2 s.

- Movimiento sinusoidal (10 s): La plataforma se mueve según el desplazamiento sinusoidal configurado.

La *Figura 6-12* muestra el comportamiento del desplazamiento relativo del bloque A respecto a la base en diferentes frecuencias de la señal en la base. Como se muestra en la *Figura 6-12*, las frecuencias que generan los desplazamientos relativos más significativos son los movimientos sinusoidales con frecuencias de 0.9 y 1,Hz, siendo la frecuencia de 0.9 Hz la que produce los desplazamientos relativos más significativos. Esta evaluación también se evaluó en los bloques B, C y D, y también se encontró la respuesta de los picos máximos del movimiento relativo a la base para frecuencias de 0.9 y 1 Hz. El tiempo de cómputo para este análisis fue de 48 minutos para cada frecuencia evaluada.

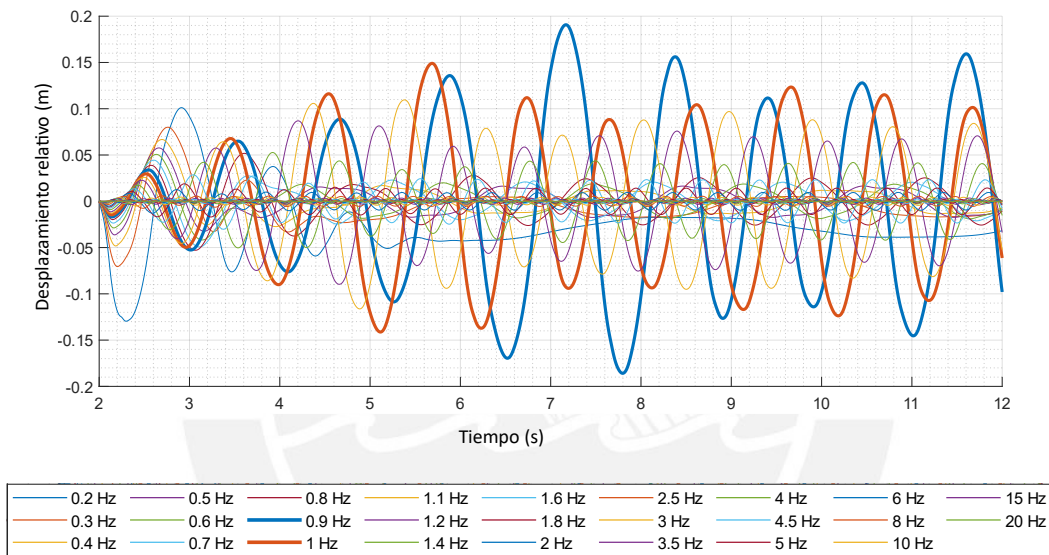


Figura 6-12: Desplazamiento relativo del bloque A respecto a la base, para diferentes movimientos sinusoidales

Por otro lado, la estructura también fue evaluada con desplazamientos sinusoidales en las frecuencias obtenidas mediante el análisis de ruido blanco (*Figura 6-11*). La *Figura 6-13* muestra el desplazamiento relativo del bloque A respecto de la base durante movimientos sinusoidales con las frecuencias obtenidas con el ruido blanco. Como se puede observar, el desplazamiento sinusoidal con una frecuencia de 0.976 Hz es el que produce el mayor desplazamiento relativo del bloque A. Lo mismo ocurre con los desplazamientos relativos respecto de la base de los bloques B, C y D. Por este motivo se puede concluir que la frecuencia dominante fuera del plano de esta estructura evaluada es de aproximadamente 0.976 Hz.

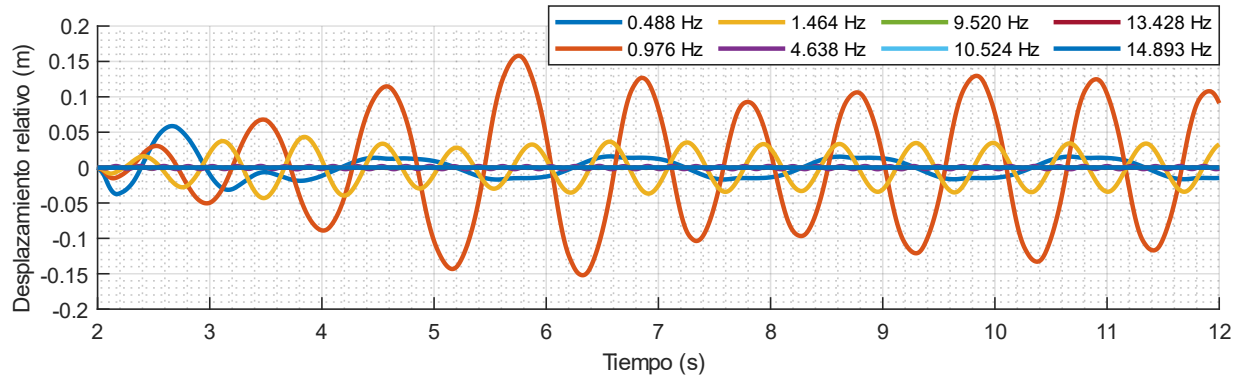


Figura 6-13: Desplazamiento relativo del bloque A respecto a la base, para frecuencias obtenidas con el ruido blanco

A partir de estos resultados, se evaluó el comportamiento de la estructura para un movimiento sinusoidal con una frecuencia de 0.976 Hz escalada a aceleraciones pico de aceleración (PGA) en la base de 0.1g a 0.9g. La Figura 6-14 muestra el estado de la estructura luego del movimiento sinusoidal con una frecuencia de 0.976 Hz y un PGA diferente. Cuando el PGA es de 0.1g o 0.2g, se observan desplazamientos permanentes o residuales en el bloque 35 (Figura 6-14a y Figura 6-14b). Cuando el PGA es de 0.3g, se observan desplazamientos permanentes en los bloques 35, 38, 39 y 40 (Figura 6-14c). Cuando el PGA es de 0.4g, se observa el colapso de los bloques 35, 38, 39 y 40 (Figura 6-14d), y así sucesivamente, hasta que el muro colapsa por completo con un PGA de 0.9g (Figura 6-14g).

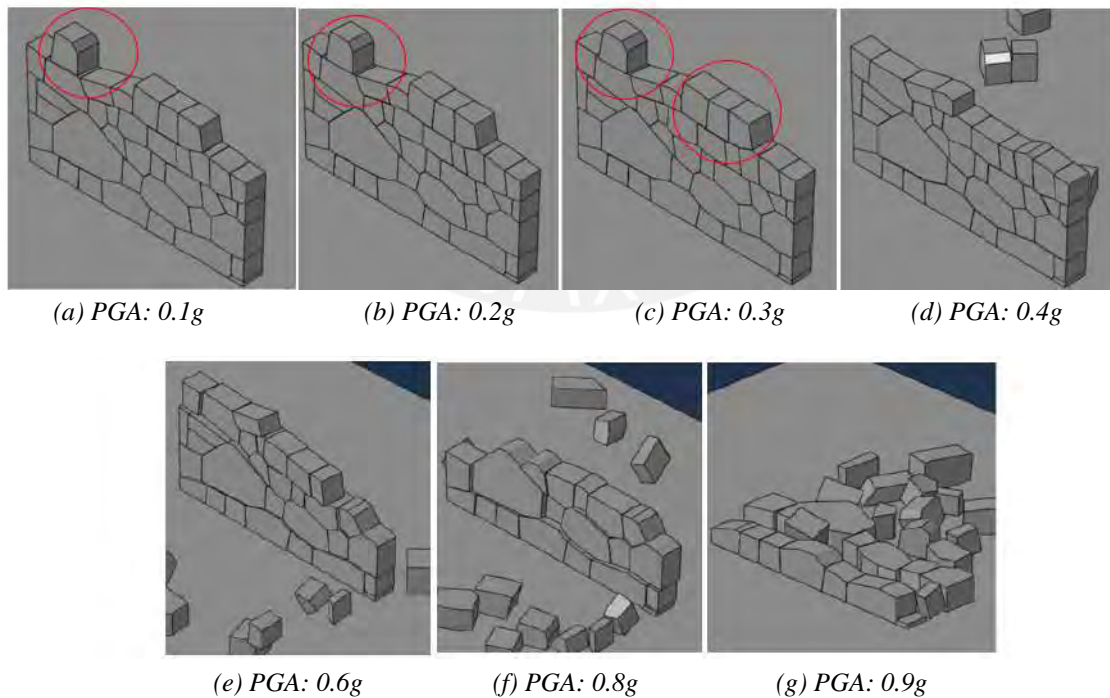


Figura 6-14: Estado final de la estructura después del movimiento sinusoidal en la base con una frecuencia de 0.976 Hz, a diferentes PGA

6.4.3. Evaluación para diferentes registros sísmicos peruanos

Se evaluó el comportamiento de la estructura por medio de tres registros sísmicos colocados en la base fuera del plano del muro: dos registros sísmicos originados en las fallas tectónicas del Cusco y el registro del sismo más grande registrado en el Perú (sismo de Áncash, 1970). Tener en cuenta que este último no fue generado por una falla intraplaca sino por un proceso de subducción entre placas a lo largo de la costa del Perú (Beck y Ruff, 1989). Los registros sísmicos y sus características se muestran en la *Tabla 6-2*.

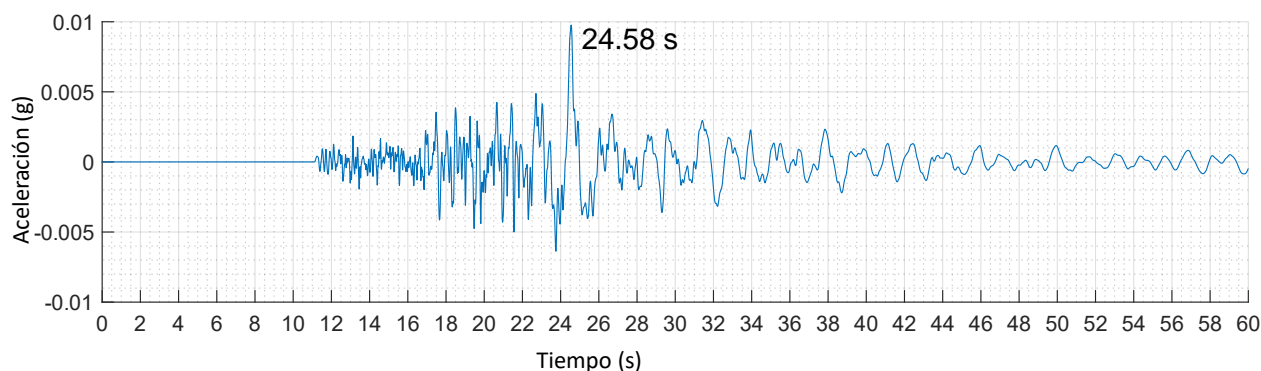
Tabla 6-2: Detalles de los registros sísmicos utilizados

Sismo	Fecha	Magnitud	PGA	Profundidad (km)	Estación sísmica	Material donde está construida la estación
Paruro, Cusco (Alva y Ortiz, 2014)	Setiembre 27, 2014	5.1 MI	0.01g	6	Tambomachay, Cusco	Roca
Cusco (IGP, 2023)	Febrero 18, 2023	3.8	0.054g	14	Wanchaq, Cusco	Grava arcillosa
Ancash (UNI, 1970)	Mayo 31, 1970	6.6 Mb	0.1g	1	Parque de la Reserva, Lima	Roca aluvial

El análisis fue nuevamente en Abaqus/Explicit, con un paso de tiempo de 1×10^{-4} s. Para cada evaluación se consideraron los siguientes pasos:

- Gravedad (2 s): Se aplicó con un incremento lineal de 1 s y se mantuvo constante hasta los 2 s.
- Acción dinámica (el tiempo depende del registro sísmico): La plataforma se mueve según el registro sísmico colocado.

La *Figura 6-15a* muestra el registro sísmico del terremoto de Paruro (solo se utilizaron los primeros 60 s del registro sísmico), y la *Figura 6-15b* muestra el espectro de Fourier de la señal sísmica. Como se puede observar, las frecuencias predominantes del sismo están entre 0,46 Hz y aproximadamente 1 Hz. En este caso la frecuencia dominante del muro de 0.976 Hz se encuentra entre las frecuencias predominantes del registro sísmico.



(a)

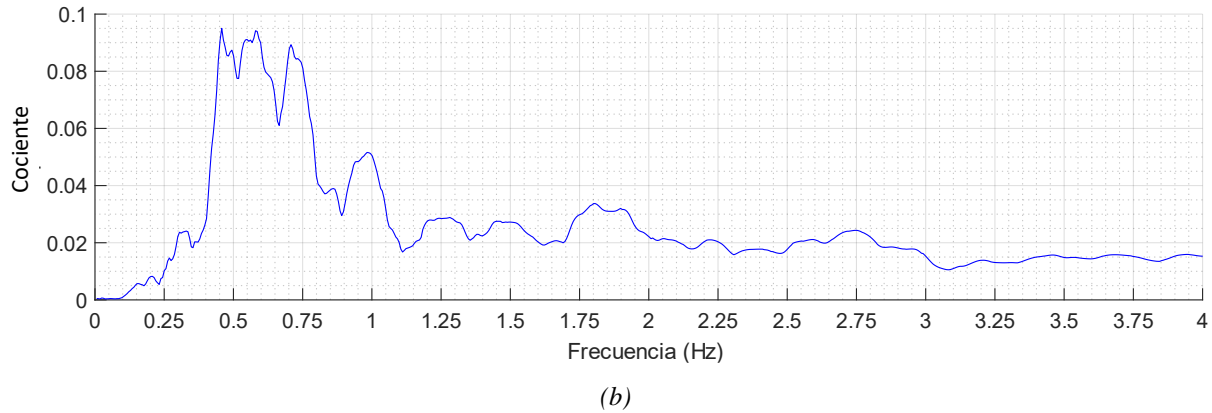


Figura 6-15: Sismo de Paruro, Cusco, 2014 (a) Registro sísmico (b) Espectro de Fourier

Se evaluó el comportamiento estructural de esta construcción, pero con el sismo escalado a un PGA diferente. El tiempo de cómputo para cada análisis fue de 1 h para cada evaluación. La Figura 6-16 muestra el estado de la estructura luego del registro sísmico con diversos PGA. A primera vista, la estructura no sufre ningún daño debido a este registro sísmico escalado a un PGA de 0.3g (Figura 6-16d). Sin embargo, con un PGA de 0.4g, el sistema colapsa violentamente al volcarse (Figura 6-16e). Como se muestra en la Figura 6-15a, en el registro sísmico existe un movimiento máximo a los 24.58 s, el cual coincide con el colapso por volteo de la estructura. Algo importante a destacar es que el sistema colapsa sólo con un PGA de 0.4g; sin embargo, en el caso de los siguientes sismos se verifica que esta estructura soporta mayor PGA sin daños importantes.

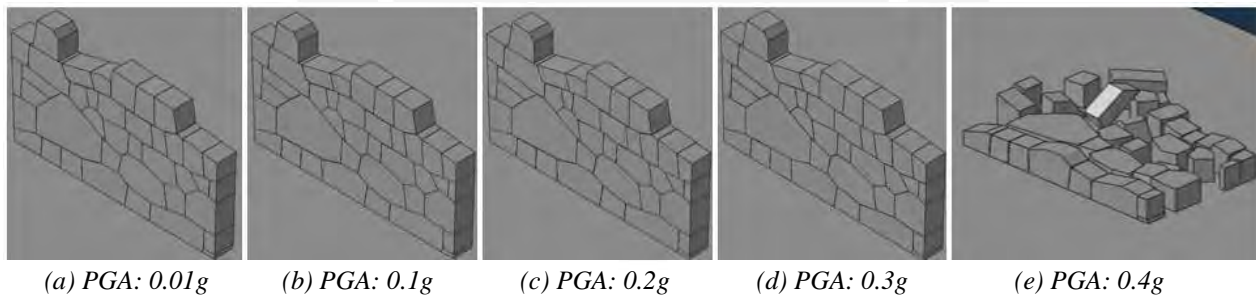


Figura 6-16: Estados de la estructura después del registro sísmico de Paruro escalado a diferentes PGA

La Figura 6-17 muestra el comportamiento del desplazamiento relativo del punto A respecto de la base debido al registro sísmico en diferentes PGA. Para esta figura se eliminaron los 2 s de gravedad inicial para ajustar la señal al registro sísmico. Como se aprecia, los movimientos masivos se generan a 24.58 s, generados por la aceleración pico en el registro sísmico. Se puede inferir que este movimiento brusco es la causa del colapso de la estructura para el registro sísmico escalado a un PGA de 0.4g. También se ve aprecia para un PGA de 0.3g, el desplazamiento relativo máximo es de 0.9 m.

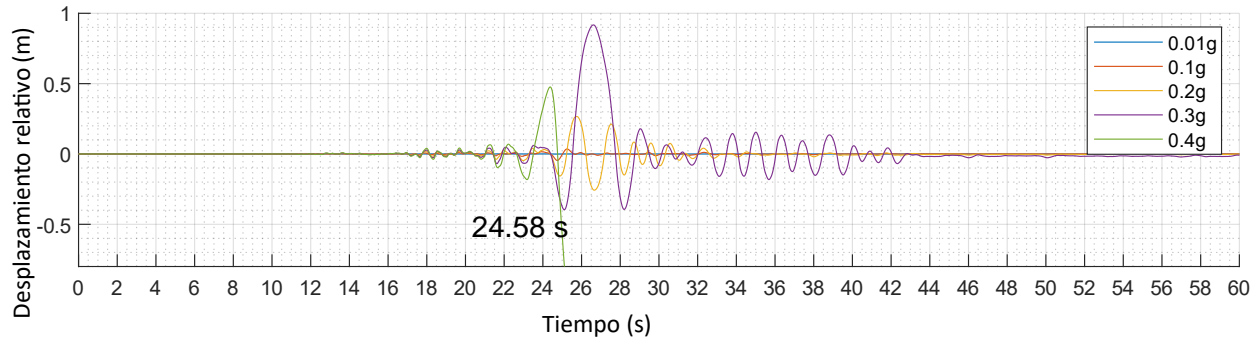


Figura 6-17: Desplazamientos relativos del punto A respecto a la base debido al sismo de Paruro con diferentes PGA

La Figura 6-18a muestra el registro sísmico del terremoto del 18 de febrero de 2023 en Cusco, y la Figura 6-18b el espectro de Fourier de la señal sísmica. Como se puede observar, las frecuencias predominantes son de 1.5 Hz a más. En este caso, la frecuencia dominante del muro de 0.976 Hz no se encuentra entre las frecuencias predominantes del registro sísmico, por lo que se espera un daño leve en la estructura. Por otro lado, en la señal sísmica se puede observar la zona de llegada de las ondas longitudinales (inicia a los 3.97 s) y de las ondas transversales (inicia a los 5.36 segundos).

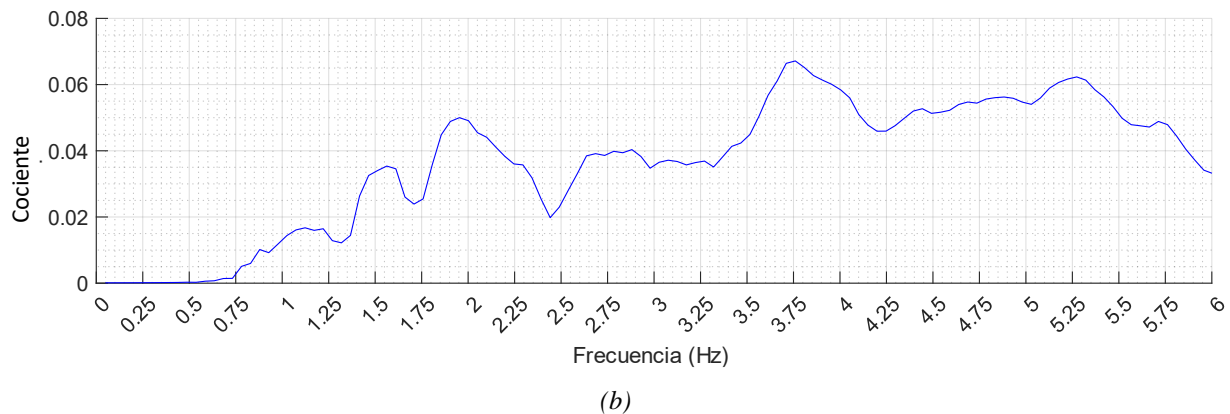
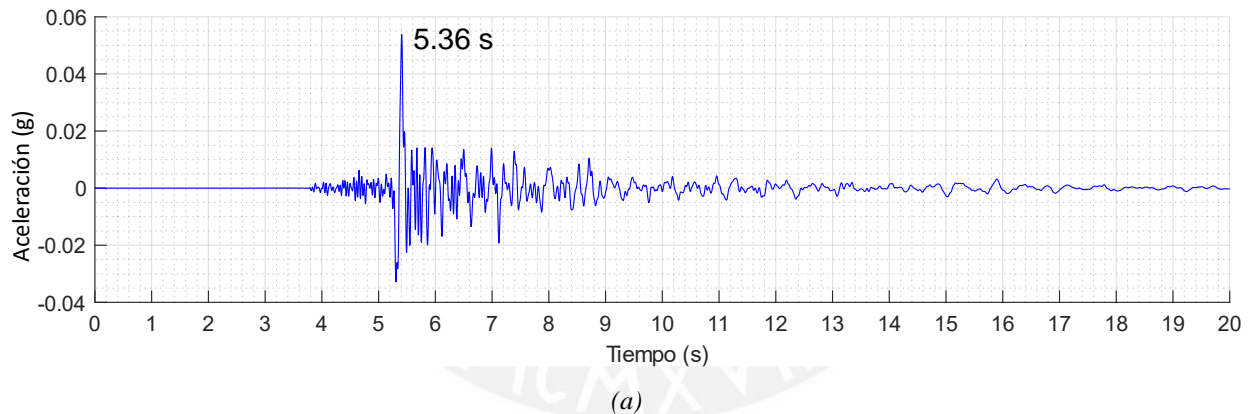


Figura 6-18: Sismo de Cusco, 2023 (a) Registro sísmico (b) Espectro de Fourier

Dado que el PGA de este terremoto es de 0.054g, el comportamiento estructural de esta construcción se evaluó frente a este registro escalado a un PGA diferente. El tiempo de cálculo para cada análisis fue de 37 minutos. La *Figura 6-19* muestra el estado de la estructura luego del registro sísmico con diferentes PGA. Aproximadamente hasta un PGA de 0.4g, la estructura no sufre ningún daño notable, y sólo a un PGA de 0.5g aparecen desplazamientos relativos en diferentes bloques (*Figura 6-19c*). Ningún bloque del sistema colapsa en registros sísmicos con un PGA elevado de 1g y 2.5g. A pesar de estos fuertes movimientos, la estructura no colapsa. Como se mencionó anteriormente, este registro sísmico tuvo frecuencias predominantes muy altas, alejadas de la frecuencia dominante fuera del plano del muro, por lo que no afectó directamente la estructura.

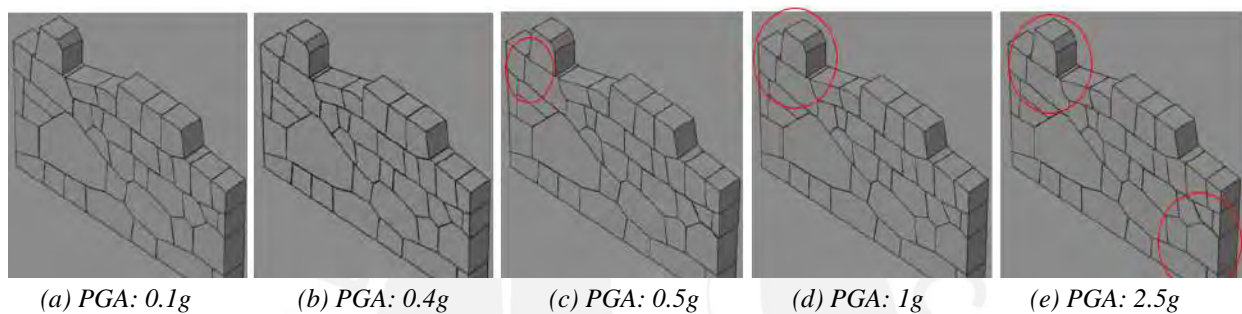


Figura 6-19: Estados de la estructura después del registro sísmico de Cusco, 2023 escalado a diferentes PGA

La *Figura 6-20* muestra el comportamiento del desplazamiento relativo del punto A respecto de la base, frente al registro sísmico con un PGA de 0.1g a 0.5g. Para esta figura se eliminaron los 2 s de gravedad inicial para ajustar la señal al registro sísmico. Sólo se evaluaron estos PGA porque el desplazamiento relativo era muy alto para los PGA más grandes. Como se puede observar en esta figura, se generan grandes movimientos a los 5,36 s que concuerda con el pico de aceleración del registro sísmico. También se puede observar que los desplazamientos relativos en el punto A no son tan grandes como en el caso del sismo anterior, donde alcanzaron 0,90 m con un PGA de 0.3g. En este caso, con un PGA de 0.5g, alcanzan solo 0.14 m.

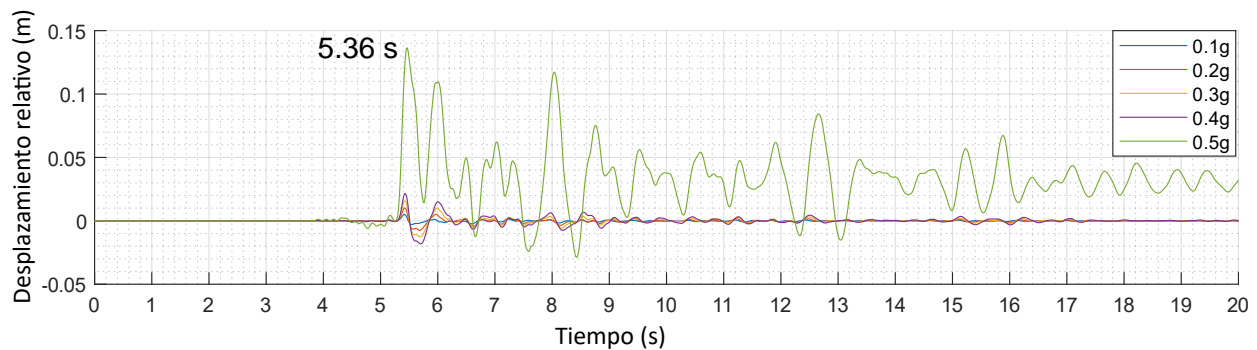


Figura 6-20: Desplazamientos relativos del punto A respecto a la base debido al sismo de Cusco, 2023 con diferentes PGA

La *Figura 6-21a* muestra el registro sísmico del terremoto de Ancash (45 s), y la *Figura 6-21b* el espectro de Fourier de esta señal. Como se muestra, las frecuencias predominantes del registro se encuentran entre aproximadamente 1.3 y 13 Hz, las cuales son superiores a la frecuencia dominante de 0.976 Hz del muro. Este terremoto ocurrió en una zona de subducción alejada del sitio de Sacsayhuamán. Sin embargo, se utilizó en esta evaluación debido a que es el terremoto registrado que causó una de las mayores destrucciones naturales en el Perú. Este terremoto afectó a unos 83,000 km² en la superficie, provocando la muerte de 70,000 habitantes y daños a más de 16,000 edificios, alrededor del 80% de las estructuras de la zona (Oliver-Smith, 1994). Lamentablemente este terremoto provocó una gran avalancha que sepultó el pueblo de Yungay (Silgado, 1978).

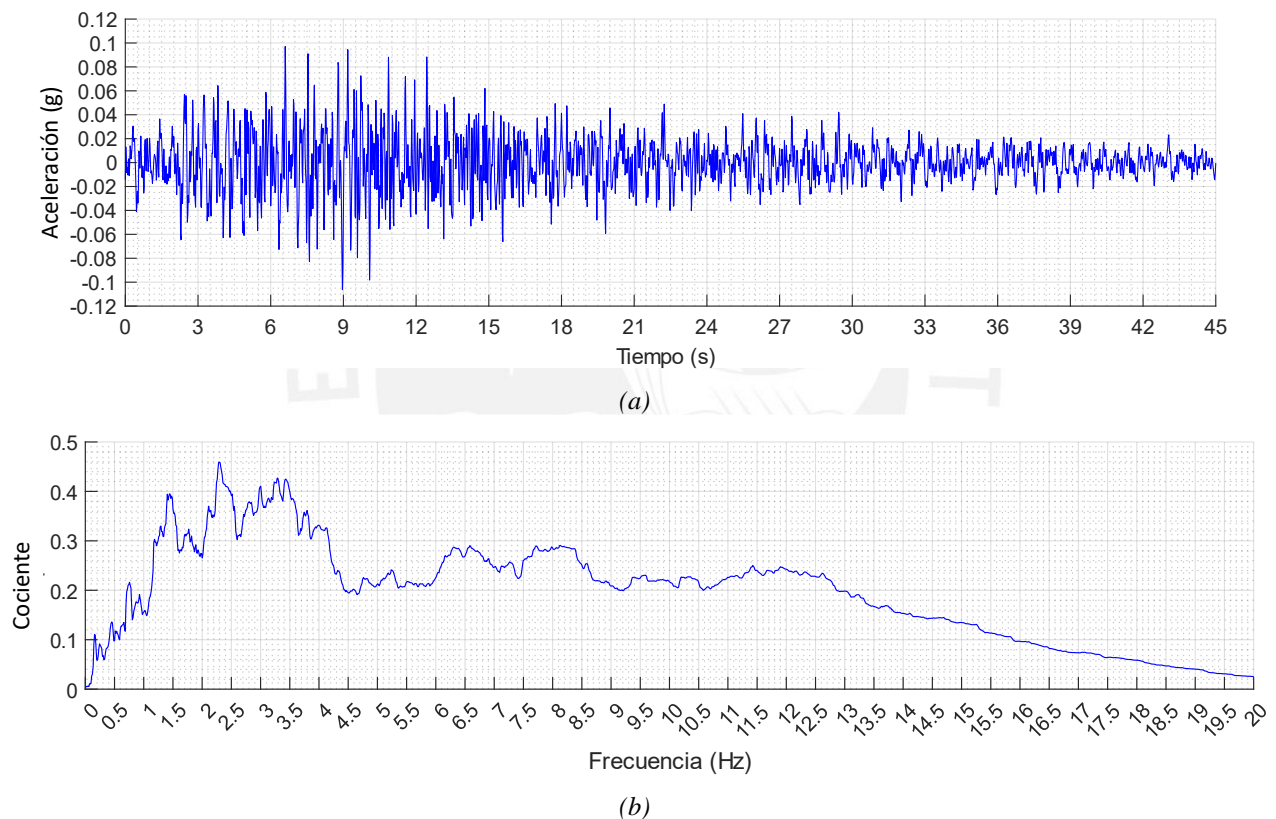


Figura 6-21: Sismo de mayo de 1970, Ancash (a) Registro sísmico (b) Espectro de Fourier

La *Figura 6-22* muestra el estado de la estructura luego de soportar el registro sísmico escalado a un PGA diferente. El tiempo de cálculo para cada análisis fue de 63 minutos. El sistema no sufre ningún daño notable hasta un PGA de 0.4g (*Figura 6-22c*); y solo con un PGA de 0.5g (*Figura 6-22d*) aparecen desplazamientos relativos perceptibles (muy similar al caso del sismo anterior). También, se puede observar que la estructura sufre un colapso parcial a un PGA de 2g (*Figura 6-22g*) y un colapso completo a 2.5g (*Figura 6-22h*). Como se mencionó, este sismo tenía frecuencias predominantes altas, por lo que no afectó drásticamente a la estructura.

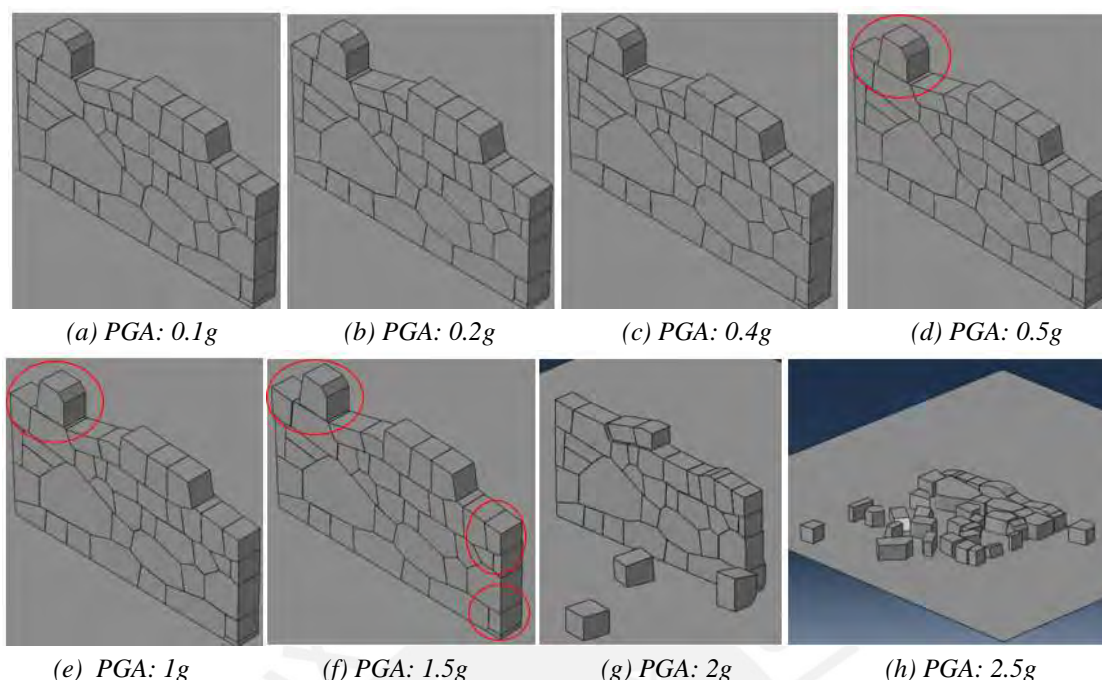


Figura 6-22: Estados de la estructura luego del registro sísmico de Áncash, 1970 escalado a diferentes PGA

La Figura 6-23 muestra el comportamiento del desplazamiento relativo del punto A respecto de la base durante el registro sísmico con un PGA de 0.1g, 0.2g, 0.3g y 0.4g. Para esta figura se eliminaron los 2 s de gravedad inicial para ajustar la señal al registro sísmico. En este caso, los desplazamientos relativos son pequeños, muy diferentes como en el caso del registro sísmico de Paruro, 2014.

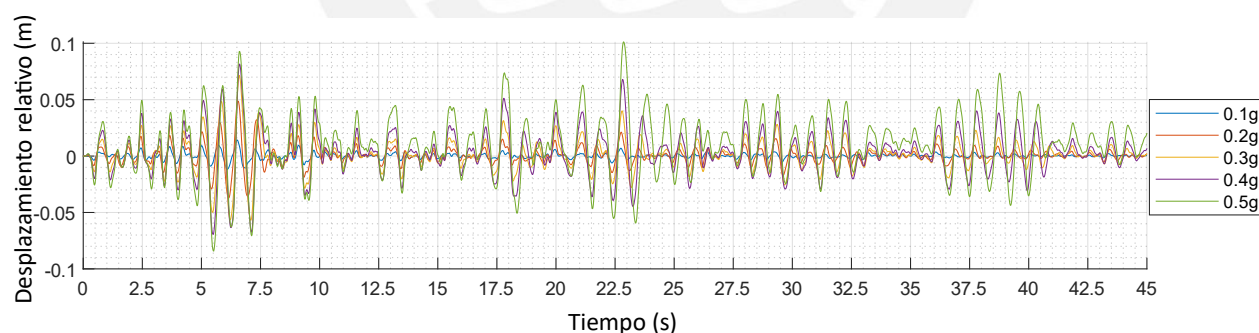


Figura 6-23: Desplazamientos relativos del punto A respecto a la base debido al sismo de Áncash, 1970 con diferentes PGA

La Tabla 6-3 muestra los bloques que sufrieron los mayores desplazamientos remanentes al final de cada evento sísmico evaluado escalado a diferentes PGA. Estos desplazamientos son relativos a la base. Los bloques que sufrieron los desplazamientos más significativos fueron generalmente los de la parte superior del muro: bloques 35, 38, 39 y 40. El terremoto de Paruro de 2014 produjo los mayores desplazamientos relativos debido a la proximidad de la frecuencia predominante del registro sísmico y la estructura evaluada. Por otro

lado, los desplazamientos remanentes parecen ser de pequeña magnitud para los sismos con PGA menores a 0.3g. Sin embargo, tener en cuenta que en estructuras patrimoniales un leve daño es bastante grave, ya que la intervención puede ser muy compleja. Como se puede observar, si los sismos tuvieran un PGA de 0.1g, el desplazamiento remanente es mínimo, menor a 1 mm, por lo que se podría concluir que es un daño leve. Con un PGA de 0.2g la estructura ya tiene un daño de casi 3 mm, lo cual podría ser muy notorio en estas construcciones, y con un PGA de 0.3g o superior podemos inferir que el daño podría ser severo. En el Cusco es posible que se genere un sismo con una magnitud Mw 7.2, y según un estudio geofísico, si la falla de Tambomachay provoca un sismo de Mw 7.01 se generaría un PGA mayor a 0.45g en los distritos de Poroy, Santiago, Cusco, Wanchaq, San Sebastián y San Gerónimo, lo que podría causar severos daños en las estructuras incas (Rosell et al., 2022).

Tabla 6-3: Máximo desplazamiento remanente después de cada evento (mm)

PGA	Sismo de Paruro, Cusco (2014)		Sismo de Cusco (2023)		Sismo de Áncash (1970)	
	Máximo desplazamiento residual (mm)	N° de piedra referida	Máximo desplazamiento residual (mm)	PGA	Máximo desplazamiento residual (mm)	N° de piedra referida
0.1g	0.5	35	0.3	38, 39, 40	0.6	39, 40
0.2g	2.9	35	0.3	35	1.8	35
0.3g	12.0	38, 39, 40	0.1	35	3.0	37
0.4g	Colapso	Total	0.1	35	7.3	35
0.5g	Colapso	Total	0.7	40	21.4	35
1g	Colapso	Total	20.0	35	112.5	39, 40
1.5g	Colapso	Total	31.8	35	129.9	25
2g	Colapso	Total	32.4	35, 36	Colapso	35, 38, 39, 40
2.5g	Colapso	Total	32.1	35, 36, 37	Colapso	Total

En el anexo 6 se adjuntan los videos como un QR, del comportamiento del muro por cada registro sísmico.

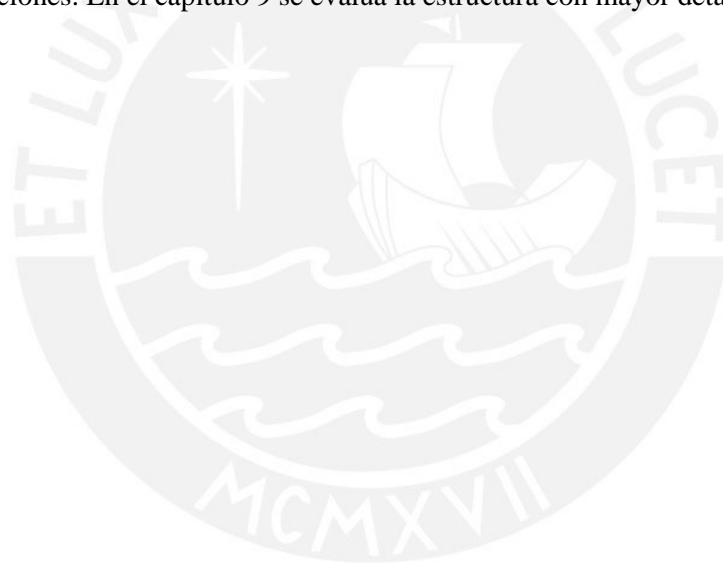
6.5. Resumen

El complejo arqueológico de Sacsayhuamán en Cusco contiene diversas estructuras prehispánicas muy importantes de la cultura Inca, por lo que es indispensable su evaluación estructural con el fin de salvaguardar el patrimonio. Lamentablemente Cusco se ubica en una zona de fallas corticales activas, lo cual podría generar un sismo de gran magnitud en esta zona.

Por otro lado, el comportamiento de volteo de las construcciones de piedra está significativamente influenciado por sus frecuencias predominantes. El enfoque basado en vibraciones representa una alternativa útil para calcular las frecuencias predominantes fuera del plano en una estructura de bloques de piedra y junta

seca. Por ejemplo, en este caso de estudio, la sección de Sacsayhuamán fue sometida a una señal de ruido blanco y a una serie de señales sinusoidales de diferentes frecuencias para obtener la frecuencia dominante al volteo. Como resultado, la frecuencia dominante de esta estructura fue de 0.976 Hz. Por lo tanto, sismos con frecuencias predominantes cercanas a este valor, incluso con amplitudes pequeñas, podrían afectar la integridad de estas construcciones. Por ejemplo, supongamos que esta estructura esté sujeta al terremoto de Paruro de 2014, el cual tiene frecuencias dominantes muy cercanas a la frecuencia dominante de la estructura, escalado a un PGA de 0.2g. En este caso, el desplazamiento residual relativo entre las piedras podría ser de 3 mm, lo que sería notable para una estructura patrimonial tan importante. En el peor de los casos, el terremoto de Paruro de 2014, escalado a una PGA de 0.4g, podría provocar el colapso de la estructura.

En este capítulo se evaluó únicamente la capa exterior de una sección del muro de Sacsayhuamán considerándola de sección constante y sin el empuje del terreno contenido. Esto con el fin verificar que la metodología de enfoque de vibraciones sea la adecuada para evaluar la frecuencia predominante fuera del plano de estas construcciones. En el capítulo 9 se evalúa la estructura con mayor detalle.



CAPITULO 7: CAMPAÑA EXPERIMENTAL DE ENSAYOS POR VOLTEO DE MUROS DE JUNTA SECA

7.1.Generalidades

En este capítulo se presenta la campaña experimental realizada por el autor de la tesis en la Universidad San Ignacio de Loyola, en la cual se elaboraron 3 muros que tienen características del Templo del Coricancha, Cusco, Perú. Esto se realizó ya que el ensayo experimental utilizado en el apartado 6.3 de Santa Cruz et al. (2021), era de piedras irregulares colocados unos sobre otros con muchos vacíos en el muro; sin embargo, diversas construcciones Inca, como en Sacsayhuamán o el Templo del Coricancha, las piedras son labradas y encajan unas sobre otras casi a la perfección. Entonces con estos nuevos ensayos experimentales se realiza una nueva calibración de las propiedades de contacto que sirvan para estructuras con bloques encajados.

Los muros se elaboraron con bloques de concreto y en el texto se detalla la evaluación de sus propiedades físicas y mecánicas del material elaborado, y todo el proceso de la construcción de los muros. Estos muros se ensayaron por volteo con el fin de obtener el comportamiento estructural de estas construcciones. En el proceso del volteo se utilizaron cámaras y una estación total para registrar más información del ensayo. Luego, se evaluaron los desplazamientos relativos de varios puntos de las estructuras en varios ángulos de inclinación, según los resultados obtenidos por la estación total. Por último, se realizaron modelos en Abaqus que simulan el volteo de estas construcciones, con el fin de calibrar las propiedades de contacto de estas estructuras.

7.2. Campaña experimental

7.2.1. Modelos elaborados

La campaña experimental se realizó en la USIL sede Pachacamac, Lima, Perú, bajo la dirección del autor de la tesis, en conjunto con los estudiantes Edson Alexis Pillaca Palomino, Onil Leonard Quispe Mercado y varios estudiantes que apoyaron en la construcción y ensayo de los muros construidos. En total se construyeron tres muros, los cuales estaban hechos con bloques de concreto que se asemejaban a un muro del templo del Coricancha (*Figura 7-1*).

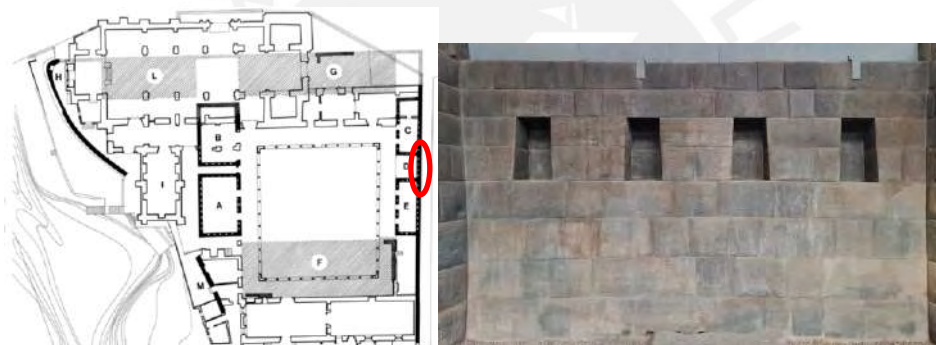


(a)

(b)

Figura 7-1: Templo del Coricancha (a) Vista externa (b) Vista interior

El muro al cual se trató de representar es un muro de doble hoja encajado, construido con piedra labrada tipo andesita (Huamaní y Yapura, 2021). Este muro se encuentra en la zona D, como conexión de las habitaciones Incas C y E (Figura 7-2a y Figura 7-2b).



(a)

(b)

Figura 7-2: Templo del Coricancha

(a) Posible plano del Templo según Canziani (2012) (b) Muro de conexión de las habitaciones C y E

Como se aprecia en la Figura 7-2b, los bloques están colocados unos sobre otros en líneas horizontales; sin embargo, verticalmente no tienen una configuración simétrica. Hasta la fecha tampoco se conoce cuál de estos bloques atraviesa las dos hojas del muro, por lo tanto, es muy complicado realizar un modelo experimental que pueda tener todas las características geométricas de la estructura. En la Figura 7-3 se muestra las dimensiones aproximadas del muro a evaluar que fueron tomadas en el lugar. En el muro en cuestión no se pudo medir exactamente el grosor, ya que no se tenía acceso a la cara posterior; sin embargo, se verificó que la mayoría de estos muros de 2 hojas en el complejo tienen un grosor de 0.80 m, por lo que se asumió esta dimensión.

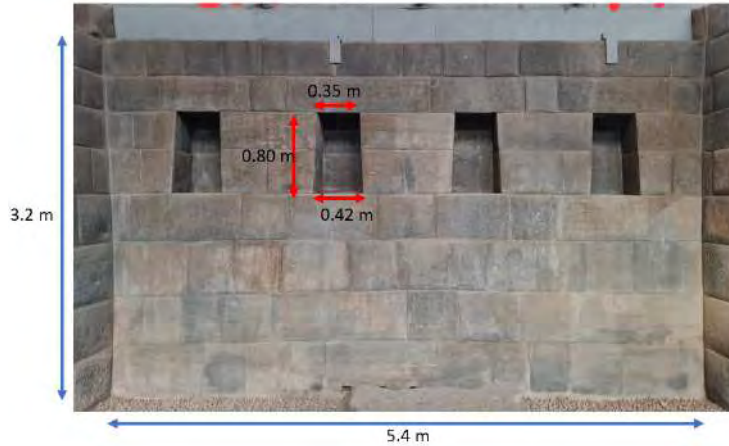


Figura 7-3: Dimensiones aproximadas del muro del Templo del Coricancha

En primera instancia se realizó el modelo inicial, el cual era una representación inicial del muro en escala 1:2. Las dimensiones del muro son $2.4 \times 1.6 \times 0.4$ m. En este modelo se consideró dos hojas (*Figura 7-4a* y *Figura 7-4b*) y que el muro tenga bloques regulares. La decisión de usar bloques regulares era debido a que se iban a usar bloques de concreto, y como se aprecia en la *Figura 7-3*, los bloques no tienen dimensiones idénticas, por lo que se tendría que elaborar un encofrado especial para cada uno. También se utilizó concreto y no roca andesita, ya que era muy costoso trasladar la andesita desde Cusco hasta Lima, y no se contaba con fondos para este objetivo. Por otro lado, tener en cuenta que según un estudio realizado por Ancori (2023) en dos tipos de rocas andesitas evaluadas en el complejo arqueológico de Pisaq, Cusco, estas tenían una densidad de 2020 y 2600 kg/m^3 , y un ángulo de fricción de 31.2 y 44.72° respectivamente; los cuales en promedio son valores muy similares a las propiedades del concreto convencional.

En la *Figura 7-4* cada fila de bloques tiene una altura de 0.20 m y cada capa tiene un grosor de 0.20 m. También los bloques de diferente color tienen las siguientes dimensiones:

- Bloques color celestes verduzcos: Son bloques de $0.20 \times 0.20 \times 0.40$ m, los cuales están colocados de tal manera que atraviesen las dos capas.
- Bloques color mostaza: También son bloques de $0.20 \times 0.20 \times 0.40$ m; sin embargo, estos están colocados solo en una capa, es decir, no atraviesan las dos capas del muro.
- Bloques de las hornacinas: Estos bloques tienen dimensiones con tal de que tengan las mismas dimensiones de las hornacinas mostradas en la *Figura 7-3*; sin embargo, escalados en 1:2.

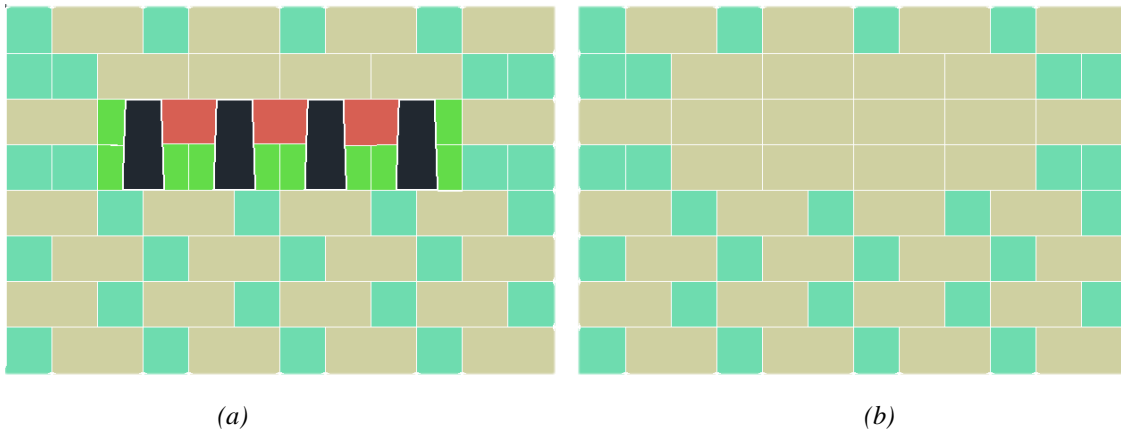


Figura 7-4: Modelo inicial (a) Capa frontal (b) Capa posterior

En la *Figura 7-5* se muestra la vista 3D del modelo. En la *Figura 7-5b* (modelo inicial) se aprecian zonas en el cual existen bloques que tienen una junta continua vertical (círculos rojos), lo cual en el muro real no existe y, además, esto podría genera un plano de falla, por lo que se decidió cambiar este modelo a uno mejorado posteriormente. Sin embargo, con este modelo inicial se construyó un muro para realizar ensayos previos y asegurar que estas juntas continuas verticales realmente afecten en el colapso de la estructura.

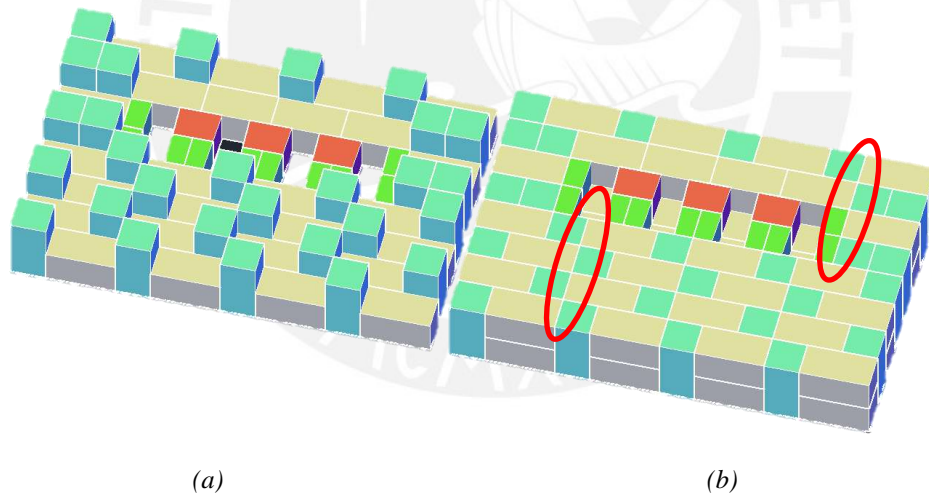
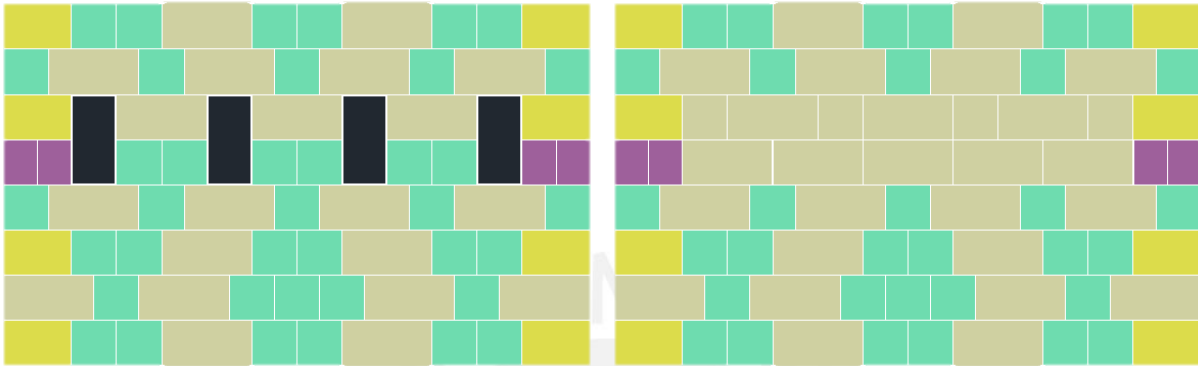


Figura 7-5: Modelo inicial en 3D (a) Capa frontal (b) Modelo completo

Como segundo modelo se realizó uno en el que no existan estas juntas continuas verticales (*Figura 7-6*). En este caso se consideraron las hornacinas de manera rectangular, ya que se apreció en el muro elaborado anterior que estas no afectaban por lo general a la estructura. De igual modo que el modelo inicial, en este caso cada fila de bloques tiene una altura de 0.20 m y cada capa tiene un grosor de 0.20 m. Para este caso los bloques de color celeste verdusco y mostaza son del mismo tamaño que se indicó anteriormente; sin embargo, se elaboraron otros bloques adicionales para evitar la continuidad vertical:

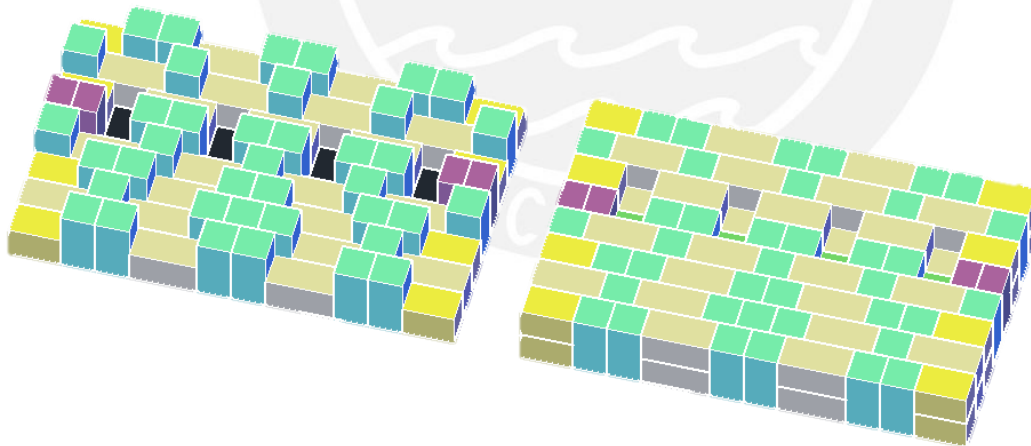
- Bloques amarillos: Estos bloques son de $0.20 \times 0.20 \times 0.30$ m, y están colocados en una sola capa, es decir, no atraviesan las dos capas.
- Bloques morados: Estos bloques son de $0.15 \times 0.40 \times 0.20$ m y son bloques que atraviesan las dos capas.



(a) (b)

Figura 7-6: Modelo final (a) Capa frontal (b) Capa posterior

Un detalle importante que mencionar es que este modelo final es 0.20 m más largo que el modelo inicial (dimensiones del modelo final: $2.6 \times 1.6 \times 0.4$ m). En la Figura 7-7 se aprecia el modelo final en 3D. Como se aprecia en este caso ya no existe una continuidad vertical.



(a)

(b)

Figura 7-7: Modelo final en 3D (a) Capa frontal (b) Modelo completo

7.2.2. Diseño de mezcla

El diseño de mezcla se realizó por el método Fuller (Kasperkiewicz, 1998), en el cual se busca la mayor densificación de los agregados. Las propiedades del cemento y los agregados fueron obtenidas por medio de

ensayos experimentales usando normas ASTM. Los resultados de estos se encuentran en la *Tabla 7-1*. El cemento usado es de la marca Sol Tipo I que cumple las especificaciones de la norma ASTM C150. Los agregados fueron comprados directamente de una ferretería de la zona. El aditivo superplastificante usado es SikaCem, el cual tiene como dosis entre 250 a 500 ml por cada bolsa de cemento de 42.5 kg.

Tabla 7-1: Propiedades físicas de los insumos del concreto elaborado

Material	Propiedad	Resultado	Norma
Cemento	Densidad	3110 kg/m ³	ASTM C188
	Tamaño Máximo Nominal (TMN)	1"	ASTM C33 y ASTM C136
	Huso	5	ASTM C33 y ASTM C136
	Humedad de absorción	0.67%	ASTM C127
Agregado grueso	Humedad natural	0.32%	ASTM C566
	Peso específico de masa	2760 Kg/m ³	ASTM C127
	Peso unitario suelto	1470 kg/m ³	ASTM C29
	Peso unitario varillado	1590 kg/m ³	ASTM C29
	Tamaño Máximo Nominal	#4	ASTM C33 y ASTM C136
	Huso	No cumple	ASTM C33 y ASTM C136
	Humedad de absorción	0.98	ASTM C128
Agregado fino	Humedad natural	0.61	ASTM C566
	Peso específico de masa	2610 kg/m ³	ASTM C128
	Peso unitario suelto	1500 kg/m ³	ASTM C29
	Peso unitario varillado	1740 kg/m ³	ASTM C29
Aditivo superplastificante (ASTM C494)	densidad	1200 kg/m ³	
	dosis	350 ml por bolsa de cemento	

En la *Tabla 7-2* se muestra la granulometría de los agregados grueso y fino, la curva de Fuller para un TMN de 1", y la mezcla de agregados con la mayor compacidad (mezcla M con una relación arena/Agregado en volumen absoluto de 0.48). También en la *Figura 7-8* se muestra las curvas granulométricas de la mezcla M y la curva de Fuller.

Tabla 7-2: Granulometría de agregados

Material	Porcentaje que pasa según tamiz											
	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
Agregado grueso (G)	100	91.4	31.9	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0
Agregado fino (A)	100	100	100	100	100	95.4	78.3	75.8	47.8	25.8	12.5	7.8
Mezcla de Fuller (TMN = 1")	100	100	86.6	70.7	61.2	43.3	30.6	21.7	15.3	10.8	7.7	5.4
M = 0.52 G + 0.48 A	100.0	95.9	67.3	52.2	52.0	49.6	40.7	39.4	24.9	13.4	6.5	4.1

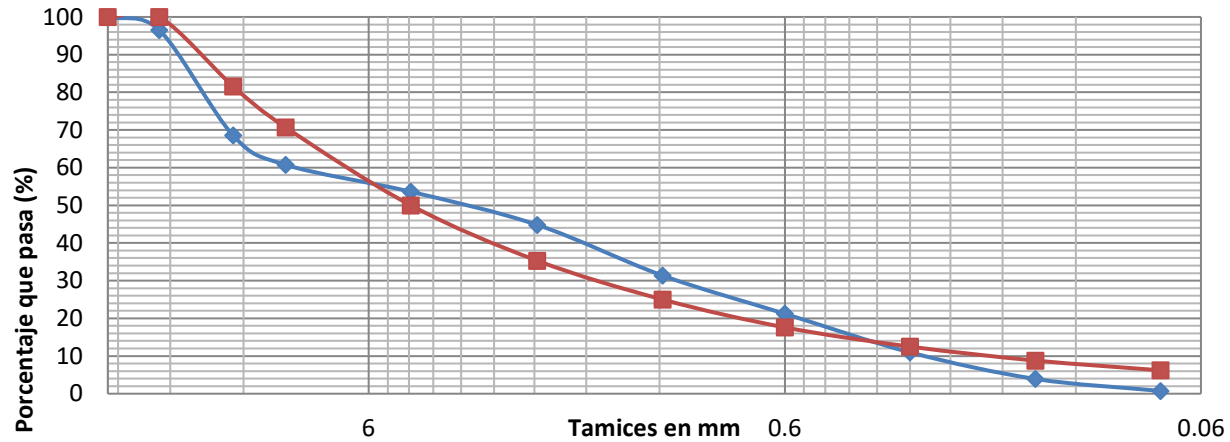


Figura 7-8: Curvas granulométricas de la mezcla de agregados (azul) y la curva de Fuller (rojo)

La relación agua/cemento utilizada fue de 0.5, para que de ese modo los bloques sean lo suficientemente resistentes y puedan soportar los golpes de caída y también, debido a que el agregado fino tenía bastante material en el pasante #200. Como parámetros de control se buscó que el slump sea de 6" y el contenido de aire entre 1 y 3% en el concreto fresco. En la *Tabla 7-3* se muestra el diseño de mezcla en seco para 1 m³ de concreto, en la *Tabla 7-4* la corrección por humedad del diseño de mezcla, y, por último, en la *Tabla 7-5* los volúmenes sueltos para una bolsa de cemento de 42.5 kg. Las cantidades de mezclado eran en baldes de 20 litros, considerando por cada tanda 1 balde de cemento, 2.2 baldes de agregado grueso, 1.9 baldes de agregado fino, 0.8 baldes de agua y aditivo 350 ml por cada bolsa de cemento.

Tabla 7-3: Diseño de mezcla para 1m³

Material	Operaciones	Masa seca (kg)	Operaciones	Volumen (m3)
Agua		210	210/1000	0.21000
Cemento	210/0.5	420	420/3110	0.13505
Aire		-	2.0%	0.02000
Ag. grueso		906	906/2760	0.32838
Ag. fino		791	791/2610	0.30312
Aditivo		4.151		0.00346
		2331.604		1.00000

Tabla 7-4: Corrección por humedad

Material	Masa seca (kg)	Masa (kg)
Agua	210	216
Cemento	420	420
Ag. grueso	906	909
Ag. fino	791	796

Tabla 7-5: Volúmenes sueltos por bolsa de cemento

Material	Masa (kg)	Vol (m3)	Vol (pie3)	Vol (litros)
Agua	21.87	0.02187	0.77	21.9
Cemento	42.50	0.02832	1.00	28.3
Ag. grueso	92.00	0.06259	2.21	62.6
Ag. fino	80.54	0.05370	1.90	53.7

7.2.3. Propiedades del concreto fresco y endurecido

Para el caso de obtención de la resistencia del concreto se elaboraron probetas cilíndricas de diámetro 4" y 8" de altura, tal como especifica la norma ASTM C192, y curados en una poza de curado. Los resultados del concreto fresco y endurecido obtenidos se muestran en la *Tabla 7-6*. En este caso no se pudo obtener la resistencia a 7 días debido a problemas técnicos en el laboratorio de la USIL. Por otro lado, las probetas sobrantes se retiraron de la piscina de curado a los 28 días en conjunto con los bloques y se ensayaron a compresión durante el armado de los muros.

Tabla 7-6: Propiedades del concreto fresco y endurecido

Estado	Propiedad	Resultado	Norma
Concreto fresco	Temperatura	28.5°C	ASTM C1064
	Slump	10"	ASTM C143
	Peso unitario	2362 kg/m ³	ASTM C138
	Aire	3.0%	ASTM C231
Concreto endurecido	Resistencia promedio a 9 días (4 probetas)	155 kg/cm ²	ASTM C39
	Resistencia promedio a más de 28 días (4 probetas)	239 kg/cm ²	ASTM C39

7.3. Construcción de los muros de bloques de concreto

7.3.1. Bloques de concreto

Los bloques de concreto fueron elaborados en encofrados de madera (Figura 7-9a) y curados en una piscina a una temperatura ambiental (Figura 7-9b).



Figura 7-9: Elaboración de bloques de concreto (a) Colocado de concreto (b) Curado de concreto

7.3.2. Equipo mecánico para el volteo de muros

Como ya se comentó, toda la campaña experimental se realizó en la USIL. Esto debido a que en dicha casa de estudios cuentan con una plataforma de volteo de estructuras, que puede cargar un muro de dimensiones de hasta 4 m de largo, 1.5 m de espesor y altura variable (Rivas, 2019). La mesa puede rotar hasta unos 45° y soportar un peso máximo de 30 toneladas. En la Figura 7-10 se aprecia un muro tipo pirca el cual se encuentra sobre la plataforma de volteo. También se aprecia que esta plataforma tiene una barra de sujeción que evita el deslizamiento de todo el muro por la base durante el ensayo.



Figura 7-10: Plataforma para ensayos de volteo (Rivas, 2019)

7.3.3. Muros construidos

Se realizaron en total 3 muros: 1 muro con el modelo inicial (muro 0) y 2 muros con el modelo final (muro 1 y muro 2). En la *Figura 7-11* se aprecia la construcción del muro 0.



(a)

(b)

Figura 7-11: Construcción del muro 0

(a) Colocación de la primera hilada (b) Acomodo de los bloques superiores

En la *Figura 7-12a* se muestra el muro 0 y en la *Figura 7-12b* el muro 1. Tener en cuenta que los muros fueron construidos uno después del otro en orden: muro 0, muro 1 y muro 2.



(a)

(b)

Figura 7-12: Armado de muros terminado

(a) Muro 0 con el modelo inicial (b) Muro 1 con el modelo final

7.3.4. Evaluación del desplazamiento del muro

Por medio de una estación total se evaluaron la ubicación de distintos puntos en los muros en cada instante de giro. En la *Figura 7-13a* se muestra los distintos puntos evaluados en el muro 0, y en la *Figura 7-13b* en el muro 1 y 2. Tener en cuenta que también se evaluó un punto “0” externo a la plataforma para verificar que la obtención de puntos sea la correcta.

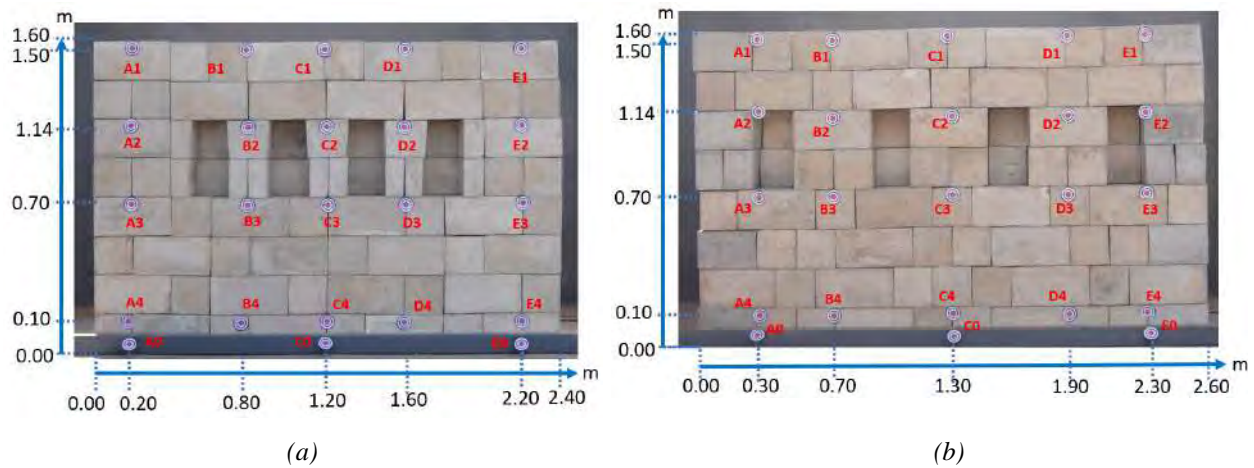


Figura 7-13: Puntos evaluados (a) Muro 0 (b) Muro 1 y 2

7.3.5. Cámaras

En cada ensayo de volteo se colocaron 4 cámaras, las cuales se colocaron estratégicamente para grabar la parte frontal (cámara Lumix GH5S), transversal (cámara Lumix GH5S), diagonal (cámara Sony a7RIV) y superior del muro (cámara de celular). En la Figura 7-14 se muestra una vista superior de la ubicación de las cámaras y la estación total.



Figura 7-14: Orden de las cámaras en el ensayo

7.4. Resultados obtenidos

7.4.1. Evaluación de la densidad y el coeficiente de fricción

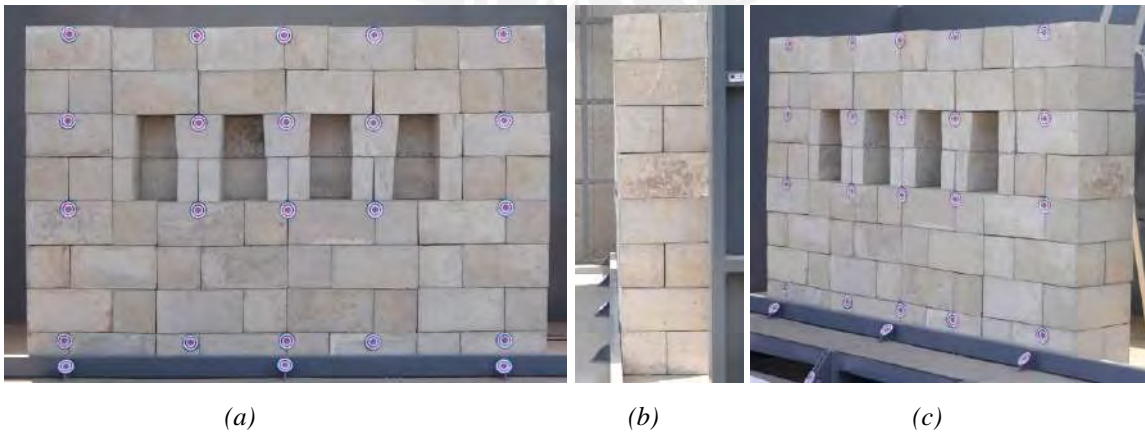
Para obtener la densidad del concreto usado en los bloques, se pesaron 5 bloques aleatorios antes de los ensayos y se obtuvo una densidad promedio de 2364 kg/m^3 . Por otro lado, para obtener el coeficiente de fricción se colocaron 6 bloques sobre otros 6 bloques como se aprecia en la *Figura 7-15* y se comenzó a girar la plataforma. El ángulo de giro en el cual se deslizaron estos bloques fue de $33, 33, 34, 34, 37$ y 37° , con un promedio de 34.67° .



Figura 7-15: Ensayo de volteo en bloques

7.4.2. Muro 0

El muro 0 fue ensayado en 3 instantes de giro: $5, 7$ y 10° , siendo poco antes de este último en el que el muro colapsó parcialmente. El colapso total fue un poco antes de 12° de giro. En la *Figura 7-16* se muestra el estado inicial del muro. La velocidad de giro fue de $0.2^\circ/\text{s}$ aproximadamente.



(a)

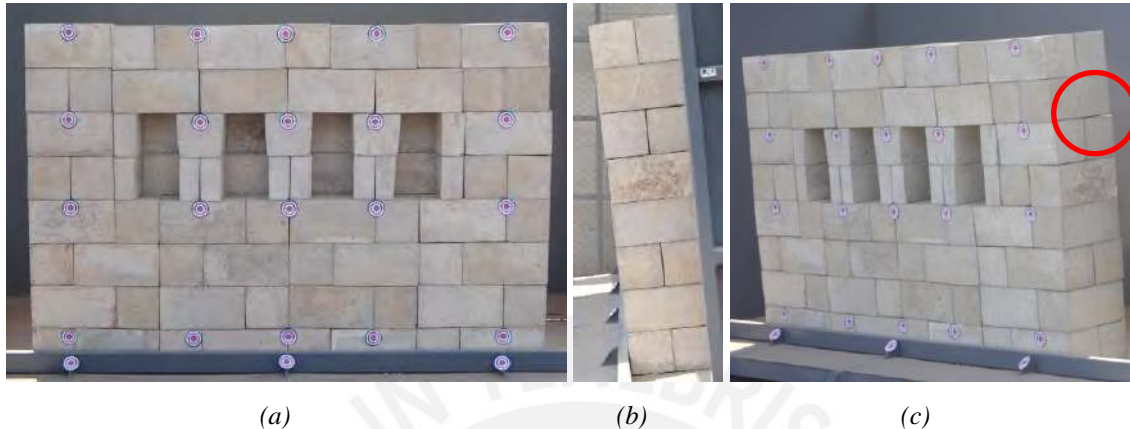
(b)

(c)

Figura 7-16: Vistas del muro 0 en 0° de giro

(a) Vista frontal (b) Vista lateral (c) Vista diagonal

En la *Figura 7-17* se muestra el estado del muro a 5° de giro. En la vista frontal y transversal no se aprecia variaciones; sin embargo, en la vista diagonal (*Figura 7-17c*) se aprecia una separación de los bloques superiores (círculo rojo).

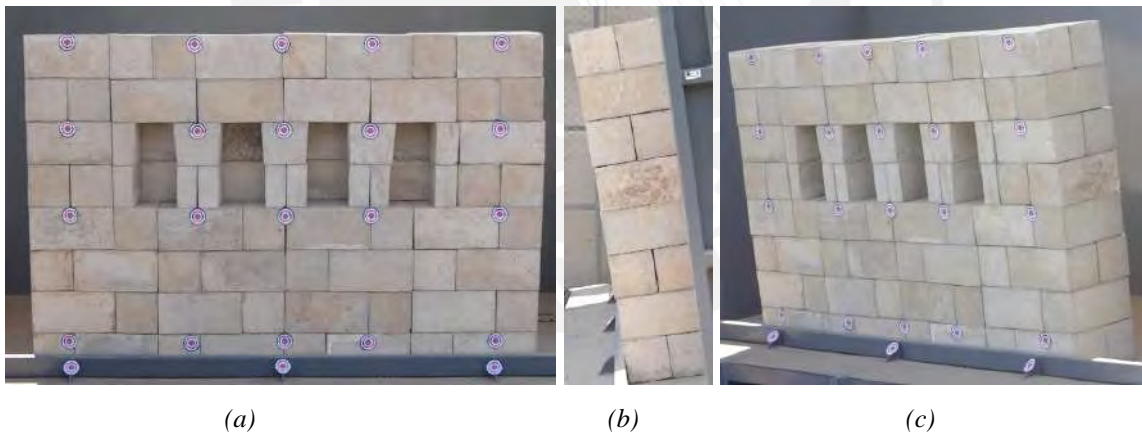


(a) (b) (c)

Figura 7-17: Vistas del muro 0 en 5° de giro

(a) *Vista frontal* (b) *Vista lateral* (c) *Vista diagonal*

En la *Figura 7-18* se muestra el estado del muro a 7° de giro. En general se apreció un acomodo del muro hacia adelante; sin embargo, no se apreciaron dislocaciones en el conjunto.



(a) (b) (c)

Figura 7-18: Vistas del muro 0 en 7° de giro

(a) *Vista frontal* (b) *Vista lateral* (c) *Vista diagonal*

En la *Figura 7-19* se muestra el estado del muro justo antes de llegar a los 10° . Como se aprecia, la falla comienza alrededor de los 9.8° y es por volteo. En la *Figura 7-19a* se aprecia como desde la 3ra hilada comienza a voltearse, y también cómo la continuidad vertical del lado de una de las hornacinas genera un plano de falla. En la *Figura 7-19b* se muestra que se generan distintos planos de falla en juntas continuas verticales durante la caída, y por último en la *Figura 7-19c* se muestra lo que queda de la estructura a 10° de

giro. En la *Figura 7-19d* se aprecia que en la parte trasera del muro también se aprecia una falla por continuidad vertical, la cual se genera a la mitad del muro.

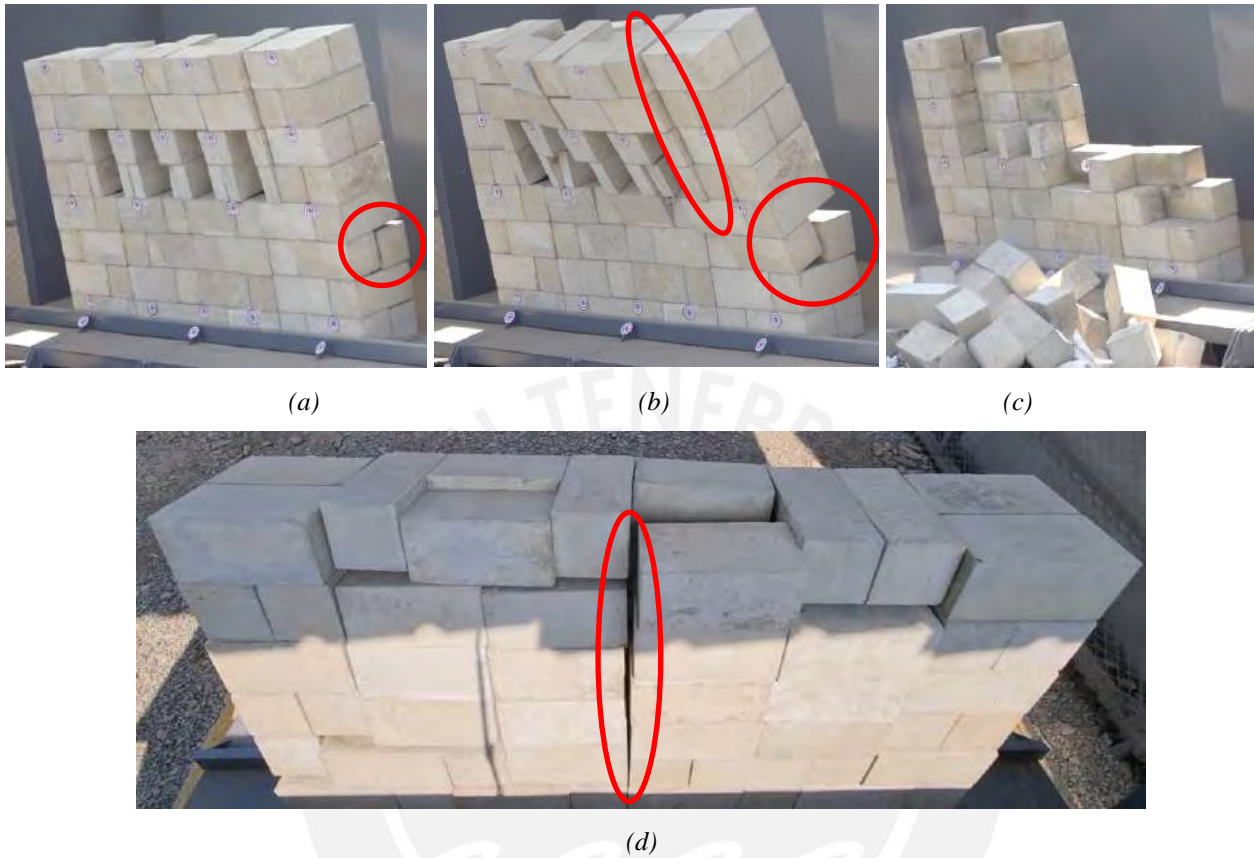
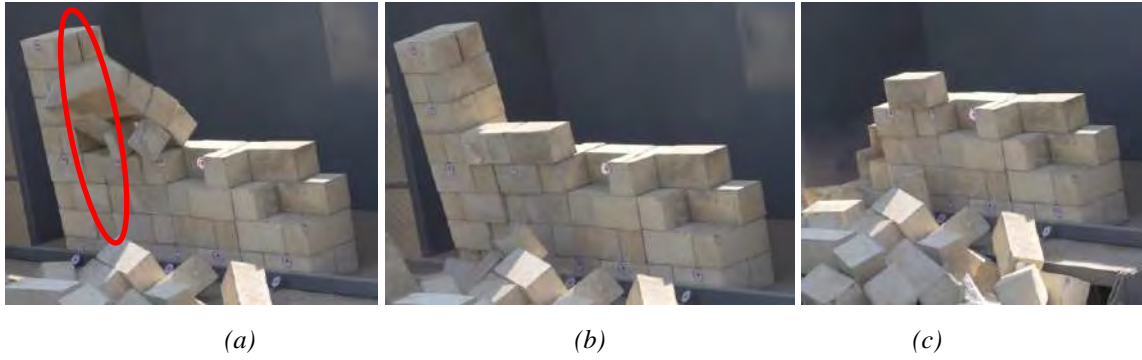


Figura 7-19: Vistas del muro 0 justo antes de llegar a los 10° de giro
(a) 9.8° (b) 9.85° (c) 10° (d) 9.85°

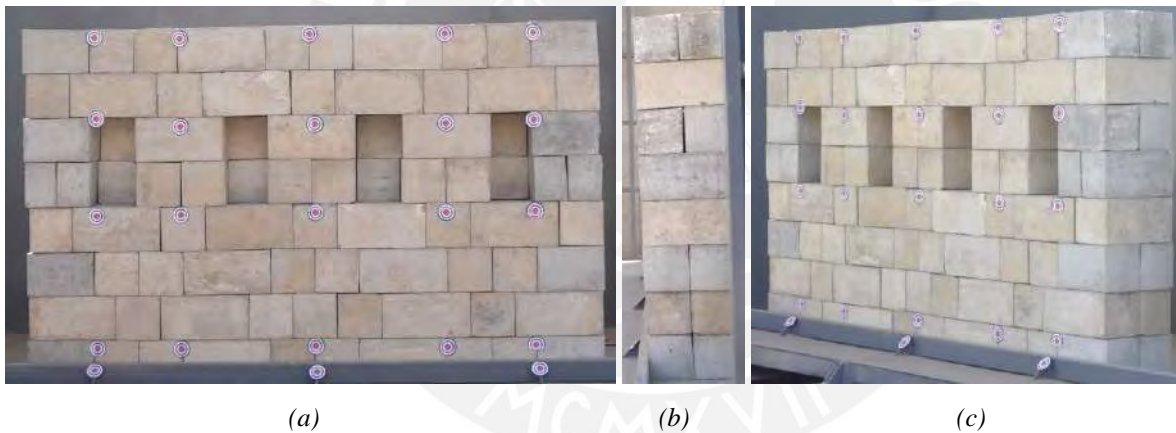
Luego, se culminó el ensayo girando la mesa hasta los 12 grados. En la *Figura 7-20* se muestra el estado del muro 0 a diferentes ángulos de giro. En la *Figura 7-20a* se aprecia que nuevamente debido a una continuidad vertical del fondo, parte del muro cae por un plano cortante. En la *Figura 7-20b* sólo se aprecia que queda una torre de bloques en la zona izquierda, y en la *Figura 7-20c* se aprecia que esta torre colapsa y queda únicamente bloques hasta la 4ta hilada sobre la plataforma.



*Figura 7-20: Vistas del muro 0 entre 10 a 12° de giro
(a) aprox. 10.8° (b) aprox. 10.9° (c) 12°*

7.4.3. Muro 1

El muro 1 fue ensayado en 9 instantes de giro: 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11°, siendo un poco antes de este último donde colapsa completamente la estructura. En la *Figura 7-21* se muestra el estado de la estructura en el instante inicial. La velocidad de giro fue de 0.2°/s aproximadamente.



*Figura 7-21: Vistas del muro 1 en 0° de giro
(a) Vista frontal (b) Vista lateral (c) Vista diagonal*

En la *Figura 7-22* se aprecia las vista del muro 1 a 7°. Hasta este ángulo de giro no se apreciaron dislocaciones o movimientos de los bloques.

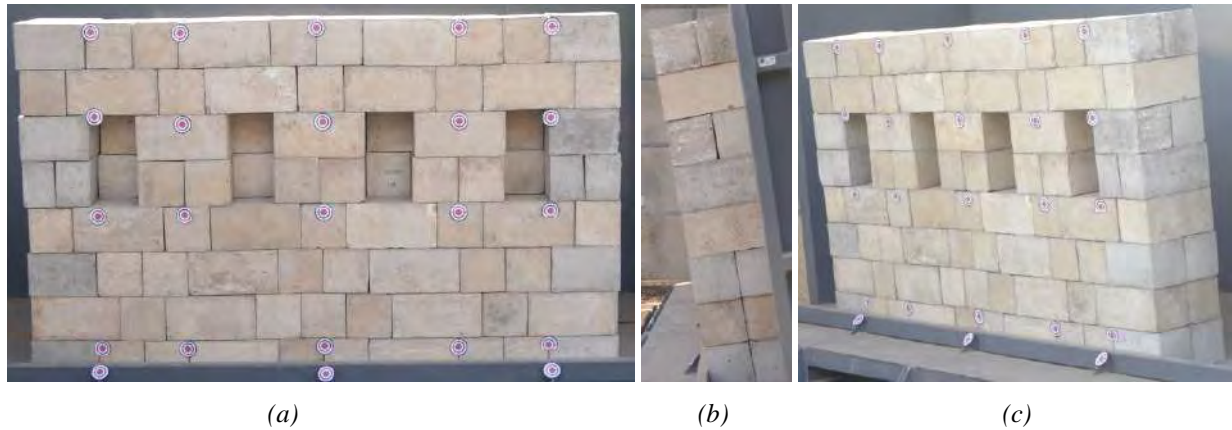


Figura 7-22: Vistas del muro 1 en 7° de giro
 (a) Vista frontal (b) Vista lateral (c) Vista diagonal

En la *Figura 7-23* se aprecia las vista del muro 1 a 10°. En este instante de tiempo tampoco se apreciaron desplazamientos relativos a simple vista.

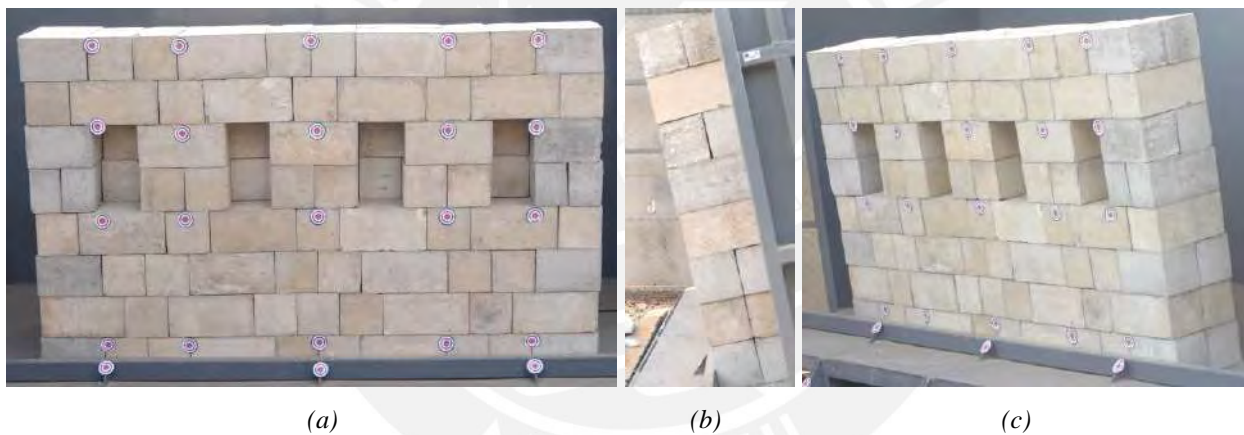
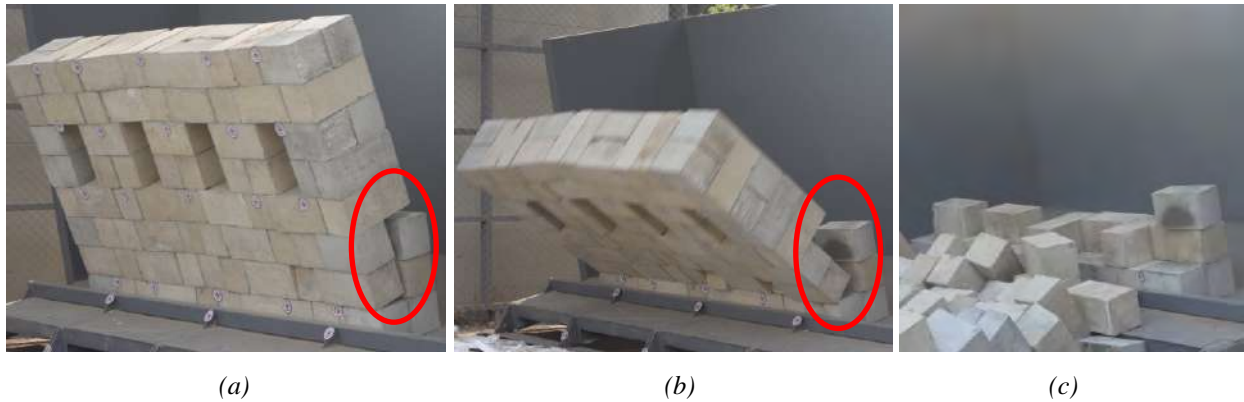


Figura 7-23: Vistas del muro 1 en 10° de giro
 (a) Vista frontal (b) Vista lateral (c) Vista diagonal

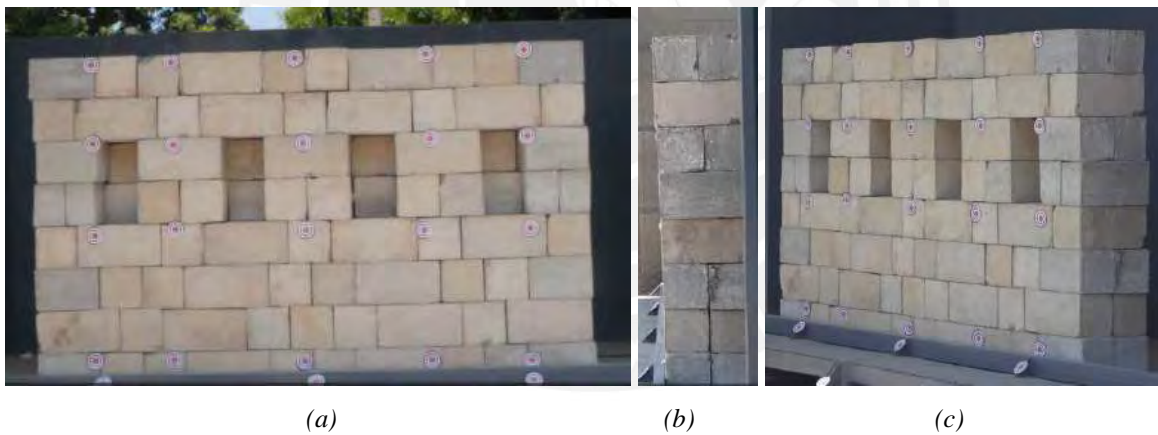
En la *Figura 7-24* se muestra el estado del muro justo antes de llegar a los 11°. Como se aprecia el fallo inicia entre la 2da y 3era hilada, en dónde los bloques comienzan a girar. Algo peculiar es que el muro cae como un conjunto compacto y además que esta zona de falla se encuentra en la misma zona por donde inició el fallo del muro 0. También, se puede apreciar que en esta zona existe una continuidad vertical en el plano transversal. En este modelo final se trató de evitar estas juntas continuas verticales en la cara frontal; sin embargo, no se tomó en cuenta que existiesen juntas continuas verticales en la zona transversal. Por otro lado, lamentablemente no se tiene el video de la vista superior, ya que la cámara superior falló en pleno ensayo.



*Figura 7-24: Vistas del muro 1 entre 10 y 11° de giro
(a) 10.65° (b) 10.75° (c) 11°*

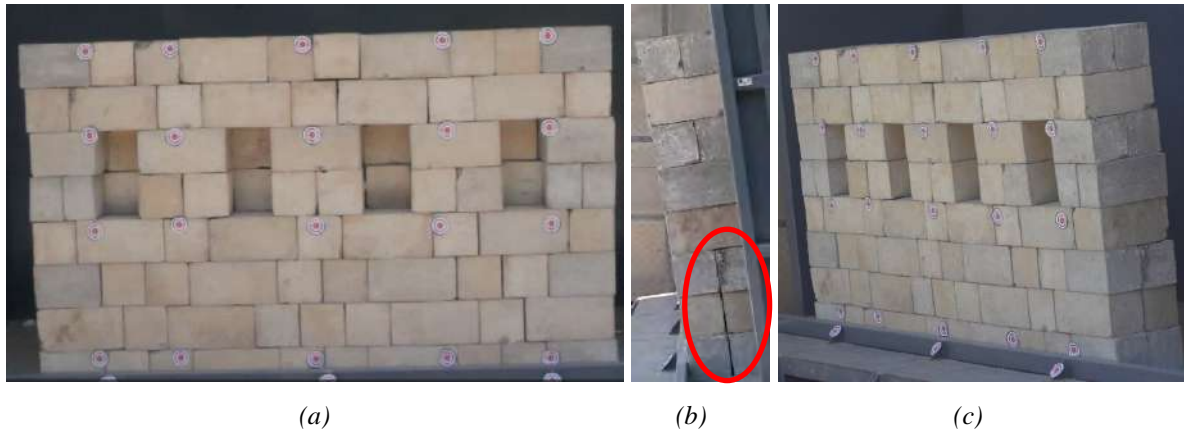
7.4.4. Muro 2

El muro fue ensayado en los mismos instantes de giro que el muro 1 y también colapsó un poco antes de 11° de giro. En la *Figura 7-25* se muestra el estado de la estructura en el instante inicial. Tener en cuenta que para la construcción de este muro se utilizaron los bloques del muro 0 y 1, por lo que varios de ellos presentaban ligeros daños en las esquinas y bordes. La velocidad de giro fue de 0.2°/s aproximadamente.



*Figura 7-25: Vistas del muro 2 en 0° de giro
(a) Vista frontal (b) Vista lateral (c) Vista diagonal*

En la *Figura 7-26* se aprecia el muro a los 7° de giro. En este caso se aprecia una ligera separación entre bloques en la zona donde fallaron los muros anteriores (círculo en rojo en la *Figura 7-26b*).

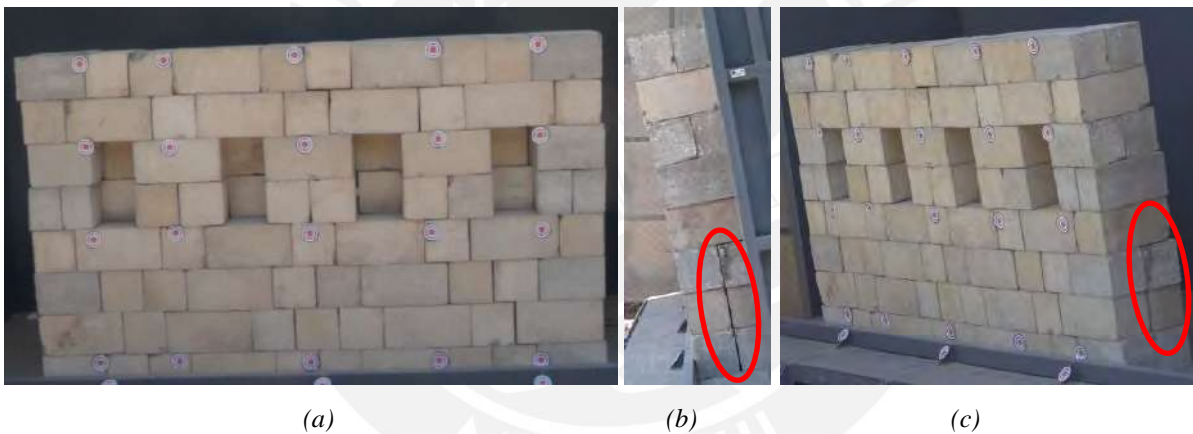


(a) (b) (c)

Figura 7-26: Vistas del muro 2 en 7° de giro

(a) Vista frontal (b) Vista lateral (c) Vista diagonal

En la *Figura 7-27* se aprecia el muro a los 10° de giro. En este instante, se aprecia en la *Figura 7-27b* y *Figura 7-27c* cómo la zona marcada comienza a abrirse ligeramente.



(a) (b) (c)

Figura 7-27: Vistas del muro 2 en 10° de giro

(a) Vista frontal (b) Vista lateral (c) Vista diagonal

En la *Figura 7-28* se muestra el estado del muro justo antes de llegar a los 11°. Como se aprecia el muro 2 tiene un fallo similar al caso del muro 1, es decir, desde la 2da hilada todo cae como un conjunto compacto. En la *Figura 7-28a* se muestra en círculos azules, como el borde superior de diversos bloques de la primera hilada se dañan ligeramente por aplastamiento. En la *Figura 7-28c* se muestra que el estado final de la estructura es simétrico y muy similar al del caso del muro 1. Por último, en la *Figura 7-28d* se muestra el colapso de la parte trasera del muro, la cual es de manera casi simétrica.

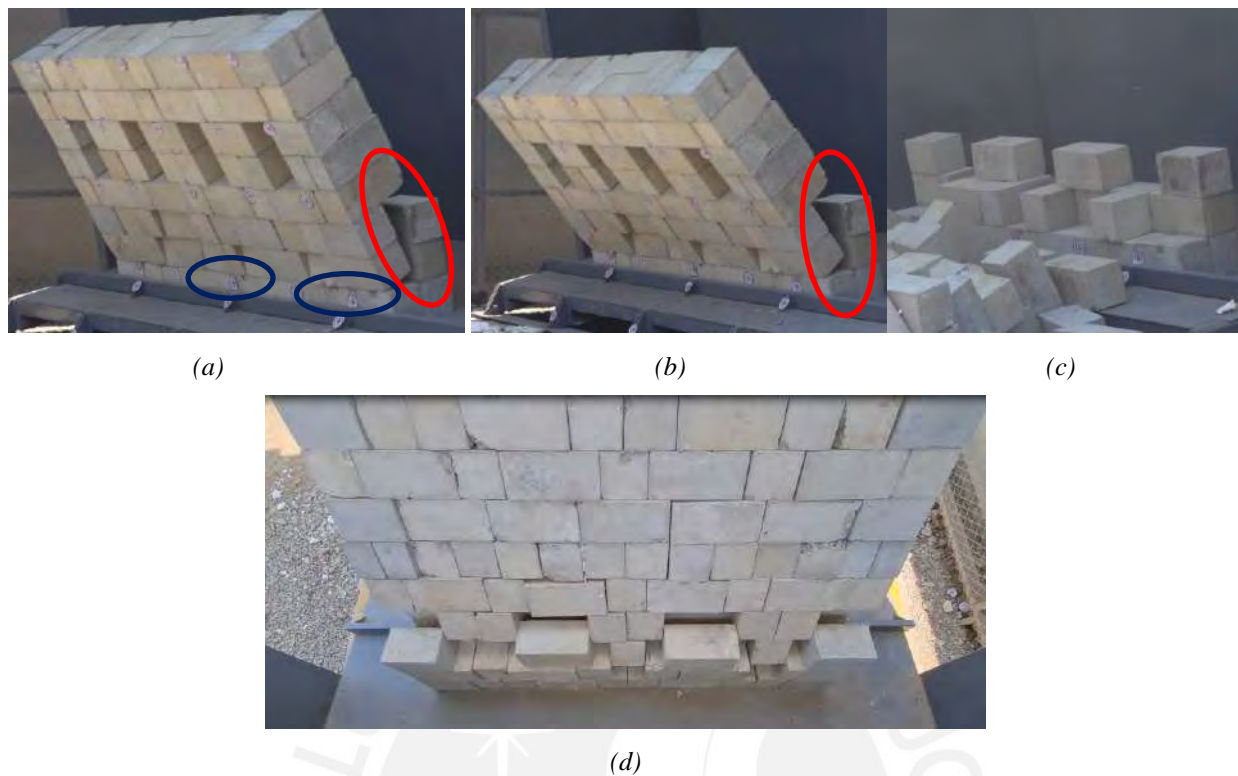


Figura 7-28: Vistas del muro 2 entre 10 y 11° de giro
 (a) 10.55° (b) 10.65° (c) 11° (d) 10.65°

7.4.5. Desplazamientos relativos

Por medio de la estación total se pudo registrar las coordenadas X, Y y Z de los puntos evaluados en cada muro en cada instante de giro. En la Figura 7-29 se muestra un esquema de como se traslada un punto en la base (K1 a K2) y un punto superior (M1 a M2) al girar la plataforma θ° .

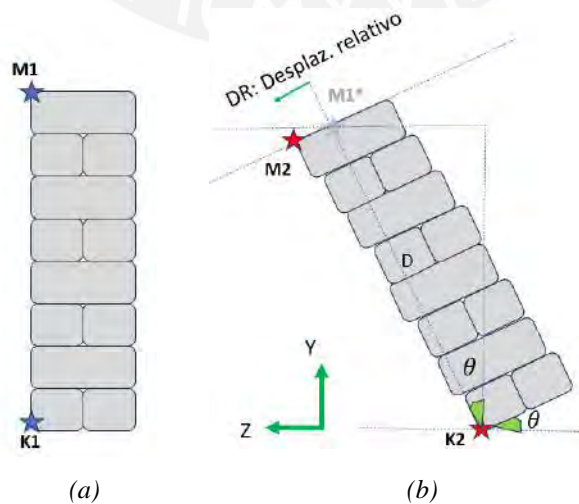


Figura 7-29: Comportamiento de la estructura (a) Instante inicial (b) Instante de giro θ

Si las coordenadas de cada punto fueran:

$$K1: (k1x, k1y, k1z) \quad M1: (m1x, m1y, m1z) \quad K2: (k2x, k2y, k2z)$$

$$M2: (m2x, m2y, m2z) \quad M1^*: (x, y, z)$$

La distancia entre $K1$ y $M1$ entonces sería:

$$D = \sqrt{(m1x - k1x)^2 + (m1y - k1y)^2 + (m1z - k1z)^2} \quad (7-1)$$

Si no hubiera desplazamiento relativo, el punto $M1^*$ tendría las siguientes coordenadas:

$$x = k2x \quad y = k2y + D \cos \theta \quad z = k2z + D \sin \theta$$

Por lo tanto, el desplazamiento relativo es la distancia entre el punto $M1^*$ y $M2$ es:

$$DR = \sqrt{(m2x - x)^2 + (m2y - y)^2 + (m2z - z)^2} \quad (7-2)$$

En la *Figura 7-30a*, *Figura 7-30b* y *Figura 7-30c* se muestra los desplazamientos relativos de la columna A, C y E respectivamente del muro 0, en cada punto evaluado y en cada instante de giro. Como se aprecia la columna E es la que tiene mayor desplazamiento relativo, ya que es justo por esta zona donde empieza el colapso a 9.8° de giro. También la columna A es la que tiene menor desplazamiento, y es justo esta zona la que no colapsa a 9.8° . El desplazamiento máximo generado a 7° es de 0.0039, 0.0222 y 0.0288 m para los puntos A1, C1 y E1 respectivamente.

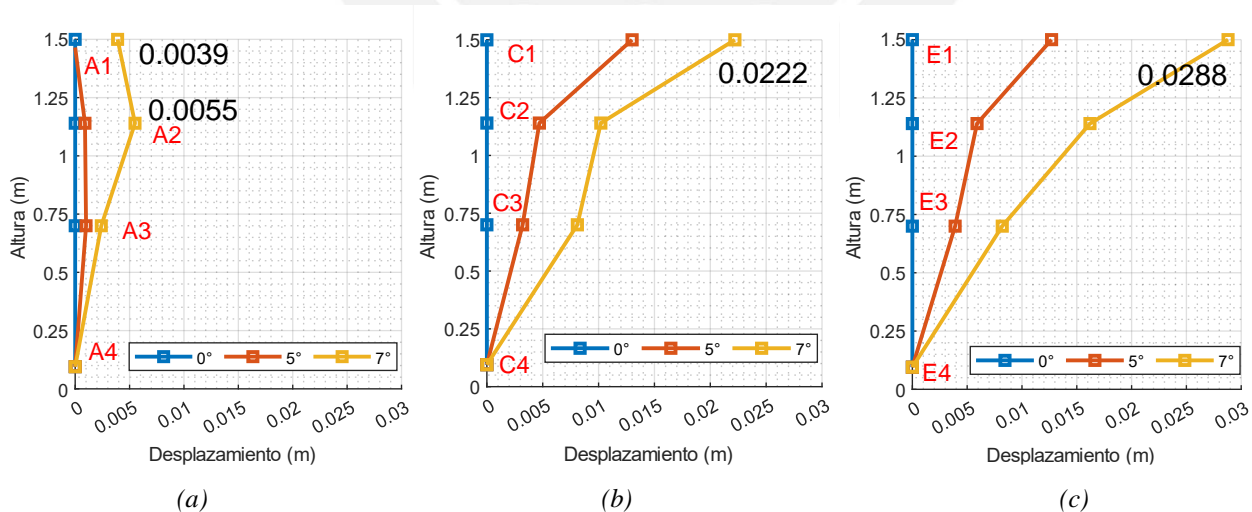


Figura 7-30: Desplazamiento relativo del muro 0 (a) Columna A (b) Columna C (c) Columna E

En la *Figura 7-31a*, *Figura 7-31b* y *Figura 7-31c* se muestran los desplazamientos relativos del muro 1 de la columna A, C y E respectivamente, en cada punto evaluado y en cada instante de giro. En este caso se aprecia

que la columna A tiene un desplazamiento relativo ligeramente mayor al de la columna C y E; sin embargo, en el colapso del muro 1 a 10.65° de giro se apreció que toda la parte superior cayó como si fuera un solo bloque. El desplazamiento máximo generado a 10° es de 0.0310, 0.0200 y 0.0268 m para los puntos A1, C1 y E1 respectivamente.

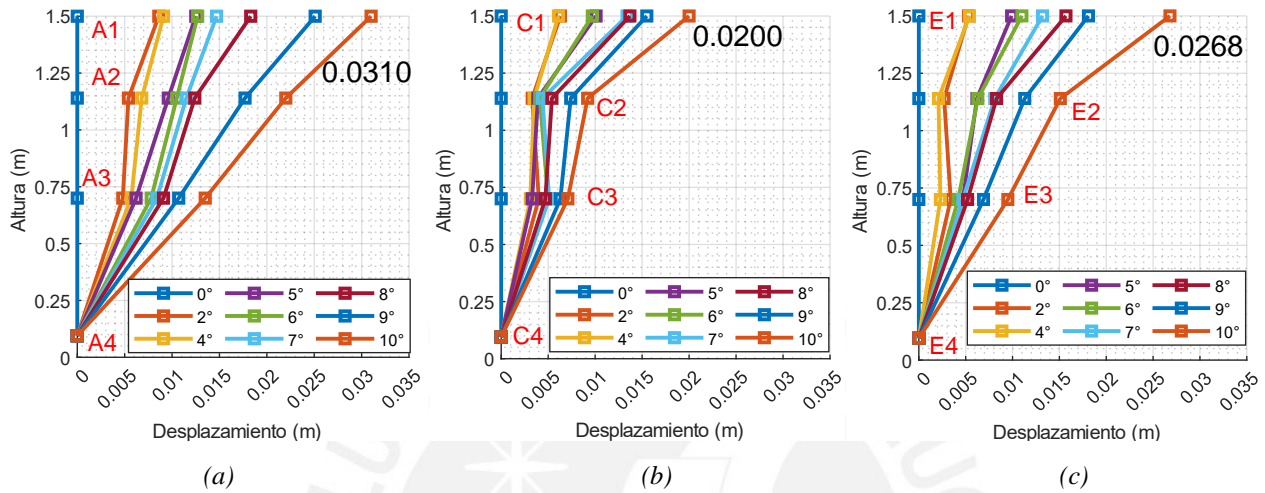


Figura 7-31: Desplazamiento relativo del muro 1 (a) Columna A (b) Columna C (c) Columna E

En la Figura 7-32a, Figura 7-32b y Figura 7-32c se muestran los desplazamientos relativos del muro 2 de la columna A, C y E respectivamente, en cada punto evaluado y en cada instante de giro. En este caso se aprecia que la columna C tiene un desplazamiento relativo mayor al de la columna A y E, lo contrario del muro 1. Sin embargo, en el colapso del muro 2 a 10.55° de giro se apreció de igual manera que toda la parte superior cayó como si fuera un solo conjunto. El desplazamiento máximo generado a 10° es de 0.0145, 0.0185 y 0.0123 m para los puntos A1, C1 y E1 respectivamente.

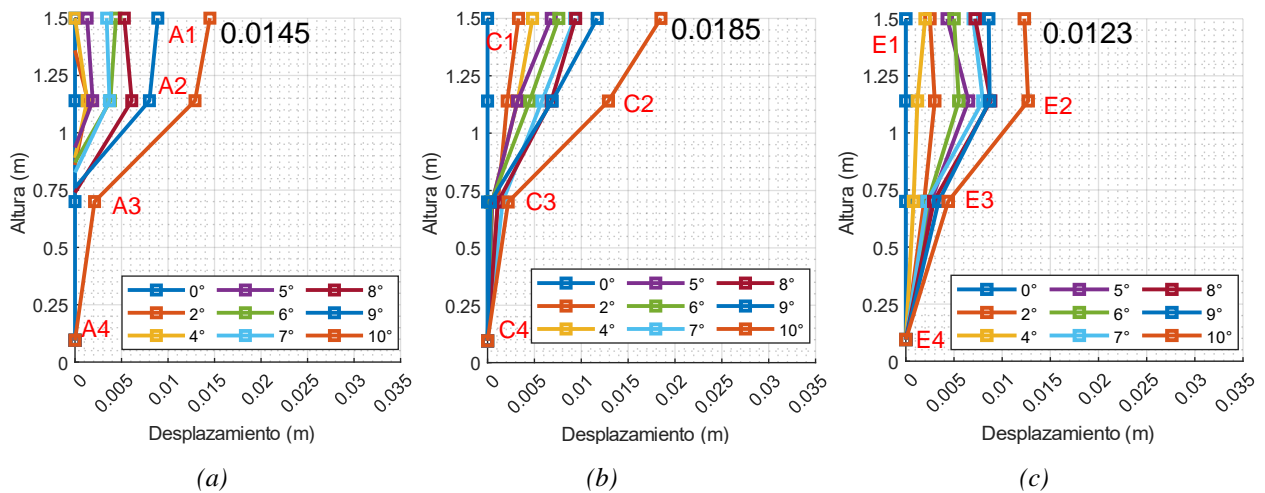


Figura 7-32: Desplazamiento relativo del muro 2 (a) Columna A (b) Columna C (c) Columna E

7.5. Calibración de las propiedades de contacto mediante modelización numérica

El modelo inicial (muro 0) y el modelo final (muro 1 y 2) se elaboraron en Abaqus/Explicit. La densidad y el coeficiente de fricción de los bloques utilizados es de 2364 kg/m^3 y 0.7 ($\mu = \tan 35^\circ$) respectivamente, los cuales son resultados obtenidos de la campaña experimental. Entonces las variables a calibrar en los modelos son la rigidez normal (K_n) y la rigidez tangencial (K_t). Sin embargo, se consideró que la rigidez tangencial sea la mitad de la rigidez normal, al igual que en diversos casos de estudio (Santa Cruz et al., 2021; Ita et al., 2023). En la *Figura 7-33a* y *Figura 7-33b* se muestran los modelos inicial y final en Abaqus respectivamente. El mallado se realizó por medio de hexaedros tipo C3D8R, con tal de que cada bloque tenga por los menos 4 hexaedros por lado.

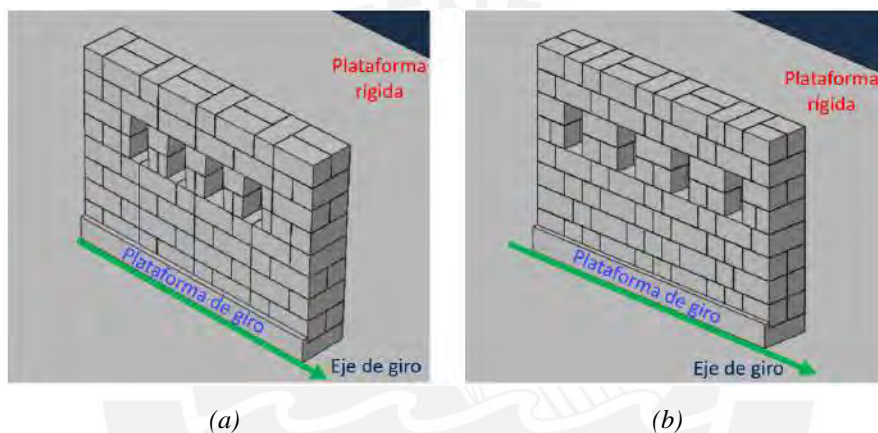


Figura 7-33: Modelos en Abaqus/Explicit (a) Modelo inicial (muro 0) (b) Modelo final (muro 1 y 2)

Como se aprecia en la *Figura 7-33*, se han considerado 2 plataformas. Una plataforma rígida de base y una plataforma de giro. La plataforma de base está empotrada, es decir, no puede trasladarse ni girar. Por otro lado, la plataforma de giro únicamente puede rotar en el eje de giro mostrado en la *Figura 7-33*. También, se muestra que la plataforma de giro tiene una saliente hacia arriba de $0.05 \times 0.05 \text{ m}$, el cual representa a la barra de sujeción en la plataforma de giro real (*Figura 7-10*). Esta saliente evita que el muro se deslice desde su base al igual que en los ensayos de la campaña experimental.

La evaluación se realiza de manera explícita con un incremento de tiempo de 0.0001 s , con los siguientes pasos:

- Paso 1, gravedad (0 a 2 s): En el primer segundo se aplica la gravedad de manera lineal y luego se mantiene constante hasta 2 s.
- Paso 2, giro normal (2 a 10 s): Se realiza el giro en la plataforma de giro con una velocidad de $1^\circ/\text{s}$ (hasta 8° de giro). La velocidad es más rápida que el ensayo experimental debido a que el tiempo computacional era muy elevado (de 0 a 8°).

- Paso 3, giro lento (10 a 40 s): Se realiza el giro en la plataforma de giro con una velocidad similar al ensayo experimental: 0.2°/s (de 8 a 14°).

El tiempo computacional para el modelo inicial y el modelo final fue de 2h, y 2h y 11 min respectivamente.

En la *Tabla 7-7* se muestra el colapso real de los muros y de los modelos numéricos con diferentes K_n . Como se aprecia, el K_n de 4×10^8 N/m³ muestra ángulos de colapso similares a los obtenidos en los ensayos experimentales.

Tabla 7-7: Comparación de los ángulos de colapso de los ensayos experimentales y numéricos

Modelo	Caso	modelo inicial	modelo final
Ensayos experimental	muro 0	9.80°	-
	muro 1	-	10.65°
	muro 2	-	10.55°
Modelo numérico	$K_n = 2 \times 10^8$ N/m ³	8.00°	9.12°
	$K_n = 4 \times 10^8$ N/m ³	9.80°	10.36°
	$K_n = 6 \times 10^8$ N/m ³	10.44°	11.36°

En la *Tabla 7-8* se muestra la comparación de los desplazamientos relativos experimentales y numéricos para los modelos evaluados con K_n de 4×10^8 N/m³. En este caso se ha considerado solo 2 puntos superiores de evaluación, uno central (punto C) y otro a un extremo (punto E). En el muro 0 los desplazamientos relativos numéricos son ligeramente menores a los experimentales; sin embargo, son muy cercanos. Por otro lado, para los muros 1 y 2 antes de los 7°, el modelo numérico y experimental presentan resultados muy similares. Sin embargo, los desplazamientos relativos experimentales de los muros 1 y 2 a los 10° de giro son mucho menores al modelo numérico. Esto podría darse debido a que el modelo numérico tiende a caerse ligeramente antes que los experimentales, por lo que sus desplazamientos son mayores.

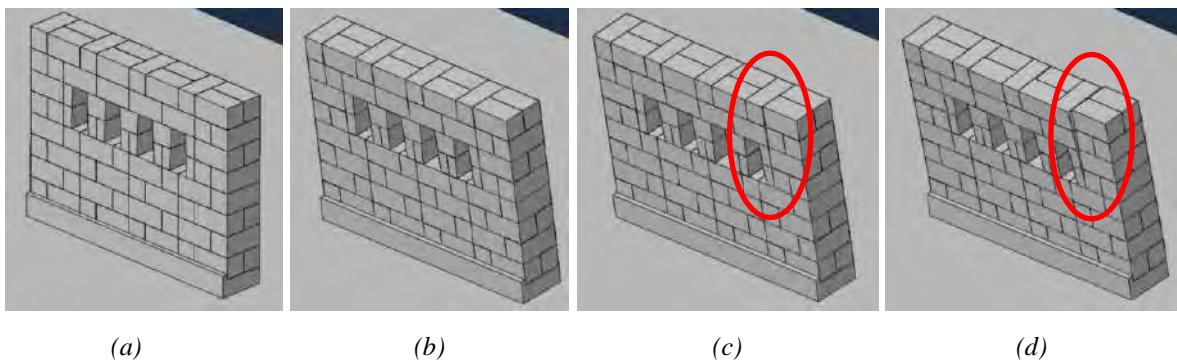
Tabla 7-8: Comparación del desplazamiento relativo de los ensayos experimentales y numéricos

Modelo	Ángulo de giro	Muro 0 (m)		Muro 1 (m)		Muro 2 (m)	
		C1	E1	C1	E1	C1	E1
Ensayos experimental	0°	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	5°	0.0130	0.0127	0.0101	0.0099	0.0068	0.0043
	7°	0.0222	0.0288	0.0134	0.0132	0.0093	0.0070
	10°	-	-	0.0200	0.0268	0.0185	0.0123
Modelo numérico	0°	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	5°	0.0082	0.0086	0.0083	0.0086	0.0083	0.0086
	7°	0.0155	0.0161	0.0155	0.0161	0.0155	0.0161
	10°	-	-	0.0460	0.0476	0.0460	0.0476

7.5.1. Evaluación de los resultados de los modelos calibrados

En esta evaluación se realiza la comparación de los modelos numéricos con los ensayos experimentales. Para este caso se utilizaron los resultados obtenidos para un K_n de 4×10^8 N/m³.

En la *Figura 7-34* se aprecia el estado del modelo inicial (muro 0) a diferentes grados de inclinación. Como se aprecia en la *Figura 7-34c* y *Figura 7-34d*, se aprecia el plano de falla en la continuidad vertical que es muy similar a lo que sucedió en el ensayo experimental del muro 0 (*Figura 7-19a* y *Figura 7-19b*); sin embargo, no se aprecia el levantamiento de la estructura desde la tercera hilada como el caso experimental. También, se aprecia que el colapso de las hornacinas en la *Figura 7-34e* es muy similar al del muro 0 (*Figura 7-19b*). Por otro lado, en la *Figura 7-34f* se muestra que queda una torre en la zona derecha luego del colapso. También en el muro 0 en aproximadamente 10.9° (*Figura 7-20b*) se aprecia que queda una torre similar; sin embargo, es del otro extremo donde se genera. Por último, en la *Figura 7-34g* se muestra un estado final de la estructura similar al del muro 0 (*Figura 7-20c*); sin embargo, los bloques que quedan sobre la plataforma no son exactamente los mismos al ensayo experimental.



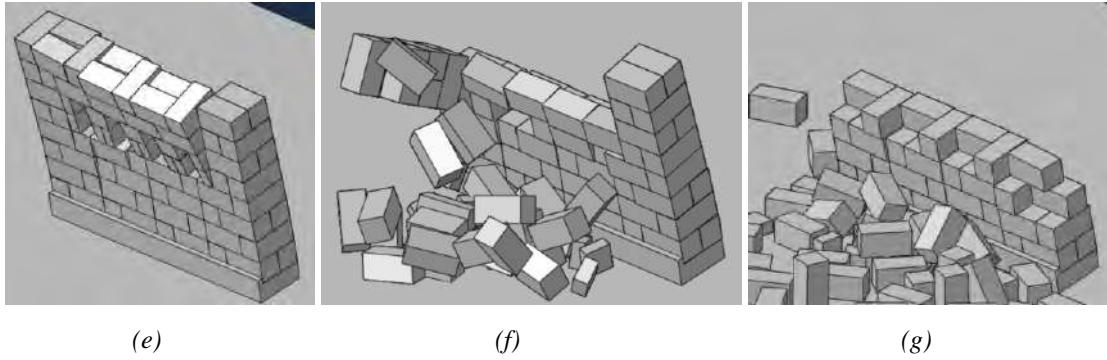


Figura 7-34: Estado del modelo inicial (muro 0) a distintos tiempos

(a) 0° (b) 8° (c) 9.2° (d) 9.8° (e) 10° (f) 10.1° (g) 10.8°

En la *Figura 7-35* se muestra el estado del muro (vista posterior) a 9.6° de giro, y como se aprecia, también se genera un plano de corte en el centro debido a la continuidad vertical como sucedió en el muro 0 (*Figura 7-19d*). Sin embargo, en el modelo numérico son más notorios también otros planos de falla.

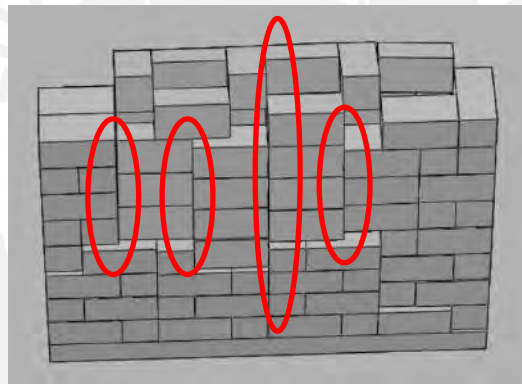


Figura 7-35.- Estado del modelo inicial (vista posterior) a 9.6° de giro

En la *Figura 7-36* se aprecia el estado del modelo final (muro 1 y 2) a diferentes grados de inclinación. Como se aprecia en la *Figura 7-36c* el colapso inicia en el mismo punto que los muros 1 y 2 (*Figura 7-24a* y *Figura 7-28a* respectivamente). Por otro lado, en la *Figura 7-36d* se aprecia que gran parte de los bloques superiores comienzan a caer como si fueran un solo cuerpo. Esto es también muy similar a lo que sucedió en los ensayos experimental del muro 1 y 2 (*Figura 7-24b* y *Figura 7-28b*, respectivamente). Por último, en la *Figura 7-36e* se muestra los bloques que quedan sobre la plataforma luego del colapso, y este caso es también muy similar a los bloques que quedaron sobre la plataforma en el muro 1 y 2 (*Figura 7-24c* y *Figura 7-28c* respectivamente).

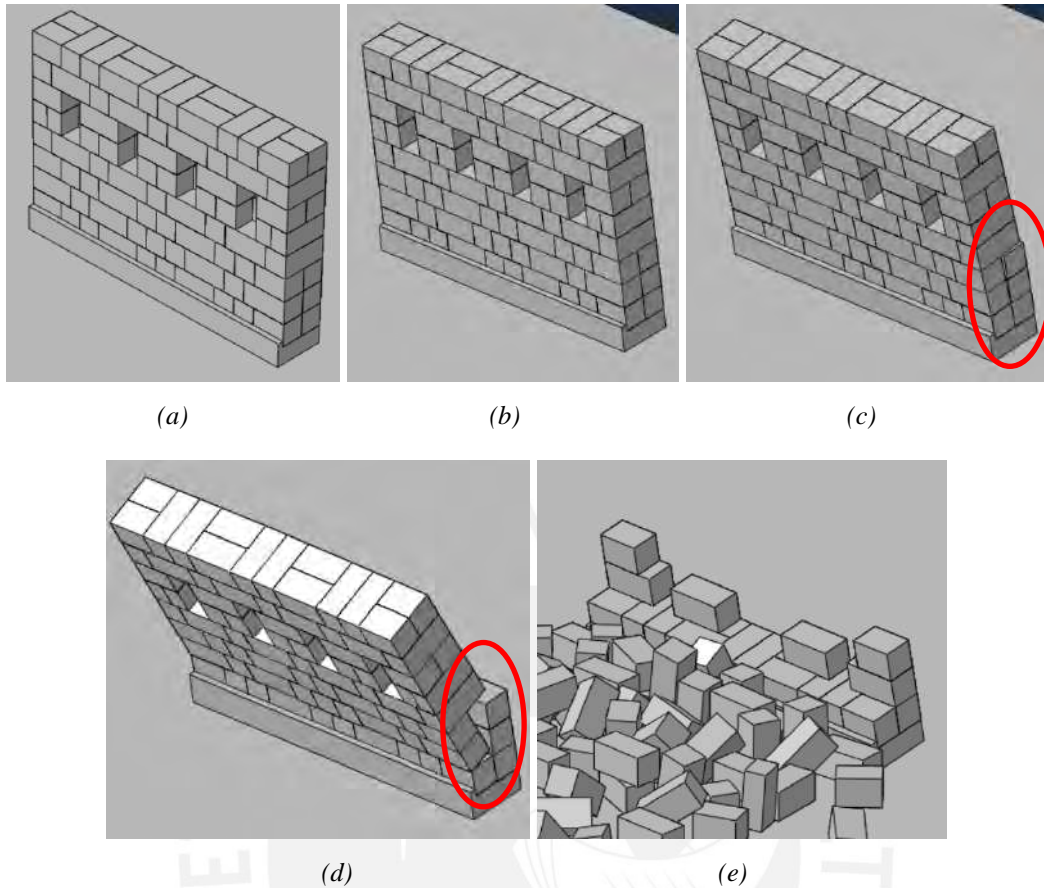


Figura 7-36: Estado del modelo final (muro 1 y 2) a distintos tiempos
 (a) 0° (b) 8° (c) 10.4° (d) 10.5° (e) 10.8°

En la *Figura 7-37* se muestra el estado del muro (vista posterior) a 10.6° de giro, y como se aprecia, también se genera una caída casi simétrica (*Figura 7-28d*).

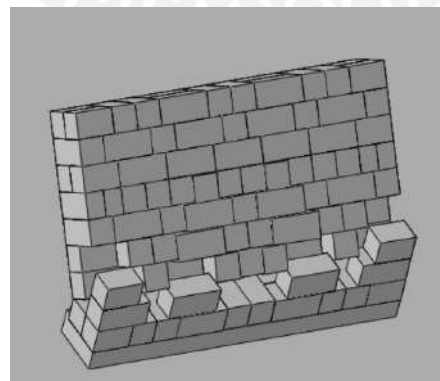


Figura 7-37: Estado del modelo final (vista posterior) a 10.6° de giro

En el anexo 6 se adjuntan los videos como un QR, de los ensayos experimentales y numéricos.

7.6. Resumen

Los modelos numéricos calibrados muestran resultados muy similares a los de la campaña experimental y esto se debe a que se está considerando la verdadera geometría de los bloques, y el uso de las propiedades físicas y mecánicas obtenidas experimentalmente. Sin embargo, los modelos no son exactamente iguales a los experimentales debido a que no se están considerando factores como las imperfecciones de los bloques, que los bloques reales no eran completamente regulares y además, que algunos de ellos tenían caras ligeramente cóncavas o convexas, lo cual generaba que el contacto entre los bloques no fuese perfecto. En cambio, en el modelo numérico esas consideraciones no se pueden incluir a tal detalle, por lo que existe una incertidumbre en los resultados. Por otro lado, tampoco se está considerando que las propiedades puedan cambiar durante el ensayo, por ejemplo, no se consideran un coeficiente de fricción estático y dinámico, lo cual podría influir en el movimiento de los bloques.

A pesar de todo esto, los resultados en desplazamientos relativos y giro son muy coherentes, ya que reflejan de muy buena manera lo obtenido en los ensayos experimentales. A futuro es importante incluir más variables en el ensayo numérico con el fin de que se logre una mayor precisión de los resultados.

Por último, la rigidez normal calibrada K_n de 4×10^8 N/m³ y el coeficiente de fricción de 0.7 son algo alejados de lo obtenido en el apartado 6.3 (calibración según los ensayos de Santa Cruz et al., 2021), de 2×10^8 N/m³ y 0.4 respectivamente. Esto se da debido a que los muros en ambos casos eran de tipologías diferentes, por lo que se podrían usar las propiedades de contacto calibradas en el apartado 6.3 para muros de junta seca con piedra de forma irregular, y la calibración de este capítulo para muros de piedra labrada encajada casi a la perfección. Por último, los valores obtenidos de densidad de la piedra artificial (concreto), y la rigidez normal tangencial son muy similares al estado del arte (*Tabla 2-4* y *Tabla 2-5*).

CAPITULO 8: MODELACIÓN NUMÉRICA FEM - DEM

8.1. Generalidades

En este capítulo se evalúa la misma sección del muro del complejo arqueológico de Sacsayhuamán evaluada en el capítulo 6, pero incluyendo el efecto del empuje del terreno mediante la introducción de esferas en el modelo numérico. Otra diferencia con lo evaluado en el capítulo 6 es que para este caso el modelo geométrico se obtiene por medio del programa desarrollado en Python y presentado en el capítulo 4. También, en este modelo se usan las propiedades obtenidas en la campaña experimental y de calibración del capítulo 7, y se evalúan numéricamente las frecuencias predominantes de la estructura usando el enfoque de vibraciones. Por último, se analiza la capacidad estructural del muro frente a los 3 registros sísmicos del Perú evaluados en el capítulo 6. La fuerza dinámica de empuje del terreno obtenida de las simulaciones numéricas se compara con el valor calculado mediante el método de Mononobe-Okabe (Mononobe y Matsuo, 1929; Okabe, 1926).

Tener en cuenta que para este caso se utiliza una propuesta para la modelación FEM – DEM, el cual es del tipo FEM modelado con propiedades de contacto y sólidos rígidos. No se utilizó el método FDEM de Munjiza (2005) presentado en el apartado 2.5, ya que Abaqus no tiene incorporado los algoritmos necesarios para este tipo de evaluación.

8.2. Método de Mononobe-Okabe

La fuerza de empuje activa de los suelos a muros de contención debido a los sismos puede ser evaluado de manera simplificada por medio de la teoría pseudoestática de Mononobe-Okabe (Mononobe y Matsuo, 1929; Okabe, 1926). En la *Figura 8-1* se aprecia un esquema de las fuerzas actuantes en un muro debido a un terreno retenido, donde ϕ es el ángulo de corte del suelo. Para este caso se considera el efecto de una fuerza de inercia actuante uniformemente debido al relleno, usando una cuña de suelo tipo Coulomb con sus componentes horizontal $k_h \cdot W$ y vertical $k_v \cdot W$ (Koseki et al., 1998). Tener en cuenta que k_h y k_v son los coeficientes del sismo horizontal y vertical respectivamente.

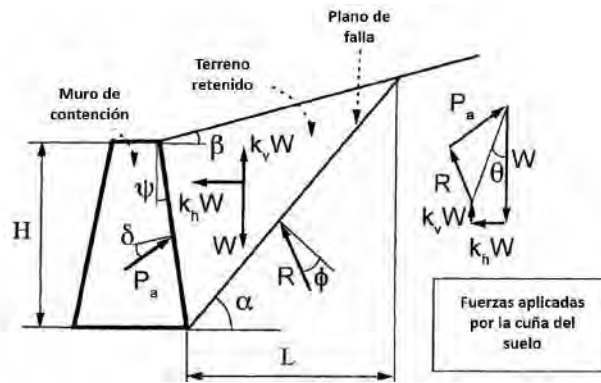


Figura 8-1: Diagrama esquemático de las fuerzas actuantes por la cuña del suelo asumidas por el método de Mononobe-Okabe

Editado de: Koseki et al., 1998

La presión activa del suelo (P_a) se obtiene por la ecuación 8-1.

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 (1 - k_v) k_a \quad (8-1)$$

Donde γ es el peso unitario del terreno, H es la altura del muro en el cual se aplica el empuje, y k_a es el coeficiente de la presión activa del suelo, el cual se obtiene mediante la ecuación 8-2.

$$k_a = \frac{\cos^2(\phi - \psi - \theta)}{\cos \theta \cos^2 \psi \cos(\delta - \psi - \theta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi - \beta - \theta)}{\cos(\delta + \psi + \theta) \cdot \cos(\psi - \beta)}} \right]^2} \quad (8-2)$$

Para este caso el ángulo θ se obtiene con la ecuación 8-3:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{k_h}{1 - k_v} \right) \quad (8-3)$$

Los coeficientes del sismo horizontal y vertical se obtienen de la siguiente manera:

$$k_h = \frac{a_h}{g} \quad (8-4)$$

$$k_v = \frac{a_v}{g} \quad (8-5)$$

Donde a_h y a_v son aceleraciones pseudoestáticas horizontal y vertical respectivamente, y g es la gravedad.

8.3. Modelación numérica de un muro del sitio arqueológico de Sacsayhuamán

Por medio del programa desarrollado en el capítulo 4 se obtiene el modelo geométrico de la estructura. En la Figura 8-2a se aprecia el muro de la Figura 6-9b pero sin la zona del cielo y algunas piedras de fondo que no pertenecen al muro en sí. Este filtrado se realiza con el fin de que el programa sea más eficiente en la ubicación

de los sólidos. En la *Figura 8-2b* se aprecia los contornos obtenidos por medio del programa en Python. Se utilizó las siguientes variables con el código 1: `blurgaussiano = 55`, `coloracionbordes = 120`, `detallado = 0.0001`, `tano = 170`, `baseimagen = 8.64` y `K = 15`. En la *Figura 8-2c* se muestra el modelo en Abaqus con 40 sillares numerados y 5 puntos de estudio en la parte superior. Los puntos A, B, C, D y E corresponden a los bloques 35, 38, 39, 40 y 33 respectivamente. Si se considerase el punto (0, 0) el punto inferior izquierdo del bloque 1, entonces las coordenadas de los puntos A, B, C, D y E son: (1.835, 4.825), (5.433, 4.509), (6.208, 4.468), (6.969, 4.380) y (8.564, 3.565). Tener en cuenta que el eje X va a lo largo del muro (derecha positiva), el eje Y es la vertical (positivo hacia arriba) y el eje Z es el eje perpendicular al plano del muro (positivo alejándose del relleno, *Figura 8-2c*).

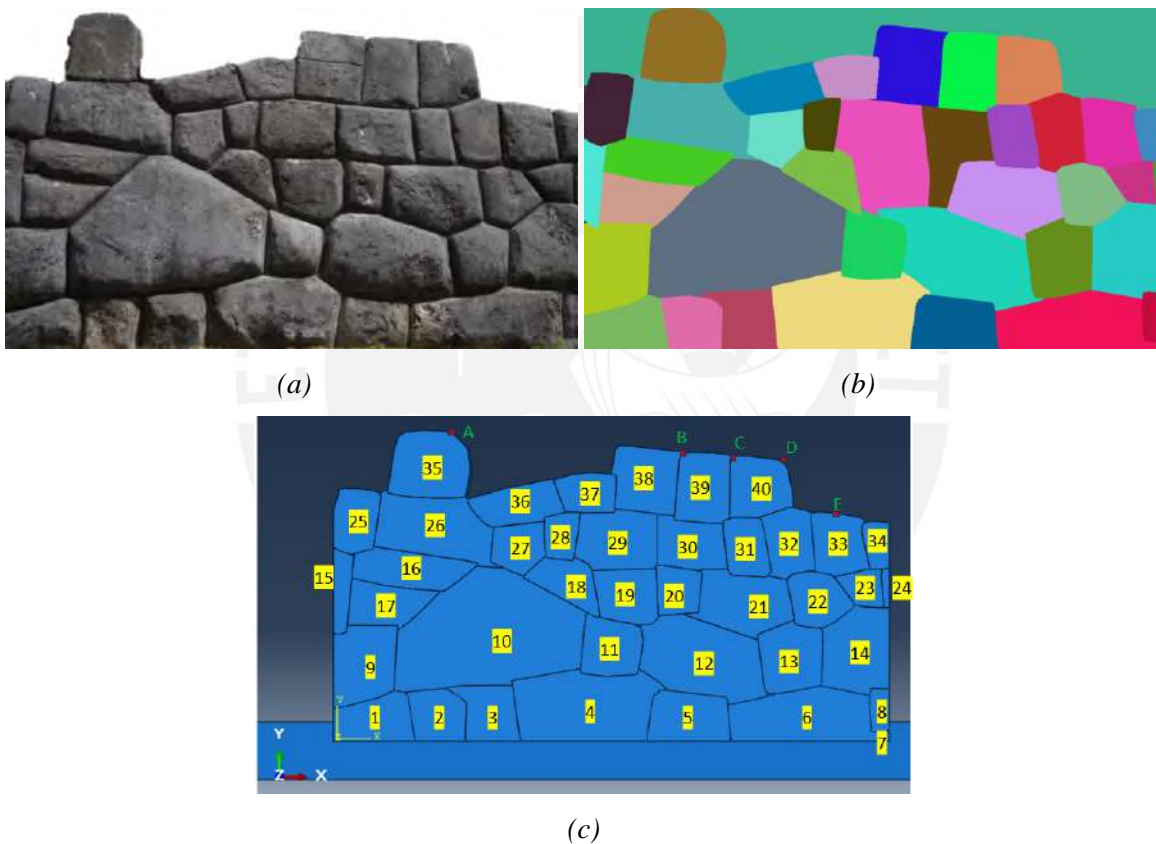


Figura 8-2: Obtención del modelo geométrico (a) Muro real (b) Modelo geométrico en Python

Inicialmente se consideró el grosor del muro como 0.8 m; sin embargo, debido al empuje del terreno por gravedad, la estructura se desplazaba en el punto superior casi 9 cm, por lo que era inadmisibles. Por lo tanto, se buscó mayor información, y según Mar y Beltrán-Caballero (2013), el grosor de la base del muro suele tener entre 1 a 2 m de grosor, por lo que se considero un grosor constante de 1.5 m. Tener en cuenta que se consideró un grosor constante en el muro y no con una pendiente, ya que el programa fue desarrollado para diseñar bloques de un mismo grosor y no variable.

Para la modelación numérica se consideró el modelo geométrico del muro y además el suelo representado por esferas tipo DEM como se muestra en la *Figura 8-3a*. El muro y las esferas se encuentran sobre una plataforma discreta rígida sin masa, la cual se encuentra empotrada. La primera fila de bloques (bloques del 1 al 7) se encuentran empotradas a la plataforma. Por otro lado, se buscó que las esferas sean del menor tamaño posible, con tal de que representen de manera más adecuada el terreno detrás de la plataforma. El diámetro de las partículas utilizadas es de 0.20 m y en total se tienen 22661 esferas distribuidas en un arreglo de $43 \times 31 \times 17$ (largo, profundidad y alto). Este total de esferas se encuentran almacenadas por los lados con 3 plataformas y el muro como se aprecia en la *Figura 8-3a*. Las plataformas son rígidas discretas y están empotradas con tal de que las esferas generen una fuerza de empuje al muro y a las 3 plataformas de lado. Por otro lado, como se sabe según la teoría de Rankine (Das, 2015), el ángulo que podría formar el terreno al deslizarse, ya sea en empuje activo o pasivo es de $(45 + \phi/2)$ o $(45 - \phi/2)$ respectivamente, y como se conoce el ángulo de fricción de estos muros ($\phi = 31^\circ$), entonces el ángulo de colapso es de 60.5° o 29.5° respectivamente. Por este motivo, se consideró un caso más conservador, es decir, un ángulo de deslizamiento de 29° , por lo que la profundidad del relleno sería de aproximadamente 6.13 m ($3.4 \times \cot 29^\circ$). Sin embargo, como las esferas tienen un diámetro de 0.20 m, se consideró una profundidad de 6.20 m (*Figura 8-3b*).

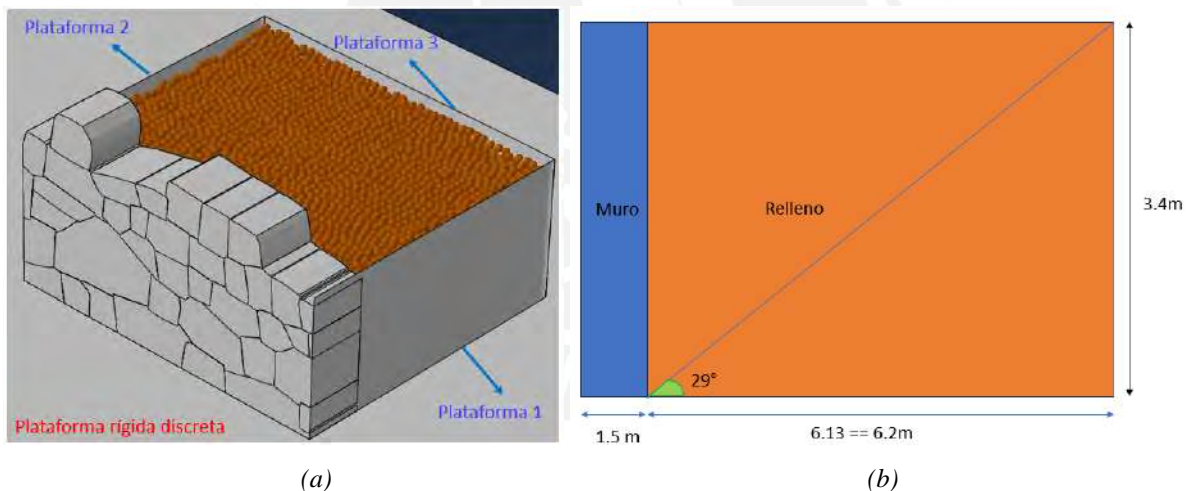


Figura 8-3: Modelo realizado en Abaqus (a) Vista 3D (b) Bosquejo de la vista lateral

El mallado en el muro se realizó por medio de hexaedros tipo C3D8R, con tal de que cada bloque tenga por los menos 4 hexaedros por lado. Por otro lado, las plataformas tenían un mallado de cuadrados de 0.2 m de lado del tipo R3D4. Se recomienda que el mallado de estas plataformas sea máximo del diámetro de las esferas, ya que sino los resultados son muy variables. Además, no se recomienda la solución por medio de multiprocesadores en la versión actual de Abaqus, ya que las soluciones de este modo todavía requieren algunas mejoras.

Tener en cuenta que en estas estructuras se ha utilizado roca caliza en general y según Agurto (1987) la roca

caliza usado por los Incas suele tener una densidad de 2200 kg/m^3 (Tabla 2-2), lo cual es muy cercano a la densidad del concreto usado (2364 kg/m^3) en la campaña experimental. También, Cuadros (2020) evaluó la densidad de piedras caliza Inca obteniendo un valor de 2290 kg/m^3 . Las densidades utilizadas en el modelo se muestran en la Tabla 8-1. La densidad de las partículas se obtuvo calculando el peso real del relleno, ya que se conoce la densidad real del terreno (1500 kg/m^3). Debido al acomodo de las esferas y el espacio entre partículas, la densidad de las esferas para lograr el peso del terreno es de 2760 kg/m^3 .

$$\text{Peso del terreno} = (1500 \text{ kg/m}^3 \times 9.81) \times (3.4 \times 6.2 \times 8.64 \text{ m})$$

$$\text{Peso del terreno} = 2.68 \times 10^6 \text{ N}$$

Tabla 8-1: Propiedades del modelo numérico

Propiedad	Bloques	Partículas
Densidad (kg/m^3)	2364	2760

Como se aprecia existen 3 tipos de interface: Bloque - bloque, bloque - partícula y partícula - partícula. El K_n , el K_t y el coef. de fricción se mantuvo igual en los tres tipos de interface con el fin de evitar más variables (Tabla 8-2).

Tabla 8-2: Propiedades de interacción

Propiedad	Bloque - Bloque	Bloque - Partícula	Partícula - Partícula
Rigidez Normal K_n (N/m^3)	4×10^8	4×10^8	4×10^8
Rigidez Tangencial K_t (N/m^3)	2×10^8	2×10^8	2×10^8
Coefficiente de fricción	0.7	0.7	0.7

8.4. Evaluación numérica solo por gravedad

El análisis se realizó en Abaqus/Explícit, con un paso de tiempo de 1×10^{-4} s, y considerando solo un paso de gravedad de 9 s, en el que la gravedad se incrementa de manera lineal por 1 s y luego se mantiene constante hasta los 8 s. En la Figura 8-4 y Figura 8-5 se muestra el peso del muro ($12.38 \times 10^5 \text{ N}$) y de las partículas ($2.68 \times 10^6 \text{ N}$) respectivamente. Como se aprecia la densidad de las partículas (Figura 8-5) se calibró con tal de que el paquete de esferas tenga el peso del terreno ($2.68 \times 10^6 \text{ N}$).

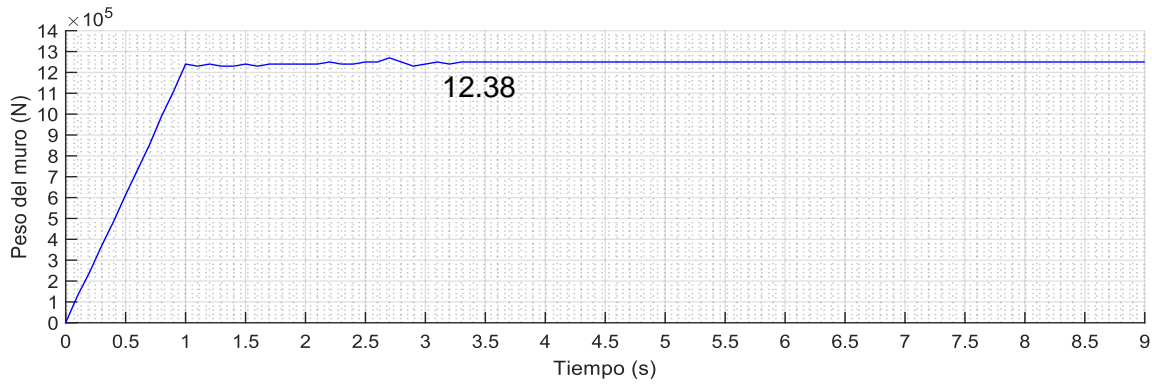


Figura 8-4: Comportamiento del peso del muro

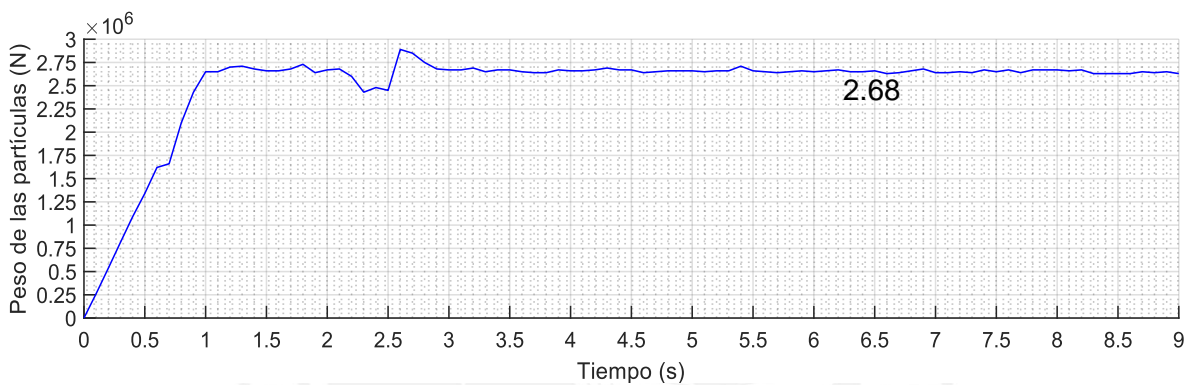


Figura 8-5: Comportamiento del peso de las partículas

Por otro lado, en la *Figura 8-6* se muestra la fuerza de empuje (reacción en Z) que realiza las partículas al muro, el cual es de 4.264×10^5 N. Como se aprecia, alrededor de los 4 segundos la fuerza de empuje es literalmente constante. Por último, en la *Figura 8-7* se muestra el desplazamiento relativo del punto A respecto a la base, fuera del plano del muro, el cual es de 0.007 m solo por el empuje del muro. Por lo tanto, si consideramos la deriva como este desplazamiento entre la altura del punto A se tiene $0.007/4.825 = 0.145\%$. Si tomamos de referencia el RNE E.030, en este se indica que para estructuras de albañilería la deriva máxima debería ser de 0.5%, y el valor obtenido es mucho menor a este.

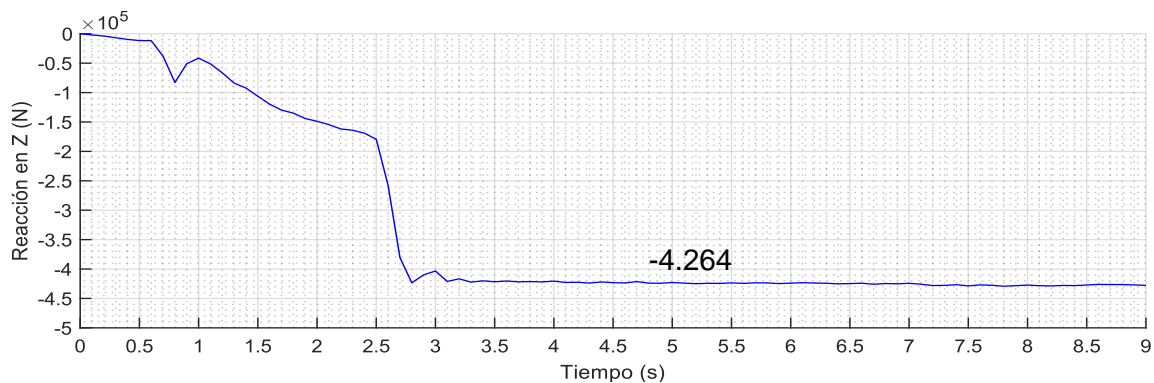


Figura 8-6: Fuerza de empuje de las partículas al muro

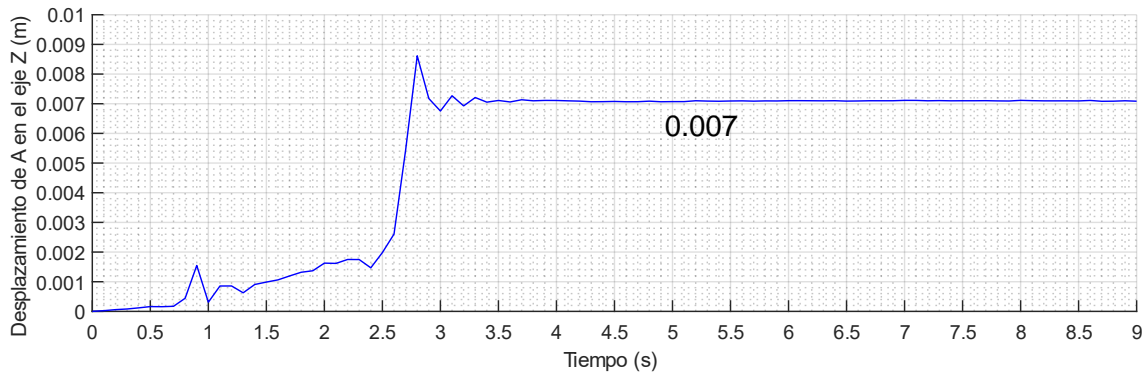


Figura 8-7: Desplazamiento relativo del punto A respecto a la base fuera del plano del muro

8.5. Enfoque basado en vibraciones

Para conocer las frecuencias predominantes del muro en su eje perpendicular al plano, el modelo se somete a un movimiento en la base correspondiente a la señal de ruido blanco usado en el apartado 6.4.2, que tiene un espectro de Fourier con frecuencias predominantes entre 0 a 20 Hz (Figura 6-10).

El análisis se realizó mediante Abaqus/Explicit, con un paso de tiempo de 0.0001 s. Para cada evaluación se consideraron los siguientes pasos:

- Gravedad (9 s): Se incrementa de manera lineal por 1 s y luego se mantiene constante hasta los 9 s.
- Ruido blanco (30 s): Todas las plataformas y la primera hilada de bloques del muro se desplaza en el eje Z, perpendicular al plano del muro, según el desplazamiento del ruido blanco.

El tiempo computacional de este proceso es de 9 h 31 min.

Luego del análisis, se obtuvo el desplazamiento en el eje fuera del plano del muro, de la base y los puntos A, B, C, D y E, y se obtuvo el espectro de Fourier de cada caso. Posteriormente, se calculó el cociente espectral de los espectros de Fourier de los puntos A, B, C, D y E con el espectro de la base para determinar las frecuencias predominantes del muro. La Figura 8-8 muestra el cociente espectral de cada punto con respecto a la base, y las frecuencias predominantes de este análisis. Como se puede observar, las frecuencias predominantes se encuentran antes de 0.5 Hz, prácticamente en los puntos 0.153 y 0.244 Hz. No se aprecia frecuencias predominantes a partir de frecuencias mayores a 0.5 Hz.

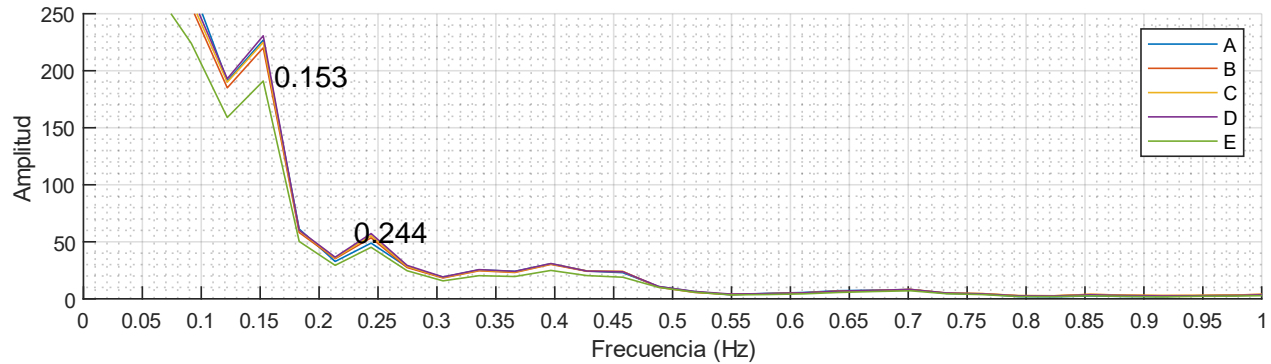


Figura 8-8: Cociente espectral de los puntos A, B, C, D y E respecto a la base

Dado que en la evaluación anterior se obtuvieron varias frecuencias predominantes antes de 0.5.Hz, la estructura fue sometida en Abaqus a movimientos sinusoidales fuera del plano en la base para conocer su comportamiento. El movimiento del suelo en el tiempo fue similar al usado en la ecuación 6.1:

$$\text{Desplazamiento} (t) = 0.5/(\omega_n^2) \sin (\omega_n t)$$

La base del sistema fue sometida a diversos movimientos sinusoidales con frecuencias que oscilaban entre 0.1 y 2 Hz. En todos estos casos, la aceleración máxima fue de 0.5 m/s^2 . El análisis fue nuevamente en Abaqus/Explicit, con un paso de tiempo de 0.0001 s. Para cada evaluación se consideraron los siguientes pasos:

- Gravedad (9 s): la gravedad se incrementa de manera lineal por 1 s y luego se mantiene constante hasta los 8 s.
- Movimiento sinusoidal (15 s): La plataforma se mueve según el desplazamiento sinusoidal configurado.

El tiempo de cómputo para este análisis fue de 15 h 31 min para cada frecuencia evaluada. En la Figura 8-9 se muestra el desplazamiento relativo del punto A en el eje Z respecto a la base. Tener en cuenta que las ondas en esta gráfica se encuentran desfasadas del eje horizontal, debido a que solo por gravedad el punto superior A se traslada 0.007.m fuera del plano (Figura 8-7). Como se aprecia desde 9 a 13 s se podría asumir que aún las esferas se acomodan debido al movimiento, y a partir de este punto se aprecia que la frecuencia de 0.2 Hz es aquel que produce el mayor desplazamiento relativo. Debido a esto se deduce que la frecuencia de 0.244 Hz es la frecuencia dominante del muro con esferas.

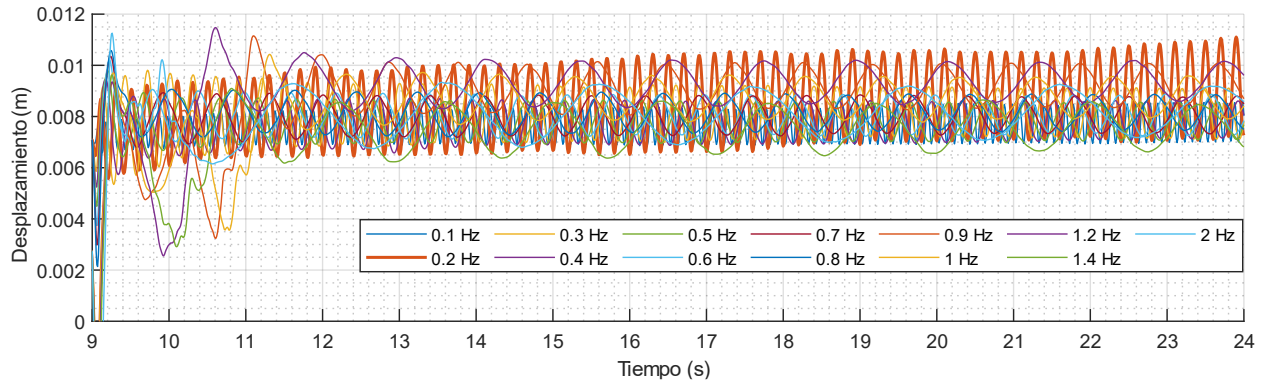


Figura 8-9: Desplazamientos relativos del punto A fuera del plano respecto de la base, para diferentes movimientos sinusoidales

8.6. Evaluación de la sección del muro a diferentes registros sísmicos peruanos

Se evaluó el comportamiento de la estructura por medio de los tres registros sísmicos utilizados en el apartado 6.4.3, los cuales fueron colocados en la base fuera del plano del muro: sismo de Paruro, 2014; sismo de Cusco, 2023; y sismo de Áncash, 1970 (Tabla 6-2).

El análisis fue nuevamente en Abaqus/Explicit, con un paso de tiempo de 0.0001 s. Para cada evaluación se consideraron los siguientes pasos:

- Gravedad (5 s): la gravedad se incrementa de manera lineal por 1 s y luego se mantiene constante hasta los 5 s (ya no fue necesario evaluar a 9 s debido a que alrededor de 4 s los elementos constituyentes se acomodan).
- Sismo (variable): La plataforma se acelera según el registro sísmico utilizado.

Si consideramos el método de Mononobe-Okabe, entonces se tendría que δ , β y ψ son cero, ya que se ha considerado el muro regular y el terreno es plano. Por otro lado, el k_v es cero en este caso, ya que no se está considerando las aceleraciones verticales. Entonces, el ángulo θ según la ecuación 8-3 es:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{k_h}{1 - 0}\right) = \tan^{-1}\frac{a_h}{g}$$

El coeficiente de la presión activa del suelo según la ecuación 8-2 es:

$$k_a = \frac{\cos^2(\phi - \psi - \theta)}{\cos \theta \cos^2 \psi \cos(\delta - \psi - \theta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta - \theta)}{\cos(\delta + \psi + \theta) \cos(\psi - \beta)}} \right]^2}$$

$$k_a = \frac{\cos^2(31^\circ - \theta)}{\cos \theta \cos(-\theta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(31^\circ) \sin(\phi - \theta)}{\cos(\theta)}} \right]^2}$$

Y la presión del terreno según la ecuación 8-1 es:

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 (1 - k_v) k_a$$

$$P_a = \frac{1}{2} (1500 \times 9.81) 3.4^2 (1 - 0) k_a$$

$$P_a = 85052.7 k_a$$

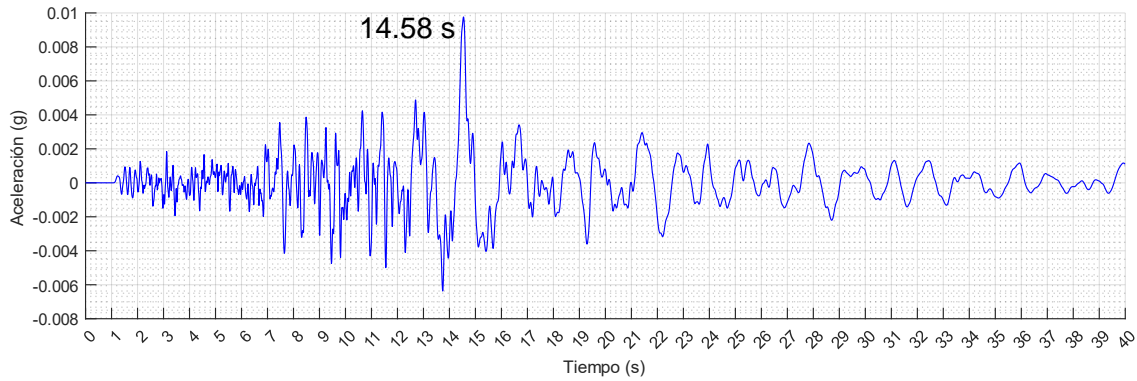
En la *Tabla 8-3* se muestra las presiones y fuerzas horizontales ejercidas al muro por el terreno debido a una aceleración horizontal a_h de 0, 0.1g, 0.2g, 0.3g, 0.4g y 0.5g. Para obtener la fuerza F que el relleno aplica al muro, se multiplicó la presión lineal (P_a) y la longitud del muro de 8.64 m. Como se aprecia, este método depende de la aceleración horizontal del terreno correspondiente al sismo considerado.

Tabla 8-3: Presiones y fuerzas por el terreno según la aceleración horizontal (Mononobe-Okabe)

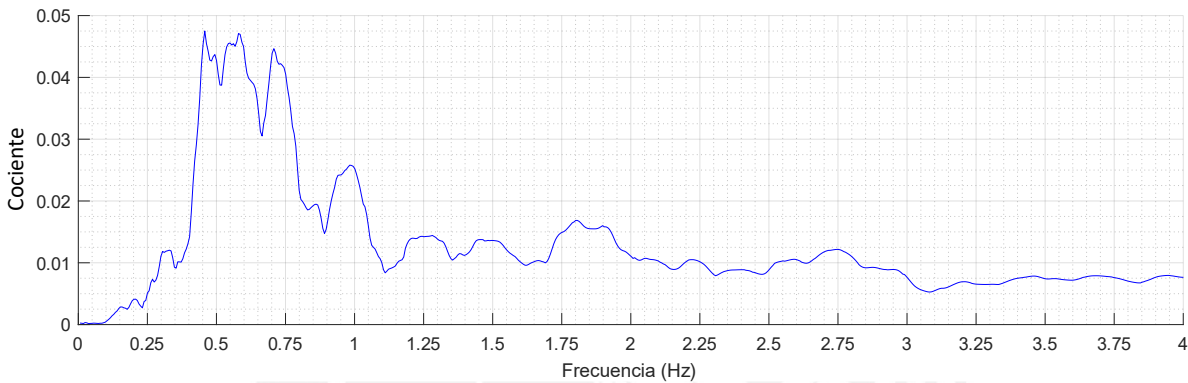
a_h	θ (rad)	k_a	P_a (kN/m)	F (kN)
0	0.0000	0.3201	27.23	235.23
0.1g	0.0997	0.3820	32.49	280.70
0.2g	0.1974	0.4568	38.85	335.67
0.3g	0.2915	0.5498	46.76	403.99
0.4g	0.3805	0.6711	57.08	493.19
0.5g	0.4636	0.8472	72.06	622.60

8.6.1. Comportamiento estructural frente al registro sísmico de Paruro, Cusco 2014

Se evaluó el comportamiento estructural de esta construcción, pero con el sismo escalado a un PGA diferente. En la *Figura 6-15a* se muestra la señal del sismo, y como se aprecia es de 60 s. El tiempo computacional para evaluar los 60 s era muy alto, por lo cual se cortó los primeros y últimos 10 s de la señal, ya que estas no cuentan con información relevante. En la *Figura 8-10a* se muestra el registro sísmico de Paruro recortado y en la *Figura 8-10b* su espectro de Fourier.



(a)



(b)

Figura 8-10: Sismo de Paruro, Cusco, 2014 (recortado) (a) Registro sísmico (b) Espectro de Fourier

La Figura 8-11 muestra el estado de la estructura luego del registro sísmico de Paruro con diversos PGA. A primera vista, la estructura no sufre daños a un PGA entre 0.1 a 0.5g. Sin embargo, con un PGA de 0.5g, el bloque 35 presenta un ligero movimiento hacia el terreno (Figura 8-11b). Para un PGA de 1g, el bloque 35 cae drásticamente en el terreno (Figura 8-11c) y varios bloques superiores (del 37 al 40) presentan desplazamientos remanentes hacia el terreno; sin embargo, no han colapsado. Ya para un PGA de 1.5g, los bloques superiores anteriores colapsan hacia el terreno (Figura 8-11d). Como se aprecia, el terreno actúa como un martillo que golpea al muro, y los bloques superiores que no tienen contacto con el terreno se desplazan hacia atrás. También, se verifica que si comparamos para un PGA de 0.1g y 1.5g, el terreno ha descendido. Esto debido a que el terreno se ha compactado más y le ha quitado espacio al muro (Figura 8-11d). Por último, para un PGA de 2.5g se muestra el colapso total del muro. En este caso se aprecia que las esferas no mantienen una cohesión lamentablemente, ya que se esparcen por la plataforma inferior (Figura 8-11e). El tiempo de cómputo para cada análisis fue entre 13 a 15 h para cada evaluación.

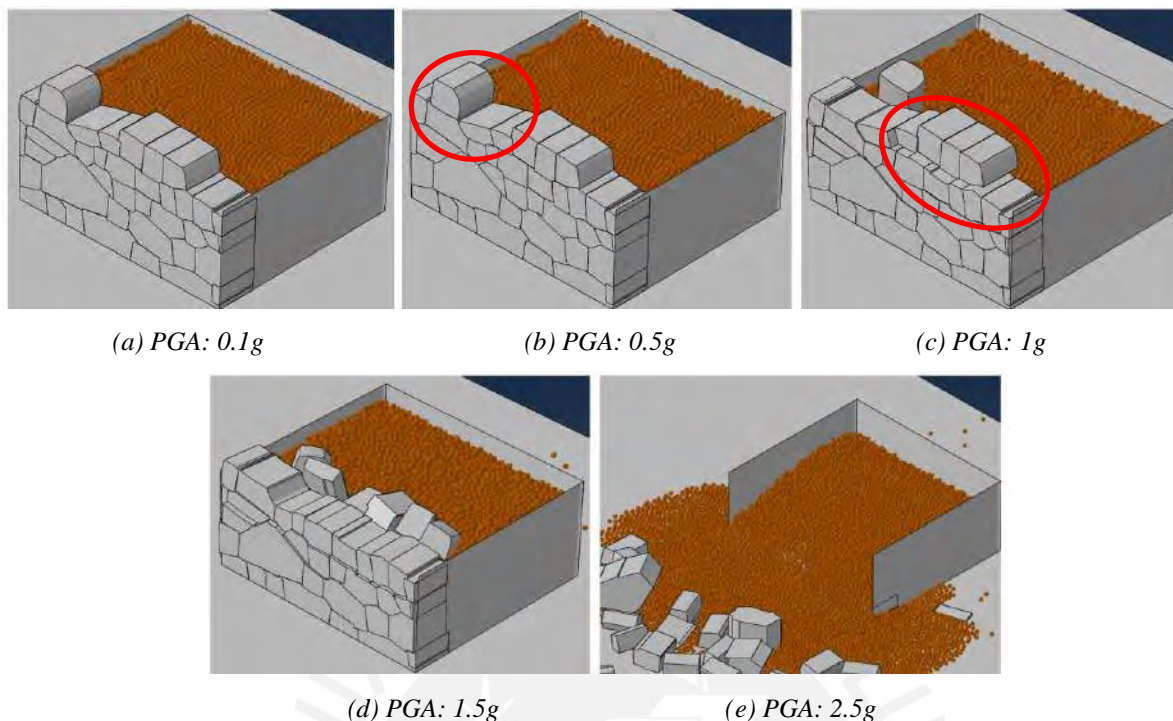


Figura 8-11: Estados de la estructura después del registro sísmico de Paruro escalado a diferentes PGA

La Figura 8-12 y Figura 8-13 muestran el comportamiento del desplazamiento relativo del punto A y E respecto a la base respectivamente, debido al registro sísmico a diferentes PGA. Para este caso se han cortado los 5 s iniciales de gravedad, con tal de que la señal tenga el mismo tiempo que el registro sísmico. Se tomaron estos puntos de evaluación ya que estos son los que presentan mayores desplazamientos remanentes en la estructura para los registros sísmicos de Paruro escalados a un PGA de 0.1g a 0.5g. En el caso del punto A (bloque 35) se aprecia que se desplaza en sentido contrario al terreno para un PGA de 0.1g a 0.4g (desplazamiento positivo); sin embargo, para un PGA de 0.5g el bloque se desplaza hacia el terreno (desplazamiento negativo). Esto también se pudo apreciar para los PGA de 1g y 1.5g en la Figura 8-11. En cambio, el punto E (bloque 33) se desplaza siempre en sentido contrario del terreno para los PGA de 0.1g a 0.5g. Esto se da, ya que el bloque 33 está en contacto con el terreno en todos los PGA evaluados, por lo que trasladarse hacia el terreno es casi imposible. Por otro lado, en ambos casos se aprecia un pico generado en la zona de 14.58 s, el cual es generado por el pico del registro sísmico. Entonces se deduce que estos picos en el registro sísmico pueden generar el mayor desplazamiento del sistema.

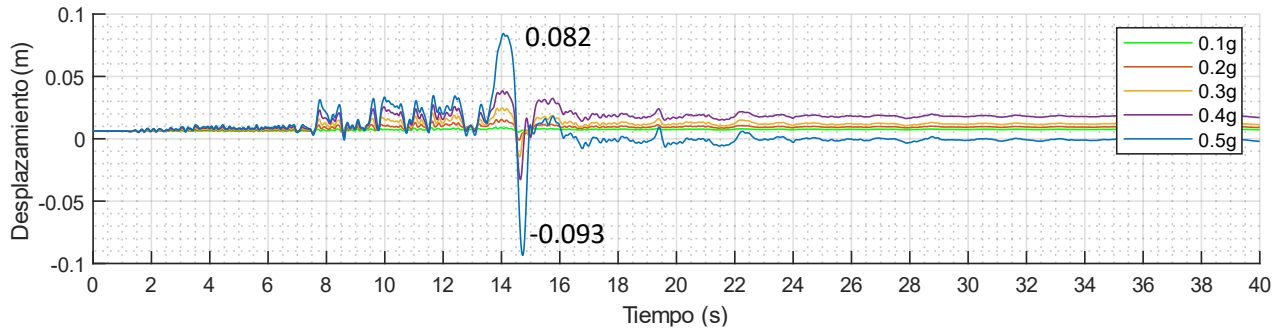


Figura 8-12: Desplazamiento relativo del punto A respecto a la base debido al registro sísmico de Paruro

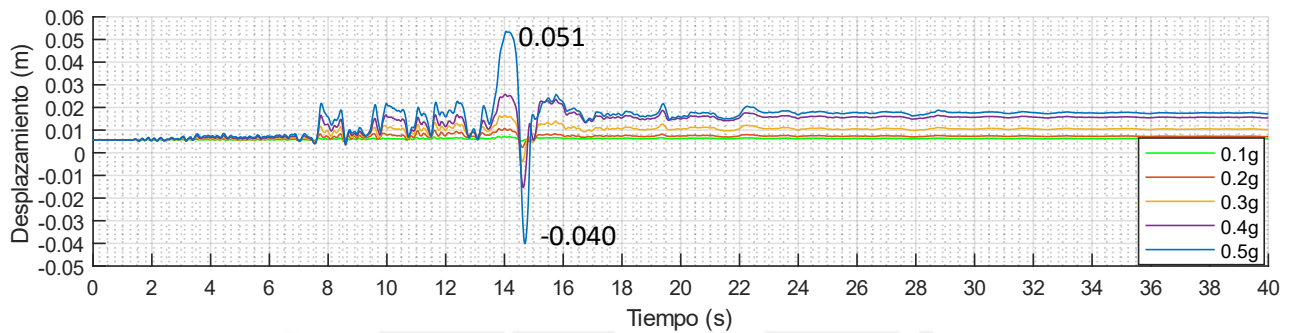
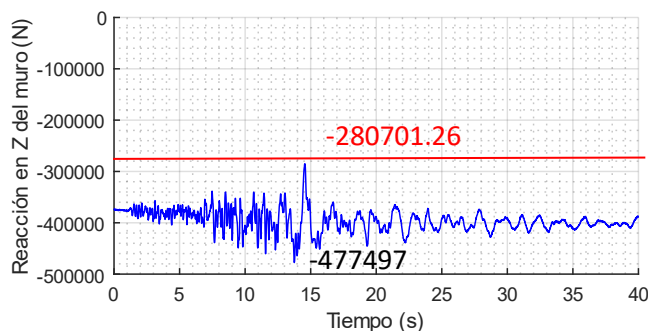
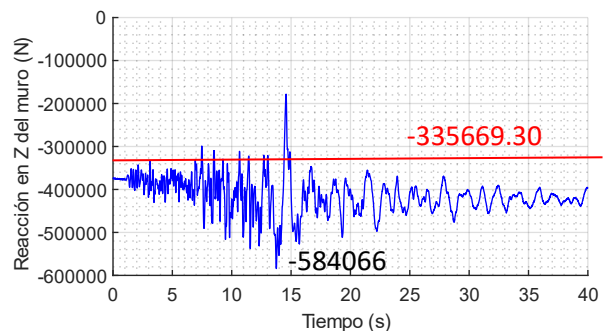


Figura 8-13: Desplazamiento relativo del punto E respecto a la base debido al registro sísmico de Paruro

Por último, en la *Figura 8-14* se presenta la reacción en Z de la base del muro para los distintos PGA evaluados. Para este caso se ha cortado los 5 s iniciales de gravedad, con tal de que la señal tenga el mismo tiempo que el registro sísmico. Las líneas y el valor en rojo son lo obtenido con el método de Mononobe-Okabe (*Tabla 8-3*), y los valores en **negrita** son las máximas reacciones obtenidas durante cada evento. Como se aprecia, las reacciones obtenidas con el método de Mononobe-Okabe son bajas para los casos de 0.1g a 0.5g; sin embargo, mientras mayor sea el PGA, los resultados obtenidos por Mononobe-Okabe son algo más cercanos a lo obtenido. También en todas estas gráficas se aprecia que el pico en 14.58 s del registro sísmico, genera también un pico en la gráfica de reacción fuera del plano.



(a) PGA: 0.1g



(b) PGA: 0.2g

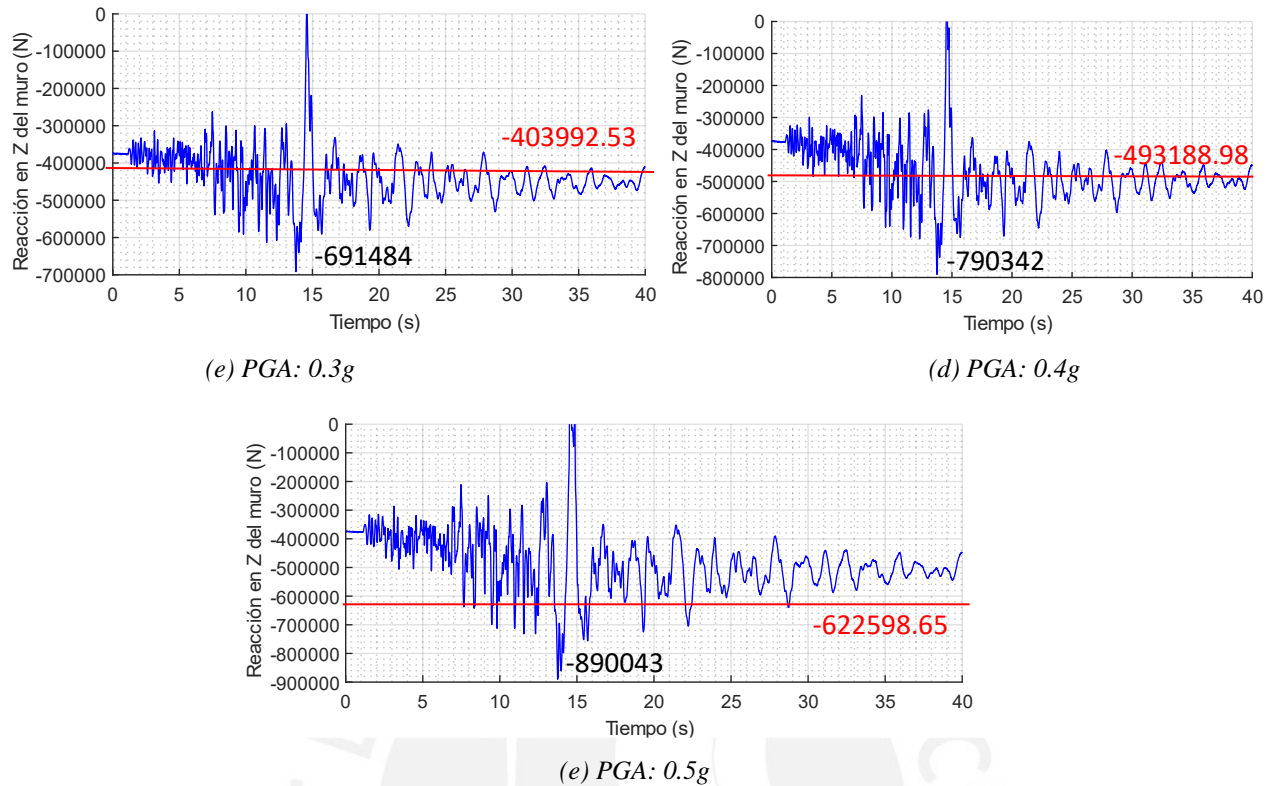
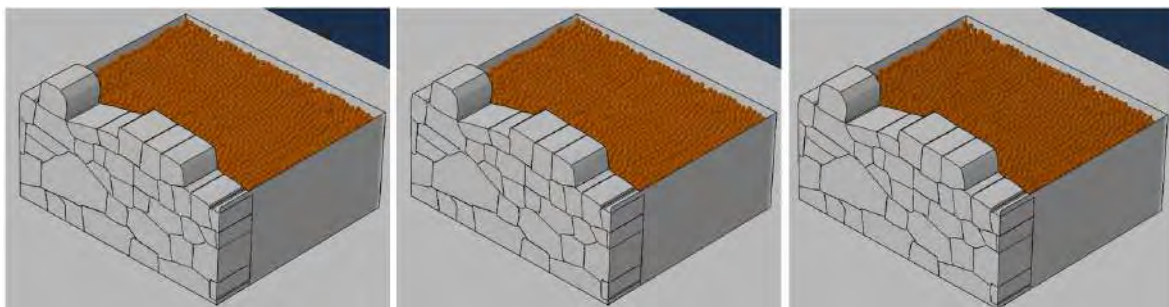


Figura 8-14: Reacción fuera del plano de la base del muro para cada caso de PGA del sismo de Paruro

8.6.2. Comportamiento estructural frente al registro sísmico de cusco 2023

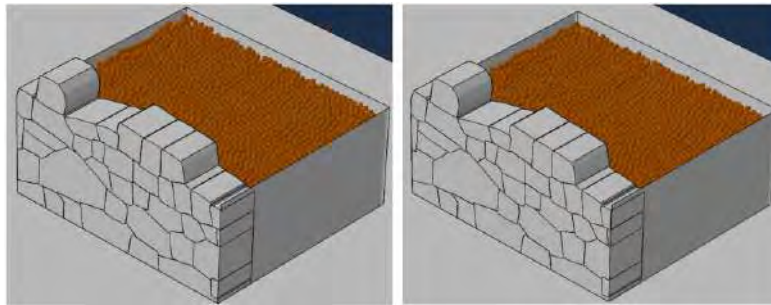
En este caso se utilizó el registro sísmico de Cusco, 2023 de la *Figura 6-18a*. De igual modo que el caso anterior se evaluó el comportamiento estructural de esta construcción, pero con el sismo escalado a un PGA diferente. La *Figura 8-15* muestra el estado de la estructura luego del registro sísmico con diversos PGA. Como se aprecia la estructura no sufre daños a simple vista a un PGA entre 0.1 a 2.5g, ya que en todos los casos se aprecia al muro sin daños. El tiempo de cómputo para cada análisis fue entre 9 a 10 h para cada evaluación.



(a) PGA: 0.1g

(b) PGA: 0.5g

(c) PGA: 1g



(d) PGA: 1.5g

(e) PGA: 2.5g

Figura 8-15: Estados de la estructura después del registro sísmico de Cusco, 2023 escalado a diferentes PGA

La Figura 8-16 y Figura 8-17 muestran el comportamiento del desplazamiento relativo del punto A y D respecto a la base respectivamente, debido al registro sísmico a diferentes PGA. Para este caso también se ha cortado los 5 s iniciales de gravedad. Se tomaron estos puntos de evaluación ya que estos son los que presentan mayores desplazamientos remanentes en la estructura para los registros sísmicos de Cusco, 2023 escalados a un PGA de 0.1g a 0.5g. Se aprecia que el punto A (bloque 35) y el punto D (bloque 40) tienen un movimiento muy similar, a pesar de que se encuentran a alturas diferentes. También en ambos casos, punto A y D, se aprecia un pico predominante el cual se genera en el tiempo 5.36 s, y coincide con el pico en la señal sísmica del inicio de las ondas transversales (Figura 6-18a).

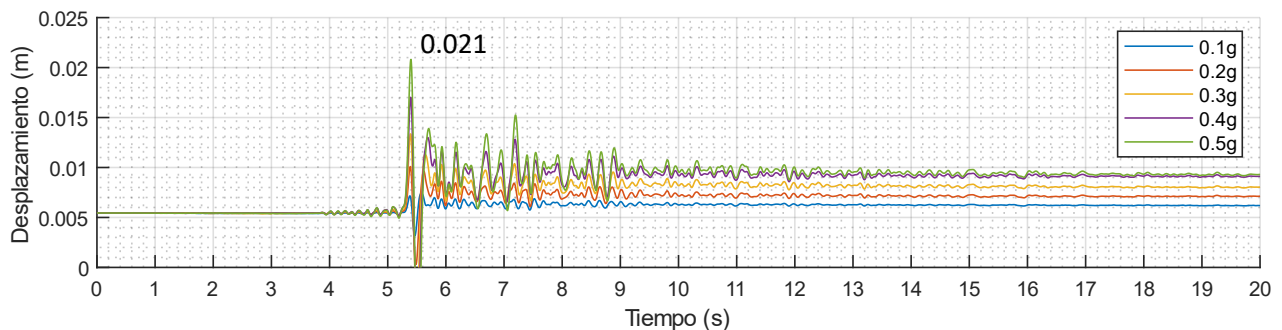


Figura 8-16: Desplazamiento relativo del punto A respecto a la base debido al registro sísmico de Cusco, 2023

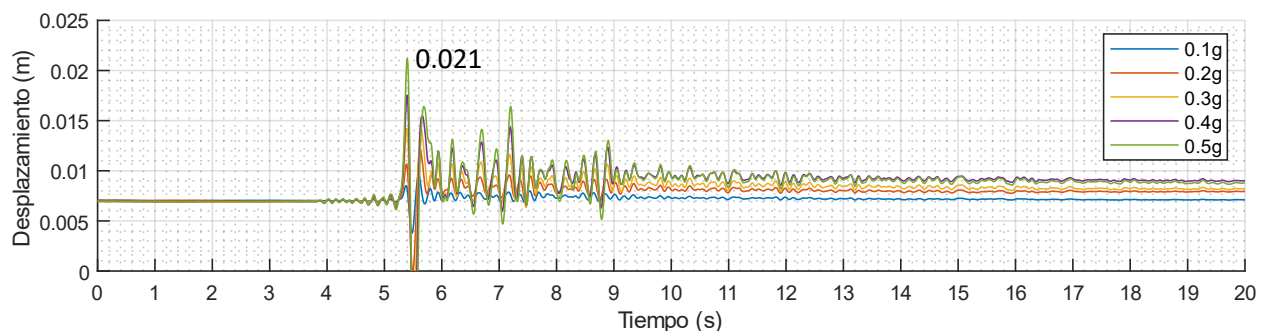


Figura 8-17: Desplazamiento relativo del punto D respecto a la base debido al registro sísmico de Cusco, 2023

Por último, en la Figura 8-18 se presenta la reacción fuera del plano en la base del muro para los distintos PGA evaluados. Para este caso también se ha cortado los 5 s iniciales de gravedad. Las líneas y el valor en rojo son lo obtenido con el método de Mononobe-Okabe (*Tabla 8-3*), y los valores en negrita son las máximas reacciones obtenidas durante cada evento. Al igual que en el caso del sismo anterior, las reacciones obtenidas con el método de Mononobe-Okabe son bajas para los casos de 0.1g a 0.5g. También en todas estas gráficas se aprecian los picos generados por la señal sísmica a 5.36 s.

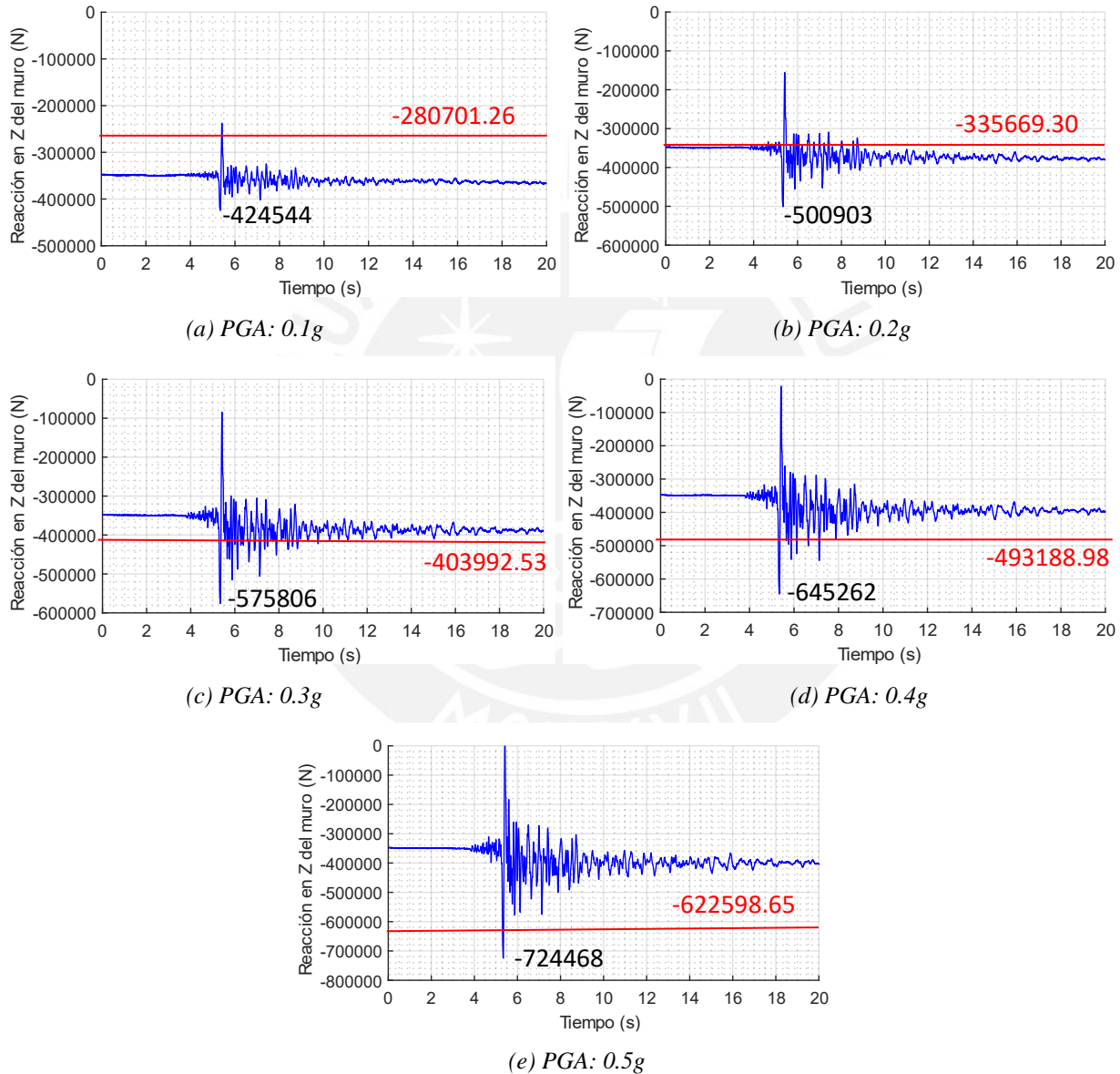


Figura 8-18: Reacción fuera del plano de la base del muro para cada caso de PGA del sismo de Cusco, 2023

8.6.3. Comportamiento estructural frente al registro sísmico de Áncash 1970

Nuevamente se evaluó el comportamiento estructural de la estructura, pero con el sismo de Áncash, 1970 escalado a diferentes PGA. En este caso se utilizó la misma señal de la *Figura 6-21a*. La *Figura 8-19* muestra el estado de la estructura luego del registro sísmico con diversos PGA. Como se aprecia la estructura no sufre daños a simple vista a un PGA entre 0.1 a 0.5g. Para un PGA de 1g, todo el muro desde la segunda hilada se traslada en el sentido contrario al terreno (*Figura 8-19c*). Para un PGA de 1.5g, este traslado es más notorio (*Figura 8-19d*). Por último, para un PGA de 2.5g se muestra que este traslado es aún mayor; sin embargo, la estructura no colapsa, pero se aprecia que, si el PGA hubiera sido un poco mayor, toda la estructura caería desde la segunda hilada por volteo (*Figura 8-19e*). El tiempo de cómputo para cada análisis fue entre 15 a 17 h para cada evaluación.

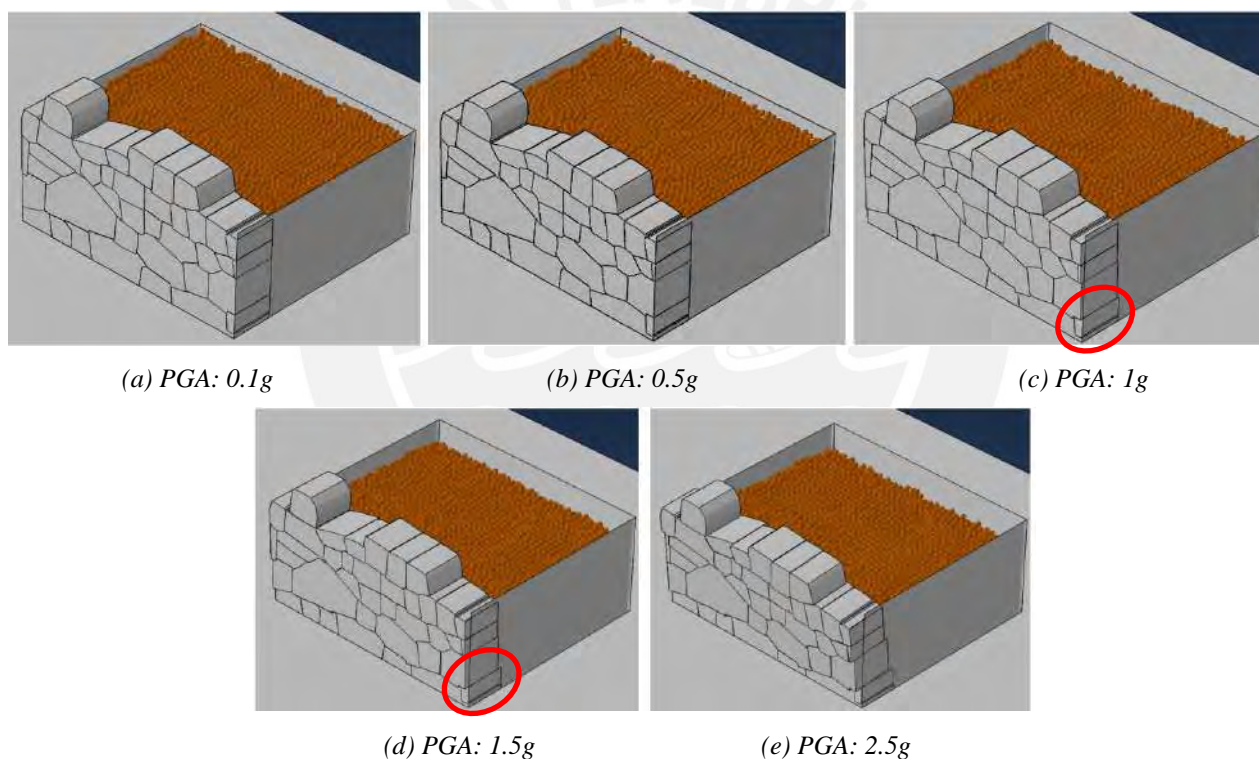


Figura 8-19: Estados de la estructura después del registro sísmico de Áncash escalado a diferentes PGA

La *Figura 8-20* y *Figura 8-21* muestran el comportamiento del desplazamiento relativo del punto A y B respecto a la base respectivamente, debido al registro sísmico a diferentes PGA. Para este caso también se ha cortado los 5 s iniciales de gravedad. Se tomaron estos puntos de evaluación ya que estos puntos son los que presentan mayores desplazamientos remanentes en la estructura para los registros sísmicos de Áncash escalados a un PGA de 0.1g a 0.5g. Se aprecia que el punto A (bloque 35) y el punto B (bloque 38) tienen un

movimiento muy similar. También en ambos casos, punto A y B, se aprecia un pico predominante el cual se genera en el tiempo de 9 s, el cual coincide con uno de los picos en la señal sísmica (Figura 6-21a).

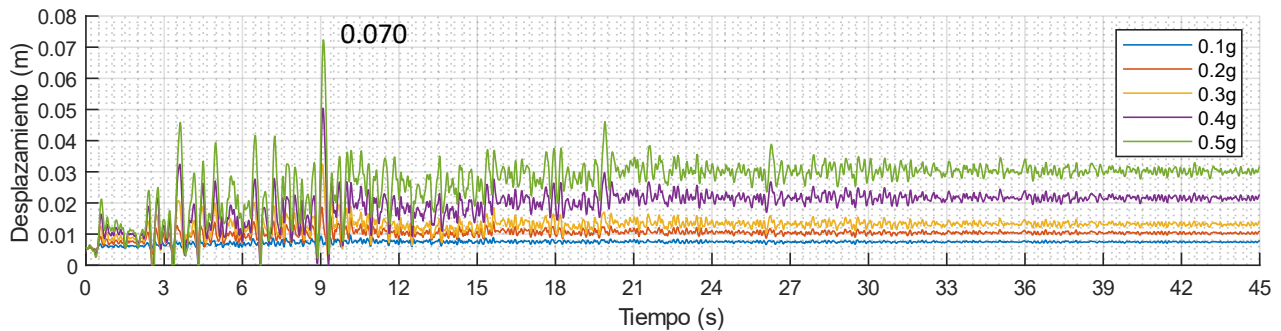


Figura 8-20: Desplazamiento relativo del punto A respecto a la base debido al registro sísmico de Áncash

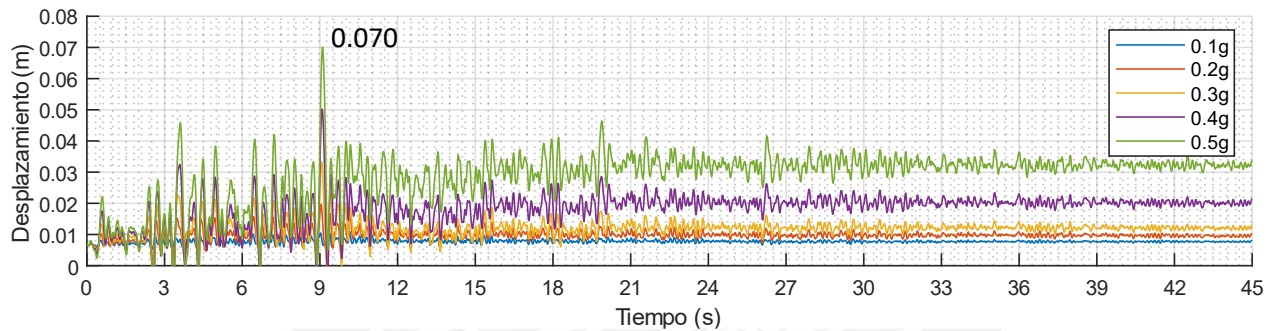
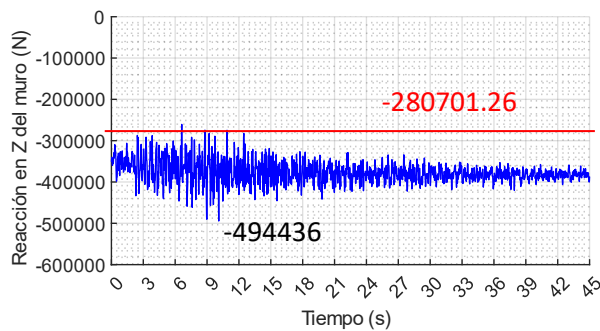
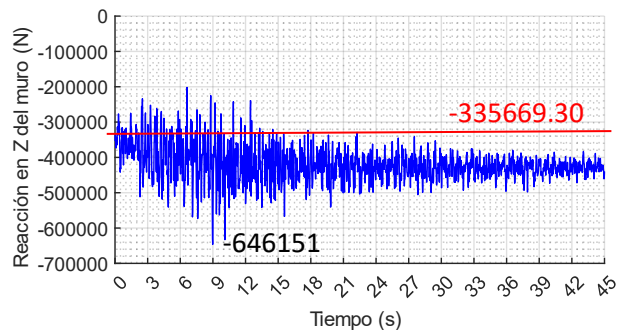


Figura 8-21: Desplazamiento relativo del punto B respecto a la base debido al registro sísmico de Áncash

Por último, en la Figura 8-22 se presenta la reacción Z en la base del muro para los distintos PGA evaluados. Para este caso también se ha cortado los 5 s iniciales de gravedad. Las líneas y el valor en rojo son lo obtenido con el método de Mononobe-Okabe (Tabla 8-3), y los valores en negrita son las máximas reacciones obtenidas durante cada evento. Al igual que en los casos de los sismos anteriores las reacciones obtenidas con el método de Mononobe-Okabe son bajas para los casos de 0.1g a 0.5g. También en todas estas gráficas se aprecian los dos picos de la señal sísmica entre 9 y 10.s (Figura 6-21a).



(a) PGA: 0.1g



(b) PGA: 0.2g

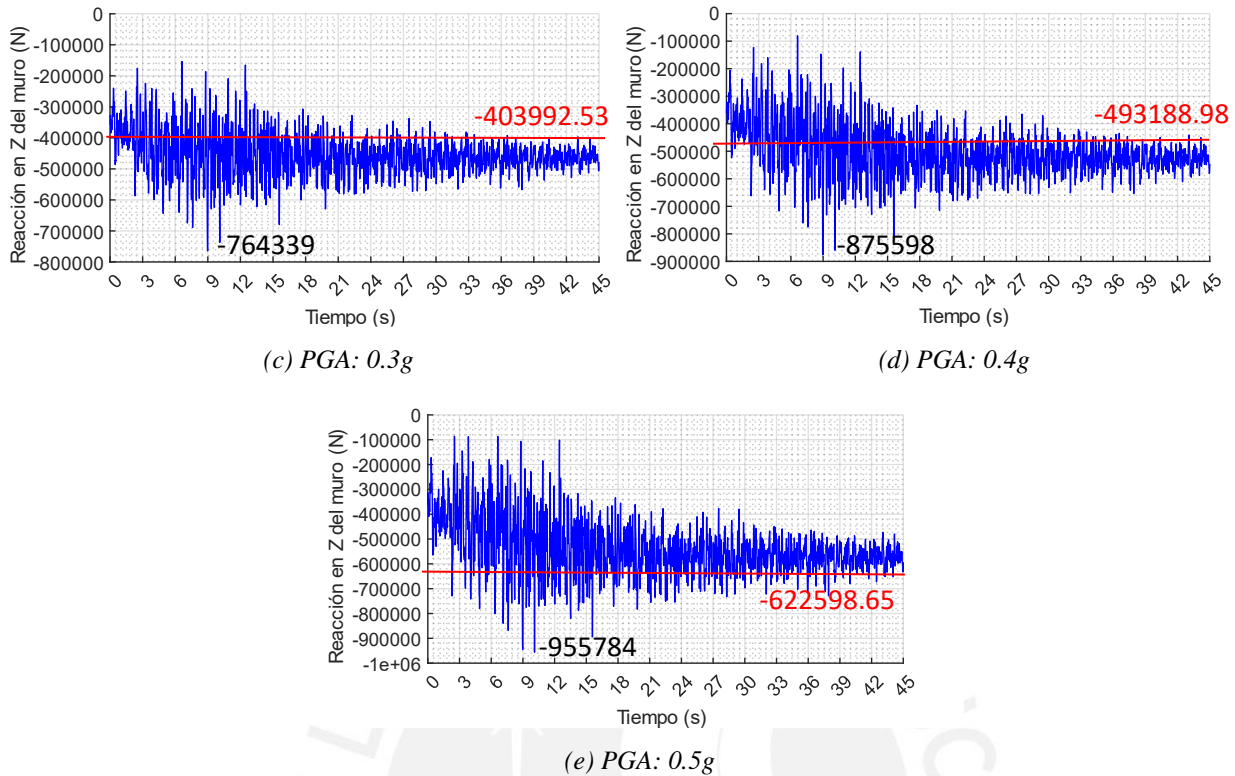


Figura 8-22: Reacción fuera del plano de la base del muro para cada caso de PGA del sismo de Áncash

8.6.4. Desplazamientos residuales de la estructura luego de la aplicación de cada registro sísmico

La Tabla 8-4 muestra los bloques que sufrieron los mayores desplazamientos remanentes al final de cada evento. Estos desplazamientos son relativos a la base y para cada caso se le ha restado 0.007 m (7 mm), el cual fue generado debido al empuje de las esferas solo por gravedad y no por el registro sísmico. Los bloques que sufrieron los desplazamientos más significativos fueron generalmente los de la parte superior del muro: bloques 35, 39, 39 y 40. Solo en el caso del sismo de Paruro, estas piedras superiores se trasladan hacia el relleno cuando el PGA del sismo era mayor o igual a 0.5g. Se aprecia que el mayor daño es causado por el sismo de Paruro, luego por el de Áncash, y, por último, el de Cusco del 2023. Como se apreció en los espectros de Fourier, el caso de Paruro tiene ligeras frecuencias menores a 0.5 Hz; el caso de Áncash también; sin embargo, para este caso no son las amplitudes que más se aprecian en el registro; y, por último, el registro sísmico de Cusco de 2023 tenía amplitudes menores a 0.5 Hz casi despreciables. Esto podría darnos una idea del daño que podrían tener estas construcciones, ya que mientras haya mayores amplitudes cercanas a la frecuencia de la estructura (0.244 Hz para este caso), el daño puede ser mayor.

Tabla 8-4: Máximo desplazamiento remanente después de cada evento (mm)

PGA	Sismo de Paruro, Cusco (2014)		Sismo de Cusco (2023)		Sismo de Ancash (1970)	
	Máximo desplazamiento residual (mm)	N° de piedra referida	Máximo desplazamiento residual (mm)	N° de piedra referida	Máximo desplazamiento residual (mm)	N° de piedra referida
0.1g	0.3	35	0.1	40	0.7	35
0.2g	8.4	35	0.9	40	3.7	35
0.3g	17.7	35	1.2	40	6.9	35
0.4g	18.8	33	2.1	35	15.7	35
0.5g	46.6	33	2.3	35	16.7	38
1g	Colapso	35	5.7	25	149.0	34
1.5g	Colapso	35, 37 al 40	13.2	39	326.5	40
2.5g	Colapso	Total	26.3	39	817.0	39, 40

Los desplazamientos relativos en esta evaluación parecen ser de pequeña magnitud para PGA menores a 0.4g. Sin embargo, es fundamental recordar que en estructuras patrimoniales se busca mantener la estructura sin el más mínimo daño, es decir, evitar que estas estructuras tengan deformaciones remanentes después de un evento sísmico. Como se puede observar, si los sismos tuvieran un PGA de 0.1g, el desplazamiento remanente es mínimo, menor a 1 mm, por lo que se podría concluir que no es un daño crítico. Con un PGA de 0.2g la estructura puede tener un daño de hasta 8.4 mm, lo cual podría ser un daño severo muy notorio en estas construcciones; y, por último, con un PGA de 0.3g o superior podemos inferir que el daño podría ser crítico. Como ya se mencionó, en el Cusco es posible que se genere un sismo con una magnitud Mw 7.2, y según un estudio geofísico, si la falla de Tambomachay provoca un sismo de Mw 7.01 se generaría un PGA mayor a 0.45g en los distritos de Poroy, Santiago, Cusco, Wanchaq, San Sebastián y San Gerónimo, lo que podría causar severos daños en las estructuras incas (Rosell et al., 2022).

8.6.5. Comparación de las reacciones de la base

En la Tabla 8-5 se muestra la comparación de las reacciones de la base en el eje Z para cada evaluación realizada. Como se aprecia, solo por gravedad la reacción en Z de la base era de gran magnitud, lo cual era superior al del método de Mononobe-Okabe para los PGA menores a 0.3g. Tener en cuenta que las propiedades de contacto entre partícula – partícula y bloque – partícula fueron considerados igual al del muro; sin embargo, estos podrían ser calibrados y tal vez así se pueda obtener los valores que indica Mononobe-Okabe. Para esto es importante que se realicen ensayos experimentales en el suelo con tal de obtener una adecuada calibración de las propiedades de contacto. Por último, en los estudios del estado del arte, algunos autores mencionan la incorporación de la rigidez y el coeficiente torsional (Shaikh et al., 2021), lo cual también podría ser importante en la calibración de estos modelos. Lamentablemente, la versión actual de

Abaqus todavía no tiene incorporadas estas propiedades y se espera que a futuro las pueda considerar en sus nuevas actualizaciones.

Tabla 8-5: Comparación de las reacciones de la base en el eje Z

Gravedad		Mononobe-Okabe	Sismo de Paruro, Cusco (2014)		Sismo de Cusco (2023)		Sismo de Ancash (1970)	
PGA	F (N)	F (N)	F máx (N)	Porcentaje de variación	F máx (N)	Porcentaje de variación	F máx (N)	Porcentaje de variación
0.1g	426412	280701.26	477497	70.1	424544	51.2	494436	76.1
0.2g		335669.3	584066	74.0	500903	49.2	646151	92.5
0.3g		403992.53	691484	71.2	575806	42.5	764339	89.2
0.4g		493188.98	790342	60.3	645262	30.8	875598	77.5
0.5g		622598.65	890043	43.0	724468	16.4	955784	53.5

En el anexo 6 se adjuntan los videos como un QR, del comportamiento del muro según cada registro sísmico.

8.7. Resumen

Como se muestra en este caso de estudio, una forma alternativa de evaluar el comportamiento estructural de construcciones irregulares de piedra es a través del método de elementos finitos-discreto (FEM - DEM), que combina la dinámica de cuerpos rígidos, las leyes de contacto y elementos tipo DEM. Tener en cuenta que el método planteado FEM – DEM, no es concretamente igual al modelo FDEM de Munjiza (2004) mencionado en estado del arte (apartado 2.5), ya que no incorpora métodos de fractura.

Este enfoque FEM – DEM reproduce adecuadamente el comportamiento dinámico de las construcciones de piedra de junta seca, los mecanismos de fallo que pueden ocurrir y una medición de los desplazamientos relativos de cada bloque de piedra. En este caso de estudio, la frecuencia dominante de la sección del muro de Sacsayhuamán era menor a 0.5 Hz (0.244 Hz). Por lo tanto, sismos intraplaca con frecuencias predominantes cercanas a este valor, podrían afectar la integridad de esta construcción. Para un terremoto con un registro sísmico similar al de Paruro de 2014 y un PGA de 0.2g, el desplazamiento remanente entre las piedras podría ser de hasta 8.4 mm, lo cual sería un daño muy grave para una estructura patrimonial tan importante. Tener en cuenta que según estudios se podría originar un sismo con un PGA mayor a 0.45g en Cusco.

Por otro lado, el modelo de partículas tipo DEM ayuda a simular el terreno de una manera eficaz ya que cada esfera solo tiene un nodo, lo cual reduce el tiempo computacional y así, se pueda utilizar más esferas para modelar de mejor manera el terreno. Se espera que Abaqus a futuro pueda incorporar propiedades de cohesión y rigidez torsional a las partículas tipo DEM, para obtener una simulación más sofisticada del comportamiento de los suelos.

CAPITULO 9: CONCLUSIONES

En este capítulo se resumen las principales conclusiones de la investigación desarrollada en la presente tesis doctoral, correspondientes al modelo de clasificación estructural de construcciones de piedra, los códigos desarrollados en Python para la segmentación de imágenes, la verificación del comportamiento de sólido rígido en Abaqus, la verificación del enfoque basado en vibraciones, la campaña experimental de ensayos por volteo de muros de bloques de junta seca, y la modelación numérica FEM - DEM.

9.1. Taxonomía de tipologías estructurales de construcciones de piedra en el Perú

La taxonomía realizada es una iniciativa de la clasificación estructural de construcciones de piedra en el Perú. Los criterios taxonómicos propuestos en esta investigación no solamente pueden ser usados para el Perú, sino para otros países que tengan diversas construcciones de piedra.

Por otro lado, de las visitas de campo se pudo verificar que las taxonomías más recurrentes en Puno y Cusco tienen las siguientes características según su uso:

- Para muros de agricultura: Época inca (I) – Agricultura (AG) – altura de muy pequeña a alto (vsh, sh, mh, t) – muro de soporte (S) – acabado rustico (RUST) – junta de mortero (MJ) – tamaños de piedra de pequeño a grande (S, M, L) – acabado de piedra natural (NAT)
- Para muros de vivienda: Época inca (I) – Vivienda (HO) – altura de mediana a muy alta (mh, t, vt) – muro de doble hoja con relleno intermedio (F2) – acabado rustico (RUST) – junta de mortero (MJ) – tamaños de piedra de pequeño a grande (S, M, L) – acabado de piedra natural y semi labrada (NAT, SHEW)
- Para muros ceremoniales: Época inca (I) – Ceremonial (CE) – altura de mediana a muy alta (mh, t, vt) – muro de doble hoja, doble hoja con relleno intermedio o de soporte (L2, F2, S) – acabado sedimentario o engastado (SED, PZL) – junta seca (DJ) – tamaños de piedra de mediano a grande (M, L) – acabado de piedra labrada (HEW)
- Para muros de recintos funerarios: Época preinca (PI) – Funeraria (FU) – altura de mediana a muy alta (mh, t, vt) – muro de varias hojas, doble hoja con relleno intermedio (L3, F2) – acabado sedimentario o engastado (SED, PZL) – junta seca (DJ) – tamaños de piedra de mediano a grande – acabado de piedra labrada (M, L)

También, de las visitas de campo y la bibliografía actual se pudo inferir que las estructuras en mejor estado de conservación son las estructuras de piedra de junta seca con un acabado labrado. Cusco es la región en donde se ubican mayormente estas construcciones ya que era la capital del Imperio Inca. Lamentablemente

esta región se ubica en una zona de fallas corticales activas, lo cual podría generar un sismo de gran magnitud, por lo que es indispensable evaluar estas construcciones para preservarlas.

9.2. Procesamiento de imágenes

Los códigos elaborados en Python permiten reducir el tiempo para la obtención del modelo físico de construcciones de piedra de junta seca, y trasladar cada bloque a un programa de análisis numérico como Abaqus. También, estas rutinas permiten asignar a cada bloque sus propiedades físicas y su característica de sólido rígido, realizar el mallado, entre otros, de forma automática.

Estos códigos fueron desarrollados para obtener el modelo geométrico 3D de imágenes obtenidas por cualquier tipo de cámara, incluso de imágenes descargadas de internet. Por ahora, estas rutinas han sido elaborados únicamente para obtener los bloques de muros de junta seca y no de muros con junta de mortero.

Tener en cuenta que los códigos elaborados no son perfectos, ya que en ocasiones es necesario realizar correcciones manuales debido a que no siempre los bordes de los sillares aparecen adecuadamente en las imágenes. Además, el modelo 3D obtenido con estos programas tiene siempre un grosor constante. Sin embargo, este último podría mejorarse, ya que con los códigos se obtienen las coordenadas de cada sillar.

Por último, estos códigos no solo pueden ser utilizados en construcciones prehispánicas de piedra de junta seca en el Perú, sino también en distintas construcciones de piedra de junta seca en el mundo. Como se comentó, los códigos elaborados funcionan hasta con imágenes descargadas del internet.

9.3. Verificación del comportamiento de sólidos rígidos en Abaqus

Una de las grandes ventajas de la mecánica de los sólidos rígidos es que permite reducir el tiempo computacional debido a la reducción de los grados de libertad. Tener en cuenta que esta característica se considera en los sillares de los modelos realizados, ya que estos son piedras con un alta rigidez y resistencia.

Por otro lado, modelar un suelo por medio de partículas tipo DEM permite representar mejor su comportamiento, ya que cada partícula posee únicamente un nodo por lo que se pueden incluir más partículas y de menor tamaño. No obstante, mientras más partículas se utilicen para simular el suelo, mayor será el tiempo computacional.

9.4. Verificación del enfoque basado en vibraciones

El enfoque basado en vibraciones es un planteamiento muy útil para calcular la frecuencia fuera del plano predominante en una estructura de bloques de piedra de junta seca. En este caso se evaluó una sección de un muro de Sacsayhuamán, Cusco por medio de ruido blanco y frecuencias sinusoidales para obtener la

frecuencia dominante de la estructura, el cual fue de 0.976 Hz, sin considerar el efecto del empuje del terreno. Tener en cuenta que no es posible obtener la frecuencia dominante usando únicamente ruido blanco o señales sinusoidales, ya que se obtienen varias frecuencias predominantes en cada caso.

Por otro lado, el comportamiento fuera del plano de construcciones de piedra está significativamente influenciado por su frecuencia dominante. Los sismos con frecuencias predominantes cercanas a la frecuencia dominante de la estructura podrían causar mayores daños. Por ejemplo, en este caso de estudio el registro sísmico de Paruro, 2014 que tenía frecuencias predominantes cercanas a la frecuencia dominante del muro de Sacsayhuamán (0.976 Hz), causó mayores daños que aquellos sismos que tenían otras frecuencias predominantes. En este caso, si sucediese un sismo de Paruro, 2014, escalado a un PGA de 0.4g, podría provocar el colapso de la estructura evaluada.

Por último, los bloques de la sección del muro de Sacsayhuamán en los modelos fallaron generalmente por volteo debido a los registros sísmicos. Al parecer si los sillares son labrados, es muy complicado que se logre vencer la fuerza de fricción crítica debido a que tienen un área de contacto perfecto, por lo que es más fácil que la estructura se voltee.

9.5. Campaña experimental de ensayos por volteo de muros de junta seca

La metodología de calibración de las propiedades de contacto basada en la ejecución de ensayos experimentales en muros reproducidos en laboratorio ha demostrado ser muy útil para disponer de datos de entrada fehacientes para las simulaciones numéricas. Esto debido a que los modelos numéricos mostraron resultados muy similares a los de la campaña experimental en el ángulo de colapso, modo de colapso y los desplazamientos de los sillares, y esto se debe a que se consideró en los modelos la verdadera geometría de los bloques, y el uso de las propiedades físicas y mecánicas obtenidas experimentalmente. Con esto se evidencia que el modelo físico es una característica muy importante para tomar en cuenta en la evaluación numérica de estructuras de piedra de junta seca.

Por otro lado, se apreció que el colapso de los muros es generalmente por volteo. Con esto se podría deducir que si los sillares son labrados, es muy complicado que se logre vencer la fuerza de fricción crítica debido a que tienen un área de contacto perfecto, por lo que es más fácil que la estructura se voltee. Tener en cuenta que en este caso experimental no se logró un contacto perfecto entre sillares, ya que algunos bloques de concreto eran ligeramente cóncavos o convexos. Sin embargo, a pesar de esta limitación, al parecer el contacto era amplio y el fallo se produjo por volteo.

Por último, la rigidez normal calibrada K_n de 4×10^8 N/m³ y el coeficiente de fricción de 0.7 (apartado 7.5), son ligeramente similares a lo que se obtuvo en la calibración del apartado 6.3, de 2×10^8 N/m³ y 0.4

respectivamente; y el estado del arte (apartado 2.7.2). Entonces se podrían usar las propiedades de contacto calibradas en el apartado 6.3 para muros de junta seca con piedra de forma irregular, y la calibración del apartado 7.5 para muros de piedra labrada.

9.6. Modelación numérica FEM – DEM

Se verifica que la combinación del método de elementos finito-discretos (FEM – DEM), que combina la dinámica de cuerpos rígidos FEM, las leyes de contacto y partículas tipo DEM, reproduce adecuadamente el comportamiento dinámico de las construcciones de piedra de junta seca. Tener en cuenta que esta combinación FEM – DEM realizada en esta investigación es una nueva propuesta para la evaluación de muros de contención de piedra de junta seca.

En este caso de estudio del muro de Sacsayhuamán incluyendo el empuje del terreno, la frecuencia dominante fue menor a 0.5 Hz (0.244 Hz), el cual fue obtenido por el enfoque de vibraciones. Al igual que en el capítulo 6, el comportamiento fuera del plano de construcciones de piedra está significativamente influenciado por su frecuencia dominante. En este caso también el registro sísmico de Paruro, 2014 tenía frecuencias predominantes cercanas a la frecuencia dominante del muro de contención de Sacsayhuamán (0.244 Hz), por lo que causó mayores daños que aquellos sismos que tenían otras frecuencias predominantes. Entonces, si sucediese un sismo de Paruro 2014, escalado a un PGA de 0.2g, el desplazamiento remanente entre las piedras luego del sismo podría ser de 8.4 mm, lo cual sería un daño muy grave para una estructura patrimonial tan importante. También se podría inferir con los resultados obtenidos del capítulo 6 y 8, que estas construcciones podrían sufrir graves daños a partir de sismos con un PGA mayor o igual a 0.2g, independientemente de las frecuencias que posea el sismo.

Por otro lado, los bloques del modelo del muro de Sacsayhuamán con empuje del terreno fallan por volteo y/o deslizamiento debido a los registros sísmicos. Cuando se evaluó el muro de Sacsayhuamán sin empuje del terreno en el capítulo 6, la estructura fallaba generalmente por volteo y esto se debe a que la única fuerza horizontal era por los registros sísmicos actuantes en la base del sistema. En el caso del muro con el empuje del terreno contenido, la fuerza horizontal se encuentra en prácticamente toda la altura del muro en todo momento, y el empuje del terreno es variable en cada instante de tiempo por los registros sísmicos actuantes en la base del sistema. Esto también se apreció en las visitas de campo realizadas en los departamentos de Puno y Cusco, y la investigación de Ttito (2018), en donde los muros de junta seca con piedra labrada que no tenían un empuje del terreno no presentaban desplazamientos horizontales, sino prácticamente tenían problemas de volteo. Sin embargo, en aquellos que si contenían un terreno, presentaban desplazamientos remanentes horizontales notorios en sus bloques (Ejm: Sacsayhuamán).

Por último, las fuerzas obtenidas por el método pseudoestático de Mononobe-Okabe resultaron ser más bajas que la fuerza máxima que las partículas generaban al muro durante los análisis sísmicos. Es importante destacar que las propiedades de contacto entre partícula – partícula y bloque – partícula fueron considerados igual al del contacto entre sillares del muro de Sacsayhuamán, lo cual pudo haber influenciado en esta variación. También, tener en cuenta que la estructura evaluada es discontinua y su comportamiento dinámico es más complejo, ya que se podrían generar balanceos entre rocas durante el análisis que esta teoría no contempla.

9.7. Sugerencias para trabajo futuro

9.7.1. *Taxonomía de tipologías estructurales de construcciones de piedra en el Perú*

- En el modelo se pueden incluir más variables como por ejemplo el tipo de piedra utilizado, la resistencia a la compresión de la piedra, el grosor de las capas, el coeficiente de fricción de la piedra, la densidad de la piedra, etc. Sin embargo, tener en cuenta que mientras más variables tenga el modelo de clasificación, más complejo será evaluar las estructuras de los sitios arqueológicos.
- Es indispensable clasificar todas las construcciones prehispánicas posibles en cada región del Perú. Es muy probable que las tipologías encontradas en Puno y Cusco sean recurrentes en diversos sitios del país.
- Se puede completar el modelo de clasificación propuesto con un procedimiento similar a la taxonomía de edificios Global Model Earthquake Model versión 2.0 (Brzev et al., 2013), para así poder relacionar el diagnóstico de la inspección con el nivel de riesgo sísmico de cada construcción de piedra en el Perú.

9.7.2. *Procesamiento de imágenes*

- Como se comentó, en ocasiones es necesario realizar correcciones manuales, por lo que es importante a futuro implementar en estos códigos los métodos de aprendizaje supervisado (Machine Learning) y de aprendizaje no supervisado (Deep Learning) para que el programa corrija automáticamente el modelo físico 3D obtenido.
- Se debe mejorar el programa para obtener el modelo físico 3D con una inclinación del muro.
- Otra forma de obtener el modelo físico en 3D es por medio de una nube de puntos (fotogrametría). Para esto se debe desarrollar un programa que transforme la nube de puntos en sólidos 3D.
- Se puede extender la aplicación de los algoritmos desarrollados al caso de mamposterías de bloques o ladrillos con junta de mortero, introduciendo las debidas modificaciones.

9.7.3. Verificación del comportamiento de sólidos rígidos en Abaqus

- A futuro se espera que el modelo numérico pueda incluir la cohesión y rigidez de giro en las partículas tipo DEM, para poder disponer de mejores resultados.
- Se puede considerar un enfoque basado en ondas, por ejemplo, utilizando técnicas experimentales no destructivas en trabajos de campo, para caracterizar el comportamiento mecánico de las juntas secas y aprovechar así la información obtenida para una mejor calibración de las propiedades de entrada en el modelo numérico.

9.7.4. Verificación del enfoque basado en vibraciones

- El tiempo computacional para realizar este enfoque es muy alto, por lo que se debe verificar si existen otros enfoques para obtener la frecuencia dominante de la estructura de manera menos costosa.
- Se debe verificar en campo si las frecuencias obtenidas por medio de estos enfoques en un modelo numérico, es la misma que se podría tener en las estructuras reales. En este sentido, es muy recomendable realizar campañas de campo de identificación dinámica de las construcciones investigadas para actualizar los modelos numéricos con mayor precisión.

9.7.5. Campaña experimental de ensayos por volteo de muros de junta seca

- Se deben construir y ensayar por volteo muros hechos con bloques de piedra que simulen construcciones Inca del Templo del Coricancha, y así, verificar que los resultados sean similares a este estudio realizado con bloques de concreto.
- Se debe calcular en los ensayos experimentales el coeficiente de fricción estática y dinámica, e incluirlos en el proceso de calibración.

9.7.6. Modelación numérica FEM - DEM

- Se debe realizar la calibración del modelo que incluye el empuje del suelo, posiblemente mediante una comparación con un modelo experimental. Las variables para calibrar son la rigidez normal y tangencial de la interacción bloque – partícula y partícula – partícula.
- Se deben realizar ensayos en la estructura de Sacsayhuamán para verificar el grosor real de esta construcción en distintos puntos. Con estos resultados, se debe evaluar nuevamente la sección del muro de Sacsayhuamán considerando el grosor real, y así obtener resultados aún más precisos.

9.8. Diseminación de los resultados de la investigación

Se han publicado en total 3 artículos científicos en actas de congresos científicos internacionales, los cuales han sido revisado por pares:

Tarque, N., & Lipa, L. (2022). Constructive typologies on prehispanic stone walls in the region of Puno, Peru. En *Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management*, pp. 1327 - 1336. Universidad de Cantabria.

Lipa, L., Tarque, N., Pelà, L., & Goicolea, J. M. (2023). Evaluation of the Seismic Behaviour of an Inca Stone Wall Using Rigid Body Dynamic Methods. En *International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions*, pp. 1102-1113. Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-39603-8_88

Tarque N., Lipa L., Pelá L., & Goicolea J.M. (2023). Estudio numérico de la capacidad al volteo de muros de piedra Inca. Caso de estudio: muro con la piedra de los 12 ángulos en Cusco, Perú. En *Actas del I Congreso del Patrimonio de la Obra Pública y de la Ingeniería Civil*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, ISBN 978-84-380-0564-4, pp. 26-29, España. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/401479>



10. BIBLIOGRAFÍA

Abaqus, Dassault Systems Simulia (2023). “ABAQUS Rigid Body Definition” en ABAQUS Theory manual.

Abaqus, Dassault Systems Simulia (2023). “ABAQUS Rotation variables” en ABAQUS Theory manual.

Abaqus, Dassault Systems Simulia (2023). “ABAQUS Rotary inertia element” en ABAQUS Theory Manual.

Abaqus, Dassault Systems Simulia (2023). “Defining general contact interactions en Abaqus/Explicit” en ABAQUS Theory Manual.

Abaqus, Dassault Systems Simulia (2023). “Discrete element method” en ABAQUS Theory Manual.

Agurto, S. (1987). Construcción, arquitectura y planeamiento incas. Lima: CAPECO editorial, pp. 119.

Alva, J. & Ortiz C. (2014). Registros acelerométricos del sismo de Paruro – Cusco del 27 de setiembre de 2014. Universidad de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Posgrado.

Alva, J., Ortiz, C., Pérez, A., & Soto, J. (2015). Mediciones geofísicas en el parque arqueológico de Sacsayhuamán. XIX Congreso Nacional de Ingeniería Civil – Huaraz.

Alva, J., Ortiz, C., Pérez, A., Soto, J., & Riveros G. (2016). Análisis dinámico bidimensional de amplificación sísmica en el parque arqueológico de Sacsayhuamán, Cusco. World Engineering Conference on Disaster Risk Reduction.

Ancori, A. (2023). La conservación de la Llaqta Inca de Písaq (Cusco, Perú), desde la geotecnia. La Tadeo Dearte, 9(11). <https://doi.org/10.21789/24223158.1970>

Arisaca, P. (2017). Conocimiento de las pinturas rupestres de Ccota en los estudiantes de la Institución Educativa Secundaria Agropecuaria Industrial Potojani Grande Chucuito-2015. Universidad Nacional del Altiplano. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/6794>

Arkush, E. (2005). Inka Ceremonial sites in the Southwest Titicaca Basin. En *Advances in Titicaca Basin Archaeology-1*, editado por C. Stanish, A.B. Cohen y M. Aldenderfer, pp. 209-242. Cotsen Institute of Archaeology, Los Angeles.

ASTM, C29 (2023). Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.

ASTM, C33 (2023). Standard specification for concrete aggregates. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.

ASTM, C39 (2021). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.

ASTM C 127 (2015). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.

ASTM C 128 (2022). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.

ASTM C 136 (2019). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.

ASTM C 138 (2023). Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.

ASTM C 143 (2020). Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.

ASTM C 150 (2022). Specification for Portland Cement. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.

ASTM C 192 (2019). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.

ASTM C 231 (2022). Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.

ASTM C 494 (2019). Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.

ASTM, C566 (2019). Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.

ASTM, C1064 (2017). Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.

Bardales Salazar, H. (2013). Conservación de puentes de piedra en el Perú: criterios para su intervención estructural. Tesis de la Pontificia Universidad Católica del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/5268>

Barreda, L. & Valencia, A. (2007). Introducción a la etnología y arqueología de Saqsaywaman. En Saqsayhuaman: Estudios fundamentales, pp. 85-152. Cusco: Instituto Nacional de Cultura. <https://doi.org/10.51343/ru.v138i0.523>

Barrientos, C. (2021). Peligro sísmico en la subcuenca del Cusco-2019. Universidad Andina del Cusco. Escuela de posgrado. <https://hdl.handle.net/20.500.12557/4718>

Béarez, P., & Miranda, L. (2000). Análisis arqueo-ictiológico del sector residencial del sitio arqueológico de Caral-Supe, costa central del Perú. *Archaeology and Society*, (13), pp. 10-11.

Beck, S. & Ruff, L. (1989). Great earthquakes and subduction along the Peru trench. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 57(3-4), pp. 199-224. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(89\)90112-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(89)90112-X)

Bradski, G., & Kaehler, A. (2000). OpenCV. *Dr. Dobb's journal of software tools*, 3(2).

Brzev, S., Scawthorn, C., Charleson, A., Allen, L., Greene, M., Jaiswal, K., & Silva, V. (2013). GEM building taxonomy (Version 2.0) (No. 2013-02). GEM Foundation.

Buades, A., Coll, B., & Morel, J. (2011). Non-local means denoising. *Image Processing On Line*, 1, pp. 208-212. https://doi.org/10.5201/ipol.2011.bcm_nlm

Bui, T., Limam, A., Sarhosis, V., & Hjjaj, M. (2017). Discrete element modelling of the in-plane and out-of-plane behaviour of dry-joint masonry wall constructions. *Engineering Structures*, 136, pp. 277-294. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.01.020>

Canziani, J. (2012). Ciudad y territorio en los Andes: contribuciones a la historia del urbanismo prehispánico. Pontificia Universidad Católica del Perú. <https://doi.org/10.18800/9786124146022>

Cárdenas, J., Carlotto, V., Cano V., Flores, T., & Oviedo, M. (2009). Estudio geológico y geodinámico de los baluartes en el sitio arqueológico de Saqsaywaman-Cusco. Instituto Geológico Mínero y Metalúrgico (INGEMMET) y Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco. Primer Reporte. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2000>

Castro, J., Vallejo, L., & Estrada, N. (2017). Mechanical analysis of the dry-stone walls built by the Incas. In *EPJ Web de conferencias* (Vol. 140, p. 06012). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714006012>

Castro, H. (2020). Coricancha como artefacto de poder inca y un lugar sagrado como [proto] museo. *Artifícios. Revista colombiana de estudiantes de historia*, 16, pp. 8-20. <https://doi.org/10.22380/2422118X.2100>

Chen, S. (1995). QuickTime VR – an image-based approach to virtual environment navigation. *Computer Graphics (SIGGRAPH'95)*, pp. 29–38.

Chen, X., Ou, W., Chan, A. H., Liu, H., Fukuda, D., & Cheng, Y. (2023). Numerical analysis on the impact response of stone masonry arches with a GPGPU-parallelised FDEM. *Computational Particle Mechanics*, pp. 1-14. <https://doi.org/10.1007/s40571-023-00629-3>

Claxton, M., Hart, R., McCombie, P., & Walker, P. (2005). Rigid block distinct-element modeling of dry-stone retaining walls in plane strain. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 131(3), pp. 381-389. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:3\(381\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:3(381))

Cobo, B. (1956). *Historia del Nuevo Mundo*. Publicaciones PardoGalimberti.

Combey, A., Audin, L., Benavente, C., Bouysse-Cassagne, T., Marconato, L., & Rosell, L. (2020). Evidence of a large “prehistorical” earthquake during Inca times? New insights from an indigenous chronicle (Cusco, Peru). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 34, 102659. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102659>

Combey, A., Audin, L., Gandreau, D., Benavente, C., Rosell, L., & Marconato, L. (2022). Reassessing the seismic hazard in the Cusco area, Peru: New contribution coming from an archaeoseismological survey on Inca remains. *Quaternary International*, 634, pp. 81-98. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2022.07.003>

Cuadra, C., Sato, Y., Tokeshi, J., Kanno, H., Ogawa, J., Karkee, M. B., & Rojas, J. (2005). Evaluation of the dynamic characteristics of typical Inca heritage structures in Machupicchu. *WIT Transactions on The Built Environment*, 83. <https://doi.org/10.2495/STR050231>

Cuadra, C. (2021). Dynamic characteristics of Inca's stone masonry. In *Masonry Construction in Active Seismic Regions*. Woodhead Publishing, pp. 421-460. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821087-1.00002-8>

Cuadros, E. (2020). Análisis estructural avanzado del Templo de Huaytará-Huancavelica, Perú (Tesis de Máster, Universitat Politècnica de Catalunya). <http://hdl.handle.net/2117/333730>

Cuadros, E., Saloustros, S., Tarque, N., & Pelà, L. (2024) Photogrammetry-aided numerical seismic assessment of historical structures composed of adobe, stone and brick masonry. Application to the San Juan Bautista Church built on the Inca temple of Huaytará, Peru. Submitted to *Engineering Failure Analysis*. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.107984>

Cundall, P., & Strack O. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *geotechnique*, 29(1), pp. 47-65. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>

Cuynet, F. (2012). Las esculturas Pukara: síntesis del conocimiento y verificación de los rasgos característicos. *Arqueología de la Cuenca del Titicaca, Perú*, pp. 217-224. <https://hal.science/hal-03941708>

Das, B., & González, S. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Cengage Learning.

Earls, J., & Cervantes, G. (2015). Inka Cosmology in Moray: Astronomy, Agriculture, and Pilgrimage. *The Inka Empire: A Multidisciplinary Approach*, pp. 121-147. <https://doi.org/10.7560/760790-009>

Endo, Y., Magi, J., Marotto, M., & Sakai, Y. (2023). Seismic Analysis of a Single-Nave Church Standing on Moderate Sloping Ground: A Church Severely Damaged By the 2009 L'Aquila Earthquake. In *International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions*, pp. 1159-1169. https://doi.org/10.1007/978-3-031-39603-8_93

Fatule, J. (2014). Paisaje cultural, identidades locales y turismo en el Valle Sagrado de los Incas: el caso de la ciudad de Pisac. Tesis PUCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/6669>

Foerster, B. (2012). *Lost Ancient Technology of Peru and Bolivia*. Lulu.com.

Foti, D., Vacca, V., & Facchini, I. (2018). DEM modeling and experimental analysis of the static behavior of a dry-joints masonry cross vaults. *Construction and building materials*, 170, pp. 111-120. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.202>

Fritsch, E., Sieffert, Y., Alguasab, H., Grange, S., Garnier, P., & Daudeville, L. (2018). Numerical analysis on seismic resistance of a two-story timber-framed structure with stone and earth infill. *International Journal of Architectural Heritage*. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1479804>

Farrington, I. (2013). *Cusco: Urbanism and Archaeology in the Inka World*.

Fukumoto, Y., Yoshida, J., Sakaguchi, H., & Murakami, A. (2014). The effects of block shape on the seismic behavior of dry-stone masonry retaining walls: A numerical investigation by discrete element modeling. *Soils and Foundations*, 54(6), pp. 1117-1126. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2014.11.007>

Gasparini, G., & Margolies, L. (1977). *Arquitectura Inka*. Caracas: Centro de Investigaciones históricas y estéticas, Facultad de arquitectura y urbanismo Universidad central de Venezuela.

Gasparini, G. & Margolies, L. (1980). *Inca Architecture*, trans. Patricia J. Lyon. Bloomington: Indiana University Press (originally in Spanish, 1977).

Geoportal 2.0. Ministerio de Cultura del Perú. Link: <https://geoportal.cultura.gob.pe/> (Acceso: Septiembre de 2023)

Gillies, S., & otros. (2007). *Shapely: manipulation and analysis of geometric objects*. Obtenido de: <https://github.com/Toblerity/Shapely>

Gong, F., Wang, Z., Zhou, Y., Wang, J., Yang, L., & Ueda, T. (2022). Mesoscale simulation of frost damage to rock material based on Rigid Body Spring Method. *Cold Regions Science and Technology*, 201, 103621. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103621>

Gonzalez-Valadez, M., Baltazar, A., & Dwyer-Joyce, R. (2010). Study of interfacial stiffness ratio of a rough surface in contact using a spring model. *Wear*, 268(3-4), pp. 373-379. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.08.022>

Haidar, A., Vincens, E., Dedecker, F., & Plassart, R. (2023). FEM–DEM modeling of pseudo static experiments on scaled-down rockfill dams with dry stone pitching. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 47(5), 7. <https://doi.org/10.1002/nag.3492>

Harris, C., Millman, K., van der Walt, S. et al. (2020). Array programming with NumPy. *Nature* 585, pp. 357–362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>

He, J., Zhang, S., Yang, M., Shan, Y., & Huang, T. (2019). Bi-directional cascade network for perceptual edge detection. In *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 3828-3837.

Henriques J. (2021). Fast edges of a color image (actual color, not converting to grayscale) (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/28114-fast-edges-of-a-color-image-actual-color-not-converting-to-grayscale>), MATLAB Central File Exchange. Revisado setiembre 14 del 2023.

Huallani, R. (2008). Informe final de investigación arqueológica parque arqueológico de Chinchero sector Wataycarcel.

Huamán, R. (2021). Characterization of the mechanical properties and obtaining the structural geometry of an Inca stone masonry building. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*, 12 (12), pp. 1281-1293.

Huamaní, J., & Yapura, W. (2021). Cusco: Concepto de organización social de los Incas. *Ñawpa Marca, revista de investigaciones sociales andinas y amazónicas*, 1, 2.

Humpiri, G. (2015). Oferta potencial de la Comunidad de Molloco para el turismo vivencial–2015. Universidad Nacional del Altiplano.

Hunter, J. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in science & engineering*, 9(03), pp. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>

Hyslop, J. (1990). *Inka Settlement Planning*. University of Texas Press, Austin.

Instituto Geofísico del Perú (IGP) – Centro Geofísico Nacional (CENSIS) (2023). Estación sísmicas de Wanchaq Cusco.

Ita, P., Santa-Cruz, S., Daudon, D., Tarque, N., Párraga, A., & Ramos, V. (2023). Out-of-plane analysis of dry-stone walls using a pseudo-static experimental and numerical approach in natural-scale specimens. *Engineering Structures*, 288, 116153. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116153>

Jing, J., Liu, S., Wang, G., Zhang, W., & Sun, C. (2022). Recent advances on image edge detection: A comprehensive review. *Neurocomputing*. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.06.083>

Kalamani, M., Valarmathy, S., & Shandeeep, S. (2014). Image Scaling Processor using Bilinear Algorithm. *International Journal of Computer Applications*, 975, 8887.

Kasperkiewicz, J. (1998). A review of concrete mix design methods. Optimization methods for material design of cement-based composites, pp. 60-114.

Kartal, M., Mulvihill, D., Nowell, D., & Hills, D. (2011). Determination of the Frictional Properties of Titanium and Nickel Alloys Using the Digital Image Correlation Method. *Exp. Mech.* 51, pp. 359–371. <https://doi.org/10.1007/s11340-010-9366-y>

Kendall, A. (1976). Descripción e inventario de las formas arquitectónicas Inca: Patrones de distribución e inferencias cronológicas. *Revista Del Museo Nacional*, XLII, pp. 13–96.

Khelladi, H. (2018). Huellas culturales de la civilización inca "Tahuantinsuyo". *Candil: Revista del Hispanismo-Egipto*, (18), pp. 254-272.

Kim, J., Lorenzoni, F., Salvalaggio, M., & Valluzzi, M. (2021). Seismic vulnerability assessment of free-standing massive masonry columns by the 3D Discrete Element Method. *Engineering Structures*, 246, 113004. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113004>

Klarich, E. (2005). From the monumental to the mundane: Defining early leadership strategies at Late Formative Pukara, Peru. Tesis Doctoral. Universidad de California.

Knudson, C. & Perez, V. (1977). Accelerograph Records from Lima Peru. 6th World Conference on Earthquake Engineering, India.

Koseki, J., Tatsuoka, F., Munaf, Y., Tateyama, M., & Kojima, K. (1998). A modified procedure to evaluate active earth pressure at high seismic loads. *Soils and Foundations*, 38, pp. 209-216. https://doi.org/10.3208/sandf.38.Special_209

Lemos, J. (2007). Discrete element modeling of masonry structures. *Int. J. Archit. Heritage* 1 (2), pp. 190–13. <https://doi.org/10.1080/15583050601176868>

Lianheng, Z., Dongliang, H., Shuaihao, Z., Xiao, C., Yibo, L., & Min, D. (2021). A new method for constructing finite difference model of soil-rock mixture slope and its stability analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 138, 104605. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2020.104605>

Liu, Y., Cheng, M., Hu, X., Wang, K., & Bai, X. (2017). Richer convolutional features for edge detection. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 3000-3009.

- Lourenço, P. (1996). A user/programmer guide for the micro-modeling of masonry structures. Report 03.21.1.31.35. Universidad de Minho.
- Lumbreras, L. (1981). *Arqueología de la América Andina*. Lima, editorial Milla Batres.
- Lyman, I. (2019). *Your first year in code: A complete guide for new and aspiring developers*. Leanpub editorial.
- McEwan, G. (1985). Excavaciones en Pikillacta: un sitio Wari. *Dialogo Andino*, 4, pp. 89-136.
- McEwan, G. (1991). Investigaciones at the Pikillacta site: A Provincial Huari Center in the valley of Cuzco. En W. Isbell y G. McEwan (editors). *Huari Administrative Structure, Prehistoric Monumental Architecture and State Government*. Washington D.C.: Dumbarron Oaks, pp. 93-119.
- McEwan, G., & Gibaja, A. (2003). The Selz Foundation excavations at Chokepukio, Cuzco. Peru: Report of the 2003 excavations, Cuzco Archaeological Institute.
- Maini, R., & Aggarwal, H. (2009). Study and comparison of various image edge detection techniques. *International journal of image processing (IJIP)*, 3(1), pp. 1-11.
- Mamani, Y. (2021). Valoración del producto turístico a través del conocimiento de la percepción del turismo interno en el distrito de Chucuito Puno-2019. Universidad Nacional del Altiplano.
- Maurtua, V. (1906). *Juicio de Limites entre El Perú y Bolivia*. Madrid, España: Imprenta de Los Hijos de M. G. Hernández.
- Mar, R., & Beltrán-Caballero, J. (2014). El conjunto arqueológico de Saqsaywaman (Cusco): Una aproximación a su arquitectura. *Revista Española de Antropología Americana*, 44(1), pp. 9-38.
- Mar, R., Matos, R., & Beltrán-Caballero, J. (2021). *Arquitectura y Urbanismo del Cusco Inka*. UMinho Editora.
- Meli, R. (2000) *Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos*. 1st Edition. ICA foundation.
- Melin, P., Gonzalez, C., Castro, J., Mendoza, O., & Castillo, O. (2014). Edge-detection method for image processing based on generalized type-2 fuzzy logic. *IEEE transactions on fuzzy systems*, 22(6), pp. 1515-<https://doi.org/1525.10.1109/TFUZZ.2013.2297159>
- Mononobe N. & Matsuo, H. (1929). On the determination of earth pressures during earthquakes. In *Proceedings of the World Engineering Congress*, p. 9, Tokyo, Japón.
- Munjiza, A. (2004). *The combined finite-discrete element method*. John Wiley & Sons.
- Munjiza, A. & Latham, J. (2004). Comparison of experimental and FEM/DEM results for gravitational deposition of identical cubes. *Engineering Computations*, 21(2/3/4), pp. 249-264. <https://doi.org/10.1108/02644400410519776>

- Murano, A., Mehrotra, A., Ortega, J., Rodrigues, H., & Vasconcelos, G. (2023). Comparison of different numerical modelling approaches for the assessment of the out-of-plane behaviour of two-leaf stone masonry walls. *Engineering Structures*, 291, 116466. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116466>
- Mutoh, A., Fujita, Y., Morikawa, H., Motoyui, S., & Sasano, S. (2023). Estimating the Structural Characteristics of Historic Armenian Church Buildings and Examining Their Strengthening Applications. In *International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions*, pp. 63-74. https://doi.org/10.1007/978-3-031-39450-8_6
- Nair, S. (2003). ¿" Neoinca" o colonial? la " muerte" de la arquitectura inca y otros paradigmas. *Boletín de Arqueología PUCP*, (7), pp. 113-131. <https://doi.org/10.18800/boletindearqueologiapucp.200301.005>
- Niles, S. (1999). *The Shape of Inca History: Narrative and Architecture in an Andean Empire*. Iowa City: Universidad de Iowa Press.
- Okabe, S. (1926). General theory of earth pressures. *Journal of the Japan Society of Civil Engineering*, vol. 12, 1.
- Olascoaga, J. (1999). *The preservation of the Inca architectural heritage*. Tesis Doctoral, Universidad de Texas Tech.
- Oliver-Smith, A. (1994). Perú, 31 de mayo, 1970: quinientos años de desastre. *Semi-annual magazine of the social studies network on disaster prevention in Latin America*, 4.
- Ortiz Del Carpio, J. (2013). *Didáctica de Historia Regional*. Perú, First edition.
- Ou, W., Chen, X., Chan, A., Cheng, Y., & Wang, H. (2022). FDEM Simulation on the Failure Behavior of Historic Masonry Heritages Subjected to Differential Settlement. *Buildings*, 12(10), 1592. <https://doi.org/10.3390/buildings12101592>
- Papadopoulos, K., Vintzileou, E., & Psycharis, I. (2019). Finite element analysis of the seismic response of ancient columns. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 48(13), pp. 1432-1450. <https://doi.org/10.1002/eqe.3207>
- Papadopoulos, K. (2021). Seismic stability assessment of an ancient dry stone defensive wall. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(1), pp. 463-482. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00975-0>
- Pérez, R. (2012). Impacto ambiental y social generado por el desarrollo del turismo en la comunidad de Choquepata, estudio de caso: parque arqueológico de Tipón del distrito de Oropesa-región Cusco. <http://hdl.handle.net/20.500.14070/180>
- Portioli, F., & Cascini, L. (2017). Large displacement analysis of dry-jointed masonry structures subjected to settlements using rigid block modelling. *Engineering Structures*, 148, pp. 485-496. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.06.073>
- Pozzi-Escot, D. (1991). Conchopata: A community of Potters. En W. Isbell y G. McEwan (editores). *Huari Administrative Structure, Prehistoric Monumental Architecture and State Government*. Washington D.C.: Dumbarron Oaks, pp. 81-92.

Protzen, J. (1987). The Fortress of Saqsa Waman: Was it ever Finished?. *Ñawpa Pacha* 25/27. pp. 155-175. <https://doi.org/10.1179/naw.1987.25-27.1.004>

Protzen, J., & Nair, S. (1997). Who Taught the Inca Stonemasons Their Skills? A Comparison of Tiahuanaco and Inca Cut-Stone Masonry. *Journal of the Society of Architectural Historians*, 56(2), pp. 146–167. <https://doi.org/10.2307/991281>

Protzen, J., & Nair, S. (2016). *Las piedras de Tiahuanaco : arquitectura y construcción de un centro megalítico andino* (1st ed.). Lima: Fondo Ed. Pontificia Univ. Católica.

Quezada, J., Vincens, E., Mouterde, R., & Morel, J. (2016). 3D failure of a scale-down dry-stone retaining wall: A DEM modelling. *Engineering Structures*, 117, pp. 506-517. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.03.020>

Rick, J. (1983). *Cronología, clima y subsistencia en el Precerámico Peruano*. Lima: Instituto Andino de Estudios Arqueológicos.

Rivas, G. (2019). *Diseño de equipo para ensayos de pircas ante cargas laterales estáticas*. Tesis de Maestría de Ingeniería Civil, PUCP, Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12390/1409>

Rezaie, A., Godio, M., & Beyer, K. (2020). Experimental investigation of strength, stiffness and drift capacity of rubble stone masonry walls. *Construction and Building Materials*, 251, 118972. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118972>

RNE E.030 (2019). *Diseño sismorresistente*. Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú.

Rodríguez-Pascua, M., Benavente Escobar, C., Rosell Guevara, L., Grütznér, C., Audin, L., Walker, R., ... & Aguirre, E. (2020). Did earthquakes strike Machu Picchu?. *Journal of Seismology*, 24, pp. 883-895. <https://doi.org/10.1007/s10950-019-09877-4>

Rosell, L., Benavente, C., Aguirre, E., Fernández, B., & Palomino, A. (2022). Expresión geomorfológica de tectónica activa y paleosismología en el Cusco: caso falla Tambomachay. *Boletín C 88 del repositorio INGEMMET Perú*. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/3598>

Rowe, J. (1946). Inca Culture at the Time of the Spanish Conquest. En J.H. Steward (editor). *The Andean Civilizations. Handbook of South American Indians*, 2 (143). Washington D.C.: Bureau of American Ethnology, Smithsonian Institution, pp. 183-330.

Rowe, J. (1962). Stages and Periods in Archaeological Interpretation. En *Southwestern Journal of Anthropology*, 18, 1, pp. 40-54.

Rowe, J. (1990). Machu Picchu a la luz de documentos de siglo XVI. *Histórica*, 14(1), pp. 139-1154.

Ruelas, R. (2020). *Desarrollo socioeconómico y político del señorío Kolla en el periodo del intermedio tardío*. Universidad Nacional del Altiplano.

Sánchez, B., & López, G. (2015). Quilcas en Sillustani, Puno. *Cronología e implicancias*. *Revista Haucaypata*, pp. 21-43.

- Santa-Cruz, S., Daudon, D., Tarque, N., Zanelli, C., & Alcántara, J. (2021). Out-of-plane analysis of dry-stone walls using a pseudo-static experimental and numerical approach in scaled-down specimens. *Engineering Structures*, 245, 112875. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112875>
- Savalle, N., Vincens, E., & Hans, S. (2018). Seismic behaviour of dry-stone retaining walls: Experimental and numerical pseudo-static studies. In *10th International Masonry Conference (IMC)*, Milan, pp. 1030-1045.
- Savalle, N., Vincens, É., & Hans, S. (2020). Experimental and numerical studies on scaled-down dry-joint retaining walls: Pseudo-static approach to quantify the resistance of a dry-joint brick retaining wall. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18, pp. 581-606. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00670-9>
- Savalle, N., Blanc-Gonnet, J., Vincens, E., & Hans, S. (2022). Dynamic behaviour of drystone retaining walls: shaking table scaled-down tests. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(10), pp. 4527-4547. <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1855477>
- Shaikh, S. A., Li, Y., Ma, Z., Chandio, F. A., Tunio, M. H., Liang, Z., & Solangi, K. (2021). Discrete element method (DEM) simulation of single grouser shoe-soil interaction at varied moisture contents. *Computers and Electronics in Agriculture*, 191, 106538. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106538>
- Silgado, E. (1978). Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú. Repositorio del INGEMMET Perú, boletín C3, pp. 1513-1974. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/251>
- Silva, J. (2007). Saqsaywaman, Casa del Sol de los Incas. En *Saqsayhuaman: Estudios fundamentales*, pp. 153-180. Cusco: Instituto Nacional de Cultura.
- Smoljanović, H., Živaljić, N., Nikolić, Ž., & Munjiza, A. (2018). Numerical analysis of 3D dry-stone masonry structures by combined finite-discrete element method. *International Journal of Solids and Structures*, 136, pp. 150-167. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.12.012>
- Stewart, D. (2000). Rigid-body dynamics with friction and impact. *SIAM review*, 42(1), pp. 3-39. <https://doi.org/10.1137/S0036144599360110>
- Strecker, M., Pérez Maestro, C., Paredes Eyzaguirre, R., & Gómez Jareca, P. (2007). Aymara rock art of Cutimbo. Puno, Perú. *Rock Art Research*, 24(2).
- Su, Z., Liu, W., Yu, Z., Hu, D., Liao, Q., Tian, Q., ... & Liu, L. (2021). Pixel difference networks for efficient edge detection. In *Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision*, pp. 5117-5127.
- Suárez, D. (2021). Cálculo de estructuras de sillería sometidas a acciones sísmicas mediante bloques rígidos; aplicación al puente romano de Alcántara. Tesis Doctoral, Caminos, Universidad Politécnica de Madrid. <https://oa.upm.es/73929/>
- Szeliski, R. (1994). Image mosaicing for tele-reality applications. in *IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV'94)*. IEEE Computer Society (Sarasota), pp. 44-53. <https://doi.org/10.1109/ACV.1994.341287>
- Tantaleán, H. (2006). Regresar para construir: prácticas funerarias e ideología(s) durante la ocupación Inka en Cutimbo, Puno-Perú. *Chungará (Arica)*, 38(1), pp. 129-143. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-73562006000100010>

Tantaleán, H. (2009). Reproduciendo un Estado Prehispánico: El Caso de Pukara en la Cuenca Nor-Oeste del Titicaca. *Arqueología del Área Centro Sur Andina*, pp. 337-358.

Tarque N., Lipa L., Pelá L., & Goicolea J. M. (2023). Estudio numérico de la capacidad al volteo de muros de piedra Inca. Caso de estudio: muro con la piedra de los 12 ángulos en Cusco, Perú. En *Actas del I Congreso del Patrimonio de la Obra Pública y de la Ingeniería Civil*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, ISBN 978-84-380-0564-4, pp. 26-29, España.

Tian, L., Qiu, K., Zhao, Y., & Wang, P. (2023). Edge Detection of Motion-Blurred Images Aided by Inertial Sensors. *Sensors*, 23(16), pp. 7187. <https://doi.org/10.3390/s23167187>

Tovar, J. (2023). Muros inca de aparejo sedimentario del centro histórico del cusco: la inclinación de los paramentos y su relación con sillares e instrumentos. <http://hdl.handle.net/20.500.12918/7880>

Trutmann, P., Luque, A., & para las Montañas, A. (2012). Los hongos olvidados del Perú. In *VI Congreso Nacional de Investigaciones en Antropología Perú*, pp. 2-13.

Tito, D. (2018). Análisis de estabilidad de taludes de la tercera terraza–zona los baluartes en el Parque Arqueológico de Sacsayhuaman. Universidad Andina del Cusco. <https://hdl.handle.net/20.500.12557/2574>

Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Facultad de Ingeniería Civil. Japan-Peru Center for Earthquake Engineering Research & Disaster Mitigation (CISMID). Nombre de la estación: Parque de la Reserva (Código: PRQ). Fecha del sismo: Mayo 31, 1970. Magnitud: 6.6 Mb. Instituto Geofísico del Perú (IGP).

Van, C. (2011). *Seven Wonders of the World: Discover Amazing Monuments to Civilization with 20 Projects*. Nomad Press.

Vlachakis, G., Colombo, C., Giouvanidis, A., Savalle, N., & Lourenço, P. (2023). Experimental characterization of dry-joint masonry structures: Interface stiffness and interface damping. *Construction and Building Materials*, 392, 130880. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130880>

Wang, Y., Zhao, X., & Huang, K. (2017). Deep crisp boundaries. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 3892-3900.

Wright, K. (2006). *Tipon: Water engineering masterpiece of the Inca Empire*. American Society of Civil Engineers.

Wright, G. (2009). *Ancient building technology, volume 3: construction*. Brill.

Wright, K., & Zegarra, A. (2000). *Machu Picchu: A civil engineering marvel*. American Society of Civil Engineers.

Wright, K., Wright, R., Zegarra, A., & McEwan, G. (2011). *Moray: Inca Engineering Mystery*. American Society of Civil Engineers.

Wright, K. (2016). *Incamisana: Engineering an Inca Water Temple*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784414163.fm>

Xu, Y., Zhuge, Y., Karim, M. R., Hassanli, R., Rahman, M. M., & Freney, M. (2023). Structural analysis of a 3D dry-stack tyre wall by finite-discrete element method. *Engineering Structures*, 281, 115787. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115787>

Zora-Carvajal, F. (2010). Lluvias originan colapso de muralla de fortaleza de Sacsayhuamán. *An-dina*, Peruvian news agency. Fecha de publicación: 14 de junio del 2010.



ANEXO 1: CÓDIGO 1 PARA LA SEGMENTACIÓN DE IMÁGENES

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Tue Apr 13 20:26:12 2021

@author: LEONEL LIPA CUSI
"""

#####LIBRERÍAS IMPORTADAS#####
import numpy as np
import cv2
from numpy import random
import matplotlib as mpl
from matplotlib import pyplot as plt
from PIL import Image
import keyboard
from ipywidgets import interact, interactive, fixed, interact_manual
from shapely.geometry import Polygon
from shapely import MultiPoint
from shapely.ops import polygonize

#####ABRIR IMAGEN#####
image= cv2.imread('E:\carpetadeprueba\imagen1.png')

#####VARIABLES A CALIBRAR #####

blurgausiano = 55          #Realiza el sombreado de la imagen.
coloracionbordes = 120    #Punto de inicio hasta el nivel de saturación 255
detallado = 0.0001        #lineas usadas para los contornos, ideal es que sea 0.0001, mayor es menos detalle
tano = 170                #Elimina los contornos más pequeños a este
baseimagen = 8.64         #Es la longitud de la base de la figura en metros para escalar al final
K = 15                    #Incremento de los sólidos al final, es en porcentaje
#####
K = K/100

#re escalado de imagen a 1024
tamano = image.shape
valor1 = 720/tamano[0]
image = cv2.resize(image,(0,0),None,valor1,valor1)

#Tamaño de la imagen
valorito1 = image.shape[0]
valorito2 = image.shape[1]

cv2.imshow('image',image)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()

image2= image.copy()

##### PAQUETE DE FILTROS 1 #####

#estilización de la imagen
image = cv2.stylization(image, sigma_s=60, sigma_r=0.2)

#suavizado de imagen a color
image = cv2.fastNlMeansDenoisingColored(image,10)

# Se utiliza la escala azul
#gray = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
gray = image[:, :, 0]

# Blur the image using Gaussian Blur 155
gray_blur = cv2.GaussianBlur(gray, (blurgausiano,blurgausiano), 0)

# Convert the image into pencil sketch y quitarle ruido

cartoon = cv2.divide(gray, gray_blur, scale=255.0)
imgray=cv2.fastNlMeansDenoising(cartoon,None,30)

##### PAQUETE DE FILTROS 2 #####
# Se utiliza la escala de grises
gray2 = cv2.cvtColor(image2, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
#gray = image[:, :, 0]

# Blur the image using Gaussian Blur 155
gray_blur2 = cv2.GaussianBlur(gray2, (blurgausiano,blurgausiano), 0)
```

```

# Convert the image into pencil sketch
cartoon2 = cv2.divide(gray2, gray_blur2, scale=255.0)
imggray2=cartoon2

##### UNIÓN DE PAQUETES DE FILTROS 1 Y 2 #####

imggray = np.array(imggray,dtype=float)
imggray2 = np.array(imggray2,dtype=float)

imggray = imggray * imggray2/255
imggray = np.array(imggray,dtype=np.uint8)

plt.hist(imggray.ravel(),256,[0,256]); plt.show()

#Retirando las manchas

img_new=np.where( imggray < coloracionbordes , 0 , 255)      #si se cumple la condición, le damos 255, sino 0

imggray = img_new
imggray = np.array(imggray,dtype=np.uint8)

#Ubicación de bordes

ret, thresh = cv2.threshold(imggray,coloracionbordes,255,0)
cnts, hierarchy = cv2.findContours(imggray,cv2.RETR_EXTERNAL,cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)

#Se crea un nuevo contorno para eliminar objetos pequeños
nuevocontorno = cnts.copy()

# se elimina las áreas pequeñas segun el tamaño de tano

a = len(cnts)-1

for c in range(a):
    #El análisis comienza de reversa para no malograr la serie
    i = a - c
    hola = cv2.arcLength(cnts[i], True)

    if (hola < tano):
        nuevocontorno.pop(i)

#Midiendo los contornos
result = []
contadores = []
for x in nuevocontorno:
    epsilon = detallado * cv2.arcLength(x, True)
    approx = cv2.approxPolyDP(x, epsilon, True)
    #approx = cv2.convexHull(x)
    result.append(approx)
    contadores.append(epsilon)

#se pone todo result en orden de mayor a menor, de ese modo se pone las pintadas grandes primero
movimiento = [x for _,x in sorted(zip(contadores,result),reverse=True)]
result = movimiento

#dibujado encima de la imagen
for x in result:
    cv2.drawContours(image, [x], -1, (random.randint(255), random.randint(255), random.randint(255)), -1)

cv2.imshow('imggray',imggray)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()

cv2.imwrite('F:\caso2.jpg',imggray)

#####DIBUJO ENCIMA DE LA IMAGEN #####

#FUNCION PARA RAYAR CONTORNOS CON PLUMA NEGRA

def click_event(event, x, y, flags, param):
    if event == cv2.EVENT_LBUTTONDOWN:
        cv2.circle(img, (x, y), 1, (0, 0, 0), 1, cv2.FILLED)
        points.append((x, y))
        if len(points) >= 2:
            cv2.line(img, points[-1], points[-2], (0, 0, 0), 1, cv2.LINE_AA)

```

```

        cv2.line(imggray, points[-1], points[-2], (0, 0, 0), 1, cv2.LINE_AA)
    cv2.imshow('LÍNEAS NEGRAS - Presiones "2" para finalizar', img)
elif event == cv2.EVENT_RBUTTONDOWN:
    points.clear()

#FUNCION PARA RAYAR CONTORNOS CON PLUMA BLANCA

def click_event2(event, x, y, flags, param):
    if event == cv2.EVENT_LBUTTONDOWN:
        cv2.circle(img, (x, y), 1, (255, 255, 255), 1, cv2.FILLED)
        points.append((x, y))
        if len(points) >= 2:
            cv2.line(img, points[-1], points[-2], (255, 255, 255), 5, cv2.LINE_AA)
            cv2.line(img, points[-1], points[-2], (255, 255, 255), 5, cv2.LINE_AA)
            cv2.imshow('LÍNEAS BLANCAS - Presione "1" para finalizar', img)
    elif event == cv2.EVENT_RBUTTONDOWN:
        points.clear()

img=image

#Se utiliza las dos funciones anteriores

#primero con líneas blancas (borrar)

while True:
    # do something
    if keyboard.is_pressed("1"):
        print("q pressed, ending loop")
        break
    else:
        cv2.imshow('LÍNEAS BLANCAS - Presione "1" para finalizar', img)
        points = []
        cv2.setMouseCallback('LÍNEAS BLANCAS - Presione "1" para finalizar', click_event2)

        cv2.waitKey(0)
        cv2.destroyAllWindows()

#segundo con líneas negras (agregar)

while True:
    # do something
    if keyboard.is_pressed("2"):
        print("q pressed, ending loop")
        break
    else:
        cv2.imshow('LÍNEAS NEGRAS - Presiones "2" para finalizar', img)
        points = []
        cv2.setMouseCallback('LÍNEAS NEGRAS - Presiones "2" para finalizar', click_event)

        cv2.waitKey(0)
        cv2.destroyAllWindows()

#SE DIBUJA LA IMAGEN PINCELADA CON LOS ARREGLOS
cv2.imshow('imagen final',imggray)
cv2.waitKey(0)
imagenueva = cv2.imwrite('F:\casol.jpg',image)          #Para guardar la imagen con contornos
cv2.destroyAllWindows()

#####OBTENCIÓN DE CONTORNOS NUEVAMENTE #####

#SE REPITE EL PASO DE OBTENER LOS CONTORNOS

ret, thresh = cv2.threshold(imggray,coloracionbordes,255,0)
cnts, hierarchy = cv2.findContours(thresh,cv2.RETR_EXTERNAL,cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)

#Se crea un nuevo contorno para eliminar objetos pequeños
nuevocontorno = cnts.copy()

#Creación del fondo para el contorno
tamano2 = image.shape
blanco = np.zeros((tamano2))+255
cv2.drawContours(blanco,nuevocontorno,-1,(0,0,0),1)

# se elimina las áreas pequeñas segun el tamaño de tano

a = len(nuevocontorno)-1

```

```

for c in range(a):
    #El análisis comienza de reversa para no malograr la serie
    i = a - c
    hola = cv2.arcLength(nuevocontorno[i], True)

    if (hola < tano):
        nuevocontorno.pop(i)

result = []
contadores = []
for x in nuevocontorno:
    epsilon = detallado * cv2.arcLength(x, True)
    approx = cv2.approxPolyDP(x, epsilon, True)
    approx = cv2.convexHull(x)
    approx = approx
    result.append(approx)
    contadores.append(epsilon)

#se pone todo result en orden de mayor a menor, de ese modo se pone las pintadas grandes primero
movimiento = [x for _,x in sorted(zip(contadores,result),reverse=True)]
result = movimiento

colorines =[]
for x in result:
    RGB1 = random.randint(255)
    RGB2 = random.randint(255)
    RGB3 = random.randint(255)
    cv2.drawContours(image, [x], -1, (RGB1, RGB2, RGB3), -1)
    colorines.append([RGB1,RGB2,RGB3])

cv2.imshow('blanco',blanco)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()

cv2.imshow('blanco',image)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()

#####INCREMENTO DE SÓLIDOS CON K #####

#PROGRAMA DE INCREMENTO DE SOLIDOS
nuevasareas = []

#se elimina los contornos que son líneas
longitud1 = len(result)-1
for i in range(0, longitud1):
    p = longitud1 - i
    if (result[p].size == 2):
        result.pop(p)

for x in result:
    #se obtiene los centroides de la figura
    M = cv2.moments(x)

    if M['m00'] == 0:
        M['m00'] = 0.000001

    cx = int(M['m10']/M['m00'])
    cy = int(M['m01']/M['m00'])

    #Se traslada la figura al cero cero
    traslado = x - [cx, cy]
    #Escalamos la figura
    trasescalado = traslado * (1+K)
    #Regresamos a su posición
    nuevito = trasescalado + [cx, cy]
    nuevito = nuevito.astype(np.int32)
    nuevasareas.append(nuevito)

result = nuevasareas

contarte=0
for x in result:
    cv2.drawContours(image2, [x], -1, (colorines[contarte][0], colorines[contarte][1], colorines[contarte][2]), -1)
    contarte = contarte+1

cv2.imshow('blanco',image2)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()

```

```

#Creación del fondo para el contorno
longitud0 = len(result)-1

blanco2=np.zeros([valorito1,valorito2,3])

for x in result:
    cv2.drawContours(blanco2, [x], -1, (255, 255, 255), -1)
    cv2.drawContours(blanco2, [x], -1, (0, 0, 0), 1)

#SE DIBUJA LA IMAGEN PINCELADA CON LOS ARREGLOS
cv2.imshow('blanco',blanco2)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()
cv2.imwrite('E:\carpetadeprueba\casol.jpg.jpg',blanco2)      #Para guardar la imagen con contornos
cv2.destroyAllWindows()

#Se elimina los elementos con menos de 2 valores del result
longitud0 = len(result)

corregido = result[:]
for i in range(0,longitud0):
    eliminador = len(result[i])
    if eliminador <= 2:
        corregido.remove(result[i])

result = corregido

#Se registra la nueva cantidad de valores de result
longitud0 = len(result) -1

for j in range(0,longitud0):
    #Se transporta cada bloque a integer
    approx = result[j]
    result[j] = np.array(approx,dtype=float)

##### USO DE LA LIBRERÍA SHAPELY #####

#con esto convierto lo del result en coordenadas para trabajar con esta libreria
#Shapely

result2 = []
coords = []

for manta in result:
    a = manta
    coords=[]
    for cols in a:
        coords.append((cols[0][0], cols[0][1]))
    result2.append(coords)

#ahora cortamos todo

cantidadnueva = len(result2)

for i in range(0,cantidadnueva):
    xi = Polygon(result2[i])

    for j in range(0,i):
        if i != j:
            xj = Polygon(result2[j])
            if xi.overlaps(xj) == True:
                casonuevo = xj.difference(xi)
                if casonuevo.geom_type == 'MultiPolygon':
                    san1 = casonuevo.geoms[0].area
                    san2 = casonuevo.geoms[1].area
                    if san1 > san2:
                        p = list(casonuevo.geoms[0].exterior.coords)
                        if p != []:
                            result2[j] = p
                    else:
                        p = list(casonuevo.geoms[1].exterior.coords)
                        if p != []:
                            result2[j] = p
                    else:

```

```

p = list(casonuevo.exterior.coords)
if p != []:
    result2[j] = p

#se recorta los contornos al tamaño de la imagen
tamanoimagen = Polygon([(0.0,0.0),(valorito2,0.0),(valorito2,valorito1),(0.0,valorito1)])

cantidadnueva = len(result2)

result3 = []

for i in range(0,cantidadnueva):
    xi = Polygon(result2[i])
    nuevopoli = xi & tamanoimagen
    if nuevopoli.geom_type == 'Polygon':
        p = list(nuevopoli.exterior.coords)
        result3.append(p)
    else:
        p = list(nuevopoli.geoms[0].exterior.coords)
        result3.append(p)

#convertimos todo nuevamente a lo que era antes

result4 = []
coords = []
for manta in result3:
    a = manta
    coords = []
    for cols in a:
        coords.append([[cols[0], cols[1]]])
    result4.append(coords)

##### PRODUCCIÓN DE LA VARIABLE RESULT4 #####

#Se realiza el escalado
factorito = baseimagen/valorito2

cantidal = len(result4)

for i in range(0,cantidal):
    cantida2 = len(result4[i])
    for j in range(0,cantida2):
        result4[i][j][0][0]=result4[i][j][0][0]*factorito
        result4[i][j][0][1]=(-result4[i][j][0][1]+valorito1)*factorito

#El resultado es RESULT4

```

ANEXO 2: CÓDIGO 2 PARA LA SEGMENTACIÓN DE IMÁGENES

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Tue Apr 13 20:26:12 2021

@author: User
"""
#####LIBRERÍAS IMPORTADAS#####

import numpy as np
import cv2
from numpy import random
import matplotlib as mpl
from matplotlib import pyplot as plt
from PIL import Image
import keyboard
from ipywidgets import interact, interactive, fixed, interact_manual
from shapely.geometry import Polygon
from shapely import MultiPoint
from shapely.ops import polygonize

#####ABRIR IMAGEN#####

image= cv2.imread('E:\carpetadeprueba\muro2.jpg')
original_image= image

#####VARIABLES A CALIBRAR #####

blurgaussiano = 55          #Realiza el sombreado de la imagen.
coloracionbordes = 254     #Punto de inicio hasta el nivel de saturación 255
detallado = 0.001         #lineas usadas para los contornos, ideal es que sea 0.0001
tano = 200                #Elimina los contornos más pequeños a este
baseimagen = 8.64        #Es la longitud de la base de la figura en metros para escalar al final
K = 8                     #Incremento de los sólidos al final, es en porcentaje

#####

K = K/100

#re escalado de imagen a 1024
tamano = image.shape
valor1 = 720/tamano[0]
image = cv2.resize(image,(0,0),None,valor1,valor1)

#Tamaño de la imagen
valorito1 = image.shape[0]
valorito2 = image.shape[1]

cv2.imshow('image',image)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()

image2= image.copy()

##### PAQUETE DE FILTROS 1 #####

#estilización de la imagen
image = cv2.stylization(image, sigma_s=60, sigma_r=0.2)

#suavizado de imagen a color
cv2.fastNlMeansDenoisingColored(image,10)
# Se utiliza la escala azul
#gray = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
gray = image[:, :, 0]

# Blur the image using Gaussian Blur 155
gray_blur = cv2.GaussianBlur(gray, (blurgaussiano,blurgaussiano), 0)

# Convert the image into pencil sketch y quitarle ruido

cartoon = cv2.divide(gray, gray_blur, scale=255.0)
imgray=cv2.fastNlMeansDenoising(cartoon,None,30)

cv2.imshow('image',imgray)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()

##### PAQUETE DE FILTROS 2 #####
```

```

# Se utiliza la escala de grises
gray2 = cv2.cvtColor(image2, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
#gray = image[:, :, 0]

# Blur the image using Gaussian Blur 155
gray_blur2 = cv2.GaussianBlur(gray2, (blurgaussiano,blurgaussiano), 0)

# Convert the image into pencil sketch

cartoon2 = cv2.divide(gray2, gray_blur2, scale=255.0)
imgray2=cartoon2

cv2.imshow('image',imgray2)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()

##### UNIÓN DE PAQUETES DE FILTROS 1 Y 2 #####

imgray = np.array(imgray,dtype=float)
imgray2 = np.array(imgray2,dtype=float)

combinacion = imgray2
tamano3 = imgray.shape

for m in range(tamano3[0]):
    for n in range(tamano3[1]):
        if imgray[m,n]>= imgray2[m,n]:
            combinacion[m,n]=imgray[m,n]

imgray = np.array(combinacion,dtype=np.uint8)

#Ubicación de bordes

ret, thresh = cv2.threshold(imgray,coloracionbordes,255,0)
cnts, hierarchy = cv2.findContours(thresh,cv2.RETR_EXTERNAL,cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)

#Se crea un nuevo contorno para eliminar objetos pequeños
nuevocontorno = cnts.copy()

# se elimina las áreas pequeñas segun el tamaño de tano
a = len(cnts)-1

for c in range(a):
    #El análisis comienza de reversa para no malograr la serie
    i = a - c
    hola = cv2.arcLength(cnts[i], True)

    if (hola < tano):
        nuevocontorno.pop(i)

#Pintando los polígonos
result = []
contadores = []
for x in nuevocontorno:
    epsilon = detallado * cv2.arcLength(x, True)
    approx = cv2.approxPolyDP(x, epsilon, True)
    result.append(approx)
    contadores.append(epsilon)

#se pone todo result en orden de mayor a menor, de ese modo se pone las pintadas grandes primero
movimiento = [x for _,x in sorted(zip(contadores,result),reverse=True)]
result = movimiento

for x in result:
    cv2.drawContours(image, [x], -1, (random.randint(255), random.randint(255), random.randint(255)), -1)

cv2.imshow('imgray',imgray)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()

cv2.imwrite('F:\caso2.jpg',imgray)

plt.hist(imgray.ravel(),256,[0,256]); plt.show()

#####DIBUJO ENCIMA DE LA IMAGEN #####

```

```

#FUNCION PARA RAYAR CONTORNOS CON PLUMA NEGRA
def click_event(event, x, y, flags, param):
    if event == cv2.EVENT_LBUTTONDOWN:
        cv2.circle(img, (x, y), 1, (0, 0, 0), 1, cv2.FILLED)
        points.append((x, y))
        if len(points) >= 2:
            cv2.line(img, points[-1], points[-2], (0, 0, 0), 1, cv2.LINE_AA)
            cv2.line(img, points[-1], points[-2], (0, 0, 0), 1, cv2.LINE_AA)
            cv2.imshow('LÍNEAS NEGRAS - Presiones "2" para finalizar', img)
    elif event == cv2.EVENT_RBUTTONDOWN:
        points.clear()

#FUNCION PARA RAYAR CONTORNOS CON PLUMA BLANCA
def click_event2(event, x, y, flags, param):
    if event == cv2.EVENT_LBUTTONDOWN:
        cv2.circle(img, (x, y), 1, (255, 255, 255), 1, cv2.FILLED)
        points.append((x, y))
        if len(points) >= 2:
            cv2.line(img, points[-1], points[-2], (255, 255, 255), 5, cv2.LINE_AA)
            cv2.line(img, points[-1], points[-2], (255, 255, 255), 5, cv2.LINE_AA)
            cv2.imshow('LÍNEAS BLANCAS - Presione "1" para finalizar', img)
    elif event == cv2.EVENT_RBUTTONDOWN:
        points.clear()

img=image

#Se utiliza las dos funciones anteriores
#primero con líneas blancas (borrar)
while True:
    # do something
    if keyboard.is_pressed("1"):
        print("q pressed, ending loop")
        break
    else:
        cv2.imshow('LÍNEAS BLANCAS - Presione "1" para finalizar', img)
        points = []
        cv2.setMouseCallback('LÍNEAS BLANCAS - Presione "1" para finalizar', click_event2)

        cv2.waitKey(0)
        cv2.destroyAllWindows()

#segundo con líneas negras (agregar)
while True:
    # do something
    if keyboard.is_pressed("2"):
        print("q pressed, ending loop")
        break
    else:
        cv2.imshow('LÍNEAS NEGRAS - Presiones "2" para finalizar', img)
        points = []
        cv2.setMouseCallback('LÍNEAS NEGRAS - Presiones "2" para finalizar', click_event)

        cv2.waitKey(0)
        cv2.destroyAllWindows()

#SE DIBUJA LA IMAGEN PINCELADA CON LOS ARREGLOS
cv2.imshow('imagen final',img)
cv2.waitKey(0)
imagenueva = cv2.imwrite('F:\casol.jpg',img) #Para guardar la imagen con contornos
cv2.destroyAllWindows()

#####OBTENCIÓN DE CONTORNOS NUEVAMENTE #####

#SE REPITE EL PASO DE OBTENER LOS CONTORNOS

ret, thresh = cv2.threshold(img, coloracionbordes, 255, 0)
cnts, hierarchy = cv2.findContours(thresh, cv2.RETR_EXTERNAL, cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)

#Se crea un nuevo contorno para eliminar objetos pequeños
nuevocontorno = cnts.copy()

```

```

#Creación del fondo para el contorno
tamano2 = image.shape
blanco = np.zeros((tamano2))+255
cv2.drawContours(blanco,nuevocontorno,-1,(0,0,0),1)

# se elimina las áreas pequeñas segun el tamaño de tano

a = len(nuevocontorno)-1

for c in range(a):
    #El análisis comienza de reversa para no malograr la serie
    i = a - c
    hola = cv2.arcLength(nuevocontorno[i], True)

    if (hola < tano):
        nuevocontorno.pop(i)

#Pintando los polígonos
result = []
contadores = []
for x in nuevocontorno:
    epsilon = detallado * cv2.arcLength(x, True)
    approx = cv2.approxPolyDP(x, epsilon, True)
    approx = cv2.convexHull(x)
    result.append(approx)
    contadores.append(epsilon)

#se pone todo result en orden de mayor a menor, de ese modo se pone las pintadas grandes primero
movimiento = [x for _,x in sorted(zip(contadores,result),reverse=True)]
result = movimiento

colorines =[]
for x in result:
    RGB1 = random.randint(255)
    RGB2 = random.randint(255)
    RGB3 = random.randint(255)
    cv2.drawContours(image, [x], -1, (RGB1, RGB2, RGB3), -1)
    colorines.append([RGB1,RGB2,RGB3])

cv2.imshow('blanco',blanco)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()

cv2.imshow('blanco',image)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()

#convierte la lista fea de result en una lista simple
amen = [i.tolist() for i in result]

#####INCREMENTO DE SÓLIDOS CON K #####

#PROGRAMA DE INCREMENTO DE SOLIDOS
nuevasareas = []

#se elimina los contornos que son líneas
longitud1 = len(result)-1
for i in range(0, longitud1):
    p = longitud1 - i
    if (result[p].size == 2):
        result.pop(p)

for x in result:
    #se obtiene los centroides de la figura
    M = cv2.moments(x)

    if M['m00'] == 0:
        M['m00'] = 0.000001

    cx = int(M['m10']/M['m00'])
    cy = int(M['m01']/M['m00'])
    #Se traslada la figura al cero cero
    traslado = x - [cx, cy]
    #Escalaamos la figura
    trasescalado = traslado * (1+K)
    #Regresamos a su posición
    nuevito = trasescalado + [cx, cy]
    nuevito = nuevito.astype(np.int32)
    nuevasareas.append(nuevito)

```

```

result = nuevasareas

contarte=0
for x in result:
    cv2.drawContours(image2, [x], -1, (colorines[contarte][0], colorines[contarte][1], colorines[contarte][2]), -1)
    contarte = contarte+1

cv2.imshow('blanco',image2)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()

#Creación del fondo para el contorno

blanco2=np.zeros([valorito1,valorito2,3])

for x in result:
    cv2.drawContours(blanco2, [x], -1, (255, 255, 255), -1)
    cv2.drawContours(blanco2, [x], -1, (0, 0, 0), 1)

#SE DIBUJA LA IMAGEN PINCELADA CON LOS ARREGLOS
cv2.imshow('blanco',blanco2)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()
cv2.imwrite('E:\carpetadepueba\casoljpg.jpg',blanco2) #Para guardar la imagen con contornos
cv2.destroyAllWindows()

#Se elimina los elementos con menos de 2 valores del result

longitud0 = len(result)

corregido = result[:]
for i in range(0,longitud0):
    eliminador = len(result[i])
    if eliminador <= 2:
        corregido.remove(result[i])

result = corregido

#Se registra la nueva cantidad de valores de result
longitud0 = len(result) -1

for j in range(0,longitud0):
    #Se transporta cada bloque a integer
    approx = result[j]
    result[j] = np.array(approx,dtype=float)

##### USO DE LA LIBRERÍA SHAPELY #####

#con esto convierto lo del result en coordenadas para trabajar con esta libreria
#Shapely

result2 = []
coords = []

for manta in result:
    a = manta
    coords =[]
    for cols in a:
        coords.append((cols[0][0], cols[0][1]))
    result2.append(coords)

#ahora cortamos todo

cantidadnueva = len(result2)

for i in range(0,cantidadnueva):
    xi = Polygon(result2[i])

    for j in range(0,i):
        if i != j:
            xj = Polygon(result2[j])
            if xi.overlaps(xj) == True:
                casonuevo = xj.difference(xi)
                if casonuevo.geom_type == 'MultiPolygon':
                    san1 = casonuevo.geoms[0].area
                    san2 = casonuevo.geoms[1].area

```

```

if san1 > san2:
    p = list(casonuevo.geoms[0].exterior.coords)
    if p != []:
        result2[j] = p
    else:
        p = list(casonuevo.geoms[1].exterior.coords)
        if p != []:
            result2[j] = p
else:
    p = list(casonuevo.exterior.coords)
    if p != []:
        result2[j] = p

#se recorta los contornos al tamaño de la imagen
tamanoimagen = Polygon([(0.0,0.0),(valorito2,0.0),(valorito2,valorito1),(0.0,valorito1)])

cantidadnueva = len(result2)

result3 = []

for i in range(0,cantidadnueva):
    xi = Polygon(result2[i])
    nuevopoli = xi & tamanoimagen
    if nuevopoli.geom_type == 'Polygon':
        p = list(nuevopoli.exterior.coords)
        result3.append(p)
    else:
        p = list(nuevopoli.geoms[0].exterior.coords)
        result3.append(p)

#convertimos todo nuevamente a lo que era antes

result4 = []
coords = []
for manta in result3:
    a = manta
    coords =[]
    for cols in a:
        coords.append([[cols[0], cols[1]]])
    result4.append(coords)

##### PRODUCCIÓN DE LA VARIABLE RESULT4 #####

#Se realiza el escalado
factorito = baseimagen/valorito2

cantida1 = len(result4)

for i in range(0,cantida1):
    cantida2 = len(result4[i])
    for j in range(0,cantida2):
        result4[i][j][0][0]=result4[i][j][0][0]*factorito
        result4[i][j][0][1]=(-result4[i][j][0][1]+valorito1)*factorito

#El resultado es RESULT4

```

ANEXO 3: CASO DE APLICACIÓN DEL CÓDIGO 1 ELABORADO EN PYTHON (MURO DE LA PIEDRA DE LOS 12 ÁNGULOS)

A) Ingreso de datos

Se realiza la carga de la imagen por medio de `cv2.imread` de la biblioteca `OPENCV`. Este algoritmo permite leer una imagen con 5 variables: las coordenadas horizontal y vertical de cada píxel, y la coloración BGR (Blue, Green, Red) de cada píxel. Entonces la imagen tendrá la siguiente ecuación:

$$\text{Intensidad de capa} = \text{imagen} (, x, \text{color}) \quad (\text{A3-1})$$

donde y y x indican las coordenadas vertical y horizontal del píxel evaluado, $color$ indica la capa de color evaluado ($color = 0$, es la coloración azul, $color = 1$, es la coloración verde, $color = 3$, es la coloración roja) e *Intensidad de capa*, es la cantidad de coloración de la capa y píxel evaluado en una escala de 0 a 255. En la *Figura A3 - 1* se aprecia la evaluación de la intensidad de cada capa de color del píxel con vertical: 280 y horizontal: 340. Para este caso se utilizó una imagen del muro de la piedra de los 12 ángulos en Cusco.

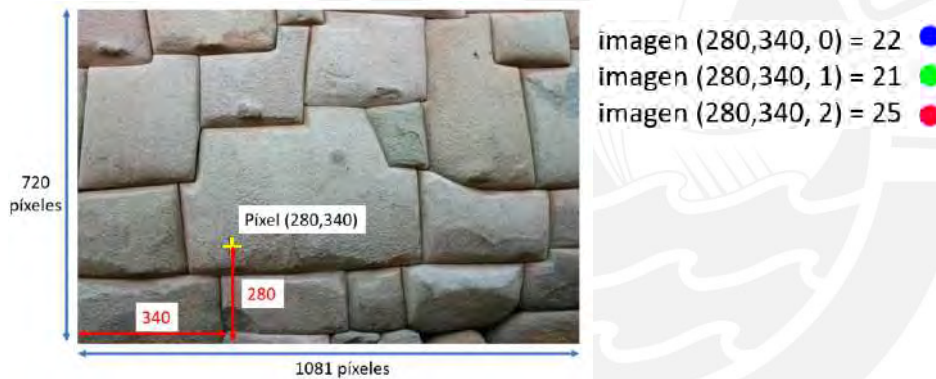


Figura A3 - 1: Intensidad de cada capa de un píxel evaluado

Luego, se escala la imagen a 720 píxeles de altura manteniendo su forma (aspect ratio) usando un algoritmo bilineal. En este algoritmo se interpola los píxeles vecinos en diferentes direcciones (Kalamani et al., 2014). Por ejemplo, en la *Figura A3 - 2* se aprecia los píxeles $Q(i,j)$ y $Q(i+1,j)$, con los cuales por medio de una interpolación lineal se obtiene el píxel $Q(x',j)$. De igual modo sucede con los píxeles $Q(i,j+1)$ y $Q(i+1,j+1)$ para obtener $Q(x',j+1)$. También, de la misma forma se puede reducir la imagen realizando la interpolación en la otra dirección. Tener en cuenta que la imagen se puede escalar a cualquier tamaño deseado; sin embargo, en este caso para reducir el tiempo computacional se decidió escalarlo a 720 píxeles de altura. Para realizar esto se utilizó la rutina `cv2.resize` de la librería `OpenCV`.

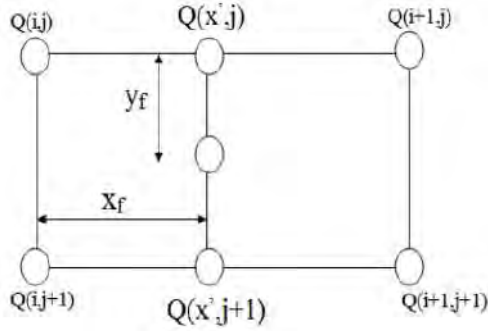


Figura A3 - 2: Interpolación bilineal

A continuación, se muestra parte del código relacionado a esta sección:

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Tue Apr 13 20:26:12 2021

@author: LEONEL LIPA CUSI
"""

#####LIBRERÍAS IMPORTADAS#####
import numpy as np
import cv2
from numpy import random
import matplotlib as mpl
from matplotlib import pyplot as plt
from PIL import Image
import keyboard
from ipywidgets import interact, interactive, fixed, interact_manual
from shapely.geometry import Polygon
from shapely import MultiPoint
from shapely.ops import polygonize

#####ABRIR IMAGEN#####
image= cv2.imread('E:\carpetadeprueba\imagen1.png')

#####VARIABLES A CALIBRAR #####

blurgaussiano = 55          #Realiza el sombreado de la imagen.
coloracionbordes = 120     #Punto de inicio hasta el nivel de saturación 255
detallado = 0.0001         #lineas usadas para los contornos, ideal es que sea 0.0001, mayor es menos detalle
tano = 170                 #Elimina los contornos más pequeños a este
baseimagen = 8.64         #Es la longitud de la base de la figura en metros para escalar al final
K = 15                     #Incremento de los sólidos al final, es en porcentaje
#####
K = K/100

#re escalado de imagen a 1024
tamano = image.shape
valor1 = 720/tamano[0]
image = cv2.resize(image,(0,0),None,valor1,valor1)

#Tamaño de la imagen
valorito1 = image.shape[0]
valorito2 = image.shape[1]

cv2.imshow('image',image)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()

image2= image.copy()
```

B) Paquete de filtros tipo 1

- Filtro de estilización (método de difusión anisotrópica)

Este filtro nos permite filtrar una imagen como si hubiera sido pintada con colores con agua, con el fin de resaltar mejor sus bordes. Para esto se utilizó la rutina `cv2.stylization` de la biblioteca OPENCV. En la *Figura A3 - 3a* se muestra una sección del muro de Sacsayhuamán, el cual ha sido filtrado por estilización, considerando un σ_s y σ_r de 60 y 0.2 respectivamente (*Figura A3 - 3b*). Como se aprecia, los bordes de los sillares se resaltan aún más, sin embargo, el problema es que aún hay muchas imperfecciones dentro de cada piedra.



Figura A3 - 3: Estilización de imagen (a) Imagen original (b) Imagen filtrada

- Filtro de suavizado de imagen a color

Para esto se utiliza la rutina de `cv2.fastNlMeansDenoisingColored` de la biblioteca OPENCV, al cual se le indica la cantidad de píxeles en tamaño a evaluar (para este caso de un tamaño 10). Esto no se aprecia a simple vista en una figura, pero si tomamos la *Figura A3 - 3b*, el color plomo de cada bloque será prácticamente el mismo.

- Uso de la capa azul de la imagen (métodos estáticos)

Luego de realizar los filtrados anteriores, se utiliza la capa de colores más adecuada, por lo que ahora se eliminan las capas ROJO y VERDE, y únicamente se utiliza la capa AZUL con intensidad de 0 a 255. La razón de usar la capa azul es que ésta entregó mejores resultados que las otras capas.

- Filtrado Gaussiano (método fuzzy)

Se recomienda un operador Gaussiano de tamaño 55×55 o 155×155 para la evaluación de estos muros. La rutina utilizada fue `cv2.GaussianBlur` de la biblioteca OPENCV. En la *Figura A3 - 4a* se muestra la capa azul de la imagen estilizada anterior (no se muestra de color azul, ya que se aprecian más detalles cuando se

muestra esta capa en escala de grises); y en la *Figura A3 - 4b* la imagen filtrada con un operador gaussiano de 55×55 píxeles (convolución). En los códigos elaborados, esta variable tiene de nombre “blurgaussiano”, el cual es el tamaño del operador.



(a)

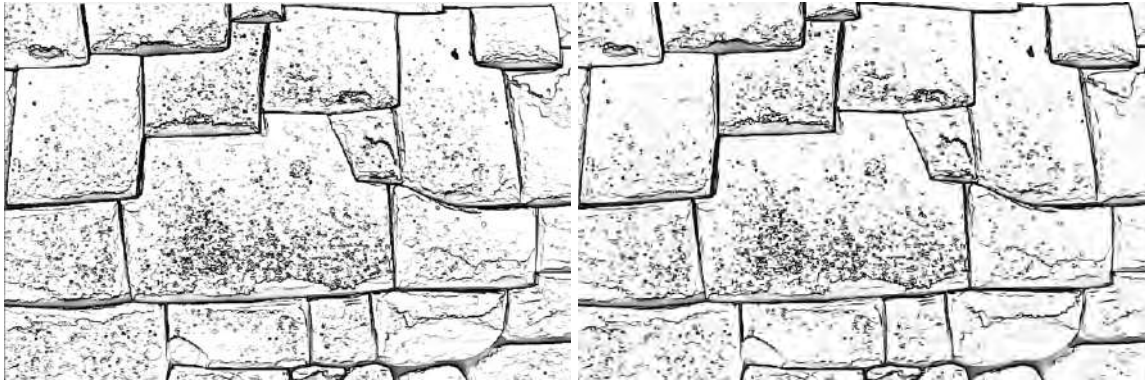
(b)

Figura A3 - 4: Filtrado Gaussiano de 55×55 (a) Imagen estilizada – capa azul (b) Imagen filtrada

- Imagen caricaturizada

La intensidad de la imagen de la *Figura A3 - 4a* se divide con la *Figura A3 - 4b* píxel con píxel de manera escalar y se multiplica por 255, con el fin de que se recupere la escala de 0 a 255 (*Figura A3 - 5a*). Esto se realiza con la rutina `cv2.divide` de la biblioteca `OPENCV`. Gracias a esto, se logra separar la imagen de los bordes, ya que si notamos en la *Figura A3 - 4a*, los bordes se notan a detalle, sin embargo, aún se aprecia variación de color plomo en los bloques. Por otro lado, en la *Figura A3 - 4b*, las piedras tienen un color casi similar por el suavizado, por lo que los bordes se han perdido parcialmente. Entonces si dividimos la *Figura A3 - 4a* con la *Figura A3 - 4b* píxel con píxel de manera escalar, se obtiene que los píxeles de la parte ploma (interior de los bloques) prácticamente sería 1, y la división de los píxeles en los bordes prácticamente sería 0 (*Figura A3 - 5a*). Si multiplicamos todos estos píxeles por 255, entonces estaríamos mostrando los bordes como color negro (0 en escala de 0 a 255) y la parte interna de los bloques como blanco (255 en escala de 0 a 255).

Luego, en la *Figura A3 - 5b* se muestra la *Figura A3 - 5a* pero con un filtro adicional de suavizado de imagen a color. De este modo, se resalta mejor la parte blanca. Sin embargo, se aprecia que algunas rugosidades de diversos bloques aún son muy notorias, las cuales aparecen como si fueran bordes de las piedras. Por este motivo se realiza un paquete de filtros tipo 2.



(a)

(b)

Figura A3 - 5: Filtro de división escalar y suavizado (a) División escalar (b) Suavizado

A continuación, se muestra el código relacionado al paquete de filtros tipo 1:

```
##### PAQUETE DE FILTROS 1 #####
#estilización de la imagen
image = cv2.stylization(image, sigma_s=60, sigma_r=0.2)

#suavizado de imagen a color
image = cv2.fastNlMeansDenoisingColored(image,10)

# Se utiliza la escala azul
#gray = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
gray = image[:, :, 0]

# Blur the image using Gaussian Blur 155
gray_blur = cv2.GaussianBlur(gray, (blurgaussiano,blurgaussiano), 0)

# Convert the image into pencil sketch y quitarle ruido

cartoon = cv2.divide(gray, gray_blur, scale=255.0)
imggray=cv2.fastNlMeansDenoising(cartoon,None,30)
```

C) Paquete de filtros tipo 2

- Imagen en escala de grises

La imagen original escalada a 720 píxeles se transforma a escala de grises. Para esto se utiliza las rutinas `cv2.cvtColor` y `cv2.COLOR_BGR2GRAY` de la librería `OPENCV`. La conversión según esta rutina sigue la ecuación A3-2.

$$\text{Imagen escala de grises} \leftarrow 0.299 \cdot R + 0.587 \cdot G + 0.114 \cdot B \quad (\text{A3-2})$$

Dónde R , G y B son las intensidades de los colores rojo, verde y azul respectivamente, de cada píxel. En la *Figura A3 - 6a* se muestra la imagen original y en la *Figura A3 - 6b*, la imagen en escala de grises.



(a)

(b)

Figura A3 - 6: Conversión a escala de grises (a) Imagen a color (b) Imagen a escala de grises

- Filtrado Gaussiano (método fuzzy)

Se realiza el filtrado gaussiano de la imagen en escala de grises, con el mismo tamaño del operador usado en el paquete de filtros tipo 1 (variable “blurgaussiano”). En la *Figura A3 - 7a* se muestra la imagen en escala de grises y en la *Figura A3 - 7b* la imagen filtrada. Como se aprecia, el filtro es más suave que en el paquete de filtros 1 (*Figura A3 - 4b*).



(a)

(b)

Figura A3 - 7: Filtrado gaussiano (a) Imagen a escala de grises (b) Imagen filtrada

- Imagen caricaturizada

La intensidad de la imagen de la *Figura A3 - 7a* se divide con la *Figura A3 - 7b* píxel a píxel de manera escalar, y se multiplica por 255, muy similar al punto 5 del Paquete de Filtros 1. Con esto obtenemos la *Figura A3 - 8* y se aprecia que en este caso no se pierde parte de los bloques como el caso de la *Figura A3 - 5b*; sin embargo, los bordes no se resaltan correctamente.



Figura A3 - 8: Filtro de división escalar

Se muestra a continuación parte el código relacionado a este paquete de filtros 2:

```
##### PAQUETE DE FILTROS 2 #####
# Se utiliza la escala de grises
gray2 = cv2.cvtColor(image2, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
#gray = image[:, :, 0]

# Blur the image using Gaussian Blur 155
gray_blur2 = cv2.GaussianBlur(gray2, (blurgaussiano, blurgaussiano), 0)

# Convert the image into pencil sketch
cartoon2 = cv2.divide(gray2, gray_blur2, scale=255.0)
imggray2=cartoon2
```

D) Interpolación tipo 1 y filtro de intensidad

Se realizan las interpolaciones del tipo 1, y luego se aplica un filtro de intensidad. Se sabe que la imagen tiene una intensidad de 0 a 255; sin embargo, no es relevante un rango tan alto de intensidad, ya que solo interesa ubicar el borde. Por lo tanto, en el algoritmo se asigna una nueva variable: “coloracionbordes”. Todo píxel con una intensidad por debajo de coloracionbordes, se le reemplaza una intensidad de 0, y si es lo contrario se le reemplaza con una intensidad de 255. Con esto se obtiene prácticamente una imagen en blanco y negro, dónde el color blanco es 255 y el color negro 0. Para esto se utiliza la rutina cv2.threshold de la biblioteca OPENCV, en donde se indica el valor de coloracionbordes a usar. Este parámetro es uno de los más importantes a calibrar, ya que depende de ello el más adecuado procesamiento de imágenes. En la *Figura A3 - 9a* se muestra la imagen que fue procesada con la Interpolación tipo 1, y en la *Figura A3 - 9b* la imagen filtrada por intensidad. Como se aprecia, esta imagen ha perdido diversas manchas que tenía la imagen.

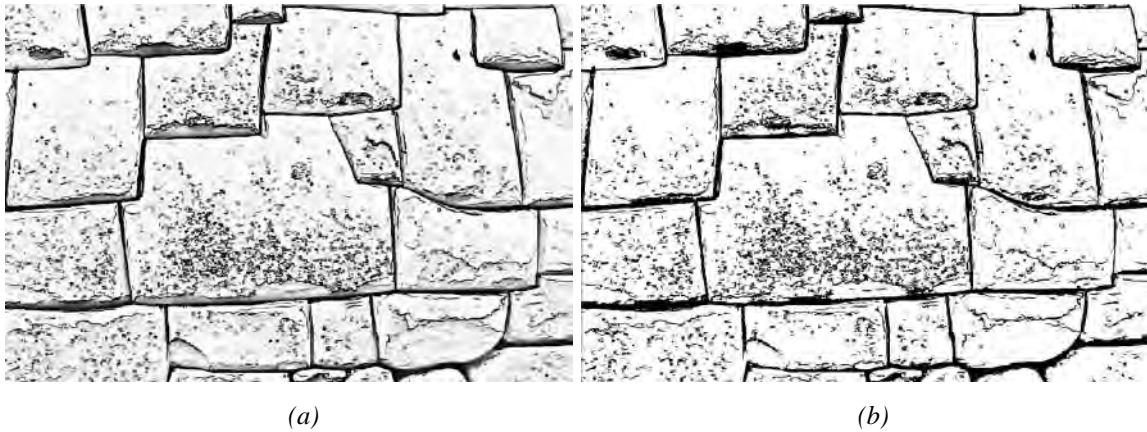


Figura A3 - 9: Filtrado de intensidad (a) Imagen antes del filtrado (b) Imagen filtrada

Se muestra a continuación parte el código relacionado:

```
##### UNIÓN DE PAQUETES DE FILTROS 1 Y 2 #####
imgray = np.array(imgray,dtype=float)
imgray2 = np.array(imgray2,dtype=float)

imgray = imgray * imgray2/255
imgray = np.array(imgray,dtype=np.uint8)

plt.hist(imgray.ravel(),256,[0,256]); plt.show()

#Retirando las manchas
img_new=np.where( imgray < coloracionbordes , 0 , 255) #si se cumple la condición, le damos 255, sino 0
imgray = img_new
imgray = np.array(imgray,dtype=np.uint8)
```

E) Paquete de filtros 3

- Ubicación del contorno

A partir del algoritmo de ubicación de contornos se ubican todos los elementos que tengan el mismo color en la *Figura A3 - 9b*. Para esto se utiliza la rutina `cv2.findContours` de la librería `OPENCV`. Todas las coordenadas de cada contorno se almacenan en una lista. Es cierto que en este caso el algoritmo podría ubicar contornos dentro de otros contornos, por lo tanto, se indica que, si existen contornos internos dentro de otro, se eliminen de la lista. Esto se logra con la rutina `cv2.RETR_EXTERNAL` de `OPENCV`.

- Eliminación de contornos muy pequeños

En esta etapa se mide la longitud de los contornos de la lista obtenida en el paso anterior, ya que se conocen sus coordenadas. Esto se logra por medio de la rutina `cv2.arcLength` de la biblioteca `OPENCV`. Si se desea se pueden borrar los contornos más pequeños según un valor asignado (En este caso se le dio el nombre de “tano” a esta variable). Si no se desea borrar contornos pequeños, asignar la variable “tano” como cero.

- Reducción de coordenadas por contorno

En ocasiones las coordenadas de la lista obtenida pueden tener muchas coordenadas, por lo que lo ideal es reducir la cantidad de coordenadas en cada contorno según un valor dado. Esto se realiza con la rutina `cv2.approxPolyDP` de OPENCV. El algoritmo mide las distancias entre coordenadas de un contorno, y si estas son muy pequeñas, se pueden ir filtrando. Para esto se le da un tamaño al algoritmo con tal de quitar las coordenadas con distancias más cortas a un valor asignado (En este caso se le dio el nombre de “detallado” a esta variable). Si no se desea reducir las coordenadas de un contorno, asignar la variable “detallado” como cero.

- Ordenamiento de contornos por tamaño

En esta etapa se ordena los contornos según su tamaño de contorno (de mayor a menor). Para esto también se utiliza la herramienta `cv2.approxPolyDP` de OPENCV. Además, en esta etapa se eliminan contornos no cerrados, es decir que solo tengan una o dos coordenadas.

- Pintado de los contornos

En esta fase se plotea cada contorno de mayor a menor, y se rellena la parte interna de cada uno con un color aleatorio solo con fines de visualización (*Figura A3 - 10a*). Esto se logra con la herramienta `cv2.drawContours`. En la *Figura A3 - 10a* se han ubicado los diversos bloques; sin embargo, hay sólidos muy pequeños los cuales no existen en la imagen real. En la *Figura A3 - 10b* se muestra el mismo caso de la *Figura A3 - 10a*, pero con los contornos pequeños eliminados, usando la variable “tano”. En la *Figura A3 - 10c* se muestra el caso de la *Figura A3 - 10b*, pero ahora con coordenadas filtradas excesivas en cada contorno, es decir, se utilizó una variable “detallado” muy grande. Por tanto, uno debe tener bastante cuidado en elegir el tamaño de contornos a eliminar y las coordenadas a filtrar, ya que eso podría eliminar o variar la geometría de los sólidos.



(a)



(b)

(c)

Figura A3 - 10: Pintado de los contornos (a) Sin filtrar contornos ni coordenadas (b) Filtrado de contornos pequeños (c) Filtrado excesivo de coordenadas

Se muestra a continuación parte el código relacionado:

```
#Ubicación de bordes
ret, thresh = cv2.threshold(imgray,coloracionbordes,255,0)
cnts, hierarchy = cv2.findContours(imgray,cv2.RETR_EXTERNAL,cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)

#Se crea un nuevo contorno para eliminar objetos pequeños
nuevocontorno = cnts.copy()

# se elimina las áreas pequeñas según el tamaño de tano
a = len(cnts)-1

for c in range(a):
    #El análisis comienza de reversa para no malograr la serie
    i = a - c
    hola = cv2.arcLength(cnts[i], True)

    if (hola < tano):
        nuevocontorno.pop(i)

#Midiendo los contornos
result = []
contadores = []
for x in nuevocontorno:
    epsilon = detallado * cv2.arcLength(x, True)
    approx = cv2.approxPolyDP(x, epsilon, True)
    #approx = cv2.convexHull(x)
    result.append(approx)
    contadores.append(epsilon)

#se pone todo result en orden de mayor a menor, de ese modo se pone las pintadas grandes primero
movimiento = [x for _,x in sorted(zip(contadores,result),reverse=True)]
result = movimiento

#dibujado encima de la imagen
for x in result:
    cv2.drawContours(image, [x], -1, (random.randint(255), random.randint(255), random.randint(255)), -1)

cv2.imshow('imgray',imgray)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()
```

F) Corrección manual

Como se aprecia en la *Figura A3 - 10b* hay sólidos que se han unido con otros debido a que tienen el mismo color. Esto se da debido a que en esa zona los bordes no fueron detectados adecuadamente y por este motivo

se realiza una corrección manual. Para esto se utiliza las herramientas `cv2.circle`, `cv2.setMouseCallback` y `cv2.line` de la biblioteca `OPENCV`. En primer lugar, se plotea la *Figura A3 - 10b* y se dibuja sobre está usando líneas continuas de color blanco. El primer click del mouse sobre la imagen coloca el primer punto, con el segundo click se traza una línea entre este punto y el anterior, y así sucesivamente. Si se desea continuar con otro sólido, se presiona la tecla `Escape` y se procede con otro sólido. Para terminar el proceso de dibujo con líneas blancas se debe presionar la tecla "1". Este procedimiento permite eliminar sólidos o zonas inexistentes. No es necesario corregir las zonas tipo venas dentro de los sólidos, ya que más adelante se utilizará un algoritmo especial para eliminar estos detalles. En la *Figura A3 - 11a* se aprecia el arreglo de zonas no deseadas (círculo rojo). En segundo lugar, se realiza el mismo proceso, pero con líneas negras. Estas líneas serán utilizadas para cerrar los sólidos adecuadamente y no se junten (líneas azules gruesas en la *Figura A3 - 11a*). El proceso es el mismo, pero en este caso se finaliza presionando el número "2". Tener en cuenta que esta corrección manual es muy importante, ya que con ello obtenemos una obtención de los bordes más adecuada. En la *Figura A3 - 11b* se muestra la imagen con los contornos corregidos en una escala de blanco y negro.

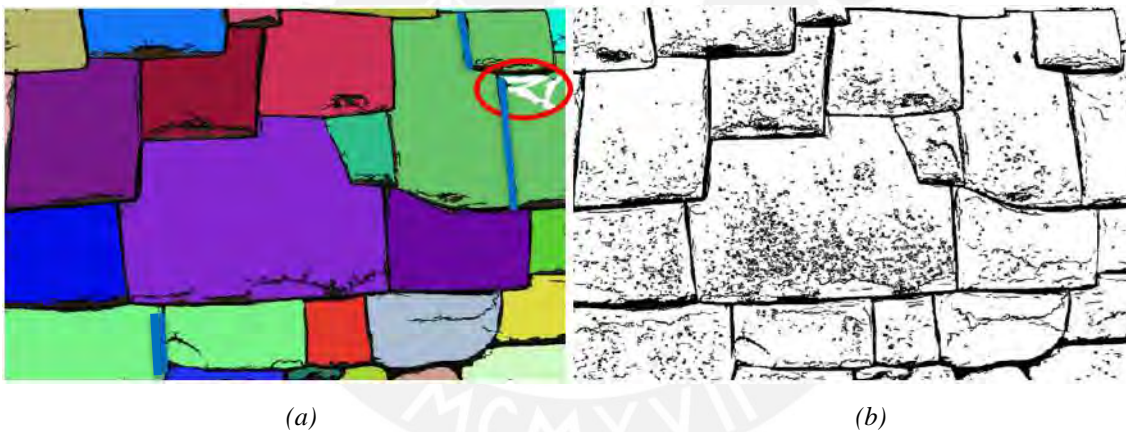


Figura A3 - 11: Corrección manual de imagen (a) Marcas realizadas (b) Imagen mejorada

Se muestra a continuación parte el código relacionado:

```
#####DIBUJO ENCIMA DE LA IMAGEN #####
#FUNCION PARA RAYAR CONTORNOS CON PLUMA NEGRA
def click_event(event, x, y, flags, param):
    if event == cv2.EVENT_LBUTTONDOWN:
        cv2.circle(img, (x, y), 1, (0, 0, 0), 1, cv2.FILLED)
        points.append((x, y))
        if len(points) >= 2:
            cv2.line(img, points[-1], points[-2], (0, 0, 0), 1, cv2.LINE_AA)
            cv2.line(img, points[-1], points[-2], (0, 0, 0), 1, cv2.LINE_AA)
            cv2.imshow('LÍNEAS NEGRAS - Presiones "2" para finalizar', img)
        elif event == cv2.EVENT_RBUTTONDOWN:
            points.clear()

#FUNCION PARA RAYAR CONTORNOS CON PLUMA BLANCA
def click_event2(event, x, y, flags, param):
```

```

if event == cv2.EVENT_LBUTTONDOWN:
    cv2.circle(img, (x, y), 1, (255, 255, 255), 1, cv2.FILLED)
    points.append((x, y))
    if len(points) >= 2:
        cv2.line(img, points[-1], points[-2], (255, 255, 255), 5, cv2.LINE_AA)
        cv2.line(imgray, points[-1], points[-2], (255, 255, 255), 5, cv2.LINE_AA)
    cv2.imshow('LÍNEAS BLANCAS - Presione "1" para finalizar', img)
elif event == cv2.EVENT_RBUTTONDOWN:
    points.clear()

img=image

#Se utiliza las dos funciones anteriores

#primero con líneas blancas (borrar)

while True:
    # do something
    if keyboard.is_pressed("1"):
        print("q pressed, ending loop")
        break

    else:
        cv2.imshow('LÍNEAS BLANCAS - Presione "1" para finalizar', img)
        points = []
        cv2.setMouseCallback('LÍNEAS BLANCAS - Presione "1" para finalizar', click_event2)

        cv2.waitKey(0)
        cv2.destroyAllWindows()

#segundo con líneas negras (agregar)

while True:
    # do something
    if keyboard.is_pressed("2"):
        print("q pressed, ending loop")
        break

    else:
        cv2.imshow('LÍNEAS NEGRAS - Presiones "2" para finalizar', img)
        points = []
        cv2.setMouseCallback('LÍNEAS NEGRAS - Presiones "2" para finalizar', click_event)

        cv2.waitKey(0)
        cv2.destroyAllWindows()

#SE DIBUJA LA IMAGEN PINCELADA CON LOS ARREGLOS
cv2.imshow('imagen final',imgray)
cv2.waitKey(0)
imagenueva = cv2.imwrite('F:\caso1.jpg',image) #Para guardar la imagen con contornos
cv2.destroyAllWindows()

```

G) Algoritmo ConvexHull

Luego de obtener la *Figura A3 - 11b*, se procesa nuevamente la imagen con el Paquete de Filtros 3 y así obtener la *Figura A3 - 13a*. Como se aprecia, ahora se ubicaron adecuadamente los contornos de cada bloque debido a la corrección manual; sin embargo, esta figura todavía tiene muchas imperfecciones internas, la cual se resuelve con el algoritmo `cv2.ConvexHull` de la librería `OPENCV`. Este algoritmo revisa cada píxel de la imagen y ubica los píxeles que tienen el mismo color. Luego únicamente encierra estos píxeles en un contorno y indica las coordenadas de este (*Figura A3 - 12*). Lamentablemente, al obtener estos nuevos contornos, estos se superponen entre sí y eso hace que los sólidos se construyan de mala manera (*Figura A3 - 13b*). Una solución para esto es plotear los contornos con relleno, desde el más grande al más pequeño, y así, obtener la *Figura A3 - 13c*. Sin embargo, con esto no se corrigen las coordenadas de cada contorno, solo se obtiene algo visual. Más adelante se explicará un algoritmo para corregir este problema.

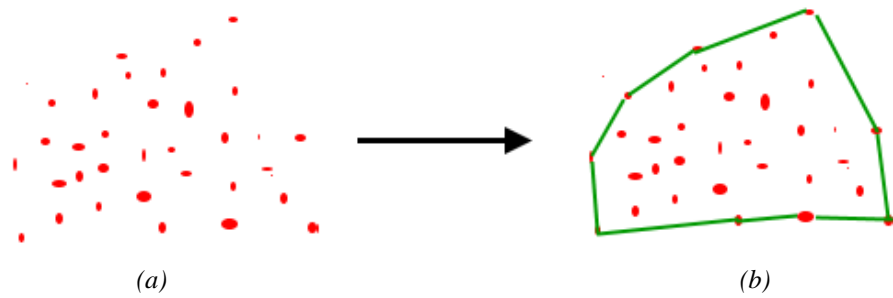


Figura A3 - 12: algoritmo ConvexHull

(a) Colores dispersos (b) polígono obtenido al cerrar todos puntos del mismo color

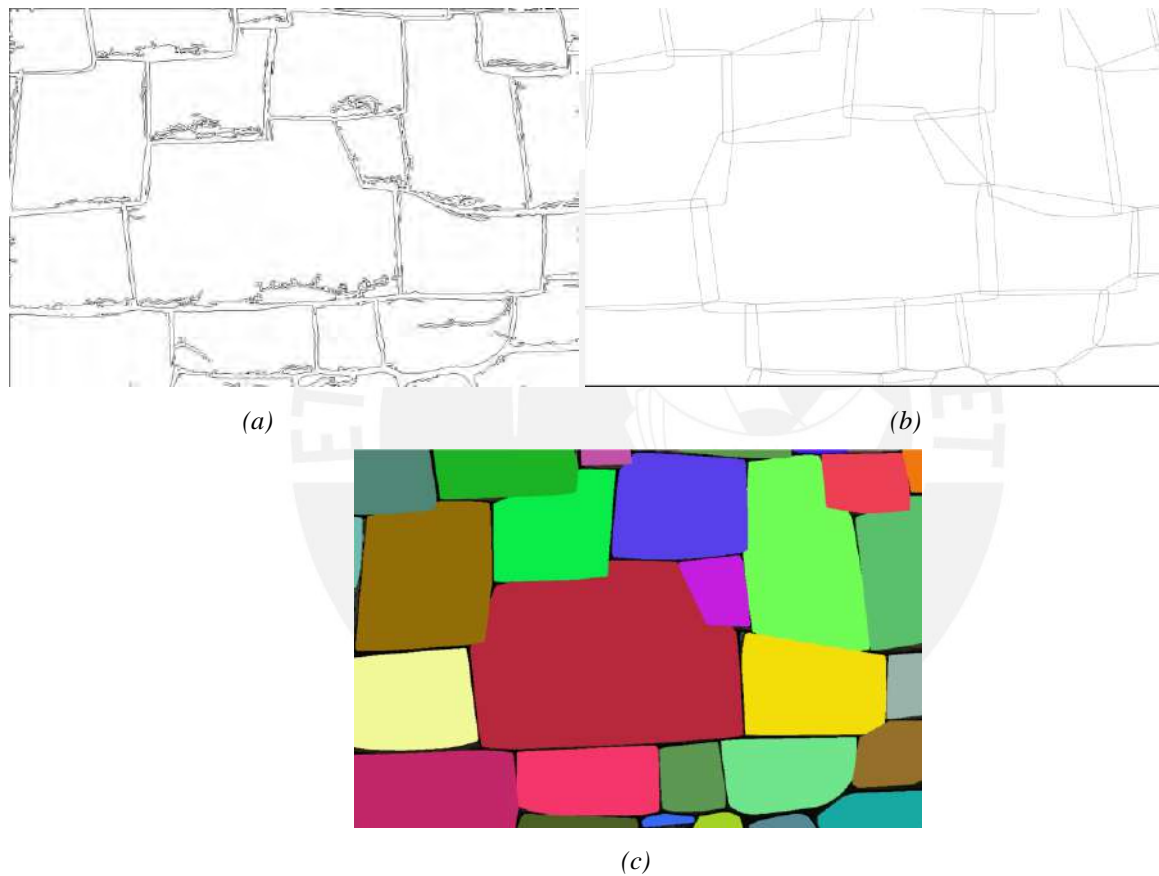


Figura A3 - 13: Imagen procesada con un algoritmo de contorno

(a) Imagen procesada nuevamente por el Paquete de Filtros 3 (b) Imagen filtrada con ConvexHull

(c) Dibujado de contornos con relleno

Se muestra a continuación parte el código relacionado:

```
# se elimina las áreas pequeñas según el tamaño de tano
a = len(nuevocontorno)-1
for c in range(a):
    #El análisis comienza de reversa para no malograr la serie
    i = a - c
    hola = cv2.arcLength(nuevocontorno[i], True)
```

```

if (hola < tano):
    nuevocontorno.pop(i)

result = []
contadores = []
for x in nuevocontorno:
    epsilon = detallado * cv2.arcLength(x, True)
    approx = cv2.approxPolyDP(x, epsilon, True)
    approx = cv2.convexHull(x)
    approx = approx
    result.append(approx)
    contadores.append(epsilon)

```

H) Incremento de sólidos

Como se aprecia en la *Figura A3 - 13c*, existen huecos entre los sólidos, lo cual realmente no se aprecia en la imagen real. Por ende, se incrementa cada sólido un porcentaje desde su centroide. Para esto primero se ubica el centroide de cada sólido con la herramienta `cv2.moments` de la biblioteca `OPENCV`. Luego, cada contorno se traslada desde su centroide al punto (0,0) y se le incrementa por un factor (variable “K” en el programa). Luego del incremento, el contorno se traslada nuevamente a su posición original desde su centroide. Se sugiere no incrementar más del 15% de tamaño, ya que, si este incremento es muy agresivo, los sólidos podrían deformarse. En la *Figura A3 - 14a* se aprecia los sólidos obtenidos en la *Figura A3 - 13c* con un incremento de tamaño del 10%, y en la *Figura A3 - 14b* la *Figura A3 - 14a* con un relleno blanco. Tener en cuenta que hasta aquí todavía no se consiguen las coordenadas corregidas. Las coordenadas de estos nuevos contornos se guardan en la variable “result”.

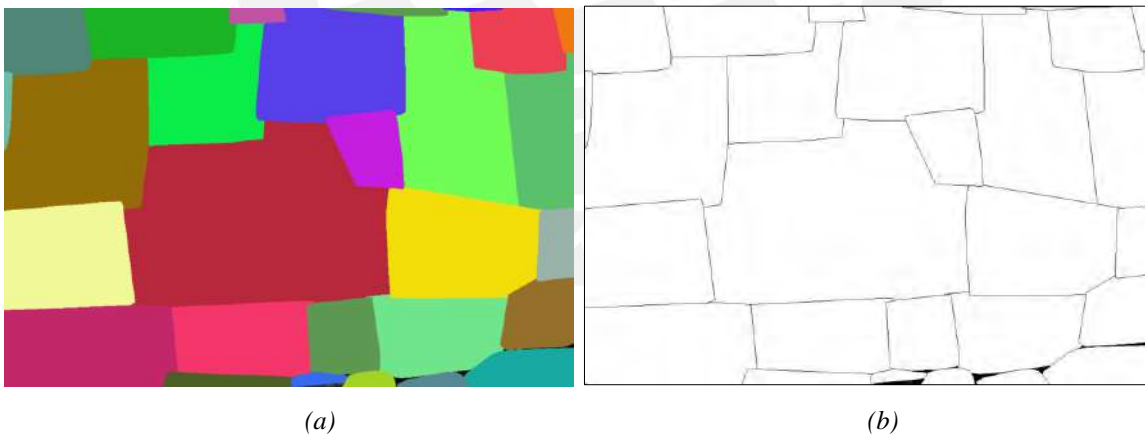


Figura A3 - 14: Incremento de tamaño de contornos
(a) Imagen con sólidos incrementados (b) Contornos finales de la imagen

Se muestra a continuación parte el código relacionado:

```

#####INCREMENTO DE SÓLIDOS CON K #####
#PROGRAMA DE INCREMENTO DE SOLIDOS
nuevasareas = []

#se elimina los contornos que son líneas
longitud1 = len(result)-1
for i in range(0, longitud1):

```

```

p = longitud1 - i
if (result[p].size == 2):
    result.pop(p)

for x in result:
    #se obtiene los centroides de la figura
    M = cv2.moments(x)

    if M['m00'] == 0:
        M['m00'] = 0.000001

    cx = int(M['m10']/M['m00'])
    cy = int(M['m01']/M['m00'])

    #Se traslada la figura al cero cero
    traslado = x - [cx, cy]
    #Escala la figura
    trasescalado = traslado * (1+K)
    #Regresamos a su posición
    nuevito = trasescalado + [cx, cy]
    nuevito = nuevito.astype(np.int32)
    nuevasareas.append(nuevito)

result = nuevasareas

contarte=0
for x in result:
    cv2.drawContours(image2, [x], -1, (colorines[contarte][0], colorines[contarte][1], colorines[contarte][2]), -1)
    contarte = contarte+1

cv2.imshow('blanco',image2)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()

```

I) Manipulación de contornos

Los contornos en la variable “result” pueden tener contornos de 1 o solo dos coordenadas, por lo cual se eliminan estos contornos para evitar problemas futuros. Luego, se convierte cada contorno en coordenadas tipo polígonos, es decir, en vez de que tengan corchetes, tengan paréntesis. Esto se realiza con el fin de usar la librería SHAPELY.

- Corrección de contornos

Cada contorno se convierte en polígonos por medio de la rutina “Polygon” de la librería SHAPELY. Los polígonos están ordenados de mayor a menor tamaño. En primera instancia se plotea el 1er polígono, luego, se coloca el 2do polígono, pero si este se interseca con el primer polígono, entonces se modifica las coordenadas del primero con tal de que no se intersequen. La rutina usada para este caso es “object.difference” de la librería SHAPELY. Después, se coloca el 3er polígono y se modifica los polígonos anteriores si hay intersección. Este procedimiento se realiza hasta finalizar el ploteo de todos los polígonos. Todo esto se realiza para eliminar el problema que se tenía en la *Figura A3 - 13b* debido al algoritmo ConvexHull. También, debido al incremento de sólidos, algunos polígonos se salen del tamaño inicial de 720 píxeles, por lo tanto, se recorta estos polígonos, intersecando cada uno de ellos con un polígono del tamaño de la imagen escalada. Por último, se retorna todos los polígonos a coordenadas, y luego a contornos en la variable “result3”.

- Dimensionado de contornos

Todos los contornos son escalados, con tal que la longitud horizontal de la imagen sea igual a la longitud real que aparece en el muro (para este caso se usa la variable “baseimagen”). Finalmente se obtiene la variable “result4” que contiene todos los contornos de cada bloque, ordenados de mayor a menor tamaño.

Se muestra a continuación parte el código relacionado

```
##### USO DE LA LIBRERÍA SHAPELY #####
#con esto convierto lo del result en coordenadas para trabajar con esta libreria
#Shapely

result2 = []
coords = []

for manta in result:
    a = manta
    coords =[]
    for cols in a:
        coords.append((cols[0][0], cols[0][1]))
    result2.append(coords)

#ahora cortamos todo

cantidadnueva = len(result2)

for i in range(0,cantidadnueva):
    xi = Polygon(result2[i])

    for j in range(0,i):
        if i != j:
            xj = Polygon(result2[j])
            if xi.overlaps(xj) == True:
                casonuevo = xj.difference(xi)
                if casonuevo.geom_type == 'MultiPolygon':
                    san1 = casonuevo.geoms[0].area
                    san2 = casonuevo.geoms[1].area
                    if san1 > san2:
                        p = list(casonuevo.geoms[0].exterior.coords)
                        if p != []:
                            result2[j] = p
                    else:
                        p = list(casonuevo.geoms[1].exterior.coords)
                        if p != []:
                            result2[j] = p
                else:
                    p = list(casonuevo.exterior.coords)
                    if p != []:
                        result2[j] = p

#se recorta los contornos al tamaño de la imagen
tamanoimagen = Polygon([(0.0,0.0),(valorito2,0.0),(valorito2,valorito1),(0.0,valorito1)])

cantidadnueva = len(result2)

result3 = []

for i in range(0,cantidadnueva):
    xi = Polygon(result2[i])
    nuevopoli = xi & tamanoimagen
    if nuevopoli.geom_type == 'Polygon':
        p = list(nuevopoli.exterior.coords)
        result3.append(p)
    else:
        p = list(nuevopoli.geoms[0].exterior.coords)
        result3.append(p)

#convertimos todo nuevamente a lo que era antes

result4 = []
coords = []
for manta in result3:
    a = manta
```

```

coords =[]
for cols in a:
    coords.append([[cols[0], cols[1]]])
result4.append(coords)

##### PRODUCCIÓN DE LA VARIABLE RESULT4 #####

#Se realiza el escalado
factorito = baseimagen/valorito2

cantidal = len(result4)

for i in range(0,cantidal):
    cantida2 = len(result4[i])
    for j in range(0,cantida2):
        result4[i][j][0][0]=result4[i][j][0][0]*factorito
        result4[i][j][0][1]=(-result4[i][j][0][1]+valorito1)*factorito

#El resultado es RESULT4

```

En la *Figura A3 - 15* se muestra la imagen original sin procesar y la imagen procesada.



Figura A3 - 15: Sólidos obtenidos por medio de la segmentación de imágenes

ANEXO 4: CÓDIGO 3 PARA DIBUJO EN ABAQUS

```
# -*- coding: utf-8 -*-
# Abaqus/CAE Release 2023 replay file
# Realizado por Leonel Lipa

# Importamos datos iniciales para Abaqus/CAE

from caeModules import *
from driverUtils import executeOnCaeStartup
executeOnCaeStartup()
import time
from abaqus import *
from abaqusConstants import *
import __main__
import numpy as np

#####LISTA DE VARIABLES SOLICITADAS DEL MURO DEL PROGRAMA#####

tantx = float(getInput('Indique la longitud del muro en metros (X):')) #Tamaño de la plataforma en X
tantz = tantx #Tamaño de la plataforma en Z
tany = float(getInput('Indique la altura de las plataformas laterales y fondo (Y):'))#es la altura que van a
tener las paredes
grosor = float(getInput('Indique el grosor del muro:')) # las plataformas laterales tendrán un grosor adicional
para que entre el muro a evaluar
#####LISTA DE VARIABLES QUE MODIFICAR #####

esferad = 0.2 #es el diámetro de la esfera

# Consideraciones para el contacto: se coloca la rigidez de contacto Kc y el coef. de fricción

coef_rigidez = 0.4
kc = 100000000

##### CARACTERÍSTICAS DEL MODELO #####

## Creación de la parte y geometría
s = mdb.models['Model-1'].ConstrainedSketch(name='__profile__',
sheetSize=200.0)
g, v, d, c = s.geometry, s.vertices, s.dimensions, s.constraints
s.setPrimaryObject(option=STANDALONE)

mdb.models['Model-1'].ContactProperty('Interaccion1')
mdb.models['Model-1'].interactionProperties['Interaccion1'].TangentialBehavior(
formulation=PENALTY, directionality=ISOTROPIC, slipRateDependency=OFF,
pressureDependency=OFF, temperatureDependency=OFF, dependencies=0,
table=((coef_rigidez, ), ), shearStressLimit=None, maximumElasticSlip=FRACTION,
fraction=0.005, elasticSlipStiffness=None)
mdb.models['Model-1'].interactionProperties['Interaccion1'].NormalBehavior(
pressureOverclosure=LINEAR, contactStiffness=kc,
constraintEnforcementMethod=DEFAULT)
mdb.models['Model-1'].ContactExp(name='Totalcontacto',
createStepName='Initial')
mdb.models['Model-1'].interactions['Totalcontacto'].includedPairs.setValuesInStep(
stepName='Initial', useAllstar=ON)
mdb.models['Model-1'].interactions['Totalcontacto'].contactPropertyAssignments.appendInStep(
stepName='Initial', assignments=((GLOBAL, SELF, 'Interaccion1'), ))

# Se construye la sección: Gravedad, Estabilidad y sismo. Se coloca el Dt para el caso explícito

dt = 0.0001
tiemposismo = 10

mdb.models['Model-1'].ExplicitDynamicsStep(name='Gravedad', previous='Initial',
timeIncrementationMethod=FIXED_USER_DEFINED_INC, userDefinedInc=dt,
improvedDtMethod=ON)
session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(step='Gravedad')
mdb.models['Model-1'].ExplicitDynamicsStep(name='Estabilidad',
previous='Gravedad', timeIncrementationMethod=FIXED_USER_DEFINED_INC,
userDefinedInc=dt, improvedDtMethod=ON)
session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(step='Estabilidad')
mdb.models['Model-1'].ExplicitDynamicsStep(name='Sismo',
previous='Estabilidad', timePeriod=tiemposismo,
timeIncrementationMethod=FIXED_USER_DEFINED_INC, userDefinedInc=dt,
```

```

improvedDtMethod=ON)
session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(step='Sismo')

#CARGAS, se coloca la gravedad y el empotramiento

#GRAVEDAD
session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(step='Gravedad')
mdb.models['Model-1'].Gravity(name='Gravedad', createStepName='Gravedad',
    comp2=-9.81, distributionType=UNIFORM, field='')
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly

session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(step='Gravedad')
mdb.models['Model-1'].TabularAmplitude(name='gravedad tabla', timeSpan=STEP,
    smooth=SOLVER_DEFAULT, data=((0.0, 0.0), (1.0, 1.0)))
mdb.models['Model-1'].loads['Gravedad'].setValues(amplitude='gravedad tabla',
    distributionType=UNIFORM, field='')

##### CREACIÓN DE PLATAFORMAS #####

#Creación de la plataforma de abajo

valormaximo = 2*max(tantx, tanty, tantz) # tamaño de la plataforma

del mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__'] # Estos DEL permiten unir el assembly anterior con
el nuevo
s1 = mdb.models['Model-1'].ConstrainedSketch(name='__profile__',
    sheetSize=200.0)
g, v, d, c = s1.geometry, s1.vertices, s1.dimensions, s1.constraints
s1.setPrimaryObject(option=STANDALONE)

s1.rectangle(point1=(-valormaximo, -valormaximo), point2=(valormaximo, valormaximo)) #se crea la
plataforma con este tamaño
p = mdb.models['Model-1'].Part(name='Plataforma', dimensionality=THREE_D,
    type=DISCRETE_RIGID_SURFACE) #tipo de plataforma

p = mdb.models['Model-1'].parts['Plataforma']
p.BaseShell(sketch=s1)
s1.unsetPrimaryObject()
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plataforma']
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p)
del mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__']
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plataforma']
v1, e, dl, n = p.vertices, p.edges, p.datums, p.nodes
p.ReferencePoint(point=v1[0])
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plataforma']
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p)
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plataforma']
r = p.referencePoints
refPoints=(r[2], )
region=p.Set(referencePoints=refPoints, name='Set-1')
mdb.models['Model-1'].parts['Plataforma'].engineeringFeatures.PointMassInertia(
    name='Inertia-1', region=region, mass=0.000001, alpha=0.0, composite=0.0) #Propiedades de masa de la
plataforma
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
a1 = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plataforma']
a1.Instance(name='Plataforma-1', part=p, dependent=ON)

a1 = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
a1.rotate(instanceList=('Plataforma-1', ), axisPoint=(-10.0, 0.0, 0.0), #rotación de la plataforma
    axisDirection=(20.0, 0.0, 0.0), angle=90.0)

a1 = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
a1.translate(instanceList=('Plataforma-1', ), vector=(tantx/2, 0, tantz/2)) #traslación de la
plataforma

p = mdb.models['Model-1'].parts['Plataforma']
p.seedPart(size= valormaximo/10, deviationFactor=0.1, minSizeFactor=0.1) #Mallado
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plataforma']
f = p.faces
pickedRegions = f.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
p.setMeshControls(regions=pickedRegions, elemShape=QUAD)
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plataforma']
p.generateMesh()
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=a)
a1 = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
a1.regenerate()

#Plataforma del fondo

```

```

p = mdb.models['Model-1'].parts['Plataforma']
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p)
s = mdb.models['Model-1'].ConstrainedSketch(name='__profile__',
sheetSize=200.0)
g, v, d, c = s.geometry, s.vertices, s.dimensions, s.constraints
s.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
s.rectangle(point1=(0.0, 0.0), point2=(tantx , tanty)) #tamaño de la plataforma
p = mdb.models['Model-1'].Part(name='PLATFONDO', dimensionality=THREE_D,
type=DISCRETE_RIGID_SURFACE)
p = mdb.models['Model-1'].parts['PLATFONDO']
p.BaseShell(sketch=s)
s.unsetPrimaryObject()
p = mdb.models['Model-1'].parts['PLATFONDO']
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p)
del mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__']
session.viewports['Viewport: 1'].partDisplay.setValues(sectionAssignments=ON,
engineeringFeatures=ON)
session.viewports['Viewport: 1'].partDisplay.geometryOptions.setValues(
referenceRepresentation=OFF)
p = mdb.models['Model-1'].parts['PLATFONDO']
v1, e, dl, n = p.vertices, p.edges, p.datums, p.nodes
p.ReferencePoint(point=v1[0])
p = mdb.models['Model-1'].parts['PLATFONDO']
r = p.referencePoints
refPoints=(r[2], )
region=p.Set(referencePoints=refPoints, name='Set-1')
mdb.models['Model-1'].parts['PLATFONDO'].engineeringFeatures.PointMassInertia(
name='Inertia-1', region=region, mass=0.000001, alpha=0.0, composite=0.0) # propiedades de la plataforma
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
p = mdb.models['Model-1'].parts['PLATFONDO']
a.Instance(name='PLATFONDO-1', part=p, dependent=ON)
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
a.translate(instanceList=('PLATFONDO-1', ), vector=(0, 0, -round(tanty* sqrt(3),1))) #traslado de la
plataforma
session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(step='Initial')
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
r1 = a.instances['PLATFONDO-1'].referencePoints
refPoints1=(r1[2], )
region = a.Set(referencePoints=refPoints1, name='Set-51')

session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(mesh=ON, loads=OFF, #mallado
bcs=OFF, predefinedFields=OFF, connectors=OFF)
session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.meshOptions.setValues(
meshTechnique=ON)
p = mdb.models['Model-1'].parts['PLATFONDO']
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p)
session.viewports['Viewport: 1'].partDisplay.setValues(sectionAssignments=OFF,
engineeringFeatures=OFF, mesh=ON)
session.viewports['Viewport: 1'].partDisplay.meshOptions.setValues(
meshTechnique=ON)
p = mdb.models['Model-1'].parts['PLATFONDO']
p.seedPart(size=valormaximo/40, deviationFactor=0.1, minSizeFactor=0.1) #Tamaño del mallado
p = mdb.models['Model-1'].parts['PLATFONDO']
p.generateMesh()
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=a)
a1 = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
a1.regenerate()

#Plataforma Izquierda

s1 = mdb.models['Model-1'].ConstrainedSketch(name='__profile__',
sheetSize=200.0)
g, v, d, c = s1.geometry, s1.vertices, s1.dimensions, s1.constraints
s1.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
s1.rectangle(point1=(0.0, 0.0), point2=(round(tanty* sqrt(3),1) + grosor, tanty)) #tamaño de la plataforma más
un exceso que es el grosor del muro
p = mdb.models['Model-1'].Part(name='PLATOIZQUIERDA', dimensionality=THREE_D,
type=DISCRETE_RIGID_SURFACE)
p = mdb.models['Model-1'].parts['PLATOIZQUIERDA']
p.BaseShell(sketch=s1)
s1.unsetPrimaryObject()
p = mdb.models['Model-1'].parts['PLATOIZQUIERDA']
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p)
del mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__']
session.viewports['Viewport: 1'].partDisplay.setValues(sectionAssignments=ON,
engineeringFeatures=ON)
session.viewports['Viewport: 1'].partDisplay.geometryOptions.setValues(
referenceRepresentation=OFF)

```

```

p = mdb.models['Model-1'].parts['PLATOIZQUIERDA']
v2, e1, d2, n1 = p.vertices, p.edges, p.datums, p.nodes
p.ReferencePoint(point=v2[1])
p = mdb.models['Model-1'].parts['PLATOIZQUIERDA']
r = p.referencePoints
refPoints=(r[2], )
region=p.Set(referencePoints=refPoints, name='Set-1')
mdb.models['Model-1'].parts['PLATOIZQUIERDA'].engineeringFeatures.PointMassInertia(
    name='OTRO', region=region, mass=0.000001, alpha=0.0, composite=0.0)
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=a)
session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(mesh=OFF)
session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.meshOptions.setValues(
    meshTechnique=OFF)
a1 = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
p = mdb.models['Model-1'].parts['PLATOIZQUIERDA']
a1.Instance(name='PLATOIZQUIERDA-1', part=p, dependent=ON)
a1 = mdb.models['Model-1'].rootAssembly

a.translate(instanceList=('PLATOIZQUIERDA-1', ), vector=(0,0,0)) #traslado de la plataforma
a.rotate(instanceList=('PLATOIZQUIERDA-1', ), axisPoint=(0.0, 0.0, 0.0),
    axisDirection=(0.0, 10.0, 0.0), angle=-90.0)
a1.translate(instanceList=('PLATOIZQUIERDA-1', ), vector=(0, 0, -round(tanty* sqrt(3),1)))

session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(mesh=ON, loads=OFF, #mallado
    bcs=OFF, predefinedFields=OFF, connectors=OFF)
session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.meshOptions.setValues(
    meshTechnique=ON)
p = mdb.models['Model-1'].parts['PLATOIZQUIERDA']
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p)
session.viewports['Viewport: 1'].partDisplay.setValues(sectionAssignments=OFF,
    engineeringFeatures=OFF, mesh=ON)
session.viewports['Viewport: 1'].partDisplay.meshOptions.setValues(
    meshTechnique=ON)
p = mdb.models['Model-1'].parts['PLATOIZQUIERDA']
p.seedPart(size=valormaximo/40, deviationFactor=0.1, minSizeFactor=0.1) #Tamaño del mallado
p = mdb.models['Model-1'].parts['PLATOIZQUIERDA']
p.generateMesh()
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=a)
a1 = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
a1.regenerate()

#Plataforma derecha

s1 = mdb.models['Model-1'].ConstrainedSketch(name='__profile__',
    sheetSize=200.0)
g, v, d, c = s1.geometry, s1.vertices, s1.dimensions, s1.constraints
s1.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
s1.rectangle(point1=(0.0, 0.0), point2=(round(tanty* sqrt(3),1) + grosor, tanty)) #tamaño de la plataforma más
    un exceso que es el grosor del muro)
p = mdb.models['Model-1'].Part(name='PLATODERECHA', dimensionality=THREE_D,
    type=DISCRETE_RIGID_SURFACE)
p = mdb.models['Model-1'].parts['PLATODERECHA']
p.BaseShell(sketch=s1)
s1.unsetPrimaryObject()
p = mdb.models['Model-1'].parts['PLATODERECHA']
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p)
del mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__']
session.viewports['Viewport: 1'].partDisplay.setValues(sectionAssignments=ON,
    engineeringFeatures=ON)
session.viewports['Viewport: 1'].partDisplay.geometryOptions.setValues(
    referenceRepresentation=OFF)
p = mdb.models['Model-1'].parts['PLATODERECHA']
v2, e1, d2, n1 = p.vertices, p.edges, p.datums, p.nodes
p.ReferencePoint(point=v2[1])
p = mdb.models['Model-1'].parts['PLATODERECHA']
r = p.referencePoints
refPoints=(r[2], )
region=p.Set(referencePoints=refPoints, name='Set-1')
mdb.models['Model-1'].parts['PLATODERECHA'].engineeringFeatures.PointMassInertia(
    name='OTRO', region=region, mass=0.000001, alpha=0.0, composite=0.0)
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=a)
session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(mesh=OFF)
session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.meshOptions.setValues(
    meshTechnique=OFF)
a1 = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
p = mdb.models['Model-1'].parts['PLATODERECHA']
a1.Instance(name='PLATODERECHA', part=p, dependent=ON)

```

```

a1 = mdb.models['Model-1'].rootAssembly

a.translate(instanceList=('PLATODERECHA', ), vector=(0, 0, 0))           #traslado de la plataforma
a1.rotate(instanceList=('PLATODERECHA', ), axisPoint=(0.0, 0.0, 0.0),
axisDirection=(0.0, 10.0, 0.0), angle=-90.0)
a1.translate(instanceList=('PLATODERECHA', ), vector=(tantx, 0, -round(tanty* sqrt(3),1)))

session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(mesh=ON, loads=OFF,           #mallado
bcs=OFF, predefinedFields=OFF, connectors=OFF)
session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.meshOptions.setValues(
meshTechnique=ON)
p = mdb.models['Model-1'].parts['PLATODERECHA']
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p)
session.viewports['Viewport: 1'].partDisplay.setValues(sectionAssignments=OFF,
engineeringFeatures=OFF, mesh=ON)
session.viewports['Viewport: 1'].partDisplay.meshOptions.setValues(
meshTechnique=ON)
p = mdb.models['Model-1'].parts['PLATODERECHA']
p.seedPart(size=valormaximo/40, deviationFactor=0.1, minSizeFactor=0.1)           #Tamaño del mallado
p = mdb.models['Model-1'].parts['PLATODERECHA']
p.generateMesh()
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=a)
a1 = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
a1.regenerate()

#####

#step fieldoutput, para que se evalúe cada intervalo de 0.01 segundos
mdb.models['Model-1'].fieldOutputRequests['F-Output-1'].setValues(variables=(
'U', 'V', 'A', 'RF'), timeInterval=0.01)

##### CREACIÓN DEL MODELO FÍSICO 3D #####

#####MURO INCA####

# AQUI SE DEBE PEGAR LA VARIABLE RESULT4

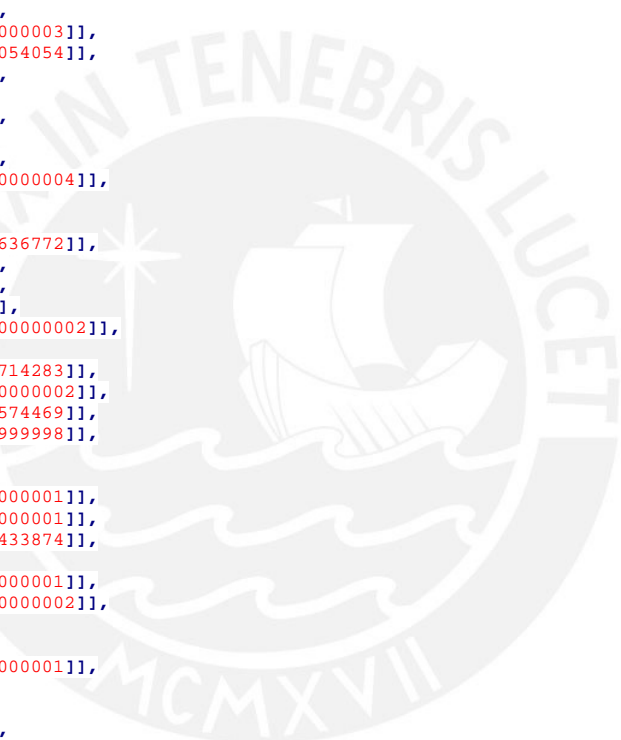
result = [[[[0.8471101170244648, 3.907563367673179]],
[[0.9386666666666668, 4.481568]],
[[0.9813333333333334, 4.6567872]],
[[0.9955555555555556, 4.7039616]],
[[1.0382222222222224, 4.784832000000001]],
[[1.1022222222222222, 4.8117888]],
[[1.1377777777777778, 4.8252672]],
[[1.3582222222222222, 4.852224]],
[[0.0, 4.852224]],
[[0.0, 3.764437835294118]],
[[0.05344698122780315, 3.7614583232876715]],
[[0.10666666666666667, 3.9356928000000004]],
[[0.128, 3.942432]],
[[0.3057777777777778, 3.942432]],
[[0.46222222222222226, 3.9356928000000004]],
[[0.6471111111111112, 3.9087359999999998]],
[[0.7149898989898991, 3.871976727272727]],
[[0.7964444444444445, 3.9087359999999998]],
[[0.8035555555555556, 3.9087359999999998]],
[[0.8471101170244648, 3.907563367673179]],
[[2.6097777777777778, 2.7024192]],
[[2.6026666666666667, 2.7024192]],
[[2.2248462222222227, 2.7317684160000004]],
[[2.0124444444444447, 2.5541568]],
[[1.8133333333333335, 2.3991552]],
[[1.7635555555555555, 2.3654592]],
[[1.7351111111111113, 2.3519808]],
[[1.7066666666666668, 2.3452416]],
[[1.6717294685990338, 2.3452416]],
[[1.3795555555555556, 2.0419776]],
[[1.2088888888888889, 1.8869760000000002]],
[[1.0453333333333334, 1.7589312000000001]],
[[1.0001816605997573, 1.7418151039001561]],
[[0.9528888888888889, 0.9030528]],
[[0.9457777777777778, 0.7952256]],
[[0.9323456790123458, 0.7884864]],
[[0.9813333333333334, 0.7884864]],
[[1.024, 0.7817472]],
[[1.0737777777777777, 0.7682688000000001]],
[[1.0831951951951952, 0.7644438486486483]],
[[1.6924444444444444, 0.8221824000000001]],
[[1.7493333333333334, 0.8221824000000001]],

```

[[1.7564444444444445, 0.8180802782608698]],
[[1.7564444444444445, 0.8289216]],
[[1.7635555555555555, 0.8356608]],
[[1.784888888888889, 0.8424]],
[[1.934222222222223, 0.8626176]],
[[2.0195555555555558, 0.8693568]],
[[2.7827273879073697, 0.8759318722319986]],
[[2.7733333333333334, 0.9434880000000001]],
[[3.8328888888888892, 1.1321856000000001]],
[[3.8471111111111114, 1.1321856000000001]],
[[3.8471111111111114, 1.1524032]],
[[3.8968888888888893, 1.7589312000000001]],
[[3.932933086735904, 2.015124347247119]],
[[2.9511111111111115, 2.5541568]],
[[2.9511111111111115, 2.5743744]],
[[2.9543931623931625, 2.5774848]],
[[2.929777777777778, 2.5878528000000003]],
[[2.7733333333333334, 2.6485056]],
[[2.610104633781764, 2.7206951246636772]],
[[2.609777777777778, 2.7024192]],
[[8.611555555555556, 0.15500160000000002]],
[[8.583111111111112, 0.134784]],
[[8.483555555555556, 0.134784]],
[[8.369777777777777, 0.1482624]],
[[8.362666666666668, 0.16174080000000002]],
[[8.334222222222223, 0.5458752]],
[[8.334222222222223, 0.6604416]],
[[8.341074251624589, 0.7123909461169704]],
[[7.567859687189224, 0.8681778512611876]],
[[7.2604444444444445, 0.8019647999999999]],
[[7.125333333333334, 0.775008]],
[[6.904888888888889, 0.7480512]],
[[6.869333333333335, 0.7480512]],
[[6.855111111111111, 0.7278336]],
[[6.705777777777778, 0.68739840000000001]],
[[6.179555555555556, 0.572832]],
[[6.129724731952816, 0.577151329712956]],
[[6.182938511326861, 0.0]],
[[8.64, 0.0]],
[[8.64, 0.21969792000000016]],
[[8.611555555555556, 0.15500160000000002]],
[[1.784888888888889, 0.8424]],
[[1.7635555555555555, 0.8356608]],
[[1.7564444444444445, 0.8289216]],
[[1.7564444444444445, 0.8180802782608698]],
[[1.912888888888889, 0.7278336]],
[[1.969777777777778, 0.68739840000000001]],
[[2.0693333333333332, 0.5997888]],
[[2.0693333333333332, 0.5323968]],
[[2.049736434108527, 0.0]],
[[2.922666666666667, 0.0]],
[[2.9084444444444446, 0.04043520000000004]],
[[2.8942222222222225, 0.0741312]],
[[2.7827273879073697, 0.8759318722319986]],
[[2.0195555555555558, 0.8693568]],
[[1.934222222222223, 0.8626176]],
[[1.784888888888889, 0.8424]],
[[1.0026666666666668, 1.8061056]],
[[1.0026666666666668, 1.7858880000000001]],
[[1.0001816605997573, 1.7418151039001561]],
[[1.0453333333333334, 1.7589312000000001]],
[[1.208888888888889, 1.8869760000000002]],
[[1.3795555555555556, 2.0419776]],
[[1.6717294685990338, 2.3452416]],
[[1.649777777777778, 2.3452416]],
[[1.2373333333333334, 2.3721984]],
[[0.8391111111111111, 2.426112]],
[[0.4551111111111113, 2.5069824]],
[[0.290548766352045, 2.5459713335320417]],
[[0.22044444444444444, 1.819584]],
[[0.2197333333333334, 1.8128448000000001]],
[[0.2346666666666667, 1.8128448000000001]],
[[1.0026666666666668, 1.8061056]],
[[2.4462222222222225, 2.8574208]],
[[2.488888888888889, 3.3156864]],
[[2.496, 3.3426432]],
[[2.4675555555555557, 3.3426432]],
[[2.424888888888889, 3.3561216000000003]],
[[2.3395555555555556, 3.403296]],
[[2.225777777777778, 3.5313408]],
[[2.1475555555555554, 3.6256896000000003]],



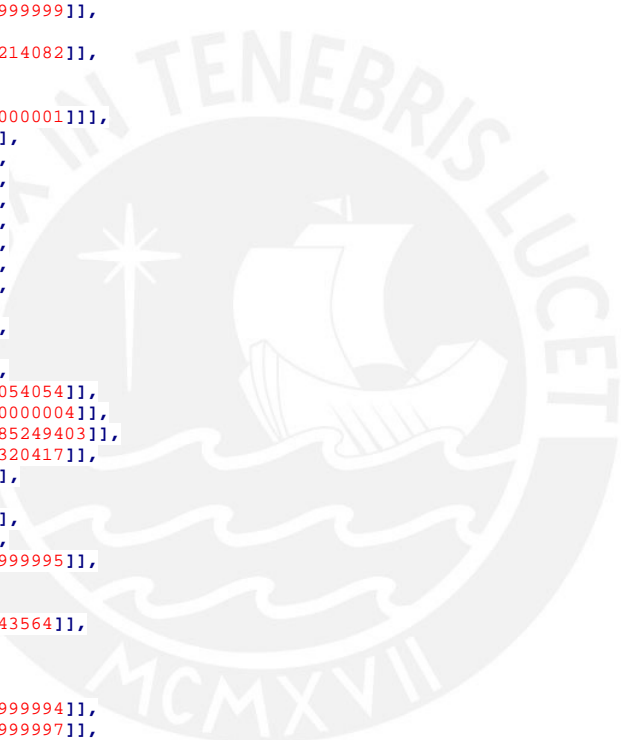
[[2.1191111111111111, 3.672864]],
[[2.112, 3.6863424]],
[[2.0977777777777778, 3.7132992000000002]],
[[2.0906666666666667, 3.740256]],
[[2.0906666666666667, 3.7806912]],
[[2.2265264873675634, 3.8201758679706597]],
[[2.2257777777777778, 3.8211264]],
[[2.1475555555555554, 3.8548224]],
[[2.0614790182106097, 3.87364733871734]],
[[2.048, 3.807648]],
[[1.8702222222222222, 3.7941696]],
[[1.5644444444444445, 3.7941696]],
[[1.1093333333333333, 3.8211264]],
[[0.8462222222222222, 3.8750400000000007]],
[[0.8462222222222222, 3.9019968000000005]],
[[0.8471101170244648, 3.907563367673179]],
[[0.8035555555555556, 3.9087359999999998]],
[[0.7964444444444445, 3.9087359999999998]],
[[0.7149898989898991, 3.871976727272727]],
[[0.7466666666666667, 3.8548224]],
[[0.7466666666666667, 3.8480831999999996]],
[[0.7395555555555556, 3.7806912]],
[[0.6826666666666668, 3.3898176]],
[[0.6328888888888889, 3.0730752000000003]],
[[0.6260660660660662, 3.040745254054054]],
[[2.0764444444444448, 2.8169856]],
[[2.176, 2.796768]],
[[2.2471111111111113, 2.7832896]],
[[2.2542222222222223, 2.763072]],
[[2.2542222222222223, 2.7563328]],
[[2.2248462222222227, 2.7317684160000004]],
[[2.6026666666666667, 2.7024192]],
[[2.6097777777777778, 2.7024192]],
[[2.610104633781764, 2.7206951246636772]],
[[2.4533333333333336, 2.7900288]],
[[2.4462222222222225, 2.8237248]],
[[2.4462222222222225, 2.8574208]],
[[5.4542222222222225, 1.9745856000000002]],
[[5.4471111111111111, 1.988064]],
[[5.445756613756615, 1.9902034285714283]],
[[5.1626666666666665, 1.9678464000000002]],
[[5.085503546099291, 1.9727215659574469]],
[[5.0773333333333334, 1.9611071999999998]],
[[5.0062222222222222, 1.8802368]],
[[4.9635555555555556, 1.8330624]],
[[4.7644444444444445, 1.8128448000000001]],
[[4.7502222222222223, 1.8128448000000001]],
[[4.632466011206259, 1.8348706344433874]],
[[4.6577777777777778, 1.8263232]],
[[4.7573333333333333, 1.7858880000000001]],
[[4.7715555555555556, 1.7791488000000002]],
[[4.7857777777777778, 1.7656704]],
[[4.8142222222222223, 1.5971904]],
[[4.8142222222222223, 1.5432768000000001]],
[[4.8, 1.4084928]],
[[4.7786666666666667, 1.3006656]],
[[4.7715555555555556, 1.2534912]],
[[4.745830065359478, 1.1275276235294116]],
[[4.7502222222222223, 1.1254464000000002]],
[[4.8853333333333335, 1.044576]],
[[4.9422222222222222, 1.0041408]],
[[5.0346666666666667, 0.9434880000000001]],
[[5.0702222222222222, 0.909792]],
[[5.1626666666666665, 0.8424]],
[[5.170188895248998, 0.7960626958214082]],
[[6.0942222222222222, 0.6873984000000001]],
[[6.1084444444444444, 0.67392]],
[[6.1226666666666667, 0.6537024]],
[[6.129724731952816, 0.577151329712956]],
[[6.1795555555555556, 0.572832]],
[[6.7057777777777778, 0.6873984000000001]],
[[6.8551111111111111, 0.7278336]],
[[6.8693333333333335, 0.7480512]],
[[6.7626666666666667, 0.7480512]],
[[6.7413333333333333, 0.7615296]],
[[6.7128888888888889, 0.8087040000000001]],
[[6.6915555555555555, 0.8760960000000001]],
[[6.602196049327743, 1.5777800335745298]],
[[5.5111111111111111, 1.9543679999999999]],
[[5.4542222222222225, 1.9745856000000002]],
[[5.0346666666666667, 0.9434880000000001]],



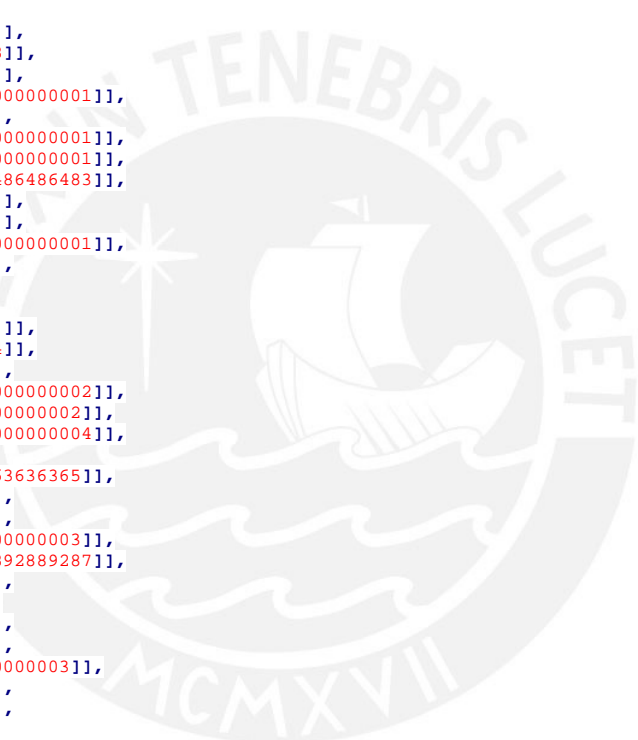
```

[[4.942222222222222, 1.0041408]],
[[4.885333333333333, 1.044576]],
[[4.750222222222223, 1.1254464000000002]],
[[4.745830065359478, 1.1275276235294116]],
[[4.728888888888889, 1.044576]],
[[4.700444444444445, 1.0378368]],
[[4.238222222222222, 1.01088]],
[[4.224, 1.01088]],
[[3.854222222222224, 1.0580544]],
[[3.847111111111114, 1.078272]],
[[3.847111111111114, 1.1321856000000001]],
[[3.832888888888889, 1.1321856000000001]],
[[2.773333333333334, 0.9434880000000001]],
[[2.894222222222225, 0.0741312]],
[[2.908444444444446, 0.04043520000000004]],
[[2.922666666666667, 0.0]],
[[4.871111111111111, 0.0]],
[[4.871111111111111, 0.0067392]],
[[4.878222222222222, 0.0741312]],
[[4.956444444444445, 0.6267456]],
[[4.984888888888889, 0.7143552]],
[[5.034666666666667, 0.7547904000000001]],
[[5.091555555555556, 0.8019647999999999]],
[[5.12, 0.8019647999999999]],
[[5.170188895248998, 0.7960626958214082]],
[[5.162666666666667, 0.8424]],
[[5.070222222222222, 0.909792]],
[[5.034666666666667, 0.9434880000000001]],
[[1.237333333333334, 2.3721984]],
[[1.649777777777778, 2.3452416]],
[[1.706666666666668, 2.3452416]],
[[1.735111111111113, 2.3519808]],
[[1.763555555555555, 2.3654592]],
[[1.813333333333335, 2.3991552]],
[[2.012444444444447, 2.5541568]],
[[2.254222222222223, 2.7563328]],
[[2.254222222222223, 2.763072]],
[[2.247111111111113, 2.7832896]],
[[2.176, 2.796768]],
[[2.076444444444448, 2.8169856]],
[[0.6260660660660662, 3.040745254054054]],
[[0.618666666666667, 3.0056832000000004]],
[[0.32696885095284667, 2.9233387685249403]],
[[0.290548766352045, 2.5459713335320417]],
[[0.455111111111113, 2.5069824]],
[[0.839111111111111, 2.426112]],
[[1.237333333333334, 2.3721984]],
[[4.458666666666667, 4.6096128]],
[[4.423111111111111, 4.596134399999995]],
[[4.387555555555556, 4.5422208]],
[[4.337777777777778, 4.2861312]],
[[4.32288228822883, 4.168695635643564]],
[[4.373333333333334, 4.1648256]],
[[4.394666666666667, 4.1580864]],
[[4.401777777777778, 4.110912]],
[[4.401777777777778, 4.0569983999999994]],
[[4.394666666666667, 3.9222143999999997]],
[[4.3704845395854575, 3.6242881761467896]],
[[4.529777777777778, 3.6122112]],
[[4.871111111111111, 3.5717760000000003]],
[[4.999111111111115, 3.5582976000000004]],
[[5.027555555555556, 3.5448192]],
[[5.028239316239317, 3.5435232000000005]],
[[5.297777777777778, 3.5246016]],
[[5.302250281252069, 3.524248384038118]],
[[5.376, 4.4074368]],
[[5.425777777777778, 4.4883072]],
[[5.44, 4.4950464]],
[[5.4474418604651165, 4.496456930232558]],
[[5.432888888888889, 4.5085248]],
[[5.411555555555556, 4.515264]],
[[4.622222222222223, 4.6096128]],
[[4.458666666666667, 4.6096128]],
[[5.043079812206573, 2.7494986816901408]],
[[5.134222222222222, 2.7428544]],
[[5.646222222222223, 2.6687232]],
[[5.676929292929294, 2.6629029818181817]],
[[5.724444444444445, 2.6822016]],
[[6.016, 2.6889408]],
[[6.129777777777778, 2.6889408]],
[[6.058666666666667, 3.2752512]],

```



[[6.058666666666667, 3.3965568]],
[[5.930666666666667, 3.3965568]],
[[5.824, 3.403296]],
[[5.297777777777778, 3.4504704]],
[[5.297777777777778, 3.470688]],
[[5.302250281252069, 3.524248384038118]],
[[5.297777777777778, 3.5246016]],
[[5.028239316239317, 3.5435232000000005]],
[[5.034666666666667, 3.5313408]],
[[5.034666666666667, 2.7563328]],
[[5.043079812206573, 2.7494986816901408]],
[[6.122666666666667, 0.6537024]],
[[6.108444444444444, 0.67392]],
[[6.094222222222222, 0.6873984000000001]],
[[5.12, 0.8019647999999999]],
[[5.091555555555556, 0.8019647999999999]],
[[5.034666666666667, 0.7547904000000001]],
[[4.984888888888889, 0.7143552]],
[[4.956444444444445, 0.6267456]],
[[4.878222222222222, 0.0741312]],
[[4.871111111111111, 0.0067392]],
[[4.871111111111111, 0.0]],
[[6.182938511326861, 0.0]],
[[6.122666666666667, 0.6537024]],
[[2.069333333333333, 0.5323968]],
[[2.069333333333333, 0.5997888]],
[[1.969777777777778, 0.6873984000000001]],
[[1.912888888888889, 0.7278336]],
[[1.749333333333333, 0.8221824000000001]],
[[1.692444444444444, 0.8221824000000001]],
[[1.083195195195195, 0.7644438486486483]],
[[1.123555555555556, 0.7480512]],
[[1.144888888888889, 0.7278336]],
[[1.159111111111112, 0.7008768000000001]],
[[1.187555555555557, 0.539136]],
[[1.270807588075881, 0.0]],
[[2.049736434108527, 0.0]],
[[2.069333333333333, 0.5323968]],
[[6.5920000000000005, 1.6645824]],
[[6.648888888888889, 1.6915392]],
[[7.1608888888888895, 1.8937152000000002]],
[[7.169832760595647, 1.8937152000000002]],
[[7.047111111111115, 2.5204608000000004]],
[[7.047111111111115, 2.5272]],
[[7.048727272727273, 2.5287316363636365]],
[[6.968888888888889, 2.5406784]],
[[6.784000000000001, 2.5743744]],
[[6.769777777777778, 2.5878528000000003]],
[[6.7669486948694875, 2.6011552892889287]],
[[6.748444444444445, 2.5811136]],
[[6.727111111111111, 2.560896]],
[[6.691555555555555, 2.560896]],
[[6.314666666666667, 2.5811136]],
[[6.200888888888889, 2.5878528000000003]],
[[6.179555555555556, 2.6013312]],
[[6.129777777777778, 2.6889408]],
[[6.016, 2.6889408]],
[[5.724444444444445, 2.6822016]],
[[5.676929292929294, 2.6629029818181817]],
[[5.717333333333333, 2.6552447999999999]],
[[5.731555555555555, 2.6485056]],
[[5.731555555555555, 2.6350272]],
[[5.724444444444445, 2.5272]],
[[5.717333333333333, 2.426112]],
[[5.674666666666667, 2.0082816]],
[[5.445756613756615, 1.9902034285714283]],
[[5.447111111111111, 1.988064]],
[[5.454222222222225, 1.9745856000000002]],
[[5.511111111111111, 1.9543679999999999]],
[[6.602196049327743, 1.5777800335745298]],
[[6.5920000000000005, 1.6578432]],
[[6.5920000000000005, 1.6645824]],
[[3.847111111111114, 1.1524032]],
[[3.847111111111114, 1.078272]],
[[3.854222222222224, 1.0580544]],
[[4.224, 1.01088]],
[[4.238222222222222, 1.01088]],
[[4.700444444444445, 1.0378368]],
[[4.728888888888889, 1.044576]],
[[4.771555555555556, 1.2534912]],
[[4.778666666666667, 1.3006656]],



[[4.8, 1.4084928]],
[[4.814222222222223, 1.5432768000000001]],
[[4.814222222222223, 1.5971904]],
[[4.785777777777778, 1.7656704]],
[[4.771555555555556, 1.7791488000000002]],
[[4.757333333333333, 1.7858880000000001]],
[[4.657777777777778, 1.8263232]],
[[4.632466011206259, 1.8348706344433874]],
[[4.209777777777778, 1.9139328000000002]],
[[4.135055843408176, 1.9438925595854921]],
[[4.131555555555556, 1.9206720000000002]],
[[4.124444444444444, 1.9206720000000002]],
[[3.996444444444444, 1.9745856000000002]],
[[3.982222222222226, 1.988064]],
[[3.932933086735904, 2.015124347247119]],
[[3.896888888888889, 1.7589312000000001]],
[[3.847111111111114, 1.1524032]],
[[4.764444444444445, 1.8128448000000001]],
[[4.963555555555556, 1.8330624]],
[[5.006222222222222, 1.8802368]],
[[5.077333333333334, 1.9611071999999998]],
[[5.085503546099291, 1.9727215659574469]],
[[5.056, 1.9745856000000002]],
[[5.048888888888889, 1.988064]],
[[5.015857217603628, 2.6955369962211497]],
[[4.021168450257631, 2.664528228296434]],
[[4.032, 2.6080704000000003]],
[[4.124444444444444, 2.1161088]],
[[4.138666666666667, 2.0015424]],
[[4.138666666666667, 1.9678464000000002]],
[[4.135055843408176, 1.9438925595854921]],
[[4.209777777777778, 1.9139328000000002]],
[[4.750222222222223, 1.8128448000000001]],
[[4.764444444444445, 1.8128448000000001]],
[[6.044444444444445, 4.4883072]],
[[5.880888888888889, 4.5017856000000001]],
[[5.575111111111111, 4.5085248]],
[[5.560888888888889, 4.5085248]],
[[5.475555555555556, 4.5017856000000001]],
[[5.44, 4.4950464]],
[[5.425777777777778, 4.4883072]],
[[5.376, 4.4074368]],
[[5.297777777777778, 3.470688]],
[[5.297777777777778, 3.4504704]],
[[5.824, 3.403296]],
[[5.930666666666667, 3.3965568]],
[[6.058666666666667, 3.3965568]],
[[6.058666666666667, 3.4302528000000003]],
[[6.087111111111112, 3.4572096]],
[[6.1584720855782, 3.4771004222066058]],
[[6.165333333333334, 4.0233024]],
[[6.172444444444444, 4.3872192]],
[[6.186666666666667, 4.4546112]],
[[6.218666666666667, 4.4546112]],
[[6.208, 4.4680896]],
[[6.115555555555556, 4.481568]],
[[6.044444444444445, 4.4883072]],
[[7.139555555555556, 3.8278656000000004]],
[[7.132444444444444, 3.8885184000000006]],
[[7.125333333333334, 3.942432]],
[[7.089777777777778, 4.1041728]],
[[7.061333333333334, 4.2456960000000001]],
[[7.025777777777778, 4.313088]],
[[6.968888888888889, 4.38048]],
[[6.769777777777778, 4.414175999999999]],
[[6.471111111111111, 4.4546112]],
[[6.186666666666667, 4.4546112]],
[[6.172444444444444, 4.3872192]],
[[6.165333333333334, 4.0233024]],
[[6.1584720855782, 3.4771004222066058]],
[[6.208, 3.4909056000000005]],
[[6.4, 3.4909056000000005]],
[[6.607084175084175, 3.484574836363636]],
[[6.663111111111111, 3.5111232]],
[[6.705777777777778, 3.5246016]],
[[6.961777777777778, 3.6122112]],
[[7.104, 3.6593856000000002]],
[[7.125333333333334, 3.6593856000000002]],
[[7.153777777777778, 3.651457129411764]],
[[7.153777777777778, 3.6526464]],
[[7.146666666666667, 3.7537344]],



[[7.139555555555556, 3.8278656000000004]],
[[[4.529777777777778, 3.6122112]],
[[4.3704845395854575, 3.6242881761467896]],
[[4.3662222222222224, 3.5717760000000003]],
[[3.953777777777778, 3.5650368]],
[[3.9324444444444446, 3.5650368]],
[[3.8297578772802656, 3.567199379104478]],
[[3.8328888888888892, 3.5582976000000004]],
[[3.8328888888888892, 3.4976448]],
[[3.8115555555555556, 3.3089472]],
[[3.754666666666667, 2.9450304000000003]],
[[3.7435572327044024, 2.8765957313207546]],
[[3.8613333333333335, 2.8237248]],
[[3.918222222222225, 2.7900288]],
[[3.968, 2.763072]],
[[3.9822222222222226, 2.7428544]],
[[3.9964444444444447, 2.7226368]],
[[4.017777777777778, 2.6822016]],
[[4.021168450257631, 2.6645282282996434]],
[[5.015857217603628, 2.6955369962211497]],
[[5.013333333333334, 2.7495936000000003]],
[[5.034666666666667, 2.7495936000000003]],
[[5.034666666666667, 3.5313408]],
[[5.027555555555556, 3.5448192]],
[[4.9991111111111115, 3.5582976000000004]],
[[4.8711111111111111, 3.5717760000000003]],
[[4.529777777777778, 3.6122112]],
[[[8.568888888888889, 2.0824128]],
[[8.561777777777777, 2.089152]],
[[8.554119658119658, 2.1658751999999932]],
[[8.554666666666668, 2.1228480000000003]],
[[8.554666666666668, 2.1026304]],
[[8.547555555555556, 2.0824128]],
[[8.540444444444445, 2.0824128]],
[[8.206222222222223, 2.1026304]],
[[8.142222222222223, 2.1228480000000003]],
[[8.106666666666667, 2.13408]],
[[8.106666666666667, 2.1228480000000003]],
[[8.078222222222223, 2.0824128]],
[[8.071111111111112, 2.0756736]],
[[7.879111111111111, 1.9274112]],
[[7.786666666666667, 1.85328]],
[[7.701333333333333, 1.8128448000000001]],
[[7.665777777777778, 1.7926272]],
[[7.608888888888889, 1.7724096]],
[[7.528836771625046, 1.7747803934853421]],
[[7.594666666666667, 1.7521920000000002]],
[[7.608888888888889, 1.6578432]],
[[7.608888888888889, 1.4758848]],
[[7.594666666666667, 1.0917504]],
[[7.587555555555556, 0.8895744000000001]],
[[7.573333333333334, 0.8693568]],
[[7.567859687189224, 0.8681778512611876]],
[[8.341074251624589, 0.7123909461169704]],
[[8.355555555555556, 0.8221824000000001]],
[[8.64, 0.8221824000000001]],
[[8.64, 2.0824128]],
[[8.568888888888889, 2.0824128]],
[[[8.334222222222223, 2.7091584]],
[[8.213333333333333, 3.2482944000000002]],
[[8.213333333333333, 3.3561216000000003]],
[[8.220444444444444, 3.3696]],
[[8.234666666666667, 3.3965568]],
[[8.256, 3.403296]],
[[8.2562165820643, 3.4033473137055834]],
[[8.248888888888889, 3.4504704]],
[[8.227555555555556, 3.470688]],
[[8.213333333333333, 3.4841664]],
[[7.786666666666667, 3.5650368]],
[[7.587555555555556, 3.5785152]],
[[7.516444444444445, 3.5785152]],
[[7.424, 3.5650368]],
[[7.424, 3.5043840000000004]],
[[7.431111111111112, 3.4100352]],
[[7.488, 2.7091584]],
[[7.488, 2.6512625454545455]],
[[7.751111111111111, 2.5945920000000005]],
[[7.772444444444445, 2.5676352]],
[[7.8793265993266015, 2.44101992727255]],
[[7.786666666666667, 2.5676352]],
[[7.836444444444445, 2.5811136]],



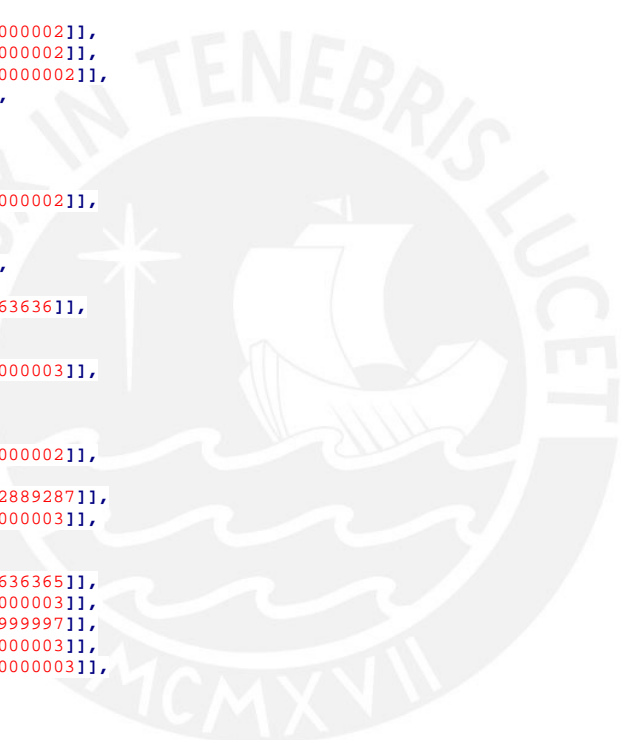
[[7.900444444444445, 2.5945920000000005]],
[[8.277333333333333, 2.6822016]],
[[8.355555555555556, 2.6842608]],
[[8.355555555555556, 2.6889408]],
[[8.334222222222223, 2.7091584]],
[[5.013333333333334, 2.7495936000000003]],
[[5.048888888888889, 1.988064]],
[[5.056, 1.9745856000000002]],
[[5.1626666666666665, 1.9678464000000002]],
[[5.674666666666667, 2.0082816]],
[[5.717333333333333, 2.426112]],
[[5.724444444444445, 2.5272]],
[[5.7315555555555555, 2.6350272]],
[[5.7315555555555555, 2.6485056]],
[[5.717333333333333, 2.6552447999999997]],
[[5.646222222222223, 2.6687232]],
[[5.134222222222222, 2.7428544]],
[[5.041777777777778, 2.7495936000000003]],
[[5.013333333333334, 2.7495936000000003]],
[[2.446222222222225, 2.8237248]],
[[2.453333333333336, 2.7900288]],
[[2.773333333333334, 2.6485056]],
[[2.929777777777778, 2.5878528000000003]],
[[2.9543931623931625, 2.5774848]],
[[3.015111111111111, 2.6350272]],
[[3.3052837944664035, 2.8966093811857707]],
[[3.285333333333334, 3.0730752000000003]],
[[3.278222222222224, 3.167424]],
[[3.278222222222224, 3.428674248648649]],
[[2.503111111111111, 3.3426432]],
[[2.496, 3.3426432]],
[[2.488888888888889, 3.3156864]],
[[2.446222222222225, 2.8574208]],
[[2.446222222222225, 2.8237248]],
[[2.951111111111115, 2.5743744]],
[[2.951111111111115, 2.5541568]],
[[3.982222222222226, 1.988064]],
[[3.9964444444444447, 1.9745856000000002]],
[[4.124444444444444, 1.9206720000000002]],
[[4.131555555555556, 1.9206720000000002]],
[[4.1386666666666665, 1.9678464000000002]],
[[4.1386666666666665, 2.0015424]],
[[4.124444444444444, 2.1161088]],
[[4.032, 2.6080704000000003]],
[[4.017777777777778, 2.6822016]],
[[3.9964444444444447, 2.7226368]],
[[3.982222222222226, 2.7428544]],
[[3.968, 2.763072]],
[[3.918222222222225, 2.7900288]],
[[3.861333333333335, 2.8237248]],
[[3.7435572327044024, 2.8765957313207546]],
[[3.740444444444445, 2.8574208]],
[[3.733333333333334, 2.830464]],
[[3.726222222222223, 2.8169856]],
[[3.335111111111114, 2.8574208]],
[[3.306666666666666, 2.8843776]],
[[3.3052837944664035, 2.8966093811857707]],
[[3.015111111111111, 2.6350272]],
[[2.951111111111115, 2.5743744]],
[[2.659555555555556, 3.942432]],
[[2.624, 3.9356928000000004]],
[[2.090666666666667, 3.7806912]],
[[2.090666666666667, 3.740256]],
[[2.097777777777778, 3.7132992000000002]],
[[2.112, 3.6863424]],
[[2.119111111111111, 3.672864]],
[[2.1475555555555554, 3.6256896000000003]],
[[2.225777777777778, 3.5313408]],
[[2.339555555555556, 3.403296]],
[[2.424888888888889, 3.3561216000000003]],
[[2.467555555555557, 3.3426432]],
[[2.503111111111111, 3.3426432]],
[[3.278222222222224, 3.428674248648649]],
[[3.278222222222224, 3.4909056000000005]],
[[3.299555555555556, 3.4976448]],
[[3.6101437908496736, 3.5761366588235295]],
[[3.605333333333337, 3.5852544]],
[[3.420444444444446, 4.0704768]],
[[3.420444444444446, 4.077216]],
[[3.466098619329389, 4.090814030769232]],
[[3.434666666666668, 4.0974336000000005]],



[[3.4204444444444446, 4.0974336000000005]],
[[2.659555555555556, 3.942432]],
[[[1.137777777777778, 4.8252672]],
[[1.102222222222222, 4.8117888]],
[[1.038222222222224, 4.784832000000001]],
[[0.995555555555556, 4.7039616]],
[[0.981333333333334, 4.6567872]],
[[0.938666666666668, 4.481568]],
[[0.846222222222222, 3.9019968000000005]],
[[0.846222222222222, 3.8750400000000007]],
[[1.109333333333333, 3.8211264]],
[[1.564444444444445, 3.7941696]],
[[1.870222222222222, 3.7941696]],
[[2.048, 3.807648]],
[[2.090666666666667, 4.0165632]],
[[2.119111111111111, 4.1715648000000005]],
[[2.119111111111111, 4.346784]],
[[2.083555555555556, 4.5691776]],
[[2.076444444444444, 4.582656]],
[[2.012444444444447, 4.650048000000001]],
[[1.834666666666667, 4.8252672]],
[[1.699555555555557, 4.8387456]],
[[1.628444444444446, 4.8454848]],
[[1.457777777777778, 4.852224]],
[[1.358222222222222, 4.852224]],
[[1.137777777777778, 4.8252672]],
[[1.187555555555557, 0.539136]],
[[1.159111111111112, 0.7008768000000001]],
[[1.144888888888889, 0.7278336]],
[[1.123555555555556, 0.7480512]],
[[1.073777777777777, 0.7682688000000001]],
[[1.024, 0.7817472]],
[[0.981333333333334, 0.7884864]],
[[0.9323456790123458, 0.7884864]],
[[0.824888888888889, 0.7345728]],
[[0.711111111111111, 0.6806592]],
[[0.682666666666668, 0.67392]],
[[0.512, 0.6267456]],
[[0.206222222222222, 0.5458752]],
[[0.0142222222222223, 0.5121792000000001]],
[[0.0, 0.5121792000000001]],
[[0.0, 0.0]],
[[1.270807588075881, 0.0]],
[[1.187555555555557, 0.539136]],
[[[3.953777777777778, 3.5650368]],
[[4.366222222222224, 3.5717760000000003]],
[[4.394666666666667, 3.9222143999999997]],
[[4.401777777777778, 4.0569983999999994]],
[[4.401777777777778, 4.110912]],
[[4.394666666666667, 4.1580864]],
[[4.373333333333334, 4.1648256]],
[[4.017777777777778, 4.1917824]],
[[3.975111111111115, 4.1917824]],
[[3.754666666666667, 4.1648256]],
[[3.669333333333333, 4.1513472]],
[[3.420444444444446, 4.077216]],
[[3.420444444444446, 4.0704768]],
[[3.605333333333337, 3.5852544]],
[[3.6101437908496736, 3.5761366588235295]],
[[3.619555555555556, 3.5785152]],
[[3.825777777777778, 3.5785152]],
[[3.8297578772802656, 3.567199379104478]],
[[3.932444444444446, 3.5650368]],
[[3.953777777777778, 3.5650368]],
[[[0.0142222222222223, 0.5121792000000001]],
[[0.206222222222222, 0.5458752]],
[[0.512, 0.6267456]],
[[0.682666666666668, 0.67392]],
[[0.711111111111111, 0.6806592]],
[[0.824888888888889, 0.7345728]],
[[0.945777777777778, 0.7952256]],
[[0.952888888888889, 0.9030528]],
[[1.002666666666668, 1.7858880000000001]],
[[1.002666666666668, 1.8061056]],
[[0.234666666666667, 1.8128448000000001]],
[[0.219733333333334, 1.8128448000000001]],
[[0.213333333333335, 1.7521920000000002]],
[[0.206222222222222, 1.6982784]],
[[0.106666666666667, 1.6713216]],
[[0.078222222222222, 1.6713216]],
[[0.0, 1.6780608000000001]],



[[0.0, 0.5121792000000001]],
[[0.01422222222222223, 0.5121792000000001]],
[[[6.648888888888889, 1.6915392]],
[[6.5920000000000005, 1.6645824]],
[[6.5920000000000005, 1.6578432]],
[[6.6915555555555555, 0.8760960000000001]],
[[6.712888888888889, 0.8087040000000001]],
[[6.741333333333333, 0.7615296]],
[[6.762666666666667, 0.7480512]],
[[6.904888888888889, 0.7480512]],
[[7.125333333333334, 0.775008]],
[[7.260444444444445, 0.8019647999999999]],
[[7.573333333333334, 0.8693568]],
[[7.587555555555556, 0.8895744000000001]],
[[7.594666666666667, 1.0917504]],
[[7.608888888888889, 1.4758848]],
[[7.608888888888889, 1.6578432]],
[[7.594666666666667, 1.7521920000000002]],
[[7.528836771625046, 1.7747803934853421]],
[[7.381333333333334, 1.7791488000000002]],
[[7.296, 1.7926272]],
[[7.196444444444444, 1.819584]],
[[7.182222222222222, 1.8263232]],
[[7.175111111111112, 1.8667584000000002]],
[[7.169832760595647, 1.8937152000000002]],
[[7.1608888888888895, 1.8937152000000002]],
[[6.648888888888889, 1.6915392]],
[[[7.424, 3.5043840000000004]],
[[7.416888888888889, 3.5650368]],
[[7.409777777777778, 3.5785152]],
[[7.367111111111112, 3.5919936]],
[[7.125333333333334, 3.6593856000000002]],
[[7.104, 3.6593856000000002]],
[[6.961777777777778, 3.6122112]],
[[6.7057777777777785, 3.5246016]],
[[6.663111111111111, 3.511232]],
[[6.607084175084175, 3.484574836363636]],
[[6.620444444444445, 3.4841664]],
[[6.656000000000001, 3.4572096]],
[[6.663111111111111, 3.4302528000000003]],
[[6.670222222222223, 3.403296]],
[[6.698666666666667, 3.2752512]],
[[6.784000000000001, 2.7832896]],
[[6.798222222222223, 2.6754624000000002]],
[[6.798222222222223, 2.6350272]],
[[6.7669486948694875, 2.6011552892889287]],
[[6.769777777777778, 2.5878528000000003]],
[[6.784000000000001, 2.5743744]],
[[6.968888888888889, 2.5406784]],
[[7.048727272727273, 2.5287316363636365]],
[[7.132444444444444, 2.6080704000000003]],
[[7.367111111111112, 2.6552447999999997]],
[[7.416888888888889, 2.6619840000000003]],
[[7.438222222222225, 2.6619840000000003]],
[[7.488, 2.6512625454545455]],
[[7.488, 2.7091584]],
[[7.431111111111112, 3.4100352]],
[[7.424, 3.5043840000000004]],
[[[0.0782222222222222, 1.6713216]],
[[0.1066666666666667, 1.6713216]],
[[0.2062222222222222, 1.6982784]],
[[0.2133333333333335, 1.7521920000000002]],
[[0.2204444444444444, 1.819584]],
[[0.32696885095284667, 2.9233387685249403]],
[[0.2844444444444444, 2.9113344]],
[[0.2631111111111113, 2.9113344]],
[[0.1991111111111113, 2.9382912]],
[[0.1564444444444444, 2.9517696]],
[[0.00711111111111115, 3.0191616000000003]],
[[0.0, 3.0259008]],
[[0.0, 1.6780608000000001]],
[[0.0782222222222222, 1.6713216]],
[[[7.751111111111111, 2.5945920000000005]],
[[7.438222222222225, 2.6619840000000003]],
[[7.416888888888889, 2.6619840000000003]],
[[7.367111111111112, 2.6552447999999997]],
[[7.132444444444444, 2.6080704000000003]],
[[7.047111111111115, 2.5272]],
[[7.047111111111115, 2.5204608000000004]],
[[7.175111111111112, 1.8667584000000002]],
[[7.182222222222222, 1.8263232]],



[[7.196444444444444, 1.819584]],
[[7.296, 1.7926272]],
[[7.381333333333334, 1.7791488000000002]],
[[7.608888888888889, 1.7724096]],
[[7.665777777777778, 1.7926272]],
[[7.701333333333333, 1.8128448000000001]],
[[7.786666666666667, 1.85328]],
[[7.879111111111111, 1.9274112]],
[[8.071111111111112, 2.0756736]],
[[8.078222222222223, 2.0824128]],
[[8.106666666666667, 2.1228480000000003]],
[[8.106666666666667, 2.13408]],
[[8.099555555555556, 2.1363264]],
[[8.092444444444444, 2.1498048]],
[[7.8793265993266, 2.4410199272727273]],
[[7.772444444444445, 2.5676352]],
[[7.751111111111111, 2.5945920000000005]],
[[0.00711111111111115, 3.0191616000000003]],
[[0.15644444444444444, 2.9517696]],
[[0.19911111111111113, 2.9382912]],
[[0.26311111111111113, 2.9113344]],
[[0.28444444444444444, 2.9113344]],
[[0.6186666666666667, 3.0056832000000004]],
[[0.632888888888889, 3.0730752000000003]],
[[0.6826666666666668, 3.3898176]],
[[0.739555555555556, 3.7806912]],
[[0.746666666666667, 3.8480831999999996]],
[[0.746666666666667, 3.8548224]],
[[0.6471111111111112, 3.9087359999999998]],
[[0.4622222222222226, 3.9356928000000004]],
[[0.305777777777778, 3.942432]],
[[0.128, 3.942432]],
[[0.1066666666666667, 3.9356928000000004]],
[[0.0, 3.5864797090909093]],
[[0.0, 3.0259008]],
[[0.00711111111111115, 3.0191616000000003]],
[[3.619555555555556, 3.5785152]],
[[3.299555555555556, 3.4976448]],
[[3.278222222222224, 3.4909056000000005]],
[[3.278222222222224, 3.167424]],
[[3.285333333333334, 3.0730752000000003]],
[[3.306666666666667, 2.8843776]],
[[3.335111111111114, 2.8574208]],
[[3.726222222222223, 2.8169856]],
[[3.733333333333334, 2.830464]],
[[3.740444444444445, 2.8574208]],
[[3.754666666666667, 2.9450304000000003]],
[[3.811555555555556, 3.3089472]],
[[3.832888888888889, 3.4976448]],
[[3.832888888888889, 3.5582976000000004]],
[[3.825777777777778, 3.5785152]],
[[3.619555555555556, 3.5785152]],
[[8.625777777777778, 3.4100352]],
[[8.426666666666668, 3.4302528000000003]],
[[8.341333333333333, 3.4302528000000003]],
[[8.312888888888889, 3.4167744000000004]],
[[8.256, 3.403296]],
[[8.234666666666667, 3.3965568]],
[[8.220444444444444, 3.3696]],
[[8.213333333333333, 3.3561216000000003]],
[[8.213333333333333, 3.2482944000000002]],
[[8.334222222222223, 2.7091584]],
[[8.355555555555556, 2.6889408]],
[[8.364912280701754, 2.684507115789474]],
[[8.533333333333333, 2.6889408]],
[[8.540444444444445, 2.6889408]],
[[8.544, 2.6855712]],
[[8.554666666666668, 2.6889408]],
[[8.618666666666668, 2.7024192]],
[[8.64, 2.7024192]],
[[8.64, 3.3999264]],
[[8.625777777777778, 3.4100352]],
[[6.208, 3.4909056000000005]],
[[6.087111111111112, 3.4572096]],
[[6.058666666666667, 3.4302528000000003]],
[[6.058666666666667, 3.2752512]],
[[6.129777777777778, 2.6889408]],
[[6.179555555555556, 2.6013312]],
[[6.200888888888889, 2.5878528000000003]],
[[6.314666666666667, 2.5811136]],
[[6.691555555555555, 2.560896]],



```

[[6.727111111111111, 2.560896]],
[[6.748444444444445, 2.5811136]],
[[6.798222222222223, 2.6350272]],
[[6.798222222222223, 2.6754624000000002]],
[[6.784000000000001, 2.7832896]],
[[6.698666666666667, 3.2752512]],
[[6.670222222222223, 3.403296]],
[[6.663111111111111, 3.4302528000000003]],
[[6.656000000000001, 3.4572096]],
[[6.620444444444445, 3.4841664]],
[[6.4, 3.4909056000000005]],
[[6.208, 3.4909056000000005]],
[[8.355555555555556, 0.8221824000000001]],
[[8.334222222222223, 0.6604416]],
[[8.334222222222223, 0.5458752]],
[[8.362666666666668, 0.16174080000000002]],
[[8.369777777777777, 0.1482624]],
[[8.483555555555556, 0.134784]],
[[8.583111111111112, 0.134784]],
[[8.611555555555556, 0.15500160000000002]],
[[8.64, 0.21969792000000016]],
[[8.64, 0.8221824000000001]],
[[8.355555555555556, 0.8221824000000001]],
[[8.533333333333333, 2.6889408]],
[[8.277333333333333, 2.6822016]],
[[7.900444444444445, 2.5945920000000005]],
[[7.836444444444445, 2.5811136]],
[[7.786666666666667, 2.5676352]],
[[8.092444444444444, 2.1498048]],
[[8.099555555555556, 2.1363264]],
[[8.142222222222223, 2.1228480000000003]],
[[8.206222222222223, 2.1026304]],
[[8.540444444444445, 2.0824128]],
[[8.547555555555556, 2.0824128]],
[[8.554666666666668, 2.1026304]],
[[8.554666666666668, 2.1228480000000003]],
[[8.554119658119658, 2.1658752]],
[[8.512, 2.5878528000000003]],
[[8.512, 2.5945920000000005]],
[[8.533333333333333, 2.6822016]],
[[8.544, 2.6855712]],
[[8.540444444444445, 2.6889408]],
[[8.533333333333333, 2.6889408]],
[[8.64, 2.7024192]],
[[8.618666666666668, 2.7024192]],
[[8.554666666666668, 2.6889408]],
[[8.533333333333333, 2.6822016]],
[[8.512, 2.5945920000000005]],
[[8.512, 2.5878528000000003]],
[[8.561777777777777, 2.089152]],
[[8.568888888888889, 2.0824128]],
[[8.64, 2.0824128]],
[[8.64, 2.7024192]]]]

```

```

#Se registra la cantidad de valores de result
longitud0 = len(result)

#Se elimina los elementos con menos de 2 valores del result

corregido = result[:]
for i in range(0,longitud0-1):
    eliminador = len(result[i])
    if eliminador <= 2:
        corregido.remove(result[i])

result = corregido

#Se registra la nueva cantidad de valores de result
longitud0 = len(result)

for j in range(0,longitud0):
    #Se transporta cada bloque a integer
    approx = result[j]
    approx = np.array(approx,dtype=float)

    longitud1 = len(approx)
    # se crea el bloque en abaqus
    s = mdb.models['Model-1'].ConstrainedSketch(name='__profile__',
        sheetSize=1.0)
    g, v, d, c = s.geometry, s.vertices, s.dimensions, s.constraints

```

```

s.setPrimaryObject(option=STANDALONE)

#Se une las lineas entre si
for i in range(0,longitudl-1):
    marcador1 = approx[i]
    marcador2 = approx[i+1]
    s.Line(point1=(marcador1[0,0], marcador1[0,1]), point2=(marcador2[0,0], marcador2[0,1]))

#Se une las lineas anteriores con el primer punto
primerito = approx[0]
s.Line(point1=(marcador2[0,0], marcador2[0,1]), point2=(primerito[0,0], primerito[0,1]))

#Se crea el bloque con su nombre
p = mdb.models['Model-1'].Part(name='Bloque-'+str(j+1), dimensionality=THREE_D,
    type=DEFORMABLE_BODY)
p = mdb.models['Model-1'].parts['Bloque-'+str(j+1)]
p.BaseSolidExtrude(sketch=s, depth=grosor)
s.unsetPrimaryObject()
p = mdb.models['Model-1'].parts['Bloque-'+str(j+1)]
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p)
del mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__']

#####

# El assembly
a1 = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
for i in range(1,longitud0+1):
    #assembly de los solidos con la malla anterior
    p = mdb.models['Model-1'].parts['Bloque-'+str(i)]
    a1.Instance(name='Bloque-' +str(i)+'-1', part=p, dependent=ON)

# creación del material y asignación de este a cada sillar
mdb.models['Model-1'].Material(name='Sillares')
mdb.models['Model-1'].materials['Sillares'].Density(table=((2500.0, ), ), #densidad
mdb.models['Model-1'].materials['Sillares'].Elastic(table=((20000000000.0, 0.3), # E y Poisson
))
mdb.models['Model-1'].HomogeneousSolidSection(name='Sillares2', material='Sillares', #sección
    thickness=None)

for i in range(1,longitud0+1):
    #asignación de la sección a todos los sillares

    p = mdb.models['Model-1'].parts['Bloque-' + str(i)]
    c = p.cells
    cells = c.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
    region = p.Set(cells=cells, name='Seccion' + str(i))
    p = mdb.models['Model-1'].parts['Bloque-' + str(i)]
    p.SectionAssignment(region=region, sectionName='Sillares2', offset=0.0,
        offsetType=MIDDLE_SURFACE, offsetField='',
        thicknessAssignment=FROM_SECTION)

#####

#SOLIDOS RÍGIDOS
bajada = 0
for i in range(1,longitud0+1):
    #asignación de RP

    #Se realiza la colocacion de los rigid body a los principales
    a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly # referente al assembly
    name5 = 'Bloque-' + str(i) + '-1' # todos los elementos
    bajada = bajada + 1

    #Se coloca el RP
    vl = a.instances[name5].vertices
    RPJ1 = a.ReferencePoint(point=vl[2])

    #Se coloca el RB
    a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
    c1 = a.instances[name5].cells
    cells1 = c1.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
    region2=a.Set(cells=cells1, name='c_Set-' +str(bajada))
    r1_1 = a.referencePoints
    nRP1= RPJ1.id # Identificamos el número del RP del sillar de interés
    refPoints1=(r1_1[nRP1], )
    region1=regionToolset.Region(referencePoints=refPoints1)
    mdb.models['Model-1'].RigidBody(name='SILLAR' +str(bajada), refPointRegion=region1,
        bodyRegion=region2)

#Mallado de los sólidos rígidos

malladotam = 0.1 # Tamaño del mallado

```

```

for i in range(1,longitud0+1):
    #Mallado
    p = mdb.models['Model-1'].parts['Bloque-' +str(i)]
    session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p)
    p = mdb.models['Model-1'].parts['Bloque-' +str(i)]
    p.seedPart(size= malladotam, deviationFactor=0.1, minSizeFactor=0.1)
    p = mdb.models['Model-1'].parts['Bloque-' +str(i)]
    p.generateMesh()

#####

#####
# CREACION DEL BLOQUE DE ESFERAS
casote1 =(tantx/esferad)//1*esferad-esferad
casote2 =(tanty/esferad)//1*esferad-esferad
casote3 =(round(tanty* sqrt(3),1))/esferad//1*esferad-esferad

s = mdb.models['Model-1'].ConstrainedSketch(name='__profile__',
sheetSize=200.0)
g, v, d, c = s.geometry, s.vertices, s.dimensions, s.constraints
s.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
s.rectangle(point1=(0.0, 0.0), point2=(casote1,casote2+esferad)) #se crea las dimensiones del bloque. ese
//1 redondea hacia abajo
p = mdb.models['Model-1'].Part(name='bloque_esferas', dimensionality=THREE_D,
type=DEFORMABLE_BODY)
p = mdb.models['Model-1'].parts['bloque_esferas']
p.BaseSolidExtrude(sketch=s, depth=casote3)
s.unsetPrimaryObject()
p = mdb.models['Model-1'].parts['bloque_esferas']
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p)
del mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__']
session.viewports['Viewport: 1'].partDisplay.setValues(sectionAssignments=ON,
engineeringFeatures=ON)
session.viewports['Viewport: 1'].partDisplay.geometryOptions.setValues(
referenceRepresentation=OFF)
p = mdb.models['Model-1'].parts['bloque_esferas']
c = p.cells
cells = c.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
region = p.Set(cells=cells, name='Set-1')
p = mdb.models['Model-1'].parts['bloque_esferas']
p.SectionAssignment(region=region, sectionName='Sillares2', offset=0.0,
offsetType=MIDDLE_SURFACE, offsetField='',
thicknessAssignment=FROM_SECTION)
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=a)
session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(loads=OFF, bcs=OFF,
predefinedFields=OFF, connectors=OFF)
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
a.DatumCsysByDefault(CARTESIAN)
p = mdb.models['Model-1'].parts['bloque_esferas']
a.Instance(name='bloque_esferas-1', part=p, dependent=ON)
session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(mesh=ON)
session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.meshOptions.setValues(
meshTechnique=ON)
p = mdb.models['Model-1'].parts['bloque_esferas']
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p)
session.viewports['Viewport: 1'].partDisplay.setValues(sectionAssignments=OFF,
engineeringFeatures=OFF, mesh=ON)
session.viewports['Viewport: 1'].partDisplay.meshOptions.setValues(
meshTechnique=ON)
p = mdb.models['Model-1'].parts['bloque_esferas']
p.seedPart(size=esferad, deviationFactor=0.1, minSizeFactor=0.1) #mallado del bloque y tamaño
p = mdb.models['Model-1'].parts['bloque_esferas']
p.generateMesh()
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=a)
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
a.regenerate()

a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
a.translate(instanceList=('bloque_esferas-1', ), vector=(esferad/2, esferad/2, -casote3-esferad/2)) #traslado
del bloque a la zona de análisis

#####

```

ANEXO 5: Uso de DEM en Abaqus en formato INP

Como se comentó, lamentablemente no se puede dibujar las partículas tipo DEM en la interfaz de Abaqus, por lo cual se debe usar otro modo. Para explicar cómo se incluyen las partículas tipo DEM en Abaqus se emplea el siguiente ejemplo, en el cual se realiza una cantidad de 125 esferas de diámetro de 0.2 m, los cuales tienen una distribución de $5 \times 5 \times 5$. Estas esferas tienen una densidad de 1000 kg/m^3 , un K_n de $2 \times 10^7 \text{ N/m}^3$, un K_t de $1 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ y un coeficiente de fricción de 0.5. El arreglo de esferas es colocado sobre una plataforma rígida discreta, la cual no puede trasladarse ni rotar (*Figura A5 - 1*). Si se evalúa la ecuación $\Delta t \leq 0.1 \sqrt{m/k}$, entonces se debe asegurar que Δt sea menor a 0.00012533 s. Entonces la evaluación se realiza en Abaqus/Explicit con un incremento de tiempo de 0.0001.s, y con solo un paso de gravedad, en la que en el primer segundo se aplica la gravedad de manera lineal y luego se mantiene constante hasta 5 s.

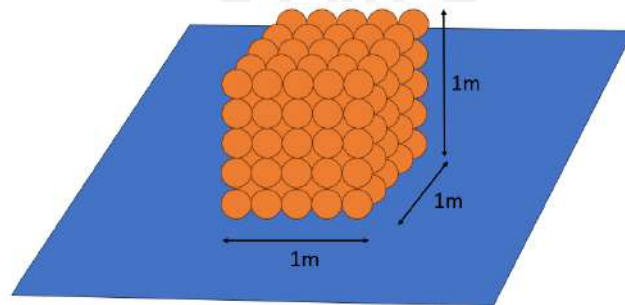


Figura A5 - 1: Arreglo de esferas de $5 \times 5 \times 5$

Como se aprecia en la *Figura A5 - 1*, las esferas ocupan un volumen bruto de $1 \times 1 \times 1 \text{ m}$. En Abaqus se coloca la plataforma rígida y en vez de colocar las esferas, se coloca un bloque que tiene el volumen bruto del arreglo de esferas, pero, cada dimensión del bloque debe tener 1 diámetro menos. En este ejemplo, el bloque debe ser entonces de $0.8 \times 0.8 \times 0.8 \text{ m}$ tipo sólido deformable 3D. También, este bloque debe de estar separado de las superficies aledañas por 0.5 diámetros (1 radio de la esfera). Por lo tanto, ya que existe una superficie aledaña debajo (plataforma rígida), el bloque debe ser colocado a 0.5 diámetros, es decir a 0.1 m. El bloque tendrá el nombre de “Bloque_esferas”. En la *Figura A5 - 2a* se muestra el bloque de 0.8 m de lado, el cual se encuentra sobre una plataforma rígida de 5 m de lado. En la *Figura A5 - 2b* se muestra la vista frontal del modelo, en la cual se aprecia que el bloque está separado de la plataforma en 0.1 m.

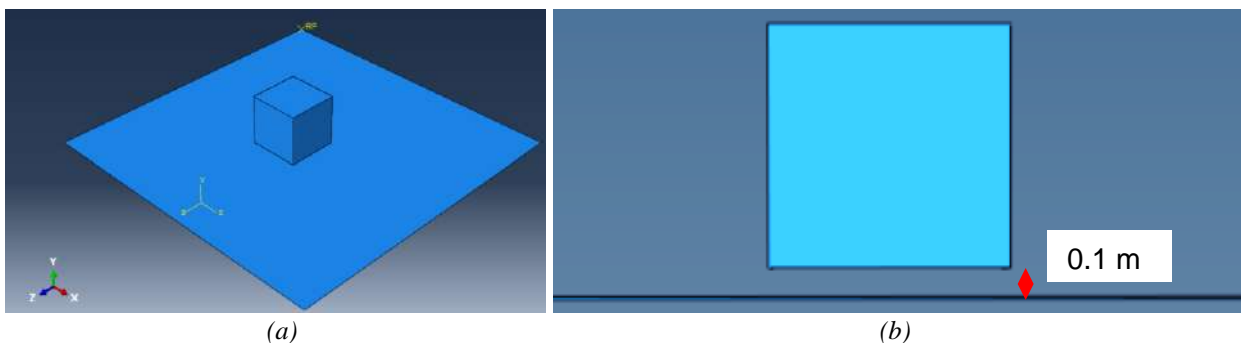


Figura A5 - 2: Bloque sobre plataforma en Abaqus (a) Vista 3D (b) Vista frontal

El bloque en Abaqus puede tener cualquier propiedad de densidad, módulo de elasticidad y módulo de Poisson, ya que luego se modificarán estas características. El bloque no debe ser convertido a sólido rígido, únicamente debe permanecer como un material deformable. Se crea la variable “Interaccion1” tipo penalty con un caso de contacto general, la cual tiene las propiedades de K_n , K_t y coeficiente de fricción. Si se desea se puede crear varias variables de contacto, por ejemplo, una variable para el comportamiento de contacto entre esferas, una variable para el comportamiento de contacto de los elementos externos, y otra variable del comportamiento de contacto entre las esferas y los elementos externos. En este ejemplo solo se colocó una variable de contacto. Por último, el mallado del bloque debe realizarse con una distancia entre nodos de 1 diámetro de esfera del tipo hexaedros C3D8R. Para este caso, la distancia del mallado entre nodos es de 0.2 m (diámetro de la esfera). Por último, se debe crear la superficie llamada “superficies total”, la cual debe englobar todos los elementos externos, sin incluir el bloque que se convertirá en partículas. En la *Figura A5 - 3* se muestra el mallado de los elementos del modelo.

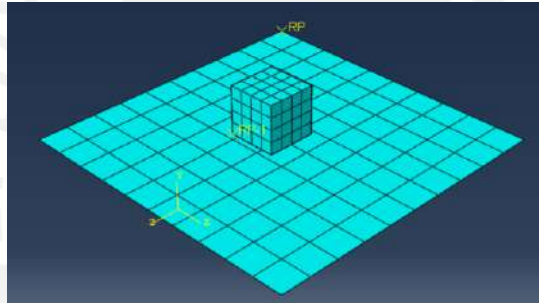


Figura A5 - 3: Mallado de los elementos del modelo

Luego de estos pasos, se sugiere evaluar el modelo elaborado para verificar que no haya errores. En modelos muy complejos se sugiere evaluar el sistema por lo menos por gravedad. En ocasiones aparece un error de deformación excesiva cuando se realiza el análisis, entonces en este caso se puede convertir el bloque en sólido rígido solo para verificar que el modelo desarrollado funcione correctamente. Cuando se verifique que todo marcha bien, quitar la característica de sólido rígido al bloque.

Luego de realizar el análisis preliminar, crear un proceso en el “Job Manager” con cualquier nombre (para este caso se usa el nombre “proceso1”), y presionar Write Input. Al realizar esto, se crea un archivo con el nombre usado en formato INP, por ejemplo, en este caso “proceso1.inp” en la carpeta del directorio de trabajo (comúnmente este es C/.temp). Luego de esto, se debe abrir el archivo INP por medio de un visor. Se recomienda usar Notepad+. En el archivo, buscar la parte llamada “Part, name=Bloque_esferas” (*Figura A5 - 4a*), si bajamos más encontraremos el mallado tipo C3D8 del bloque, y por último, el “End Part” (*Figura A5 - 4b*).

```

1  *Heading
2  ** Job name: proceso1 Model name: Model-1
3  ** Generated by: Abaqus/CAE 2023
4  ** Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
5  **
6  ** PARTS
7  *Part, name=Bloque_esferas
8  *Node
9
10 1, 0.800000012, 0.800000012, 0.800000012
11 2, 0.800000012, 0.600000024, 0.800000012
12 3, 0.800000012, 0.400000006, 0.800000012
13 4, 0.800000012, 0.200000003, 0.800000012
14 5, 0.800000012, 0., 0.800000012
15 6, 0.800000012, 0.800000012, 0.600000024
16 7, 0.800000012, 0.600000024, 0.600000024
17 8, 0.800000012, 0.400000006, 0.600000024
18 9, 0.800000012, 0.200000003, 0.600000024
19 10, 0.800000012, 0., 0.600000024
20 11, 0.800000012, 0.800000012, 0.400000006
21 12, 0.800000012, 0.600000024, 0.400000006
22 13, 0.800000012, 0.400000006, 0.400000006
23 14, 0.800000012, 0.200000003, 0.400000006
24
25
26 52, 104, 105, 110, 109, 79, 80, 85, 84
27 53, 106, 107, 112, 111, 81, 82, 87, 86
28 54, 107, 108, 113, 112, 82, 83, 88, 87
29 55, 108, 109, 114, 113, 83, 84, 89, 88
30 56, 109, 110, 115, 114, 84, 85, 90, 89
31 57, 111, 112, 117, 116, 86, 87, 92, 91
32 58, 112, 113, 118, 117, 87, 88, 93, 92
33 59, 113, 114, 119, 118, 88, 89, 94, 93
34 60, 114, 115, 120, 119, 89, 90, 95, 94
35 61, 116, 117, 122, 121, 91, 92, 97, 96
36 62, 117, 118, 123, 122, 92, 93, 98, 97
37 63, 118, 119, 124, 123, 93, 94, 99, 98
38 64, 119, 120, 125, 124, 94, 95, 100, 99
39
40 *Nset, nset=Set-1, generate
41 1, 125, 1
42
43 *Elset, elset=Set-1, generate
44 1, 64, 1
45
46 *section, section=1
47 *Solid Section, elset=Set-1, material=Material-1
48 /
49
50 *End Part

```

(a) (b)

Figura A5 - 4: Parte “bloque_esferas” (a) Inicio (b) final

Luego de ubicar esta zona se debe copiar todo lo marcado en líneas punteadas verdes de la *Figura A5 - 4* a un nuevo archivo, por ejemplo, “nuevoproceso.inp” y guardarlo, sin incluir la línea “End Part”. De aquí se usa el programa en Python llamado “solidtodem.py” que es un programa desarrollado por Abaqus para convertir cada subelemento del mallado C3D8 en partículas PD3D. Para activar este programa se debe colocar el archivo “solidtodem.py” en la carpeta donde se ubica el archivo creado “nuevoproceso.inp”. Luego, por medio de CMD (En Windows: Inicio>símbolo del sistema), ubicarse en la carpeta donde se encuentran estos dos archivos y ejecutamos lo siguiente (*Figura A5 - 5a*):

abaqus python solidtodem.py – inp nuevoproceso – part (A5-1)

```
E:\>abaqus python solidtodem.py -inp nuevoproceso -part|
```

(a)

```
E:\>abaqus python solidtodem.py -inp nuevoproceso -part
***DEM mesh written out to dem_nuevoproceso.inp***
E:\>|
```

(b)

Figura A5 - 5: solidtodem.py (a) código a utilizar (b) proceso satisfactorio

Si todo sale satisfactorio (*Figura A5 - 5b*) debe aparecer un archivo nuevo en la carpeta evaluada llamada “dem_nuevoproceso.inp”, que al abrirlo se aprecia que el mallado del “Bloque_esferas” tipo C3D8R ahora es un mallado de partículas tipo PD3D (*Figura A5 - 6a* y *Figura A5 - 6b*). Todo esto debe copiarse y reemplazarse en el mallado del “Bloque_esferas” P3D8 (*Figura A5 - 7a* y *Figura A5 - 7b*) del archivo inicial “proceso1.inp”. Como se aprecia en la *Figura A5 - 6a*, ahora el mallado se llama “dem1”.

puntos del mallado que se realizó en el bloque “Bloque_esferas”. Estas características convierten a las esferas en sólido rígidos y, además, le dan nuevas propiedades que reemplazan a las que se asignaron inicialmente al “Bloque_esferas” de densidad, módulo de elasticidad y módulo de Poisson. Como se comentó antes, lamentablemente en la versión actual de Abaqus no se le puede dar otras características como la capacidad de deformación, cohesión, entre otros a las esferas.

Estas esferas no están incluidas en el ensamblaje del modelo, por lo que para incluirlas se debe ubicar en el archivo “procesos1.inp”, “End assembly”, y antes de esta línea colocar lo siguiente (Figura A5 - 8b):

```
*Surface, name=dem1
Bloque_esferas-1.dem1,
```

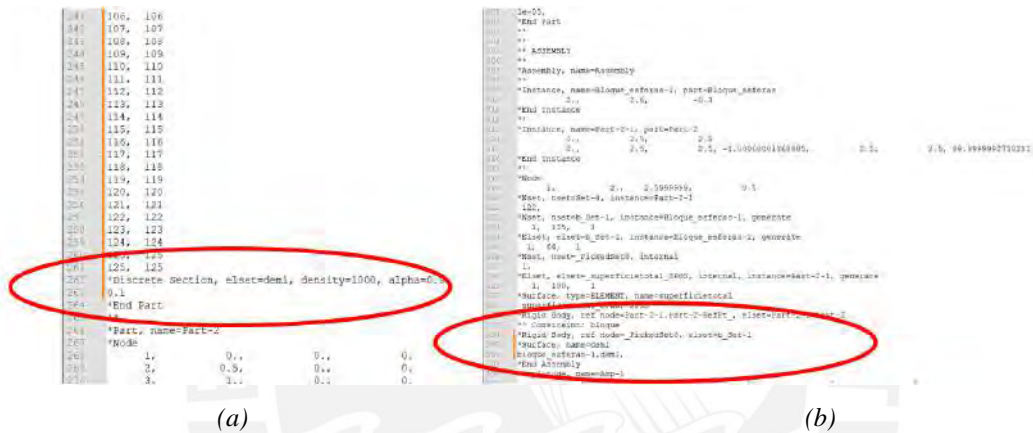


Figura A5 - 8: Detalles del procesos1.inp (a) Características de las partículas (b) Ensamblaje de las partículas

Como se aprecia en la Figura A5 - 8b, ahora el “Bloque_esferas” se llama “Bloque_esferas-1”. Esto se da debido a que en el ensamblaje se agrega estos sufijos numerados, ya que en ocasiones se puede agregar el mismo elemento varias veces en el ensamblaje, entonces de este modo se pueda distinguirlos.

Por último, en el archivo “procesos1.inp” se debe buscar la zona de “INTERACTION PROPERTIES” e “INTERACTIONS”. En la Figura A5 - 9a se aprecia estos dos casos y en “INTERACTION PROPERTIES” se aprecia la interacción creada en Abaqus, la cual tiene el K_n de 2×10^7 N/m³, el K_t de 1×10^7 N/m³ y el coeficiente de fricción de 0.5, con el nombre que se utilizó: “Interaccion1”. Aquí aparecen todas las variables de contacto con los nombres asignados anteriormente. Ahora, se debe reemplazar todo lo de “INTERACTIONS” por lo siguiente (Figura A5 - 9b):

```
*Contact
*Contact Controls Assignment, rotational terms=STRUCTURAL
*Contact Inclusions
DEM1, DEM1
```

DEM1, superficietotal
 superficietotal, superficietotal
 *Contact Property Assignment
 superficietotal, superficietotal, Interaccion1
 DEM1, superficietotal, Interaccion1
 DEM1, DEM1, Interaccion1

Esto permite asignar a las esferas las propiedades de contacto. “Contact inclusions” indica cómo actuarán los contactos, por ejemplo, partícula “DEM1” con partícula “DEM1” (DEM1 es el nombre que se asignó al mallado de esferas anteriormente). DEM1 con “superficietotal” (“superficietotal” es la superficie creada, que engloba todo el modelo sin incluir a las esferas) y “superficietotal” con “superficietotal”. Luego, en “Contact property Assignment” se indica con qué variable de contacto van a actuar estas superficies, por ejemplo, en este caso ya que solo se ha creado la variable “Interaccion1”, se especifica que “superficietotal” con “superficietotal”, DEM1 con “superficietotal” y DEM1 con DEM1 tengan la misma variable de contacto, “Interaccion1”.

```

-----
*Elastic
2e+08, 0.3
**
** INTERACTION PROPERTIES
**
*Surface Interaction, name=Interaccion1
*Friction, shear traction slope=1e+07
0.5,
*Surface Behavior, pressure-overclosure=LINEAR
2e+07,
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: empotrado Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
Set-4, ENCASTRE
**
** INTERACTIONS
**
** Interaction: Int-1
*Contact, op=NEW
*Contact Inclusions, ALL EXTERIOR
*Contact Property Assignment
, Interaccion1
** -----
**

```

(a)

```

*Elastic
2e+08, 0.3
**
** INTERACTION PROPERTIES
**
*Surface Interaction, name=Interaccion1
*Friction, shear traction slope=1e+07
0.5,
*Surface Behavior, pressure-overclosure=LINEAR
2e+07,
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: empotrado Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
Set-4, ENCASTRE
**
** INTERACTIONS
**
*Contact
*Contact Controls Assignment, rotational terms=STRUCTURAL
*Contact Inclusions
DEM1, DEM1
DEM1, superficietotal
superficietotal, superficietotal
*Contact Property Assignment
superficietotal, superficietotal, Interaccion1
DEM1, superficietotal, Interaccion1
DEM1, DEM1, Interaccion1
** -----
**

```

(b)

Figura A5 - 9: Detalles del contacto e interacciones (a) Antes (b) Después

Por último, se guarda el archivo y en Abaqus, se crea un nuevo proyecto en el “Job Manager” y al dar click en “Create”, colocar “Source”. En este punto elegir “Source: Input file” y escoger el archivo “proceso1.inp”, el cual ya ha sido modificado. Una sugerencia es el de no activar el uso de multiprocesadores, ya que por alguna razón este entrega resultados errados para este tipo de análisis. En la Figura A5 - 10 se muestra el comportamiento de las partículas sobre la plataforma a distintos tiempos debido a la gravedad.

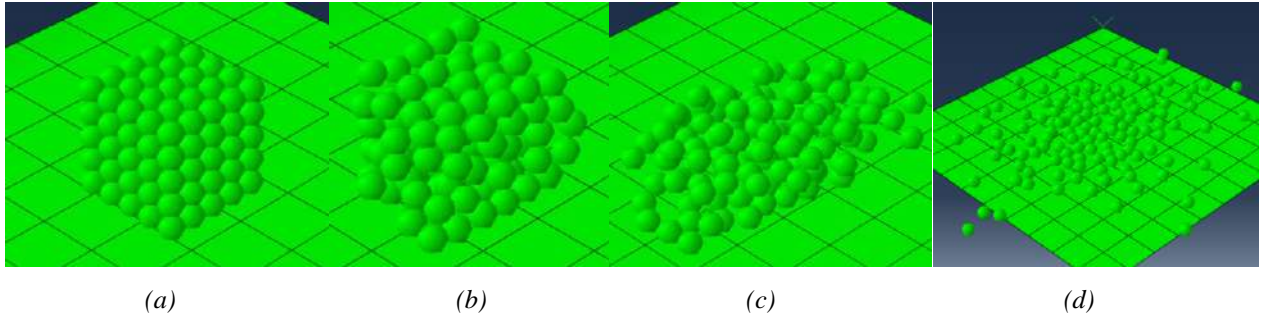


Figura A5 - 10: Partículas en Abaqus a diferentes tiempos

(a) $t = 0\text{ s}$ (b) $t = 3\text{ s}$ (c) $t = 3.5\text{ s}$ (d) $t = 5\text{ s}$



ANEXO 6: INFORMACIÓN AUDIOVISUAL

En el siguiente QR se muestran los videos del comportamiento de la estructura de Sacsayhuamán evaluada en el capítulo 6 y 8, frente a los diversos registros sísmicos. También se muestran los modelos numéricos y los ensayos experimentales del capítulo 7.

