

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DEL PERÚ**

Escuela de Posgrado



**MODELACIÓN NUMÉRICA DE MUROS DE CONTENCIÓN
DE PIEDRA**

Tesis para obtener el grado académico de Magíster en Ingeniería Civil
con mención en Estructuras Sismorresistentes que presenta:

Ing. Victor Felipe Puyen Burga

Asesor:

Dr. Sabino Nicola Tarque Ruiz

Lima, 2022

Informe de Similitud

Yo, Nicola Tarque, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado MODELACIÓN NUMÉRICA DE MUROS DE CONTENCIÓN DE PIEDRA, del autor Víctor Felipe Puyen Burga, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de **14%**. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 22/11/2022.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha:

Lima, 14 de diciembre de 2022

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: Tarque Ruiz Sabino Nicola Paterno Materno, Nombre1 Nombre 2	
---	--

DNI: 40225394	Firma
---------------	-------

ORCID: 0000-0002-1029-9240	
----------------------------	--



Sabino Nicola Tarque Ruiz
Ingeniero Civil - Esp. Ing. Estructural
Reg. CIP. N° 75382



Dedicatoria

Este trabajo de investigación esta dedicado a mi padre Ángel Puyen, a mi madre Carmen Burga y a mi hermana Andrea Puyen por todo su apoyo y aliento no solo para este trabajo de tesis, sino también para mis dificultades de los día a día.



Agradecimientos

Agradecimientos especiales para mis amigos Oskar Quiroz, Paul Silvestre, Rai del Pino y Anace Reyes por su apoyo y motivación en todo este tiempo. Así mismo, agradecimientos al Dr. Nicola Tarque y al Ing. Leonel Lipa por todo el asesoramiento brindado en el desarrollo de la presente investigación

RESUMEN

En la actualidad, muchas de las viviendas construidas en los asentamientos periféricos de Lima Metropolitana utilizan los muros de piedra (pircas) como sistema de contención sin un debido estudio de su comportamiento. Por esta razón, este trabajo de investigación tiene por finalidad evaluar este tipo de sistemas haciendo uso de la teoría de los elementos finitos y definir si es posible modelar estas estructuras, de modo que sirva como punto de partida para futuras investigaciones. El procedimiento para elaborar esta tesis se detalla a continuación: En primer lugar, se hará revisión bibliográfica de los trabajos de investigación y ensayos previos hechos en el Perú en relación con estas estructuras. Asimismo, se recopilará información sobre las definiciones más importantes para el presente trabajo y relacionadas a la modelación numérica. Seguidamente, se profundizarán los conceptos vinculados con el uso del software Abaqus, el cual servirá para realizar el modelamiento de la estructura. Posteriormente, se calibrarán diferentes modelos teóricos realizados en Abaqus con los resultados obtenidos de los ensayos experimentales hechos a muros tipo pirca. Finalmente, se analizarán los resultados obtenidos de los modelamientos en el Software y se concluirá si es posible representar este tipo de estructura bajo la teoría de los elementos finitos.

ABSTRACT

Many houses built in peripheral settlements located in Lima Metropolitana currently have stone walls (pircas) as a containment system without having a due study of their behaviors. Therefore, this research aims to evaluate this type of systems using the finite element theory and identifying whether is possible to model these structures, so that it may be used as a starting point for future research. The elaboration process of this thesis will be as follows: first, a bibliographical review of previous research and essays related to these structures from Peru will be written, and key definitions for this study that are related to numerical modeling will be compiled. Thereafter, concepts related to the use of Abaqus software will be examined, which will help to model the structure; and then, different theoretical methods carried out in Abaqus will be calibrated with results coming from experimental tests on pirca walls. Finally, the results of models built from this Software will be analyzed and it will conclude whether is possible to represent this type of structure under the finite element theory.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo Principal:	2
1.2.2. Objetivos Secundarios:.....	2
1.3. Alcances	2
1.4. Pregunta de Investigación	2
1.5. Hipótesis.....	2
1.6. Organización	2
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE	4
2.1. Uso y Vulnerabilidad de los muros tipo pirca en Lima.....	4
2.2. Evaluación experimental de las pircas	7
2.3. La piedra como sistema constructivo en Perú	8
2.4. Investigaciones haciendo uso de los elementos Discretos en Perú	9
2.5. Investigaciones haciendo uso de los elementos Finitos en Perú	10
CAPÍTULO 3: DEFINICIONES	13
3.1. Peso propio	13
3.2. Rigidez de Contacto	13
3.3. Coeficiente de fricción	13
3.4. Muros de Contención con Junta Seca (DSRW, por sus siglas en inglés).....	13
3.5. Historia de los muros de contención de Junta Seca.....	15
CAPÍTULO 4: MODELACIÓN NUMERICA	16
4.1. Conceptos Importantes	16
4.2. Fuerza Inercial sísmica de muros	17
4.3. Teoría de los Elementos Finitos	18
4.4. Tipos de modelado	19
CAPÍTULO 5: ENSAYO ESTÁTICO	22
5.1. Descripción e Instrumentos utilizados	22
5.2. Equipos utilizados y Mano de obra	23
5.3. Ensayos Desarrollados	30

5.4. Resultados del ensayo	32
CAPÍTULO 6: PRIMERA CALIBRACIÓN DE MODELO	37
6.1. Unidades y Materiales.....	37
6.2. Geometría de los elementos	37
6.3. Fases de análisis	39
6.4. Interacción.....	40
6.5. Mallado de elementos.....	41
6.6. Resultados del análisis	42
6.7. Resultados gráficos de los análisis	48
CAPÍTULO 7: MODELO DE MURO DE PIRCA	55
7.1. Modelos de calibración general.....	55
7.2. Unidades, Materiales y Condiciones.....	62
7.3. Ensamble de los elementos	64
7.4. Fases de análisis	65
7.5. Condiciones de contacto.....	66
7.6. Cargas del sistema.....	66
7.7. Mallado de los elementos.....	67
7.8. Resultados	68
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES	75
REFERENCIAS	77

Lista de Figuras

Capítulo 1:

Figura N°1. 1 Laderas del Cerro El Agustino (Fotografía: J. Robert,2017) [2].....	1
Figura N°1. 2 Muros tipo pirca como sistema de contención [2].....	1

Capítulo 2:

Figura N°2. 1 Laderas del Cerro El Agustino	4
Figura N°2. 2 Vivienda en A.H.31 (Fotografía: Montes, 2017)	5
Figura N°2. 3 Vivienda en A.H.31 (Fotografía: Chávez, 2018)	5
Figura N°2. 4 Pirca elaborada en Perú usando bloques de dimensiones variadas (Fotografía: Quispe, 2019).....	6
Figura N°2. 5 Propuesta de dimensiones de base del muro (Figura: Ballón / Echenique, 2017)..	7
Figura N°2. 6 Esquema de mesa inclinable (Figura: Rivas, 2019)	8

Figura N°2. 7 Muros a escala evaluados a) Bloques irregulares sin arriostres b) Bloques irregulares con arriostres c) Bloques irregulares con tarrajeo (Fotografías: Alcántara, 2020).....	8
Figura N°2. 8 Puente Trujillo (Fotografía: Bardales, 2013).....	9
Figura N°2. 9 Evaluación haciendo uso de los Elementos Discretos (Figura: Zanelli, 2019)	10
Figura N°2. 10 Evaluación haciendo uso de los Elementos Discretos (Figura: Aliaga, 2020) ...	10
Figura N°2. 11 Superficie de falla - FEM (Figura: Urrutia, 2008)	11
Figura N°2. 12 Esquema de la zona crítica evaluada (Figura: Silva, 2014).....	11
Figura N°2. 13 Análisis dinámico - FEM (Figura: Enciso, 2014)	12
Figura N°2. 14 Respuesta no lineal en Viga (Figura: Xamir / Soncco, 2019)	12

Capítulo 3:

Figura N°3. 1 Castillo de Arévalo Date (a) (Fotografía: casalarealarevalo, por LaReal, 2019, https://casalareal.com/castillo-de-arevalo).....	13
Figura N°3. 2 Iglesia de San Rafael de Mucuchies (Fotografía: Venezuelatuya, por Rafaela Acosta, 2010, https://www.venelogia.com/archivos/4423/)	14
Figura N°3. 3 Muro de contención de Piedra (Fotografía: Sumelzo, por Sumelzo, 2005, https://sumelzo.com/obra-73-muro-de-contencion-colocado-en-poligono-ptr).....	14
Figura N°3. 4 Muro de contención de Piedra II (Fotografía: construccionesrnc, por construccionesrnc, https://construccionesrnc.com/muro-de-contencion-de-piedra-en-seco/	14
Figura N°3. 5 Piedra de los 12 ángulos (wamanadventures, https://www.wamanadventures.com/blog/piedra-de-12-angulos-2/)	15

Capítulo 4:

Figura N°4. 1 Volteo del Muro	16
Figura N°4. 2 Deslizamiento de Muro	16
Figura N°4. 3 Aplastamiento.....	17
Figura N°4. 4 Software Abaqus	19
Figura N°4. 5 Representación de la Micromodelación [5].....	20
Figura N°4. 6 Representación de la Mesomodelación [5].....	20
Figura N°4. 7 Representación de la Macromodelación [5].....	21

Capítulo 5:

Figura N°5. 1 Ensayo de Muro de Pirca.....	22
Figura N°5. 2 Computador de Ensayo	22

Figura N°5. 3 Mesa inclinable y material para el muro (piedra) (Fotografía: Ramos / Terbullino, 2020)	23
Figura N°5. 4 Habilitación del Material (Fotografía: Ramos / Párraga, 2020)	24
Figura N°5. 5 Transporte del Material (Fotografía: Ramos, Párraga, 2020).....	24
Figura N°5. 6 (a) Descarga del Material (b) Distribución del material (Fotografías: Ramos / Párraga, 2020)	25
Figura N°5. 7 (a) Límite de la base (Fotografías: Ramos / Párraga, 2020).....	25
Figura N°5. 8 (a) Verificación del ancho del muro (Fotografías: Ramos / Párraga, 2020).....	26
Figura N°5. 9 (a) Base del muro (Fotografías: Ramos / Párraga, 2020)	26
Figura N°5. 10 (a) Vista lateral del muro (Fotografías: Ramos / Párraga, 2020).....	26
Figura N°5. 11 (a) Construcción del muro (Fotografías: Ramos / Párraga, 2020).....	27
Figura N°5. 12 Detalles del muro (Fotografías: Ramos / Párraga, 2020)	27
Figura N°5. 13 Avance intermedio en la construcción del muro I (Fotografías: Ramos / Párraga, 2020)	28
Figura N°5. 14 Avance intermedio en la construcción del muro II (Fotografías: Ramos / Párraga, 2020)	28
Figura N°5. 15 Modificación de piedras (Fotografías: Ramos / Párraga, 2020).....	28
Figura N°5. 16 Muro finalizado (Fotografías: Ramos / Párraga, 2020).....	29
Figura N°5. 17 Ángulo 5.0°	30
Figura N°5. 18 Ángulo 10.0°	30
Figura N°5. 19 Ángulo 15.0°	30
Figura N°5. 20 Ángulo 16.6°	30
Figura N°5. 21 Ángulo 20.0°	31
Figura N°5. 22 Ángulo 25.0°	31
Figura N°5. 23 Ángulo 30.0°	31
Figura N°5. 24 Ángulo 40.0°	31
Figura N°5. 25 Esquema de puntos de control del ensayo.....	32
Figura N°5. 26 Esquema de desplazamientos en muro (Imagen: Ramos / Párraga, 2020)	33
Figura N°5. 27 Desp. Max vs ángulo de inclinación (Imagen: Ramos / Párraga, 2020)	36

Capítulo 6:

Figura N°6. 1 (a) Part manager (b) Modelo de piedra.....	38
Figura N°6. 2 (a) Part manager (b) Modelo de plataforma	38
Figura N°6. 3 (a) Part manager (b) Modelo de terreno	39
Figura N°6. 4 Unión de elementos creados.....	39
Figura N°6. 5 Steps creados	39
Figura N°6. 6 Contacto entre bloques	40

Figura N°6. 7 Eje de rotación de la plataforma.....	41
Figura N°6. 8 Mesh – a) Piedra b) Plataforma c) Terreno	41
Figura N°6. 9 Mesh – Estructura Global.....	42
Figura N°6. 10 Estado de gravedad y de rotación h – Estructura Global.....	43
Figura N°6. 11 Etapa en Gravedad (u=0.25).....	44
Figura N°6. 12 Etapa en Rotación (u=0.25).....	44
Figura N°6. 13 Desplazamiento vertical vs Tiempo - Entre pircas – Coef. Fricción:0.25.....	45
Figura N°6. 13 Etapa en Gravedad (u=0.30).....	45
Figura N°6. 14 Etapa en Rotación (u=0.30).....	46
Figura N°6. 16 Desplazamiento vertical vs Tiempo - Entre pircas – Coef. Fricción:0.30.....	46
Figura N°6. 17 Etapa en Gravedad (u=0.35).....	47
Figura N°6. 18 Etapa en Rotación (u=0.35).....	47
Figura N°6. 19 Desplazamiento vertical vs Tiempo - Entre pircas – Coef. Fricción:0.35.....	48
Figura N°6. 20 Fuerza Normal vs Tiempo - Entre pircas – Coef. Fricción:0.25	48
Figura N°6. 21 Fuerza Normal (Contacto) vs Tiempo - Entre pirca y plataforma – Coef. Fricción:0.25	48
Figura N°6. 22 Fuerza Normal (Contacto) vs Tiempo - Entre pircas – Coef. Fricción:0.30	49
Figura N°6. 23 Fuerza Normal (Contacto) vs Tiempo - Entre pirca y plataforma – Coef. Fricción:0.30	50
Figura N°6. 24 Fuerza Normal vs Tiempo - Entre pircas – Coef. Fricción:0.35	51
Figura N°6. 25 Fuerza Normal (Contacto) vs Tiempo - Entre pirca y plataforma – Coef. Fricción:0.35	51
Figura N°6. 26 Fuerza Cortante (Contacto) vs Tiempo - Entre pircas.....	52
Figura N°6. 27 Fuerza Cortante (Contacto) vs Tiempo - Entre pirca y plataforma	53
Capítulo 7:	
Figura N°7. 1 Primer momento de análisis (Caso I)	55
Figura N°7. 2 Fin del análisis global de la estructura (Caso I)	56
Figura N°7. 3 Primer momento de análisis (Caso II).....	56
Figura N°7. 4 Fin del análisis global de la estructura (Caso II).....	57
Figura N°7. 5 Primer momento de Falla Global (Caso III).....	57
Figura N°7. 6 Fin del análisis global de la estructura (Caso III).....	58
Figura N°7. 7 Primer momento de Falla Global (Caso IV).....	58
Figura N°7. 8 Fin del análisis global de la estructura (Caso IV).....	59
Figura N°7. 9 Primer momento de Falla Global (Caso V).....	59
Figura N°7. 10 Fin del análisis global de la estructura (Caso V).....	60
Figura N°7. 11 Primer momento de Falla Global (Caso VI).....	60
Figura N°7. 12 Fin del análisis global de la estructura (Caso VI).....	61

Figura N°7. 13 Primer momento de Falla Global (Caso VI).....	61
Figura N°7. 14 Fin del análisis global de la estructura (Caso VI).....	62
Figura N°7. 15 Unidades del Modelo.....	62
Figura N°7. 16 Tipos de pircas (a) Pirca tipo 1 (b) Pirca tipo 2 (c) Pirca tipo 3	63
Figura N°7. 17 Tipos de pircas (d) Pirca tipo 4 (e) Pirca tipo 5.....	64
Figura N°7. 18 (g) Plataforma (h) Terreno	64
Figura N°7. 19 Ensamble – 3D	64
Figura N°7. 20 (a) Elevación frontal X-Y (b) Elevación lateral Z-Y.....	65
Figura N°7. 21 Fases de análisis	66
Figura N°7. 22 Empotramiento en superficie de apoyo (Terreno).....	66
Figura N°7. 23 Empotramiento en bloque inferior	67
Figura N°7. 24 (a) Mesh piedra tipo 1 (b) Mesh piedra tipo 2 (c) Mesh piedra tipo 3	67
Figura N°7. 25 (a) Mesh piedra tipo 4 (b) Mesh piedra tipo 5.....	67
Figura N°7. 26 Mesh – terreno.....	68
Figura N°7. 27 Distribución de bloques.....	68
Figura N°7. 28 Fuerza entre plataforma y muro vs Tiempo	69
Figura N°7. 29 Punto de análisis.....	70
Figura N°7. 30 Punto de análisis – Desplazamiento en Y vs tiempo (Abaqus).....	70
Figura N°7. 31 Comparación de desplazamientos (Punto 1)	71
Figura N°7. 32 Comparación de desplazamientos (Punto 4)	71
Figura N°7. 33 Comparación de desplazamientos (Punto 7)	72
Figura N°7. 34 Modelo 5.00°	73
Figura N°7. 35 Ensayo 5.00°.....	73
Figura N°7. 36 Modelo 10.00°.....	73
Figura N°7. 37 Ensayo 10.00°.....	73
Figura N°7. 38 Modelo 15.00°	73
Figura N°7. 39 Ensayo 15.00°.....	73
Figura N°7. 40 Modelo 16.60°	73
Figura N°7. 41 Ensayo 16.60°.....	73
Figura N°7. 42 Leyenda y Sistema de referencia.....	74

Lista de Tablas

Capítulo 2:

Tabla N° 2. 1 Resumen del porcentaje de daño estructural de viviendas sobre pircas (Tabla: Zanelli, 2019).....	6
Tabla N° 2. 2 Incremento de la PAE para viviendas sobre pircas (Tabla: Ramos, 2021).....	7

Capítulo 5:

Tabla N°5. 1 Rendimiento (Cuadro: Ramos / Párraga, 2020).....	29
Tabla N°5. 2 Ángulos de rotación.....	33
Tabla N°5. 3 Desplazamiento – Punto 1 (Unid: mm).....	33
Tabla N°5. 4 Desplazamiento – Punto 2 (Unid: mm).....	33
Tabla N°5. 5 Desplazamiento – Punto 3 (Unid: mm).....	33
Tabla N°5. 6 Desplazamiento – Punto 4 (Unid: mm).....	34
Tabla N°5. 7 Desplazamiento – Punto 5 (Unid: mm).....	34
Tabla N°5. 8 Desplazamiento – Punto 6 (Unid: mm).....	34
Tabla N°5. 9 Desplazamiento – Punto 7 (Unid: mm).....	34
Tabla N°5. 10 Desplazamiento – Punto 8 (Unid: mm).....	34
Tabla N°5. 11 Desplazamiento – Punto 9 (Unid: mm).....	35
Tabla N°5. 12 Desplazamiento – Punto 10 (Unid: mm).....	35
Tabla N°5. 13 Desplazamiento – Puntos fijos (Unid: mm).....	35
Tabla N°5. 14 Desplazamientos totales de puntos de control (Unid: mm).....	35
Tabla N°5. 15 Desplazamientos totales desde punto R (Unid: mm).....	35
Tabla N°5. 16 Desplazamientos y derivas obtenidas (Cuadro: Ramos / Párraga, 2020).....	36

Capítulo 6:

Tabla N°6. 1 Unidades Utilizadas en el Modelo.....	37
Tabla N°6. 2 Comparación de resultados.....	53

Capítulo 7:

Tabla N°7. 1 Cantidad de Pircas utilizadas.....	65
Tabla N°7. 2 Peso de Columna 1.....	69
Tabla N°7. 3 Modelo (Abaqus vs Ensayo Real) - Desplazamientos.....	73

Capítulo 8:

Tabla N°8. 1 Evaluación de contacto entre pircas.....	75
Tabla N°8. 2 Evaluación de contacto entre pirca inferior y plataforma.....	75

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La migración hacia la ciudad de Lima se ha producido sin un control adecuado en los últimos 30 años, principalmente entre las décadas de los 70 y 80 [1]. Producto de este movimiento, se crearon lo que se conoce hoy como Asentamientos Humanos, donde la mayoría de estos se ubican sobre cerros sin un estudio técnico apropiado.

Muchos de los asentamientos humanos, los cuales ocupan las laderas de los diferentes distritos de Lima, como se puede apreciar en la Figura N° 1.1, han sido regularmente afectados por fenómenos de origen natural y/o antrópico. Como ejemplo de lo último mencionado se tienen deslizamientos de terreno, incendios y derrumbes de construcciones [2].



Figura N°1. 1 Laderas del Cerro El Agustino [Fotografía: J. Robert,2017] [2]

De todos los sistemas utilizados en los asentamientos humanos, los muros de piedras, también conocidos como pircas, son las estructuras más vulnerables en relación con los sistemas de viviendas. Se debe tomar en cuenta, que estos sistemas presentan gran probabilidad de colapso estando frente a la actividad de un sismo frecuente o estando al frente de un sismo ocasional, si el empuje se concentrara en la mitad superior de la altura de la pirca [3]. Un ejemplo del sistema de pircas se puede observar en la Figura N° 1.2.



Figura N°1. 2 Muros tipo pirca como sistema de contención [2]

En los años 2008 y 2018, se realizaron estudios en Perú sobre este tipo de estructuras y sus cimentaciones, con el objetivo de evaluar y concientizar a la población sobre este tipo de sistemas. En ambos estudios, se concluyó que los muros de contención de piedras son sumamente vulnerables. A la fecha, se están realizando más estudios y ensayos que permitan entender mejor el comportamiento de estas estructuras bajo un estado estático y dinámico [4].

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Principal:

- Plantear una metodología de evaluación numérica de pircas.

1.2.2. Objetivos Secundarios:

- Recopilar información sobre modelación de muros de piedra.
- Evaluar las tipologías constructivas de pircas tomando como ejemplo el caso de Carabaylo.
- Modelar con FEM utilizando Abaqus el comportamiento de los muros de pirca

1.3. Alcances

Las consideraciones tomadas en cuenta para esta investigación son las siguientes:

- La información recopilada será vinculada al comportamiento de las pircas y sus variaciones ante sollicitaciones externas (Gravedad, entre otros)
- El software utilizado para el análisis de la estructura será Abaqus.
- El resultado final de la investigación serán lineamientos que hagan posible el uso de los muros tipo pirca.

1.4. Pregunta de Investigación

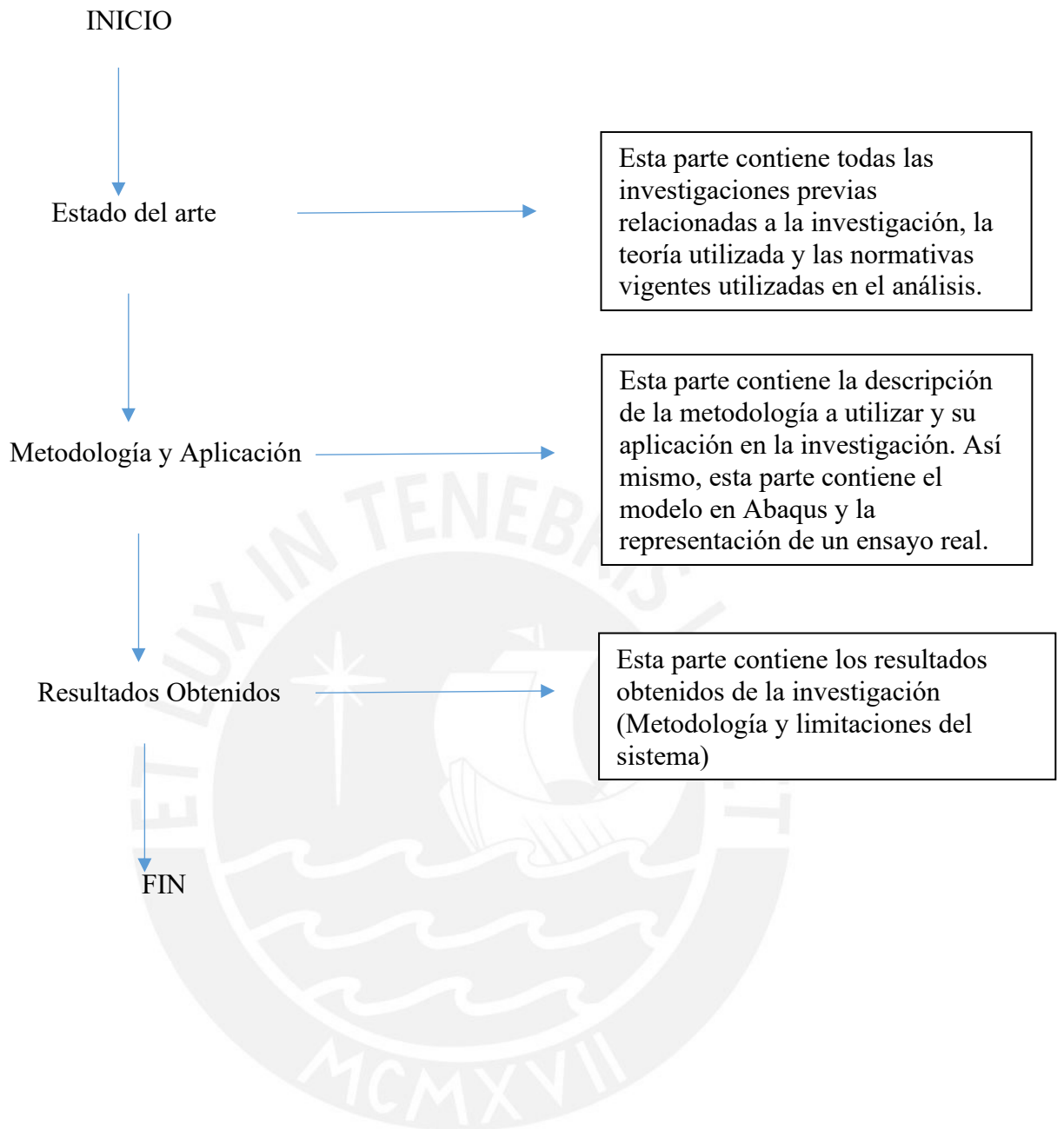
¿Será posible modelar el comportamiento de las pircas con elementos finitos?

1.5. Hipótesis

Es posible modelar con la Teoría de los Elementos Finitos el comportamiento de los muros de Pirca en un estado en reposo y ante sollicitaciones externas.

1.6. Organización

A continuación, se presenta la organización y secuencia de actividades que se han realizado para lograr los objetivos de la investigación:



CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se detallarán y explicarán los estudios previos relacionados a la vulnerabilidad de los muros tipo pirca en Lima, sobre los muros de contención y sus cargas de empuje sobre estas.

2.1. Uso y Vulnerabilidad de los muros tipo pirca en Lima

En el año 2009, Robert, J y Sierra, A realizaron un trabajo de investigación titulada “Construcción y refuerzo de la vulnerabilidad en dos espacios marginales de Lima”. De este trabajo, se evaluó el nivel de riesgo que existen en muchas viviendas en los asentamientos humanos de la Margen Izquierdo del Río Rímac (MIRR) y los del Cerro El Agustino. Por ejemplo, se observaron muchas viviendas sin un estudio técnico y con escasa calidad de construcción ubicadas en las partes altas de las laderas (Figura N° 2.1). Así mismo, se observó el uso de pircas como sistema de contención en ladera, la cual no presentaba un estudio técnico [2].



Figura N°2. 1 Laderas del Cerro El Agustino

En el año 2017, el geógrafo HildegarDO Córdoba – Aguilar, presentó un estudio relacionado a la vulnerabilidad de los asentamientos de la periferia de Lima Metropolitana frente al cambio climático. De este se concluyó que muchas de las personas que viven en los asentamientos periféricos de Lima Metropolitana tienen muy poca conexión con el resto de la ciudad, e incluso en algunos casos se sienten rechazados por esta. Debido a esto, muchas personas prefieren permanecer viviendo en los periféricos de Lima sin ningún control técnico de sus construcciones [25].

En el mismo año, el Arq. Paul Montes Neyra, desarrolló un estudio relacionado a la vulnerabilidad física del empircado de viviendas en laderas urbanizadas centradas principalmente en Carabayllo. En esta se analizaron 3 tipos de viviendas, las cuales presentaban diferentes características (Número de niveles, cantidad de residentes, superficie

construida, entre otros), donde los resultados brindaron información de las diferentes formas de vulnerabilidad existentes para este tipo de estructuras. No solo se apreciaron daños a los muros tipo pirca, sino también sobre las viviendas las cuales sostenían. En la Figura N°2.2 se puede apreciar un tipo de vivienda analizada. [38].



Figura N°2. 2 Vivienda en A.H.31 [Fotografía: Montes, 2017]

De igual manera, en el 2018, el Ing. Eladio Chávez, realizó una investigación enfocada en la mitigación de desastres ante la vulnerabilidad sísmica en el asentamiento humano paraíso del distrito de San Juan de Lurigancho. De esta investigación, se concluyó que, en la zona de estudio, el 100% de las viviendas son autoconstruidas sin cumplir las Normas Técnicas. Así mismo, se detalla que las viviendas se encuentran en estado regular y que un reforzamiento con malla electrosoldada brindaría un reforzamiento efectivo ante la gran vulnerabilidad sísmica [37]. Esto último se puede apreciar en la Figura N° 2.3.

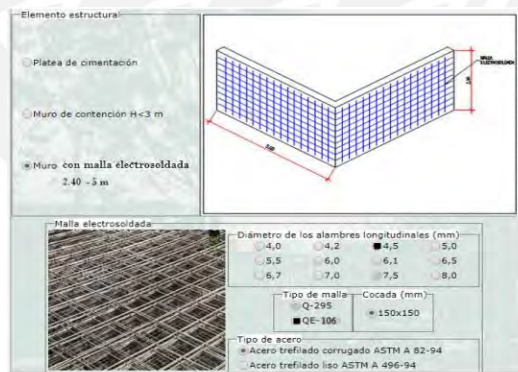


Figura N°2. 3 Vivienda en A.H.31 [Fotografía: Chávez, 2018]

Posteriormente, la Ing. Criss Zanelli Flores en el año 2019, evaluó el comportamiento de las pircas ante un evento sísmico, concluyendo que estas estructuras son las más vulnerables del sistema de viviendas en laderas. Así mismo, concluyo que estas estructuras, podrían colapsar frente a 2 escenarios: Sismo frecuente en donde el relleno produzca un empuje activo en toda su altura o un sismo ocasional donde el empuje fuese solo la mitad superior de la altura de la pirca, es decir se tendrá mayor derivas y vulnerabilidad sísmica ante una mayor altura de

pirca. En la Tabla N°2.1 se puede apreciar un resumen de los porcentajes de daño encontrados en las viviendas sobre pirca de acuerdo con la altura del relleno y del tipo de sismo [3].

Tabla N° 2. 1 Resumen del porcentaje de daño estructural de viviendas sobre pircas (Tabla: Zanelli, 2019)

Caso del relleno Sistema de vivienda	Caso (a): Relleno activo en toda la altura		Caso (b): Relleno activo en la mitad superior de la altura	
	Sismo Frecuente	Sismo Ocasional	Sismo Frecuente	Sismo Ocasional
Vivienda sobre pirca alta 1.75–2.25 m.	100% Daño completo	100% Daño completo	30% Daño moderado	100% Daño completo
Vivienda sobre pirca mediana 1.25–1.75m	100% Daño completo	100% Daño completo	31% Daño moderado	100% Daño completo
Vivienda sobre pirca baja 0.75–1.25 m.	52% Daño extensivo	100% Daño completo	20% Daño moderado	40% Daño moderado

Así mismo, en el mismo año, el Ing. Elliot Quispe, realizó una caracterización de la técnica de construcción y diseño de los muros de contención en las laderas del distrito de Carabayllo. De esta investigación, concluye que las pircas son estructuras sostenibles, sustentables, económicas y fáciles de construir. Se resalta que el buen uso de los muros de pircas está ligado a la experiencia de los maestros pirqueros, mientras su fracaso es debido a su uso indiscriminado y son un control adecuado. En la Figura N°2.4, se puede apreciar un ejemplo de muro de pirca tomado en campo por el especialista. [34].



Figura N°2. 4 Pirca elaborada en Perú usando bloques de dimensiones variadas [Fotografía: Quispe, 2019]

Seguidamente, en el año 2021, el Ing. Vladimir Ramos Clemente realizó la evaluación del riesgo sísmico de viviendas sobre pircas en un asentamiento humano en el distrito de Villa María del Triunfo. De esta investigación, se concluyó que la zona de análisis es muy propensa a sufrir daños considerables de darse el escenario de un sismo de magnitud moderada. Así mismo, se reportó la poca importancia que se le da a la técnica y uso de los materiales al momento de la construcción de los muros, la falta de una actualización en la normativa peruana que involucre a la amplificación debido a la topografía que se presenta

en la zona y la alta fragilidad de los muros de pirca. En la Tabla N°2.2 se observan los resultados de la investigación [36].

Tabla N° 2. 2 Incremento de la PAE para viviendas sobre pircas (Tabla: Ramos, 2021)

Sistema Estructural	Vivienda sin pirca PAE (%)	Incremento de la PAE (%)	
		Vivienda sobre Pirca H=1m PAE = 10.8%	Vivienda sobre Pirca H=1.5m PAE = 14.7%
Madera	1.2%	840%	1180%
Mampostería Simple	2.7%	306%	453%
No Tecnificado	6.3%	71%	132%

PAE: Pérdida Anual Esperada

2.2. Evaluación experimental de las pircas

En el año 2017, los Ingenieros Andrés Ballón y José Echenique, realizaron un análisis de estabilidad de muros de contención de acuerdo a las zonas sísmicas del Perú. De este estudio, se evidencia que el método de Mononobe Okabe es el más conversador en comparación con otros, sin embargo, su uso se limita por condiciones del ángulo del talud. En la Figura N°2.5 de observa la propuesta de dimensiones según los análisis de la estructura [42]:

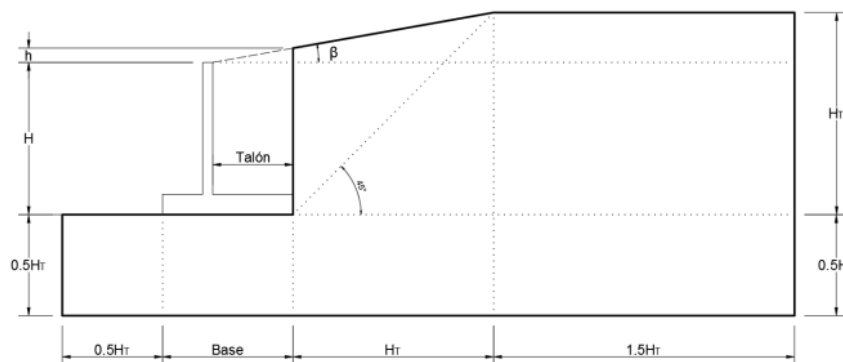


Figura N°2. 5 Propuesta de dimensiones de base del muro [Figura: Ballón / Echenique, 2017]

De igual manera, también en el año 2019, el Ing. Gram Rivas, desarrolló un equipo de ensayos de pircas ante cargas laterales estáticas. En este trabajo se construyeron 2 mesas inclinables, una para ensayos monotónicos y otra para ensayos cíclicos. De esta investigación, se espera realizar ensayos experimentales para poder comparar los resultados con los obtenidos en la realidad. En la figura N°2.6 se puede observar el esquema de la mesa inclinable [41]:

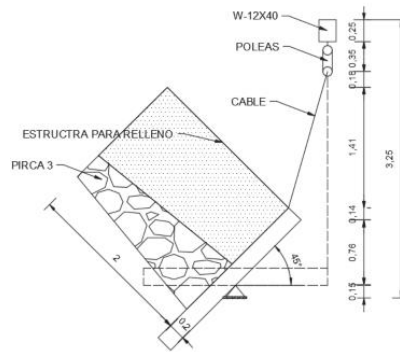


Figura N°2. 6 Esquema de mesa inclinable [Figura: Rivas, 2019]

En el año 2020, el Ing. Julio César Alcántara Cornejo, realizó una evaluación experimental del desempeño de muros de contención de piedra de junta seca usando especímenes a escala reducida. De esta investigación, se concluyó que es posible evaluar experimentalmente el comportamiento de los muros de piedra de junta seca cuando se presentan cargas laterales estáticas perpendiculares a su plano, esto siempre que las magnitudes se controlen por los factores de escala adecuados. En la figura N°2.7, se puede observar los tipos de muros analizados durante la investigación [35].

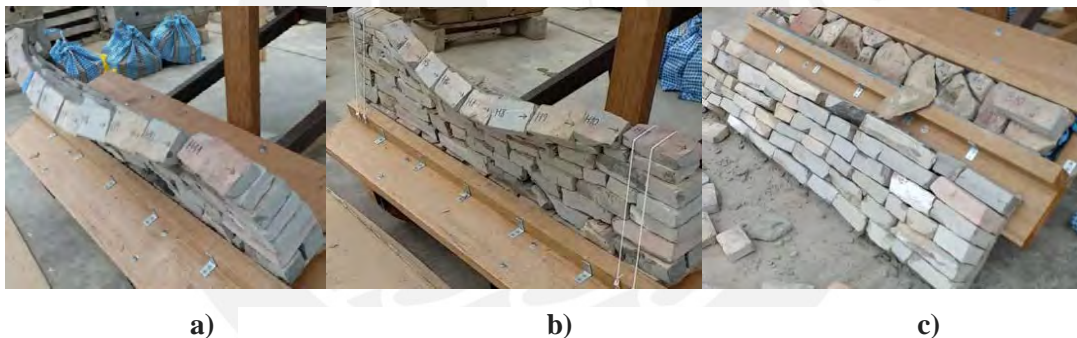


Figura N°2. 7 Muros a escala evaluados a) Bloques irregulares sin arriostres b) Bloques irregulares con arriostres c) Bloques irregulares con tarrajeo [Fotografías: Alcántara, 2020]

2.3. La piedra como sistema constructivo en Perú

En el año 2013, el Ing. Héctor Bardales, desarrolló un estudio para conservar los puentes de piedra en el Perú haciendo uso de criterios para su posible intervención estructural. En este caso, el puente Trujillo, el cual fue la estructura de estudio, fue modelada y analizada, brindando información de que ante la sobrecarga vehicular según la normativa ASSHTO (HL-93) estaba comprometiendo su estabilidad. De esto, también se tomó en cuenta las características de la piedra y sus límites ante

cargas. Se concluye que no solo el puente Trujillo necesita intervención o restauración, sino también muchos puentes del país. En la figura N°2.8, se puede apreciar la estructura evaluada durante la investigación [43].



Figura N°2. 8 *Puente Trujillo* [Fotografía: Bardales, 2013]

En el año 2014, el Arq. Walter Antonio, desarrolló un estudio para hacer posible el uso de la piedra de Miraflores como sistema constructivo en el proyecto hospedaje turístico del distrito de Miraflores – Yauyos – Lima. De este se rescata el uso de la piedra como material de construcción y la preservación cultural y ancestral de carácter turístico de la zona en mención [39].

Posteriormente, en el año 2021, los ingenieros Alex Herrera y Rodrigo Silva, desarrollaron un análisis técnico-económico entre un muro de gaviones y un muro de suelo reforzado como solución de estabilidad de taludes en la carretera Choropampa – Cospan (Cajamarca). Del estudio, se obtuvo que el muro de suelo reforzado era menos económico que el muro de gaviones manteniendo en ambos casos el mismo nivel de seguridad [40].

2.4. Investigaciones haciendo uso de los elementos Discretos en Perú

En el año 2019, la Ing. Criss Zanelli, previamente mencionada, hizo uso de los elementos discretos para evaluar la vulnerabilidad sísmica de pircas en el distrito de Carabayllo. En la figura N° 2.9, se observa el análisis por el método de los elementos discretos que se realizó a las pircas [3].

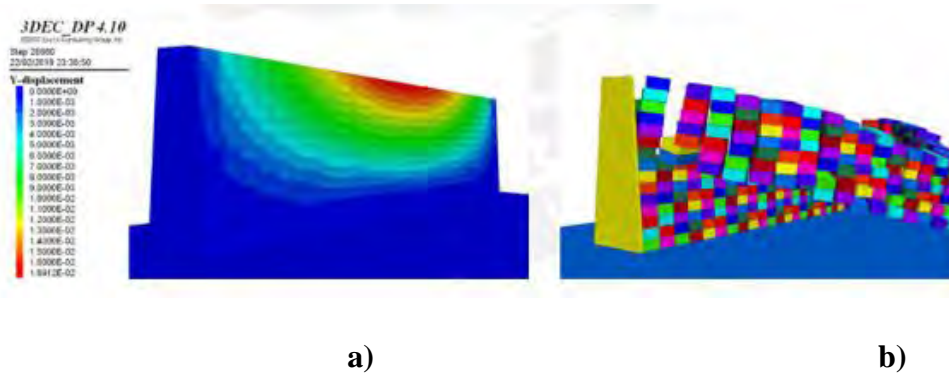


Figura N°2. 9 *Evaluación haciendo uso de los Elementos Discretos [Figura: Zanelli, 2019]*

En el año 2020, el Ing. Diego Aliaga, desarrolló un análisis de estabilidad estática de un talud crítico en el distrito de Magdalena por el método de los elementos discretos (DEM). De esta investigación, se resalta la complejidad en relación con el tiempo que puede llegar a tener un modelo si no se evalúa un equilibrio con la información procesada, de modo que no afecte los resultados definitivos. Se utilizaron los softwares GeoSlope y Yade y se buscó presentar resultados muy similares a los que ocurrirían en la realidad. En la Figura N°2.10, se puede apreciar el análisis del muro haciendo uso de los Elementos Discretos [44].

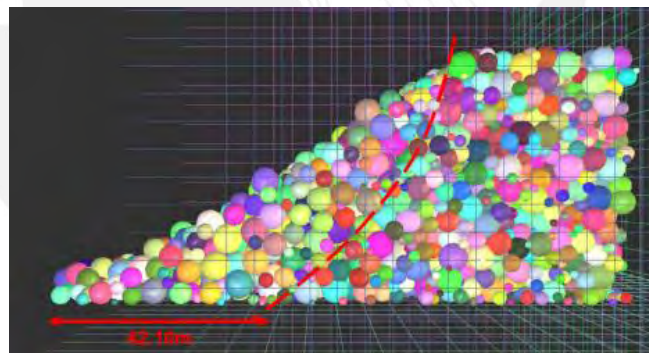


Figura N°2. 10 *Evaluación haciendo uso de los Elementos Discretos [Figura: Aliaga, 2020]*

2.5. Investigaciones haciendo uso de los elementos Finitos en Perú

En el año 2008, el ing. Pablo Urrutia, desarrolló un análisis de Estabilidad por Elementos Finitos de los Taludes de la Costa Verde en el Distrito de Miraflores. De los resultados se concluyó que los resultados del análisis de un modelo numérico no se deben tomar como irrefutables, sino que se les debe utilizar para obtener un entendimiento general del comportamiento de la estructura analizada. En la Figura N°2.11, se observa la superficie de falla según los resultados obtenidos de la investigación [47]:

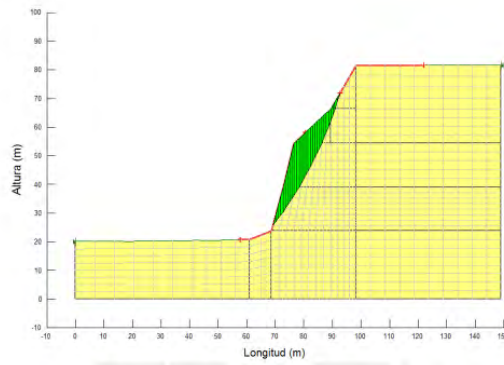


Figura N°2. 11 Superficie de falla - FEM [Figura: Urrutia, 2008]

En el año 2014, el Ing. Jonathan Silva, realizó un estudio mediante elementos finitos (FEM) de la interacción suelo-tubería en tuberías enterradas debido a una falla del suelo de tipo lateral. De este modelamiento, se obtuvieron tensiones y elongaciones a lo largo de un tramo de tubería enterrada por causas de deslizamiento de suelo. Se concluye que el método de los elementos finitos puede ser utilizados para analizar solo los tramos críticos de la tubería, haciendo de este modo el procesamiento mucho más sencillo y de menor tiempo. En la figura N°2.12, se puede observar un esquema de la zona crítica evaluada [45]:

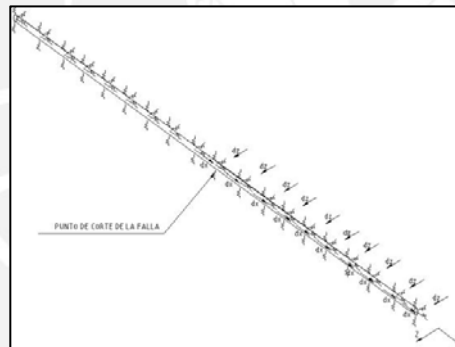


Figura N°2. 12 Esquema de la zona crítica evaluada [Figura: Silva, 2014]

Ese mismo año, el Ing. Fernando Enciso, desarrolló un procedimiento para el análisis dinámico de estructuras usando el método de los elementos finitos (FEM). Este trabajo tenía por finalidad ser una guía para evaluar la respuesta de estructuras elásticas lineales sometidas a cargas variables en el tiempo. En la Figura N°2.13, se observa el modelamiento de un cuerpo utilizado para la evaluación del análisis dinámico deseado [46]:

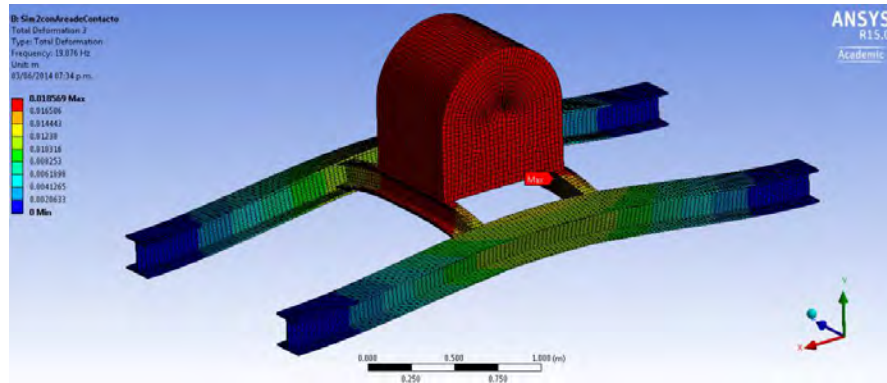


Figura N°2. 13 *Análisis dinámico - FEM [Figura: Enciso, 2014]*

Seguidamente, en el año 2019, los Ingenieros Jorge Xamir y Kurt Soncco realizaron un modelamiento no lineal Geométrico de vigas utilizando la teoría mejorada del primer orden mediante el método de los elementos finitos. De este se pudo demostrar que es posible obtener resultados convergentes y correctos ante diferentes tipos de cargas sobre el elemento de análisis. En la Figura N°2.14 se puede observar la respuesta obtenida del análisis [48]:

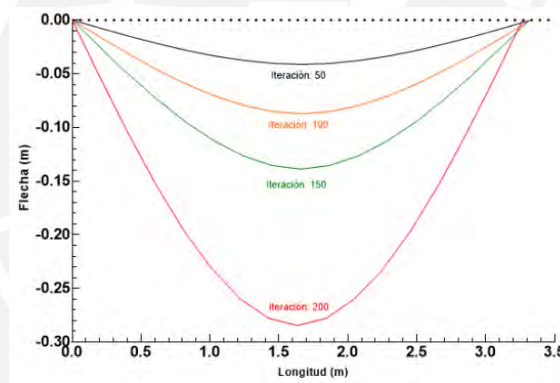


Figura N°2. 14 *Respuesta no lineal en Viga (Figura: Xamir / Soncco, 2019)*

CAPÍTULO 3: DEFINICIONES

A continuación, se mencionan las cargas principales que podrían actuar sobre el muro analizado en esta investigación:

3.1. Peso propio

Esta carga proviene únicamente de la estructura, es decir depende únicamente de su densidad y de su geometría. Cabe resaltar que la distribución en cómo se arme el muro influirá en la posición de acción de su peso, lo cual influirá en su momento estabilizador o de equilibrio.

3.2. Rigidez de Contacto

La rigidez de Contacto es la relación que existe entre la fuerza de contacto y el desplazamiento relativo de un cuerpo. Así mismo está definida por la rugosidad de las superficies en contacto y por ende, se encuentra relacionado con el coeficiente de fricción [50].

3.3. Coefficiente de fricción

La fricción tiene por definición ser la resistencia que presenta un cuerpo al movimiento respecto a otro cuando se encuentran en contacto. Generalmente se usan los términos de fricción, coeficiente de fricción o fuerza de fricción para definir este fenómeno, sin embargo, fricción está vinculado a fenómeno, la fuerza al resultado que se produce y el coeficiente al comportamiento de dicho fenómeno [49].

3.4. Muros de Contención con Junta Seca (DSRW, por sus siglas en inglés)

En muchos lugares del mundo, la construcción con piedra representa el paisaje principal de un área determinada [30]. Inclusive, en los últimos años, las estructuras de piedra con junta seca han recibido gran atención en relación a la preservación de patrimonios culturales y dentro del marco del desarrollo sostenible.

Entre las construcciones con piedra más importantes en diferentes países, se presentan castillos (a), iglesias (b), muros de contención para carreteras (c), entre otros. Un ejemplo de este tipo de construcción se aprecia en las Fotografías N°3.1, 3.2, 3.3 y 3.4.



Figura N°3. 1 Castillo de Arévalo Date (a) [Fotografía: casalarealarevalo, por LaReal, 2019, <https://casalareal.com/castillo-de-arevalo>]



Figura N°3. 2 Iglesia de San Rafael de Mucuchies [Fotografía: Venezuelatuya, por Rafaela Acosta, 2010, <https://www.venelogia.com/archivos/4423/>]



Figura N°3. 3 Muro de contención de Piedra [Fotografía: Sumelzo, por Sumelzo, 2005, <https://sumelzo.com/obra-73-muro-de-contencion-colocado-en-poligono-ptr>]



Figura N°3. 4 Muro de contención de Piedra II ([Fotografía: construccionesrnc, por construccionesrnc, <https://construccionesrnc.com/muro-de-contencion-de-piedra-en-seco/>]

Entre las estructuras de piedra más relevantes y utilizadas por el hombre se encuentran los muros de contención, cuya finalidad es el de soportar los empujes de algún material [31]. Estas estructuras son usadas por ejemplo como estribos en puentes, en edificios con sótanos o para soportar los empujes de agua en un tanque. En relación con los muros de contención

de piedra, se han utilizado para la construcción, en su momento, de los muros incas. Esto se puede observar en la Figura N°3.5:



Figura N°3. 5 Piedra de los 12 ángulos [Fotografía: wamanadventures, <https://www.wamanadventures.com/blog/piedra-de-12-angulos-2/>]

3.5. Historia de los muros de contención de Junta Seca

Los DSRW datan de la época neolítica, cuando el hombre tenía la necesidad de protegerse del clima. Así mismo, se tiene registros de estas estructuras con propósitos en el área de agricultura. Incluso se podría decir que una de las primeras civilizaciones en aplicar este tipo de estructuras con finalidad sísmica son los incas, los cuales mantenían sus DSRW en pie incluso después de 600 años. En el ciclo XX, con el uso del concreto y aparición de nuevos materiales, el uso de los DSRW se redujo considerablemente. Sin embargo, en la actualidad se ha generado interés por este tipo de estructuras, por la finalidad de conservar estructuras antiguas, por su bajo impacto en el ambiente y su mejor integración con el entorno [23].

La primera investigación relacionada con los DSRW se desarrolló en 1834 por John Burgoyne, la cual estudio la importancia de la geometría de los muros, concluyendo de este estudio que este tipo de estructuras obtienen su estabilidad de su peso propio y la fricción entre bloques [19]. Posteriormente, Cooper [20], para este tipo de estructuras, identifico 3 tipos de fallas en un plano con pendiente: Volcamiento, deslizamiento y abultamiento. Las dos primeras fallas se relacionan a una falla de deformación plana, mientras la tercera se vincula a una falla tridimensional.

En el año 2014, se realizó una investigación a los muros de piedra con la finalidad de evaluar su capacidad en el plano ante carga sísmica. Para este tipo de modelación, se utilizó la teoría de elementos finitos y elementos discretos. De este estudio, se resaltó que el tipo de falla que presente el muro está vinculado con su geometría y que las masas concentradas encima de estas estructuras no influyen en su mecanismo de falla [24].

CAPÍTULO 4: MODELACIÓN NUMÉRICA

4.1. Conceptos Importantes

Las verificaciones necesarias que se deben analizar en un muro son los siguientes:

Volteo: Para este tipo de falla del muro, se verifica que el muro no gire respecto a un eje perpendicular a su plano. Son dos los tipos de cargas los que estarán presentes en este análisis: Fuerzas de volteo, las cuales son aquellas que ocasionan el volteo inminente en la estructura, y las fuerzas resistentes, las cuales tienen por función contrarrestar el efecto de volteo de la estructura [12]. El esquema correspondiente se aprecia en la Figura N°4.1:

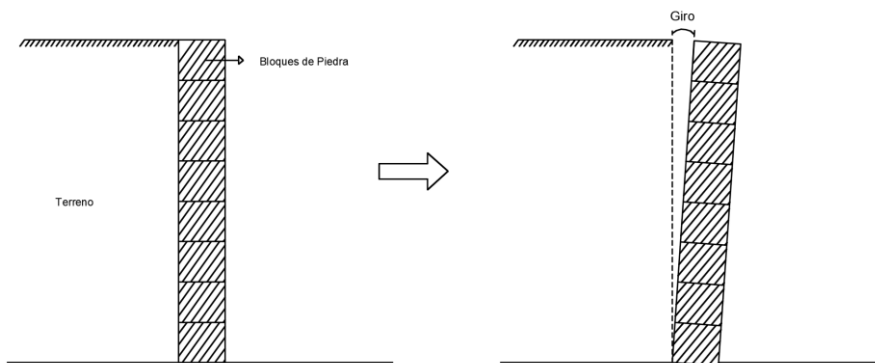


Figura N°4. 1 Volteo del Muro

Deslizamiento: Para este tipo de análisis, se verifica que el muro no presente un desplazamiento desde su ubicación original. Para este caso, la fuerza de importancia para que la estructura no deslice es la fuerza de fricción que se origina entre la superficie de los bloques de piedra y la de la superficie del suelo con la estructura. Esta última está fuertemente influenciada con el peso total de la estructura y de darse el caso, también del relleno que se ubica por encima del mismo [12]. El esquema correspondiente se aprecia en la figura N°4.2:

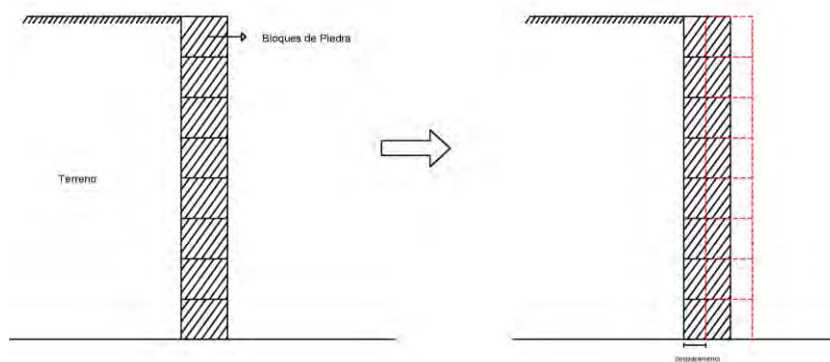


Figura N°4. 2 Deslizamiento de Muro

Capacidad admisible: Para este tipo de análisis, se verifica que el muro no presente en asentamiento en el terreno donde se apoye. Este tipo de falla se vincula a un suelo con mala

calidad y que presente poca capacidad admisible [12]. El esquema de cargas se aprecia en la Figura 4.3.:

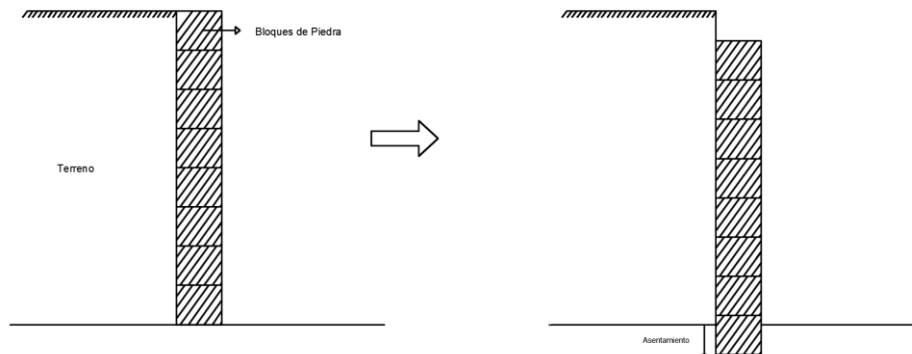


Figura N°4. 3 Aplastamiento

4.2. Fuerza Inercial sísmica de muros

Durante el diseño y análisis de un muro de contención, se debe definir el tipo de falla de la estructura para de este modo, interpretar su posible comportamiento ante una sollicitación. Un diseño adecuado debe cumplir con las leyes de equilibrio sin producir algún esfuerzo cortante indeseable que supere la resistencia al corte de la estructura, sin embargo, durante un sismo, las llamadas fuerzas inerciales, podrían generar un desequilibrio en la estructura y causar deformaciones permanentes en el muro [13].

Es importante saber que, actualmente, existen varios métodos dinámicos de evaluación de estabilidad de estructuras de tierra (depósitos de desechos, taludes, entre otros). Todos los métodos tienen como función brindar la distribución de tensiones y deformaciones de una estructura cuando esta se encuentre bajo la acción de ciertas sollicitaciones (entre estas, la carga sísmica). Entre las técnicas más avanzadas, el Método de Equilibrio Límite (MEL). Este método, representa la carga sísmica como una fuerza estática igual a un porcentaje de la masa involucrada (coeficiente sísmico) [14]. Cabe resaltar, que el coeficiente de aceleración sísmica varía de acuerdo al lugar y la normativa aplicativa de la zona. Por ejemplo, en Perú, el coeficiente de aceleración sísmica, también conocida como Factor de amplificación sísmica, está en base a los periodos de la estructura y son 3 los casos para su uso [15]:

$$T < T_p \quad (C = 2.50) \quad \text{Ecuación N° 2. 1}$$

$$T_p < T < T_L \quad (C = 2.50 \times T_p / T) \quad \text{Ecuación N° 2. 2}$$

$$T > T_L \quad (C = 2.5 \times (T_p \times T_L / T^2)) \quad \text{Ecuación N° 2. 3}$$

Donde:

Tp: Periodo que define la plataforma del factor C.

TL: Periodo que define el inicio de la zona del factor C con desplazamiento constante.

T: Periodo fundamental de la estructura.

Por otro lado, Kraner define los efectos del sismo mediante aceleraciones verticales y horizontales [16], mientras Saragoni [17], se basó en los estudios de Noda y Uwave [18] para establecer los valores de coeficiente sísmico.

4.3. Teoría de los Elementos Finitos

El comportamiento complejo de los diversos elementos que rodean al hombre no puede ser captado en una sola operación general [26]. De este modo, las diferentes ciencias proceden a separar un sistema conocido en varias partes, cuyo comportamiento pueda ser identificado sin dificultad, para luego reconstruir el sistema original y estudiarlo a partir de sus componentes. En varios casos, un número finitos de partes correctamente definidas puede representar un modelo correcto. Estos tipos de trabajos son denominados discretos.

Por un lado, los matemáticos trabajaron más dentro del área de las ecuaciones diferenciales, mientras los ingenieros crean una analogía entre los elementos discretos reales y porciones finitas de un dominio continuo. Por ejemplo, en la década de 1940 en el campo de la mecánica de sólidos, Mc Henry, Hrenikoff y Newmark utilizaron por primera vez una red de elementos de línea para el desarrollo y obtención de tensiones en sólidos continuos [27]. Más adelante, en la misma área de la mecánica de sólidos, Argyris, Turner y otros supusieron que las pequeñas porciones de un sistema o cuerpo se comporten de una forma simplificada, demostrando así que se pueden sustituir las propiedades del continuo de un modo más directo [26]. No fue hasta 1956, que Turner, Clough, Martin y Topp, presentan el método computarizado de los elementos finitos, el cual podía resolver con gran exactitud y aproximación las diferentes ecuaciones utilizadas para predecir el comportamiento de un cuerpo [28].

Las fuerzas de empuje del terreno sobre los muros de piedra serán analizadas bajo los criterios de la teoría de los elementos finitos (FEM). Esta última, en términos técnicos y recientes, se basa en la división de un cuerpo o elemento en partes mucho más pequeñas conectadas entre sí por medio de los llamados puntos nodales, de modo que podamos pasar ese sistema de infinitos grados de libertad a un número finito, y estas a su vez estas puedan relacionarse con ecuaciones diferenciales y representar el comportamiento real del elemento analizado [22]. Así mismo, este método tendrá la finalidad de resolver estas ecuaciones con el objetivo de poder encontrar resultados aproximados mas no exactos. Actualmente, existen varios

programas que se encargan de realizar esta división del elemento (también conocido como mallado) y resolver las ecuaciones relacionadas de modo que se encuentran respuestas ante diferentes solicitaciones. Uno de estos programas de modelación es el Abaqus, el cual se usará para la representación de los muros tipo pirca de esta investigación. El área de trabajo del software a usar se aprecia en la Figura N°4.4:

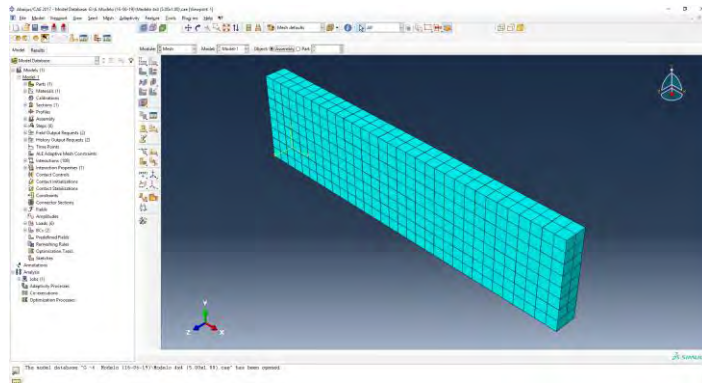


Figura N°4. 4 Software Abaqus

4.4. Tipos de modelado

Al momento de representar un objeto de forma teórica, es necesario entender e inducir su comportamiento ante alguna solicitación interna o externa. Dentro de esta representación, se encuentra la correcta forma de modelar el cuerpo y sus factores externos. Existen 3 tipos de modelamiento, los cuales conllevan a resultados muy similares entre sí pero que a su vez presentan diferentes consideraciones.

Micromodelamiento

En este tipo de modelamiento se toma en cuenta cada una de las partes de la estructura, cada una con sus propiedades geométricas, del material y de borde. La característica principal de este tipo de modelamiento es el alto nivel de tiempo invertido ya que este modelo es mucho más detallado. Así mismo, podríamos confirmar que los resultados obtenidos son mucho más precisos comparándolo con los otros dos métodos. Este método toma relevancia si se analiza un cuerpo el cual presenta varios materiales para un mismo análisis [5]. La representación de la Micromodelación se aprecia en la Figura N°4.5:

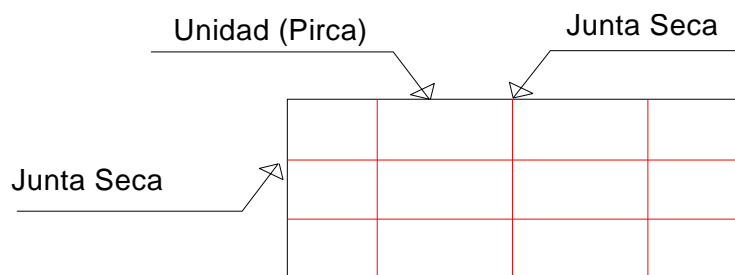


Figura N°4. 5 Representación de la Micromodelación [5]

Mesomodelamiento (Modelación simplificada)

En este tipo de modelamiento, al igual que en el Micromodelamiento, se toman en cuenta las propiedades de todos los elementos que componen el cuerpo, sin embargo, las zonas de interacción entre los elementos se consideran con una interface, la cual presenta propiedades de contacto.

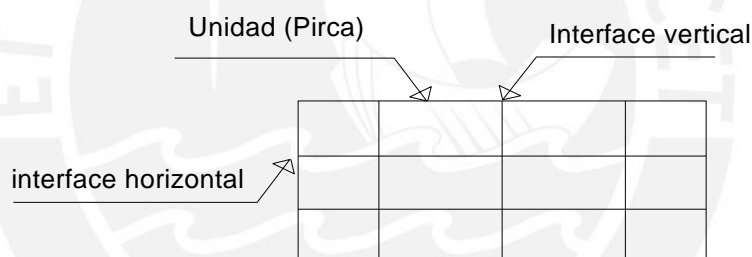


Figura N°4. 6 Representación de la Mesomodelación [5]

Macromodelamiento

En este tipo de modelamiento, se toman en cuenta las propiedades de los elementos como uno solo, de este modo, los elementos a analizar se reducen considerablemente. Así mismo, no se realiza con profundidad el detalle de la interacción entre las unidades de la estructura. Se resalta que este tipo de modelamiento, en comparación con los 2 anteriores, es el que menos tiempo se invierte y muchas veces los resultados son muy aproximados al de un Micromodelamiento. Es importante resaltar que, para este caso, hay que tener bastante cuidado con las propiedades de los elementos, porque las leyes constitutivas de los elementos podrán variar considerablemente si se requiere que los análisis sean precisos y cercanos a la realidad [5]. La representación de la Macromodelación se aprecia en la Figura N°4.7:

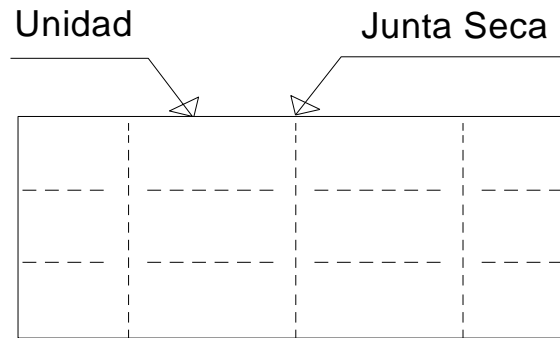


Figura N°4. 7 Representación de la Macromodelación [5]

Mientras más detallado es un modelo en un programa de software, el tiempo de inversión en el procesamiento es mayor. El factor del tiempo también involucra el desenvolvimiento del operador con el programa y el tipo de computadora donde se desarrollen las evaluaciones [31].



CAPÍTULO 5: ENSAYO ESTÁTICO

5.1. Descripción e Instrumentos utilizados

El miércoles 15 de enero del año 2020, se realizó un ensayo estático a escala real de un muro tipo pirca sobre un equipo de mesa inclinable. Este ensayo tuvo lugar en el laboratorio de estructuras de la Universidad San Ignacio de Loyola (USIL). El muro presentaba una altura de 1.00 m de alto, 0.50 m de espesor y 4.00 m de largo, mientras la plataforma metálica presentaba 4.00m de largo, 1.50m de profundidad y 2.00 de altura, como se puede apreciar en la Figura N° 5.1:



Figura N°5. 1 Ensayo de Muro de Pirca

El experimento contó con la ayuda de un sistema metálico que genera un giro en la plataforma de apoyo, con la intención de conocer el ángulo de inclinación de la falla del muro. Este ángulo es posible calibrar de forma manual o automática. El computador, el cual permitía el ingreso del ángulo de inclinación, se muestra en la Figura N° 5.2:



Figura N°5. 2 Computador de Ensayo

De forma gradual, se iba incrementando el ángulo de inclinación del sistema hasta encontrar la falla. El ángulo máximo de rotación de la plataforma es de 45° y la velocidad de inclinación está en el rango de 3° a 5°/seg. Así mismo, el peso máximo permitido es de 30 Tnf (294.2 KN).

5.2. Equipos utilizados y Mano de obra

A continuación, se procede a mencionar los equipos utilizados para la construcción del muro de pirca:

- Comba
- Cíncel
- Escalera de tijera bilateral metálica
- Wincha
- Equipos de Protección Personal (Lentes de seguridad, guantes, botas de seguridad y chalecos).

Los equipos de protección personal mencionados previamente están basados en la norma G.050 – Seguridad durante la construcción.

Se resalta que el muro de pirca fue realizado por maestros de obra, los cuales en su momento nos brindaron su experiencia. En esta mencionan que la técnica utilizada para la construcción del muro de pircas fue aprendida, asimilada y desarrollada de manera empírica mediante la experiencia de construcción de una gran cantidad de muros de pirca [33].

Así mismo, se resalta que los trabajos en el laboratorio fueron desarrollados principalmente por 1 operario y 1 ayudante (1 cuadrilla de trabajo).

Zona de trabajo

Como se muestra en la Figura N° 5.3, el material de piedras se encontraba cerca de la plataforma inclinable utilizada para el ensayo correspondiente.



Figura N°5. 3 Mesa inclinable y material para el muro (piedra) [Fotografía: Ramos / Terbullino, 2020]

Materiales

A continuación, se menciona algunas consideraciones relacionadas con la habilitación de los materiales:

- Los materiales utilizados para el ensayo, en su mayoría rocas, fueron obtenidas de las canteras de rocas Andesitas ubicadas en el Distrito Villa María del Triunfo.
- El material utilizado fue habilitado por los maestros pirqueros, con la finalidad de que puedan escoger el tipo y el tamaño de las piedras en base a su experiencia en el área.
- Así mismo, se resalta que, para los trabajos de habilitación, los maestros pirqueros recibieron apoyo de familiares y/o amigos. Esto es muy común en la construcción de este tipo de estructuras en la zona de análisis. Esto se puede apreciar en la Figura N° 5.4.



Figura N°5. 4 Habilidad del Material [Fotografía: Ramos / Párraga, 2020]

- El transporte del material hasta la zona del ensayo fue realizado por los maestros de la zona, como se puede observar en la Figura N°5.5.



Figura N°5. 5 Transporte del Material [Fotografía: Ramos, Párraga, 2020]

- El material se descargó directamente en la zona del ensayo como se observa en la Figura N° 5.6 (a). En la fotografía N° 5.6 (b) se puede observar la distribución de las pircas post-descarga.



(a)

(b)

Figura N°5. 6 (a) Descarga del Material (b) Distribución del material [Fotografías: Ramos / Párraga, 2020]

Medidas y limitaciones del Muro de pirca

Del mismo modo, se detallan algunas medidas y límites importantes para el armado del muro de pircas a ensayar. Considerando un ancho de 0.50m, se limitó esta medida gracias a una línea trazada como se muestra en la Figura N°5.7:

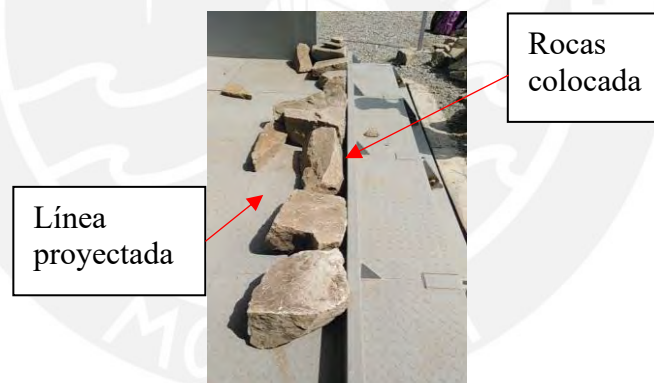


Figura N°5. 7 (a) Límite de la base [Fotografías: Ramos / Párraga, 2020]

Se resalta que el ancho de apoyo que presentaba la plataforma para colocar el muro era de 1.00m y la distancia del muro al eje inclinable era de 0.20m.

Posteriormente, se procedió a colocar las demás piedras verificando a cada momento el ancho del muro en toda su altura (ancho constante de 0.50m), esto se puede observar en la Figura N° 5.8:



Figura N°5. 8 (a) Verificación del ancho del muro [Fotografías: Ramos / Párraga, 2020]

Las piedras de la base suelen ser de mayor dimensión en comparación con las de la parte superior, así mismo, suelen ser las más complicadas en colocar, ya que las demás se colocan en base a estas. La base del muro se puede apreciar en las fotografías N°5.9 y 5.10:



Figura N°5. 9 (a) Base del muro [Fotografías: Ramos / Párraga, 2020]



Figura N°5. 10 (a) Vista lateral del muro [Fotografías: Ramos / Párraga, 2020]

Entre las piedras de gran tamaño se generaban vacíos, unos más grandes que otros, para evitar esto, se rellenaba con piedras de menor tamaño, de modo que se ocupe la

mayor cantidad de volumen en el espacio a trabajar. Lo mencionado previamente se observa en la Figura N° 5.11:



Figura N°5. 11 (a) Construcción del muro [Fotografías: Ramos / Párraga, 2020]

Detalles de la construcción

Al finalizar la construcción de la primera hilada del muro, se procede a construir las partes superiores de manera progresiva, hilada por hilada. La construcción de la primera y segunda hilada se ve en la Figura N°5.12:



Figura N°5. 12 Detalles del muro [Fotografías: Ramos / Párraga, 2020]

En las siguientes fotografías se observa un avance intermedio del muro de pirca:



Figura N°5. 13 Avance intermedio en la construcción del muro I [Fotografías: Ramos / Párraga, 2020]



Figura N°5. 14 Avance intermedio en la construcción del muro II [Fotografías: Ramos / Párraga, 2020]

Se resalta que algunas piedras fueron modificadas antes de ser colocadas ya sea para reducir su tamaño u otorgar algunos detalles respecto a su espesor o angulosidad. Lo mencionado se puede observar en la Figura N° 5.15:



Figura N°5. 15 Modificación de piedras [Fotografías: Ramos / Párraga, 2020]

A continuación, en la Figura N° 5.16, se muestra el resultado final del muro:



Figura N°5. 16 Muro finalizado [Fotografías: Ramos / Párraga, 2020]





A continuación, se muestra el rendimiento obtenido durante la construcción del muro de pirca:


Tabla N°5. 1 Rendimiento (Cuadro: Ramos / Párraga, 2020)




Altura de Muro (m)	Tiempo de ejecución (días)	Rendimiento (metro lineal/día)
1.00	1.50	2.70

5.3. Ensayos Desarrollados

En total, se desarrollaron 8 ensayos, los cuales buscaban encontrar la primera falla del muro (local) y su falla total.

Caso	Fotografía
<p><u>Ángulo de 5.0°</u></p> <p>Para esta primera prueba, se generó un ángulo de inclinación de 5° en el sistema. Para esta primera posición, no se observaron deslizamientos ni fallas aparentes.</p>	 <p data-bbox="932 689 1295 730">Figura N°5. 17 Ángulo 5.0°</p>
<p><u>Ángulo de 10.0°</u></p> <p>Para esta segunda prueba, se generó un ángulo de inclinación de 10° en el sistema. Para esta segunda posición, tampoco se observaron deslizamientos ni fallas aparentes.</p>	 <p data-bbox="932 1025 1295 1066">Figura N°5. 18 Ángulo 10.0°</p>
<p><u>Ángulo de 15.0°</u></p> <p>Para esta tercera prueba, se generó un ángulo de inclinación de 15° en el sistema. Para esta tercera posición, tampoco se observaron deslizamientos ni fallas aparentes.</p>	 <p data-bbox="932 1373 1295 1413">Figura N°5. 19 Ángulo 15.0°</p>
<p><u>Ángulo de 16.6°</u></p> <p>Para esta cuarta prueba, se empezó a aumentar el Angulo de inclinación, partiendo de los 15°, hasta encontrar la primera falla del muro. El ángulo de falla encontrado fue de 16.6° y fue una falla local ya que se concentró en la parte central del muro.</p>	 <p data-bbox="932 1675 1295 1715">Figura N°5. 20 Ángulo 16.6°</p>

<p><u>Ángulo de 20.0°</u></p> <p>Para la inclinación de 20° se produjeron desplazamientos pequeños de las piedras sueltas, mas no se produjo la falla total del muro.</p>	 <p>Figura N°5. 21 Ángulo 20.0°</p>
---	---

Caso	Fotografía
<p><u>Ángulo de 25.0°</u></p> <p>Para la inclinación de 25° se produjeron desplazamientos pequeños de las piedras sueltas, mas no se produjo la falla total del muro. Mismo caso al de la inclinación de 20°.</p>	 <p>Figura N°5. 22 Ángulo 25.0°</p>
<p><u>Ángulo de 30.0°</u></p> <p>Para la inclinación de 30° se produjeron desplazamientos pequeños de las piedras sueltas, mas no se produjo la falla total del muro. Mismo caso al de la inclinación de 20° y 25°.</p>	 <p>Figura N°5. 23 Ángulo 30.0°</p>
<p><u>Ángulo de 40.0°</u></p> <p>Para la inclinación de 40° se produjo la falla total del muro. Se deslizaron las piedras en los extremos y en general hubo interacción directa entre muchas de estas.</p>	 <p>Figura N°5. 24 Ángulo 40.0°</p>

Características de la plataforma

A continuación, se detallan algunas características importantes que nos servirán para el modelamiento en Abaqus:

Densidad de la piedra: 2398.37 kg/m³ [3]

Ancho del muro: 0.50 m

5.4. Resultados del ensayo

Para la obtención de resultados, se tomaron en total 11 puntos de control para poder conocer sus diferentes desplazamientos conforme vaya rotando la plataforma metálica.

A continuación, se muestra el esquema de los puntos de control tomados durante el ensayo:

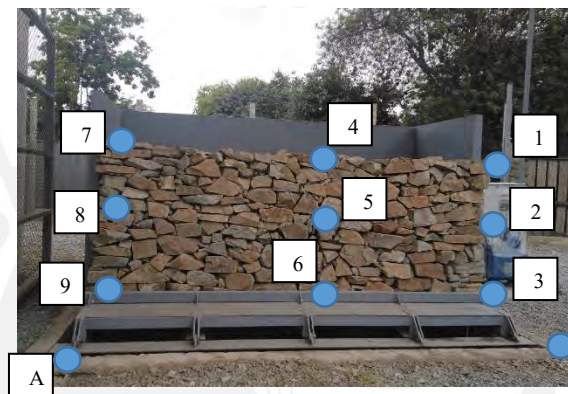


Figura N°5. 25 Esquema de puntos de control del ensayo

De igual modo, se tomó un punto R como punto de referencia para poder conocer los desplazamientos y derivas de los puntos de control. Este punto se ubica en las coordenadas locales (100.00;100.00;100.00).

El área que componen los puntos A, 9, B y 3 pertenece al área superior de la plataforma metálica de rotación, mientras los puntos del 1 al 9 corresponden al área del muro de pirca.

El proceso mediante el cual se realizó las mediciones correspondientes fue gracias a un equipo de estación total, la cual fue calibrada previo a la realización del ensayo, para de este modo poder obtener desplazamientos absolutos y derivas. Lo último mencionado era posible ya que la plataforma de rotación generaba esos desplazamientos.

A continuación, se muestra el esquema de rotación buscado:

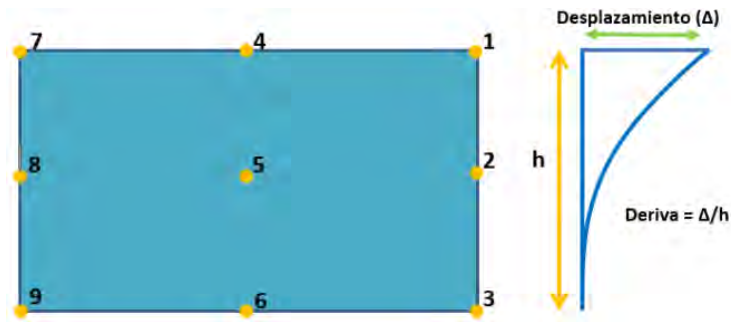


Figura N°5. 26 Esquema de desplazamientos en muro [Imagen: Ramos / Párraga, 2020]

Pasamos a verificar los ángulos de rotación de la plataforma tomando como ejemplo 3 puntos de control. Para este caso, se tomarán los puntos 1, 4 y 7, los cuales corresponden a las pircas de la fila superior del muro. Esto se observa en el Cuadro N°5.2:

Tabla N°5. 2 Ángulos de rotación

Puntos	Ángulos de rotación (°)			
	A	B	C	D
Punto 7	-	6.54	12.29	17.96
Punto 4	-	6.50	12.37	18.30
Punto 1	-	6.88	12.61	18.51

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de este ensayo, donde B (5°), C (10°), D (15°) y E son las diferentes posiciones de los puntos para las diferentes rotaciones que se generan (La numeración sin letra significa la posición inicial):

Tabla N°5. 3 Desplazamiento – Punto 1 (Unid: mm)

Punto 1	X	Y	Z
1	106.407	102.690	101.159
B1	106.309	102.630	101.207
C1	106.221	102.573	101.243
D1	106.126	102.508	101.266

Tabla N°5. 4 Desplazamiento – Punto 2 (Unid: mm)

Punto 2	X	Y	Z
2	106.373	102.688	101.694
B2	106.318	102.653	101.745
C2	106.264	102.619	101.783
D2	106.204	102.578	101.814

Tabla N°5. 5 Desplazamiento – Punto 3 (Unid: mm)

Punto 3	X	Y	Z
3	106.328	102.663	101.217
B3	106.311	102.654	101.263
C3	106.293	102.642	101.304
D3	106.273	102.628	101.344

Tabla N°5. 6 Desplazamiento – Punto 4 (Unid: mm)

Punto 4	X	Y	Z
1	105.405	104.315	101.197
B4	105.311	104.255	101.250
C4	105.219	104.195	101.287
D4	105.118	104.132	101.313

Tabla N°5. 7 Desplazamiento – Punto 5 (Unid: mm)

Punto 5	X	Y	Z
5	105.398	104.300	100.668
B5	105.344	104.267	100.721
C5	105.291	104.233	100.764
D5	105.234	104.197	100.800
E5	105.192	104.165	100.794

Tabla N°5. 8 Desplazamiento – Punto 6 (Unid: mm)

6	105.311	104.263	100.220
B6	105.294	104.252	100.265
C6	105.277	104.240	100.306
D6	105.255	104.227	100.344
E6	105.249	104.223	100.355

Tabla N°5. 9 Desplazamiento – Punto 7 (Unid: mm)

Punto 7	X	Y	Z
7	104.325	106.000	101.188
B7	104.231	105.940	101.239
C7	104.141	105.882	101.276
D7	104.043	105.825	101.302

Tabla N°5. 10 Desplazamiento – Punto 8 (Unid: mm)

Punto 8	X	Y	Z
8	104.345	105.977	100.661
B8	104.291	105.943	100.716
C8	104.239	105.910	100.759
D8	104.181	105.874	100.795

Tabla N°5. 11 Desplazamiento – Punto 9 (Unid: mm)

Punto 9	X	Y	Z
9	104.264	105.924	100.222
B9	104.247	105.913	100.270
C9	104.229	105.900	100.312
D9	104.207	105.887	100.350
E9	104.202	105.884	100.359

Tabla N°5. 12 Desplazamiento – Punto 10 (Unid: mm)

PUNTO	X	Y	Z
C	104.145	105.855	100.199
CB	104.123	105.836	100.233
CC	104.107	105.826	100.261
CD	104.090	105.814	100.287

Tabla N°5. 13 Desplazamiento – Puntos fijos (Unid: mm)

PUNTO	X	Y	Z
R	100.000	100.000	100.000
A	105.932	102.194	99.987
B	103.685	105.824	99.977

Así mismo, se tienen los desplazamientos totales de los puntos de control en base a su posición inicial. Esto se puede apreciar a continuación en la tabla N°5.14:

Tabla N°5. 14 Desplazamientos totales de puntos de control (Unid: mm)

ESTADO	PUNTOS DE CONTROL									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	C
A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B	0.125	0.083	0.050	0.123	0.083	0.049	0.123	0.084	0.052	0.045
C	0.235	0.157	0.096	0.239	0.159	0.095	0.236	0.159	0.100	0.078
D	0.351	0.235	0.143	0.360	0.234	0.141	0.351	0.236	0.145	0.112
E	-	-	-	-	0.277	0.154	-	-	0.156	-

De este modo, se puede calcular las distancias hasta el punto máximo de desplazamiento (Punto R). Esto se puede apreciar en el tabla N°5.15:

Tabla N°5. 15 Desplazamientos totales desde punto R (Unid: mm)

ESTADO	PUNTOS DE CONTROL									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	C
A	7.045	6.951	6.869	7.019	6.934	6.814	7.491	7.419	7.302	7.176
B	6.941	6.893	6.851	6.919	6.876	6.795	7.397	7.365	7.285	7.149
C	6.846	6.834	6.832	6.819	6.819	6.776	7.306	7.313	7.266	7.133
D	6.739	6.767	6.810	6.708	6.756	6.753	7.209	7.254	7.244	7.114
E	-	-	-	-	6.703	6.746	-	-	7.239	-

Como se puede apreciar en el cuadro previo, los resultados de rotación para los diferentes estados son muy cercanos, por lo que podemos concluir que los datos tomados durante el ensayo son confiables.

Así mismo, se muestran los desplazamientos obtenidos para los puntos de análisis de acuerdo con las rotaciones de la plataforma generadas:

Tabla N°5. 16 Desplazamientos y derivas obtenidas (Cuadro: Ramos / Párraga, 2020)

Punto	H (m)	Inclinación en grados					
		5.00°		10.00°		15.00°	
		Δ (mm)	Δ/h %	Δ (mm)	Δ/h %	Δ (mm)	Δ/h %
1-4-7	1.00	7.67	0.77	8.01	0.80	14.02	1.40
2-5-8	0.50	3.16	0.63	2.82	0.56	5.61	1.12
3-6-9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

A continuación, se muestra la curva de desplazamiento máximo del muro comparado con el ángulo de inclinación.

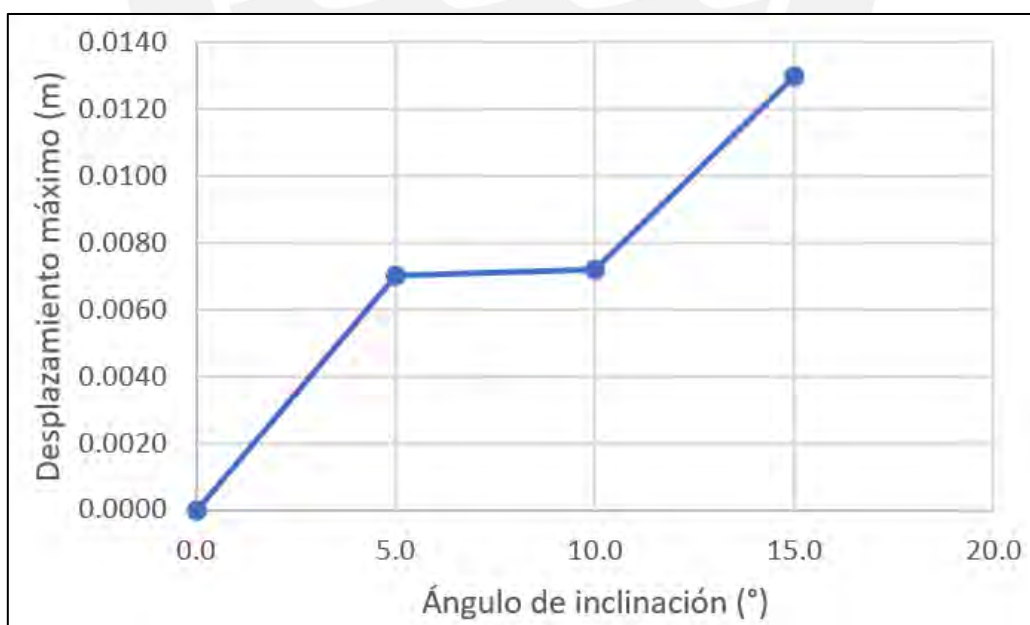


Figura N°5. 27 Desp. Max vs ángulo de inclinación [Imagen: Ramos / Párraga, 2020]

En base a los resultados obtenidos en el ensayo experimental, se realizó un primer modelo en Abaqus con el objetivo de encontrar una primera calibración del modelo.

CAPÍTULO 6: PRIMERA CALIBRACIÓN DE MODELO

Como se mencionó previamente, el programa utilizado para el desarrollo de los modelos será Abaqus. En este capítulo, se desarrollará un modelo ejemplar utilizando datos de investigaciones desarrolladas previamente.

Este modelo consiste en 2 bloques de piedras ubicados verticalmente uno sobre otro. Las dimensiones de estas pircas son de 0.25x0.25x0.25m y están apoyados sobre una plataforma de dimensiones 0.25x0.25x0.10m, la cual a su vez se apoya en un terreno de dimensiones 2.00x2.00m.

A continuación, se mostrará el desarrollo de cada parte del modelo con una breve descripción de estas, esto con la finalidad de conocer las características y condiciones correspondientes.

6.1. Unidades y Materiales

En el software Abaqus, se debe tener mucho cuidado de las unidades utilizadas. Este es un programa adimensional, es decir no cuenta con un sistema de unidades establecido. Por esta razón, se cuenta con cuadro referencial, el cual se muestra en la Tabla N° 6.1, para tener en cuenta el uso correcto de las unidades, los cuales se encuentran en dependencia.

Tabla N°6. 1 Unidades Utilizadas en el Modelo

Quantity	SI	SI (mm)	US Unit (ft)	US Unit (inch)
Length	m	mm	ft	in
Force	N	N	lbf	lbf
Mass	kg	Tonne (10 ³ kg)	slug	Lbf s ² /in
Time	S	S	S	S
Stress	Pa (N/m ²)	MPA (N/mm ²)	Lbf/ft ²	psi (lbf/in ²)
Energy	J	mJ (10 ⁻³ J)	ft lbf	In lbf
Density	kg/m ³	Tonne/mm ³	slug/ft ³	lbf S ² /in ⁴

A continuación, se mencionarán los valores utilizados para representar la densidad de la piedra y algunas propiedades importantes a utilizar en el modelo:

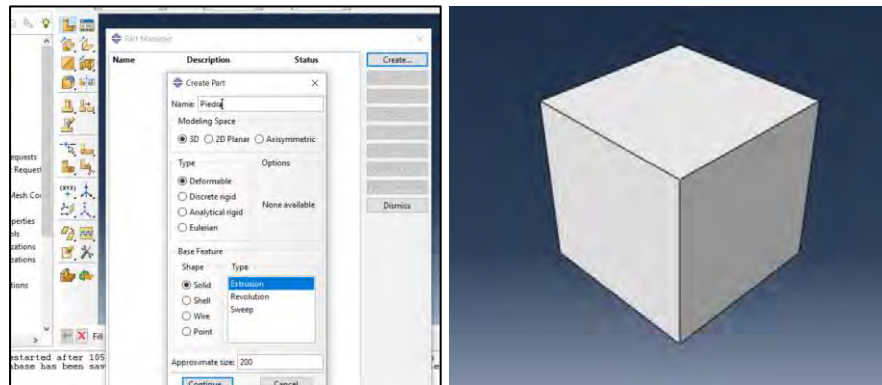
- Densidad (Piedra) = 2398.37 kg/m³ [3]
- Módulo de elasticidad = 12GPa (1.20x10¹⁰Pa) [3]
- Módulo de Poisson = 0.11 [3]

6.2. Geometría de los elementos

A continuación, procedemos a crear los elementos los cuales conformaran a la estructura en análisis.

Detalles de las rocas:

Como se muestra en la Figura N°6.1, el primer elemento es una piedra cúbica (modelo 3D), de dimensiones 0.25x0.25x0.25m, de tipo deformable y forma sólida.



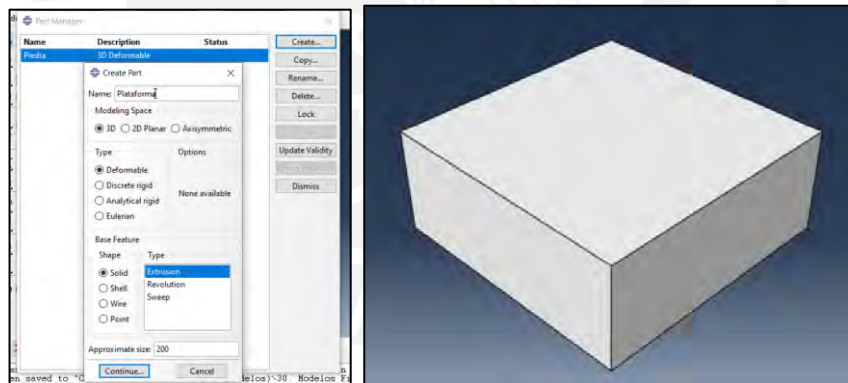
(a)

(b)

Figura N°6. 1 (a) Part manager (b) Modelo de piedra

Detalles de la plataforma

Como se muestra en la Figura N°6.2, al igual que en el caso previo, este segundo elemento la cual es una plataforma donde se apoyan las piedras (modelo 3D), cuyas dimensiones son 0.25x0.25x0.10m, de tipo deformable y forma sólida, será creado con el mismo procedimiento, a partir de un área inicial la cual para este caso sería 0.25x0.25m.



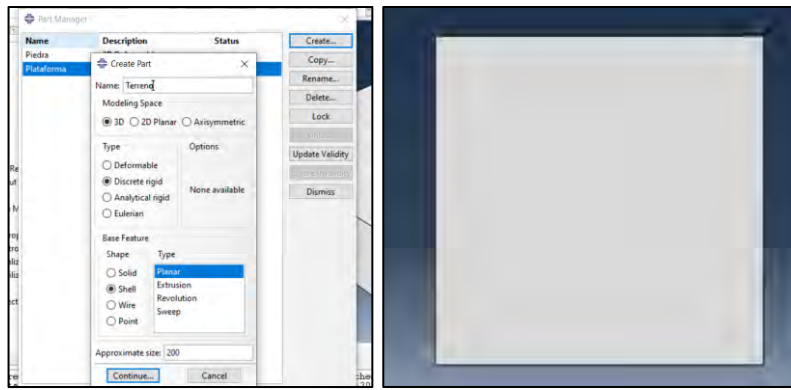
(a)

(b)

Figura N°6. 2 (a) Part manager (b) Modelo de plataforma

Detalles del terreno

En el caso del terreno, el cual presenta dimensiones de 5.00x5.00m, se usará del mismo modo un modelo 3D, de tipo deformable y forma sólida. Esto se puede apreciar en la Figura N°6.3:



(a)

(b)

Figura N°6. 3 (a) Part manager (b) Modelo de terreno

A continuación, se muestra el resultado de unir las partes en un solo elemento de análisis:

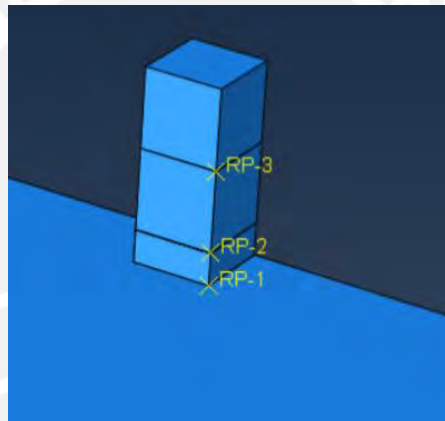


Figura N°6. 4 Unión de elementos creados

6.3. Fases de análisis

Para el presente caso de análisis, se realizarán pruebas bajo un control de 3 fases: un análisis inicial, un análisis estático general para el caso de la gravedad y un análisis dinámico implícito para el caso de rotación.

A continuación, en la Figura N°6.5, se los casos de cargas creados:

Name	Procedure	Nlgeom	Time
Initial	(Initial)	N/A	N/A
Gravedad	Static, General	ON	2
Rotación	Dynamic, Implicit	ON	5

Figura N°6. 5 Steps creados

6.4. Interacción

Dentro del campo Interacción, podremos generar todas las condiciones de contacto que se generaran durante el análisis de la estructura. Este es un paso muy importante ya que de esto dependerá el cómo se comporten los elementos al estar en contacto. A continuación, se detallan los valores utilizados para el desarrollo de los modelos:

Coefficiente de fricción: 0.25, 0.30 y 0.35 (Valores a analizar)

Rigidez de contacto: 1E+008 [3]

Como se observa, se toman condiciones tangenciales y normales. La condición tangencial está vinculada al coeficiente de fricción y se tomaron valores de 0.25, 0.30 y 0.35. Por otro lado, se está considerando una condición de comportamiento normal vinculado a la rigidez de contacto, la cual es un factor que mide cuantitativamente la oposición de un material a la deformación causada por una fuerza o esfuerzo. Para el presente análisis, se está tomando un valor de rigidez de contacto de 1E+008 [3].

Se debe tener en cuenta que la rigidez de contacto es una propiedad física la cual aparece cuando existen 2 superficies rugosas en contacto.

A continuación, se muestra una representación gráfica de esta interacción para el caso de los muros de piedra:

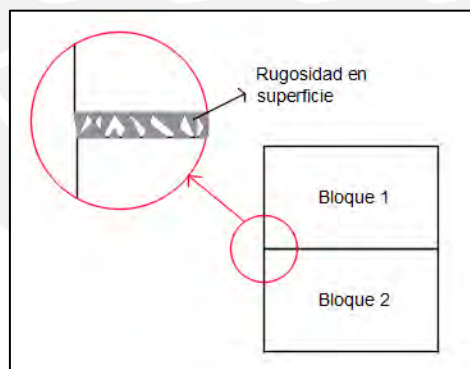


Figura N°6. 6 Contacto entre bloques

Así mismo, se muestra el caso de carga creado llamado “gravedad”, la cual se aplica de manera progresiva, de modo que de manera lineal se reparte la carga hasta llegar a su pico en el tiempo de 1 segundo, mientras durante otro segundo permanecerá con ese valor para que el modelo se estabilice, haciendo del caso de análisis un tiempo total de 2 seg. El valor de la gravedad con la que se trabaja es de 9.81 m/s^2 en el componente 2 (dirección vertical).

Así mismo, por condiciones del ensayo, empotramos el terreno durante todo el ensayo y solo durante las 2 primeras fases la plataforma. Esta condición se puede apreciar en la imagen N°4.9:

Del mismo modo, creamos la condición para la rotación de la plataforma. Las condiciones para considerar se muestran en la imagen N°4.10:

Ingresamos la rotación en radianes, la cual para 16.6° le corresponde un valor de 0.2897 rad. Al igual que el caso de la gravedad, esta rotación se aplica de manera progresiva en un tiempo de 1 seg, mientras durante 5 segundos se mantendrá en la posición deseada. El eje de rotación de la plataforma se muestra esquemáticamente en la Figura N°6.7:

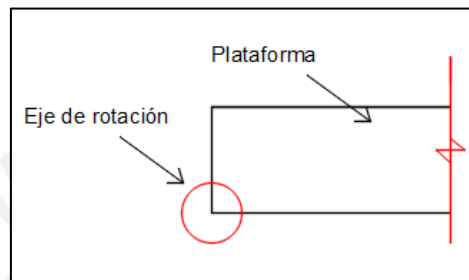


Figura N°6. 7 Eje de rotación de la plataforma

6.5. Mallado de elementos

Lo siguiente a desarrollar es la división de los elementos en partes más pequeñas, de modo que se analicen estas y por consiguiente podamos deducir y comprender el comportamiento de toda la estructura. El programa utiliza los sistemas de discretización con formas de hexaedros, tetraedros y/o prismas rectangulares. Para nuestro caso, ya que se trabajarán con bloques cúbicos, se utilizará la discretización por hexaedros (C3D8R).

Por ejemplo, para la piedra, consideramos un mesh de 0.125m. Lo último que se menciona se puede observar en la Figura N°6.8:

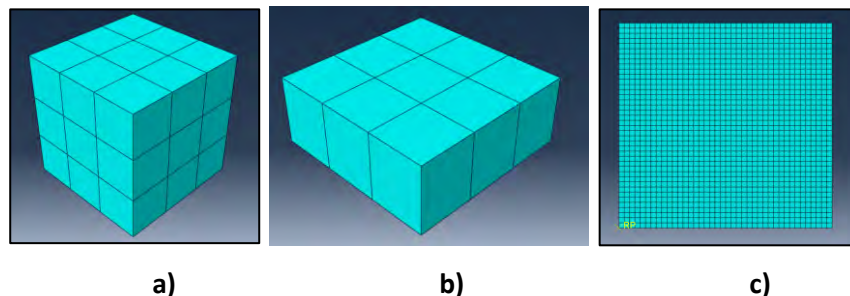


Figura N°6. 8 Mesh – a) Piedra b) Plataforma c) Terreno

El mismo procedimiento y espaciamiento ocurre para la plataforma. Esto se puede observar en la Figura N°6.9:

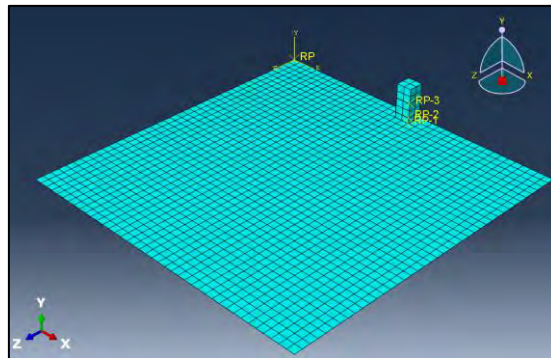


Figura N°6. 9 Mesh – Estructura Global

Como se observa, el mesh tanto de las pircas, de la plataforma y del terreno coinciden en tamaño. Esto es de importancia porque los nodos de trabajo estarán acoplados y trabajarán sin inconvenientes.

6.6. Resultados del análisis

En nuestro caso, se van a analizar los desplazamientos respecto al eje Y de las coordenadas globales.

La diferencia y seccionamiento en los tiempos de cada fase de análisis nos permite evaluar la estructura para varios casos de fricción, de modo que se visualicen los resultados desde el inicio del análisis, pasando luego a la etapa de gravedad y finalmente por la rotación.

Resultados numéricos

A continuación, se mostrarán algunos cálculos obtenidos de forma manual con la finalidad de compararlos con los obtenidos en el Software Abaqus.

Peso específico de la piedra:	2398.37 kg/m ³
Volumen de bloque de Piedra:	0.25x0.25x0.25 = 0.015625m ³
Cantidad de piedras modeladas:	n = 2
Peso total de las pircas:	0.015625x2398.37 = 37.47 kg

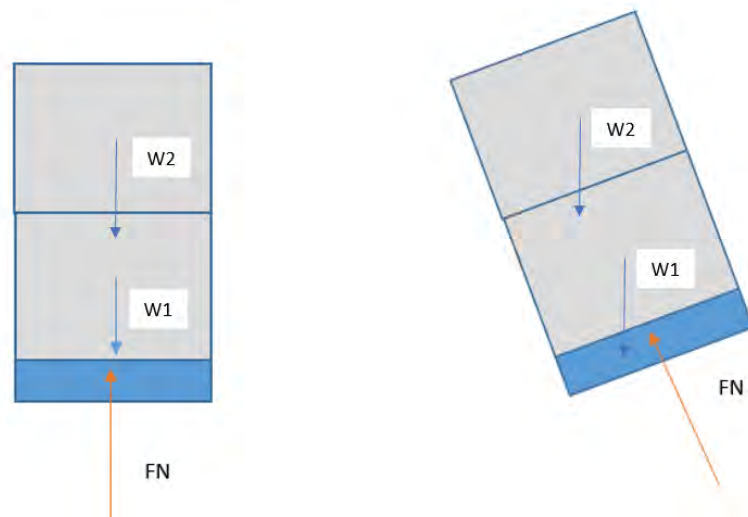


Figura N°6. 10 Estado de gravedad y de rotación h – Estructura Global

En la Figura N° 6.10, podemos apreciar el esquema de cargas esperado del muro de piedra ante las solicitaciones de gravedad y rotación de la plataforma.

Donde:

- FN: Fuerza normal ejercida de la plataforma hacia el muro de piedra
- W: Peso de total de las pircas ($W1 + W2$)

Para el primer caso (Fase de gravedad), se puede deducir que la fuerza normal obtenida es igual al peso de la estructura de piedra, por lo que el valor a considerar sería de 37.47 kg. Para el segundo caso (Fase de rotación), descomponiendo la carga del peso en la dirección de la fuerza normal, se obtendría un valor igual a 35.91kg. Estos 2 resultados se tendrían que comparar con los obtenidos del análisis en Abaqus. Tomaremos como puntos de análisis el caso de 3 coeficientes de fricción, estos valores serán de 0.25, 0.30 y 0.35.

Fricción $\mu = 0.25$

Etapa gravedad:

Durante esta etapa empieza a aparecer de manera progresiva el efecto de la gravedad sobre el cuerpo. Dado que el sistema de carga es uniforme y el cuerpo es homogéneo, la distribución de desplazamientos (U) debe ser uniforme. Esto se puede observar al visualizar los colores del modelo. Para este caso, se evaluó específicamente el desplazamiento vertical (U_2). Para este caso de análisis, podemos confirmar que el cuerpo se comporta de acuerdo con lo esperado y de manera correcta.

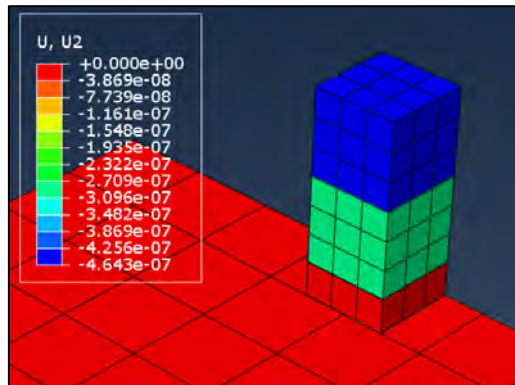


Figura N°6. 11 Etapa en Gravedad (u=0.25)

Etapa rotación:

Para esta etapa, se observa en la Figura N°6.12 que se ha producido la falla del sistema para un ángulo de rotación de 16.60° , haciendo que los bloques se separen de la plataforma y haciendo nulos los esfuerzos normales. Esto se debería evidenciar en las gráficas de esfuerzo normal vs tiempo.

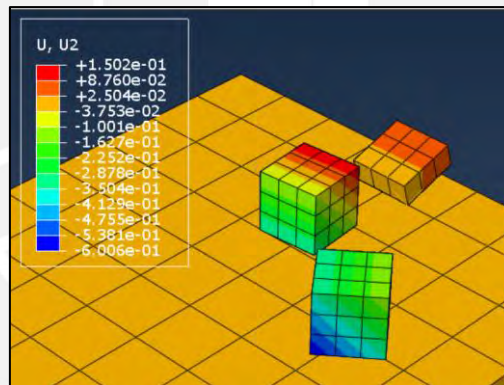


Figura N°6. 12 Etapa en Rotación (u=0.25)

Desplazamiento Vertical:

Como se observa en la Figura N°6.13, podemos observar que desde el segundo 0 hasta el segundo 2.0 el bloque presenta desplazamiento 0. Esto último es coherente a lo que se ve en el modelo ya que al estar en un estado de gravedad y no existir penetración entre bloques, lo ideal sería que no durante ese tiempo el desplazamiento sea cero. Luego al ir rotando hasta el segundo 3.5 aproximadamente donde se produce el deslizamiento de bloques, se produce una gradiente relacionada a la rotación progresiva de la plataforma. Finalmente, desde el segundo 3.50 para adelante se ven saltos vinculados a la interacción de los bloques con la plataforma y el terreno (rebotes y desplazamientos).

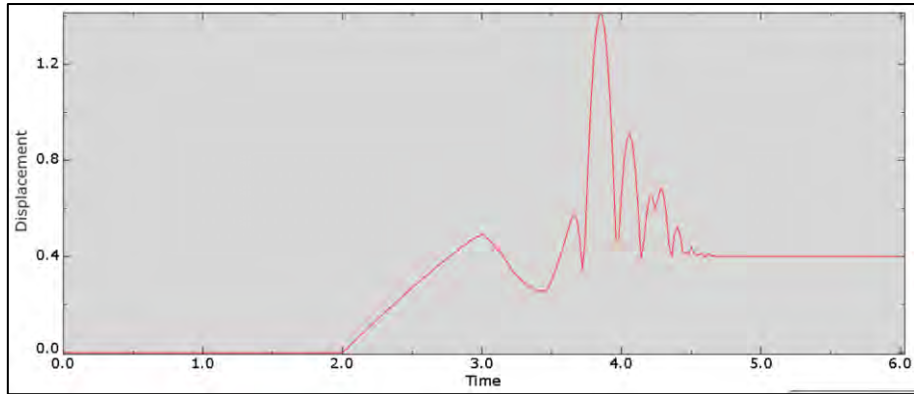


Figura N°6. 13 Desplazamiento vertical vs Tiempo - Entre pircas – Coef. Fricción:0.25

Fricción $\mu = 0.30$:

Etapa gravedad:

Durante esta etapa, al igual que en el caso previo, empieza a aparecer de manera progresiva el efecto de la gravedad sobre el cuerpo. Dado que el sistema de carga es uniforme y el cuerpo es homogéneo, la distribución de desplazamientos (U) debe ser uniforme. Esto se puede observar al visualizar los colores del modelo. Para este caso, se evaluó específicamente el desplazamiento vertical (U2). Para este caso de análisis, podemos confirmar que el cuerpo se comporta de acuerdo con lo esperado y de manera correcta.

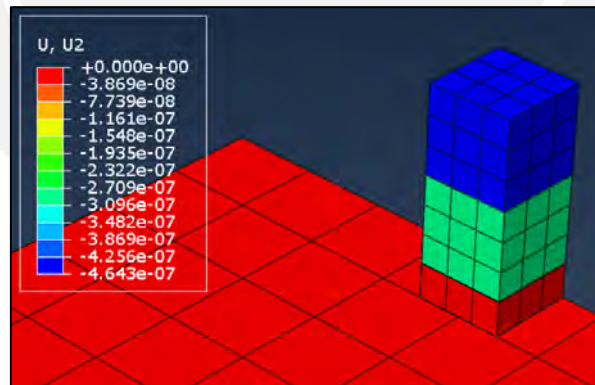


Figura N°6. 14 Etapa en Gravedad ($\mu=0.30$)

Etapa rotación:

Para esta etapa, se observa en la Figura N°6.14 que se ha producido la falla del sistema, haciendo que los bloques se separen de la plataforma y haciendo nulos los esfuerzos normales. Esto se debería evidenciar en las gráficas de esfuerzo normal vs tiempo.

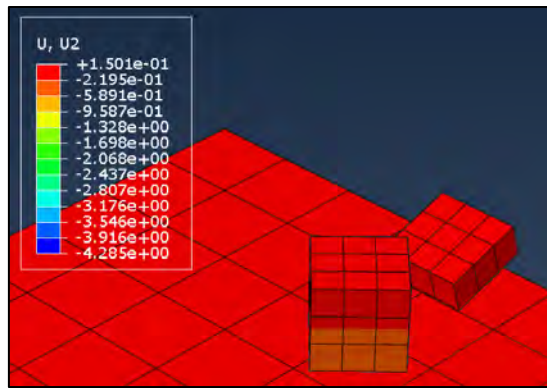


Figura N°6. 15 Etapa en Rotación ($u=0.30$)

Desplazamiento Vertical:

Se puede observar, la Figura N°6.16 presenta la misma tendencia que la gráfica N°4.3, donde el caso de fricción era 0.25. Se observa un tramo constante relacionado con la etapa de gravedad, luego una etapa de gradiente correspondiente a la etapa de rotación de la plataforma, y finalmente una etapa de interacción entre los bloques, la plataforma y el terreno.

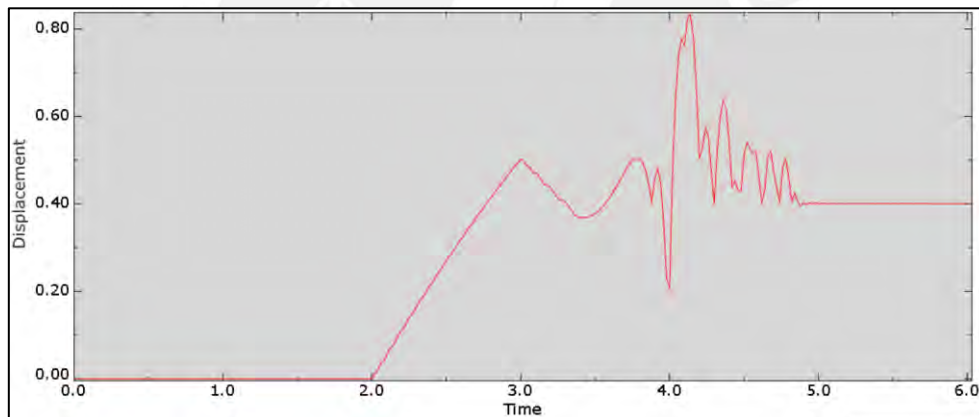


Figura N°6. 16 Desplazamiento vertical vs Tiempo - Entre pircas – Coef. Fricción:0.30

Fricción $u = 0.35$:

Etapa gravedad:

Durante esta etapa, al igual que en los casos previos, empieza a aparecer de manera progresiva el efecto de la gravedad sobre el cuerpo. Dado que el sistema de carga es uniforme y el cuerpo es homogéneo, la distribución de desplazamientos (U) debe ser uniforme. Esto se puede observar al visualizar los colores del modelo. Para este caso, se evaluó específicamente el desplazamiento vertical (U_2). Para este caso de análisis, podemos confirmar que el cuerpo se comporta de acuerdo con lo esperado y de manera correcta.

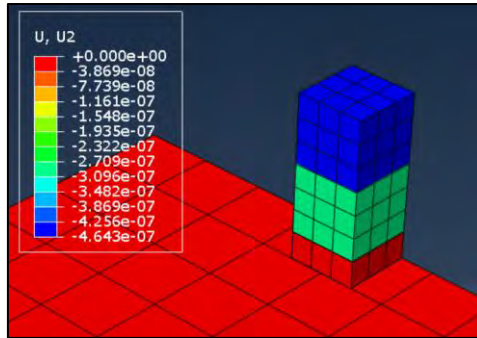


Figura N°6. 17 Etapa en Gravedad ($u=0.35$)

Etapa rotación:

Para esta etapa, se observa en la Figura N°6.18 que el sistema permanece en equilibrio, es decir que los bloques han permanecido unidos entre sí y en contacto con la plataforma. Esto se debe a que la fuerza de fricción para el presente caso de análisis es lo suficiente como para retener el desplazamiento de los bloques.

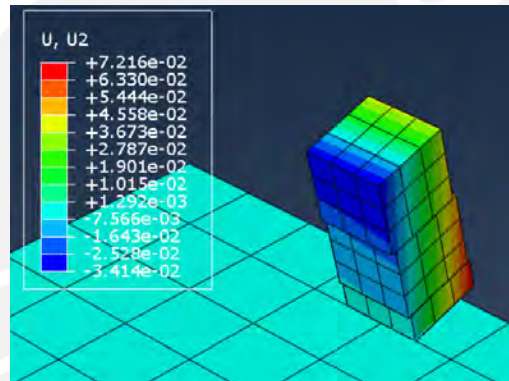


Figura N°6. 18 Etapa en Rotación ($u=0.35$)

Desplazamiento Vertical:

A diferencia de los casos previos, en este podemos apreciar que a partir del segundo 3.00, los bloques presentan un ligero desplazamiento y vibración por detenerse el efecto de rotación de la plataforma, para luego pasar a un estado estático. Esto se debe a que la fuerza de fricción es suficiente como para sostener la estructura y evitar los desplazamientos.

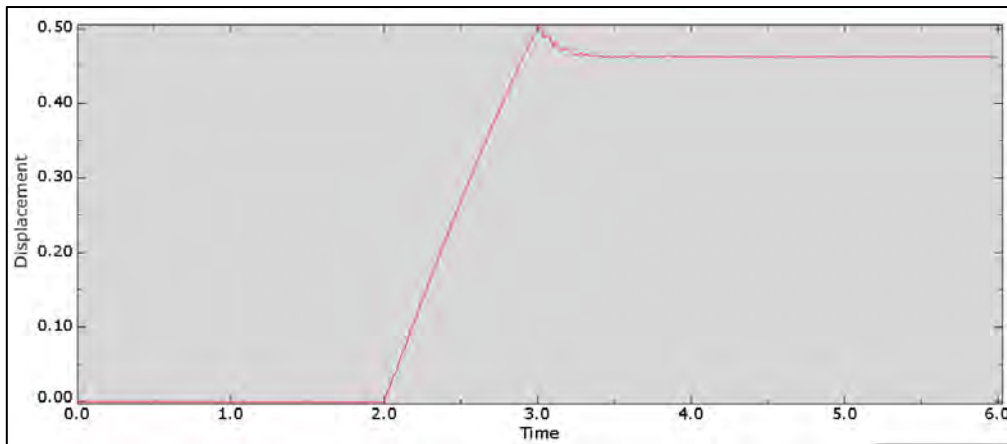


Figura N°6. 19 Desplazamiento vertical vs Tiempo - Entre pircas – Coef. Fricción:0.35

6.7. Resultados gráficos de los análisis

A continuación, se mostrarán los resultados gráficos obtenidos en relación con el esfuerzo normal (eje Y) de los 3 análisis descritos previamente. Esto se analizará en base a la interacción entre las mismas pircas, y entre la pirca inferior y la plataforma.

Fricción $\mu=0.25$:

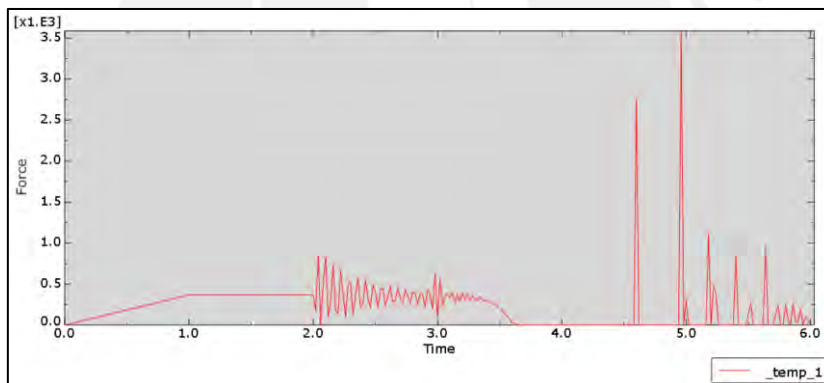


Figura N°6. 20 Fuerza Normal vs Tiempo - Entre pircas – Coef. Fricción:0.25

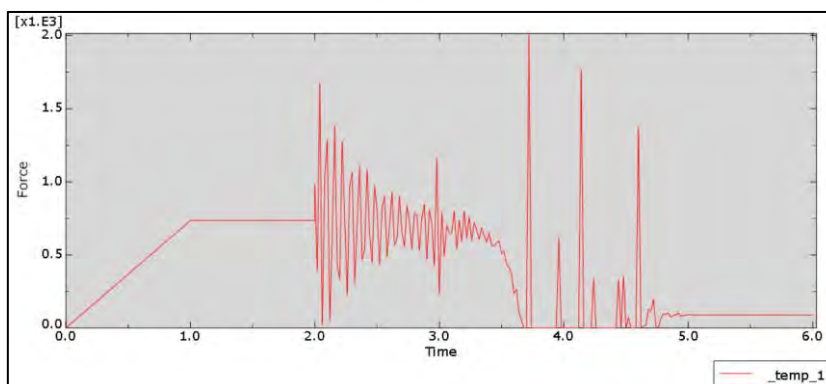


Figura N°6. 21 Fuerza Normal (Contacto) vs Tiempo - Entre pirca y plataforma –
Coef. Fricción:0.25

Según lo observado en las Figuras N°6.20 y N°6.21, la fuerza normal ejercida entre los mismos bloques, y entre el bloque inferior y la plataforma de rotación sigue una misma tendencia de comportamiento. Para el primer segundo, la gravedad ejercida crece linealmente conforme lo hace la fuerza normal. Para el siguiente segundo próximo, la fuerza normal se mantiene constante ya que para el step creado llamado “gravedad” ocurre lo mismo. Al inicio de la rotación, la cual se da al segundo 2, los bloques empiezan a presentar variación de sus fuerzas normales, esto debido a que la gravedad ya no es vertical, sino presenta un ángulo de inclinación según vaya avanzando el step llamado “Rotación” y por esta razón se presentan desplazamientos internos que pueden generar no un colapso de la estructura, pero si una variación en sus áreas de contacto. Posteriormente, al momento de la falla local de la estructura, los bloques sufren colisión y separación entre ellos, lo cual genera una distorsión en la tendencia de los gráficos presentados. Para este caso de coeficiente de fricción igual a 0.25, donde la fuerza generada por esta última es la mínima en comparación con los demás casos de estudio, se esperaba que los bloques deslicen o roten, lo cual fue así. Se resalta a su vez que entre los segundos 3.60 y 5.00, se presentan picos provocados por el contacto brusco de las pircas con el terreno y la plataforma, esto último producido por la falla de la estructura.

Fricción $\mu = 0.30$:

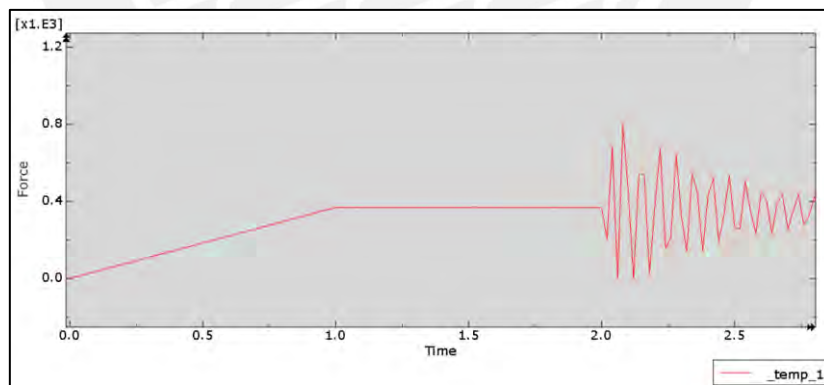


Figura N°6. 22 Fuerza Normal (Contacto) vs Tiempo - Entre pircas – Coef.

Fricción:0.30

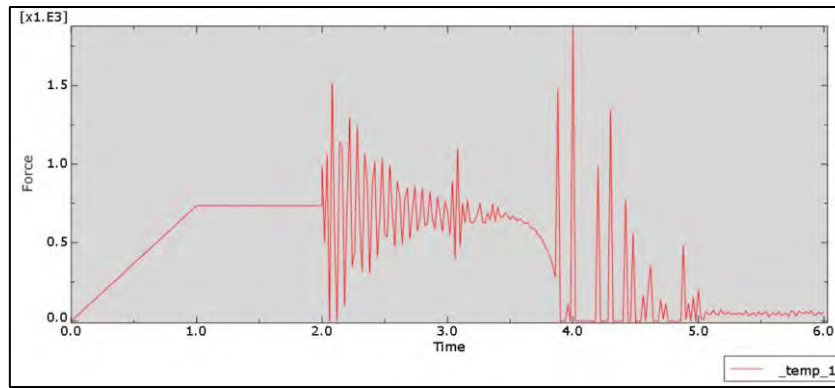


Figura N°6. 23 Fuerza Normal (Contacto) vs Tiempo - Entre pirca y plataforma –
Coef. Fricción:0.30

Para este caso, donde el coeficiente de fricción es ligeramente mayor ($\mu=0.30$), se puede observar de las Figuras N°6.22 y N°6.23 que la fuerza normal ejercida entre los mismos bloques, y entre el bloque inferior y la plataforma de rotación se mantiene con la misma tendencia que la mostrada en el caso previo ($\mu=0.25$). Para el primer segundo, la gravedad ejercida crece linealmente conforme lo hace la fuerza normal. Para el siguiente segundo próximo, la fuerza normal se mantiene constante ya que para el step creado llamado “gravedad” ocurre lo mismo. Al inicio de la rotación, la cual se da al segundo 2, los bloques empiezan a presentar variación de sus fuerzas normales, esto debido a que la gravedad ya no es vertical, sino presenta un ángulo de inclinación según vaya avanzando el step llamado “Rotación”. Al igual que en caso previo, se presentan desplazamientos mínimos internos que no generan una etapa de colapso, pero sí de variación en las áreas de contacto de la estructura. Posteriormente, al momento de la falla local de la estructura, los bloques sufren colisión y separación entre ellos, lo cual genera una distorsión en la tendencia de los gráficos presentados. Para este caso de coeficiente de fricción igual a 0.30, donde la fuerza generada por esta última es la mínima en comparación con los demás casos de estudio, también se esperaba que los bloques deslicen o roten, lo cual ocurrió también de ese modo. En relación con los desplazamientos, para el caso anterior estos eran mayores. Se presenta lógica ya que más fricción, más retención al movimiento de los bloques. En relación con los picos que se ven en las gráficas a partir del segundo 4 aproximadamente, son debidos a las colisiones de las rocas con el terreno y entre ellas mismas. Esto último mencionado se produce después de la falla local del muro de pircas. Así mismo, como en el caso anterior, se presentan picos entre los segundos

3.60 y 5.00 ya que las pircas sufren un contacto brusco durante la etapa de colapso entre ellas mismas y con la plataforma.

Fricción $\mu = 0.35$:

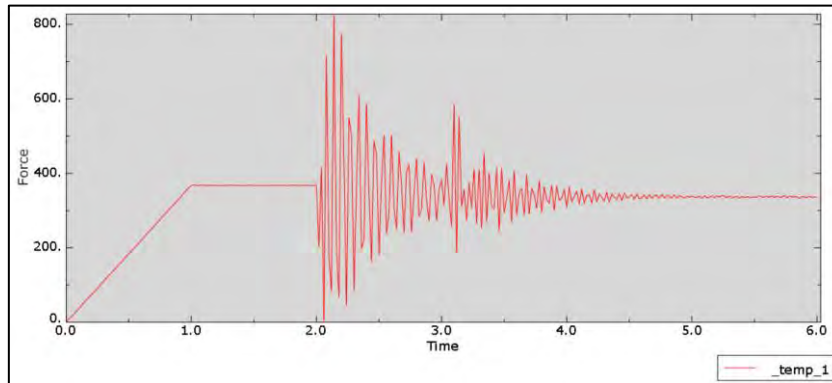


Figura N°6. 24 Fuerza Normal vs Tiempo - Entre pircas – Coef. Fricción:0.35

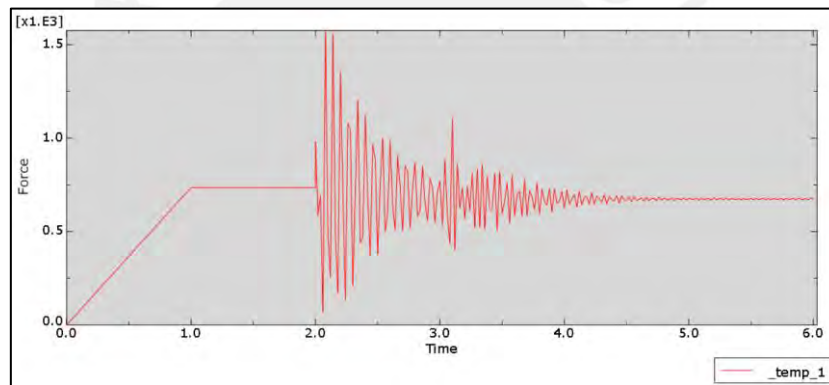


Figura N°6. 25 Fuerza Normal (Contacto) vs Tiempo - Entre pircas y plataforma – Coef. Fricción:0.35

Para este último caso de estudio, donde el coeficiente de fricción es mayor ($\mu=0.35$), se puede observar de las Figuras N°6.24 y N°6.25 que la fuerza normal ejercida entre los mismos bloques, y entre el bloque inferior y la plataforma de rotación ya no presenta la misma tendencia que los casos anteriores a partir de cierto momento. Para el primer segundo, la gravedad ejercida crece linealmente conforme lo hace la fuerza normal, esto ocurre también para los casos previos. Para el siguiente segundo próximo, la fuerza normal se mantiene constante ya que para el step creado llamado “gravedad” ocurre lo mismo. Al inicio de la rotación, la cual se da al segundo 2, los bloques empiezan a presentar variación de sus fuerzas normales, esto debido a que la gravedad ya no es vertical, sino presenta un ángulo de inclinación según vaya avanzando el step llamado “Rotación”. Esto último también es indicador, al igual que en los 2 casos previos, que se producen desplazamientos internos, no suficientes como

para generar el colapso de la estructura, pero si para generar un cambio en las áreas de contacto. Posteriormente, lo cual se diferencia de los casos previos, los bloques permanecen juntos y no así se mantienen hasta el final del análisis. Para este caso de coeficiente de fricción igual a 0.30, donde la fuerza generada por esta última es la mínima en comparación con los demás casos de estudio, se esperaba que los bloques no deslicen ni roten, lo cual se presentó del modo descrito.

Como se observaron en los resultados previos, existe deslizamiento entre los bloques para el caso donde los coeficientes de fricción es 0.25 y 0.30, por lo tanto, se podrá analizar solo el caso de fuerza cortante para el caso donde $u=0.35$.

	Caso	FN (kg)	Área de contacto (m ²)	Esf (kg/m ²)	Max Fc (kg)	Fza por Gravedad (kg)
Desliza	0.25	37.47	0.0625	599.59	8.98	10.71
Desliza	0.30	37.47	0.0625	599.59	10.77	10.71
No Desliza	0.35	37.47	0.0625	599.59	12.57	10.71

Donde:

FN: Fuerza normal (kg)

Esf: Esfuerzo cortante (kg/m²)

Max Fc = máxima fuerza de fricción

En el cuadro previo, mediante cálculos manuales, se observa que la fuerza generada por la gravedad provoca que el cuerpo deslice al ser mayor que la fuerza máxima de fricción (Max Fc). Solo para el caso de $u=0.35$ el cuerpo no desliza. Esto último se demostrará en el modelamiento de calibración.

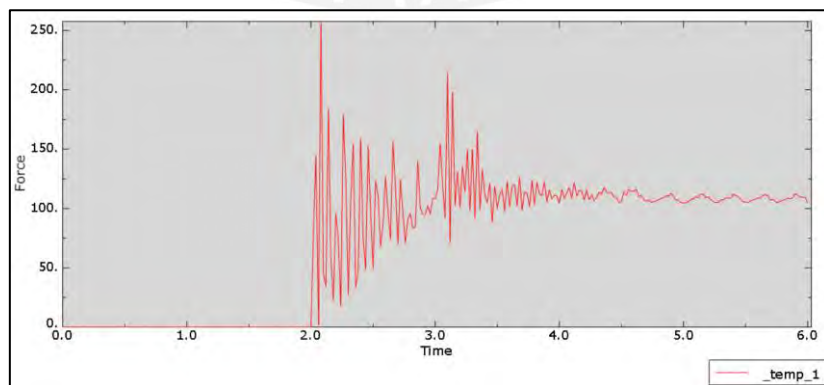


Figura N°6. 26 Fuerza Cortante (Contacto) vs Tiempo - Entre pircas

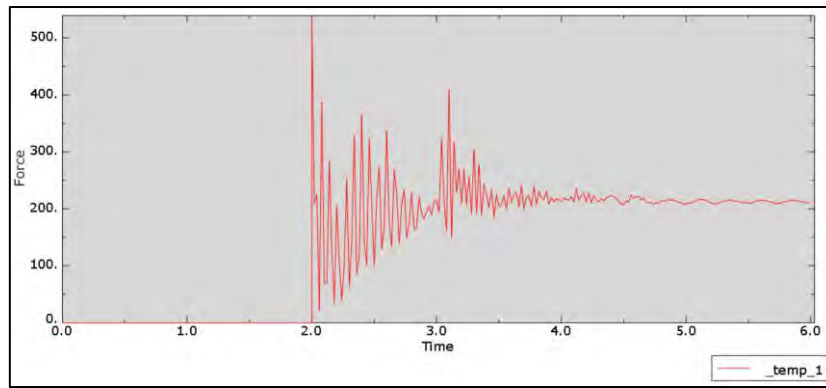


Figura N°6. 27 Fuerza Cortante (Contacto) vs Tiempo - Entre pircas y plataforma

En las Figuras N°6.26 y 6.27, se puede observar el comportamiento de la fuerza cortante entre las pircas y la plataforma respectivamente. Se puede observar que, en los 2 primeros segundos, al no presentarse fuerzas de empuje o arrastre en los bloques (etapa de gravedad), no se presentan fuerzas cortantes en las zonas de contacto, lo cual es lo más lógico. Sin embargo, al iniciar la rotación de la plataforma, se presentan varios picos en la gráfica, dándonos a entender la variación del área de contacto entre los cuerpos. Finalmente, la gráfica presenta oscilaciones continuas desde el segundo 4, dando a entender que luego del colapso de la estructura, los bloques presentan interacciones bruscas hasta llegar al estado de reposo, y por ende a que la fuerza de corte llegue a ser cero.

A continuación, se muestra en la Tabla N°6.2 la comparación de resultados obtenidos de forma manual y el Abaqus:

Tabla N°6. 2 Comparación de resultados

Caso	Manual		Abaqus			
	FN (kg)	FT (kg)	FN (N)	FN (kg)	FT (N)	FT (kg)
0.25	37.47	10.71	367.45	37.47	-	-
0.30	37.47	10.71	367.45	37.47	-	-
0.35	37.47	10.71	367.45	37.47	104.95	10.70

Donde:

FN: Fuerza Normal

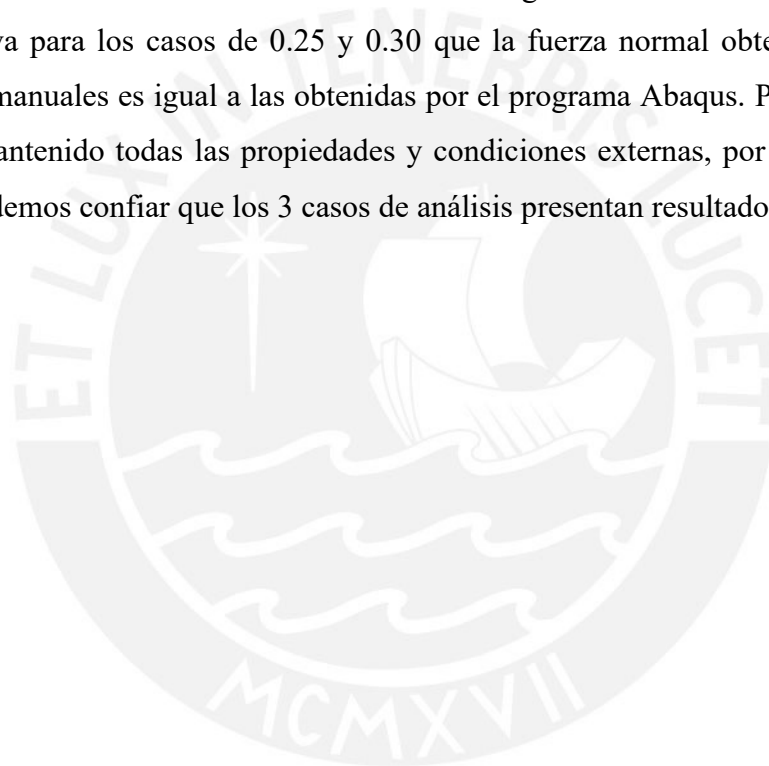
FT: Fuerza Cortante

Solo se analiza el caso de $u=0.35$ ya que en los demás casos los bloques deslizan. Se puede apreciar que los resultados son muy cercanos. Dado esto podemos confirmar que el sistema se encuentra calibrado.

Para el caso de tener un coeficiente de fricción de 0.35, según los cálculos se obtiene una fuerza Normal total de 37.47 kg y una fuerza Cortante total de 10.71 kg. Para el caso del Abaqus, se obtiene una fuerza Normal total de 37.47 kg y una fuerza cortante total de 10.70 kg. La diferencia entre ambos casos de análisis es mínima, por lo que podemos concluir que el modelo en relación con el caso de fricción, cargas y condiciones es aceptable en comparación al modelo real.

Como se menciona en previamente, los casos para los coeficientes de fricción de 0.25 y 0.30 son difíciles de manejar, ya que la fuerza de fricción se pierde en cierto instante al separarse los bloques por completo, Sin embargo, es posible analizar el caso de fuerza normal durante todo el caso de la fuerza de gravedad.

Se observa para los casos de 0.25 y 0.30 que la fuerza normal obtenida mediante cálculos manuales es igual a las obtenidas por el programa Abaqus. Para los 3 casos se han mantenido todas las propiedades y condiciones externas, por lo que de este modo podemos confiar que los 3 casos de análisis presentan resultados confiables.



CAPÍTULO 7: MODELO DE MURO DE PIRCA

De los resultados y consideraciones tomadas del primer análisis realizado para obtener la calibración del modelo simple, se trabajará el modelo completo, el cual es la representación general del modelo físico presentado en el Capítulo 3 del presente trabajo.

El objetivo principal del presente modelo es obtener los mismos resultados (Desplazamientos) del muro ensayado en escala real, para de este modo, tener una base para futuros modelamientos de este tipo de estructuras.

A continuación, se mostrarán un conjunto de modelos acompañados de sus resultados elaborados con la finalidad de llegar al modelo más exacto y adecuado según el comportamiento del Ensayo. Posteriormente, se mostrará el modelo final, junto con las propiedades, condiciones ingresadas y resultados definitivos.

7.1. Modelos de calibración general

Manteniendo una sola distribución de pircas, tratando de igualar la forma del muro del ensayo físico, se evaluaron varios modelos teniendo como variables la velocidad de rotación de la plataforma y el coeficiente de fricción.

Caso I: $u=0.34$ $V_r= 1.035^\circ/\text{seg}$

Para este caso, se toma un coeficiente de fricción de 0.34 y una velocidad de rotación de la plataforma de $1.035^\circ/\text{seg}$. Al realizar el análisis tomando las consideraciones previamente mencionadas, encontramos la siguiente distribución para el primer instante de falla global y al finalizar el análisis en las Figuras N°7.1 y 7.2 respectivamente:

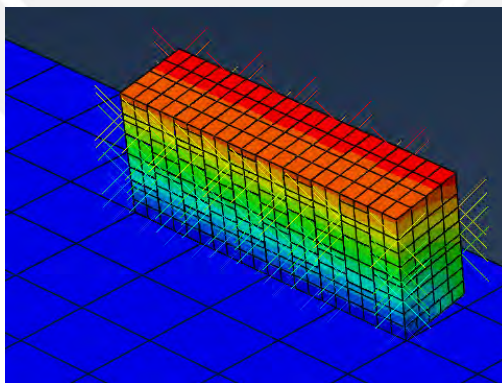


Figura N°7. 1 Primer momento de análisis (Caso I)

En la figura N°7.1 se puede observar que la falla inicia (16.6°) generando una distribución de desplazamientos bastante uniformes, es decir que todos los bloques presentan sus primeros desplazamientos relativos de simultánea.

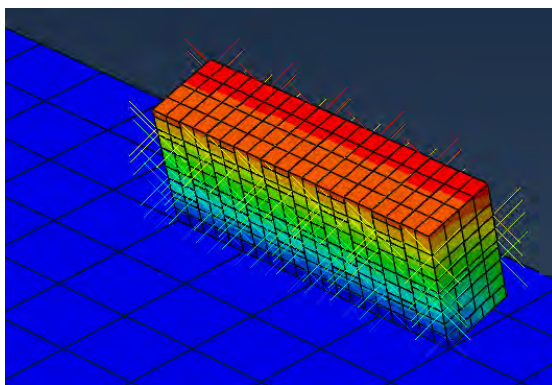


Figura N°7. 2 Fin del análisis global de la estructura (Caso I)

Sin embargo, en la figura N°7.2, se puede observar que para cuando se alcanza la rotación deseada, los bloques no han cedido al deslizamiento. Esto es debido a que la plataforma de rotación generó velocidades muy lentas y la fuerza de fricción entre bloques es suficiente como para sostener el cuerpo.

Caso II: $u=0.32$ $V_r= 1.035^\circ/\text{seg}$

Para este caso, se reduce el coeficiente de fricción a 0.32 y se mantiene la velocidad de rotación de la plataforma a $1.035^\circ/\text{seg}$. Al realizar el análisis tomando las consideraciones previamente mencionadas, encontramos la siguiente distribución para el primer instante de falla global y al finalizar el análisis en las Figuras N°7.3 y 7.4 respectivamente:

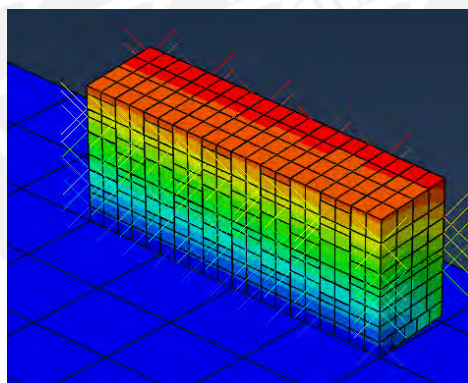


Figura N°7. 3 Primer momento de análisis (Caso II)

En la figura N°7.3 se puede observar que la falla inicia (16.60) generando una distribución de desplazamientos mucho más uniformes en comparación con el caso I, es decir que todos los bloques presentan sus primeros desplazamientos relativos de simultánea.

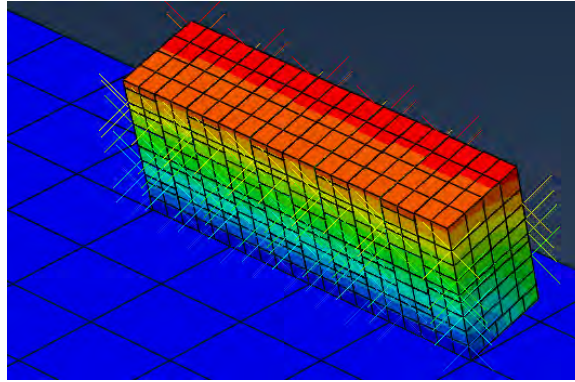


Figura N°7. 4 Fin del análisis global de la estructura (Caso II)

Al igual que en el caso previo, en la figura N°7.4, se puede observar que para cuando se alcanza la rotación deseada, los bloques no han cedido al deslizamiento. Esto es debido a que la plataforma de rotación genero velocidades muy lentas y la fuerza de fricción entre bloques es suficiente como para sostener el cuerpo.

Caso III: $u=0.34$ $Vr= 3.32^\circ/\text{seg}$

Para este caso, se toma un coeficiente de fricción de 0.34 y una velocidad de rotación de la plataforma de $3.32^\circ/\text{seg}$. Al realizar el análisis tomando las consideraciones previamente mencionadas, encontramos la siguiente distribución para el primer instante de falla global y al finalizar el análisis en las Figuras N°7.5 y 7.6 respectivamente:

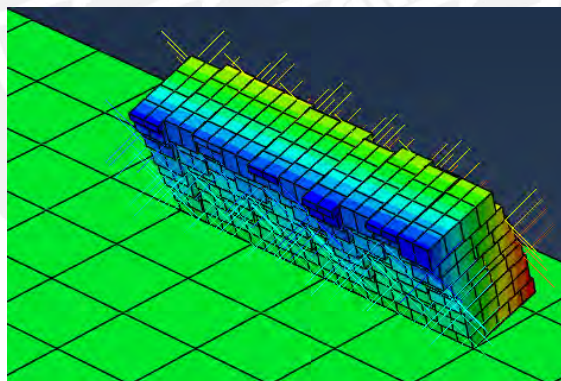


Figura N°7. 5 Primer momento de Falla Global (Caso III)

En la figura N°7.5 se puede observar que la falla inicia (16.60°) generando una distribución de desplazamientos más uniformes en comparación con el caso II, es decir que todos los bloques presentan sus primeros desplazamientos relativos de forma casi simultánea.

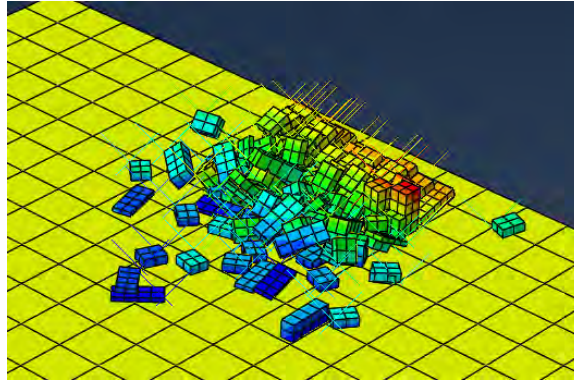


Figura N°7. 6 Fin del análisis global de la estructura (Caso III)

Así mismo, en la figura N°7.6, se puede observar la falla global de la estructura, observando de este modo la distribución de las pircas sobre el terreno. Así como en el primer caso, se puede observar la diferente distribución en los desplazamientos según el rango de colores mostrados en la Imagen.

Caso IV: $u=0.34$ $Vr= 1.509^\circ/\text{seg}$

Para este caso, se toma un coeficiente de fricción de 0.34 y una velocidad de rotación de la plataforma de $1.509^\circ/\text{seg}$. Al realizar el análisis tomando las consideraciones previamente mencionadas, encontramos la siguiente distribución para el primer instante de falla global y al finalizar el análisis en las Figuras N°7.7 y 7.8 respectivamente:

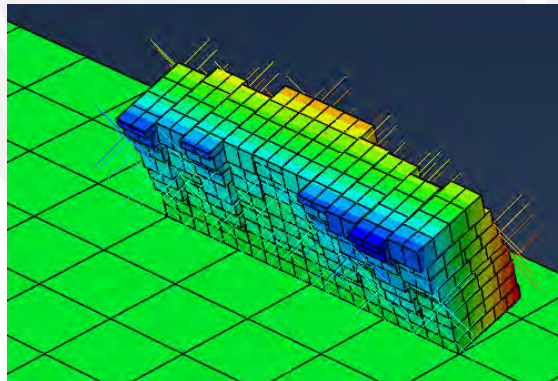


Figura N°7. 7 Primer momento de Falla Global (Caso IV)

En la Figura N°7.7 se puede observar que la falla inicia (16.60°) generando una distribución de desplazamientos menos uniformes en comparación con el caso III, es decir que todos los bloques presentan sus primeros desplazamientos relativos de forma no simultánea.

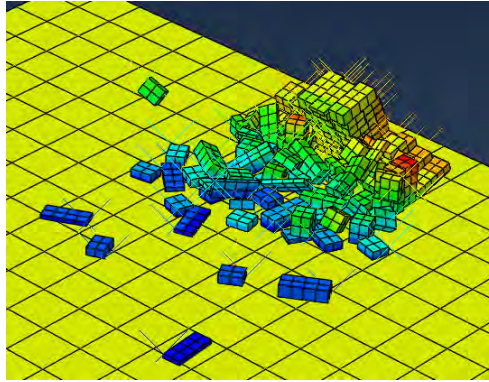


Figura N°7. 8 Fin del análisis global de la estructura (Caso IV)

Así mismo, en la Figura N°7.8, se puede observar la falla global de la estructura, observando de este modo la distribución de las pircas sobre el terreno. Así como en el primer caso, se puede observar la diferente distribución en los desplazamientos según el rango de colores mostrados en la Imagen.

Caso V: $u=0.33$ $Vr= 1.66^\circ/\text{seg}$

Para este caso, se toma un coeficiente de fricción de 0.33 y una velocidad de rotación de la plataforma de $1.66^\circ/\text{seg}$. Al realizar el análisis tomando las consideraciones previamente mencionadas, encontramos la siguiente distribución para el primer instante de falla global y al finalizar el análisis en las Figuras N°7.9 y 7.10 respectivamente:

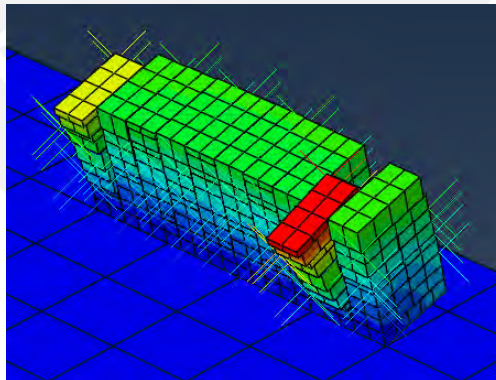


Figura N°7. 9 Primer momento de Falla Global (Caso V)

En la Figura N°7.9 se puede observar que la falla inicia (16.60°) generando una distribución de desplazamientos poco uniforme, sobre todo en 2 lados del muro. Esto se debe a la interacción interna de los mismos. Esto a su vez, es causante del colapso parcial (no total) del muro de piedra.

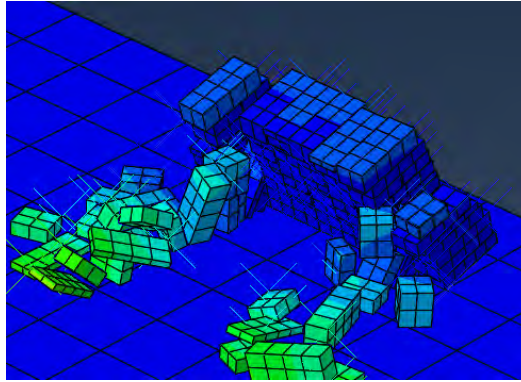


Figura N°7. 10 Fin del análisis global de la estructura (Caso V)

En la Figura N°7.10, se puede observar la falla global de la estructura, observando de este modo la distribución parcial de las pircas sobre el terreno. Para este caso, observamos que no se generó el deslizamiento total de todas las pircas, algunas de estas fueron retenidas por las fuerzas internas de fricción. Dado que este modelo está muy lejano al comportamiento real del ensayo, no se tomará en cuenta para futuras evaluaciones.

Caso VI: $u=0.32$ $Vr= 1.66^\circ/\text{seg}$

Para este caso, se toma un coeficiente de fricción de 0.32 y una velocidad de rotación de la plataforma de $1.66^\circ/\text{seg}$. Al realizar el análisis tomando las consideraciones previamente mencionadas, encontramos la siguiente distribución para el primer instante de falla global y al finalizar el análisis en las Figuras N°7.11 y 7.12 respectivamente:

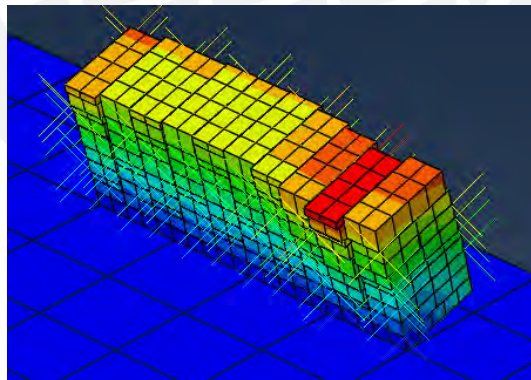


Figura N°7. 11 Primer momento de Falla Global (Caso VI)

En la Figura N°7.11 se puede observar que la falla inicia (16.60°) generando una distribución de desplazamientos poco uniforme, sobre todo en 1 lado del muro. Esto se debe a la interacción interna de los mismos. A diferencia del caso V, en este si se genera el colapso total del muro, esto debido a que el coeficiente de fricción es menor y por ende las fuerzas de retención son menores.

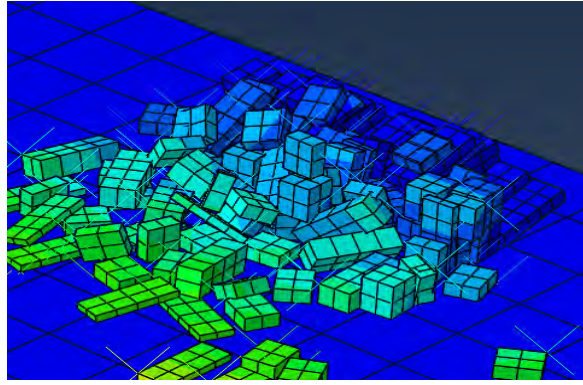


Figura N°7. 12 Fin del análisis global de la estructura (Caso VI)

En la Figura N°7.12, se puede observar la falla global de la estructura, observando de este modo la distribución total de las pircas sobre el terreno. Dado que este modelo no presenta el mismo comportamiento inicial que el ensayo experimental, no se toma en cuenta para futuras evaluaciones.

Caso VII: $u=0.32$ $Vr= 1.84^\circ/\text{seg}$

Para este caso, se mantiene el coeficiente de fricción de 0.32 y una velocidad de rotación de la plataforma de $1.84^\circ/\text{seg}$. Al realizar el análisis tomando las consideraciones previamente mencionadas, encontramos la siguiente distribución para el primer instante de falla global y al finalizar el análisis en las Figuras N°7.13 y 7.14 respectivamente:

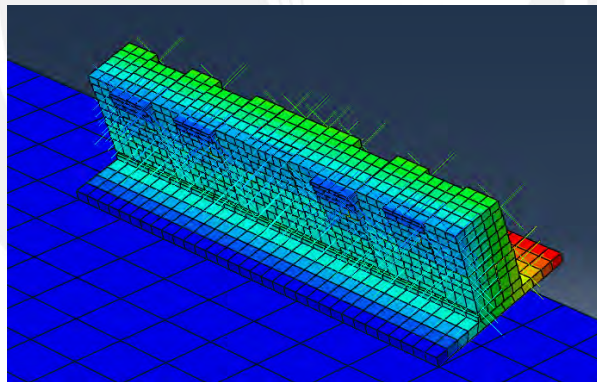


Figura N°7. 13 Primer momento de Falla Global (Caso VI)

En la Figura N°7.13 se puede observar que la falla inicia generando una distribución de desplazamientos más uniforme en comparación al caso previo. Esto se debe a la interacción interna de los mismos. A diferencia del caso VI, en este si se genera el colapso total del muro, esto debido a que el coeficiente de fricción es menor y por ende las fuerzas de retención son menores.

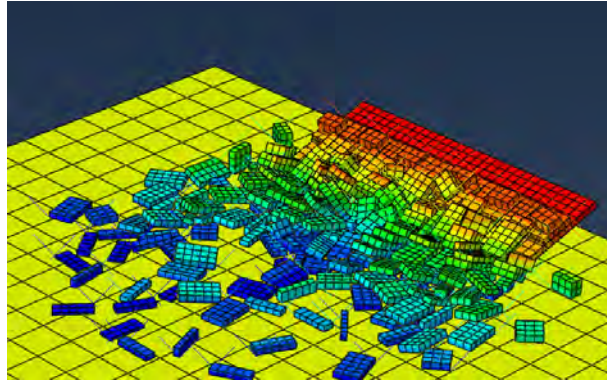


Figura N°7. 14 Fin del análisis global de la estructura (Caso VI)

En la Figura N° 7.14, se puede observar la falla global de la estructura, observando de este modo la distribución total de las pircas sobre el terreno

Según los resultados obtenidos, obtenemos que el modelo más óptimo según la distribución propuesta y más cercana al modelo físico, es la cual considera un coeficiente de fricción igual a 0.32 y una velocidad de rotación de la plataforma igual a 1.84 °/seg.

A continuación, se mostrarán características del modelo definitivo y algunas descripciones importantes de los mismos.

7.2. Unidades, Materiales y Condiciones

Se trabajarán con las mismas unidades con las que se trabajó el primer modelo. Esto se puede apreciar en la Figura N°7.15 resaltado en el cuadro rojo:

Quantity	SI	SI (mm)	US Unit (ft)	US Unit (inch)
Length	m	mm	ft	in
Force	N	N	lbf	lbf
Mass	kg	tonne (10 ³ kg)	slug	lbf s ² /in
Time	s	s	s	s
Stress	Pa (N/m ²)	MPa (N/mm ²)	lbf/ft ²	psi (lbf/in ²)
Energy	J	nJ (10 ⁻³ J)	ft lbf	in lbf
Density	kg/m ³	tonne/mm ³	slug/ft ³	lbf s ² /in ⁴

Figura N°7. 15 Unidades del Modelo

Se resalta que los resultados obtenidos también se obtendrán en las unidades mostradas previamente.

Elementos del sistema

Para el presente modelo, se trabajarán con 6 tipos de pircas, con la finalidad de aproximar la forma del modelo real, una plataforma metálica de rotación y un plano de dimensiones larga con el objetivo de representar el terreno de apoyo.

A continuación, se muestran las dimensiones de 5 tipos de pircas usados en el modelo como ejemplo, teniendo en cuenta que se utilizaron 22 en total.

BLOQUES DE PIEDRA (PIRCAS):

Pirca tipo 1: Dimensiones de 0.10m de alto, 0.50 de espesor, 0.32m de largo

Pirca tipo 2: Dimensiones de 0.15m de alto, 0.28 de espesor, 0.32m de largo

Pirca tipo 3: Dimensiones de 0.17m de alto, 0.28 de espesor, 0.32m de largo

Pirca tipo 4: Dimensiones de 0.08m de alto, 0.50 de espesor, 0.32m de largo

Pirca tipo 5: Dimensiones de 0.10m de alto, 0.50 de espesor, 0.15m de largo

La razón por la cual se usaron 22 tipos de pircas es para asimilarlo con el caso real. El tamaño de las pircas reales fue aproximadamente de esos tamaños, motivo por el cual se consideró tomar esas dimensiones para el análisis.

PLATAFORMA METÁLICA:

La plataforma para considerar tiene dimensiones de 4.00x1.50x0.10.

TERRENO:

El terreno para considerar tiene dimensiones de 10.00x10.00x0.25.

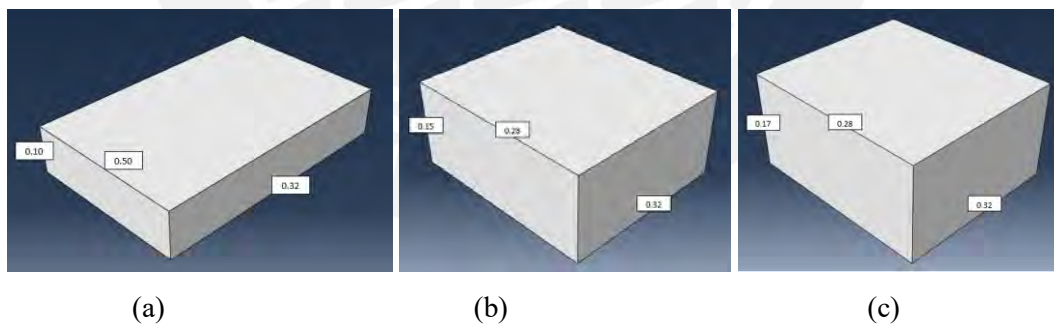
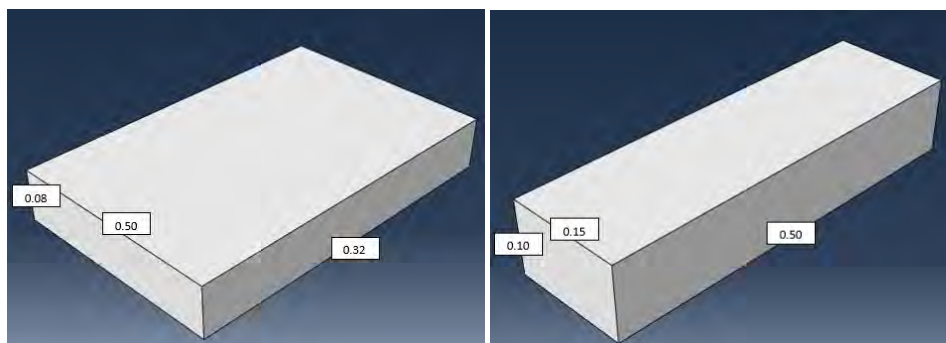
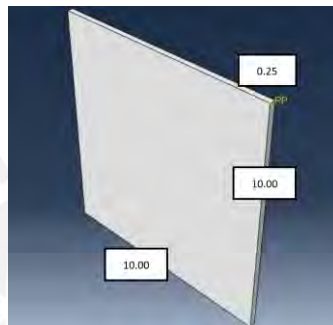
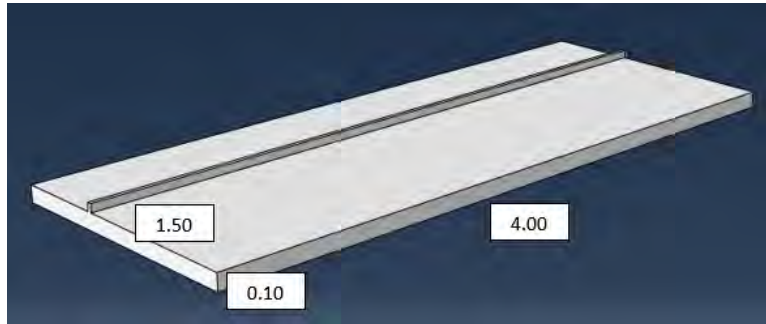


Figura N°7. 16 Tipos de pircas (a) Pirca tipo 1 (b) Pirca tipo 2 (c) Pirca tipo 3



(d) (e)
Figura N°7. 17 Tipos de pircas (d) Pirca tipo 4 (e) Pirca tipo 5



(g) (h)

Figura N°7. 18 (g) Plataforma (h) Terreno

Propiedades de la pirca

Consideramos las características de la piedra utilizadas en el modelamiento del primer análisis.

Se toma un valor del módulo de Yong de 20000000 y módulo de Poisson de 0.20.

7.3. Ensamble de los elementos

A continuación, se muestra el resultado de unir los elementos creados en el punto 7.3 del presente trabajo en una vista 3D:

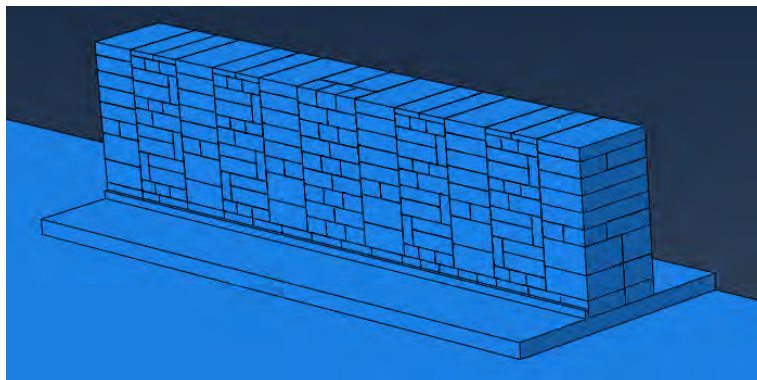


Figura N°7. 19 Ensamble – 3D

Así mismo, se aprecian elevaciones frontales y laterales del presente modelo en las Figura 7.21:

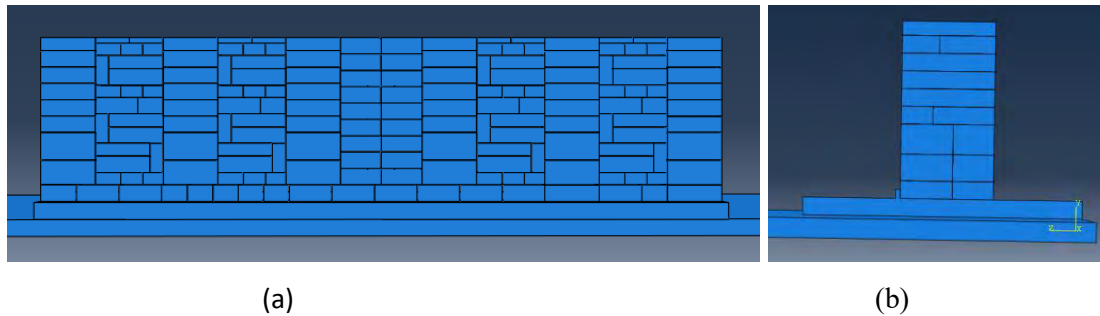


Figura N°7. 20 (a) Elevación frontal X-Y (b) Elevación lateral Z-Y

A continuación, se detallará la cantidad de pircas utilizadas para el presente modelo:

Tabla N°7. 1 Cantidad de Pircas utilizadas.

Tipo	Dimensión	Cantidad	Tipo	Dimensión	Cantidad
Tipo 1	0.32x0.10x0.50	32	Tipo 12	0.16x0.10x0.17	33
Tipo 2	0.32x0.15x0.28	6	Tipo 13	0.32x0.10x0.20	6
Tipo 3	0.32x0.17x0.28	6	Tipo 14	0.21x0.10x0.22	6
Tipo 4	0.32x0.08x0.50	18	Tipo 15	0.32x0.15x0.22	6
Tipo 5	0.15x0.10x0.50	10	Tipo 16	0.32x0.17x0.22	6
Tipo 6	0.25x0.10x0.50	13	Tipo 17	0.16x0.10x0.16	6
Tipo 7	0.21x0.10x0.28	1	Tipo 18	0.32x0.10x0.30	6
Tipo 8	0.12x0.075x0.50	12	Tipo 19	0.24x0.10x0.50	8
Tipo 9	0.13x0.075x0.50	12	Tipo 20	0.32x0.10x0.50	12
Tipo 10	0.15x0.075x0.50	12	Tipo 21	0.24x0.10x0.33	18
Tipo 11	0.20x0.035x0.50	8	Tipo 22	0.32x0.10x0.33	6

Cada bloque de piedra se colocó de modo que existan vacíos entre los elementos. En la realidad, se rellenaban los vacíos con piedras trituradas, pero por temas de modelado, se ajustó las dimensiones de las pircas para poder trabajar un modelo equilibrado entre los resultados y su tiempo procesamiento (archivo no muy cargado). En total se utilizaron 243 pircas para el modelo.

7.4. Fases de análisis

Para crear los procesos de análisis de la estructura de forma secuencial, así como se desarrolló para el modelo de calibración, se utiliza la herramienta STEP. Para este caso, se crean 2 casos, un primer caso para la condición de gravedad y un segundo caso para una rotación impuesta.

Para este caso de análisis, se realizarán pruebas bajo un análisis estático general para el caso de la gravedad y un análisis dinámico implícito para el caso de rotación.

A continuación, en la Figura N°7.22, se muestran los steps creados con sus características y tiempos correspondientes:

Step Manager				
	Name	Procedure	Nlgeom	Time
✓	Initial	(Initial)	N/A	N/A
✓	Peso	Dynamic, Explicit	ON	2
✓	Rortación	Dynamic, Explicit	ON	16

Figura N°7. 21 Fases de análisis

7.5. Condiciones de contacto

Así como en el modelo de calibración, podremos generar todas las condiciones de contacto que se generaran durante el análisis del modelo definitivo. A continuación, se muestran los valores utilizados para el análisis del modelo en Abaqus:

Coefficiente de fricción: 0.32

Rigidez de contacto: 1E+008 N/m²

7.6. Cargas del sistema

En la opción “Load”, creamos las cargas y condiciones de contorno vinculadas al análisis de la estructura. En este caso, se crea el caso de gravedad, del tipo “Gravity”:

Según las unidades que se trabajó, se considera un valor de la aceleración de la gravedad de -9.81m/s² en el componente 2 (dirección vertical).

A continuación, creamos la condición de empotramiento para el terreno, de modo que simulamos el comportamiento estático de la superficie donde se apoya la plataforma de rotación. Esta representación se puede apreciar en la siguiente imagen:

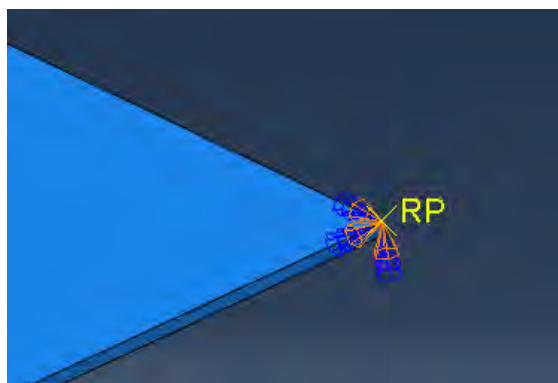


Figura N°7. 22 Empotramiento en superficie de apoyo (Terreno)

Así mismo, ingresamos impedimento de movimiento y giro en las direcciones X, Y, Z durante la etapa de gravedad para el punto inferior de la plataforma de rotación resaltado de color rojo en la Figura N°7.24:

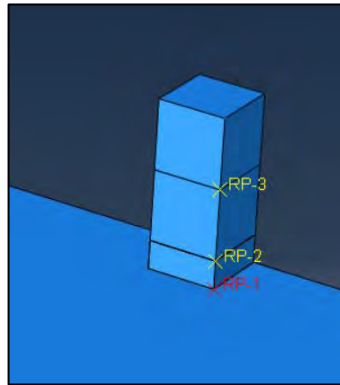


Figura N°7. 23 Empotramiento en bloque inferior

7.7. Mallado de los elementos

Al igual que en el modelo de calibración, lo siguiente a desarrollar es la división de los elementos en partes más pequeñas, de modo que se analicen estas y por consiguiente podamos deducir y comprender el comportamiento de toda la estructura. Para este caso, ya que se trabajarán con bloques cúbicos, se utilizará la discretización por hexaedros (C3D8R). Por ejemplo, para la piedra, consideramos un mesh de 0.125m. Lo último que se menciona se puede observar en las imágenes:

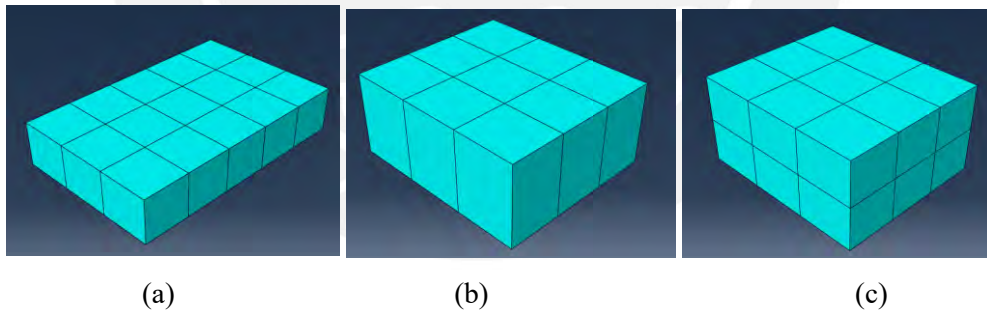


Figura N°7. 24 (a) Mesh piedra tipo 1 (b) Mesh piedra tipo 2 (c) Mesh piedra tipo 3

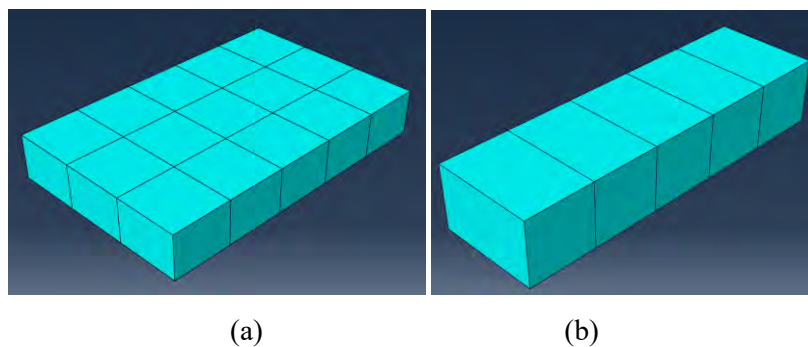


Figura N°7. 25 (a) Mesh piedra tipo 4 (b) Mesh piedra tipo 5

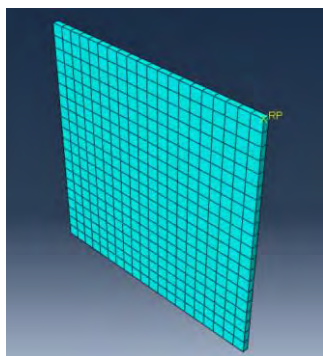


Figura N°7. 26 Mesh – terreno

7.8. Resultados

Al igual que en el caso del modelo de calibración, se analizarán los resultados obtenidos durante el desarrollo del análisis.

Resultados numéricos

Al igual que en el modelo de calibración, se mostrarán algunos cálculos obtenidos de forma manual con la finalidad de compararlos con los obtenidos en el Software Abaqus.

Densidad de la piedra: 2398.37 kg/m^3

Se resalta que los bloques analizados son bloques rígidos, es decir no sufriran deformaciones durante las interacciones que puedan presentar.

El bloque de piedra se ha dividido en 11 columnas (3 tipos). A continuación, se presenta la distribución de Columnas distribuidas en el muro:

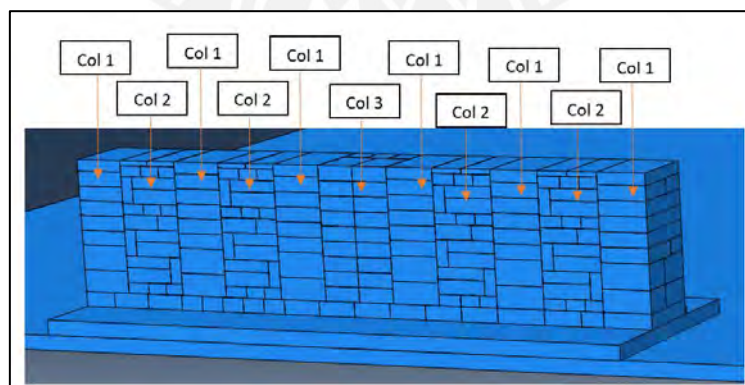


Figura N°7. 27 Distribución de bloques

A continuación, se muestran los pesos de los bloques y el peso total de toda la estructura.

Tabla N°7. 2 Peso de Columna 1

Pirca	Largo (m)	Alto (m)	Ancho (m)	Volumen (m)	Peso (Kg)
Tipo 1	0.32	0.10	0.50	0.016	38.37
Tipo 2	0.32	0.15	0.28	0.013	32.23
Tipo 3	0.32	0.17	0.28	0.015	36.53
Tipo 4	0.32	0.08	0.50	0.013	30.70
Tipo 5	0.15	0.10	0.50	0.008	17.99
Tipo 6	0.25	0.10	0.50	0.013	29.98
Tipo 7	0.21	0.10	0.28	0.006	14.10
Tipo 8	0.12	0.08	0.50	0.005	10.79
Tipo 9	0.13	0.08	0.50	0.005	11.69
Tipo 10	0.15	0.08	0.50	0.006	13.49
Tipo 11	0.20	0.35	0.50	0.035	83.94
Tipo 12	0.16	0.10	0.17	0.003	6.52
Tipo 13	0.32	0.10	0.20	0.006	15.35
Tipo 14	0.21	0.10	0.22	0.005	11.08
Tipo 15	0.32	0.15	0.22	0.011	25.33
Tipo 16	0.32	0.17	0.22	0.012	28.70
Tipo 17	0.16	0.10	0.16	0.003	6.14
Tipo 18	0.32	0.10	0.30	0.010	23.02
Tipo 19	0.24	0.10	0.50	0.012	28.78
Tipo 20	0.32	0.10	0.50	0.016	38.37
Tipo 21	0.24	0.10	0.33	0.008	19.00
Tipo 22	0.32	0.10	0.33	0.011	25.33

En total, conforman el muro 3 bloques de cada tipo de columna, por lo que se obtiene al final un peso total de 4796.74 kg.

Por otro lado, el modelo del Abaqus muestra la siguiente distribución de carga obtenidas por el peso de la estructura:

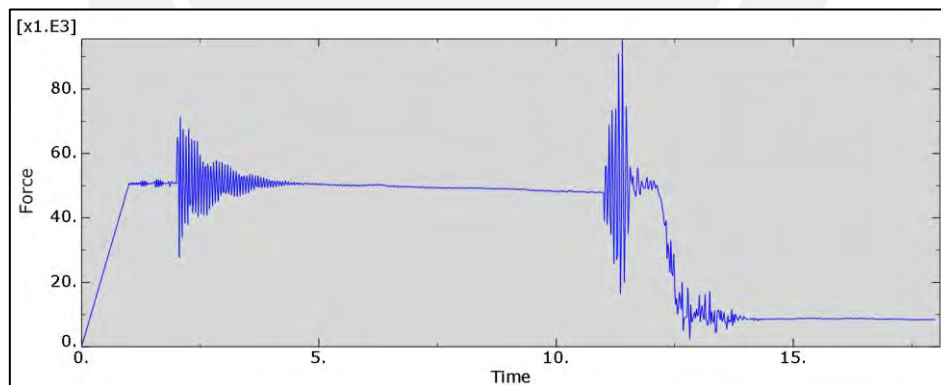


Figura N°7. 28 Fuerza entre plataforma y muro vs Tiempo

$$F \text{ máx.} = 47056 \text{ N} = 4796.74 \text{ kg}$$

El error obtenido en base a los resultados reales del proyecto es de $(16.72/4813.46 \cdot 100) = 0.35\%$, es decir, los resultados son muy cercanos considerando también que existe un leve deslizamiento entre los elementos que podrían generar diferencias con el modelo real.

A continuación, se procede a comparar puntualmente el efecto de la rotación de la plataforma metálica, el desplazamiento de un punto de la pirca y el tiempo de duración del ensayo:

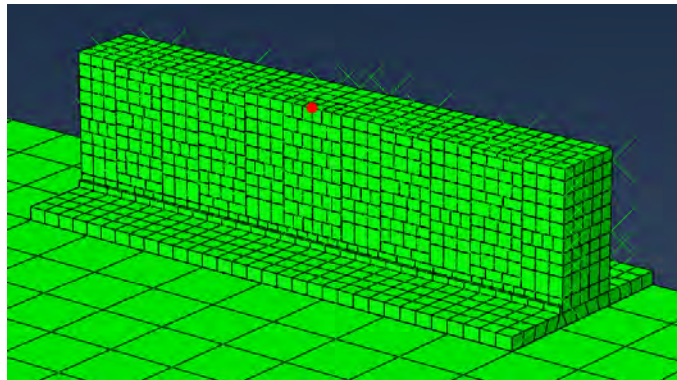


Figura N°7. 29 Punto de análisis

Los resultados obtenidos durante el ensayo en Abaqus son los siguientes para el punto de análisis:

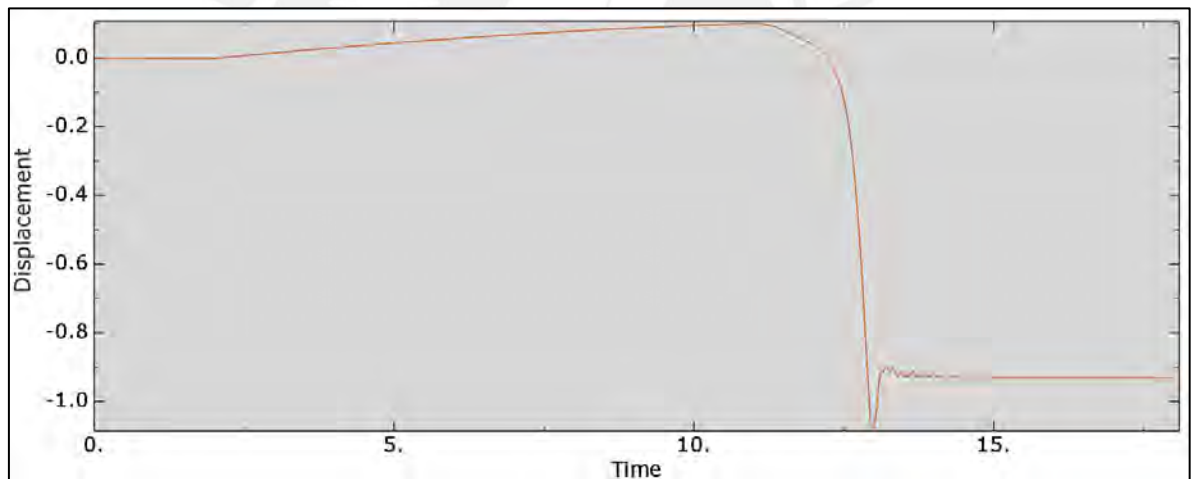


Figura N°7. 30 Punto de análisis – Desplazamiento en Y vs tiempo (Abaqus)

Comparación (Ensayo real vs Modelo Abaqus)

A continuación, se muestra la comparación de los desplazamientos obtenidos entre el ensayo real y el modelo desarrollado en Abaqus para los puntos superiores de control (1, 4 y 7):

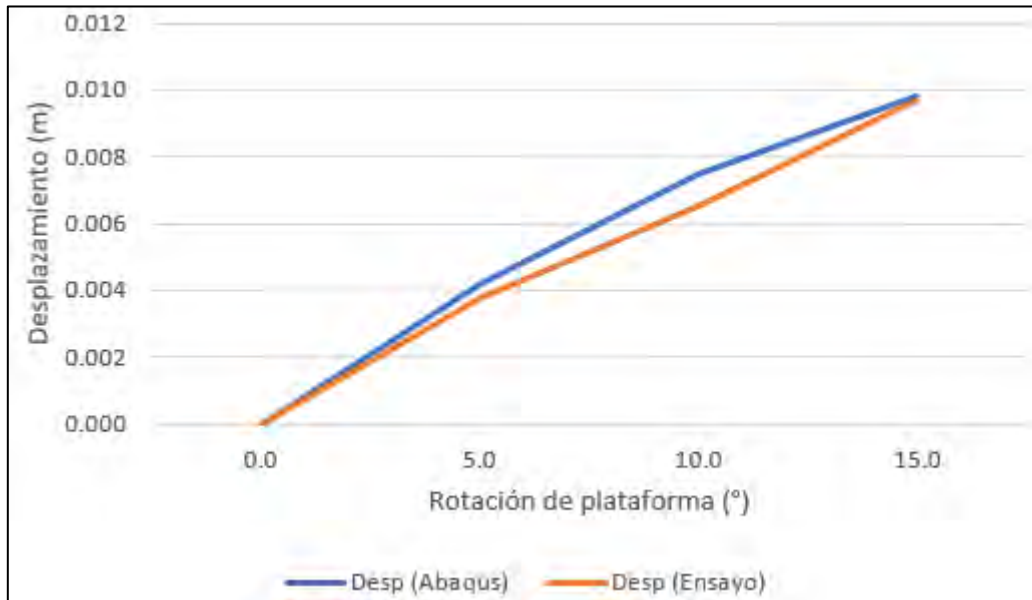


Figura N°7. 31 Comparación de desplazamientos (Punto 1)

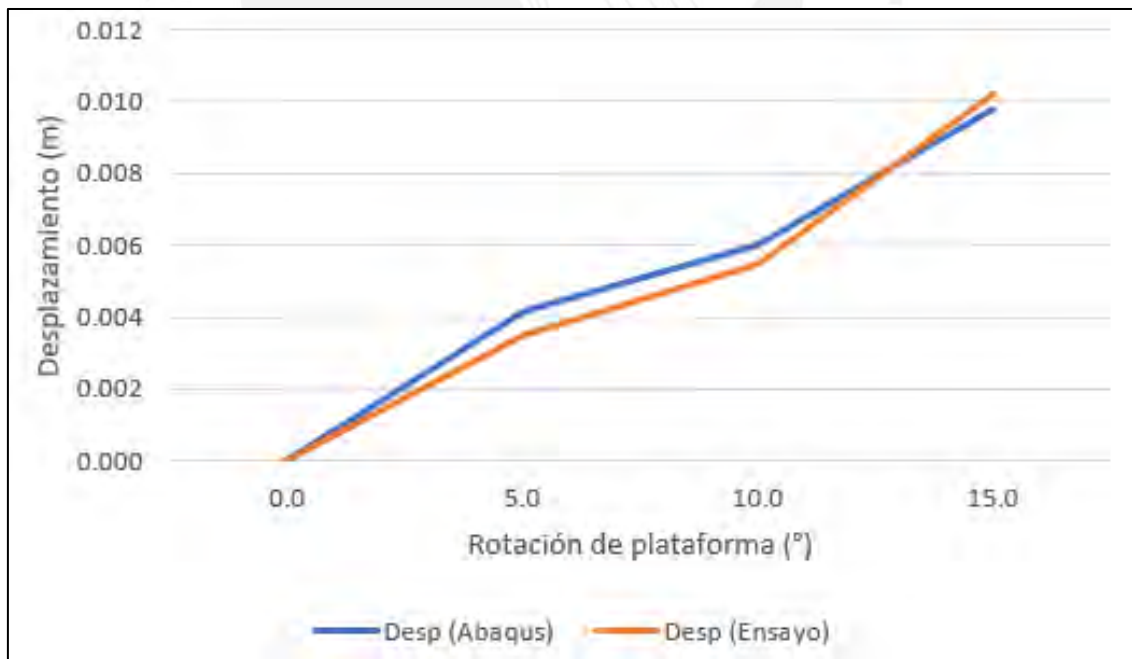


Figura N°7. 32 Comparación de desplazamientos (Punto 4)

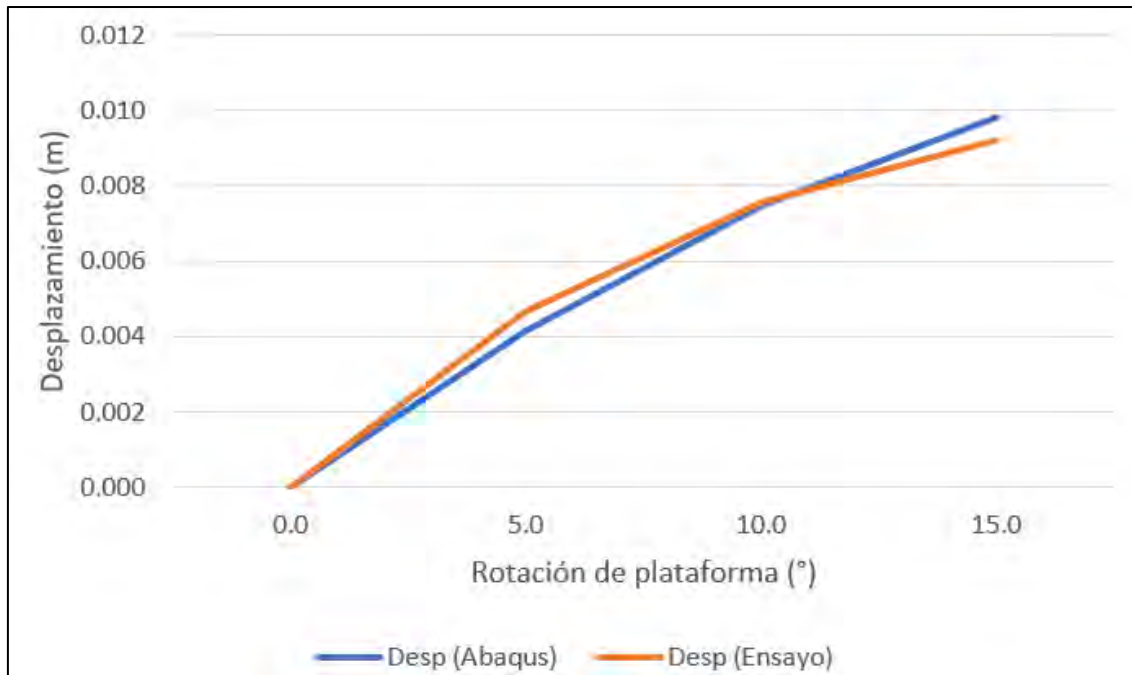


Figura N°7. 33 Comparación de desplazamientos (Punto 7)

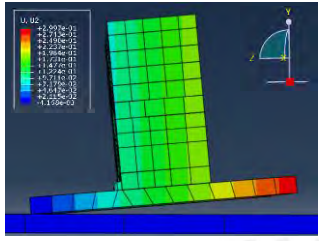
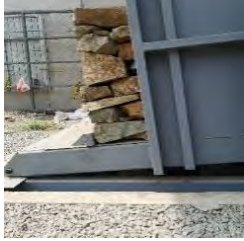
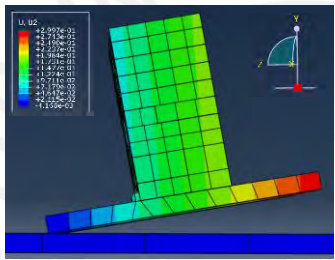

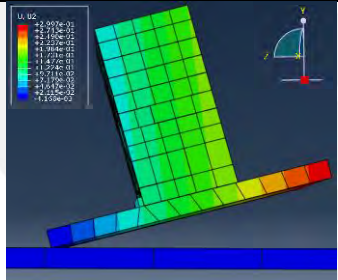

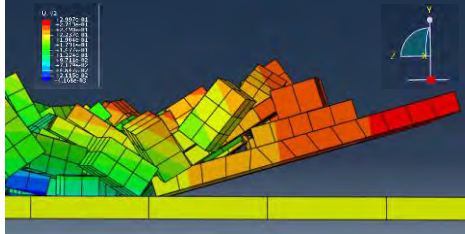

Como se observa en las Figuras N°7.35, 7.36 y 7.37, los desplazamientos obtenidos tanto para el ensayo real como para el modelo en Abaqus son aproximados.

Los factores que pueden generar diferencia están involucrados por las consideraciones en la construcción (piedras trituradas, amarres especiales, entre otros). Sin embargo, para un análisis general del muro de pirca, podríamos confirmar que el ensayo desarrollado es confiable y podremos calibrar futuros proyectos a partir de este modelo.

Comparación de modos de falla

A continuación, se muestra la comparación, para los diferentes ángulos de falla, del comportamiento de las pircas tanto para el modelo en Abaqus como para el modelo real:

Tabla N°7. 3 Modelo (Abaqus vs Ensayo Real) - Desplazamientos

Ángulo (°)	Modelo (Abaqus)	Ensayo Real
5.00	 <p>Figura N°7. 34 Modelo 5.00°</p>	 <p>Figura N°7. 35 Ensayo 5.00°</p>
10.00	 <p>Figura N°7. 36 Modelo 10.00°</p>	 <p>Figura N°7. 37 Ensayo 10.00°</p>
15.00	 <p>Figura N°7. 38 Modelo 15.00°</p>	 <p>Figura N°7. 39 Ensayo 15.00°</p>
16.60	 <p>Figura N°7. 40 Modelo 16.60°</p>	 <p>Figura N°7. 41 Ensayo 16.60°</p>

A continuación, se muestra la leyenda (Desplazamientos en el eje Y (mm)) y el sistema de referencia usados en el análisis de los diferentes ángulos de falla:

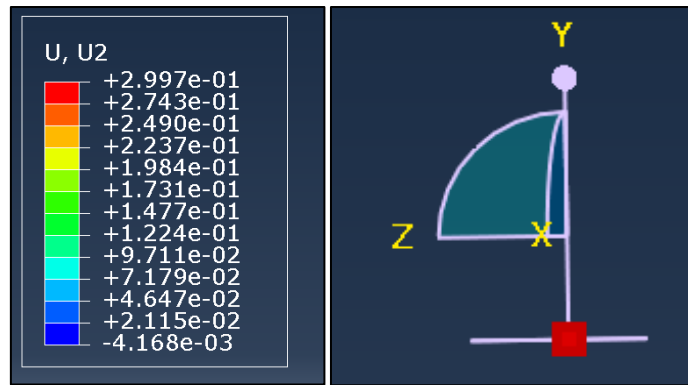


Figura N°7. 42 Leyenda y Sistema de referencia

Como se puede observar de la comparación de resultados, para los ángulos 5°, 10° y 15°, la forma en que se desplazan los elementos es la misma, no ocurre un aparente deslizamiento entre los bloques. Sin embargo, al llegar a los 16.6° de rotación en la plataforma, se produce la falla local de la estructura.

En lo que si se diferencian y se muestra en diferencia de colores en el Abaqus es en la posición de los bloques durante la rotación de la plataforma. Esta diferencia progresiva se presenta de manera distribuida y homogénea brindándonos información del desplazamiento continuo de los elementos en grupo.

La resistencia que tienen los bloques de piedra hasta alcanzar el ángulo de falla, es debido al coeficiente de fricción que existe entre los bloques. Si bien, en el modelo real, este coeficiente puede presentar variaciones por las condiciones de contacto, de humedad, de temperatura, entre otros factores, en el modelo se utilizó un valor promedio y adecuado (0.32) para el comportamiento del muro de pirca.

Las dimensiones de la plataforma se han mantenido tal y como se encuentran en el modelo físico, para de este modo simular con exactitud el contacto entre la base del muro de pirca y la plataforma.

Se puede observar también que el tope que se colocó en la parte inferior del muro (al igual que en el modelo real), brinda estabilidad al deslizamiento en la base de la estructura. Este tope presenta una altura de 0.10m, sin embargo, cumple con el objetivo de evitar una falla por desplazamientos no deseados.

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES

Modelo de Calibración

- Se evaluaron 3 casos de fricción para entender y evaluar el comportamiento de las pircas ($\mu=0.25, 0.30$ y 0.35).
- Los resultados obtenidos en los 3 modelos en Abaqus se igualan a los resultados obtenidos de manera manual correspondientemente para cada caso.

Evaluación de contacto entre pircas:

Tabla N°8. 1 Evaluación de contacto entre pircas

	Manual	Abaqus	
Caso	Fuerza Normal (kg)	Fuerza Normal (N)	Fuerza cortante (kg)
0.25	37.47	367.45	37.47
0.30	37.47	367.45	37.47
0.35	37.47	367.45	37.47

Evaluación de contacto entre pirca inferior y plataforma:

Tabla N°8. 2 Evaluación de contacto entre pirca inferior y plataforma

	Manual	Abaqus	
Caso	Fuerza Normal (kg)	Fuerza Normal (N)	Fuerza cortante (kg)
0.25	74.95	735.24	74.97
0.30	74.95	735.24	74.97
0.35	74.95	735.24	74.97

- Para los casos de coeficiente de fricción de 0.25 y 0.30, los valores de fuerza normal en las direcciones 2 y 3 (CNF2 Y CNF3) a partir de cierto momento iniciada la etapa de rotación, toma el valor de 0. Esto debido a que los sets creados para los análisis mostrados dependen de la unión entre pircas y la unión entre las pircas y la plataforma. Para esos casos, al desarrollarse la falla local, estos elementos se separan, por lo que los sets creados se anulan y gráficamente, los CNF2 y CNF3 toman el valor de 0.
- Para el caso de trabajar con un coeficiente de fricción de 0.31, los bloques no presentan una falla local ni global para el escenario de rotación. Sin embargo, para el caso en el que se utiliza un coeficiente de fricción de 0.30, los bloques presentan una falla global.
- Se predecía que el caso de fricción máxima (0.35) iba a generar el desplazamiento nulo de las pircas.

Modelo Definitivo

- Como se puede observar, tanto en el modelo de calibración como en el modelo definitivo, se obtuvieron resultados aproximados a los calculados de forma manual y los obtenidos en los ensayos reales. Esto puede deberse al tipo de mallado utilizado en los modelos, ya que mientras más pequeña sea esta, los resultados serán más consistentes, sin embargo, el tiempo de procesamiento será mayor.
- Para este proyecto, se buscó equilibrar el tiempo de procesamiento y la aproximación de resultados. Esto debido a que se maneja gran cantidad de información, por lo que el proceso de datos puede tardar horas de no lograr un equilibrio prudente. Esto es más que todo una recomendación a futuros proyectos.
- Podemos confirmar, en base a los resultados obtenidos en Abaqus y la comparación de resultados con el ensayo físico, que sí es posible modelar con elementos finitos el comportamiento de las pircas.
- Para lograr aun mucha más precisión en los resultados, podemos generar mucho más detalle en las zonas de contactos, en especial en aquellas donde existes piedras trituradas y colocadas para rellenar espacios.
- Este proyecto nos sirve como base para futuras investigaciones donde los principales temas a tratar sean el comportamiento de las pircas y la teoría de los elementos finitos.
- Para facilitar el análisis de un modelo a futuro, se recomienda trabajar con pircas de base más estable (no redondeadas ni con posibilidad de deslizamiento).

REFERENCIAS

- [1] BLONDET, Vargas, 1978. *Investigaciones sobre Vivienda Rural*, Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [2] Robert, J., & Sierra, A. (2009). *Construcción y refuerzo de la vulnerabilidad en dos espacios marginales de Lima*. Vol. 38, núm. 3, 595-621. Bulletin de l'Institut français d'études andines. Lima, Organismo Internacional
- [3] ZANELLI, Criss (2019). *Evaluación de Vulnerabilidad Sísmica de Pircas Mediante Modelación numérica en Elementos Discretos: Aplicación al caso de las Pircas en Carabaylo*, Lima. Tesis para optar el Grado de Magister en Ingeniería Civil. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- [4] DE LOS RIOS, Dora (2019). *Estudio Semi Empírico de Muros de Piedra Tipo Pirca utilizados como cimentación de viviendas en AA. HH de Lima Metropolitana*, Lima. Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniería Civil. Lima: Universidad Ricardo Palma, Facultad de Ingeniería.
- [5] HERNANDEZ, Alfonso (2014). *Simulación del comportamiento de paredes de fábrica de ladrillo bajo estados de carga biaxial mediante micro modelización*. Tesis para optar el Grado de Master en Ingeniería Civil. Barcelona, España: Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.
- [6] Escuela de Ingenieros Agrónomos (2011). *Muros de Contención*. Trujillo: Universidad de Castilla – La Mancha.
- [7] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 8th Ed. 2017. Publication Code: LRFD-8, IDBN 978-1-56051-654-5.
- [8] SIVAJUGAN, N. *Empujes de tierra y muros de contención (ppt)* www.u-cursos.cl. Consulta: 10 de octubre del 2021.

- [9] TORRES, Rafael (2008). *Análisis y Diseño de Muros de Contención de Concreto Armado*. Merida, Venezuela: Universidad de los Andes Facultad de Ingeniería.
- [10] GONZÁLEZ, Claudia, ROMO, Miguel (2013). Empuje dinámico en estructuras de retención con inclusión compresible. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XV (número 4). Recuperado el 15 de noviembre del 2021, de <https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432014000400003#:~:text=Este%20m%C3%A9todo%20permite%20obtener%20las,sistema%20similar%20sin%20inclusi%C3%B3n%20compresible.>
- [11] MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES (2018). *Manual de Puentes*. Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.
- [12] BALLÓN, Andrés, ECHENIQUE, Sosa (2019). *Análisis de estabilidad de muros de contención de acuerdo a las zonas sísmicas del Perú*. Tesis para optar el título de Ingeniero Civil. Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Facultad de Ingeniería.
- [13] VALENZUELA, Juan. *Diseño sísmico de Muros de Contención*. Apuntes de Clase (ppt) www.u-cursos.cl. Consulta: 11 de octubre del 2021.
- [14] MARTÍNEZ, R., Barrera, S. & GÓMEZ, P. (2010) *El método pseudo-estático de estabilidad en presas: un análisis crítico Obras y proyectos*, n° 9. 30-3/, Consulta: 20 de noviembre del 2021. <<https://scielo.conicyt.cl/pdf/oyp/n9/art04.pdf>>
- [15] SENCICO (2016). *Diseño Sismorresistente (E.030)*. Reglamento nacional de Edificaciones. Aprobada por decreto supremo N°011 – 2016 - vivienda, modificada con decreto supremo N°002-2014-Vivienda.
- [16] KRAMER, S. (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall. University of Washington.

- [17] SARAGONI, R. (1993) Análisis de riesgo sísmico para la construcción del Puerto de Valparaíso. 6tas jornadas chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica. Vol. 2.
- [18] NODA, S y UWADE, T. (1996) *Relation between seismic coefficient and ground acceleration for gravity quaywalls*, New Delhi, India: 6th World Conference on Earthquake Engineering,
- [19] BURGOYNE, J. (1853). *Revetment or retaining walls*. Corps of royal engineers, Vol 3.
- [20] COOPER, M (1986). *Deflections and failure modes in dry – stone retaining walls*. Ground Engineering, Vol.19 n°3. Consultado: 10 de Julio del 2010. <https://cdn.ca.emap.com/wp-content/uploads/sites/13/1986/11/1986-11_Pages_28-33.pdf>
- [21] Das, B. M., & León, J. C. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. México, eD. F DF: Cengage Learning. Séptima edición.
- [22] FORNÓNS, José María (1982). El método de los Elementos Finitos en la ingeniería de Estructuras. Edita: Barcelona: Universidad Politécnica de Barcelona.
- [23] L.R, Alejano, (2012). Geotechnique, Journal article, DOI: 10.1680/geot.10. P .112
- [24] SMOLJANOVIC, Hrvoje, BALIC, Ivan and TROGRILIC, Boris (2014). *Stability of regular stone walls under in-plane seismic*. Loading Acta Mech 226, 1881–1896 (2015). <<https://doi.org/10.1007/s00707-014-1282-2>>
- [25] CÓRDOVA, H. (2017). *Vulnerabilidad de los asentamientos de la periferia de Lima Metropolitana frente al cambio climático*. Reconociendo las geografías de América Latina y el Caribe, 209-233.

- [26] ZIENKIEWICZ, O.C, (1981). *El método de los elementos finitos*. Swansea, Universito of Wales.
- [28] CALAO, E. M., VÁSQUEZ, M. L., BECERRA, F., OSSA, J., ENRÍQUEZ, C., & FRESNEDA, E. (1999). *El método de elementos finitos y su aplicación en la investigación odontológica*. Revista Facultad de Odontología Universidad de Antioquia, 11(1).
- [29] FANG, Y. S., & CHEN, T. J. (1995). Taiwan: *Modification of Mononobe-Okabe theory*. *Geotechnique*, 45(1), 165-167. National Chiao Tung University.
- [30] COLAS, Anne-Sophie, MOREL, Jean-Claude & GARNIER, Denis. (2010). *Full-Scale fields trials to assess dry-stone retaining wall stability*. Vol. 32, Issue 5, May 2010, Pages 1215-1222 Consulta: 10 de Julio del 2021.
- [31] SUÁREZ, Diana (2021). *Cálculo de estructuras de sillería sometidas a acciones sísmicas mediante bloques rígidos; aplicaciones al puente romano de Alcántara*, Lima. Tesis para optar el Grado de Máster en Ingeniería Civil. Madrid: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, Escuela Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- [32] MONTERO, Javier (2013). *Optimización del Mallado de un Modelo de un Eje Fisurado*, Madrid. Trabajo de fin de grado en Ingeniería Mecánica. Madrid: UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID, Departamento de Ingeniería Mecánica.
- [33] CLEMENTE, Vladimir, & PÁRRAGA, Anggie (2020). *Informe de proceso constructivo de muros de piedra en junta seca*. Lima: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ, Facultad de Ciencias e ingeniería.
- [34] QUISPE, Elliot (2019). *Caracterización de la técnica de construcción y diseño de los muros de contención en las laderas de Carabayllo*. Lima: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ, Facultad de Ciencias e ingeniería.

- [35] ALCÁNTARA, Julio (2020). *Evaluación experimental del desempeño de muros de contención de piedra de junta seca usando especímenes de escala reducida*. Lima: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ, Facultad de Ciencias e ingeniería.
- [36] RAMOS, Vladimir (2021). *Evaluación del Riesgo Sísmico de Viviendas sobre pircas en un Asentamiento Humano en el Distrito de Villa María del Triunfo*. Lima: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ, Facultad de Ciencias e ingeniería.
- [37] CHÁVEZ, Eladio (2018). *Mitigación de desastres ante la vulnerabilidad sísmica en el asentamiento humano paraíso del distrito de San Juan de Lurigancho 2018*. Lima: UNIVERSIDAD CESAR VALLEJO, Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
- [38] MONTES, Paul. (2017). *La vulnerabilidad física del empircado de viviendas en laderas urbanizadas A.H.31, Carabayllo*, Lima: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ, Facultad de Arquitectura y Urbanismo.
- [39] PAUCAR, Walter. (2014). *Aplicación de la piedra de Miraflores como sistema constructivo en el proyecto hospedaje turístico del distrito de Miraflores – Yauyos –* Lima: UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ, Facultad de Arquitectura.
- [40] PAUCAR, Walter. (2014). *Análisis técnico-económico entre un muro de gaviones y un muro de suelo reforzado como solución de estabilidad de taludes en la carretera Choropampa – Cospan, Cajamarca*: UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS, Facultad de Ingeniería.
- [41] RIVAS, Gram. (2019). *Diseño de equipo para ensayos de pircas ante cargas laterales estáticas*. Lima: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ, Escuela de Posgrado.

- [42] BALLÓN, Andrés, ECHENIQUE, Jose. (2017). *Análisis de estabilidad de muros de contención de acuerdo a las zonas del Perú*. Lima: UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS, Facultad de Ingeniería.
- [43] BARDALES, Héctor (2013). *Conservación de Puentes de Piedra en el Perú: Criterios para su intervención Estructural*. Lima: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ, Escuela de Posgrado.
- [44] ALIAGA, Diego (2020). *Análisis de estabilidad estática de un talud crítico en el distrito de Magdalena por el método de Elementos Discretos (DEM)*. Lima: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ, Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- [45] SILVA, Jonathan (2014). *Estudio mediante Elementos Finitos de la interacción Suelo-Tubería en tuberías enterradas debido a una falla del suelo de tipo lateral*. Lima: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ, Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- [46] ENCISO, Fernando (2014). *Procedimiento para el análisis dinámico de estructuras usando el método de los Elementos Finitos*. Lima: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ, Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- [47] URRUTIA, Pablo (2008). *Análisis Dinámico de Estabilidad por Elementos Finitos de los Taludes de la Costa Verde en el Distrito de Miraflores*. Lima: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ, Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- [48] XAMIR, Jorge, KURT, Soncco (2019). *Modelamiento no lineal geométrica de vigas utilizando la teoría mejorada de primer orden mediante el método de elementos finitos*. Lima: UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS, Facultad de Ingeniería.

[49] MORALES, Márquez (2002). *Diseño de una máquina tribológica para pruebas de desgaste abrasivo severo*. Lima: INSTITUTO POLITÉCNICO SEVERO. SEPI-ESIME-Zacatenco.

[50] NORDBORG, Lundberg, ARTEAGA, Lopez (2014). La generación de ruido en el contacto entre la rueda y el carril – efectos no lineales. IX CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA. VALVIDIA, CHILE, 01 al 03 de diciembre.

