



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

**CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS**

TESIS

**“Modelación numérica de modelos constitutivos de mampostería
antigua.”**

PRESENTA

ING. DAVID MUÑOZ RENTERÍA

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL EN
EL ÁREA DE ESTRUCTURAS**

TUTOR

DR. HÉCTOR ÁNIMAS RIVERA

COMITÉ TUTORIAL

DR. JESÚS PACHECO MARTÍNEZ

AGUASCALIENTES, AGS., MAYO DEL 2016

Centro de Ciencias del Diseño
y de la Construcción

DR. EN ING. MARIO EDUARDO ZERMEÑO DE LEÓN
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E

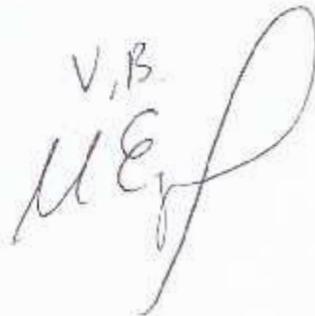
Por medio del presente, como Tutor designado del estudiante **ING. DAVID MUÑOZ RENTERÍA** con ID 93369, quien realizó la tesis titulada: "**Modelación numérica de modelos constitutivos de mampostería antigua**" y con fundamento en el Art. 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO** para que él pueda proceder a imprimirla y así continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su amable consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E
"SE LUMEN PROFERRE"
Aguascalientes, Ags., a 16 de mayo de 2016


DR. HÉCTOR ÁNIMAS RIVERA
TUTOR DE TESIS


DR. JESÚS PACHECO MARTÍNEZ
COTUTOR DE TESIS

V.B.


c.c.p.- M. en Ing. José Luis López López – Secretario de Investigación y Posgrado del CCDC
c.c.p.- Dr. Jesús Pacheco Martínez – Secretario Técnico de la Maestría en Ingeniería Civil
c.c.p.- Dr. Héctor Ánimas Rivera – Tutor de Tesis
c.c.p.- Ing. David Muñoz Rentería – Alumno
c.c.p.- Archivo



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

Centro de Ciencias del Diseño
y de la Construcción

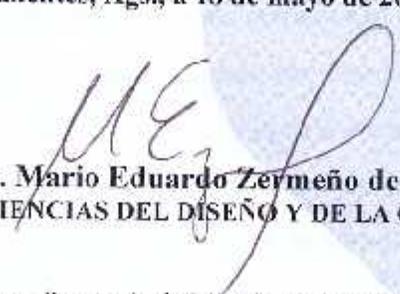
OFICIO No. CCDC-D-132-2016
ASUNTO: Conclusión de Tesis

DRA. GUADALUPE RUIZ CUELLAR
DIRECCIÓN GENERAL DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
PRESENTE.

Por medio de este conducto informo que el documento final de tesis titulado: **“Modelación numérica de modelos constitutivos de mampostería antigua”**. Presentado por el sustentante: **ING. DAVID MUÑOZ RENTERÍA** con ID **93369** egresado de la **MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL**, cumple las normas y lineamientos establecidos institucionalmente. Cabe mencionar que el autor cuenta con el voto aprobatorio correspondiente.

Para efecto de los trámites que al interesado convengan se extiende el presente, reiterándole las consideraciones que el caso amerite.

A T E N T A M E N T E
“SE LUMEN PROFERRE”
Aguascalientes, Ags., a 18 de mayo de 2016


Dr. en Ing. Mario Eduardo Zeymeño de León
DECANO DEL C. DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

- c.c.p.- M. en Ing. José Luis López López – Secretario de Investigación y Posgrado del CCDC.
- c.c.p.- Dr. Jesús Pacheco Martínez – Secretario Técnico de la Maestría en Ingeniería Civil.
- c.c.p.- Dr. Héctor Ánimas Rivera – Tutor de Tesis.
- c.c.p.- Ing. David Muñoz Rentería – Egresado de la Maestría en Ingeniería Civil.
- c.c.p.- Lic. Delia Guadalupe López Muñoz – Jefe Sección de Certificados y Títulos.
- c.c.p.- Archivo

MEZL/rbv

AGRADECIMIENTOS

Muchas gracias a mi pastor ya que yo confié en él y se hizo su voluntad como lo dice en su palabra:

“El que teme a Dios hará buenas obras; y quien observa exactamente la justicia, poseerá la sabiduría;

Porque ella le saldrá al encuentro cual madre respetable,
y cual virgen desposada lo recibirá.

Lo alimentará con pan de vida y de inteligencia, y le dará a beber el agua de ciencia saludable, y fijara en él su morada, y él será constante.

Y la sabiduría será su sostén, y no verá jamás confundido, sino que será ensalzado entre sus hermanos, y en medio de la Iglesia le abrirá la boca, llenándolo del espíritu de sabiduría y de inteligencia, y revistiéndolo de un manto que lo cubrirá de gloria.

Ha de colmarlo de consuelo y de alegría, y le dará en herencia un eterno renombre.

Los hombres necios nunca la lograran; mas los prudentes saldrán a su encuentro; no le verán los necios, porque están lejos de la soberbia y del dolo.

Los hombres mentirosos no se acordarán de ella; mas los veraces conversarán con ella, y andarán de bien en mejor hasta que vean la cara de Dios.

No está bien la alabanza de ella en la boca del pecador, porque de Dios es la sabiduría, y con la sabiduría anda acompañada la alabanza a Dios; y rebotará en los labios del hombre fiel, y el Señor soberano se la infundirá.

No digas: en Dios consiste que la sabiduría este lejos de mí; no hagas tu lo que el aborrece, y la tendrás.

Tampoco digas: Él me ha inducido al error; pues no necesita él que haya hombres impíos.

Aborrece el Señor toda maldad, la cual no puede ser amada de aquellos que lo temen.

Creó Dios desde el principio al hombre, y lo dejó en manos de su consejo.

Le dio además sus mandamientos y preceptos.

Si guardando constantemente la fidelidad que le agrada, quisieres cumplir los mandamientos, ellos serán tu salvación.

Ha puesto delante de ti el agua y el fuego; extiende tu mano a lo que más te agrade.

Delante del hombre están la vida y la muerte, el bien y el mal, lo que escogiere le será dado.

Porque la sabiduría de Dios es grande, y su poder fuerte e irresistible; y está mirando a todos sin cesar.

Tiene puesto el señor sus ojos sobre los que lo temen y él observa todas las acciones de los hombres.

A ninguno ha mandado obrar impíamente, y a ninguno ha dado un tiempo o permiso para pecar.

Porque no le es grato a él el tener hijos desleales e inútiles.”(Eclesiástico 15,1-22).

También tengo que agradecerle a mi esposa Laura Guadalupe que me apoyado y gracias a ella soy lo que soy, a mis pequeños grandes maestros David Alejandro, Ángel Tadeo y María José que con tan solo su esencia me enseña grandes cosas, también a mi papá que estoy orgulloso de él por su corazón tan bueno y noble, a mi mamá por que ha sido una guerrera incansable, a mi hermano Ricardo que es muy buena persona y lo quiero mucho y a su prometida, a todos mis familiares en especial a mi abuelo que fue un maestro y un padre, me enseñó a trabajar y se despidió este 2016 en carne pero está en espíritu, a mi abuela que la quiero, a mis tíos y tías que siempre me han apoyado, primos y sus hijos; a todos mis amigos que todos los guardo en mi corazón y me han apoyado por mencionar algunos: Ing. Jorge Mercado, Ing. Carlos González, Ing. Diego Hernández, Lic. Teófilo Díaz, Maestra Claudia, Esmeralda, Rubén, Silvia y a todos los del grupo de Amor y Servicio, CONACYT por la beca otorgada para poder estudiar la maestría, a la Universidad Autónoma de Aguascalientes por ser una gran institución, a mis profesores en especial a los que les nace enseñar como el Maestro Emilio Mendoza, al Maestro Reyna Valdivia, A los amantes del saber cómo el Dr. Ortiz, también a Ma. Soto por prestarme su computadora, al futuro Ing. Sergio Herrada por su apoyo, al Maestro Raudel por su apoyo, A todos mis profesores por su enseñanza en especial a mis tutores el Dr. Héctor Ánimas Rivera y Dr. Jesús Pacheco Martínez por su tiempo y disponibilidad, a todos mis compañeros que me brindaron su amistad.

DEDICATORIAS

A Dios que gracias a sus enseñanzas pude seguir a delante y a pesar de que me costó lágrimas no me soltó de su mano, todo se gana en esta vida y esto me costó mucho ganármelo, a mi esposa que siempre me apoyo, a mis hijos que siempre me llenaban de vida, a mis padres que se esforzaron por darme lo mejor, todos los que han estado a mi lado, amigos, familiares y los profesores por su dedicación y enseñanzas.



ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE FIGURAS	3
ÍNDICE TABLAS	9
ÍNDICE GRAFICAS	11
Resumen.....	12
ABSTRACT.....	13
Introducción.....	14
Planteamiento del problema	20
Justificación del problema	21
Objetivo general:.....	22
Objetivos particulares:	22
1.- Marco teórico:	24
1.1.- Estrategias de modelación de mampostería	24
1.2.-Comportamiento de la mampostería compuesta por piezas y material de unión.....	26
1.2.1.-La interface unidad-mortero.....	26
1.2.2.-Comportamiento compresión de la mampostería	29
1.2.3.-Comportamiento a cortante de la mampostería.....	29
1.2.4.- Comportamiento tracción.....	31
1.3.- Características Mecánicas de la Mampostería	33
1.4.- Clasificación de la mampostería	38
1.5. Método de índice de calidad de la mampostería llamado MQI.....	41
1.5.2.- Propiedades de dimensión de la piedra y ladrillo (SD).....	42
1.5.3.- Forma de la piedra y ladrillo (SS). De guijarros a piedras	43
1.5.4.- Características horizontales de las camas (HL).....	43
1.5.5.- Características Horizontales de las camas (HL).....	44
1.5.6.- Características del conjunto vertical (VI)	45
1.5.7.-. Propiedades mecánicas del mortero (MM)	46
1.6- Análisis lineal y no lineal en Abaqus.	48

2.- Etapa experimental.....	50
2.1.- Cilindros de mortero de cal.....	52
2.1.1.- Espécimen 1: Características	54
2.1.2.- Espécimen 2: Características	55
2.1.3.- Espécimen 3: Características	57
2.2.- Cilindro de mortero con cantera	59
2.2.1.- Espécimen 4: Características	62
2.2.2.- Espécimen 7: Características	63
2.2.3.- Espécimen 8: Características	65
2.3.- Determinación de la adherencia por esfuerzo cortante entre el mortero y las piezas de mampostería	67
2.4.- Cubos de mortero	70
3.5 Coeficiente de fricción entre el mortero y la cantera	72
3.- Modelación Tridimensional	76
3.1 Introducción:	76
3.2 Modelación numérica:	76
3.3.- Para modelación en Abaqus	79
3.4.- Enmallado	86
4.-Resultados.....	88
4.1.- Primer modelo de ensayo (Muro 1).....	88
4.2 Segundo Modelo de ensayo (muro 2).....	94
4.3 Tercer Modelo de ensayo (muro 3)	98
4.4 Cuarto Modelo de ensayo (muro 4).....	103
4.5 Quinto Modelo de ensayo (muro 5).....	111
5.-Discusión de Resultados	119
Conclusiones	123
Glosario	125
Referencias.....	126
Anexo A.- Obtención del coeficiente de fricción	A

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1 Catedral de Reims, Roma (Francia)	14
Figura 2.- Parlamento Inglés , Londres (Inglaterra)	16
Figura 3.-Puente Overtoun, Dumbarton (Escocia)	17
Figura 4.- Puente de Salces, Cantabria (España)	17
Figura 1.1 modelos de mampostería(Lourenco, 2002)	25
Figura 1.1.1 el comportamiento a la tensión de la interface unidad mortero de la mampostería (R. V. D. Pluijm, 1992)	27
Figura 1.1.2.- Área de unión entre el mortero y los ladrillos de arcilla de la mampostería de las pruebas de (R. V. D. Pluijm, 1992).....	27
Figura 1.1.3.- Comportamiento de mampostería bajo esfuerzo cortante con precompresión y sin precompresión (Viviescas, 2009)	28
Figura 1.1.4.- Definición de fricción y dilatación ángulos(Lourenco, 1996)	28
Figura 1.1.5.- Pila para prueba de compresión(Distrito Federal, 2004).....	29
Figura 1.1.6.- Envoltente de rotura obtenida por (Mann & Müller, 1982)	30
Figura 1.1.7.- Modo de fallo de falta de fricción (Mann & Müller, 1982)	30
Figura 1.1.8.- Modo de fallo por unidad(Mann & Müller, 1982)	31
Figura 1.1.9.- Modo de fallo por compresión(Mann & Müller, 1982)	31
Figura 1.1.10.- Envoltentes de rotura sin insuficiencia a fricción(Mann & Müller, 1982)	31
Figura 1.1.11.- Diagramas experimentales típicos tensión-desplazamiento por tensión en la dirección paralela a las juntas horizontales (Backes, 1985),	32
Figura 1.1.12.- Variación de la adhesión unidad-mortero con el contenido de humedad de las unidades al momento de la puesta en obra (Sinha, 1967; citado por Hendry, 1990)	32
Figura 1.1.13.- Ejemplo de comportamiento fuera de plano de alta, media y baja calidad. Mampostería de alta calidad tiene un comportamiento monolítico fuera de plano. En la mampostería de calidad media hay una falta de comportamiento monolítico fuera de plano. Mampostería de mala calidad produce una desintegración completa de la pared. (Antonio Borri & De Maria, 2009).....	35
Figura 1.1.14.- Parámetros mecánicos de acuerdo a los tipos de estructuras de la mampostería(MIT , 2009)	36
Figura 1.1.15.- Clasificación de mampostería con respecto a la pared secciones (morfología). a) Hoja solitaria, b) de doble hoja, c) de tres hojas(Binda & Cardani, 2007)	38

Figura 1.1.16.- Tipo de falla de junta según la morfología de la piedra(A. Borri et al., 2015);(Antonio Borri & De Maria, 2009)	44
Figura 1.1.17.- Tipo de junteo horizontal según la piedra(A. Borri et al., 2015;Antonio Borri & De Maria, 2009)	44
Figura 1.1.18.- Tipo de junteo vertical según la piedra(A. Borri et al., 2015);(Antonio Borri & De Maria, 2009)	45
Figura 1.1.19.- Comportamiento fuera de plano de un panel de pared simple, doble y triple hoja.(A. Borri et al., 2015)	46
Figura 1.1.20 resorte lineal y no lineal (SIMULIA, 2013)	48
Figura 2.0.1 Arena cernida y no cernida	51
Figura 2.0.2 Prueba de aumento de diámetro	51
Figura 2.1.1 perdida de agua especímenes de mortero	53
Figura 2.1.2 Desmolde y caracterización de especímenes de mortero	53
Figura 2.1.3 Puesto a ensayo de Especímen	54
Figura 2.1.4 <i>Puesto a ensayo de Especímen</i>	56
Figura 2.1.5 Puesto a ensayo de Especímen	58
Figura 2.2.1 Hechura de especímenes de mortero con cantera	60
Figura 2.2.2 Especímen fracturado	61
Figura 2.2.3 Detección de huecos	61
Figura 2.2.4 Puesto a ensayo de Especímen	62
Figura 2.2.5 Puesto a ensayo de Especímen	63
Figura 2.2.6 Puesto a ensayo de Especímen	66
Figura 2.3.1 Texturización de los ladrillos de cantera	68
Figura 2.3.2 Cabeceado de bloques	68
Figura 2.3.3 Armado de muestras para ensayo	69
Figura 2.3.4 Ensayo de muestras en prensa	69
Figura 2.3.5 Junta de adherencia ensayada	70
Figura 2.4.1 Cubos de mortero	71
Figura 2.5.1 Bloque de mortero y molde	72
Figura 2.5.2 Cálculo de fricción por deslizamiento	73

Figura 2.5.2 muestra de especímenes ensañados	74
Figura 3.2.1 muestras de modelos de mampostería regular y mampostería irregular sacados de la catedral	76
Figura 3.2.2. Dimensiones de juntas en mampostería regular y mampostería irregular	77
Figura 3.2.3. Dimensiones de juntas en modelos hipotéticos de mampostería regular y mampostería irregular	77
Figura 3.2.4 Modelo todo de sillar	78
Figura 3.2.5 Modelo de mampostería irregular con relleno	78
Figura 3.2.6 Modelo de mampostería regular con relleno	79
Figura 3.3.1 Modelación del mortero	80
Figura 3.3.2 Modelación del relleno de la mampostería	81
Figura 3.3.3 interacción entre las piedras y el mortero, a su vez entre el mortero y el relleno	85
Figura 4.4.1 enmallado de los modelos	86
Figura 4.4.2 aplicación de carga y restricciones en los modelos	87
Figura 4.4.3 muro 1 esfuerzo de von mises en el mortero y en la cantera en el incremento 569	88
Figura 4.4.4 muro 1 esfuerzo de von mises en la cantera incremento 569	89
Figura 4.4.5 muro 1 deformaciones en cm en sentido de la aplicación de la carga en el incremento 569	89
Figura 4.4.6 muro 1 deformación en cm en sentido de la aplicación de la carga en el incremento 5	90
Figura 4.4.7 muro 1 deformación en cm en sentido de la aplicación de la carga en el incremento 15	91
Figura 4.4.8 muro 1 deformación en cm en sentido de la aplicación de la carga en el incremento 18	91
Figura 4.4.9 muro 1 deformación en cm en sentido de la aplicación de la carga en el incremento 27	92
Figura 4.4.10 muro 1 deformación en cm en sentido de la aplicación de la carga en el incremento 30	92
Figura 4.4.11 muro 1 deformación en cm en sentido de la aplicación de la carga en el incremento 32	93

Figura 4.4.12 muro 1 deformación en cm en sentido de la aplicación de la carga en el incremento 569	93
Figura 4.5.1 esfuerzos de von mises en (kg/cm ²) de muro 2 de la piedra y el mortero en el incremento 322	94
Figura 4.5.2 esfuerzos de von mises en (kg/cm ²) de muro 2 en el relleno en el incremento 322	94
Figura 4.5.3 esfuerzos de von mises en (kg/cm ²) de muro 2 en el mortero en el incremento 1	95
Figura 4.5.4 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 2 incremento 11	96
Figura 4.5.5 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 2 incremento 56	96
Figura 4.5.6 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 2 incremento 78	96
Figura 4.5.7 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 2 incremento 85	97
Figura 4.5.8 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 2 incremento 88	97
Figura 4.5.9 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 2 incremento 92	97
Figura 4.5.10 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 2 incremento 322	98
Figura 4.6.1 Esfuerzos de Von Mises en (kg/cm ²) del muro 3 en la piedra, en el relleno y mortero incremento 59	98
Figura 4.6.2 Esfuerzos de Von Mises en (kg/cm ²) del muro 3 en el relleno incremento 59	99
Figura 4.6.3 Esfuerzos de Von Mises en (kg/cm ²) del muro 3 en el mortero incremento 59 y 6	99
Figura 4.6.4 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 3 incremento 11	100
Figura 4.6.5 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 3 incremento 15	101
Figura 4.6.6 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 3 incremento 18	101

Figura 4.6.7 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 3 incremento 19	101
Figura 4.6.8 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 3 incremento 20	102
Figura 4.6.9 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 3 incremento 23	102
Figura 4.6.10 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 3 incremento 30	102
Figura 4.6.11 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 3 incremento 39	103
Figura 4.7.1 Esfuerzos de Von Mises en (kg/cm ²) en cantera y mortero en el muro 4 en el incremento 305	104
Figura 4.7.2 Esfuerzos de Von Mises en (kg/cm ²) en relleno en el muro 4 en el incremento 305	104
Figura 4.7.3 Esfuerzos de Von Mises en (kg/cm ²) en mortero en el muro 4 en el incremento 1	105
Figura 4.7.4 Esfuerzos de Von Mises en (kg/cm ²) en la piedra en el muro 4 en el incremento 96	105
Figura 4.7.5 Esfuerzos de Von Mises en (kg/cm ²) en el relleno en el muro 4 en el incremento 96	106
Figura 4.7.6 Esfuerzos de Von Mises en (kg/cm ²) en el relleno en el muro 4 en el incremento 305	106
Figura 4.7.7 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 4 incremento 31	107
Figura 4.7.8 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 4 incremento 8	108
Figura 4.7.9 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 4 incremento 31	108
Figura 4.7.10 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 4 incremento 37	108
Figura 4.7.11 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 4 incremento 54	109
Figura 4.7.12 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 4 incremento 59	109

Figura 4.7.13 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 4 incremento 72	110
Figura 4.7.14 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 4 incremento 108	110
Figura 4.7.15 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 4 incremento 165	110
Figura 4.7.16 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 4 incremento 305	111
Figura 4.8.1 Esfuerzos de Von Mises en (kg/cm ²) en la piedra en el muro 5 en el incremento 53	111
Figura 4.8.2 Esfuerzos de Von Mises en (kg/cm ²) en el mortero en el muro 5 en el incremento 53	112
Figura 4.8.3 Esfuerzos de Von Mises en (kg/cm ²) en el relleno en el muro 5 en el incremento 53	113
Figura 4.8.4 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 5 incremento 1	114
Figura 4.8.5 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 5 incremento 2	115
Figura 4.8.6 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 5 incremento 3	115
Figura 4.8.7 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 5 incremento 4	116
Figura 4.8.8 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 5 incremento 53	116
Figura 4.8.9 Esfuerzos de Von Mises en (kg/cm ²) de la cantera, del mortero y en el relleno en el muro 4 en el incremento 31	117
Figura A	A

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1.1.- tabla para determinar la resistencia a la compresion de la mampostería con la resistencia del mortero (NTC, 2008)	33
Tabla 1.2 parámetros mecánicos de la mampostería de acuerdo a la tipología (NTC, 2008)	34
Tabla 1.3 tabla extendida de (NTC, 2008) con coeficientes de corrección derivado de (Kržan, Bosiljkov, & R, 2011) para diferentes tipos de mampostería	37
Tabla 1.4.- Clasificación de los principales elementos para la identificación del tipo de mampostería (Binda & Cardani, 2007)	40
Tabla 1.5.- Clasificación para el caso II(A. Borri et al., 2015;A Borri & De Maria, 2009)	42
Tabla 1.6.- Clasificación para el caso III(A. Borri et al., 2015;A Borri & De Maria, 2009)	43
Tabla 1.7.- Clasificación para el caso IV(A. Borri et al., 2015;A Borri & De Maria, 2009)	43
Tabla 1.8.- Clasificación para el caso V (A. Borri et al., 2015;A Borri & De Maria, 2009)	44
Tabla 1.9.- Clasificación para el caso VI (A. Borri et al., 2015;A Borri & De Maria, 2009)	45
Tabla 1.10.- Clasificación para el caso VII(A. Borri et al., 2015;A Borri & De Maria, 2009)	46
Tabla 1.11.- Valores del MQI(A. Borri et al., 2015;A Borri & De Maria, 2009)	47
Tabla 1.12.- Condiciones del MQI(A. Borri et al., 2015;A Borri & De Maria, 2009)	48
Tabla 2.1.1 Tabla de resultados Esfuerzo-Deformación Espécimen 1	54
Tabla 2.1.2 Tabla de resultados Esfuerzo-Deformación Espécimen 2	56
Tabla 2.1.3 Tabla de resultados Esfuerzo-Deformación Espécimen 3	58
Tabla 2.2.1 Tabla de resultados Esfuerzo-Deformación Espécimen 4	62
Tabla 2.2.2 Tabla de resultados Esfuerzo-Deformación Espécimen 7	64
Tabla 2.2.3 Tabla de resultados Esfuerzo-Deformación Espécimen 8	66
Tabla 2.2.4 Esfuerzos ultimo de adherencia entre el mortero de cal y la cantera.	70
Tabla 2.2.5 Tabla de resultados de los cubos de mortero	71
Tabla 2.2.5 Tabla de resultados Deslizamiento	74
Tabla 3.1.1 Esfuerzo-Deformación para caracterización del mortero	80
Tabla 3.1.2 Esfuerzo-Deformación para caracterización del relleno	81
Tabla 3.1.3 Serie de tablas de corrección de parámetros en cantera	84

Tabla 4.1.1 Esfuerzo vs Deformación muro 1	90
Tabla 4.1.2 Esfuerzo vs Deformación del muro 2	95
Tabla 4.1.3 Esfuerzo vs Deformación muro 3	100
Tabla 4.1.4 Esfuerzo vs Deformación muro 4	107
Tabla 4.1.5 Esfuerzo vs Deformación muro 5	113
Tabla 4.1.5.1 Esfuerzo vs Deformación muro 5 modificada	117
Tabla 5.1.1 características mecánicas de los modelos	120



ÍNDICE GRAFICAS

Gráfica 2.1.1 Gráfica de resultados Esfuerzo-Deformación Espécimen 1	55
Gráfica 2.1.2 Gráfica de resultados Esfuerzo-Deformación Espécimen 2	57
Gráfica 2.1.3.- Gráfica de resultados Esfuerzo-Deformación Espécimen 3	59
Gráfica 2.1.4 Gráfica de resultados Esfuerzo-Deformación Espécimen 4	63
Gráfica 2.1.5 Gráfica de resultados Esfuerzo-Deformación Espécimen 7	65
Gráfica 2.1.6 Gráfica de resultados Esfuerzo-Deformación Espécimen 8	67
Grafica 3.1.1 Características mecánicas de rocas Riolita, Basalto y otras rocas volcánicas(Montoro, 1970)	82
Grafica 3.1.2 Curva de Esfuerzo-Deformación Unitaria en cantera (Meli et al., 2002)	82
Grafica 3.1.3 Graficas de esfuerzo-deformación de la cantera para cada uno de los modelos	85
Gráfica 4.1.1 Esfuerzo-Deformación de mampostería irregular con relleno y juntas de 2 cm.	114
Gráfica 4.1.2 Esfuerzo-Deformación de mampostería irregular con relleno y juntas de 2 cm. Modificada	118
Gráfica 5.1.1 Esfuerzo-Deformación de los 5 modelos de mampostería.	119
Gráfica 5.1.2 Esfuerzo-Deformación de los 5 modelos de mampostería limitada en el eje “x” a 0.01	120

Resumen

Para identificar la seguridad de los edificios patrimoniales es necesario conocer las características mecánicas de la mampostería (módulo elástico, resistencia última y relación de Poisson).

En algunos casos los muros de mampostería de edificios patrimoniales exteriormente lucen similares, sin embargo interiormente se cuenta con un arreglo o acomodo diferente en sus elementos, lo cual hace que el muro tenga un comportamiento diferente. De igual manera, existe gran cantidad de diversidad de arreglos exteriores con diferente acomodo, lo cual también hace que cambien sus características mecánicas.

El propósito de este estudio es obtener las características mecánicas de los muros de mampostería antigua con diferentes acomodos para obtener las características mecánicas de los elementos que lo conforman, por medio de modelos no lineales de elemento finito en Abaqus; así obtener sus características mecánicas la mampostería de edificios patrimoniales con los diferentes acomodos de los elementos que la conforman.

ABSTRACT

In order to assess the level of safety of heritage buildings it is necessary to know the mechanical properties of the masonry (Young's modulus, ultimate strength and the Poisson's coefficient).

In some cases the walls of masonry heritage buildings outwardly look similar, but inside it has a different arrangement in its elements, which makes the wall as a structural elements to have a different behavior. Similarly, there is a lot of variety of external accommodations with different arrangement, which also makes change their mechanical characteristics.

The purpose of this study is to obtain the mechanical characteristics of ancient masonry walls with different properties for the mechanical characteristics of the elements that conform them, by using finite element nonlinear models in Abaqus and to obtaining their mechanical properties masonry heritage buildings with different properties of the elements that comprise it.

Introducción

El patrimonio cultural edificado se constituye principalmente por edificios fabricados de distintos materiales, siendo la mampostería el principal de ellos. Debido a la importancia que tienen ante la sociedad, su valor intrínseco está dado por su importancia cultural y social; que cada vez incrementa su valor. A razón de dichos factores, su conservación se vuelve vital para la sociedad actual, ya que por su valor como legado cultural y evidencia de los pueblos, influye positivamente en las naciones contribuyendo económicamente mediante el turismo, el cual se ha convertido en una de las industrias de mayor importancia a nivel mundial después de la década de los setentas (Bowitz & Ibenholt, 2009).



Figura 1 Catedral de Reims, Roma (Francia)

Saber la integridad de una estructura en relación con su edad, uso y su nivel de seguridad para resistir eventos es importante y necesario. En vista del número apreciable de las estructuras antiguas todavía hoy en uso existe una atención grande respecto a la preservación y a asuntos de rehabilitación. Tres factores principales están en general involucrados a las extensiones diferentes en relación con la decadencia de materiales de construcción: 1) la intemperie de materiales expuestos al ambiente; 2) procesos de bio-deterioro; y 3) acción humana y contaminación antrópica (Herrera & Videla, 2003).

La mampostería histórico generalmente tiene un comportamiento elástico-frágil (en comparación a otros materiales de construcción), con una resistencia mucho menor a la tensión y al cortante con respecto a la de compresión, pero nunca despreciable (Turnsek & Cacovic, 1971). Sin embargo, bajo compresión y cizalla, el comportamiento de mortero es dúctil, no lineal en alto grado y puede gobernar el comportamiento general de la mampostería. Por lo tanto, para los propósitos de modelización numérica de mampostería histórica, ésta se considera como un material elástico lineal, mientras que dependiendo de la combinación de carga aplicada, el comportamiento global de la mampostería pueden considerarse como no lineal” como lo menciona(Krzan, Gostic, Serena, & Vlatko, 2015).

Las estructuras de mampostería complejas e inciertas muestran una gran variedad de escenarios de daños posibles cuyos síntomas requieren la selección de la tipología de la información apropiada para ser detectado(Ruocci, 2009).

Existe una gran complejidad en cuanto al análisis de dichas estructuras, ya que cuentan con una gran heterogeneidad de materiales. Existe mampostería con fragmentos de roca y aglutinantes de diversos orígenes y características. EL análisis se complica por el hecho de que los edificios patrimoniales se construyeron en un lapso de tiempo de varios años, ya que esto causa que sea muy difícil hacer una caracterización representativa de las propiedades de los diversos materiales usados. Inclusive en muchos casos dichos edificios se edificaron con técnicas constructivas distintas en un lapso de tiempo de varios años que duró su construcción.

Cabe mencionar que, bajo compresión y cortante, el comportamiento de mortero es dúctil, fuertemente no lineal y puede gobernar el comportamiento general de la mampostería.

Por lo tanto, para los propósitos de modelización numérica de mampostería histórica, esta se consideran como un material elástico lineal, mientras que dependiendo de la combinación de esfuerzos aplicados; el comportamiento global de la mampostería pueden considerarse como no lineal” (Krzan et al., 2015).



Figura 2.- Parlamento Inglés , Londres (Inglaterra) 2

El adoptar técnicas de análisis no lineal mediante modelos de elementos finitos (FEM), es una herramienta que podría ayudar describir exactamente el comportamiento de una estructura real (Fajfar & Eeri, 2000); (Foti, Ivorra, & Sabba, 2012); (Foti, Diaferio, Giannoccaro, & Mongelli, 2012); (Foti, Diaferio, Giannoccaro, & Mongelli, 2011); (Foti, Gatulli, & Potenza, 2014).

La caracterización no lineal ha sido aplicada de manera limitada a la tipificación de estructuras reales, debido a la gran cantidad de datos requeridos y a la dificultad del problema. Sin embargo, la información sobre el comportamiento no lineal de una estructura puede ser esencial en la evaluación del comportamiento dinámico de una estructura real. Además, los cambios en las propiedades dinámicas de la estructura, incluyendo desviaciones de la linealidad, pueden proporcionar evidencia cuantitativa de que los fenómenos perjudiciales que transgredan a la estructura (Fragonara Z., et al., 2012).

El Código Italiano (NTC, 2008) que utiliza valores tabulados, incluyendo rangos suficientemente ancho de tipologías, sustituyendo a los pocos datos experimentales adquiridos. Por otra parte, el enfoque de es muy " amplio ".



Figura 3.-Puentes Overtoun, Dumbarton (Escocia) 3

Debido a que los factores de alta seguridad deben ser utilizados cuando esta se emplea, se toma el riesgo de hacer los resultados obtenidos con un análisis de elementos finitos dinámico inútil, con efectos negativos obvios, también desde un punto de vista económico.



Figura 4.- Puente de Salces, Cantabria (España)

Actualmente, el diseño y cálculo de estructuras está siendo innovado por los expertos: por un lado es relativamente sencillo analizar estructuralmente nuevas estructuras, pero es mucho más difícil comprobar que los modelos numéricos de las estructuras existentes representan fielmente su comportamiento; Es muy compleja la labor de investigar y adquirir todos los datos necesarios para continuar el análisis más completo en el rango no lineal.

Dada la heterogeneidad de los diversos componentes que integran la estructura, resulta complicado definir sus características mecánicas con el objetivo de asegurar la fiabilidad y

la estabilidad del edificio histórico. Por lo tanto, las características mecánicas de los materiales que componen la estructura se puede definir con precisión solamente mediante trabajo experimental. (Lenza & Ghersi, 2011; Foti, 2013; Pagnini, Vicente, Lagomarsino, & Varum, 2011; Silveira, Varum, & Costa, 2013).

Aunque numerosas campañas experimentales de estudios de mampostería (Vintzileou, 2014), se han llevado a cabo en todo el mundo, todavía hay varios aspectos del comportamiento de las estructuras de mampostería histórica que permanecen insuficientemente investigadas. Incluso en su comportamiento bajo compresión no está documentado adecuadamente (en términos de resistencia, deformabilidad, el comportamiento post-pico, etc.).

Adicionalmente es conocido que éstas construcciones antiguas no fueron construidas en una sola etapa, si no que fueron agregando secciones de construcción en diferentes tiempo. Esto ocasiona que en una sola edificación veamos diferentes formas y métodos de construcción lo que hace más complejo la caracterización de resistencia mecánica de los componentes.

El Código italiano (NTC, 2008) tiene un enfoque para obtener la resistencia mecánica de la mampostería que es muy “ amplio ” y desde el punto de vista económico resulta ser poco viable.

Existen métodos como MQI (método cualitativo para evaluación de la mampostería) el cual se puso en práctica en los códigos de diseño de Umbría en 2003. Sin embargo estos métodos te dan una aproximación porque están pensados para todos los distintos tipos de mampostería y sus clasificaciones son en grandes grupos.

Ninguna estructura se escapa de las acciones gravitacionales por eso es importante el comprender de manera adecuada el comportamiento a la compresión de la mampostería histórica. Pudiéramos pensar que no es importante debido a que si observamos que la estructura está de pie significa que resiste adecuadamente. Sin embargo existen fenómenos como por ejemplo el de reblandecimiento por efecto de la intemperie, lo cual ocasiona la degradación de las componentes (rocas y mortero) y por lo tanto pérdida de resistencia.

Respecto a muros de mampostería de edificios patrimoniales, resulta sumamente complejo determinar su comportamiento debido a que el sistema constructivo empleado en su hechura, tiene influencia significativa en la resistencia y en la manera en que se deforma el muro ante las cargas que soporta.



Planteamiento del problema

En algunos casos los muros de mampostería de edificios patrimoniales exteriormente lucen similares, sin embargo interiormente tienen un arreglo o acomodo de sus elementos diferente lo cual hace que el muro tenga un comportamiento también diferente.

El problema abordado en este trabajo consiste en determinar cómo influye este acomodo o arreglo interior de muros de mampostería en las características mecánicas de la mampostería (módulo elástico, resistencia última y relación de Poisson) tomando como un espécimen a un muro de dimensiones dadas.



Justificación del problema

Se justifica el estudio de este problema debido a que para hacer un análisis del comportamiento de un edificio patrimonial de mampostería, es necesario alimentar el modelo numérico generado para ello, con datos “macroscópicos” que resulten de considerar no solo el material (mampostería, si no el acomodo y las variaciones de las características de la mampostería a lo largo y ancho del interior de los elementos estructurales del edificio patrimonial.

Debido a que los muros de carga son el elemento estructural más recurrente en los edificios patrimoniales, y también el más simple de ellos, se ha escogido para este trabajo el análisis de la influencia del cómo está construido un muro de mampostería en su comportamiento mecánico-estructural.

Objetivo general:

Determinar la influencia del sistema constructivo “interior” de un muro de mampostería en su comportamiento mecánico-estructural.

Objetivos particulares:

- a). Caracterizar en laboratorio las propiedades de un mortero y rocas similares a lo usado en los muros de la Catedral de Aguascalientes,
- b). Realizar el análisis no lineal del comportamiento estructural de especímenes de muros de mampostería de 1.4 m de ancho, 2 m de largo y 3 m de alto; variando el sistema constructivo “interior” sometidos a cargas axiales.
- c). De los resultados de los análisis del comportamiento estructural de los muros elaborar curvas de esfuerzo vs deformación para determinar el módulo de elasticidad y la resistencia última de los especímenes, relacionando estos datos con los sistemas constructivos “interiores” de los muros.



1.- Marco teórico:

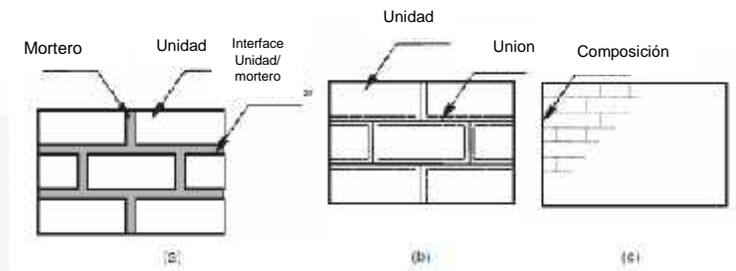
1.1.- Estrategias de modelación de mampostería

Es sabido que la mampostería es un material compuesto que consiste en unidades de ladrillos o bloques de piedra y mortero que trabaja como aglutinante, la debilidad material de unión de las unidades individuales en su interfaz. Estos dos materiales tienen distintas características propias. Por lo tanto la representación de los materiales para la simulación de la estructura global es un poco compleja. Los criterios para su representación numérica se centran principalmente en dos maneras diferentes de modelado a saber, el modelado de los componentes individuales de las unidades y el mortero llamado micro-modelado y modelado simplificado considerando albañilería como un material compuesto llamado macro-modelo. Dependiendo del tipo y tamaño de la estructura y el resultado que se pretende las siguientes estrategias se toman en consideración (Lourenco, 2002).

Micro-modelos detallados: Aquí el concepto radica en la representación de las unidades y los morteros como elementos continuos, mientras que la unidad de interfaz de mortero está representada por elementos discontinuos. En este enfoque, los parámetros de los materiales tales como el módulo de Young, el coeficiente de Poisson y propiedades inelásticas (opcional) de tanto la unidad de mortero y se tienen en cuenta. La interfaz, que es en realidad un plano de potencial grieta / deslizamiento, se modela con rigidez inicial maniquí para evitar la interpenetración de la continuum. Por lo tanto esto permite que la acción combinada de la unidad, el mortero y la interfaz para ser estudiado con una lupa (Figura 1.1a).

Micro-modelado Simplificados: En este enfoque, cada conjunto que consta de mortero y la unidad de dos interfaces de mortero, considerados como un interfaz de promedio, mientras que las unidades se expanden con el fin de mantener la geometría sin cambios (Figura 1.1b). Masonería se considera, pues, como un conjunto de bloques elásticos unido por los posibles fracturas / deslizamiento líneas en las articulaciones. Dado que el efecto de Poisson del mortero no es incluido en este tipo de modelado, se pierde la exactitud de los resultados.

Macro-modelos: Enfoque Macro de modelado se simplifica mediante la abolición de la dificultad de características distintivas de la unidad, el mortero y la interfaz de unidad de mortero, y la introducción del concepto de homogénea continuo anisotrópico en la mampostería como un todo (Figura 1.1c).



a) micro-modelos detallados, b) micro-modelos simplificados, c) macro-modelos
Figura 1.1 modelos de mampostería(Lourenco, 2002)

Los métodos mencionados anteriormente varían en su aplicación dependiendo del tamaño de la estructura y el propósito del análisis. Cuando el comportamiento global de la mampostería estructural es requerido, un método aplicable es el macro-modelado. Macro-modelado es aplicable para las estructuras que consisten de pared sólida y lo suficientemente grandes dimensiones tales que la variación de tensión a través o a lo largo de su ser es insignificante (puede considerarse como uniforme). Pero macro-modelado tiene una gran ventaja sobre micro-modelado en el sentido de que consume menos el tiempo y la memoria del equipo para llevar a cabo un análisis óptimo.

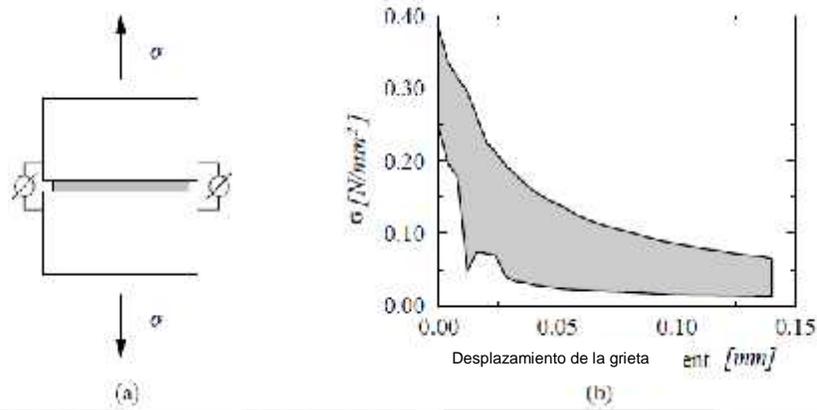
1.2.-Comportamiento de la mampostería compuesta por piezas y material de unión

1.2.1.-La interface unidad-mortero

Esta clase de mampostería se compone por piezas, un material que unir las piezas y la interface entre el material de unión y las piezas que con frecuencia la interface es el eslabón más débil. A su vez dos esfuerzos caracterizan el comportamiento de la interface piezas y la unión; el primero está asociado con la falla a tensión del mortero y el segundo está asociado con la falla al cortante.

1.2.1.1.- Modo I de falla a tensión

(R. V. D. Pluijm, 1992) hizo pruebas de deformación controlada en pequeñas muestras de mampostería de arcilla sólida y unidades de calcio silicato, como se muestra en la Figura 1.1.1. Estas pruebas llevaron a una curva exponencial para el reblandecimiento por tensión (modo I) de la energía de fractura G_f' se encuentra entre estos valores 0,005 a 0.02 [Nmm / mm²] para una fuerza de adherencia a la tensión comprendida entre 0,3 y 0.9 [N /mm²], de acuerdo a la combinación unidad-mortero. Esta energía de fractura es la energía necesaria para crear un área unitaria de una grieta a lo largo de la interfaz de unidad de mortero. (R. van der Pluijm, 1999)concluye de acuerdo a las anteriores pruebas que el área de fractura no es el total de la sección si no como lo marca la Figura 1.1.2 también concluyo que la resistencia no lineal a tensión de la mampostería está ligada a la interface mortero y unidad.



- a) Espécimen de prueba
- b) experimento esfuerzo-desplazamiento de la grieta resultados de ladrillo de arcilla de la mampostería (el área sombreada representa la envolvente de los tres ensayos)

Figura 1.1.1 el comportamiento a la tensión de la interface unidad mortero de la mampostería (R. V. D. Pluijm, 1992)

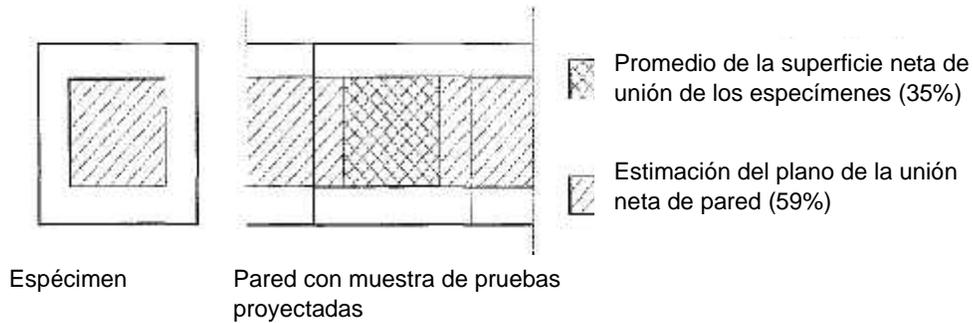


Figura 1.1.2.- Área de unión entre el mortero y los ladrillos de arcilla de la mampostería de las pruebas de (R. V. D. Pluijm, 1992).

1.2.1.1.- Modo II de falla

El modo II (falla por cortante) G''_f es un modo típico de falla de la mampostería según (Viviescas, 2009) como se muestra en la Figura 1.1.3 bajo $\theta = 0$. Que a su vez la falla por cortante se puede relacionar con un modelo friccionante de Coulumb (Lourenco, 1996) como se puede observar en la Figura 1.1.4.

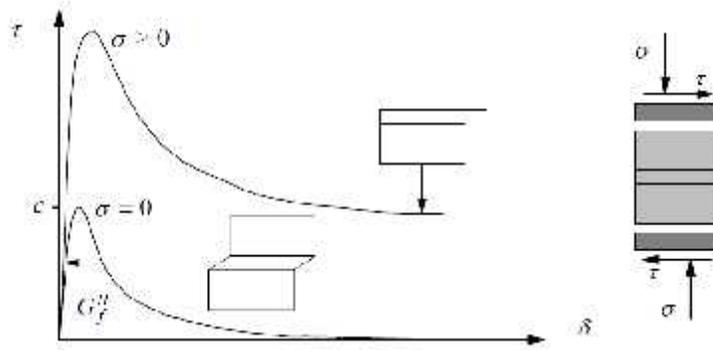
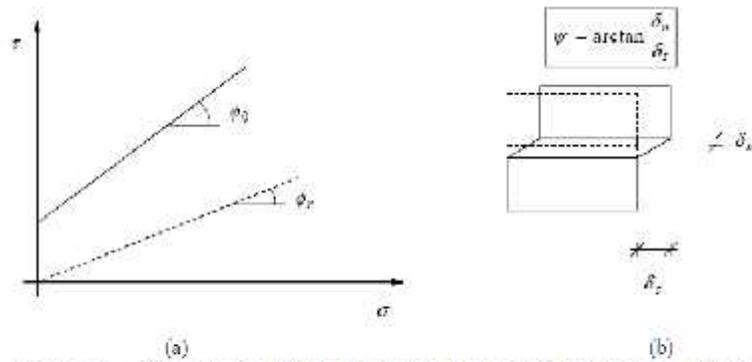


Figura 1.1.3.- Comportamiento de mampostería bajo esfuerzo cortante con precompresión y sin precompresión (Viviescas, 2009)



a) La ley de fricción de Coulumb, con el ángulo de fricción inicial y residual; b) Ángulo de dilatación como la elevación de las unidades colindantes sobre esfuerzo cortante

Figura 1.1.4.- Definición de fricción y dilatación ángulos(Lourenco, 1996)

1.2.2.-Comportamiento compresión de la mampostería

La manera más aceptada por la comunidad científica de obtener la resistencia a compresión de la mampostería es por medio de piletas como se muestra en la Figura 1.1.5 es una manera fácil de obtener la resistencia a la compresión mampostería a comparación de otros procedimientos, y una vez obteniendo está el reglamento (Distrito Federal, 2004) te permite encontrar el comportamiento ante otras cargas, bajo la carga de compresión es un comportamiento más significativo de la mampostería.

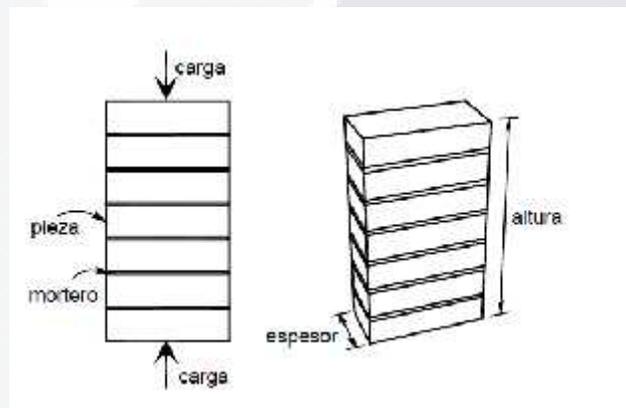


Figura 1.1.5.- Pila para prueba de compresión(Distrito Federal, 2004)

1.2.3.-Comportamiento a cortante de la mampostería

(Mann & Müller, 1982) crearon una envolvente de rotura que relaciona las tensiones de cizallamiento y las tensiones axiales (σ), donde la divide en tres diferentes zonas como se muestra en la Figura 1.1.6: La primera zona se caracteriza por la insuficiencia de fricción que se caracteriza por tener bajas tensiones axiales y tensiones de cizallamiento más altas como se muestra en la Figura 1.1.7. La segunda zona es los agrietamientos diagonales que pasan por las unidades, que se caracteriza por tener altas tensiones axiales y tensiones de cizallamiento como se muestra en la Figura 1.1.8 y la tercera zona caracteriza por el fallo de compresión en el que las paredes de esta categoría son sometido a tensiones axiales muy elevadas que exceden la resistencia a la compresión de las unidades de la mampostería como se muestra Figura 1.1.9.

(Mann & Müller, 1982) también argumentaron que la primera zona (insuficiencia de fricción) no existe si existe un mortero de buena calidad y unidad con baja resistencia como se muestra en la Figura 1.1.10.

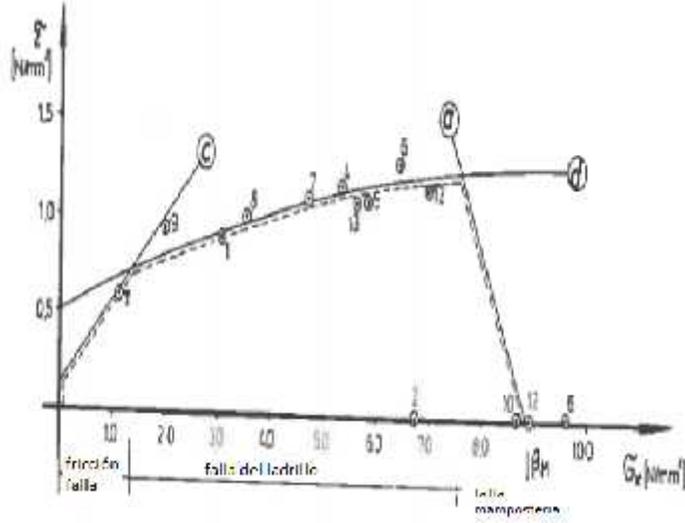


Figura 1.1.6.- Envolvente de rotura obtenida por (Mann & Müller, 1982)



Figura 1.1.7.- Modo de fallo de falta de fricción (Mann & Müller, 1982)



Figura 1.1.8.- Modo de fallo por unidad(Mann & Müller, 1982)

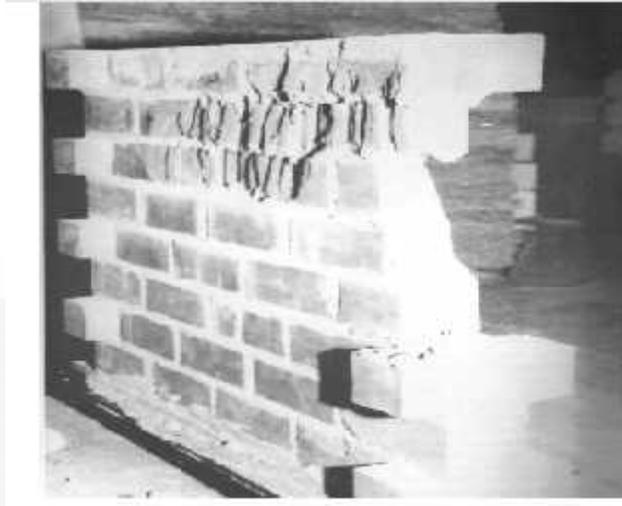


Figura 1.1.9.- Modo de fallo por compresión(Mann & Müller, 1982)

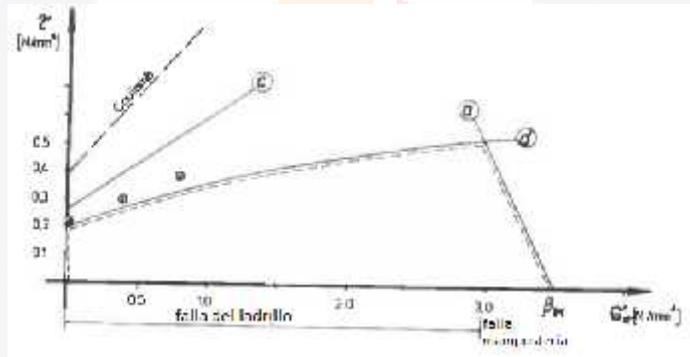
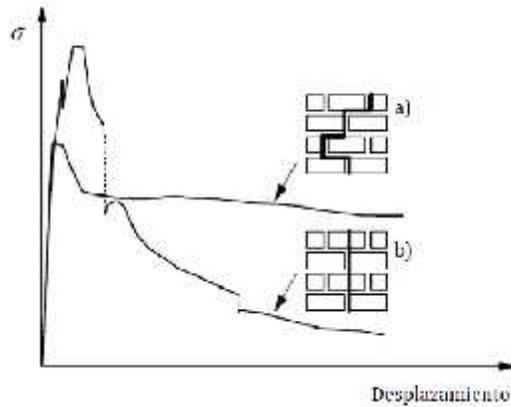


Figura 1.1.10.- Envoltentes de rotura sin insuficiencia a fricción(Mann & Müller, 1982) 15

1.2.4.- Comportamiento tracción

(Backes, 1985) una campaña experimental para estudiar la tracción uniaxial paralela a las juntas horizontales estos se realizaron sobre probetas de cuatro hiladas, obteniendo curvas carga-desplazamiento mediante control por desplazamiento Figura 1.1.11 en la cual se Observó dos tipos de fallo dependiendo de la resistencia relativa entre unidades y mortero: en (a) se observa uno diagonal escalonado a través de las juntas horizontales y verticales, y (b) otro con fisuras prácticamente verticales a través de unidades y juntas verticales.



(a) Falla por diagonal escalonada a través de juntas horizontales y verticales; (b) Falla vertical a través de juntas verticales y piezas.

Figura 1.1.11.- Diagramas experimentales típicos tensión-desplazamiento por tensión en la dirección paralela a las juntas horizontales (Backes, 1985), 16

Los mecanismos de adherencia entre unidad y mortero pueden determinar la resistencia a tracción de la mampostería. A pesar de conocer el mecanismo de fallo aún no han sido completamente entendidos. Se conoce que se trata de procesos físico-químicos en que interviene la estructura de poros de ambos materiales es crítica.

Además también depende de la clasificación de la arena en el mortero si es una arena con muchos finos es desfavorables para la adhesión. En el caso de ladrillos de arcilla la humedad de las piezas en el momento de pegar los ladrillos es importante: piezas muy secas o saturadas llevan a adherencia muy baja, como se puede concluir a partir de la Figura 1.1.12. (Sinha, 1967; citado por Hendry, 1990)

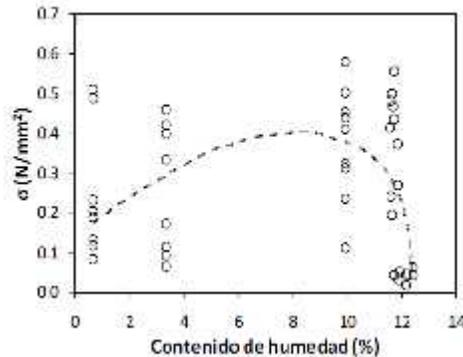


Figura 1.1.12.- Variación de la adhesión unidad-mortero con el contenido de humedad de las unidades al momento de la puesta en obra (Sinha, 1967; citado por Hendry, 1990)

1.3.- Características Mecánicas de la Mampostería

El código Italiano (MIT, 2009) en ausencia de pruebas en sitio y pruebas de laboratorio permite las características mecánicas de mampostería usando parámetros prescritos, La (NTC, 2008) clasifican el mortero de acuerdo con la resistencia a la compresión promedio o a su composición .

Para los elementos naturales de la piedra cuadrada, es entonces posible determinar la resistencia a la compresión característica, f_{bk} , de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$f_{bk} = 0,75 \cdot f_{bm}$$

Donde f_{bm} es la resistencia a la compresión promedio obtenido a partir de pruebas experimentales. Conocer el valor de f_{bk} y la clase de mortero utilizado en una fábrica, es posible definir la resistencia a la compresión de la mampostería de la Tabla 1.1

f_{bk} (N / mm ²)	Mortero			
	M 15	M 10	M 5	M 2.5
2.0	1.0	1.0	1.0	1.0
3.0	2.2	2.2	2.2	2.0
5.0	3.5	3.4	3.3	3.0
7.5	5.0	4.5	4.1	3.5
10.0	6.2	5.3	4.7	4.1
15.0	8.2	6.7	6.0	5.1
20.0	9.7	8.0	7.0	6.1
30.0	12.0	10.0	8.6	7.2
>40	14.3	12.0	10.4	-

Tabla 1.1.- tabla para determinar la resistencia a la compresion de la mampostería con la resistencia del mortero (NTC, 2008)

La (NTC, 2008) también da valores de parámetros mecánicos de acuerdo a la tipología de la albañilería como se ve en Tabla 1.2

Tipología Albañilería	f_m (N / mm ²) Mínimo máximo	T_0 (N / mm ²) Mínimo máximo	E (N / mm ²) Mínimo máximo	G (N / mm ²) Mínimo máximo	w (kN / m ³)
Con bloques de piedra suaves (toba, calcarenitas)	2.40	0,042	1260	420	16
Con bloques de piedra cuadrados	8.00	0.12	3200	940	22

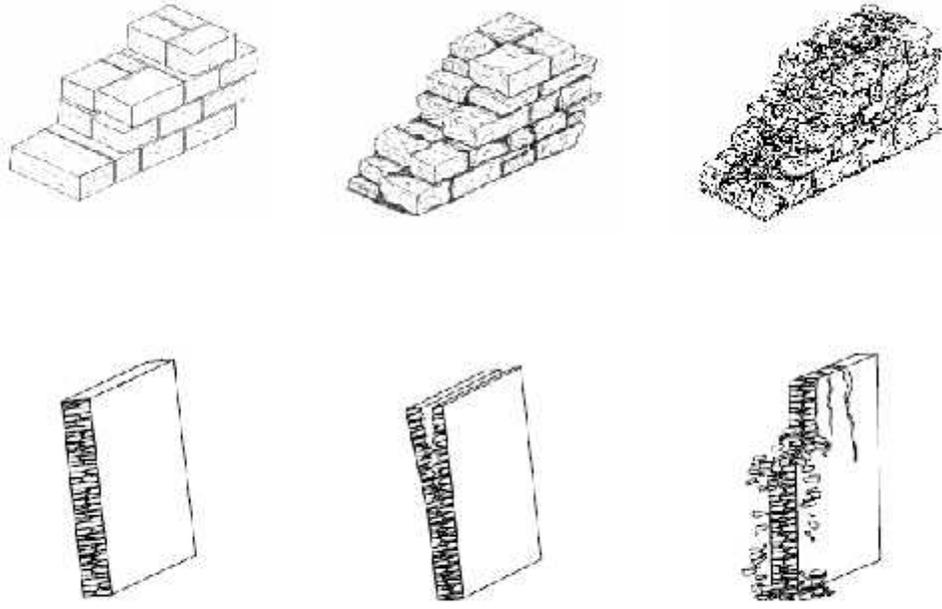
Tabla 1.2 parámetros mecánicos de la mampostería de acuerdo a la tipología (NTC, 2008)

La calidad de la mampostería es realmente fundamental en la determinación de la capacidad de una construcción para resistir a las acciones sísmicas. Para abordar esta problemática no puede ser abordada solo en términos de esfuerzo y deformación: una mampostería que puede resistir y transferir las fuerzas verticales y sísmicas sin fracturarse deberían tener características geométricas y físicas que permiten un comportamiento monolítico. (Antonio Borri & De Maria, 2009) ver Figura 1.1.13.

Entre las características que el Código Italiano requiere para considerar una mampostería en buena condiciones; uno de los puntos a considerar es: líneas horizontales, juntas verticales no alineadas, formas cuadradas y grandes piedras o ladrillos, presencia de conexiones verticales en muros multihoja, buena calidad de mortero por su puesto una adecuada resistencia del ladrillo o piedra.

Dada la morfología de la mampostería, los valores de la tabla suponen hojas exteriores desconectadas y que no cuentan con elementos de conexión transversal sistemática.

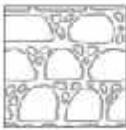
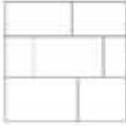
La propuesta de la Figura 1.1.14 se refiere a la albañilería que no tiene grietas. Este valor está catalogado como real, por secciones en fisura 1 / 7-1 / 6 y debe tomarse en cuenta. De la tabla, los valores mínimos y máximos se proporcionan de acuerdo con los resultados experimentales.



Mampostería de alta Calidad	Mampostería de Calidad media	Mampostería de baja
-----------------------------	------------------------------	---------------------

Figura 1.1.13.- Ejemplo de comportamiento fuera de plano de alta, media y baja calidad. Mampostería de alta calidad tiene un comportamiento monolítico fuera de plano. En la mampostería de calidad media hay una falta de comportamiento monolítico fuera de plano. Mampostería de mala calidad produce una desintegración completa de la pared. (Antonio Borri & De Maria, 2009) 18

Las decisiones relativas a los valores que se toman para un análisis deben de identificar del tipo de mampostería (A-F), sus valores mínimos y máximos, y la investigación de calidad de la textura y morfología de la pared.

Textura	Tipos de Piedra de Mampostería	f_{Mc} (MPa)	f_{Mt} (MPa)	F_M (MPa)	G_M^b (MPa)	Density (kN/m^3)
A	 Mampostería de piedra irregular	0.70-1.80	0.020-0.048	200-1,050	130-350	19
B	 Mampostería de piedra sin cortar con paredes enfrentadas de espesor limitado y el núcleo de relleno.	2.00-3.00	0.053-0.080	1,020-1,440	340-480	20
C	 Mampostería de piedra cortada con una buena unión.	2.60-3.80	0.084-0.111	1,500-1,980	500-660	21
D	 Mampostería de piedra blanda (piedra blanca, piedra caliza, etc.)	1.40-2.40	0.042-0.063	900-1,700	300-420	16
E	 Vestido mampostería de piedra rectangular con piedras no blandas	4.70-8.00	0.135-0.180	740-3,200	200-940	22
F	 Ladrillo completo con mortero de cal	2.00-4.00	0.040-0.140	240-1,800	80-600	18

a) la representación símbolos de la figura son de (“SIA 266/2; SN 505266/2,” 2012)

b) relativo a la destrucción de una sección

Figura 1.1.14.- Parámetros mecánicos de acuerdo a los tipos de estructuras de la mampostería(MIT , 2009)

19

Los valores de partida en los parámetros mecánicos, además del peso específico promedio de cada tipo y calidad de piedra para mampostería deben estar incluidos para que se adopten para la evaluación y la reducción del riesgo sísmico del patrimonio cultural véase MIT , 2009.

Abordando el estado de la conservación-factor de reducción para la fuerza este será de 0.7, y para la propiedad elástica se tomará el valor de 0.6 (Kržan, Gostič, & Bosiljkov, 2014).Se debe prestar especial atención en las juntas de mortero muy gruesas, algo cotidiano para el ladrillo bizantino y estos redujeron las propiedades.

Para la multi-hoja de mampostería cuyo espesor del núcleo interno es de 25%, las propiedades de resistencia y rigidez de la mampostería se deben considerar teniendo en cuenta la morfología de la pared y el procedimiento en (Krzan et al., 2015) .

Otros coeficientes de corrección de acuerdo con diseños para los parámetros mecánicos aplicados en mortero de óptima calidad, la presencia de cursos o de las fronteras, la presencia de conexiones, lechadas de mortero que se hacen para fortalecer con mortero reforzado se presentan en la Tabla 1.3.

Tipo de piedra de mampostería	Buena calidad de mortero	Estado de conservación	Capas delgadas de mortero (<10 mm)	Cursos o fronteras	Conexiones transversales (a través de la piedra)	Mortero/ Inyecciones de lechada	Yeso reforzado
A	1.5	—	—	1.3	1.5	2	2.5
B	1.4	—	1.2	1.2	1.5	1.7	2.0
C	1.3	—	—	1.1	1.3	1.5	1.5
D	1.5	—	1.5	—	1.5	1.7	2.0
E	1.2	—	1.2	—	1.0	1.2	1.2
F	1.5	0.7 ^b	1.5	—	1.3	1.5	1.5

a) Los valores que deben reducirse de forma adecuada en caso de grandes espesores de paredes (e.g. $t_w > 70$ cm)

b) Coeficiente de corrección se refieren únicamente a los parámetros de fuerza

Tabla 1.3 tabla extendida de (NTC, 2008) con coeficientes de corrección derivado de (Kržan, Bosiljkov, & R, 2011) para diferentes tipos de mampostería .

1.4.- Clasificación de la mampostería

“No existe una clasificación universal de las diferentes tipologías. Hay mampostería toda para representar el estado de desarrollo y logros técnicos de una cultura particular en un área determinada y el tiempo”.(Krzan et al., 2015)

La mampostería de piedra se puede dividir con tan solo el producto interior como: escombros al azar producto de demolición; escombros cuadrados producto de demolición; escombros al azar brutos; escombros de pedernal; escombros cuadrado brutos; mampostería construido en bloques regulares; escombros poligonales y escombros de mampostería sin mortero.

También se puede clasificar con forma al tipo de unidad y de mortero, son su textura y morfología véase tabla Tabla 1.4 y de acuerdo a la sección Figura 1.1.15 las principales características de mampostería de para determinar su comportamiento en el plano de carga.

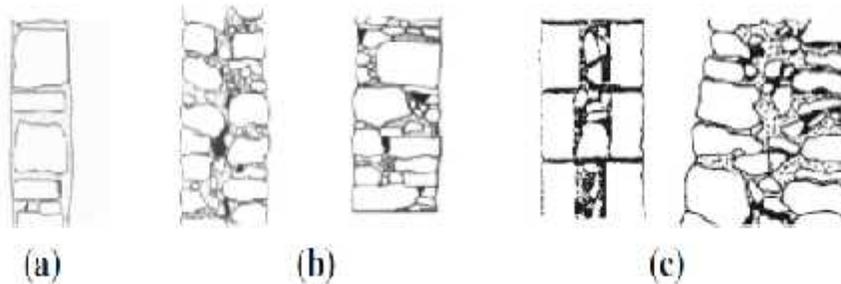


Figura 1.1.15.- Clasificación de mampostería con respecto a la pared secciones (morfología). a) Hoja solitaria, b) de doble hoja, c) de tres hojas(Binda & Cardani, 2007)

Cuando se habla de paneles multi-hoja de mampostería de secciones transversales, la textura aparente no necesariamente, puede aportar a la conducta general debido a su relleno de mampostería y determinar las características mecánicas.

Teniendo en cuenta esto, para las secciones transversales de material compuesto cuyo espesor de las hojas exteriores es muy pequeño comparación con la sección bruta, la textura aparente termina siendo relevante porque es muy probable que el relleno se igual a la textura exterior o muy pequeño, para la determinación del comportamiento de la mampostería.

mampostería histórica, se han formado tres grandes tipologías distintivas de la morfología y puede ser identificado como(Binda, Saisi, & Penazzi, 2003):

- Hoja simple: Elementos piedra están unidos con mortero, Las unidades de piedra pueden ser regulares, y se colocan de manera escalonada en el plano horizontal. Que pueden ser en formas irregulares o regulares y las juntas de mortero con espesor horizontal o sub-horizontal inclinado.

- Doble hoja: Se construyen dos capas en la sección transversal. Esta tipología se pueden diferenciar en dos secciones adicionales: la primera como hojas entrelazadas, donde las piedras de cursos posteriores de capas opuestas se juntas y traban entre si o la segunda de hojas adosadas, que son completamente separados por una junta vertical de mortero.

- Tres hojas: Se crean dos hojas externas de soporte de carga de mayor espesor y un núcleo interno compuesto por fragmentos de piedra.

Tras el examen mencionado anteriormente, visual identificación de la mampostería se puede basar en tres parámetros principales: la textura, morfología y características de los componentes; promover criterios que caracterizan a cada uno de ellos se presentan en la Tabla 1.4.

Textura	Morfología	Caracterización de los constituyentes	
		Unidades	Mortero
Parte estructural	Tipología	Tipo de unidad	Función
Tipo de mampostería	Tipo de secciones	Procedencia	Color del mortero
Hiladas horizontales en bandas	Espesor de la sección	Ejecución del trabajo	Color del agregado
Diferentes tipos de bandas en las mamposterías	Presencia de la calzada	Conservación	Tipo de agregado
Presencia de calzada	Distribución de vacíos	Regularidad de las unidades	Consistencia
Hiladas horizontales en capas	Tamaño de los vacíos	Tamaño de las unidades	Forma del agregado
Juntas escalonadas	Diferentes tipos de bandas en las mamposterías		Calidad del mortero/ condición/fuerza
Longitud del plano flojo	Presencia de piedras cruzadas		
	Longitud del plano flojo		

Tabla 1.4.- Clasificación de los principales elementos para la identificación del tipo de mampostería (Binda & Cardani, 2007)

1.5. Método de índice de calidad de la mampostería llamado MQI

Una evaluación de las propiedades mecánicas de las paredes de mampostería puede llevarse a cabo sobre la base de criterios cualitativos, a pesar de un cierto nivel de aproximación.

El método, llamado MQI, está en función de un conjunto de técnicas de construcción, que si son ejecutadas aportan en un adecuado comportamiento mecánico, asegura la compacidad y la monoliticidad.

El Índice MQI, considera las siguientes características:

- Calidad Mortero / contacto eficaz entre los elementos / cuñas;
- Presencia a través de piedras / enclavamiento cruz;
- Forma de bloques (la forma varía de guijarros a piedras perfectamente cortadas);
- Dimensión de bloques (de grandes dimensiones inferiores a 20 cm, comprendido entre 20 y 40 cm, superior a 40 cm);
- Resistencia de los bloques;
- Arreglo en forma escalonada de la vertical de enclavamiento articulaciones plan;
- La horizontalidad de los cursos de bloque.

Aplicación.

Se puso en práctica en los códigos de diseño de Umbría en 2003. Tuvo una mayor aplicación en el periodo del 2005 al 2008 por el ministerio Italiano de Investigación. Recientemente se ha utilizad en Marruecos e Inglaterra.

La categorización de cada parámetro se hace bajo tres resultados posibles: cumplido (F), parcialmente cumplido (PF) y no se cumple (NF).

Son 7 los parámetros evaluados.

1.5.1.- Estado de conservación y propiedades mecánicas(SM).

NF. Elementos degradados / dañadas (> 50% del número total de elementos) Ladrillos huecos (sólido <30%)

Ladrillos de barro ladrillos sin cocer

PF. Presencia de elementos degradados / dañados (10%, 50%) Ladrillos huecos (55 sólido 30%)

Arenisca o toba elementos

F . Elementos dañados-Un de los elementos degradados / dañados <10%

Ladrillos cocidos sólidos

Ladrillos huecos (55% <sólido)

Bloques de hormigón

Piedra dura

La información de estados de conservación y propiedades mecánicas esta sacadas de tabla 1 en (A. Borri, De Maria, Castori, & Corradi, 2015;A Borri & De Maria, 2009)

1.5.2.- Propiedades de dimensión de la piedra y ladrillo (SD).

NF	La presencia de más de 50% de elementos con gran dimensión <20 CM
	Patrón de unión de ladrillo hecha de juntas en cabeceras
PF	La presencia de más de 50% de elementos con una gran dimensión de 20-40 cm
	Co-presencia de elementos de diferentes dimensiones
F	La presencia de más de 50% de elementos con gran dimensión > 40 cm

Tabla 1.5.- Clasificación para el caso II(A. Borri et al., 2015;A Borri & De Maria, 2009)

1.5.3.- Forma de la piedra y ladrillo (SS). De guijarros a piedras

NF	Escombros, redondeado o mampostería de piedras (predominante) en ambas hojas de mampostería
PF	Co-presencia de escombros, piedra redondeada o de guijarros y apenas / piedra perfectamente cortada y ladrillos en ambas hojas de mampostería
	Una hoja de mampostería de piedras perfectamente cortadas o ladrillos
	Albañilería hecho de irregular (escombros, redondeado, guijarros) piedras, pero con presencia de piedras fijas.
F	Piedras perfectamente cortadas en ambas hojas de mampostería (predominantes)
	Ladrillos

Tabla 1.6.- Clasificación para el caso III(A. Borri et al., 2015;A Borri & De Maria, 2009)

1.5.4.- Características horizontales de las camas (HL).

	Sección visible (análisis cuantitativo)	Sección no visible (análisis cualitativo)
NF	$MI < 1,25$	Las piedras pequeñas en comparación con la pared de espesor
	Las piedras pequeñas (para cualquier valor MI)	No hay encabezados
PF	$1,25 < MI < 1,55$	Para pared de doble hoja
		La presencia de algunas cabeceras
		Grosor de la pared más grande que la piedra de grandes dimensiones
F	$MI > 1,55$	Grosor de la pared similar a la piedra de grandes dimensiones
		Presencia sistemática de las cabeceras

Tabla 1.7.- Clasificación para el caso IV(A. Borri et al., 2015;A Borri & De Maria, 2009)

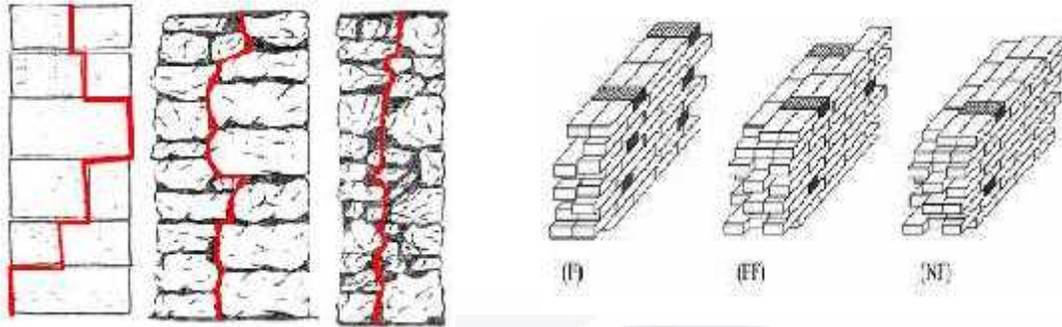


Figura 1.1.16.- Tipo de falla de junta según la morfología de la piedra(A. Borri et al., 2015);(Antonio Borri & De Maria, 2009)

1.5.5.- Características Horizontales de las camas (HL).

NF	Articulaciones de cama no continuos
PF	Situación intermedia entre NF y F
	Para pared de doble hoja
PF	Sólo una hoja con juntas horizontales continuas
F	Articulaciones de cama continua
	Muro de mampostería de piedra con cursos de ladrillos (distancia entre los cursos de < 60 cm

Tabla 1.8.- Clasificación para el caso V (A. Borri et al., 2015;A Borri & De Maria, 2009)

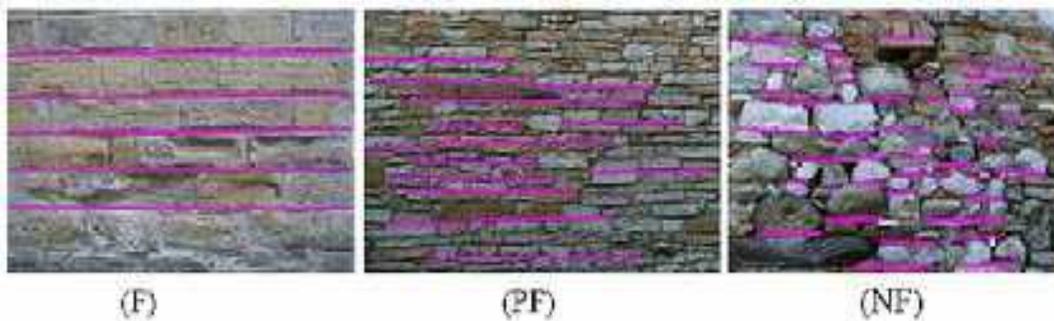


Figura 1.1.17.- Tipo de junteo horizontal según la piedra(A. Borri et al., 2015;Antonio Borri & De Maria, 2009)

1.5.6.- Características del conjunto vertical (VI)

	Análisis cuantitativo	Análisis cualitativo
NF	Pared de una hoja ($M < 1,4$)($M < 1,4$)	Juntas verticales Alineadas
	Pared de doble hoja $M < 1,4 < 1,4$ para una hoja de albañilería, $M < 1,6 < 1,6$ para la	Juntas verticales Alineadas por al menos 2 grandes piedras
	Pared hecha de piedras muy pequeñas	Pared de ladrillo macizo de tan solo cabeceras
PF	Pared Sola hoja $1,4 < M < 1,6$, $1,4 < M < 1,6$	Juntas verticales Parcialmente escalonadas
	Pared de doble hoja	(articulación vertical entre 2 ladrillo no se coloca en el medio de ladrillo superior e inferior adyacente)
	(a) Ambas hojas $1,4 < M < 1,6$	
	(b) Por lo menos una hoja $M > 1,6$	
	(c) Primera hoja $M > 1,6$	
	(d) Segunda hoja $1,4 < M < 1,6$, $1,4 < M < 1,6$	
F	Una sola hoja $M > 1,6$	Juntas verticales debidamente escalonadas
	Pared de doble hoja (ambas hojas $M > 1,6$)	(articulación vertical entre 2 piedras se coloca en el centro de la piedra superior e inferior adyacente)

Tabla 1.9.- Clasificación para el caso VI (A. Borri et al., 2015;A Borri & De Maria, 2009)

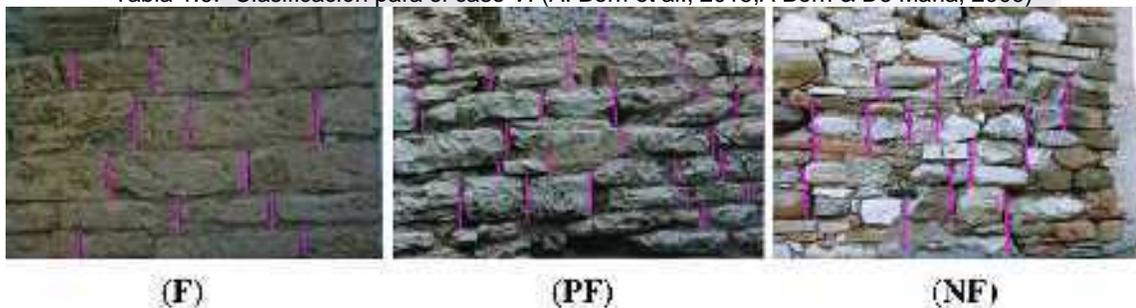


Figura 1.1.18.- Tipo de junteo vertical según la piedra(A. Borri et al., 2015);(Antonio Borri & De Maria, 2009)

1.5.7.-. Propiedades mecánicas del mortero (MM)

NF	Muy débil mortero, mortero polvoriento sin cohesión
	Sin mortero (escombros o piedra de gravilla)
	Grandes juntas horizontales hechas de mortero débil (espesor comparable a la piedra / espesor de ladrillo)
	Piedras porosas / ladrillos con unión débil al mortero
PF	Mortero de mediana calidad, con las juntas de cama sin muescas en gran medida
	Albañilería hecha de (escombros) piedras irregulares y mortero débil, pero con presencia de piedras fijas
F	Buena calidad y mortero no degradado, espesores de junta de cama regular o largos espesores de juntas hechas de mortero de muy buena calidad.
	Albañilería hecha de grandes piedras perfectamente cortadas sin mortero o espesores muy delgados de cama

Tabla 1.10.- Clasificación para el caso VII(A. Borri et al., 2015;A Borri & De Maria, 2009)

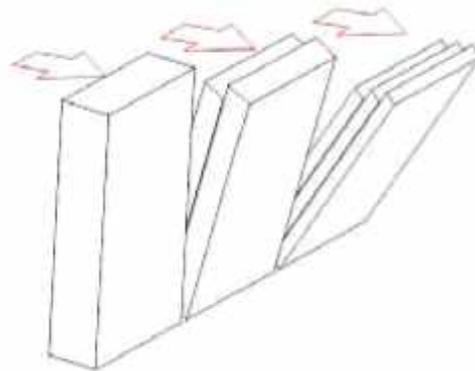


Figura 1.1.19.- Comportamiento fuera de plano de un panel de pared simple, doble y triple hoja.(A. Borri et al., 2015)

Se asignan valores a cada parámetro y se plantea la ecuación:

$$M Q I = S M (S D + S S + W C + H J + V J + M M)$$

	Carga Vertical (V)			Horizontal carga en el plano (I)			Carga horizontal fuera del plano (O)		
	NF	PF	F	NF	PF	F	NF	PF	F
HJ	0	1	2	0	0.5	1	0	1	2
WC	0	1	1	0	1	2	0	15	3
SS	0	15	3	0	1	2	0	1	2
VJ	0	0.5	1	0	1	2	0	0.5	1
SD	0	0.5	1	0	0.5	1	0	0.5	1
MM	0	0.5	2	0	1	2	0	0.5	1
SM	0.3	0.7	1	0.3	0.7	1	0.5	0.7	1

Tabla 1.11.- Valores del MQI(A. Borri et al., 2015;A Borri & De Maria, 2009)

Categoría Albañilería	Categoría Albañilería		
	LA	B	C
Acciones verticales (V)	$0 \leq MQI \leq 2.5$	$2.5 \leq MQI \leq 5$	$5 \leq MQI \leq 10$
Acciones fuera de plano (D)	$0 \leq MQI \leq 4$	$4 \leq MQI \leq 7$	$7 \leq MQI \leq 10$
Acciones en plano (I)	$0 \leq MQI \leq 3$	$3 \leq MQI \leq 5$	$5 \leq MQI \leq 10$

Tabla 1.12.- Condiciones del MQI(A. Borri et al., 2015;A Borri & De Maria, 2009)

1.6- Análisis lineal y no lineal en Abaqus.

La diferencia entre los análisis lineales y no lineales en Abaqus es:

Que en el análisis lineal.- existe una relación entre la carga aplicada al sistema como en su respuesta por ejemplo si un resorte se deforme 10 cm con una carga de 100 kg, entonces por 200 kg se debe deformar 20 cm. Entonces esto simplifica mucho para Abaqus ya que solo calculara la flexibilidad solo una vez (mediante un ensamble de matriz de rigideces y la invierte).

El análisis no lineal

Un análisis no lineal se refiere a los cambios de rigidez de la estructura, ya que se deforma. Un ejemplo sencillo es un resorte con una respuesta de refuerzo no lineal (véase la figura 8-1).

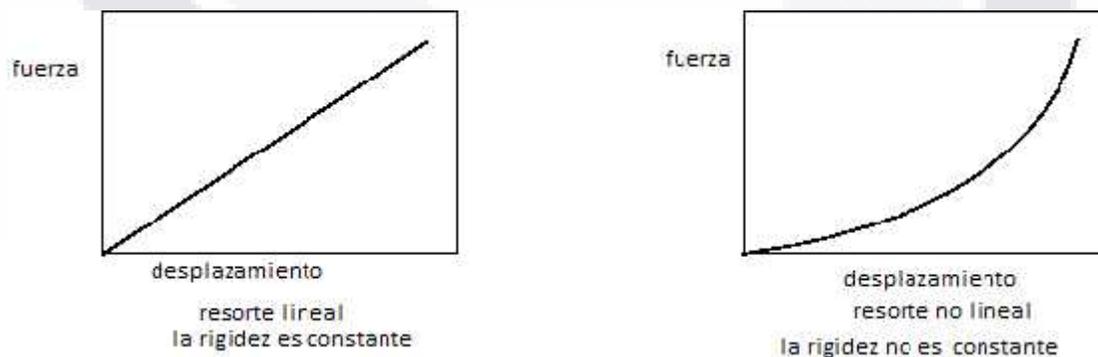


Figura 1.1.20 resorte lineal y no lineal (SIMULIA, 2013)

Ya que la rigidez es dependiente del desplazamiento, la flexibilidad inicial no se puede multiplicar por la carga y obtener el desplazamiento del resorte. En un análisis implícito no lineal la matriz de rigidez de la estructura tiene que ser ensamblada e invertida una y otra vez durante el análisis, lo que resulta mucho más pasos para Abaqus. Abaqus para resolver tiene que a cortar el tiempo del análisis para encontrar convergencia si no la encuentra tiene que recortar mas el tiempo y tiene ciertos intentos por configuración, esto se debe porque llega un punto que no es viable el análisis. Para la resolución de análisis no lineales cada estado de carga debe resolverse por separado.



2.- Etapa experimental

En la etapa experimental se tuvieron que realizar especímenes de cilindro de mortero con cal para la obtención de las características mecánicas de los morteros con cal usada en la junta de los sillares de mampostería. Para la realización de estos especímenes se tuvo que saber previamente qué proporción de cemento-arena-cal a usar para este fin.

Se buscó en la bibliografía y como resultado se encontró que no es tan importante la proporción que en su tiempo en que se realizó la construcción de la catedral como se concluye en (Azcarate, Camara, Lasagabaster, & Latorre, 2002). También se encontró en otro libro que después de observar diferentes muestras de morteros obtenidas de la Catedral de Santa María; se concluyó que hoy en día es un factor más importante el uso del mortero que el tiempo que se construyó dicha edificación, también en este estudio se encuentra que según las muestras, las juntas tendían más aglutinante a comparación de los rellenos que eran ricos en áridos.

En un estudio realizado a la Catedral de Jaca (Castelló, 1998) se determinó que las relaciones de los morteros con cal en diferentes elementos, en una muestra de junta entre sillar y sillar resultaron ser 1:5, otra muestra también de junta de sillar y sillar dio como resultado 1:3.5; terminando con una muestra de relleno se obtuvo la relación 1:4. Con los datos encontrados se propuso entonces un mortero con relación 1:4 tanto para caracterizar el mortero de relleno como el de las juntas.

Debido a que en la antigüedad no se usaba cal hidratada si no cal viva, sin embargo como lo menciona en (Barba & Villaseñor, 2013) la cal viva tiene muchas variantes debido a su proceso artesanal de elaboración, por ende y por facilidad del mercado de obtener cal hidratada se propuso hacer los especímenes con cal hidratada.

La arena usada fue cernida como se muestra en la Figura 2.1.1 para el mortero de junta de sillar, dado que el espesor de la junta que mide 0.5 cm y no se espera que los agregados tengan mayor tamaño que la junta del sillar. No se usaron mallas graduadas del laboratorio debido a que estas no tenían uso en la elaboración de mampostería. Para los morteros de relleno se usó la arena no cernida debido que este caso no tenemos limitantes de espesores de junta.

Para determinar la cantidad agua a agregar se consultó con base a la norma (“NMX-C-061-ONNCE-2010,” 2010) como se ven en la Figura 2.1.2 . El porcentaje de aumento del diámetro debía de ser del 115% para cumplir con lo que establece la norma.



Figura 2.0.1 Arena cernida y no cernida



Figura 2.0.2 Prueba de aumento de diámetro

Sin embargo, después de elaborar los cilindros y al momento de poner a curar el espécimen, la norma indica que se metan a la cámara de curado inmediatamente de que se elaboraron las muestras y cumplidas 24 horas se debe poner en agua saturada con cal.

Los especímenes se realizaron a base de mortero con cal, pero este compuesto reacciona con el aire, por lo que se decidió que los especímenes se dejaran al aire libre, como lo recomienda los del Grupo Calidra en (Calidra, 2016) Para morteros de cal, cuya indicación es que sean curados al aire libre, además esto es más representativo de cómo se realizan los materiales en obra.

Fue así como a las 24 horas se retiraron del molde y quedaron a resguardo del laboratorio, pero fuera de la cámara de curado. Dichos especímenes se probaron a los 28 días y los datos fueron capturados en tablas y expresado en gráficas. Este tratamiento se le dio a todos los cilindros de mortero utilizados en esta tesis porque las mezclas contenían cal.

2.1.- Cilindros de mortero de cal

Para las pruebas se realizaron tres cilindros de solo mortero de cal, simulando el material de junta entre sillares de mampostería antigua de piedra.

Para su elaboración se limpiaron y engrasaron los moldes y después de realizar la mezcla de mortero para el llenado de los cilindros; sin embargo al momento de la elaboración de estos especímenes tuvieron fugas de agua en el base del molde y disminuyó en su altura, por lo tanto de medir 30 cm, los especímenes terminaron midiendo 29.2 cm, 27.7 cm y 28.5 cm respectivamente, esto se puede observar en la Figura 2.1.1 y Figura 2.1.2.



Figura 2.1.1 pérdida de agua especímenes de mortero



Figura 2.1.2 Desmolde y caracterización de especímenes de mortero

Cuando se probaron los seis cilindros en dos grupos que se hicieron con forme a la norma (“NMX-C-128-1997-0NNCCE,” 1997) como se muestra en la Figura 2.1.3.

Se tuvo un problema en cuestión al micrómetro que se encontraba en forma vertical, pues se quedó pegado y no marcó adecuadamente, cuando se percató de este error en la marcación ya se habían probado todos los cilindros. Sin embargo con y se consultó al (UPC, 2016) donde indica el coeficiente de Poisson de 0.2 para el mortero, lo que permitió corregir y obtener los siguientes datos.

2.1.1.- Espécimen 1: Características

Altura (cm)	29.200	Diámetro (cm)	15.050	Peso (kg)	9.67	Área (cm ²)	177.9	Densidad (kg/cm ³)	0.00186
----------------	--------	------------------	--------	--------------	------	----------------------------	-------	-----------------------------------	---------

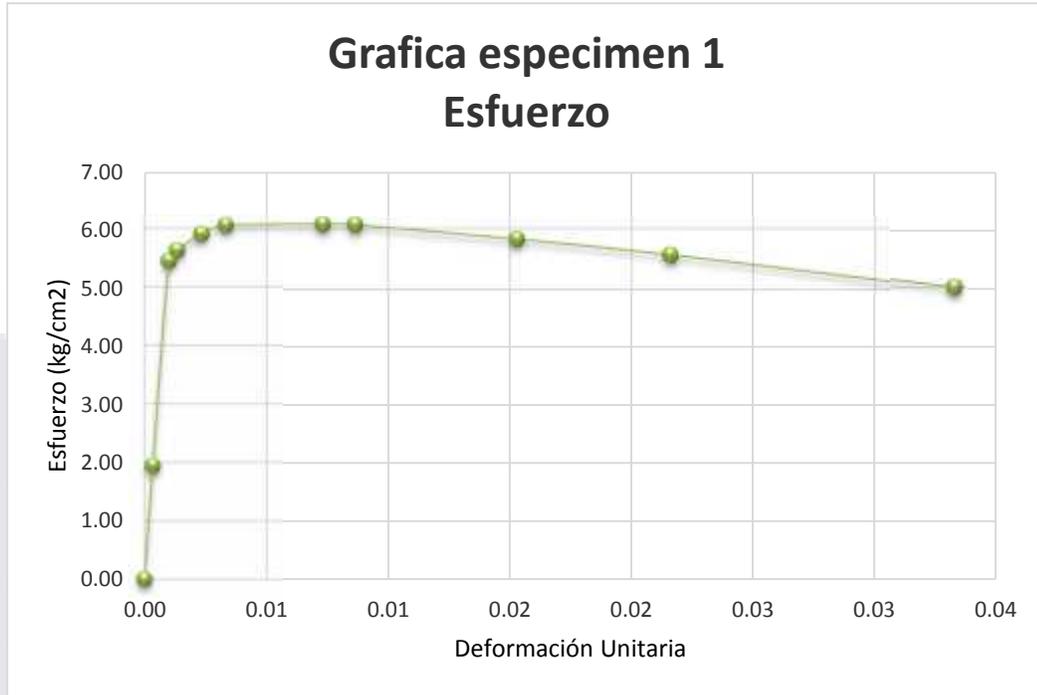


Figura 2.1.3 Puesto a ensayo de Espécimen 130

Def. lateral mm	Carga kg	Def axial mm	Def. lateral cm	Def. axial cm	Lateral unitaria	Axial unitaria	Esfuerzo kg/cm ²
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.01	345.00	0.09701	0.001	0.00970	0.00007	0.00033	1.93935
0.03	968.00	0.29103	0.003	0.02910	0.00020	0.00100	5.44141
0.04	1000.00	0.38804	0.004	0.03880	0.00027	0.00133	5.62129
0.07	1050.00	0.67907	0.007	0.06791	0.00047	0.00233	5.90236
0.10	1076.00	0.97010	0.010	0.09701	0.00066	0.00332	6.04851
0.22	1080.00	2.13422	0.022	0.21342	0.00146	0.00731	6.07099
0.26	1078.00	2.52226	0.026	0.25223	0.00173	0.00864	6.05975
0.46	1036.00	4.46246	0.046	0.44625	0.00306	0.01528	5.82366
0.65	990.00	6.30565	0.065	0.63056	0.00432	0.02159	5.56508
1.00	890.00	9.70100	0.100	0.97010	0.00664	0.03322	5.00295

Tabla 2.1.1 Tabla de resultados Esfuerzo-Deformación Espécimen 1

El resultado del ensayo se pudo compilar en la siguiente gráfica.



Gráfica 2.1.1 Gráfica de resultados Esfuerzo-Deformación Espécimen

2.1.2.- Espécimen 2: Características

Altura (cm)	27.700	Diámetro (cm)	14.800	Peso (kg)	8.00	Área (cm ²)	172.03	Densidad (kg/cm ³)	0.00168
----------------	--------	------------------	--------	--------------	------	----------------------------	--------	-----------------------------------	---------

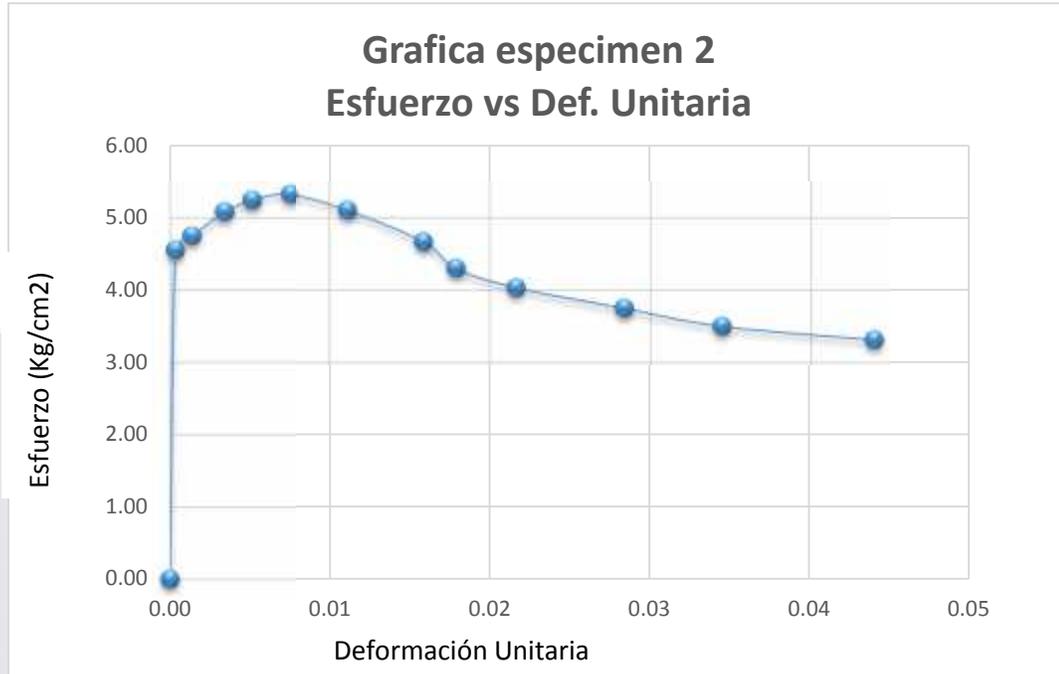


Figura 2.1.4 Puesto a ensayo de Espécimen 2

Def. lateral mm	Carga kg	Def. axial mm	Def. lateral cm	Def. axial cm	Lateral unitaria	Axial unitaria	Esfuerzo kg/cm2
0.00	621.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.01	783.00	0.09358	0.001	0.00936	0.00007	0.00034	4.55143
0.04	817.00	0.37432	0.004	0.03743	0.00027	0.00135	4.74906
0.10	874.00	0.93581	0.010	0.09358	0.00068	0.00338	5.08039
0.15	902.00	1.40372	0.015	0.14037	0.00101	0.00507	5.24315
0.22	916.00	2.05878	0.022	0.20588	0.00149	0.00743	5.32453
0.33	878.00	3.08818	0.033	0.30882	0.00223	0.01115	5.10364
0.47	803.00	4.39831	0.047	0.43983	0.00318	0.01588	4.66768
0.53	740.00	4.95980	0.053	0.49598	0.00358	0.01791	4.30147
0.64	694.00	5.98919	0.064	0.59892	0.00432	0.02162	4.03409
0.84	645.00	7.86081	0.084	0.78608	0.00568	0.02838	3.74926
1.02	602.00	9.54527	0.102	0.95453	0.00689	0.03446	3.49931
1.30	570.00	12.16554	0.130	1.21655	0.00878	0.04392	3.31330

Tabla 2.1.2 Tabla de resultados Esfuerzo-Deformación Espécimen 2

El resultado del ensayo 2 se pudo compilar en la siguiente gráfica.



Gráfica 2.1.2 Gráfica de resultados Esfuerzo-Deformación Espécimen 2

2.1.3.- Espécimen 3: Características

Altura (cm)	28.500	Diámetro (cm)	14.800	Peso (kg)	8.030	Área (cm ²)	172.03	Densidad (kg/cm ³)	0.00164
----------------	--------	------------------	--------	--------------	-------	----------------------------	--------	-----------------------------------	---------

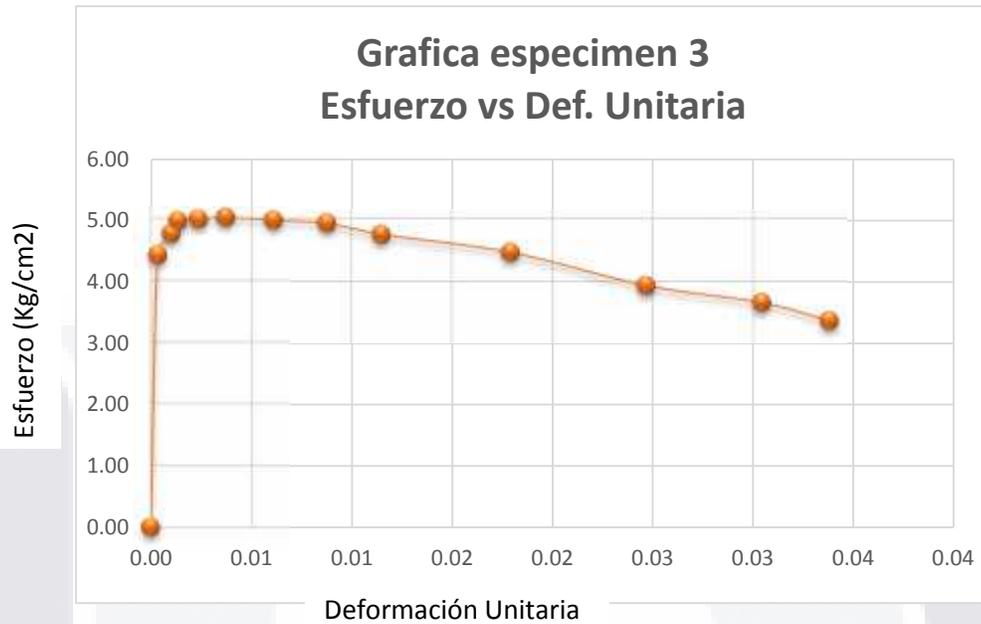


Figura 2.1.5 Puesto a ensayo de Espécimen 3

Def. lateral mm	Carga kg	Def. axial mm	Def. lateral cm	Def. axial cm	Lateral unitaria	Axial unitaria	Esfuerzo kg/cm ²
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.01	758.00	0.09628	0.001	0.00963	6.7568E-05	0.000338	4.40611
0.03	818.00	0.28885	0.003	0.02889	2.0270E-04	0.001014	4.75487
0.04	853.00	0.38514	0.004	0.03851	2.7027E-04	0.001351	4.95832
0.07	858.00	0.67399	0.007	0.06740	4.7297E-04	0.002365	4.98739
0.11	863.00	1.05912	0.011	0.10591	7.4324E-04	0.003716	5.01645
0.18	855.00	1.73311	0.018	0.17331	1.2162E-03	0.006081	4.96995
0.26	848.00	2.50338	0.026	0.25034	1.7568E-03	0.008784	4.92926
0.34	817.00	3.27365	0.034	0.32736	2.2973E-03	0.011486	4.74906
0.53	768.00	5.10304	0.053	0.51030	3.5811E-03	0.017905	4.46423
0.73	677.00	7.02872	0.073	0.70287	4.9324E-03	0.024662	3.93527
0.90	630.00	8.66554	0.09	0.86655	6.0811E-03	0.030405	3.66207
1.00	580.00	9.62838	0.1	0.96284	6.7568E-03	0.033784	3.37143

Tabla 2.1.3 Tabla de resultados Esfuerzo-Deformación Espécimen 3

Dichos resultados se ven consultados en la siguiente gráfica.



Gráfica 2.1.3.- Gráfica de resultados Esfuerzo-Deformación Espécimen 3

2.2.- Cilindro de mortero con cantera

Para la siguiente fase de pruebas se elaboraron cinco cilindros de mortero de la misma proporción, adicionando pedazos de cantera de un banco de material del cual se creó que fue extraída la piedra usada para la Catedral de Aguascalientes dada su cercanía con la ciudad y la semejanza de material visto en el banco y la catedral.

Se realizaron estos cilindros con el fin de obtener las características mecánicas del relleno que tiene la mampostería antigua de 3 hojas. Se rompieron pedazos de cantera los cuales se sumergieron en recipiente lleno agua, con el fin de saturar las piedras y que estas no absorbieran el agua del mortero, para este fin se sumergieron las piedras aproximadamente 3 minutos y después se colocaron en los cilindros como se muestra en la Figura 2.2.1.



Figura 2.2.1 Hechura de especímenes de mortero con cantera

Sin embargo, al momento de cabecear los cilindro con mortero de azufre dos de los especímenes se rompieron como se muestra en la Figura 2.2.2, y esto ocurrió debido a la fragilidad producida por los huecos en los cilindros por la geometría de las piedras no permite rellenar los huecos como se puede ver en la Figura 2.2.3.

Además, las piedras cruzan en gran parte el área del cilindro, así que aunque se extremen los cuidados, el cilindro se rompía al querer desmoldar al cilindro del molde de cabeceo.

También puede deducirse que en los especímenes fracturados con pedazos de cantera, la piedra de cantera absorbió el agua del mortero y por ello no disminuyeron su volumen ni tampoco se observó que fugará agua en la base de los especímenes.



Figura 2.2.2 Espécimen fracturado



Figura 2.2.3 Detección de huecos

Estos cilindros se elaboraron para determinar las características mecánicas del relleno de mortero-cantera y se probaron conforme a la norma (“NMX-C-128-1997-0NNCCE,” 1997) como se muestra en la Figura 2.2.4.

Se tuvo el mismo problema con el micrómetro vertical, pues no hizo una correcta medición y se percató el error una vez ensayados los tres cilindros en buen estado, volviendo a consultar con (UPC, 2016) donde indica el coeficiente de Poisson de 0.2 para el mortero y como el trabajo mecánico lo efectúa en él, se pudo corregir y obtener los siguientes datos.

2.2.1.- Espécimen 4: Características

Altura (cm)	30.200	Diámetro (cm)	15.100	Peso (kg)	9.015	Área (cm ²)	179.08	Densidad (kg/cm ³)	0.00167
----------------	--------	------------------	--------	--------------	-------	----------------------------	--------	-----------------------------------	---------

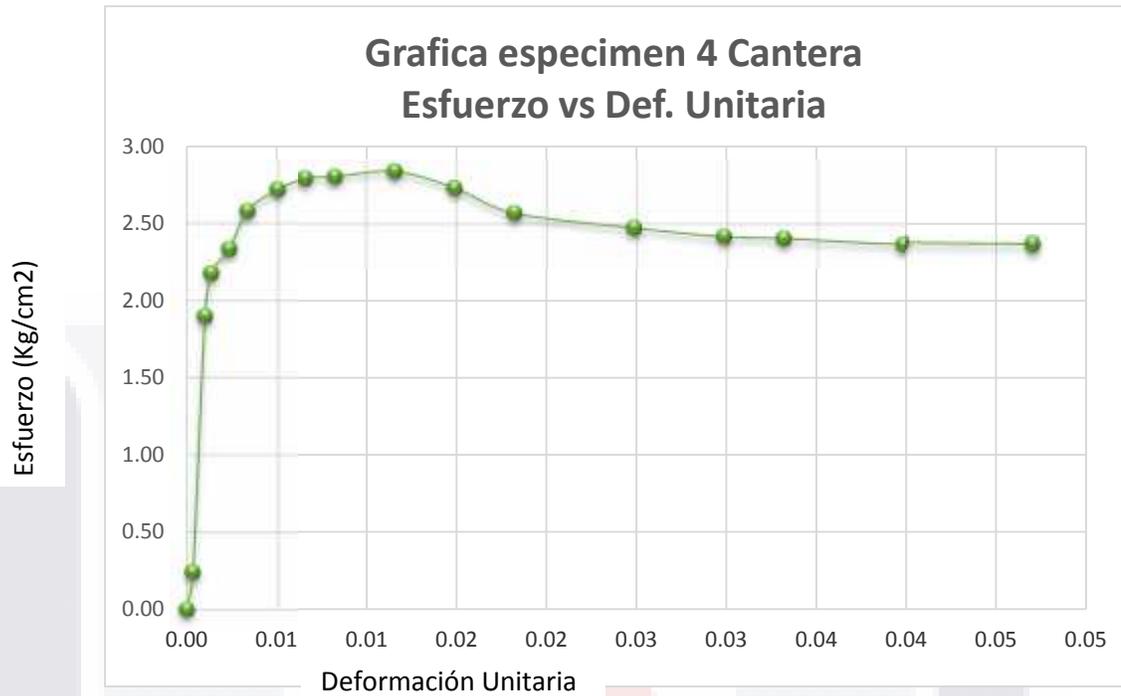


Figura 2.2.4 Puesto a ensayo de Espécimen 4

Def. lateral mm	Carga kg	Def. axial mm	Def. lateral cm	Def axial cm	Lateral unitaria	Axial unitaria	Esfuerzo kg/cm ²
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.01	43.00	0.1000	0.001	0.01000	0.00007	0.00033	0.24012
0.03	340.00	0.3000	0.003	0.03000	0.00020	0.00099	1.89860
0.04	390.00	0.4000	0.004	0.04000	0.00026	0.00132	2.17781
0.07	418.00	0.7000	0.007	0.07000	0.00046	0.00232	2.33416
0.10	462.00	1.0000	0.010	0.10000	0.00066	0.00331	2.57987
0.15	487.00	1.5000	0.015	0.15000	0.00099	0.00497	2.71947
0.20	500.00	2.0000	0.020	0.20000	0.00132	0.00662	2.79206
0.25	502.00	2.5000	0.025	0.25000	0.00166	0.00828	2.80323
0.35	508.00	3.5000	0.035	0.35000	0.00232	0.01159	2.83674
0.45	489.00	4.5000	0.045	0.45000	0.00298	0.01490	2.73064
0.55	460.00	5.5000	0.055	0.55000	0.00364	0.01821	2.56870
0.75	443.00	7.5000	0.075	0.75000	0.00497	0.02483	2.47377
0.90	433.00	9.0000	0.090	0.90000	0.00596	0.02980	2.41793
1.00	431.00	10.0000	0.100	1.00000	0.00662	0.03311	2.40676
1.20	424.00	12.0000	0.120	1.20000	0.00795	0.03974	2.36767
1.42	422.00	14.2000	0.142	1.42000	0.00940	0.04702	2.35650

Tabla 2.2.1 Tabla de resultados Esfuerzo-Deformación Espécimen 4

Cuyos resultados capturados se alojaron en esta gráfica.



Gráfica 2.1.4 Gráfica de resultados Esfuerzo-Deformación Espécimen 4

2.2.2.- Espécimen 7: Características

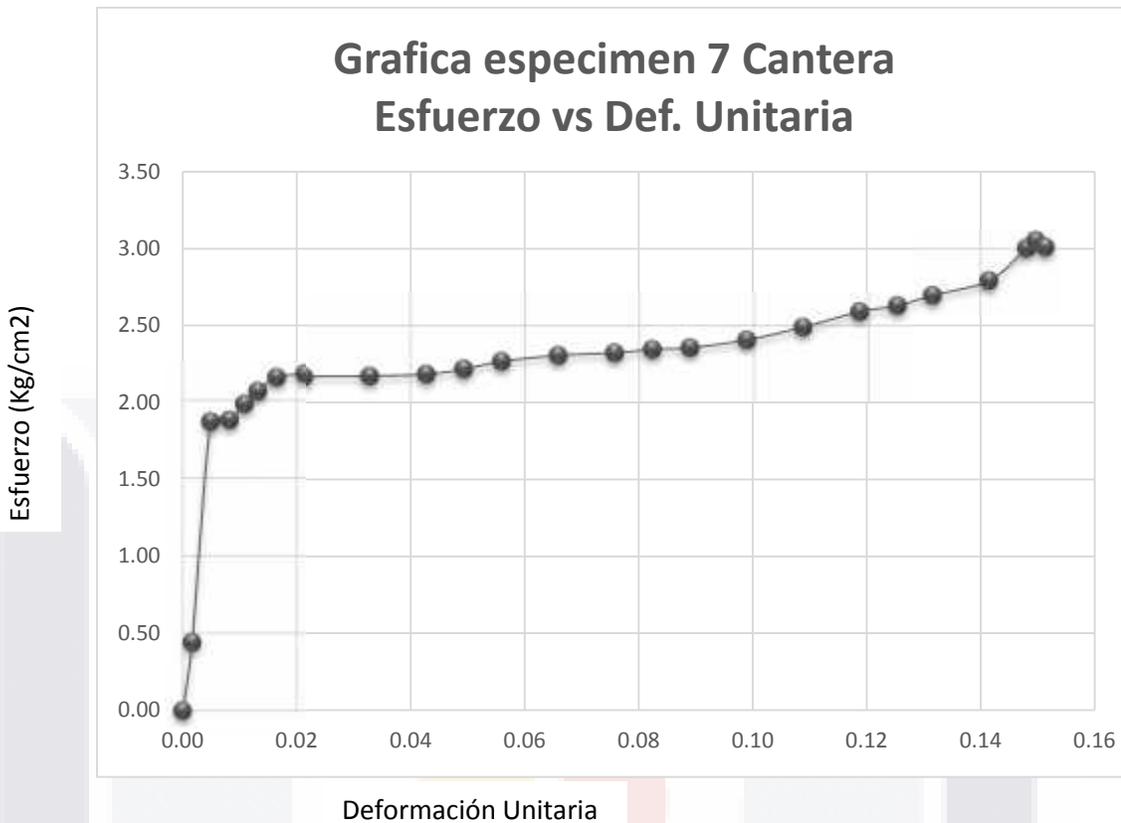
Altura (cm)	30.300	Diámetro (cm)	15.200	Peso (kg)	8.378	Área (cm ²)	181.50	Densidad (kg/cm ³)	0.00152
----------------	--------	------------------	--------	--------------	-------	----------------------------	--------	-----------------------------------	---------



Figura 2.2.5 Puesto a ensayo de Espécimen 7

Def. lateral mm	Carga kg	Def axial mm	Def. lateral cm	Def. axial cm	Lateral unitaria	Axial unitaria	Esfuerzo kg/cm ²
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.05	80.00	0.49836	0.005	0.04984	0.00033	0.00164	0.44087
0.15	338.00	1.49507	0.015	0.14951	0.00099	0.00493	1.86268
0.25	340.00	2.49178	0.025	0.24918	0.00164	0.00822	1.87370
0.33	359.00	3.28914	0.033	0.32891	0.00217	0.01086	1.97841
0.40	374.00	3.98684	0.040	0.39868	0.00263	0.01316	2.06107
0.50	390.00	4.98355	0.050	0.49836	0.00329	0.01645	2.14925
0.65	394.00	6.47862	0.065	0.64786	0.00428	0.02138	2.17129
1.00	395.00	9.96711	0.100	0.99671	0.00658	0.03289	2.17680
1.30	397.00	12.95724	0.130	1.29572	0.00855	0.04276	2.18782
1.50	403.00	14.95066	0.150	1.49507	0.00987	0.04934	2.22089
1.70	412.00	16.94408	0.170	1.69441	0.01118	0.05592	2.27049
2.00	419.00	19.93421	0.200	1.99342	0.01316	0.06579	2.30906
2.30	422.00	22.92434	0.230	2.29243	0.01513	0.07566	2.32560
2.50	426.00	24.91776	0.250	2.49178	0.01645	0.08224	2.34764
2.70	428.00	26.91118	0.270	2.69112	0.01776	0.08882	2.35866
3.00	437.00	29.90132	0.300	2.99013	0.01974	0.09868	2.40826
3.30	452.00	32.89145	0.330	3.28914	0.02171	0.10855	2.49092
3.60	470.00	35.88158	0.360	3.58816	0.02368	0.11842	2.59012
3.80	477.00	37.87500	0.380	3.78750	0.02500	0.12500	2.62870
4.00	490.00	39.86842	0.400	3.98684	0.02632	0.13158	2.70034
4.30	507.00	42.85855	0.430	4.28586	0.02829	0.14145	2.79402
4.50	545.00	44.85197	0.450	4.48520	0.02961	0.14803	3.00344
4.55	554.00	45.35033	0.455	4.53503	0.02993	0.14967	3.05303
4.60	546.00	45.84868	0.460	4.58487	0.03026	0.15132	3.00895

Tabla 2.2.2 Tabla de resultados Esfuerzo-Deformación Espécimen 7



Gráfica 2.1.5 Gráfica de resultados Esfuerzo-Deformación Especimen 7

2.2.3.- Especimen 8: Características

Altura (cm)	30.300	Diámetro (cm)	14.900	Peso (kg)	8.695	Área (cm ²)	174.37	Densidad (kg/cm ³)	0.00165
----------------	--------	------------------	--------	--------------	-------	----------------------------	--------	-----------------------------------	---------



Figura 2.2.6 Puesto a ensayo de Espécimen 8

Def. lateral mm	Carga kg	Def axial mm	Def. lateral cm	Def axial cm	Lateral unitaria	Axial unitaria	Esfuerzo kg/cm ²
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.06	374.00	0.61007	0.006	0.06101	0.00040	0.00201	2.14491
0.08	400.00	0.81342	0.008	0.08134	0.00054	0.00268	2.29402
0.12	514.00	1.22013	0.012	0.12201	0.00081	0.00403	2.94781
0.15	523.00	1.52517	0.015	0.15252	0.00101	0.00503	2.99943
0.2	530.00	2.03356	0.020	0.20336	0.00134	0.00671	3.03957
0.28	540.00	2.84698	0.028	0.28470	0.00188	0.00940	3.09692
0.35	539.00	3.55872	0.035	0.35587	0.00235	0.01174	3.09119
0.45	513.00	4.57550	0.045	0.45755	0.00302	0.01510	2.94208
0.55	401.00	5.59228	0.055	0.55923	0.00369	0.01846	2.29975
0.6	442.00	6.10067	0.060	0.61007	0.00403	0.02013	2.53489
0.68	421.00	6.91409	0.068	0.69141	0.00456	0.02282	2.41445

Tabla 2.2.3 Tabla de resultados Esfuerzo-Deformación Espécimen 8



Gráfica 2.1.6 Gráfica de resultados Esfuerzo-Deformación Espécimen 8

2.3.- Determinación de la adherencia por esfuerzo cortante entre el mortero y las piezas de mampostería

Teniendo en cuenta que muchas veces lo que falla de la mampostería no es el mortero ni las piezas, sino la interface entre estos dos materiales.

Atendiendo a esto se trató de determinar de una manera viable en el laboratorio tratando de homogenizar la norma (“NMX-C-082-ONNCCE-2013,” 2013) para determinación de la adherencia por esfuerzo cortante entre el mortero y las piezas de mampostería se representará en ladrillo con mortero, para esto se mandó cortar la cantera en forma de ladrillos (7 cm de espesor, 14 de ancho y 28 cm de largo) . Para dar más homogeneidad a las piezas con la cantera, se añadió textura golpeándolas con cincel y martillo, dándoles un aspecto a piedras naturales como se muestra en la Figura 2.3.1.



Figura 2.3.1 Texturización de los ladrillos de cantera³⁹

Después se cabecearon con forme a la norma (“NMX-036-0NNCE-2013,” 2013) cuyo proceso de elaboración quedó documentado en la Figura 2.3.2 y se unieron con mortero con la misma proporción con la que se trabajó en los cilindros para caracterizar el mortero de junta entre los sillares.

En total, para la determinación de la adherencia por esfuerzo cortante entre el mortero y las piezas de mampostería se elaboraron 3 especímenes de piedra como se muestra en la Figura 2.3.3.



Figura 2.3.2 Cabeceado de bloques



Figura 2.3.3 Armado de muestras para ensayo 41

Se probaron con forma a la norma (“NMX-C-082-ONNCCE-2013,” 2013) como se muestra en la Figura 2.3.4 y se obtuvieron los siguientes datos:



Figura 2.3.4 Ensayo de muestras en prensa

Sin embargo al momento de la prueba en lugar de fallar la adherencia de la junta, falló el mortero a cortante; debido a su poca resistencia como se muestra en la Figura 2.3.5 en los 3 especímenes.



Figura 2.3.5 Junta de adherencia ensayada 43

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 2.2.4

especímenes	peso (kg)	ancho (cm)	largo (cm)	espesor (cm)	area en cm ²	carga ultima (kg)	esfuerzo ultimo (kg/cm ²)
1	10.052	12.2	23.9	1.7	541.68	49	0.09
2	10.014	12	24	1.2	547.2	41	0.07
3	10.005	11.8	23.6	1.2	528.64	68	0.13

Tabla 2.2.4 Esfuerzos ultimo de adherencia entre el mortero de cal y la cantera. 19

2.4.- Cubos de mortero

Se fabricaron nueve muestras como se muestra en la Figura 2.4.1 cubo del mortero con forme a la norma (“NMX-C-061-ONNCE-2010,” 2010) empleado para probar y comparar la resistencia del mortero en los cubos contra los cilindros de mortero además con estos mismo se requería obtener la determinación de la adherencia por esfuerzo cortante entre el mortero y las piezas de mampostería .



Figura 2.4.1 Cubos de mortero 44

El ensayo arrojó los siguientes resultados:

cubo	d1	d2	d3	peso	carga (kg)	kg/cm2
1	4.90	5.00	4.95	215.00	144.00	5.84
2	4.90	5.00	4.90	213.00	280.00	11.43
3	5.00	4.90	4.90	214.00	185.00	7.50
4	5.00	5.00	4.90	217.00	119.00	4.76
5	5.00	5.00	5.00	211.00	133.00	5.32
6	5.00	4.90	5.00	212.00	169.00	6.74
7	4.90	4.90	5.00	211.00	127.00	5.17
8	4.90	4.90	4.90	206.00	207.00	8.60
9	4.90	5.00	4.90	206.00	191.00	7.76
Promedio						7.01333333

Tabla 2.2.5 Tabla de resultados de los cubos de mortero

Los resultados experimentales dieron mayores en los cubos que los cilindros, se llegó a la conclusión que esa diferencia se debe a la pérdida de humedad que tuvieron los cilindro de morteros.

3.5 Coeficiente de fricción entre el mortero y la cantera

En ocasiones la falla de la mampostería no está en el mortero, ni en la cantera, ni en la adherencia. En algunas otras ocasiones la interacción de mortero con la piedra puede fallar por la falta de fricción como lo menciona (Mann & Müller, 1982). Por eso también se trató de determinar la fricción entre la cantera y el mortero. Para esto se hizo un molde rectangular de metal como se muestra en la Figura 2.5.1 el cual se usó para cimbra, para elaboración de un bloque hecho de mortero como se muestra en la Figura 2.5.1 anterior. Se puede consultar el Anexo A para determinación del coeficiente de fricción entre dos superficies mediante la inclinación de un plano inclinado.

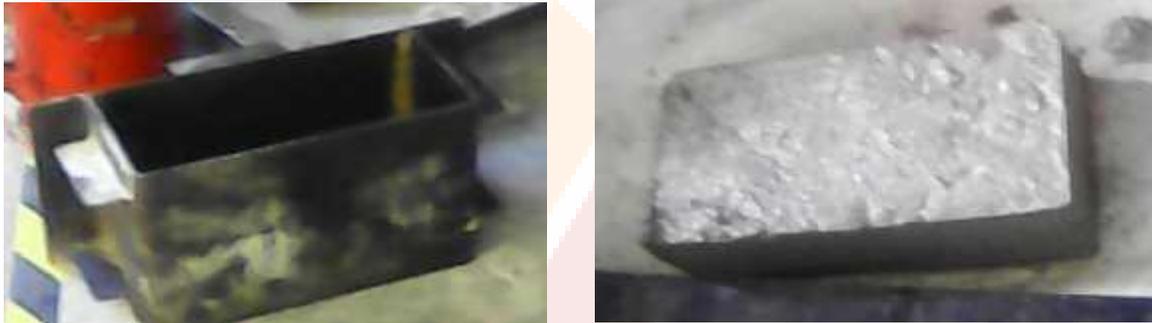


Figura 2.5.1 Bloque de mortero y molde

Se puso en una superficie de cantera que esta estaba a su vez en una superficie de madera que se levantaba y con eso se pudo determinar el coeficiente de fricción, ya que la fricción era lo único que se oponía al deslizamiento del bloque de mortero como se muestra en la Figura 2.5.2



Figura 2.5.2 Cálculo de fricción por deslizamiento

Como el levantamiento de la tabla es un poco impreciso se optó por realizar esta actividad 25 veces y esto arrojó un promedio en el cateto adyacente y sacamos un promedio estos son los datos: Cateto opuesto es 64.24 de promedio y cateto adyacente es 100.34 cm pues solo se divide el co/ca que es igual tan θ que a su vez es igual μ para ver con más claridad puede ver el anexo A y obtenemos en coeficiente de fricción es 0.64.

num.	cateto opuesto (cm)
1	59.00
2	71.00
3	64.00
4	64.00
5	61.50
6	56.00
7	68.00
8	70.00
9	66.00
10	72.00
11	66.00

12	63.00
13	57.50
14	70.00
15	63.00
16	63.00
17	59.00
18	69.00
19	59.00
20	68.00
21	65.00
22	68.00
23	62.00
24	67.00
25	55.00
promedio	64.24

Tabla 2.2.5 Tabla de resultados Deslizamiento 21



Figura 2.5.2 muestra de especímenes ensañados



3.- Modelación Tridimensional

3.1 Introducción:

Se realizaron estos modelos en Abaqus para poder modelar sólidos y exclusivamente se caracterizaron los componentes, por medio de modelos no lineales, y así se obtuvieron sus características.

3.2 Modelación numérica:

Estos modelos fueron inspirados en el edificio de la Catedral de Aguascalientes se seleccionó al azar de la fachada debido a que son los expuestos a la intemperie, un metro cuadrado de mampostería regular y un metro cuadrado de mampostería irregular como se muestra en la siguiente Figura 3.2.1:

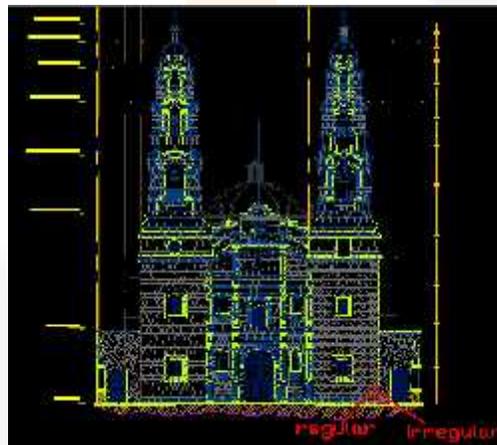


Figura 3.2.1 muestras de modelos de mampostería regular y mampostería irregular sacados de la catedral

En dicho edificio histórico la junta del mortero se pudo apreciar que el metro cuadrado de la mampostería irregular tiene junta de mortero de 2 cm y el metro cuadrado de mampostería regular tiene la junta de 0.5 cm. Este detalle puede ser apreciado en la Figura 3.2.2.

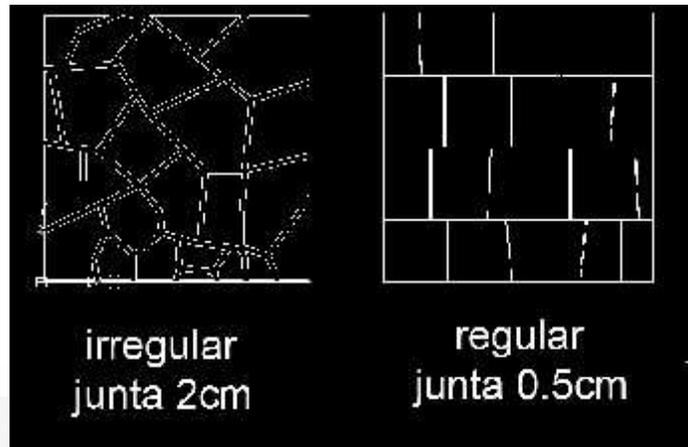


Figura 3.2.2. Dimensiones de juntas en mampostería regular y mampostería irregular

Como se buscó evaluar la diferencia de módulo de elasticidad, ductibilidad y resistencia a compresión tanto de la mampostería irregular como la de la regular y su influencia del espesor de la junta entonces se decidió inventar 2 modelos hipotéticos en los cuales se intercambiaban los espesores de las juntas como se muestra en la Figura 3.2.3.

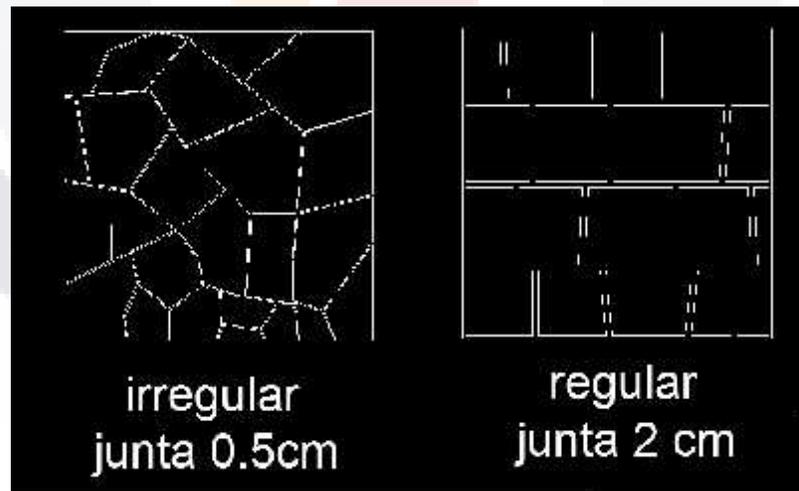


Figura 3.2.3. Dimensiones de juntas en modelos hipotéticos de mampostería regular y mampostería irregular

Otro objetivo a cumplir fue el identificar la diferencia mampostería relleno de mortero con pedazos de cantera contra solamente la técnica sillar tanto adentro como afuera, así que se hizo un modelo con sillares tanto por dentro como por fuera para la apariencia exterior se usó la regular con junta de 0.5 cm de la Figura 3.2.2 para obtener módulo de elasticidad, ductibilidad y resistencia a compresión.

Entonces se hicieron los siguientes modelos:

El primero se modeló mampostería toda de sillares incluso por dentro con un espesor de junta de 0.5 cm como se muestra en la Figura 3.2.4

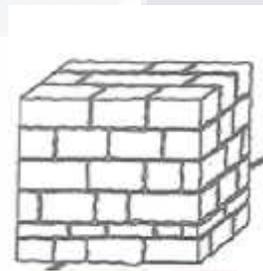


Figura 3.2.4 Modelo todo de sillar

Después se modeló mampostería irregular con junta de 0.5 cm y 2 cm con material de relleno de mortero y pedazos de cantera como se muestra en la Figura 3.2.5

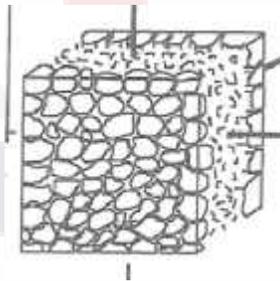


Figura 3.2.5 Modelo de mampostería irregular con relleno

Después se modelo mampostería regular con junta de 0.5 cm y 2 cm con material de relleno de mortero y pedazos de cantera, como se muestra en la Figura 3.2.6

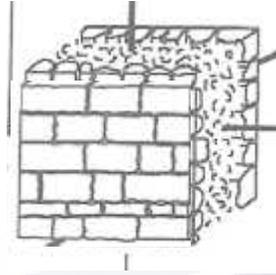


Figura 3.2.6 Modelo de mampostería regular con relleno

Como la mayoría de muros de las fachadas de la catedral tienen anchos aproximadamente entre 1.2 m a 1.6 m se escogió un ancho de 1.4 m para todos los modelos. Por estos mismos anchos se cree que la catedral tiene mampostería de 3 hojas debido que las piedras miden de 30 cm a 50 cm. Se acordó para el largo de los modelos y usar 2 m de largo por facilidad de tomar patrón del metro cuadrado, y de alto se propuso 3 m para que tuvieran una relación mayor a 2 a 1 con respecto a la base, como lo recomienda (“NMX-C-128-1997-0NNCCE” 1997).

Para las dimensiones de la piedra cantera se modelaron piedras de la dimensiones de frente vista de la catedral de Aguascalientes y se le dieron una profundidad de 30 a 50 cm, cuidando que los modelos de juntas iguales tuvieran el mismo volumen de piedra independientemente de que fuera mampostería irregular o regular.

3.3.- Para modelación en Abaqus

Se modeló el mortero en 3D como se muestra en la Figura 3.3.1 con un ancho de 30 cm debido a que fue la dimensión menor de las piedras con la características de espécimen 3, debido a que este tuvo un módulo de elasticidad medio de los especímenes de mortero con cal pero en un lugar de darle todo la gráfica a Abaqus se simplifico a 3 puntos para que fuera más fácil su convergencia en Abaqus, los cuales se muestran en la siguiente tabla 3.1.1

Es cierto que los cubos de mortero excedieron, resistencia sin embargo se optó por escoger el los datos del espécimen 3 debido a que se buscaba someterle a una curva de esfuerzo vs deformación y ver la ductibilidad de la mampostería.

Esfuerzo kg/cm ²	Deformación unitaria
0.0000	0.0000
4.9874	0.0024
4.4642	0.0179

Tabla 3.1.1 Esfuerzo-Deformación para caracterización del mortero 22

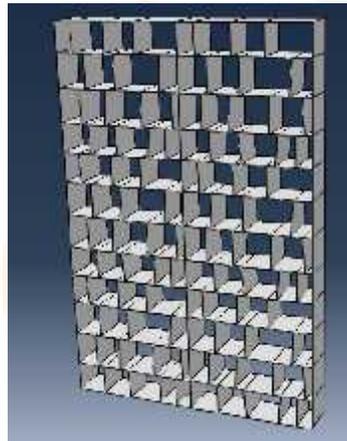


Figura 3.3.1 Modelación del mortero

Para modelar relleno de mortero con cantera se creó un sólido en 3D teniendo huecos en sus caras exteriores donde pasaba una piedra como se ve en la figura 3.3.1 para cuestión de características mecánica del material se metió la del espécimen 8 debido a que el módulo de elasticidad quedo en medio de igual manera la curva se tuvo que simplificar a 3 puntos los cuales se muestran en la tabla 3.1.2 para facilitar la convergencia.

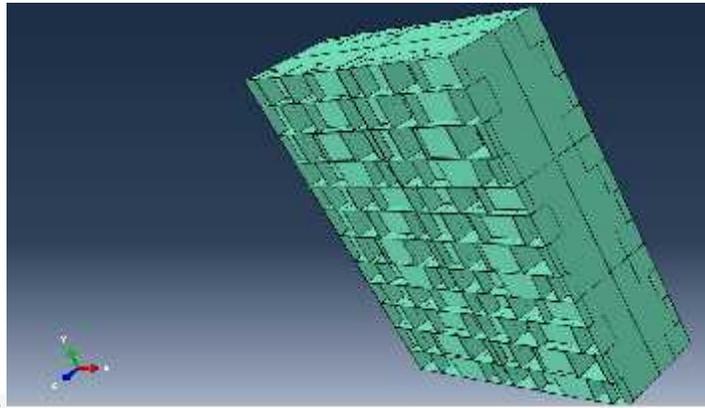


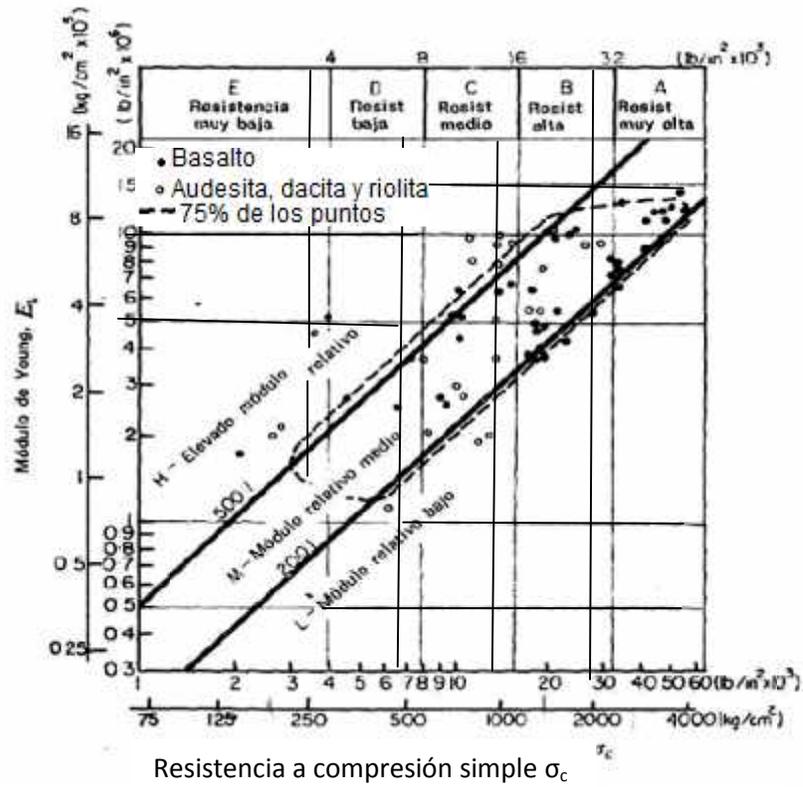
Figura 3.3.2 Modelación del relleno de la mampostería 55

Esfuerzo kg/cm ²	Deformación unitaria
0.0000	0.0000
3.0969	0.0094
2.5349	0.0201

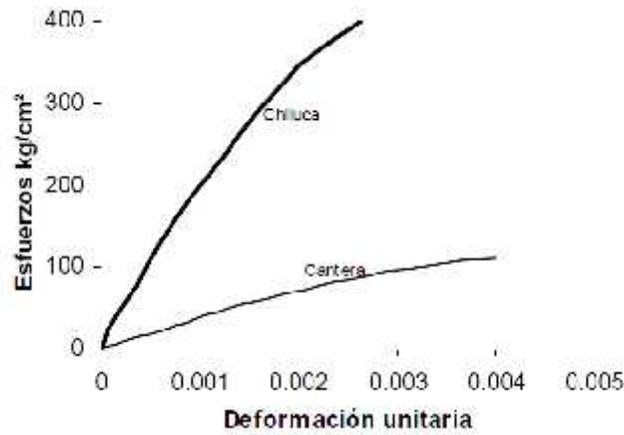
Tabla 3.1.2 Esfuerzo-Deformación para caracterización del relleno

La cantera se modeló con diferentes características mecánicas debido a que como son problemas no lineales y se tuvo conocimiento que al momento de que se le asignaba un módulo de elástico de la cantera encontrado en (Montoro, 1970) Cuyo valor es de 20,000 kg/cm² para la cantera, que es una Riolita, como se muestra en la Grafica 3.1.1.

Con esta característica, algunos modelos alcanzaban su convergencia, pero no todos; entonces se propuso tomar otra curva de cantera encontrada en (Meli, Sánchez, & Torres, 2002), como se muestra en la Grafica 3.1.2. Como unos modelos que no convergían, convergieron; pero otros que con la anterior características, si convergían a hora ya no convergían. Esto nos llevó a combinar estas dos fuentes de la siguiente manera tablas 3.1.3 en cada modelo de manera diferente pero terminando en el mismo punto de deformación y esfuerzo a acumulado. Esto se debió a que el cambiar el módulo de elasticidad en ocasiones más rígido y en ocasiones más dúctil que ocasiono que se deformaran en diferentes tiempos del análisis el mortero y el relleno y la cantera, y fuera más fácil para Abaqus el análisis. Y para el módulo de Poisson se tomo 0.25 (Farmer, 1968).



Grafica 3.1.1 Características mecánicas de rocas Riolita, Basalto y otras rocas volcánicas(Montoro, 1970)



Grafica 3.1.2 Curva de Esfuerzo-Deformación Unitaria en cantera (Meli et al., 2002)

En base a las siguientes tablas se hizo la corrección:

Relleno de sillar de piedra	
Esfuerzo (kg/cm ²)	Def. Unitaria
0	0
5	0.000025
30	0.001
60	0.002
90	0.003
100	0.004
90	0.005

Regular junta de 0.5cm	
Esfuerzo (kg/cm ²)	Def. Unitaria
0	0
20	0.0001
30	0.001
60	0.002
90	0.003
100	0.004
90	0.005

Regular junta de 2 cm	
Esfuerzo (kg/cm ²)	Def. Unitaria
0	0
10	0.00005
30	0.001
60	0.002
90	0.003
100	0.004
90	0.005

Irregular junta de 0.5 cm	
Esfuerzo (kg/cm ²)	Def. Unitaria
0	0
5	0.000025
30	0.001
60	0.002
90	0.003
100	0.004
90	0.005

Irregular junta de 2 cm	
Esfuerzo (kg/cm ²)	Def. Unitaria
0	0
30	0.001
60	0.002
90	0.003
100	0.004
90	0.005

Tabla 3.1.3 Serie de tablas de corrección de parámetros en cantera



Grafica 3.1.3 Graficas de esfuerzo-deformación de la cantera para cada uno de los modelos

Interacción en el modelo

En cuestión de la interacción entre las rocas y el mortero fue “Tie” en Abaqus, de igual manera entre el mortero y el relleno debido que esto hace más simple el análisis en Abaqus para facilidad la convergencia como se muestra Figura 3.3.3.

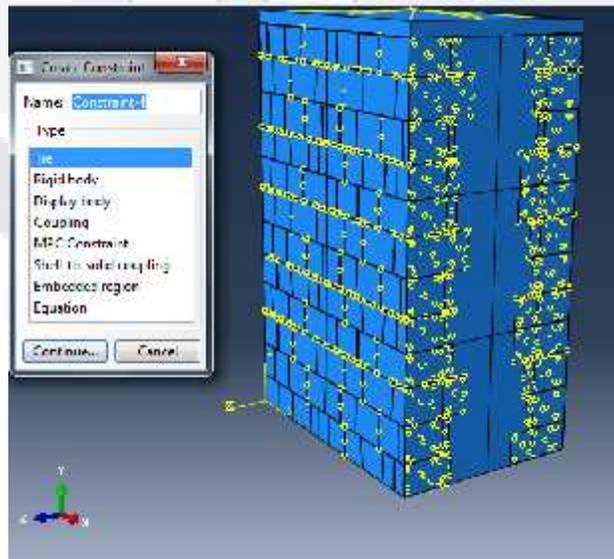


Figura 3.3.3 interacción entre las piedras y el mortero, a su vez entre el mortero y el relleno

3.4.- Enmallado

Enmallado fue realizado a cada 10 cm en todo, sin embargo una parte se modelo con mallado de hexaedros y otra con tetraedros. Con hexaedros se realizó una placa y piedras ya que un que estos tienen a converger más fácil en los modelos, pero no todo se pudo mallar en Abaqus con hexaedros, entonces se necesitó de los tetraedros, con los cuales se malló el mortero y el relleno como se ve en la siguiente Figura 4.4.1.

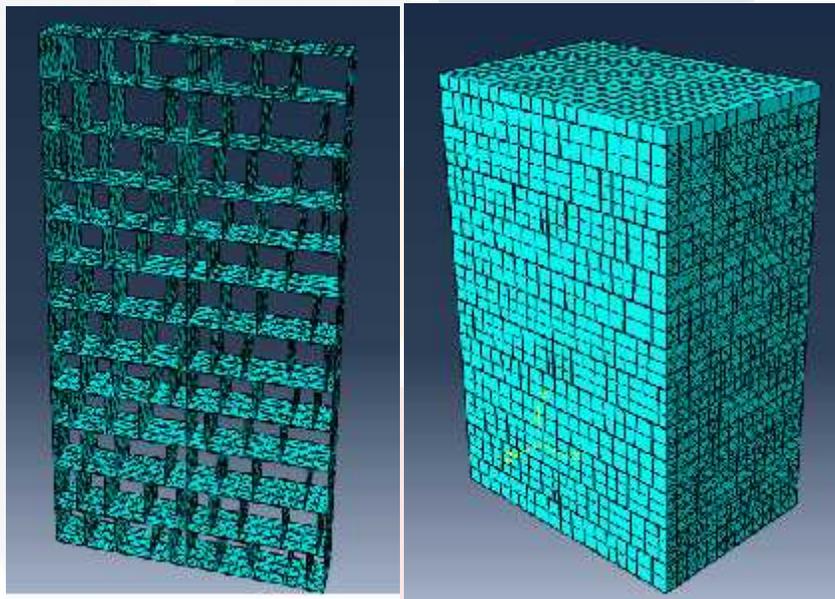


Figura 4.4.1 enmallado de los modelos

En cuestión de simular lo más cercano a la realidad la prueba de compresión se optó por poner una placa de 10 cm de acero, con un $f_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$ además con la función “compling” de Abaqus, se compilo la superficie superior de la placa a un nodo de la parte superior de la placa, el cual fue restringido en el eje x, z, y la rotación tanto en y,x y z, para que la placa solo se moviera en y; la interface entre la placa y el muro se modelo como contacto tangencial sin fricción y normal con penalti entre la superficie de contacto .

La carga se aplicó en la superficie de la placa y en la parte del área inferior del muro se articuló, como se muestra en la siguiente Figura 4.4.2. Estos análisis no tienen en cuenta

la gravedad debido a que el Abaqus no lo toma como una carga si no una aceleración y hace más complejo los análisis.

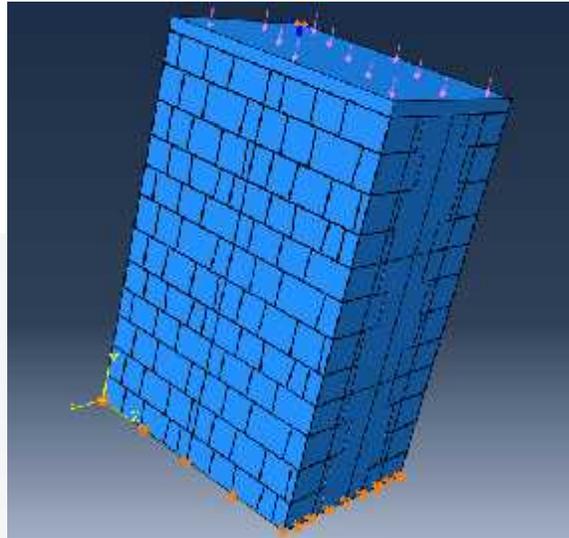


Figura 4.4.2 aplicación de carga y restricciones en los modelos 58

4.-Resultados

4.1.- Primer modelo de ensayo (Muro 1)

Resultados de los modelos de sillar con relleno se puede dar cuenta que el modelo no se cició, si no, que llegó a su esfuerzo último de carga por que llego máximo esfuerzo de Von Mises de la piedra, como se puede ver en la Figura 4.4.3. Se puede observar que la distribución de esfuerzos de Von Mises son homogéneos en gran cantidad, incluso en los sillares del centro como se puede observar en la Figura 4.4.4, la cual es una Figura quitando el mortero y quedando solo los sillares.

De igual manera si vemos desplazamiento de los sillares en y podemos observar que es completamente homogéneo como se ve en la Figura 4.4.5.

Para obtener una curva de esfuerzo deformación se tomaron los desplazamientos del modelo con forme al tiempo. Con los desplazamiento están en cm y se dividió entre 300 por lo largo del modelo para obtener la deformación unitaria y con el tiempo del análisis se puede obtener que carga que se está aplicando en ese momento ya que cuando llegue al tiempo de 1 se estará aplicando una presión de 110 kg/cm² y con una regla de 3 se obtiene la presión aplicada que tiene en ese momento. Entonces como nuestro modelo solo llego a un tiempo 0.8 encontramos que fallo en 88 kg/cm² como se indica en la Figura 4.4.5.

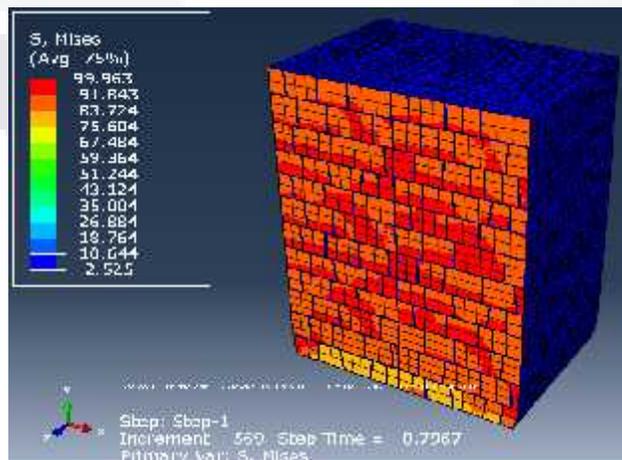


Figura 4.4.3 muro 1 esfuerzo de von mises en el mortero y en la cantera en el incremento 569

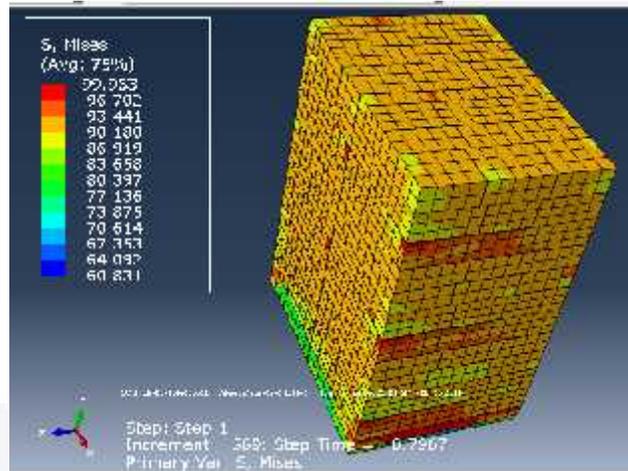


Figura 4.4.4 muro 1 esfuerzo de von mises en la cantera incremento 569 60

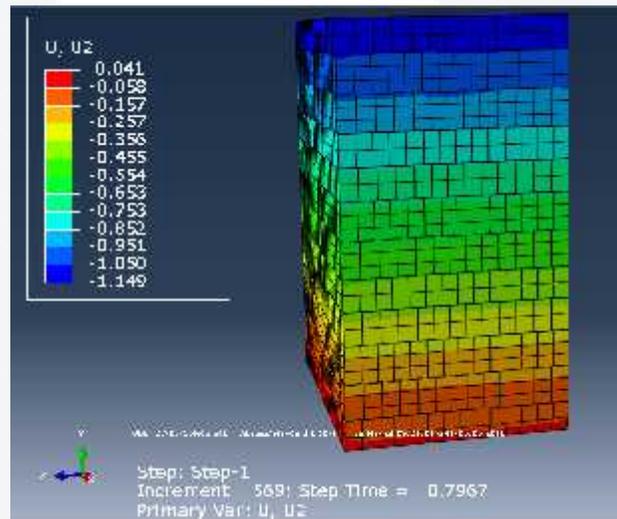


Figura 4.4.5 muro 1 deformaciones en cm en sentido de la aplicación de la carga en el incremento 569

Entonces se obtuvo la siguiente tabla de este modelo.

Incremento	U2(cm)	Tiempo	Def. unitaria	Esfuerzo (kg/cm ²)
0	0.000	0.000	0.0000	0.00
5	0.106	0.100	0.0004	11.00
15	0.250	0.190	0.0008	20.90
18	0.410	0.300	0.0014	33.00
27	0.550	0.410	0.0018	45.10
30	0.670	0.510	0.0022	56.10
32	0.872	0.650	0.0029	71.50
569	1.150	0.800	0.0038	88.00

Tabla 4.1.1 Esfuerzo vs Deformación muro 1 25

Se anexaron imágenes en Abaqus de tabla esfuerzo vs deformación de mampostería de sillar dentro y fuera.

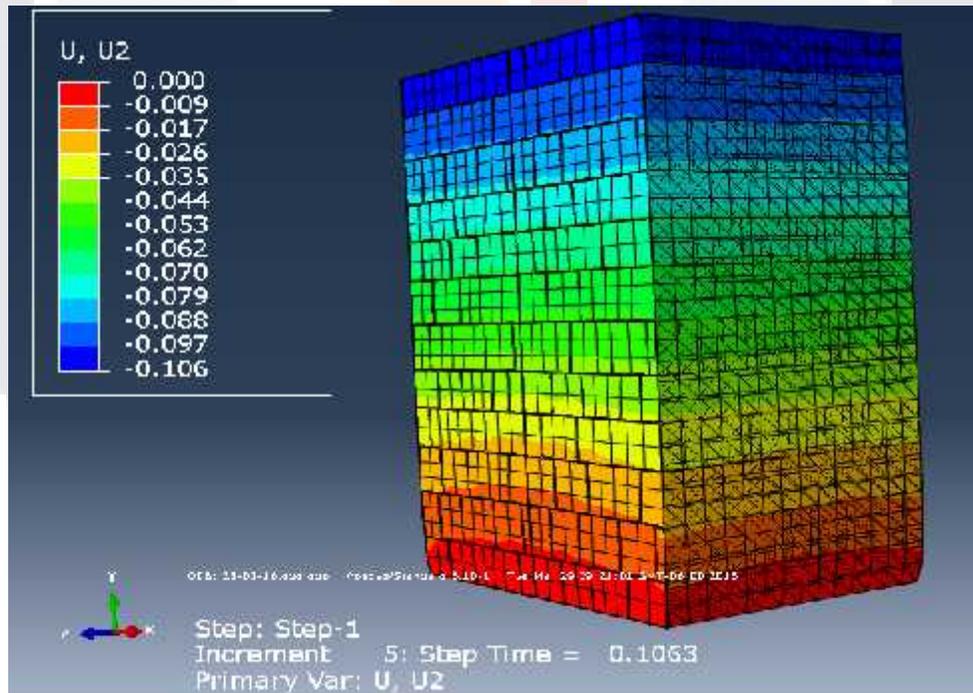


Figura 4.4.6 muro 1 deformación en cm en sentido de la aplicación de la carga en el incremento 5

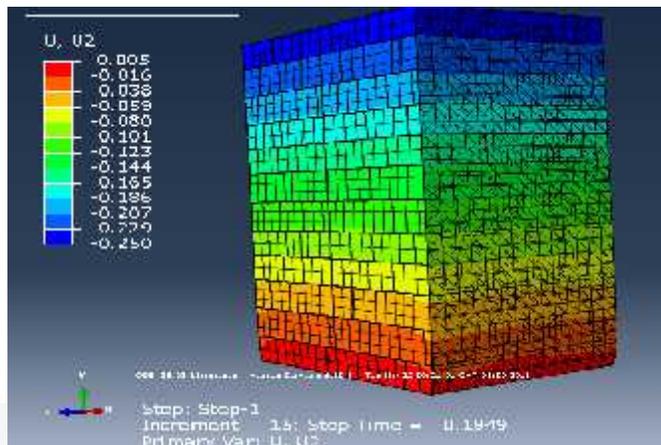


Figura 4.4.7 muro 1 deformación en cm en sentido de la aplicación de la carga en el incremento 15

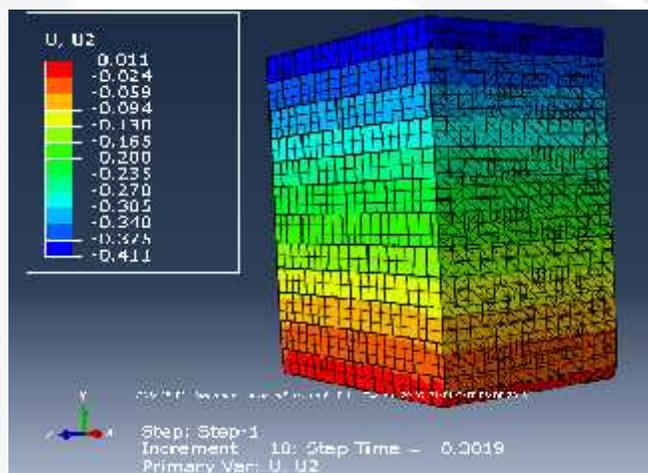


Figura 4.4.8 muro 1 deformación en cm en sentido de la aplicación de la carga en el incremento 18

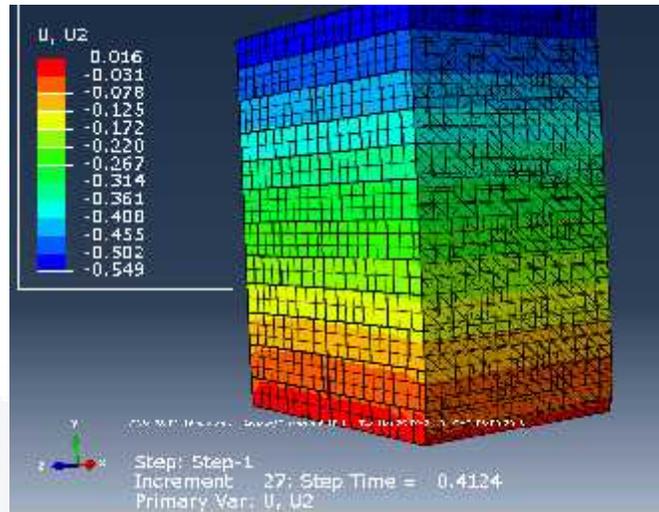


Figura 4.4.9 muro 1 deformación en cm en sentido de la aplicación de la carga en el incremento 27

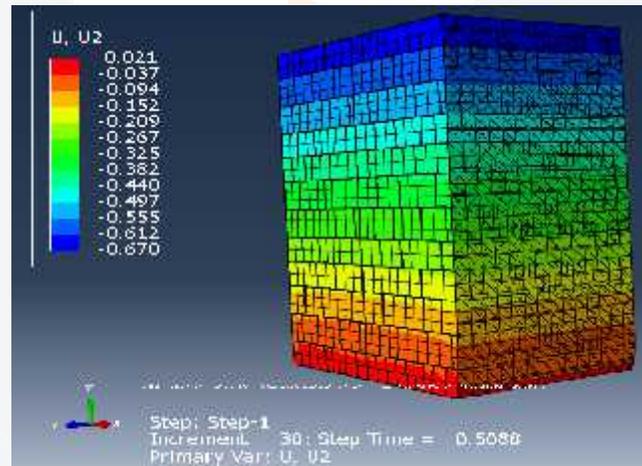


Figura 4.4.10 muro 1 deformación en cm en sentido de la aplicación de la carga en el incremento 30

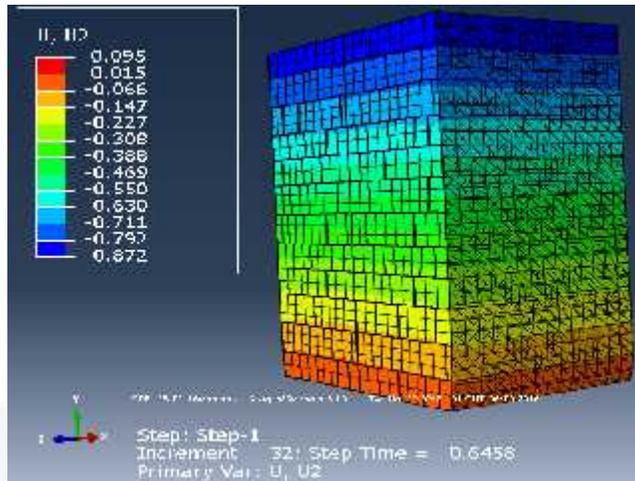


Figura 4.4.11 muro 1 deformación en cm en sentido de la aplicación de la carga en el incremento 32

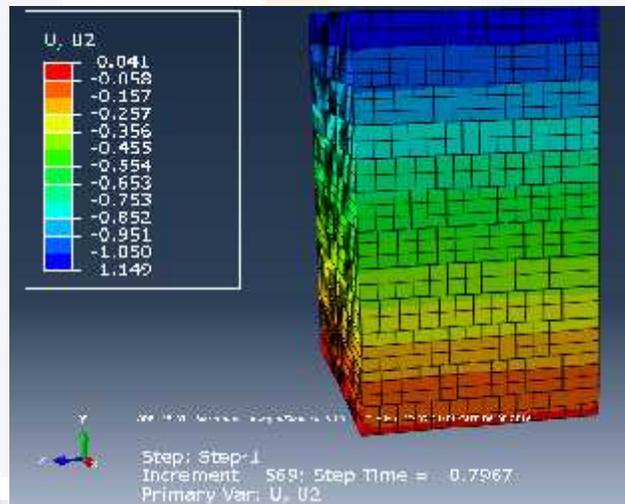


Figura 4.4.12 muro 1 deformación en cm en sentido de la aplicación de la carga en el incremento 569

4.2 Segundo Modelo de ensayo (muro 2)

Para el segundo modelo con mampostería regular con junta 0.5 cm se puede observar que no se cicló al correr el modelo por que llegó a los esfuerzos últimos de la cantera, como se puede observar en la Figura 4.5.1 mampostería, de igual manera no llegó a su resistencia última el relleno como se observa en la Figura 4.5.2; sin embargo se ve más homogéneo que la mampostería irregular. También se observa que durante la aplicación de la carga en el mortero la distribución de esfuerzo se distribuye en las líneas horizontales, como se puede observar en la Figura 4.5.3, y no en puntos como en la mampostería irregular que en seguida se documentó.

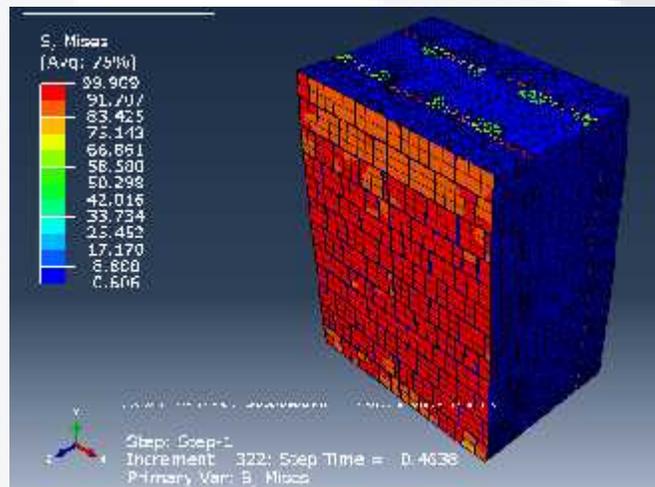


Figura 4.5.1 esfuerzos de von mises en (kg/cm²) de muro 2 de la piedra y el mortero en el incremento 322

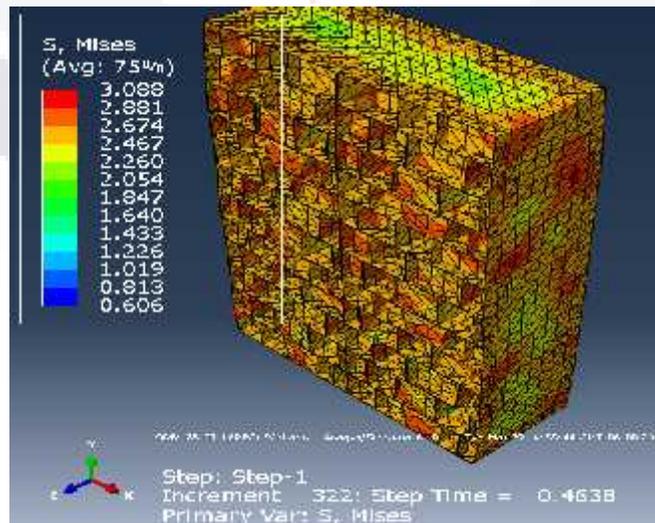


Figura 4.5.2 esfuerzos de von mises en (kg/cm²) de muro 2 en el relleno en el incremento 322

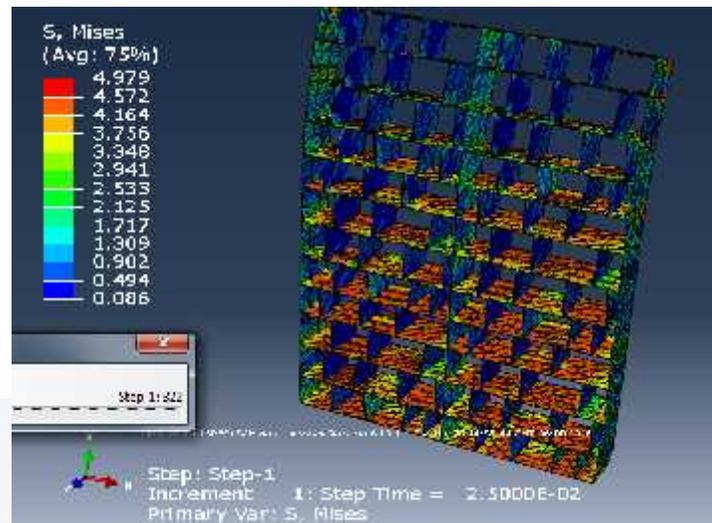


Figura 4.5.3 esfuerzos de von mises en (kg/cm²) de muro 2 en el mortero en el incremento 1

Incremento	U2(cm)	Tiempo	Def. unitaria	Esfuerzo (kg/cm ²)
0	0.000	0.000	0.0000	0.00
11	0.076	0.089	0.0003	9.79
56	0.383	0.150	0.0013	16.50
78	0.637	0.233	0.0021	25.63
85	0.780	0.284	0.0026	31.24
88	0.944	0.340	0.0031	37.40
92	1.220	0.417	0.0041	45.87
322	1.490	0.460	0.0050	50.60

Tabla 4.1.2 Esfuerzo vs Deformación del muro 2 26

Se anexaron imágenes en Abaqus del resultado esfuerzo vs deformación de mampostería de sillar con relleno y juntas de 0.5 cm

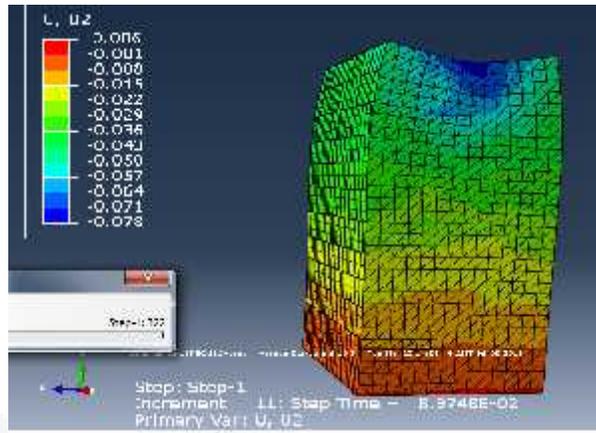


Figura 4.5.4 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 2 incremento 11

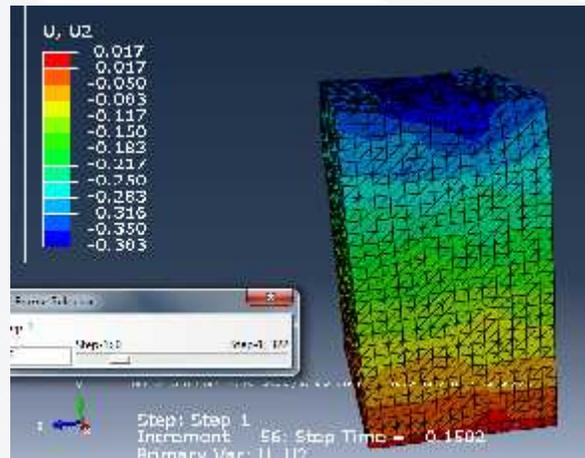


Figura 4.5.5 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 2 incremento 56

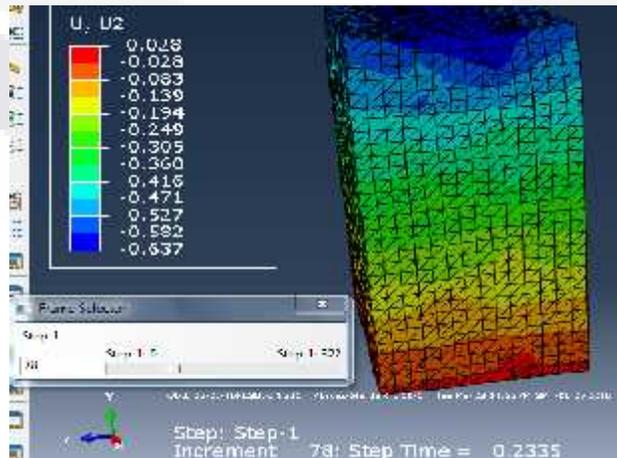


Figura 4.5.6 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 2 incremento 78

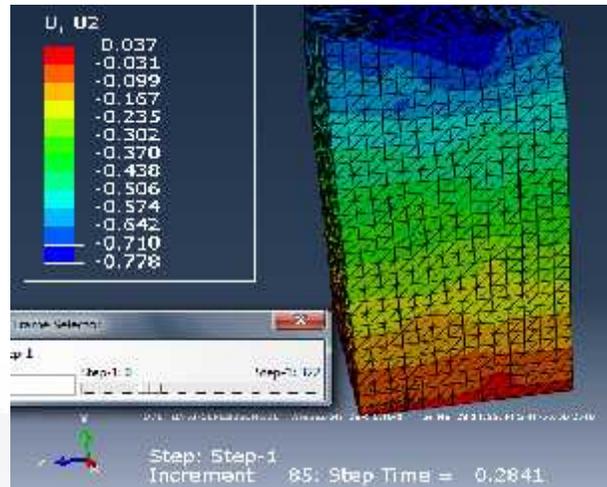


Figura 4.5.7 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 2 incremento 85

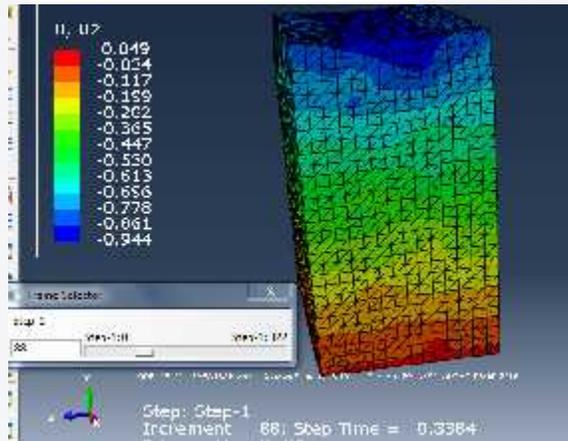


Figura 4.5.8 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 2 incremento 88

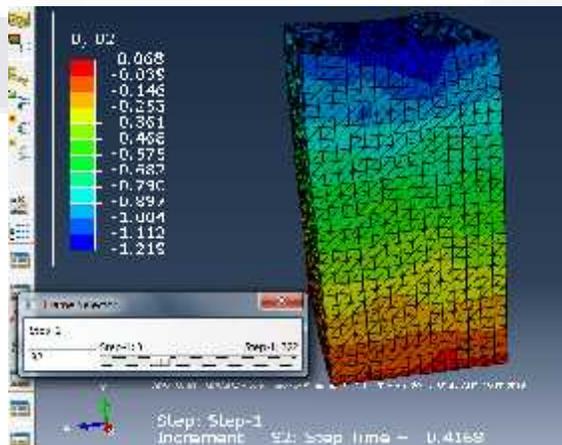


Figura 4.5.9 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 2 incremento 92

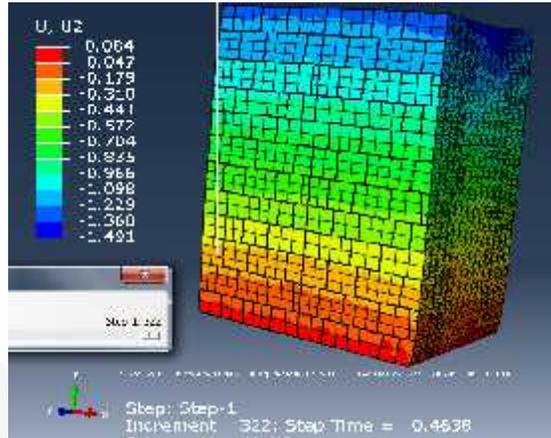


Figura 4.5.10 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 2 incremento 322

4.3 Tercer Modelo de ensayo (muro 3)

Tercer modelo se elaboró de mampostería regular con junta de 2 cm con relleno, este modelo se puede observar que llegó a su resistencia última de la mampostería debido a que la cantera llegó a su resistencia máxima de esfuerzos de Von Mises como puede observarse en la Figura 4.6.1. Sin embargo el relleno no llegó a su resistencia máxima, esto puede notarse en la como se ve en la Figura 4.6.2; aunque la distribución de los esfuerzos en el mortero fue óptimamente homogénea como se ve en la Figura 4.6.3, en comparación con la mampostería irregular que se vera más tarde en la modelación.

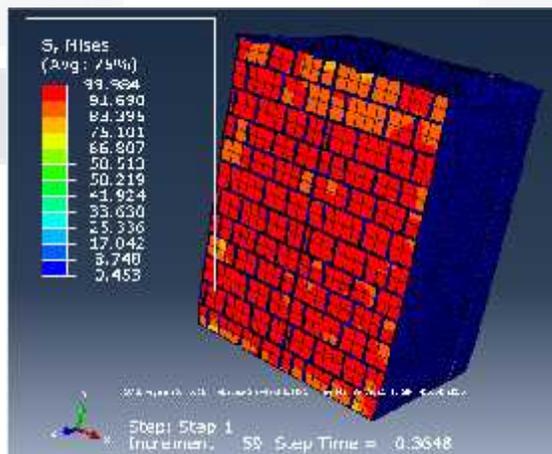


Figura 4.6.1 Esfuerzos de Von Mises en (kg/cm^2) del muro 3 en la piedra, en el relleno y mortero incremento

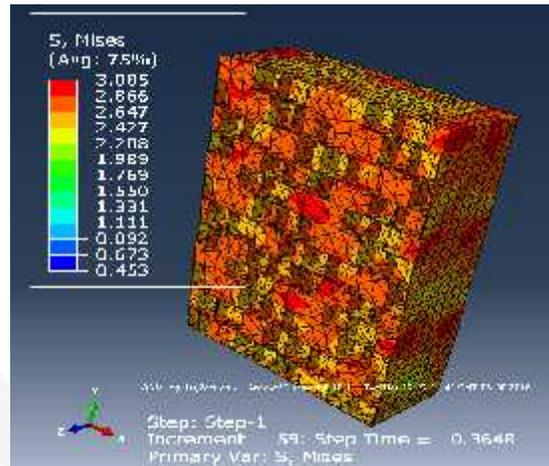


Figura 4.6.2 Esfuerzos de Von Mises en (kg/cm²) del muro 3 en el relleno incremento 59

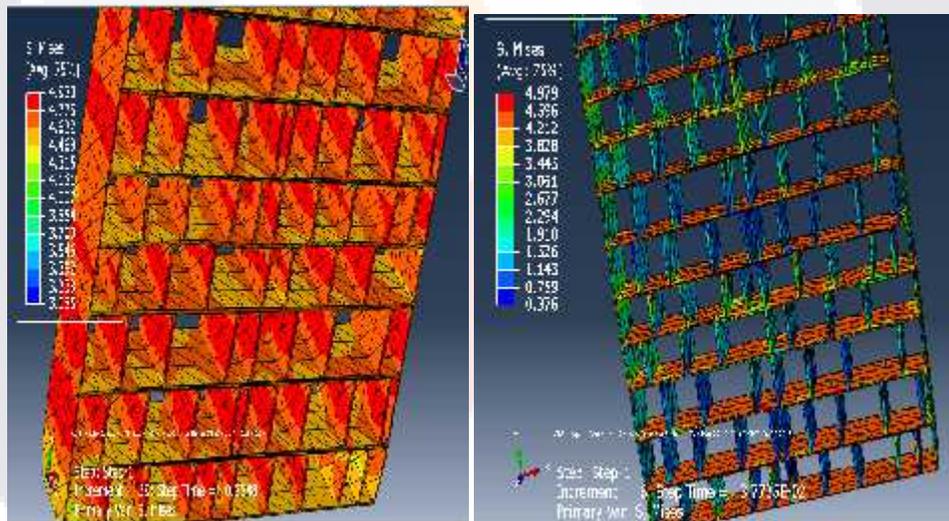


Figura 4.6.3 Esfuerzos de Von Mises en (kg/cm²) del muro 3 en el mortero incremento 59 y 6

Entonces de este modelo se sacó la siguiente tabla de esfuerzo contra deformación.

Incremento	U2(cm)	Tiempo	Def. unitaria	Esfuerzo (kg/cm2)
0	0.000	0.000	0.0000	0.000
11	0.110	0.050	0.0004	5.500
15	0.481	0.120	0.0016	13.200
18	0.736	0.180	0.0025	19.800
19	0.921	0.220	0.0031	24.200
20	1.210	0.280	0.0040	30.800
23	1.570	0.340	0.0052	37.400
30	1.660	0.350	0.0055	38.500
39	1.850	0.365	0.0062	40.128

Tabla 4.1.3 Esfuerzo vs Deformación muro 3

Se anexaron imágenes en Abaqus del resultado esfuerzo vs deformación de mampostería regular con relleno de y juntas de 2 cm

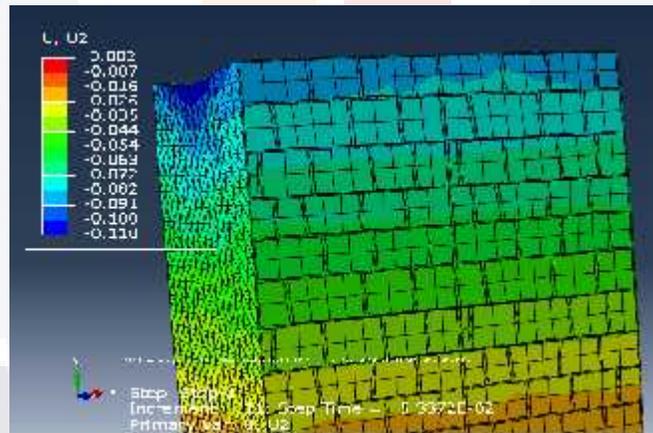


Figura 4.6.4 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 3 incremento 11

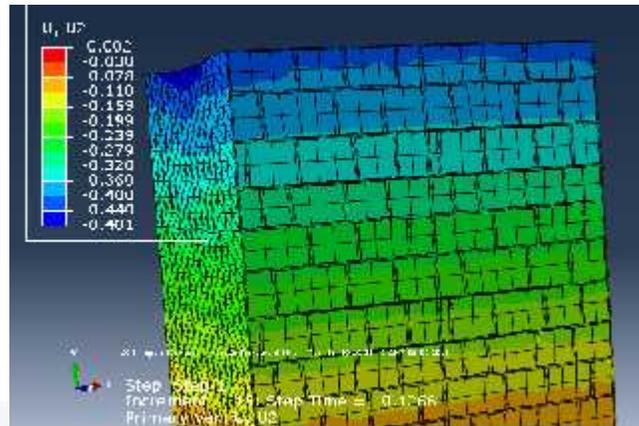


Figura 4.6.5 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 3 incremento 15

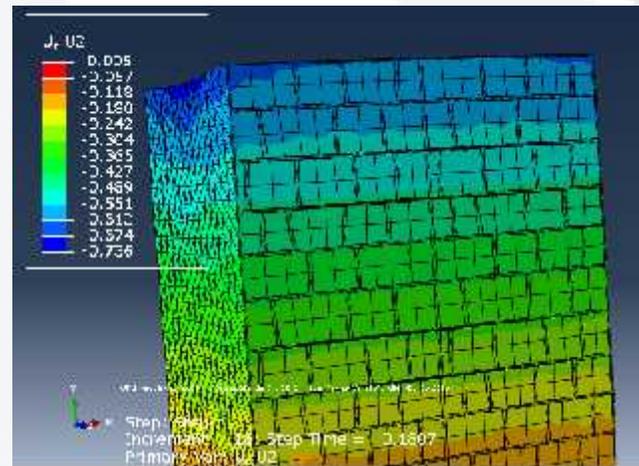


Figura 4.6.6 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 3 incremento 18

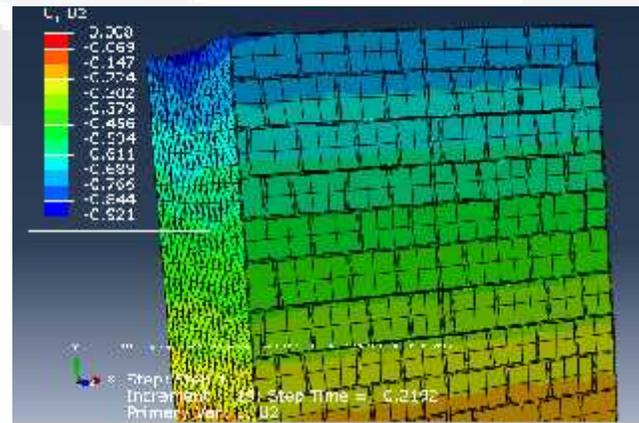


Figura 4.6.7 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 3 incremento 19

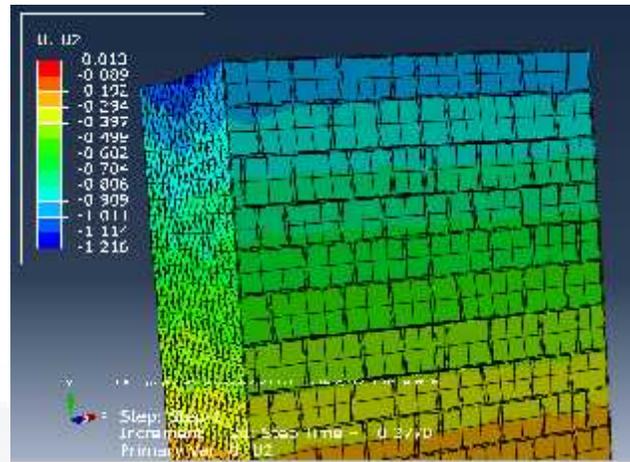


Figura 4.6.8 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 3 incremento 20

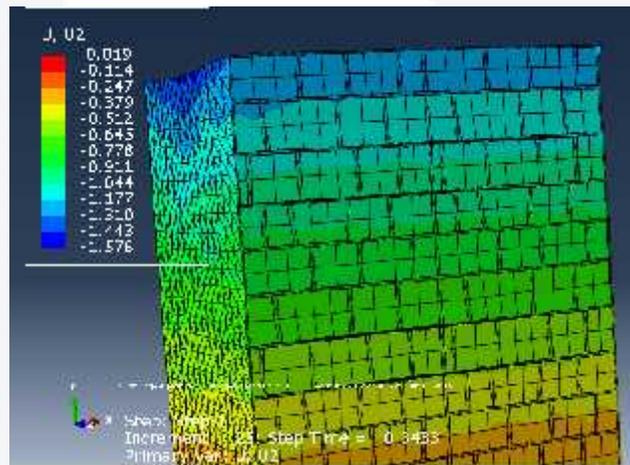


Figura 4.6.9 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 3 incremento 23

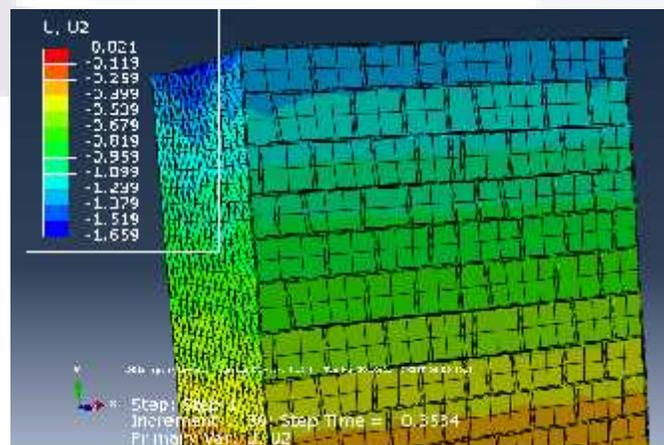


Figura 4.6.10 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 3 incremento 30

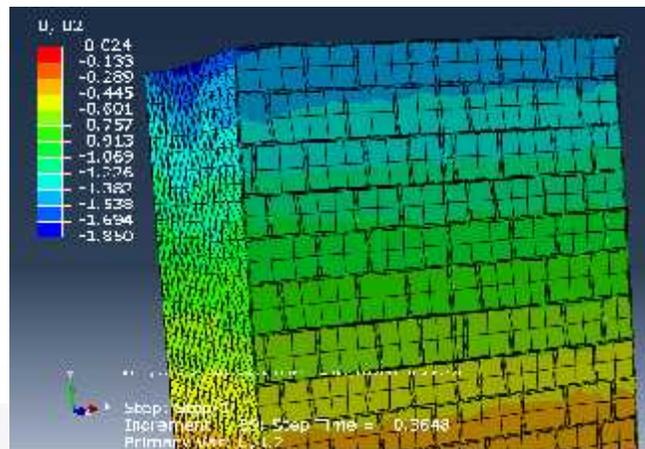


Figura 4.6.11 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 3 incremento 39

4.4 Cuarto Modelo de ensayo (muro 4)

Se realizó el siguiente modelo de mampostería irregular con junta de 0.5cm con relleno. Se pudo observar que no se cicló el análisis, pues se llegó a la resistencia última en la cantera como en el mortero, lo que se observa en Figura 4.7.1 Sin embargo en el relleno no alcanzó su resistencia última, como se puede observar en la Figura 4.7.2, debido a la mala distribución de esfuerzo. Durante el análisis se pudo observar que los esfuerzos del mortero se concentraban en ciertos puntos como se muestra Figura 4.7.3; así como se identificaron concentraciones de esfuerzos en ciertas líneas de fractura como se muestra en la Figura 4.7.4 y también se puede observar cómo se distribuye los esfuerzos en el relleno en la Figura 4.7.6, así como al momento de los desplazamiento, estos son más heterogéneos; tal se muestra en la Figura 4.7.7.

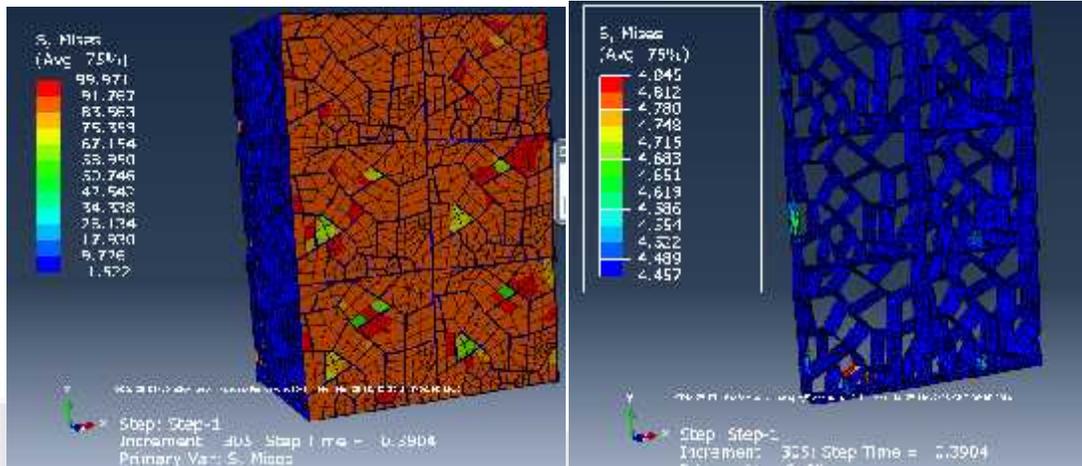


Figura 4.7.1 Esfuerzos de Von Mises en (kg/cm^2) en cantera y mortero en el muro 4 en el incremento 305

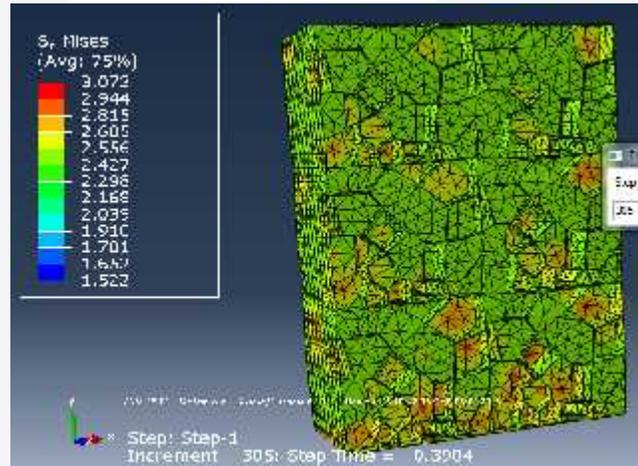


Figura 4.7.2 Esfuerzos de Von Mises en (kg/cm^2) en relleno en el muro 4 en el incremento 305

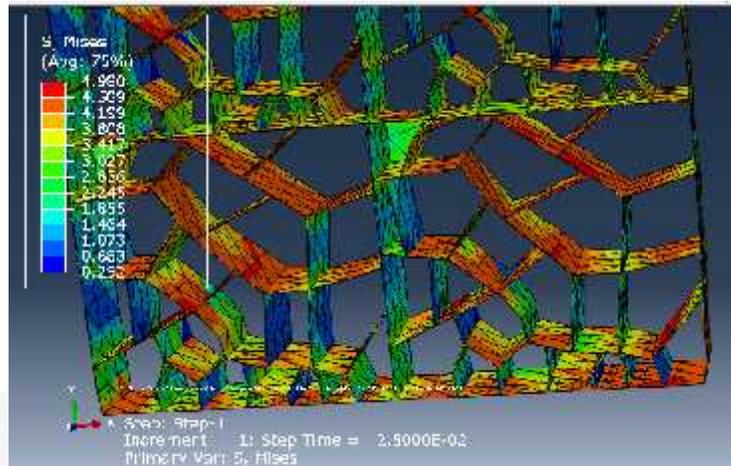


Figura 4.7.3 Esfuerzos de Von Mises en (kg/cm²) en mortero en el muro 4 en el incremento 1

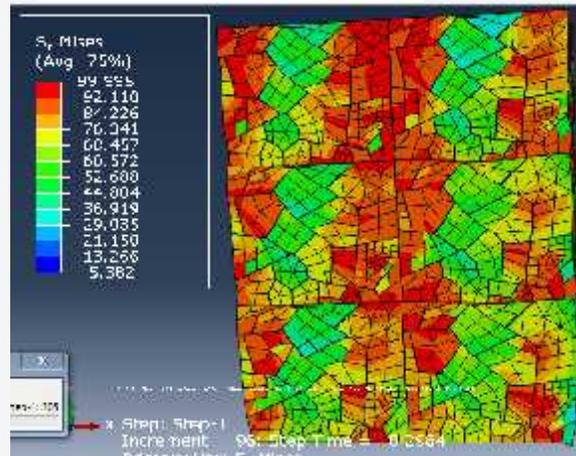


Figura 4.7.4 Esfuerzos de Von Mises en (kg/cm²) en la piedra en el muro 4 en el incremento 96

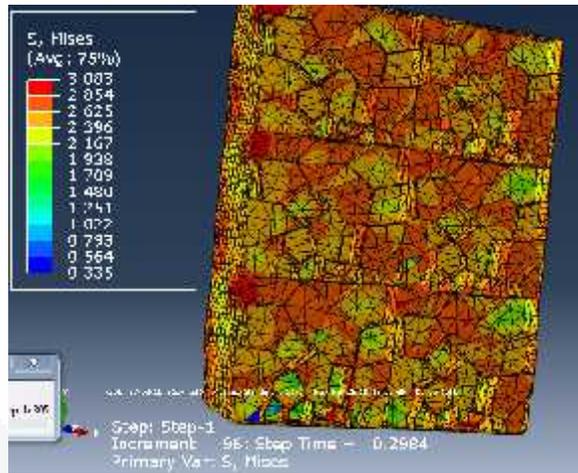


Figura 4.7.5 Esfuerzos de Von Mises en (kg/cm^2) en el relleno en el muro 4 en el incremento 96

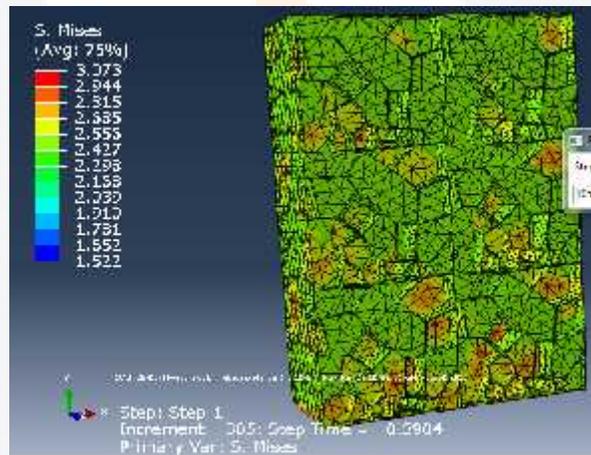


Figura 4.7.6 Esfuerzos de Von Mises en (kg/cm^2) en el relleno en el muro 4 en el incremento 305

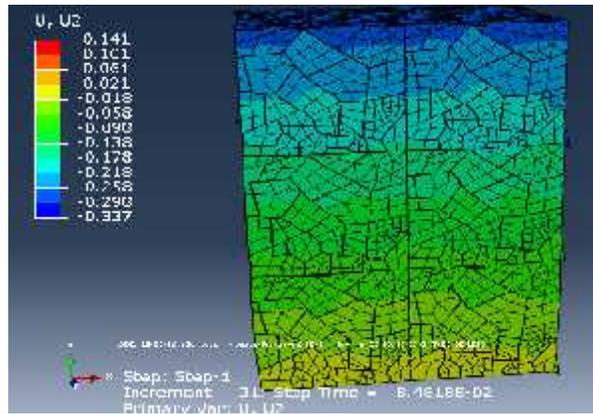


Figura 4.7.7 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 4 incremento 31

En este análisis se obtuvieron los siguientes resultados:

Incremento	U2(cm)	Tiempo	Def. unitaria	Esfuerzo (kg/cm ²)
0	0.000	0.000	0.00000	0.00
8	0.109	0.047	0.00036	5.17
31	0.337	0.084	0.00112	9.24
37	0.480	0.100	0.00160	11.00
54	0.580	0.150	0.00193	16.50
59	0.830	0.200	0.00277	22.00
72	1.120	0.250	0.00373	27.50
108	1.640	0.310	0.00547	34.10
165	3.900	0.350	0.01300	38.50
305	12.300	0.390	0.04100	42.90

Tabla 4.1.4 Esfuerzo vs Deformación muro 4

Se anexaron imágenes en Abaqus del resultado esfuerzo vs deformación de mampostería regular con relleno de y juntas de 2 cm

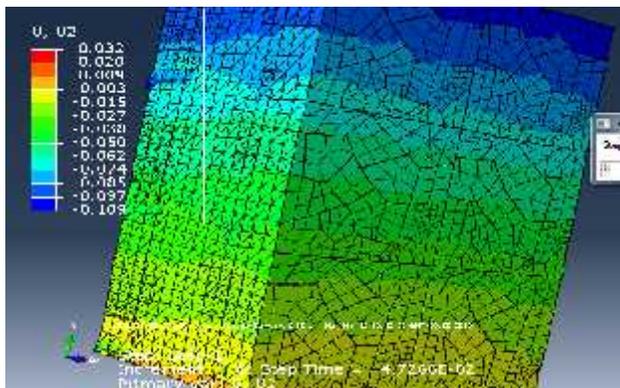


Figura 4.7.8 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 4 incremento 8

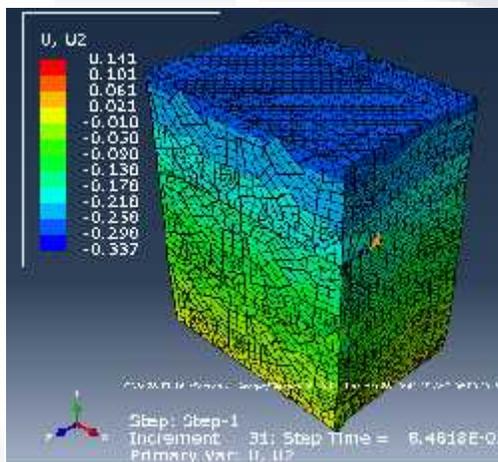


Figura 4.7.9 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 4 incremento 31

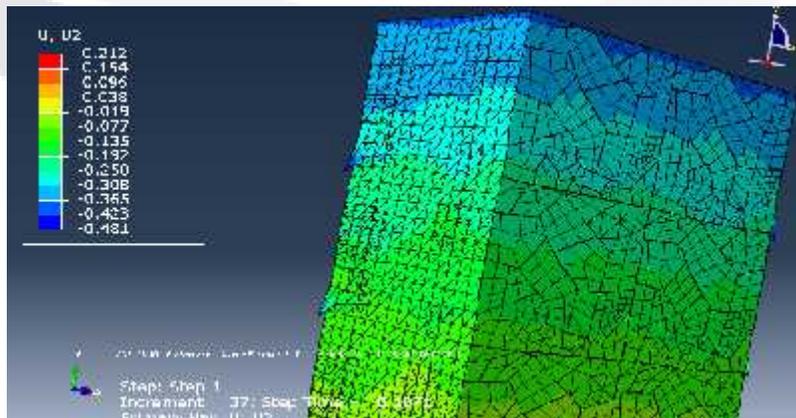


Figura 4.7.10 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 4 incremento 37

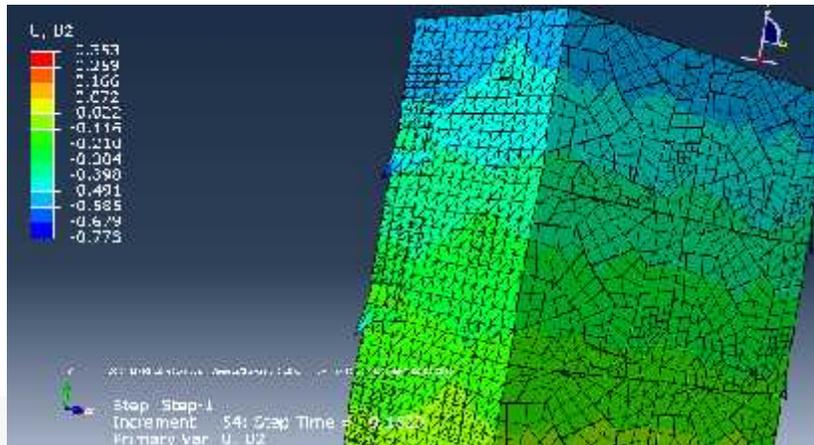


Figura 4.7.11 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 4 incremento 54

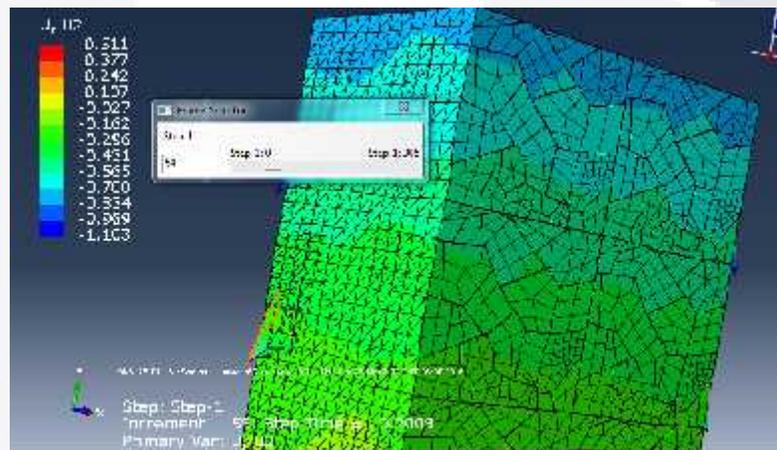


Figura 4.7.12 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 4 incremento 59

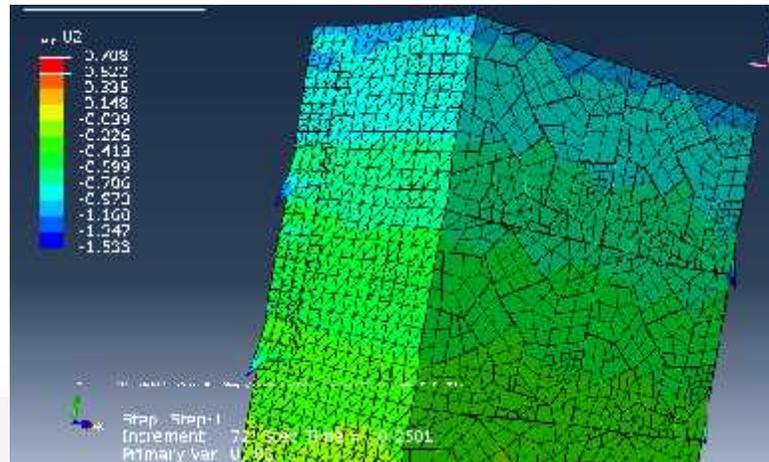


Figura 4.7.13 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 4 incremento 72

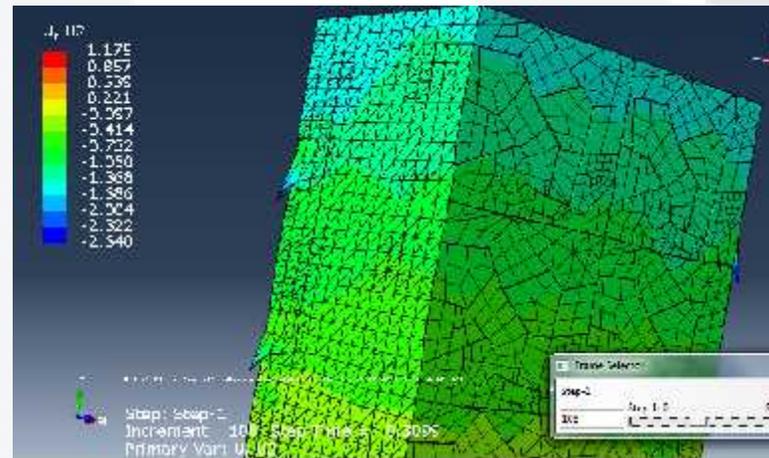


Figura 4.7.14 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 4 incremento 108

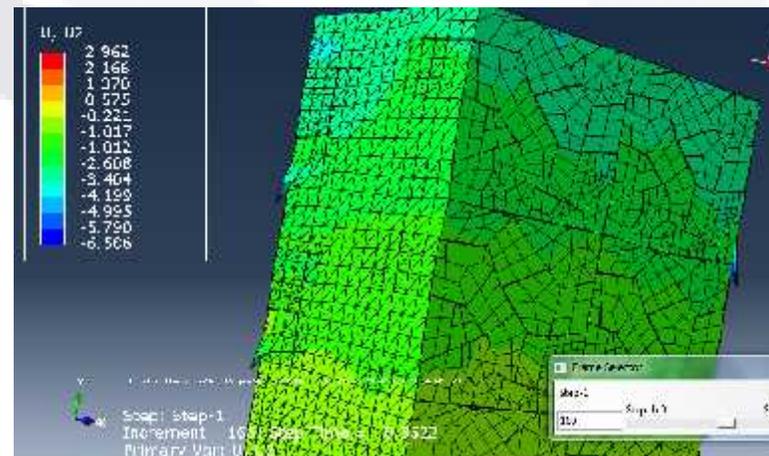


Figura 4.7.15 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 4 incremento 165

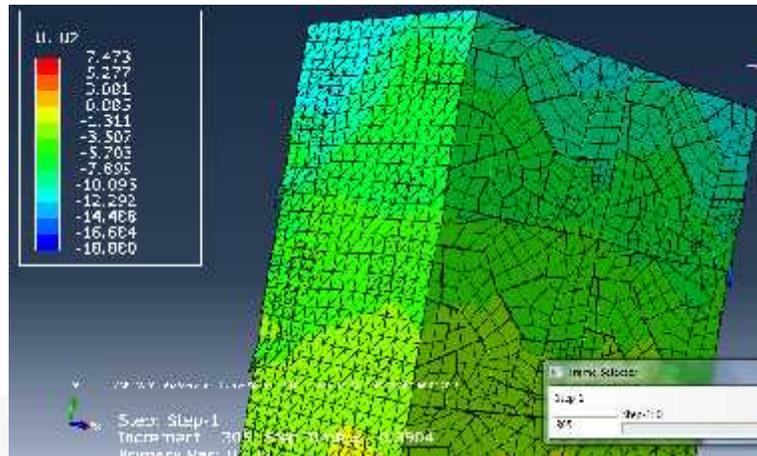


Figura 4.7.16 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 4 incremento 305

4.5 Quinto Modelo de ensayo (muro 5)

Se modeló un espécimen de mampostería irregular con junta de 2 cm, Este modelo si se cicló dado que el análisis no encontró convergencia, esto debido a que no se llegó al esfuerzo último en la cantera, como se puede observar en la Figura 4.8.1.

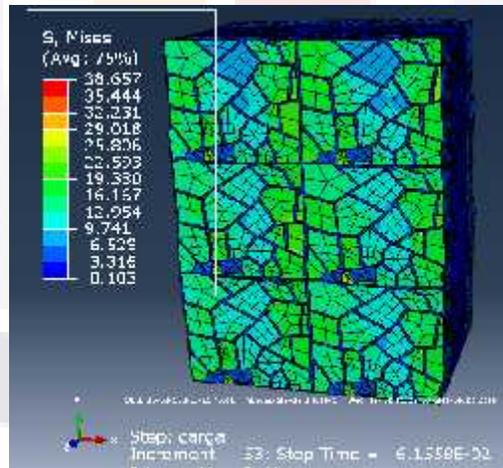


Figura 4.8.1 Esfuerzos de Von Mises en (kg/cm^2) en la piedra en el muro 5 en el incremento 53

Esta situación debió ocurrir debido a que hay más concentraciones de esfuerzos en ciertos puntos, como se puede observar la Figura 4.8.2, pues hay partes donde el mortero que está trabajando elásticamente, es decir todavía no se termina de plastificar, cuando en la cantera hay ciertos puntos del análisis que tienen esfuerzos de 38 kg/cm², como se muestra en Figura 4.8.1, y esto provoca que se empalmen las no linealidades del relleno y el mortero como se ve en Figura 4.8.3. Que provoca dificultades para solucionar las matrices en Abaqus y por lo tanto no se logró encontrar convergencia. Este problema se podría solucionar cambiando los valores de convergencia, pero se optó por no cambiarlos debido a que disminuiría la exactitud del análisis y los anteriores modelos no serían comparables con este.

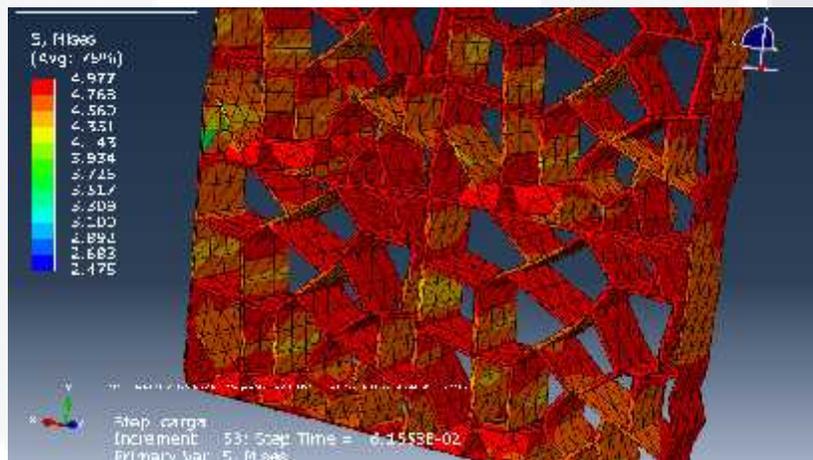


Figura 4.8.2 Esfuerzos de Von Mises en (kg/cm²) en el mortero en el muro 5 en el incremento 53

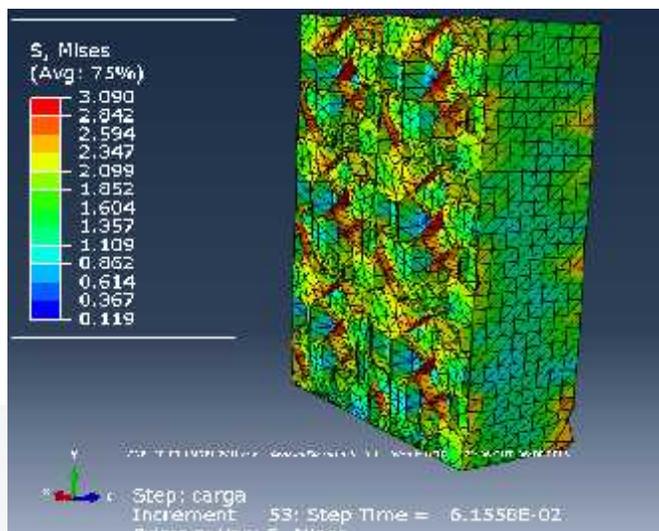


Figura 4.8.3 Esfuerzos de Von Mises en (kg/cm^2) en el relleno en el muro 5 en el incremento 53

Sin embargo con los primeros puntos del análisis se pudo imaginar el comportamiento de esta mampostería.

Incremento	U2(cm)	Tiempo	Def. unitaria	Esfuerzo (kg/cm^2)
0	0.000	0.0000	0.0000000	0.000
1	0.039	0.0100	0.0001300	1.100
2	0.079	0.0200	0.0002633	2.200
3	0.167	0.0350	0.0005567	3.850
4	0.343	0.0579	0.0011433	6.369
53	0.378	0.0615	0.0012600	6.765

Tabla 4.1.5 Esfuerzo vs Deformación muro 5

Se anexó la gráfica Esfuerzo-Deformación en este modelo debido a que fue el único que tuvo la particularidad de ciclar el cálculo, truncando los resultados pues no encontró convergencia.



Gráfica 4.1.1 Esfuerzo-Deformación de mampostería irregular con relleno y juntas de 2 cm.

Se anexaron imágenes en Abaqus del resultado esfuerzo vs deformación de mampostería irregular con relleno de y juntas de 2 cm

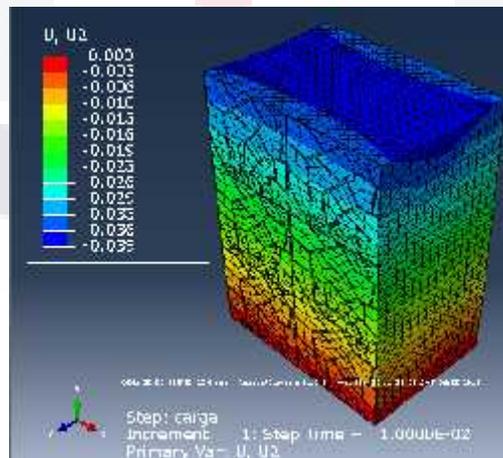


Figura 4.8.4 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 5 incremento 1

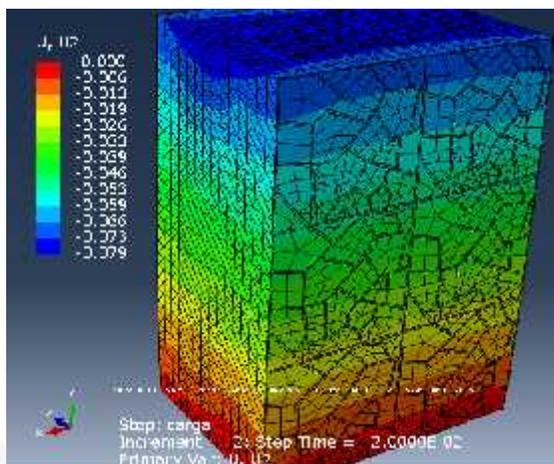


Figura 4.8.5 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 5 incremento 2

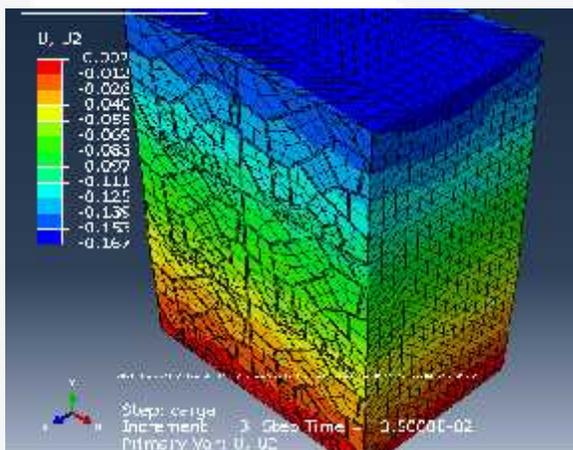


Figura 4.8.6 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 5 incremento 3

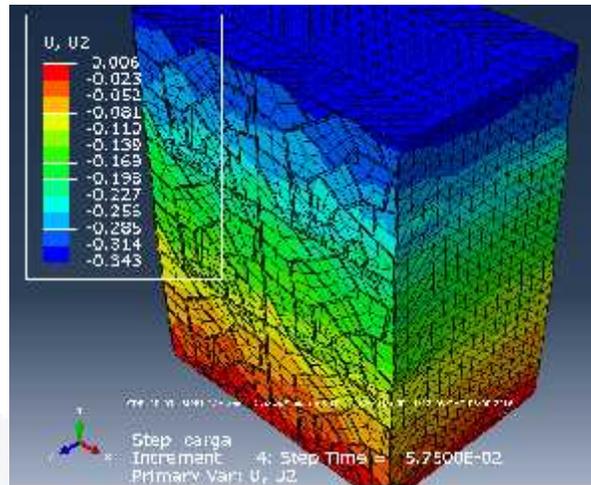


Figura 4.8.7 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 5 incremento 4

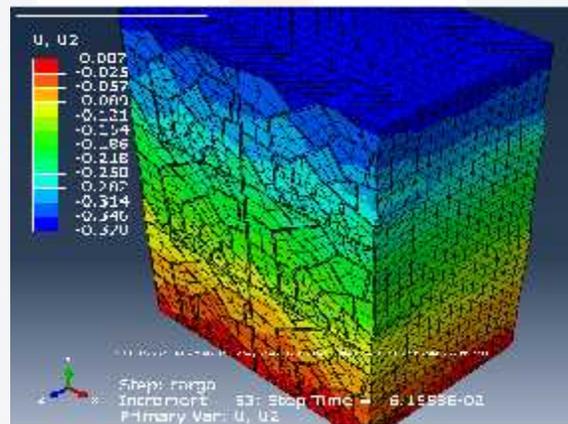


Figura 4.8.8 deformación en cm en dirección de la aplicación de la carga en el muro 5 incremento 53

Lo más parecida a la mampostería irregular con junta de 2 cm es la mampostería con junta de 0.5cm, de estos modelos podemos buscar el esfuerzo semejante donde se cedió la mampostería irregular de 2 cm como se muestra en la Figura 4.8.9, de acuerdo a una regla de 3, encontrar la gráfica esfuerzo-deformación aproximada de la mampostería irregular con junta de 2 cm.

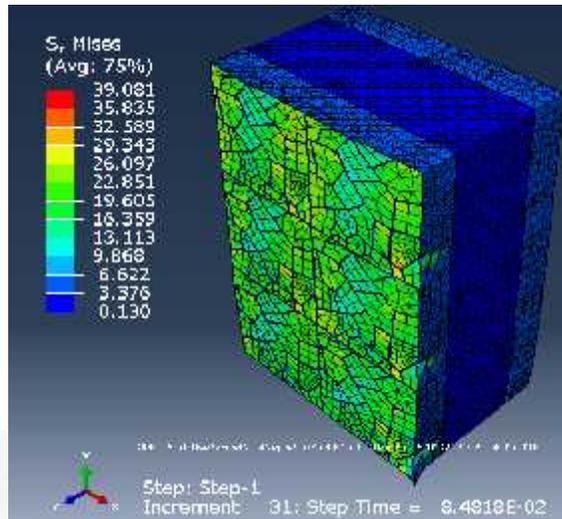


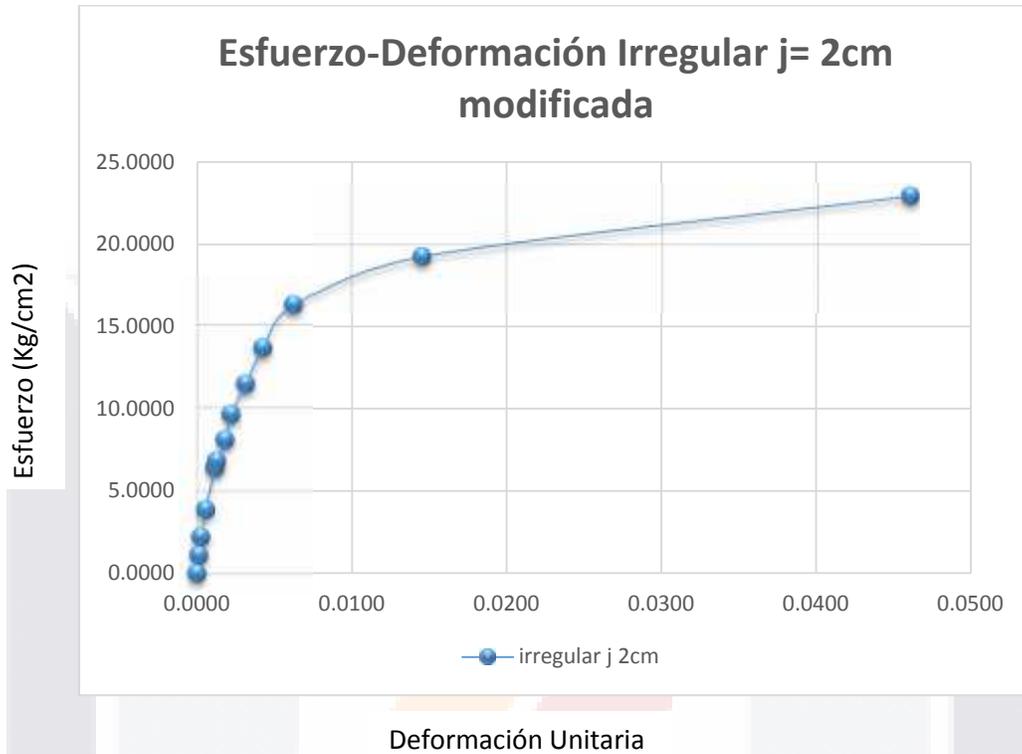
Figura 4.8.9 Esfuerzos de Von Mises en (kg/cm²) de la cantera, del mortero y en el relleno en el muro 4 en el incremento 31

Entonces se llegó a la siguiente tabla:

Incremento	U2(cm)	Tiempo	Def. unitaria	Esfuerzo (kg/cm ²)
0	0.000	0.0000	0.0000000	0.000
1	0.039	0.0100	0.0001300	1.100
2	0.079	0.0200	0.0002633	2.200
3	0.167	0.0350	0.0005567	3.850
4	0.343	0.0579	0.0011433	6.369
53	0.378	0.0615	0.0012600	6.765
	0.538398	0.073214	0.001795	8.053571
	0.650564	0.087160	0.002169	9.587585
	0.930979	0.103762	0.003103	11.413792
	1.256261	0.123526	0.004188	13.587847
	1.839525	0.147055	0.006132	16.176009
	4.374481	0.175065	0.014582	19.257153
	13.796439	0.208411	0.045988	22.925182

Tabla 4.1.5.1 Esfuerzo vs Deformación muro 5 modificada

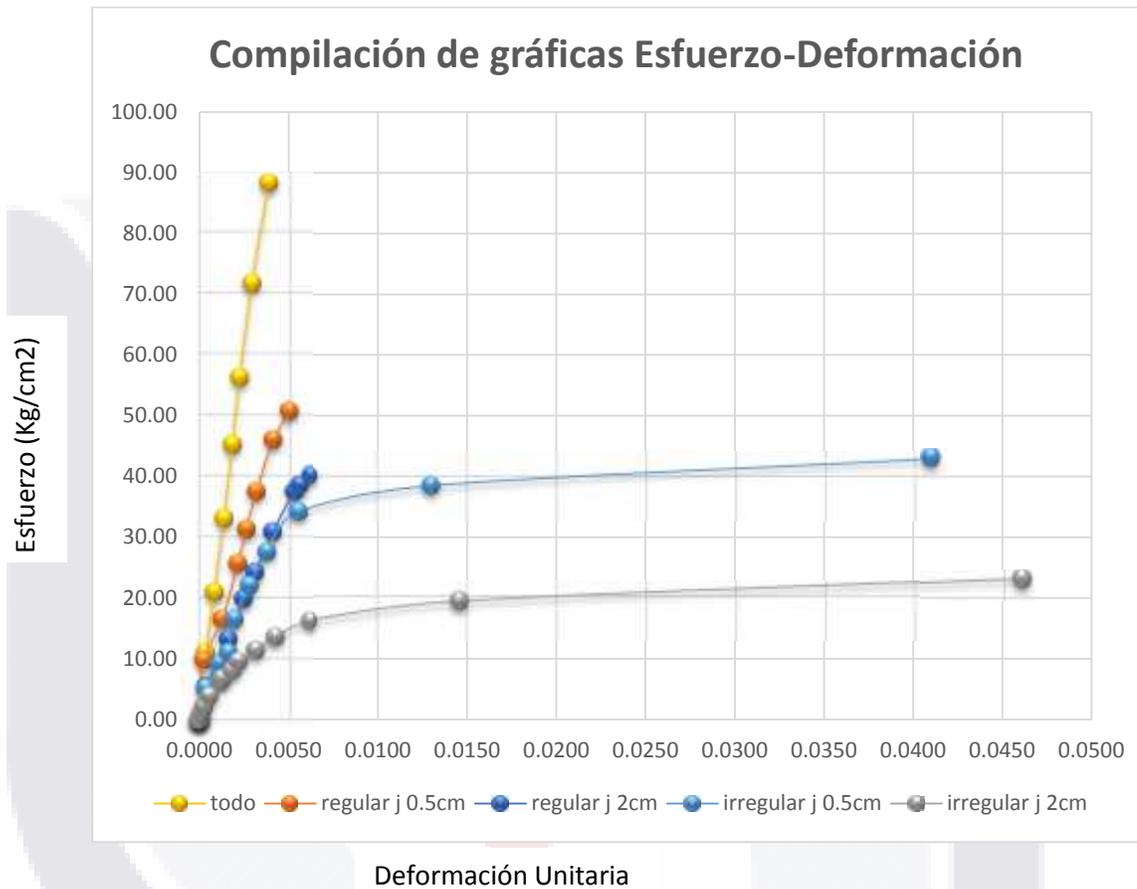
De la tabulación se obtuvo la siguiente gráfica de esfuerzo contra deformación. Se nota claramente que la tendencia es a ser más dúctil y disminuir su resistencia.



Gráfica 4.1.2 Esfuerzo-Deformación de mampostería irregular con relleno y juntas de 2 cm. Modificada

5.-Discusión de Resultados

Una vez que se generaron todas las gráficas de los 5 modelos se realizó la compilación de todos en la siguiente gráfica:



Gráfica 5.1.1 Esfuerzo-Deformación de los 5 modelos de mampostería.

Se realizó una gráfica con esfuerzo-deformación de los 5 modelos modificando el eje de las "x" hasta 0.01; se pudo ver los puntos que afectó el modificar el módulo de elasticidad en una parte de la cantera, sin embargo no es significativo ya que al final la cantera llegó a los esfuerzos y deformaciones acumulados iguales como se esperaba en la Gráfica 5.1.2 se muestra como sigue su trayectoria.



Gráfica 5.1.2 Esfuerzo-Deformación de los 5 modelos de mampostería limitada en el eje “x” a 0.01

Modelo	Módulo elasticidad (kg/cm ²)	f'c (kg/cm ²)	f'c*0.77
relleno sillar	24,212.71	88.00	67.76
regular j 0.5cm	11,524.30	50.60	38.962
regular j 2cm	7,943.23	40.13	30.9001
irregular j 0.5cm	8,054.67	42.90	33.033
irregular j 0.5cm	4,335.91	22.93	17.6561

Tabla 5.1.1 características mecánicas de los modelos

Analizando la gráfica 4.8.4. se obtuvo el módulo de elasticidad de acuerdo con (“NMX-C-128-1997-0NNCCE,” 1997), interpolando los pasos que no estuvieran en el análisis, además dicha norma pide que se use un factor por esbeltez de las pilas; dicho factor corresponde a 0.77.

Conjuntando todos los datos se elaboró la tabla 5.1.1. Estos resultados se compararon con los parámetros que da el código italiano (MIT, 2009) en cuestión a resistencia última y de módulo de elasticidad y se descubrió que entran en dichos intervalos que son muy amplios, excepto por el modelo de mampostería irregular con junta de 0.5 cm, pero dado que este modelo es hipotético y en la realidad no se pueda hacer debido a que la junta necesita ser más grande por las irregularidades de la piedra, por lo tanto no es relevante.

Entonces podemos considerar que nuestros resultados son buenos, además que los modelos tienen coherencia, debido a que disminuye la capacidad de carga con entre los modelos de relleno de sillar y relleno de mortero, ya que la piedra tiene mayor resistencia que el mortero; en los modelos de mampostería regular contra irregular se observó que disminuye su resistencia como se puede observar en el código italiano (MIT, 2009); debido a su conformación y se observó que la distribución del esfuerzo no es homogénea en la mampostería irregular, en comparación en la mampostería regular. También es razonable que entre mayor sea el porcentaje de mortero, se disminuya su resistencia debido a la diferencia de propiedades mecánicas entre el mortero y la cantera.



Conclusiones

- 1.- Que cuando la mampostería está conformada de sillares tanto el exterior como el interior, siempre y cuando haya buena conexión entre sus hojas para la resistencia a compresión, es muy semejante a las características estructurales de la piedra de la que está compuesta.
- 2.- Que la distribución de esfuerzos en la mampostería irregular no trabaja homogéneamente debido a que no todas las piedras trabajan, pues se concentran los esfuerzos en ciertas líneas de fractura y ocasiona que disminuya en gran porcentaje su capacidad de resistencia a la compresión.
- 3.- Que entre mayor sea la cantidad de mortero, aumenta la ductibilidad de la mampostería, además que cuando ocurre una peor distribución de esfuerzos se tiene un comportamiento ante acciones de compresión más dúctil, siempre y cuando no ocurran fallas locales ni deslizamientos de piedras.
- 4.- Que el espesor de la junta es importante para la caracterización del comportamiento estructural de la mampostería, ya que en un modelo disminuyó una quinta parte de su resistencia y en otro una tercera tan solo con cambiar 1.5 cm el espesor de junta, y se deja pauta para hacer más análisis y saber hasta qué punto es importante.



Glosario

Convergencia.- cuando se habla de convergencia en un programa de elemento finito se refiere al punto donde encuentra la solución o igualdad que cumpla con los parámetros del programa, de todas las matrices; que caracterizan el problema a resolver.



Referencias

- Azcarate, A., Camara, L., Lasagabaster, J. I., & Latorre, P. (2002). *Catedral de Santa María. Vitoria-Gasteiz. Plan Director de Restauración* (Vol. II).
- Backes, H. P. (1985). *On the behavior of masonry under tension in the direction of the bed joints*. Aachen University of Technology., Aachen. Germany.
- Barba, Luis, & Villaseñor, A. (2013). *La cal historia y sus usos*. México: Universidad Nacional Autónoma de México Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Binda, L., & Cardani, G. (2007). Proposta di una metodologia per la valutazione della qualità muraria. *In: Reluis*.
- Binda, L., Saisi, A., & Penazzi, D. (2003). Historic masonry buildings: necessity of a classification of structures and masonries for the adequate choice of analytical models. (p. pp 168–173). Presented at the In: VI International symposium computer methods in structural masonry, STRUMAS, Rome, Italy.
- Borri, A., & De Maria, A. (2009). A comparison about safety levels and classification of interventions on masonry existing buildings. *Eurocode 8 Perspectives from the Italian Standpoint Woekshop*, 237–249.
- Borri, A., & De Maria, A. (2009). L'indice di Qualità Muraria (IQM): Evoluzione ed Applicazione nell'ambito delle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2008. In *En: Actas de la 13ª conferencia nacional italiana para la ingeniería sísmica, Bolonia, Italia*). Bolonia, Italia.
- Borri, A., De Maria, A., Castori, G., & Corradi, M. (2015). A method for the analysis and classification of historic masonry. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1–19.
- Bowitz, E., & Ibenholt, K. (2009). Economic Impact of culture heritage. *Research and Perspectives, Journal of Cultural Heritage*, 10, 1–8.

- Bowitz, E., & Ibenholt., K. (2009). Economic Impact of culture heritage.
- Calidra, G. (2016). que es el mortero y como funciona. Retrieved from <http://calidra.com/usodelacal/mortero/>
- Castelló, R. (1998). Composición de los morteros empleados en la construcción de la catedral de jaca., *109-3*, (299–306).
- Distrito Federal. (2004). Normas técnicas complementarias para diseño y la construcción.
- Fajfar, P., & Eeri, M. (2000). A nonlinear analysis method for performance based seismic design. *Earthq Spectra 2000*, *16*(3):573–92.
- Farmer, I. W. (1968). *Engineering Properties of Rocks*. Londres.
- Foti, D. (2013). Shape optimization of rectified brick blocks for the improvement of the out-of-plane behavior of masonry. *ISSN: 1998- 4448*, *7*(4):417–24.
- Foti, D., Diaferio, M., Giannoccaro, N., & Mongelli, M. (2011). Operational modal analysis of a historical tower in Bari. Civil Engineering Topics. In *Conf Proc of the Society for Experimental Mechanics Series* (Vol. 4, pp. 335–342). Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.11.009>. ISSN: 0963- 8695
- Foti, D., Diaferio, M., Giannoccaro, N., & Mongelli, M. (2012). Ambient vibration testing, dynamic identification and model updating of a Historic tower. *NDT&E*, *47*:88–95. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.11.009>.
- Foti, D., Gatulli, V., & Potenza, F. (2014). Output-only identification and model updating by dynamic testing in unfavorable conditions of a seismically damaged building. In *Computer-Aided Civil and Infrastruct Eng*. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1111/mice.12071>
- Foti, D., Ivorra, S., & Sabba, M. (2012). Dynamic investigation of an ancient bell tower with operational modal analysis. *Open Constr Build Tech J*, *6*:384–91.

- Fragonara Z., et al., (2012). “Non-linear characterisation of the physical model of an ancient masonry bridge.” *Journal of Physics: Conference Series 382 (2012) 01205*, doi:10.1088/1742-6596/382/1/012051.
- Hendry, A. W. (1990). *Structural Masonry*. Mac Millan Education Ltd, London.
- Herrera, L. ., & Videla, H. A. (2003). A comparative study on biodeterioration and weathering effects in three sites of Latin American cultural heritage. In C. Saiz-Jimenez(ed.)*Molecular Biology and Cultural Heritage: 253-288*. Lisse: A.A. Balkema Publishers.
- Kržan, M., Bosiljkov, V., & R, Ž. (2011). Design of lateral resistance of URM blockwork through theoretical models and code provisions. (p. pp 451–462). Presented at the . In: Ingham JM(ed) Proceedings of the 9th Australasian masonry conference,, Queenstown, New Zeland,.
- Kržan, M., Gostič, S., & Bosiljkov, V. (2014). Application of different in-situ testing techniques and vulnerability assessment of Kolizej palace in Ljubljana. *Bull Earthq Eng (in This Special Issue)*. doi:10.1007/s10518-014-9639-4.
- Krzan, M., Gostic, S., Serena, C., & Vlatko, B. (2015). Acquiring reference parameter masonry for the structural performance analysis of historical buildings. *Bull Earthquake Eng(2015)*, 13, 204–236.
- Lenza, P., & Ghersi, A. (2011). *Edifici in muratura, alla luce della nuova normativa sismica*. italia: Ed. Dario Flaccovio editore.
- Lourenco. (2002). Computations on historic masonry structures. *Prog. Struct. Engng Mater*, 4:301–319.
- Lourenco, P. B. (1996). *Computational strategies for masonry structures* (Delft, The Netherlands). University of Technology.

- Mann, W., & Müller, H. (1982). *Failure of shear-stressed masonry – an enlarged theory, tests and application to shear walls*. Proc. British Ceramic Society.
- Meli, R., Sánchez, A. R., & Torres, R. (2002). Comportamiento y refuerzo estructural de columnas de sillares de piedra.
- MIT. (2009). Ministry of Infrastructures and Transportation. Circ. C.S.LI.Pp. No. 617 of 2/2/2009.
- Montoro, J. (1970). pag. 20-33 Universidad Nacional Colombia. Retrieved from <http://www.docentes.unal.edu.co/jmmonteroo/docs/1-3%20UNIVERSO-LA%20TIERRA.pdf>
- NMX-036-0NNCE-2013. (2013).
- NMX-C-061-0NNCE-2010. (2010).
- NMX-C-082-0NNCCE-2013. (2013).
- NMX-C-128-1997-0NNCCE. (1997).
- NTC. (2008). Norme tecniche per le costruzioni. Decreto Ministeriale 14/1/2008.
- Pagnini, L. C., Vicente, R., Lagomarsino, S. S., & Varum, H. (2011). A mechanical model for the seismic vulnerability assessment of old masonry buildings. *Earthq Struct*, 2(1):25–42.
- Pluijm, R. V. D. (1992). Material properties of masonry and its components under tension and shear (pp. p. 675–686). Presented at the Proc. 6th Canadian Masonry Symposium, eds. V.V. Neis,, Saskatoon, Saskatchewan, Canada.
- Pluijm, R. van der. (1999). *Out-of-Plane Bending of Masonry Behaviour and Strength*. Technische Universiteit Eindhoven.
- Ruocci, G. (2009). *Application of the SHM Methodologies to the Protection of Masonry Arch Bridges from Scour*. Politecnico di Torino, Italy., Italy.

SIA 266/2; SN 505266/2. (2012). Natursteinmauerwerk. Swiss Society of Engineers and Architects SIA, Zürich, Switzerland (in German).

Silveira, D., Varum, H., & Costa, A. (2013). Influence of the testing procedures in the mechanical characterization of adobe bricks. *Constr Build*, 40:719–28.

SIMULIA, A. 6. 1. (2013). 8. Nonlinearity. In *Getting Started with Abaqus: Interactive Edition*.

Turnsek, V., & Cacovic, F. (1971). *Proc. 2nd int. brick masonry conf.* Stoke-on-Trent.

UPC. (2016). capítulo 2 estado del conocimiento. Retrieved from

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6207/05.pdf?sequence=6&isAllowed=y>

Vintzileou, E. (2014). chapter 8 testing Historic Masonry Element and/or building Models.

Viviescas, A. (2009, July). *Modelo simples para análisis de muro de obra de fábrica cargados en su plano*. univesitat politècnica de catalunya, Barcelona.

Anexo A.- Obtención del coeficiente de fricción



Figura A

En un plano inclinado con un cuerpo arriba de él como se ve en Figura A ; las fuerzas que actúan es la fuerza de gravedad que va estar en función de la masa por la gravedad con respecto al Angulo de inclinación del plano inclinado; la otra fuerza que actúa es la normal que va ser igual coseno del Angulo del plano inclinado por la masa por la gravedad véase ecuación 1 y la fuerza de fricción va ser igual a la normal por el coeficiente de fricción véase ecuación 2; al momento de que hay un desplazamiento entre el plano normal y el cuerpo significa que la fuerza de fricción es menor a la masa por la aceleración por el seno del Angulo inclinado. Si tú vas incrementando el Angulo de inclinación del plano va llegar el momento donde el coeficiente de fricción por la normal va ser igual masa por la aceleración por el seno del Angulo del plano inclinado véase ecuación 3.

Ecuación 1 $N=ma \cdot \cos$

Ecuación 2 $Fr=N\mu$

Ecuación 3 $fr=ma \cdot \text{sen}$

Entonces sustituyendo en la ecuación 2 la ecuación 3 y 1 podemos simplificar la ecuación y obtener que $\mu= \tan$ y así podemos encontrar el coeficiente de fricción entre dos superficie sobre un plano inclinado con tan solo cambiar la inclinación de un plano inclinado.