PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

"APLICACIONES DE ABAQUS A LA MECÁNICA DE FRACTURA EN ESTRUCTURAS PORTANTES DE MAMPOSTERÍA"

Memoria para optar al Título de:

INGENIERO CIVIL MECÁNICO

ALUMNO : CLAUDIO ANDRÉS PARRA CHAMORRO PROFESOR GUÍA : IGNACIO ARTEAGA JORDA

2016

Dedicado a la persona que llena

de alegría mi vida, mi hijo

Maximiliano Alonso

Agradecimientos

En primer lugar a mi pilar fundamental durante todos estos años de estudio, mi familia, sin su apoyo nada de esto hubiese sido posible, a cada uno de ustedes muchas gracias por la ayuda y paciencia brindada, que me condujo a cumplir este anhelado sueño.

También mis pilares dentro de la universidad, mis amigos que siempre estuvieron ahí cuando los necesité, en las buenas y malas, Diego Núñez y Francisco Catalán.

A todo el cuerpo docente de la Escuela de Ingeniería Mecánica que más allá de la formación académica, me hicieron ser mejor persona y hoy un mejor profesional. En particular a mi profesor guía Ignacio de Arteaga, quién siempre tuvo un minuto para escuchar y compartir experiencias, gracias por la ayuda en esta última etapa universitaria.

Al profesor Juan Castillo por su gran ayuda y disposición durante el desarrollo de esta tesis.

Al profesor Rufino Goñi de la Universidad de Navarra, que también aportó su granito de arena en esta investigación y fue un excelente tutor al compartir sus conocimientos.

Agradecer también al proyecto Fondecyt iniciación nº 11140425 que lleva por nombre "Developing an automated methology for quasistatic structural analysis of load bearing structures: Masonry Arches".

Resumen

El presente proyecto de investigación estudia y muestra aplicaciones de la mecánica de la fractura en el software de elementos finitos Abaqus, a través de construcciones de mampostería.

En primer lugar se realiza una contextualización sobre la mecánica de la fractura, que es el tema principal de esta memoria. Mediante el estudio de esta rama de la ingeniería se logra comprender y exponer los métodos existentes y teorías propuestas en las últimas décadas, y a la vez se muestran los enfoques a seguir para aplicarlo sobre la mampostería. Luego se da lugar a la utilización del método de los elementos finitos usando el programa Abaqus, el cual posee una extensa librería y formas de utilizar para generar modelos muy cercanos a la realidad.

Gracias a la aplicación de la mecánica de la fractura en Abaqus, se ha desarrollado un modelo que permite analizar y estudiar el comportamiento en muros de mampostería, bajo la acción de cargas estáticas mediante el método de los elementos finitos extendido (XFEM), y también un modelo de arco mediante "Contour integral" obteniendo los factores de intensidad de tensiones (FIT).

Índice

Capítulo 1 Introducción	1 -
1.1 Introducción	1 -
1.2 Clasificación de la mampostería estructural	3 -
Capítulo 2 Objetivos	5 -
2.1 Objetivos generales	5 -
2.2 Objetivos específicos	5 -
Capítulo 3 Marco teórico	6 -
3.1 Muros de fábrica	6 -
3.1.1 Descripción general de la mampostería	6 -
3.1.2 Propiedades de la mampostería	6 -
3.1.3 Fenómeno del reblandecimiento de la mampostería	8 -
3.1.4 Fallas comunes en muros de mampostería	9 -
3.1.5 Arcos de fábrica	10 -
3.2 Mecánica de la fractura	11 -
3.2.1 Historia de la mecánica de la fractura	11 -
3.2.2 Mecánica de la fractura elástica-lineal	13 -
3.2.3 Planteamiento energético	13 -
3.2.4 Tasa de liberación de energía y energía de fractura	16 -
3.2.5 Modos de fractura	19 -
3.2.6 Factor de intensidad de tensiones	20 -
3.2.7 Zona plástica o zona de proceso de fractura (ZPF)	25 -
3.2.8 Mecánica de la fractura elasto-plástica	26 -
3.2.9 Plasticidad en el frente de fractura	26 -

3.2.10 La integral de contorno <i>J</i>	28 -
3.3 Software de elementos finitos utilizado	30 -
3.3.1 Abaqus	30 -
3.3.2 Menús de Abaqus	30 -
3.3.3 Modelo en Contour Integral	34 -
3.3.4 Contour Integral	34 -
3.3.5 Modelo en XFEM	37 -
3.3.6 XFEM	37 -
3.3.7 Funciones de enriquecimiento	38 -
Capítulo 4 Modelado en Abaqus	42 -
4.1 Modelado	42 -
4.1.1 La técnica de los elementos finitos	42 -
4.1.2 Micro-modelo	43 -
4.1.3 Macro-modelo	43 -
4.1.4 Maso-modelo	43 -
4.2 Creación de un Maso-modelo	44 -
4.2.1 Creación de un muro implementando XFEM	45 -
4.2.2 Creación de un arco implementando Contour Integral	85 -
Capítulo 5 Análisis de modelos	91 -
5.1 Análisis y discusión	91 -
Capítulo 6 Conclusiones	95 -
6.1 Conclusiones	95 -
Capítulo 7 Bibliografía	97 -
7.1 Bibliografía	97 -

Capítulo 1 Introducción

1.1 Introducción

Hoy en día la presencia de muros de ladrillos en obras de construcción es algo muy común de observar, y cabe destacar que su uso no es reciente, desde los tiempos más remotos de la humanidad las primeras civilizaciones buscaban la manera de mostrar su cultura a través de su desarrollo en edificaciones para vivir, protegerse y decorar.

Como es de suponer debido a la gran cantidad de años que se emplea esta técnica, conocida como mampostería (unidades puestas a mano), su análisis y comportamiento debe estar plenamente desarrollado, pero la realidad es muy distinta. Recientemente autores como: Page (1981), Penelis (1993), Lourenço (1996), Martin (1997), Zuchini (2009), han propuesto algunos modelos de análisis para la obra de fábrica mediante distintas solicitaciones de carga. La presente investigación busca estudiar el inicio y propagación de grietas en muros de fábrica típicos formados por unidades de ladrillos y juntas de mortero. Para poder realizar las simulaciones se recurre a una de las nuevas tendencias en la ingeniería, el análisis por el método de los elementos finitos. Dentro de los distintos software existentes, el presente proyecto de investigación hace uso del software Abaqus que incorpora dentro de sus características el estudio de la mecánica de la fractura en sólidos, particularmente la herramienta XFEM (eXtended Finite Element Method) que permite generar la propagación de una grieta a lo largo de una trayectoria arbitraria sin la necesidad de volver a mallar como algunos programas antiguos.

A su vez se encuentra presente el estudio de la mecánica de la fractura, cuyo inicio se da durante la primera guerra mundial gracias a las primeras investigaciones del ingeniero aeronáutico Alan Arnold Griffith para explicar la falla producida en materiales frágiles. En la actualidad cobra vital importancia, ya que debido al conocimiento que se tiene de la ciencia e ingeniería de materiales, se evitan grandes desastres y pérdidas en las construcciones del hombre, como ejemplo se muestra la fractura del casco de uno de los buques Clase Liberty construidos entre 1941 y 1945:



Figura N°1.1: Fractura del casco de un buque Clase Liberty.

Entre los factores determinantes de esta grave fractura se destacan la presencia de grandes concentradores de esfuerzos en esquinas no redondeadas en los cuales se iniciaban fisuras. Además, el acero que se utilizaba era de baja tenacidad, apropiada para la unión de planchas de acero mediante remaches, antes de incorporar la soldadura en la línea de producción, pero sufrían serios daños cuando eran descargados al mar por efecto de la temperatura.

Finalmente se ve la necesidad de aplicar la mecánica de la fractura al análisis de un muro de fábrica. Para ello se ha generado un modelo en el programa Abaqus, mediante el cual se ven las condiciones de inicio y propagación de grietas, para luego comparar los resultados de esta investigación con aquellas publicaciones recientes, de esta forma generando un precedente en cuanto a las solicitaciones que puede soportar un muro antes de fracturarse.



Figura N°1.2: Fractura en muro de fábrica.

1.2 Clasificación de la mampostería estructural

La mampostería estructural se clasifica según como ésta se encuentra reforzada:

Mampostería reforzada totalmente inyectada: Es aquella que posee todas las celdas o cavidades interiores, inyectadas con mortero de relleno, y su refuerzo interno puede ser con barras o alambres de acero dispuestos en forma vertical, debido al gran refuerzo que posee se considera con un gran diseño sismo resistente.

Mampostería reforzada parcialmente inyectada: Esta construcción es muy similar a la anterior, pero difiere en que no todas las celdas de las unidades van inyectadas con mortero, solamente aquellas celdas que llevan refuerzo de barras o alambres de acero son inyectadas.

Mampostería parcialmente reforzada: Esta construcción posee menos refuerzo que la anterior, se encuentran ubicadas a una mayor distancia entre las celdas reforzadas, y además sólo algunas son inyectadas con mortero de relleno.

A continuación se describen estos tres tipos de mampostería estructural.



Figura N°1.3: Mampostería estructural reforzada interiormente.

Mampostería de muros confinados: Este tipo de construcción de mampostería a diferencia del resto, no posee refuerzo en sus celdas interiores, por el contrario, se refuerza el muro de forma perimetral, mediante vigas y columnas de concreto como se muestra en la siguiente imagen:



Figura N°1.4: Mampostería de muros confinados.

Mampostería de cavidad reforzada: Este tipo de mampostería consiste en 2 o más muros que se colocan de forma paralela, dejando una cavidad entre ellos, la cual es inyectada con mortero o concreto. En el caso de los refuerzos, éstos van colocados en el interior de la cavidad inyectada. Para asegurar la unión de los muros, se coloca un conector especial entre ellos que va anclado al concreto inyectado en la cavidad.



Figura N°1.5: Mampostería de cavidad reforzada.

Mampostería no reforzada: Es aquella que por su construcción no lleva ningún tipo de refuerzo, y además se permite utilizar estructuralmente en viviendas de uno o dos pisos en zonas de baja actividad sísmica. Su principal uso es para decorar, debido a que no posee gran resistencia en comparación a las del tipo reforzado.

Capítulo 2 Objetivos

2.1 Objetivos generales

Analizar el alcance de los distintos métodos de la mecánica de la fractura presentes en Abaqus, sobre elementos portantes de mampostería.

2.2 Objetivos específicos

- Estudiar la mecánica de la fractura.
- Analizar las funciones y aplicaciones de Abaqus en la mecánica de la fractura.
- Modelar estructuras para su posterior análisis.
- Aplicar la técnica de elementos expandidos (XFEM) para estudiar la iniciación y propagación de una grieta a lo largo de una trayectoria arbitraria, sin necesidad de volver a mallar paso a paso como se acostumbraba en softwares anteriores.
- Analizar los resultados.

Capítulo 3 Marco teórico

3.1 Muros de fábrica

En la actualidad gran parte de las construcciones se realizan mediante el uso de muros de ladrillo, debido a su gran resistencia y capacidad de transmitir las fuerzas de compresión. Esta técnica que se remonta hace 6000 años A.C, también es conocida como mampostería y en este capítulo se presenta una descripción de ella, se establecen los elementos que la constituyen y también se describen las propiedades de los diferentes materiales que la componen, debido a que el comportamiento de estos por separado tiene gran influencia en la respuesta final de la construcción final.

3.1.1 Descripción general de la mampostería

Se define mampostería como aquella construcción en la cual sus unidades se han puesto a mano (mampuesto); es el sistema tradicional de construcción que consiste en levantar muros y paramentos para diversos fines. Estos pueden ser de tipo: bloques de barro cocido (ladrillo), bloques de cemento o piedras.

Del mismo modo se entiende por mampostería al conjunto total de un muro, es decir, la presencia de bloques de ladrillo para dar firmeza a la estructura en conjunto con el material ligante conocido como mortero o cemento.

Es importante señalar una gran división en la mampostería, esta consiste en la disposición de las juntas de mortero. En un primer caso van dispuestas en forma irregular y es lo que se conoce como sillería. En un segundo caso la disposición de las juntas de forma regular que es el caso de esta investigación donde se sigue el contorno de los ladrillos formando a la vez dos tipos de juntas, aquellas que van en forma horizontal y las que siguen al ladrillo en forma vertical.

3.1.2 Propiedades de la mampostería

Es importante establecer las propiedades de los materiales a utilizar en la construcción de muros de fábrica, en la presente tesis se ha desarrollado con ladrillos de arcilla cocida y mortero, por ello serán usadas las propiedades de la bibliografía presente para cada una de las partes que componen la mampostería.

A continuación se detalla la problemática existente en las propiedades mecánicas de ladrillo y mortero.

- Ladrillos: las propiedades de los ladrillos que son fabricados a partir de arcilla horneada varían de forma considerable según las condiciones en las cuales fueron horneados, ya sea por el tipo de horno, la temperatura o el tiempo de cocción, entre las principales causas. Debido a esto los ladrillos suelen tener diferentes propiedades de acuerdo a su lugar de origen. En la actualidad estas diferencias se están intentando acortar mediante la aplicación de normas de buena prácticas ya estandarizadas, como por ejemplo, la Norma ISO 9000, la Norma española FL-90 (Norma NBE de muros resistentes de fábrica de ladrillos), entre otras. Dado que la variación de propiedades es inherente al proceso de fabricación, es común observar gran dispersión en los resultados de los ensayos experimentales aplicados a ladrillos, pero en general, estos suelen manifestar un comportamiento del tipo frágil.
- Mortero: las propiedades de los morteros que se utilizan en la mampostería están compuestas por distintas combinaciones de cemento, arena y cal. Es muy común la fabricación de morteros con menores resistencias a las que posee el ladrillo. En la búsqueda de lograr un mortero con mayor resistencia se ha llegado a la conclusión que es más importante la generación de una interfaz de unión sólida entre mortero y ladrillo que la alta resistencia por si solo del mortero. A nivel de tensiones y deformaciones no suelen soportar grandes deformaciones elásticas por lo que es muy propenso a fracturarse inmediatamente al llegar a su máxima tensión, dado lo anterior es que presenta un comportamiento frágil.

3.1.3 Fenómeno del reblandecimiento de la mampostería

Este fenómeno consiste en una disminución gradual de las propiedades mecánicas bajo un incremento sostenido de la carga aplicada, funciona tanto para un elemento como para una estructura. Esta característica es observada en materiales como suelos, ladrillos, morteros, cerámicas, rocas o concreto, en los cuales la falla se presenta a través de un proceso de degradación creciente, manifestado por microfisuras internas que debido a la carga aplicada empiezan a crecer hasta convertirse en grandes fisuras que llevan al colapso del elemento o estructura. Tal comportamiento mecánico es comúnmente atribuido a la heterogeneidad del material, debido a la presencia de diversas fases y defectos como imperfecciones y vacíos. Aún antes de la carga el mortero contiene microfisuras debido a las diferencias en los tiempos durante el curado y a la presencia del agregado. Los ladrillos de arcilla contienen inclusiones y microfisuras debido al acortamiento durante el proceso de horneado.

Las tensiones y fisuras iniciales, al igual que su resistencia interna, causan un crecimiento progresivo de la fisuración cuando el material se encuentra sometido a una deformación progresiva. En un comienzo, las microfisuras son estables, es decir, que ellas crecen únicamente cuando la carga es incrementada, pero más adelante, cerca de la carga última, ocurre una aceleración en la formación de fisuras, iniciando la generación de macrofisuras. Las macrofisuras son inestables, lo cual significa que la carga tiene que disminuir para evitar un crecimiento que no pueda ser controlado. En un ensayo de deformación de fisuras produce reblandecimiento y localización de fisuras en una pequeña zona mientras el resto de la muestra es descargado.

3.1.4 Fallas comunes en muros de mampostería

Cuando los muros de mampostería no cuentan con un adecuado confinamiento, no poseen refuerzo, o este último es muy débil, es muy probable que presenten fallas. Dentro de las principales fallas, se han detectado cuatro tipos de patrones comunes de agrietamiento, que son explicados a continuación:

- Falla de corte por deslizamiento: El agrietamiento por deslizamiento se presenta a lo largo de la junta horizontal de mortero como consecuencia de una falla de adherencia por corte en la junta, ocasionada por la poca adhesión entre las unidades y el mortero.
- Falla de corte: El agrietamiento por corte se puede presentar en forma de escalera siguiendo la junta de mortero, caracterizada por su forma diagonal a lo largo del muro y es consecuencia de las tensiones de tracción diagonal o esfuerzos de corte que se producen en el mismo.
- Falla por flexión: El agrietamiento se presenta en forma vertical en las esquinas y el centro, que puede presentarse en muros esbeltos, y produce una falla de compresión por flexión en el talón comprimido del muro.
- Falla de aplastamiento por compresión diagonal: Esta falla es producto del efecto de puntal que se produce cuando se separa el cuerpo del muro de los elementos de confinamiento, situación que genera grandes tensiones de compresión en las esquinas del muro, las que pueden provocar la falla por aplastamiento de la zona cuando la mampostería es de baja calidad o cuando se usan unidades del tipo rejilla de paredes delgadas.

3.1.5 Arcos de fábrica

El arco es uno de los elementos estructurales que más curiosidad ha despertado a lo largo de la historia de la arquitectura, siendo el único elemento estructural de la antigüedad que permitía abrir huecos en los muros y cubrir grandes luces con ladrillos o mampostería.

Su uso se remonta a las primeras civilizaciones, siendo los romanos los que lo empezaron a utilizar extensivamente en la obra civil, perfeccionando de tal modo la técnica de construcción, que hasta el día de hoy se mantienen en pie muchas de sus obras.

Por otro lado, los primeros intentos de comprender su funcionamiento y de establecer unas reglas de dimensionado los encontramos en los manuscritos de Leonardo da Vinci, en los que se intuye el intento de calcular la fuerza horizontal en los estribos. La solución a este problema, junto con las teorías que intentan establecer la forma y grosor ideal del arco, han sido objeto de estudio de numerosos científicos y arquitectos desde su origen.

La evolución a lo largo de la historia del arco como elemento estructural fundamental, se basa en el uso de los materiales disponibles, la utilización de nuevas herramientas, el perfeccionamiento de la técnica constructiva y la comprensión de su comportamiento estructural.

Cuando el arco es de piedra o ladrillo, las piezas que lo forman reciben el nombre de dovelas, y trabajan básicamente a compresión, los elementos sobre los que apoya el arco y reciben la carga del mismo, se llaman estribos. La dovela central recibe el nombre de clave, tal y como muestra la siguiente imagen.



Figura N°3.1: Partes principales que componen un arco.

3.2 Mecánica de la fractura

3.2.1 Historia de la mecánica de la fractura

Los primeros estudios de fractura se remontan a los tiempos de Leonardo da Vinci, quien midió la resistencia a la rotura en alambres de hierro (Fe) y encontró que su resistencia variaba inversamente con la longitud del alambre ensayado. Esto puso de manifiesto por primera vez el hecho que la gran cantidad de defectos en un material controla su resistencia, ya que pudo observar que al ser de mayor longitud, un alambre tiene una mayor probabilidad de contener tales defectos. [1]

Aunque los resultados de esta investigación eran meramente cualitativos, Griffith estableció la conexión entre la fractura y el tamaño de los defectos en su primer trabajo publicado en el año 1920, aplicando el análisis de tensiones a un agujero elíptico, previamente tratado por Inglis en 1913. Griffith utiliza el primer principio de la termodinámica para formular la teoría de la fractura, basada en el balance simple de energía. De acuerdo con esta teoría una grieta se hace inestable y se produce la fractura, cuando el cambio de la energía tensional que resulta de un incremento de la grieta es suficiente para superar la energía superficial del material.

Griffith estableció un buen modelo para materiales muy frágiles como el vidrio o los materiales cerámicos, pero no pudo aplicar su teoría a los metales, porque teniendo en cuenta que el trabajo de fractura proviene exclusivamente de la energía superficial del material, el modelo de Griffith solamente se puede aplicar a sólidos idealmente frágiles.

La modificación del modelo de Griffith tuvo que esperar más de 20 años para poder ser aplicada a los metales. El nacimiento de la Mecánica de Fractura se debe a un grupo de investigadores del laboratorio de investigación naval de Washington D.C. que estudiaron el problema de la fractura en detalle. En los años 50, el Dr. G.R. Irwin lideró este grupo de investigación, que después de estudiar los trabajos previos planteados por Griffith, Inglis y otros, desarrolló un importante trabajo para extender los postulados de Griffith a los metales, incluyendo la disipación de energía local.

En el año 1956, Irwin desarrolla su concepto de la tasa de liberación de energía, que se relaciona con la teoría de Griffith, pero de forma más útil para resolver problemas de ingeniería. Varios colegas de Irwin llamaron su atención sobre un trabajo de Westergaard, publicado en 1938, que desarrollaba una técnica semi-inversa para analizar las tensiones y desplazamientos por delante de una grieta aguda. Irwin utiliza la aproximación de Westergaard para mostrar que las tensiones y desplazamientos cerca del frente de grieta pueden presentarse mediante una simple constante que está relacionada con la tasa de liberación de energía. Este importante parámetro que caracterizaba el frente de grieta resultó ser el que más tarde se ha conocido como el factor de intensidad de tensiones (K).

Inmediatamente se produjeron varios éxitos en la aplicación de esta nueva ciencia en el análisis de varias roturas catastróficas, particularmente en el año 1956 Wells utilizó la mecánica de la fractura para explicar las fallas sobre el fuselaje de los aviones "De Havilland Comet", como resultado de grietas por fatiga que alcanzaban un tamaño crítico.



Figura N°3.2: Fractura en fuselaje de avión "De Havilland Comet" (1953).

La segunda aplicación notable de la mecánica de la fractura tuvo lugar en General Electric en el año 1957; Winne y Wundt aplicaron la tasa de liberación de energía de Irwin para explicar el fallo de los rotores de grandes turbinas de gas, llegando incluso a prevenir la fractura en los rotores existentes.

Como ocurre con todas las grandes ideas, éstas son cuestionadas. La mecánica de la fractura no fue una excepción y produjo un cierto escepticismo y recelo a la aceptación de sus postulados por parte de ciertos sectores, países y algunos centros de enseñanza en sus inicios.

3.2.2 Mecánica de la fractura elástica-lineal

La mecánica de fractura y particularmente la mecánica de fractura elástica lineal ("Linear Elastic Fracture Mechanics", LEFM), es conocida como la ciencia que estudia los mecanismos y procesos de propagación de grietas en sólidos. Del mismo modo estudia la distribución de tensiones y deformaciones que ocurren en un material que se encuentra agrietado, o que contiene discontinuidades cuando éste se encuentra sometido a alguna tensión externa. Como se menciona en párrafos anteriores, surge con los trabajos fundamentales de Griffith sobre criterios de propagación de grietas en sólidos, basados en conceptos de transformación de energía elástica en energía de superficie, por esta razón es conocida como una formulación energética de la mecánica de fractura.

3.2.3 Planteamiento energético

El aspecto fundamental de la mecánica de la fractura es poder definir si una grieta existente en un material determinado permanecerá estable o por el contrario ésta crecerá bajo ciertas condiciones dadas.

La formulación del planteamiento energético constituye la base de la mecánica de fractura y fue planteado por Griffith en el año 1921 como resultado del problema elástico de tensiones generado en el vértice de un agujero elipsoidal inmerso en una placa considerada como un medio semi-infinito. La solución elástica señala que a medida que los vértices de la elipse se hacen más agudos, las tensiones en ese punto tienden a infinito independiente si el valor de la tensión aplicada fuese bajo. Debido a las similitudes entre los casos durante su desarrollo Griffith concluyó que debido a aquella singularidad no podría utilizarse la tensión como criterio del crecimiento de la grieta, por el contrario el problema debía plantearse en términos de balance de energía.

Para analizar este caso es necesario considerar una placa semi-infinita, homogénea e isótropa (mismas propiedades según sus direcciones), con módulo elástico E, con una grieta central de forma elíptica de longitud 2a, que es deformada elásticamente por tensiones de tracción en ambos extremos (σ) como se muestra en la siguiente imagen.



Figura N°3.3: Placa con agujero elíptico de longitud "2a".

En este caso, a partir de la solución de Inglis (1913), Griffith encontró que la energía elástica (U) almacenada en la placa por unidad de espesor es:

$$U = \frac{\pi \, \sigma^2 a^2}{E} \qquad (3.1)$$

Y definió la energía de superficie (W) como:

$$W = 4\alpha\gamma_s \qquad (3.2)$$

Donde γ_s es la energía específica de superficie y es una constante del material, 4a corresponde al área de la superficie de agrietamiento (para este caso se considera un espesor unitario de longitud 2a y se multiplica por dos debido a ambas caras que posee la grieta). Cuando la grieta comienza a incrementar su longitud, entra en un estado de inestabilidad debido a las tensiones aplicadas y el sistema mecánico transfiere energía de la zona no fracturada a la zona de fractura, mediante un proceso de conversión de la energía elástica en energía de superficie.

$$\frac{dU}{da} = \frac{dW}{da} \qquad (3.3)$$

Como se explica luego mediante el balance de energía, el término dU/da refleja implícitamente una disminución de la energía elástica almacenada en la placa, debido al crecimiento de la grieta y por este motivo la ecuación anterior no incluye un signo negativo (-) en la igualdad.

Luego derivando la ecuación 3.1 y 3.2 con respecto a la longitud de grieta se tiene que:

$$\frac{dU}{da} = \frac{2\pi \sigma^2 a}{E} \qquad (3.4)$$
$$\frac{dW}{da} = 4\gamma_s \qquad (3.5)$$

Reemplazando (3.4) y (3.5) en (3.3) se puede despejar la tensión, que en este caso corresponde a una tensión para la cual se produce el inicio de grieta y se conoce como tensión de fractura de Griffith σ_c :

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2\gamma_s E}{\pi a}} \qquad (3.6)$$

Por lo tanto, se puede concluir que según el criterio de Griffth para que una grieta se prolongue una longitud ("*da*"), es necesario que la energía elástica liberada por tal prolongación sea igual o mayor a la energía de superficie que se necesita para que la grieta pueda crecer, por el contrario si la energía liberada es inferior a la energía necesaria para la propagación, entonces la grieta permanecerá estable.

Como se menciona en la historia de la mecánica de la fractura, el principal inconveniente de este modelo es que sólo explica mecanismos de rotura aplicables a materiales muy frágiles como lo fue el vidrio en el estudio de Griffth, para otros materiales, sumado a la dificultad que conlleva evaluar experimentalmente la energía de superficie, ésta resulta en general muy inferior a la energía requerida para que ocurra crecimiento de grieta, debido a que las grietas no son lisas ni rectas, sino rugosas y curvilíneas y además van acompañadas por microagrietamientos, desplazamientos relativos y plasticidad en la zona próxima a la punta de la grieta.

El criterio de propagación de grietas de Griffith puede generalizarse en términos de un balance entre energía disponible (la cual es suministrada principalmente por las fuerzas externas) y la energía necesaria para que ocurra tal propagación.

La energía disponible para la propagación de grieta comúnmente se denomina "tasa de liberación de energía (*G*) y como lo estableció Griffith, se asume igual a $\frac{1}{2}dU/da$, por lo tanto la ecuación (3.4) se puede expresar como:

$$\frac{dU}{da} = \frac{\pi \sigma^2 a}{E} = G \quad (3.7)$$

Por su parte, la energía requerida (dW/da), también conocida como "energía de fractura" o "tasa crítica de liberación de energía" (G_{IC}) es una propiedad del material que se puede considerar constante en un comportamiento elástico. Debido a su forma de expresar, tiene dimensiones de fuerza por unidad de propagación de grieta, por esta razón también se le denomina fuerza resistente al agrietamiento (R).

La condición de G_{IC} se presenta cuando la tensión σ toma un valor crítico σ_c , para el cual dU/da = dW/da y por lo tanto de (3.7):

$$\frac{dW}{da} = R = G_{IC} = \frac{\pi \sigma_c^2 a}{E} \quad \text{o} \quad \sigma_c = \sqrt{\frac{G_{IC}E}{\pi a}} \quad (3.8)$$

Esta es una forma más general que la ecuación (3.6) para expresar la tensión de agrietamiento de Griffith y tiene la ventaja que no involucra la energía especifica de superficie (γ_s).

De esta forma, el criterio de fractura de tasa de liberación de energía establece:

Si $G < G_{IC}$ entonces da = 0, no hay propagación de grieta (estable).

Si G = G_{IC} entonces da ≥ 0 , posibe propagación cuasi-estática de grieta.

Si $G > G_{IC}$ entonces da > 0, crecimiento dinámico de grieta (inestable).

Gráficamente, el proceso de fractura puede representarse de la siguiente manera: primero es necesario considerar una placa como se muestra en la siguiente figura (3.4a), que al estar sometida a una tensión σ , almacena una energía elástica que se puede representar por el área OAB de la figura (3.4b).



Figura N°3.4: a) Placa con extremos fijos

Si los extremos de la placa permanecen fijos (deformación constante a lo largo de toda la placa) y la grieta se prolonga una longitud ("*da*"), entonces la rigidez se reduce, puesto que inicialmente correspondía a la pendiente de la línea OA y ahora corresponde a la de la línea OC. Esto implica que parte de la carga se relaja. La energía que queda almacenada en la placa después de haberse propagado la grieta, está representada ahora por el área OCB como se muestra a continuación:



Figura N°3.5: Placa con extremos fijos.

Por lo tanto, se observa una disminución de la energía elástica y de la tasa de liberación de energía G, que está representada ahora por el área OAC. La grieta continúa prologándose si la energía representada por dicha área es igual o superior a la requerida por el material para que pueda ocurrir dicha propagación.



Figura N°3.6: Placa con extremos fijos.

3.2.5 Modos de fractura

De acuerdo con las investigaciones de Broek (1986), una grieta en un sólido puede verse sometida a tensión en tres modos diferentes:



Figura N°3.7: Modos de fractura.

Modo I o modo de apertura, se produce cuando la grieta se abre debido a la aplicación de tensiones normales al plano de fractura.

Modo II o modo deslizante, es aquel donde debido a la aplicación de tensión cortante en el plano de fractura, se producen desplazamientos longitudinales de las superficies en dicho plano.

Modo III o modo de rotura transversal, corresponde al desplazamiento de las superficies de fractura en sentidos opuestos, debido a la aplicación de tensión cortante en planos diferentes al plano de fractura.

El peor de los casos corresponde a una combinación de los tres modos de agrietamiento anteriores, sin embargo, para efectos prácticos se suele utilizar el modo que predomina por sobre los otros para establecer las variables que se analizan, por ello se denotan con el subíndice que corresponde al modo de fractura I, II ó III.

3.2.6 Factor de intensidad de tensiones

Como ya fue mencionado, Alan Griffith planteó el criterio de propagación de grieta basado en un análisis de balance de energía para evitar el problema de la singularidad en la punta, donde de acuerdo con la solución elástica, las tensiones tienden a infinito al aplicarse cualquier carga externa. Irwin (1957) desarrolló uno de los más importantes avances de la LEFM al formular el problema de propagación de grietas en términos del estado de tensiones del material cerca de la punta y probó que este enfoque es en esencia igual al enfoque energético y que existe relación entre ambos.

Irwin dedujo que el proceso de fractura no podía concentrarse en un solo punto como lo plantea la teoría elástica, sino que se presenta en una zona pequeña próxima a la punta, que denominó zona plástica o zona de proceso de fractura (ZPF), la cual, por el efecto de la deformación, absorbe gran cantidad de energía y mantiene las tensiones dentro de un valor finito.

Con el fin de determinar la distribución de tensiones alrededor de la punta de la grieta, en una placa como la de la figura N°3.8, Irwin empleó la función de tensión de Airy (ψ), que es una función en base a esfuerzo, y que en este caso debe satisfacer simultáneamente las condiciones particulares de tensiones, deformaciones y de compatibilidad de tensión-deformación que se presentan en ese sector (González, 1998).

Para la solución de la función de tensión de Airy se pueden usar diferentes funciones. Si el agrietamiento es del modo I, resulta conveniente usar la solución propuesta por Westergaard, en cuyo caso el campo de tensiones alrededor de la punta de la grieta (Figura N°3.9) está dado por:



Figura N°3.8: Sistema de coordenadas en la vecindad de una grieta.



Figura N°3.9: Sistema de coordenadas en la vecindad de una grieta.

Para el modo I:

$$\sigma_{x} = \sigma \sqrt{\frac{\alpha}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (3.9)$$

$$\sigma_{y} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (3.10)$$

$$\tau_{xy} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$$
(3.11)

Donde el factor de intensidad de esfuerzos esta descrito como: $K_I = \sigma \sqrt{\pi \alpha}$

Para el modo II:

$$\sigma_x = \sigma_x \sqrt{\frac{\alpha}{2r}} \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \left[2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right] \quad (3.12)$$

$$\sigma_{y} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \left[\cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right]$$
(3.13)

$$\tau_{xy} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (3.14)$$

Donde el factor de intensidad de esfuerzos esta descrito como: $K_{II} = \tau \sqrt{\pi \alpha}$ Para el modo III:

$$\tau_{xz} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \operatorname{sen} \frac{\theta}{2}$$
(3.15)

$$\tau_{yz} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \tag{3.16}$$

Donde el factor de intensidad de esfuerzos esta descrito como: $K_{III} = \tau \sqrt{\pi \alpha}$

Además, para placas delgadas (tensión plana) se tiene: $\sigma_z = 0$ y para placas gruesas (deformación plana): $\sigma_z = v \ (\sigma_{\chi^+} \sigma_y)$.

O de forma general:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_i}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \qquad (3.17)$$

Donde $f_{ij}(\theta)$ es una función conocida de θ que depende de la geometría de la grieta y las condiciones de carga, σ_{ij} son las tensiones de Cauchy, r es la distancia al vértice de fractura, θ es el ángulo con respecto al plano de grieta y K_i es el "factor de intensidad de tensiones" (FIT) o FIS por sus siglas en inglés (Factor Intensity Stress) para el modo I de agrietamiento y se puede expresar como:

$$K_I = \beta \sigma \sqrt{a} \qquad (3.18)$$

Donde *a* es la longitud de la grieta inicial o entalla inicial y β es un factor adimensional, que para una placa infinita corresponde a $\sqrt{\pi}$ y en tal caso:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \qquad (3.19)$$

El factor de intensidad de tensiones resulta ser una magnitud, con unidades en el sistema internacional en $MN \cdot m$, que define por sí sola el estado tensional y de deformaciones en el entorno del frente de una fisura.

Para un elemento de tamaño finito, β depende de la longitud de la grieta y de la geometría del cuerpo sometido a tensión. Usualmente los FIT de estos elementos se expresan en términos del FIT de la placa infinita, y la ecuación (3.19) se expresa como:

$$K_I = \beta_{(a/W)} \sigma \sqrt{\pi a} \quad (3.20)$$

Donde W es el ancho de la placa.

La importancia del factor de intensidad de tensiones radica entonces en que al conocerse K_I , se puede determinar completamente el campo de tensiones alrededor de una grieta. Además K_I constituye un parámetro de similitud útil para poder comparar las características de agrietamiento de elementos de un mismo material pero con diferente geometría y diferente longitud de grieta, pues este principio indica que si dos diferentes grietas, en diferentes estructuras tienen una misma K_I y están sometidas al mismo modo de agrietamiento, se debe esperar un comportamiento similar en cuanto al avance o estabilidad de la grieta, debido a que el campo de tensiones es el mismo en ambos casos, por lo tanto, una grieta se propagará cuando el factor de intensidad de tensiones alcance un valor crítico, denominado factor de intensidad de tensión crítico (K_{IC}), también conocido como tenacidad a la fractura. El valor de K_{IC} puede obtenerse de ensayos de fractura para una condición en la cual la tensión es la crítica ($\sigma = \sigma_{cr}$) y se considera una propiedad del material, que de acuerdo con la ecuación (3.20) está dada por:

$$K_{IC} = \beta_{(a/W)} \sigma_c \sqrt{\pi a} \quad (3.21)$$

De manera similar al enfoque de tasa de liberación de energía, el criterio de avance de una grieta en términos del factor de intensidad de tensiones está dado por las siguientes condiciones:

Si $K_I < K_{IC}$ entonces da = 0, no hay propagación de grieta (estable).

Si $K_I = K_{IC}$ entonces da ≥ 0 , posibe propagación cuasi-estática de grieta.

Si $K_I > K_{IC}$ entonces da > 0, crecimiento dinámico de grieta (inestable).

A partir de (3.8) y (3.19), la relación entre la tasa de liberación de energía y factor de intensidad de tensiones en condición de tensión plana se puede expresar como:

$$G_{IC} = \frac{K_{IC}^2}{E} \tag{3.22}$$

Y para el caso de deformación plana la relación es:

$$G_{IC} = (1 - v^2) \frac{K_{IC}^2}{E}$$
 (3.23)

Donde v es la relación de Poisson. Estas relaciones (3.22) y (3.23) se conocen como las ecuaciones de Irwin, las cuales no solamente se cumplen para la condición crítica sino para cualquier otra condición inferior a la crítica, es decir son relaciones generales entre G_I y K_I . La extensión de las expresiones anteriores a los casos de solicitaciones variadas, que generan todos los posibles modos de fractura conduce a la ecuación más general:

$$G = \left[\frac{K_I^2}{E} + \frac{K_{II}^2}{E} + \frac{K_{III}^2}{E} (1+\nu)\right] \quad (3.24)$$

Para esfuerzo plano,y:

$$G = \left[\frac{K_I^2}{E}(1-v^2) + \frac{K_{II}^2}{E}(1-v^2) + \frac{K_{III}^2}{E}(1+v)\right] \quad (3.25)$$

Para deformación plana.

El factor de intensidad de tensiones posee la ventaja de ser aditivo, es decir, se pueden obtener valores de K_I para diferentes partes de una geometría compleja y luego sumar aquellos valores para obtener un K_I general, para un mismo estado de solicitación de la grieta.

3.2.7 Zona plástica o zona de proceso de fractura (ZPF)



Figura N°3.10: Tensión teórica en un medio elástico.

Se puede observar en la figura que en la punta de la grieta la tensión tiende al infinito y que se reduce gradualmente a medida que se está más lejos de la punta. Como resulta lógico pensar, el valor de la tensión no puede llegar al infinito, dado que el material al alcanzar su límite de fluencia sufre deformaciones plásticas que impiden que esta tensión siga aumentando. La distancia hasta la cual se producen deformaciones plásticas, corresponde a un círculo de radio r_p^* que se obtiene al proyectar sobre el eje de la abscisa el punto de intersección entre la tensión teórica y el límite de fluencia o valor máximo que puede tener la tensión en condiciones elásticas σ_{ys} , tal como se muestra la siguiente imagen:



Figura N°3.11: Zona plástica teórica próxima a la punta de la grieta.

Este círculo se conoce como "zona plástica o zona de proceso de fractura (ZPF)".

3.2.8 Mecánica de la fractura elasto-plástica

La Mecánica de la Fractura Elástica Lineal (MFEL), describe y predice en forma correcta el comportamiento de la fractura a través de materiales frágiles. Sin embargo, al realizar el análisis del campo tensional que propone la teoría para el entorno de un defecto, se obtienen valores que tienden al infinito mientras más próximo a la punta de la grieta. Siempre que el tamaño de esta zona plástica que se forma sea lo suficientemente pequeña con respecto al tamaño de la grieta, la MFEL puede usarse mediante pequeñas correcciones, proporcionando buenos resultados en sus predicciones. Sin embargo, gran número de materiales, como lo son la mayor parte de las aleaciones metálicas que actualmente se ocupan, son demasiado dúctiles y tenaces como para que los cálculos realizados por medio de la MFEL sean correctos, debido a que previo a la fractura desarrollan una importante zona plástica que condiciona su comportamiento. Por esta razón surge la necesidad de utilizar la Mecánica de la Fractura Elasto-Plástica (MFEP), que permite analizar aquellas situaciones de fractura de los materiales que vienen precedidas de un estado de gran deformación plástica en el entorno de la grieta.

- 26 -

3.2.9 Plasticidad en el frente de fractura

La expresión obtenida para el estado tensional en el frente de una fisura solicitada en modo I es:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_i}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \qquad (3.26)$$

Esta ecuación debe ir acompañada de dos precisiones sobre su región de validez: la primera, es que representa el estado tensional sólo en la zona próxima al frente de grieta, de modo que en zonas más alejadas queda definida por las condiciones de contorno del problema. La segunda es que dicha expresión se singulariza en r = 0, por lo tanto, para distancias al frente de grieta muy reducidas la tensión teórica toma un valor que tiende a infinito y que no es realista en materiales dúctiles, en los cuales aparece una zona de plasticidad.

En el plano de una grieta (Θ =0) solicitada en modo I, al aplicar los criterios de plastificación al estado tensional dado por (Figura N°3.9) se obtiene la extensión de la zona plastificada r_p^* que, en tensión plana, resulta:

$$\boldsymbol{r}_{\boldsymbol{p}}^{*} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_{I}}{\sigma_{ys}} \right)^{2} \qquad (3.27)$$

Donde σ_{ys} es el límite elástico del material.

En realidad, la zona plástica tiene una extensión superior a la obtenida por la aproximación previa, existiendo otras expresiones que se obtienen tras analizar el estado tensional de las proximidades de una grieta y a partir del equilibrio de esfuerzos. Todas ellas establecen el tamaño de la zona plástica como función del factor de intensidad de tensiones y del límite elástico. La más utilizada es la de Irwin, que en tensión plana viene dada por:

$$\boldsymbol{r}_{\boldsymbol{p}}^{*} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{I}}{\sigma_{ys}} \right)^{2} \qquad (3.28)$$

La representación gráfica en perspectiva de la zona plástica del frente de grieta en una placa solicitada en modo I y de suficiente espesor como para obtener deformación plana se muestra a continuación:



Figura N°3.12: Representación gráfica de la zona plástica en el frente de una fisura en condiciones de tensión plana y deformación plana.

Si el tamaño de la zona plástica es pequeño, es decir, ($r_p^* << a$) la aplicación de la MFEL en el establecimiento de criterios de rotura es suficientemente válida. Para extender el campo de validez de la MFEL se realiza una corrección a la longitud del defecto por motivo de tener en cuenta el efecto de la zona plástica en la dirección de avance de la fractura. Para condiciones de deformación plana, en la corrección de la longitud del defecto, r_p^* , se realiza una ponderación de tal manera que quede dentro el efecto de las dimensiones de la zona plástica en los extremos en tensión plana, resultando:

$$\boldsymbol{r}_{\boldsymbol{p}}^{*} = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K_{I}}{\sigma_{ys}} \right)^{2} \qquad (3.29)$$

3.2.10 La integral de contorno J

En aquellos materiales en que por su tenacidad y ductilidad la zona plástica se extiende de forma importante en torno al frente de la fisura, el crecimiento de la misma, y por tanto la fractura, ya no puede justificarse como un proceso que se produce cuando el factor de intensidad de tensiones alcanza un valor crítico, dado que este parámetro no representa las condiciones tensionales en el entorno del defecto. Por este motivo hace falta definir un nuevo parámetro que se encuentre relacionado con los campos de tensiones y deformaciones de tal manera que la situación crítica del mismo se pueda caracterizar por un valor crítico. Este valor es conocido como "Integral J".

La integral J es una integral curvilínea, cerrada en torno al frente de fisura e independiente del camino, que define el cambio diferencial de energía potencial del sistema para una extensión diferencial de fisura, de modo que puede considerarse la extensión del dominio elasto-plástico de la tasa de liberación de energía G, de Griffith, descrita en la MFEL. Posee la propiedad de caracterizar el estado tensional y de deformación en el entorno de dicho frente en un material elastoplástico, por lo tanto, es un parámetro muy aceptado para caracterizar la fractura en régimen elastoplástico. Asi, la integral J se utiliza como un criterio de fractura de forma que un sistema material con un defecto dado iniciará su proceso de fractura cuando la integral J alcance un valor crítico J_{C} :

$$J = J_C \qquad (3.30)$$

Cabe destacar que Eshelby en 1951 introdujo esta integral para una singularidad de esfuerzo en un sólido elástico, pero no pudo aplicarla a problemas con grietas. Años más tarde en 1968, Cherepanov y J.Rice desarrollaron esta integral como una aproximación energética, basándose en el teorema de conservación de la energía, definieron un conjunto de integrales de contorno independientes del camino de integración. Una de ellas es la integral *J*, cuya expresión en el caso bidimensional es:

$$J = \int_{\Gamma} W dy - T_i \frac{du}{dx} ds \quad (3.31)$$

Donde *W* es la energía de deformación por unidad de volumen, T_i son las componentes del vector de tracciones, u_i son las componentes del vector de desplazamientos y ds es un elemento diferencial de Γ . La energía de deformación se define como:

$$W = \int_{0}^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \qquad (3.32)$$

Donde σ_{ij} y ε_{ij} son los tensores de tensiones y deformaciones respectivamente.

Las componentes del vector de tracciones vienen dadas por:

$$T_{ij} = \sigma_{ij} n_j \tag{3.33}$$

Donde n_j son las componentes de un vector unitario normal a Γ . La figura muestra un esquema en el que se definen gráficamente algunos de los términos de la integral J.



Figura N°3.13: Fisura en un medio bidimensional y trayectoria para integral J.
3.3 Software de elementos finitos utilizado

3.3.1 Abaqus

En esta investigación el software comercial de elementos finitos utilizado, que incorpora la mecánica de la fractura, es Abaqus. Mediante este programa se pueden resolver un sinfín de problemas ingenieriles basados en el método de los elementos finitos. Además es importante destacar que el software permite resolver desde un simple análisis estático lineal, hasta las más complejas simulaciones dinámicas, gracias a su extensa librería de elementos finitos y los diversos métodos de cálculo que han sido desarrollados a lo largo del tiempo. Asimismo permite modelar cualquier geometría. Por último se destaca su gran capacidad para modificar parámetros a gusto del usuario, dando amplia variedad de propiedades en los materiales a utilizar permitiendo de esta forma que se pueda hacer uso en distintas áreas de la ingeniería.

Fue desarrollado en Estados Unidos por la compañía Dassault Systemes (1978), y dentro de la amplia gama de productos que incorpora, se destacan cuatro:

- Abaqus/CAE: Es una aplicación usada para modelar y analizar componentes mecánicos y ensamblajes de piezas. También existe un "sub-producto" incorporado en el CAE para post-procesar los resultados que aporta el programa (Abaqus/Viewer).
- Abaqus/CFD: software capacitado para el cálculo computacional de la dinámica de fluidos.
- Abaqus/Standard: Es el análisis general de Abaqus. Emplea el tradicional sistema de integración implícita.
- Abaqus/Explicit: Análisis especial que emplea métodos de integración explícita para resolver complejos sistemas no lineales con contactos y cargas transitorias.

3.3.2 Menús de Abaqus

Para desarrollar un modelo en el programa se debe seguir una serie de pasos establecidos con el fin llevar a cabo la simulación. Mediante los 11 módulos presentes en Abaqus se consigue generar un modelo muy similar a la realidad gracias a que cada uno de estos módulos posee su propio menú y ventana de edición. Entre los 11 módulos se encuentran:

"Part", "Property", "Assembly", "Step", "Interaction", "Load", "Mesh", "Optimitation", "Job", "Visualization" y "Sketch" que serán explicados a continuación.

Part

Es el primer paso donde el usuario puede crear la geometría de su modelo. En esta investigación se realiza una cuadrícula acorde a las dimensiones de los ladrillos, otra de las juntas de mortero y una última de las losas que sostienen el muro. Luego se genera una matriz de acuerdo a las dimensiones del muro y las unidades de ladrillo. Con la matriz creada se puede determinar en qué lugar y posición se encuentra cada elemento componente del muro.

Se crea una part del tipo 3D, deformable, solid, extrusión, para cada elemento componente del muro, cabezal, losa superior, junta vertical, junta horizontal, ladrillo, ladrillo medio, losa inferior, fundación inferior.

Property

Consiste en crear un material con sus respectivas propiedades: módulo de Young, densidad, coeficiente de Poisson, tipo de material, esfuerzo principal máximo, energía de fractura, etc. Estas propiedades dadas al material creado se deben asignar a cada elemento componente del muro.

Assembly

En este módulo que consiste en ensamblar las partes que ya han sido creadas hay que destacar una diferencia muy importante, el programa permite ensamblar instancias (piezas) de manera dependiente o independiente, en otras palabras que compartan mismas propiedades, o que sigan las propias. Cuando se poseen elementos que serán repetidos a lo largo del modelo, como es el caso del muro, es favorable ensamblar las instancias de forma dependientes para cada elemento componente del muro, ya que de esta forma se podrá mallar una sola vez en lugar de tener que repetir la acción.

Otra característica de este módulo es que permite generar el juego de relaciones de posición entre las partes que componen el modelo creado, para ello Abaqus entrega una serie de opciones que satisfacen y simplifican la forma de unir piezas.

Step

En este módulo se crean los denominados "pasos" que debe seguir el análisis acorde a los resultados que el usuario espera obtener en el modelo. Para la simulación del muro se crean distintos pasos en función del proceso de carga, ya sea del tipo pre-compresión vertical o carga horizontal. Finalmente se busca la manera que estos pasos del análisis sean cuasiestáticos, es decir, una simulación dinámica pero a una velocidad tan baja que se eliminan los efectos de la inercia asemejándose a una de tipo estática, para ello se debe seleccionar, "General", "Dynamic-Implicit", "Quasi-static" u otro método es crear una tabla de amplitud de manera tal que la carga entregada sea aumentada a través del tiempo en forma muy lenta.

Interaction

Módulo de vital importancia para esta investigación, dado que es aquí donde se crean los contactos entre superficies que son los encargados de acercar el modelo a la realidad y junto con ello, Abaqus inserta la mecánica de la fractura a través de su menú "Special" y a continuación "Crack". Luego, como será explicado en el apartado 3.3.3.1, aparecen las herramientas "Contour integral" y XFEM (eXtended Finite Elements Method).

Load

En este módulo del programa es donde se establecen las cargas y condiciones de contorno aplicadas al análisis deseado, de manera tal que sea efectivamente igual a la realidad. Abaqus da distintas opciones en cuanto a marcar vértices, caras, nodos y/o aristas con el fin de poder aplicar cargas puntuales o cargas distribuidas según corresponda, y además generar aquellas restricciones de movimiento.

Mesh

Módulo esencial que es el encargado de los elementos finitos a analizar. El programa da una opción por defecto para mallar la pieza, sin embargo, el usuario puede modificar la malla según su criterio.

En el mallado de cualquier pieza se debe tener especial atención a las geometrías complejas. Del mismo modo para poder mallar de buena forma una zona que generará grieta, es importante manejar cierta técnica dado que los análisis realizados requieren cálculos muy sensibles en las zonas cercanas al frente de la grieta.

Optimization

Es un módulo que permite establecer algunas mejoras en cuanto a la forma de generar los cálculos mediante algoritmos preestablecidos y que suelen no modificarse. Para esta investigación se dejan los datos por defecto para no intervenir en los cálculos.

Job

Paso final de todo el proceso que se lleva a cabo en Abaqus y es donde el usuario ordena a la CPU del computador a trabajar, también posee distintas opciones de configuración relativas al costo computacional, permitiendo trabajar y procesar sin ocupar la memoria total del pc. Es importante destacar que antes de comenzar a calcular el programa, el usuario puede realizar un "pre-check" al trabajo detallado paso a paso, como medida de precaución, dado que el ordenador puede pasar horas y horas calculando y minutos antes del final puede abortar, es por ello que se aconseja revisar previamente. También tiene la opción de realizar un seguimiento del proceso de análisis verificando hora de inicio, mensajes de advertencia, pasos realizados, etc.

Visualization

Consiste principalmente en la entrega de los resultados, gracias a las opciones gráficas del programa. Además permite observar visualmente los resultados del análisis; dando opciones de realizar cambios en escala si es necesario, mostrando el elemento deformado normal y también con una escala de colores que permite identificar claramente las zonas más solicitadas según las tensiones deseadas en alguna dirección en particular. Además incorpora una breve historia de todo lo realizado paso a paso durante el análisis computacional de manera que es fácil mostrar un paso en particular.

Sketch

Permite verificar cualquier cota, ángulo o cualquier característica en general del dibujo que se está realizando. Del mismo modo el usuario puede realizar otro dibujo que no tenga relación con el análisis, por esta razón es una herramienta necesaria que en caso de ser requerida no interfiere con el proceso que se lleva a cabo en el programa.

3.3.3 Modelo en Contour Integral

La mecánica de la fractura se puede encontrar en el módulo de interacción de Abaqus, dentro de sus aplicaciones, permite modelar la fractura mediante estimaciones de integrales de contorno, esto para grietas previamente definidas y en las cuales se recomienda realizar un mallado más refinado en la zona de la punta de grieta. Es importante destacar que usando integral de contorno no se puede predecir la forma en que se propagará la grieta, su principal uso es para un análisis puntual de una grieta que puede abrir o no durante la ejecución del programa, y de esta forma obtener los parámetros asociados a la mecánica de fractura y su visualización en el modelo.

3.3.4 Contour Integral

A través del uso de integral de contorno se puede estudiar la aparición de grietas en modelos del tipo cuasi-estático en dos o tres dimensiones. Según corresponda se puede optar para realizar los siguientes tipos de cálculos de integrales de contorno:

- J-integral: parámetro de la mecánica de fractura ampliamente aceptado para la respuesta lineal del material, y con limitaciones, a la respuesta no lineal del material. Asociado principalmente a la energía.
- C_t-integral: es una función similar a la J-integral pero actúa principalmente en la zona de fluencia del material y cómo éste se comporta en función del tiempo (muy dependiente de la plasticidad).
- Stress intensity factors: Factor de intensidad de tensiones, muy utilizado en la mecánica de fractura elástica lineal que sirve para medir los campos de tensiones y deformaciones en la punta de la grieta. En otras palabras, un análisis local del problema.
- T-stress: parámetro que representa un esfuerzo paralelo que ocurre en las cercanías de la punta de grieta, sirve para complementar el método de J-integral.

Los modelos a realizar en el software de elementos finitos, estarán enfocados principalmente en obtener estimaciones de integral de contorno, mediante la aparición de una grieta entre dovelas que forman un arco, y de esta manera obtener la liberación de energía asociada al crecimiento de la grieta, que será la responsable de separar el modelo.

También utilizándolo como un método indirecto, se podrá obtener su campo de tensiones y deformaciones mediante los valores de los factores de intensidad de tensiones según los modos que corresponda.

Para poder realizar un análisis mediante integral de contorno, es necesario indicar el frente de la grieta, por esta razón se destaca que debe ser una grieta previamente definida a estudiar. Este frente de grieta dependiendo si el modelo es en dos o tres dimensiones puede ser: nodo, vértice, eje, cara, como se muestra a continuación:



Figura N°3.13: Representación gráfica de la zona

El siguiente paso es definir una línea de fisura, es decir, el lugar geométrico que abrirá durante el análisis. Por último, el programa solicita establecer la dirección de inicio de grieta por medio de un vector que el usuario debe ingresar, o de manera alternativa puede señalar la dirección mediante nodos de referencia en el modelo, en otras palabras, indicar el nodo que representa el inicio y el nodo que representa el final del vector.

Como se menciona en un comienzo se hace necesario generar una malla un poco más refinada en la zona próxima a la punta de grieta, tal como explica la mecánica de la fractura clásica debido a la singularidad que ocurre en esta zona. Se recomienda generar un anillo de triángulos con elementos tipo cuña y el resto de la región de contornos con elementos cuadriláteros o hexaédricos según corresponda.



Figura N°3.14: Representación gráfica de la zona

Una vez que se ha creado la grieta es necesario generar la solicitud de salida mediante el menú "History output" señalando la grieta creada como dominio, estableciendo el número de contornos para la integral y finalmente el tipo de cálculo para llevar a cabo.

#	Edit History Output Request	×
Name:	H-Output-1	
Step:	Step-1	
Procedure:	Static, General	
Domain:	Crack 🖌 : Crack-1	~
Frequency:	Every n increments v n: 1	
Timing:	Output at exact times	
Number of	contours: 3	
Step for	residual stress initialization values:	
Туре: 🔾 Ј-	integral	
00	t-integral	
OT	-stress	
() S	tress intensity factors	
c	rack initiation criterion: 🔘 Maximum tangential stress	
	 Maximum energy release rate 	
	⊖ KII=0	
		_
	OK	

Figura N°3.15: Representación gráfica de la zona

Si se elige la opción "Stress intensity factors", el usuario puede escoger entre tres criterios, según el esfuerzo tangencial máximo, tasa de liberación de energía máxima y el factor de intensidad de tensiones en modo II igual a cero.

3.3.5 Modelo en XFEM

Como fue explicado en párrafos anteriores, los métodos para modelar la fractura en forma convencional sólo permiten la propagación de grieta a lo largo de los elementos que anteriormente fueron predefinidos para aquello según distintos criterios. Resulta lógico pensar que a la hora de resolver problemas reales se crea un gran inconveniente dado que no existen las herramientas para calcular exactamente por donde comenzará el inicio de grieta, quizás la experiencia puede ayudar en algo pero lamentablemente no asegura resultados.

Sin embargo, gracias a la nueva herramienta incorporada en Abaqus: XFEM, la localización de la grieta pasa a ser a lo largo de una trayectoria arbitraria e independiente del mallado. Por lo tanto, no hace falta realizar ningún tipo de mallado especial como se explicó anteriormente.

3.3.6 XFEM

Como se menciona en el apartado anterior, modelar cualquier tipo de discontinuidad en movimiento mediante el método de los elementos finitos tradicional, es un problema debido a la necesidad de volver a mallar para que se ajuste a la geometría de la discontinuidad.

Gracias a XFEM se da solución a este problema. Es un modelo propuesto por Belytschko y Black (1999) y Moes et. al. (1999), consiste en realizar el análisis con una única malla ya que se extiende el dominio geométrico que en un principio se supone que no contiene ninguna grieta y no necesariamente necesita de una malla muy fina. Este método trata a la grieta como una entidad geométrica independiente y además considera una interacción con la malla mediante funciones de enriquecimiento en las zonas más cercanas a los nodos de elementos intersectados por la ubicación geométrica de la grieta. Este razonamiento concuerda totalmente con lo estudiado en la mecánica de la fractura clásica donde se considera la punta de la grieta como una zona de singularidad y donde las tensiones se ven aumentadas. Por esto, el enriquecimiento de los nodos cercanos a la grieta manifiesta una forma eficiente de poder representar aquellas singularidades que se presentan. Los autores antes mencionados presentan este enriquecimiento de la malla mediante la incorporación de grados de libertad en los nodos de los elementos intersectados por la grieta. De esta forma, se logra que los nodos cercanos a la zona de fisura puedan representar la discontinuidad y mejorar la representación de la singularidad en el extremo de la grieta.

3.3.7 Funciones de enriquecimiento

En el primer modelo propuesto para representar las grietas de forma independiente de la malla realizado por Belytschko y Black (1999), se trabajó enriqueciendo la aproximación de los desplazamientos de los nodos alrededor del extremo y a lo largo de las caras y frente de la grieta, mediante el uso de unas funciones que aumentan los grados de libertad de los nodos involucrados directamente con la iniciación y propagación de la grieta.

Como se puede apreciar en la siguiente figura, se muestran con círculos negros aquellos nodos normales y en cuadrados azules los nodos enriquecidos más cercanos a la grieta. Esta última se puede observar por una línea roja.



Figura N°3.16: Grieta y nodos enriquecidos.

La solución aproximada de elementos finitos es la siguiente:

$$u_{ef}(x) = \sum_{i \in I} \phi_i(x) u_i + \sum_{i \in K} \left[\phi_i(x) \sum_{l=1}^4 F_l(x) b_{il} \right]$$
(3.34)

Donde I es el conjunto de todos los nodos de la malla y K es el subconjunto formado por los nodos enriquecidos con funciones $F_l(x)$. El eje x está alineado con las caras de grieta, $\varphi(x)$ son las funciones de forma convencionales, b_{il} son los grados de libertad añadidos a los nodos y $F_l(x)$ son las funciones tipo extremo de la grieta. Estas funciones se obtienen de la representación de un campo de desplazamientos del extremo de grieta de la mecánica de la fractura elástica lineal y son:

$$F_{l}(r,\theta) = \left\{ \sqrt{rsen}\left(\frac{\theta}{2}\right), \sqrt{rcos}\left(\frac{\theta}{2}\right), \sqrt{rsen}\left(\frac{\theta}{2}\right)sen(\theta), \sqrt{rcos}\left(\frac{\theta}{2}\right)sen(\theta) \right\}$$
(3.35)

Aunque es una formulación muy precisa, para grietas de mayor tamaño u otra orientación, es decir, aquellas grietas no rectilíneas, la representación mediante las funciones de extremo de grieta resulta poco precisa en los elementos más alejados. Por esta razón Moes et. al. (1999) observó aquello y propuso una manera complementaria para el enriquecimiento, donde el extremo de la grieta es enriquecido de la misma manera que la punta de la grieta. Análogamente se introdujo una forma más apropiada para representar la discontinuidad en los elementos que están intersectados a lo largo de la grieta y que no están cerca del extremo. Los nodos de estos elementos son enriquecidos mediante la función de salto de Heaviside, H(x):

$$H(x) = \begin{cases} 1 & (x - x^*)e_n > 0\\ -1 & (x - x^*)e_n < 0 \end{cases}$$
(3.36)

Como se muestra en la siguiente imagen, nuevamente se representa la grieta con color rojo, los nodos convencionales con círculos negros, los nodos enriquecidos con las funciones de extremo de grieta mediante cuadrados azules, y los nodos enriquecidos con la función de Heaviside mediante círculos verdes:



Figura N°3.17: Grieta y nodos enriquecidos con la función de Heaviside.

En la imagen que se muestra a continuación se aclara como se realiza la aproximación para poder llevar a cabo los cálculos, en primer lugar dado un punto x del dominio, se toma x^{*} como el punto más cercano a la grieta. En x^{*}, se construyen los vectores tangenciales y normales a la grieta curva, e_s y e_n respectivamente, con la orientación e_n tomada de manera que e_s x e_n = e_z. Donde el vector unitario e_z apunta hacia afuera del papel.



Figura N°3.18: Vectores tangenciales y normales.

De forma general, la aproximación de elementos finitos extendida para una grieta en el caso bidimensional queda:

$$u_{xfem}(x) = \sum_{i \in \mathbf{I}} \phi_i(x) u_i + \sum_{i \in \mathbf{T}} \phi_i(x) H(x) a_i + \sum_{i \in \mathbf{K}} \left[\phi_i(x) \sum_{l=1}^4 F_l(x) b_{il} \right]$$
(3.37)

Donde T es el conjunto de nodos que se enriquecen con la función de discontinuidad H(x) para elementos divididos por la grieta.

Por lo tanto, en un problema bidimensional, se puede notar que un nodo convencional posee dos grados de libertad, un nodo enriquecido con la función Heaviside posee cuatro y en el caso de nodos enriquecidos con la función de extremo de grieta cuenta con diez grados de libertad.

Moes et. al. (1999) indica el enriquecimiento de los nodos en una discretización con una grieta interior. Se enriquecen con funciones representativas del campo de desplazamientos en extremo de grieta de los nodos marcados con círculos verdes y con funciones de discontinuidad los marcados con cuadrados azules.



Figura N°3.19: Discretización de una grieta interior.

La aproximación de elementos finitos extendida para una grieta interior en el caso bidimiensional queda:

$$u_{xfem}(x) = \sum_{i \in I} \phi_i(x) u_i + \sum_{i \in T} \phi_i(x) H(x) a_i + \sum_{i \in K_1} \left[\phi_i(x) \sum_{l=1}^4 F_{l,1}(x) b_{il,1} \right] + \sum_{i \in K_2} \left[\phi_i(x) \sum_{l=1}^4 F_{l,2}(x) b_{il,2} \right]$$
(3.38)

Donde **K1** y **K2** son los conjuntos de nodos a enriquecer con las funciones de extremo de grietas correspondientes. Esta formulación de enriquecimiento local es un caso específico del Método de la partición de la unidad (Melenk y Babuska (1996)).

El método retiene la mayoría de las ventajas que caracterizan a la formulación habitual del método de los elementos finitos tradicional, con las modificaciones apropiadas para la integración numérica (en concreto, se crea una subdivisión de los elementos intersectados por la grieta). Es de especial utilidad en el análisis de propagación de grieta, al evitar el problema de volver a mallar ofreciendo buenos resultados.

Capítulo 4 Modelado en Abaqus

4.1 Modelado

4.1.1 La técnica de los elementos finitos

En la actualidad existen diversos métodos que se ajustan al análisis de estructuras compuestas por obra de fábrica. Como se ha mencionado en apartados anteriores, la técnica de los elementos finitos ha resultado ser muy útil en los últimos años y ha recibido una gran aceptación para modelar el comportamiento estructural de la obra de fábrica. Dado los grandes avances que han logrado las investigaciones, hoy en día se pueden identificar claramente las estrategias a implementar. Estas dependen principalmente del objetivo que se busca en el estudio a realizar y los datos disponibles para el modelo. En primer lugar se tiene el micro-modelo que consiste básicamente en modelar en forma muy detallada cada uno de los componentes de la obra de fábrica, es decir, unidades de ladrillo y morteros por separado cada uno como un componente más del modelo numérico. Se puede deducir, que debido al gran detalle que implica este tipo de análisis, tiene una limitante: el elevado costo computacional requerido para obtener los resultados esperados, por esta razón se ha ido desarrollando últimamente una nueva técnica conocida como micro-modelo simplificado o maso-modelo. Por otra parte se encuentra el segundo enfoque clásico que es el macromodelo. Este método usa los elementos finitos en forma muy similar pero con la gran diferencia que posee un nivel de detalle menor. Esto permite estudiar estructuras de mayores dimensiones sin requerir grandes recursos a nivel computacional.



Figura N°4.1: Modelos numéricos en muros de fábrica para diferentes enfoques a) Micro-modelo; b) Micro-modelo simplificado; c) Macro-modelo.

4.1.2 Micro-modelo

Con el paso del tiempo se han realizado una serie de campañas experimentales buscando identificar donde se localiza el mayor daño en la obra de fábrica. Por esta razón se hace necesario un modelo el cual pueda simular con el máximo nivel de detalle el comportamiento de la unión o interfaz ladrillo-mortero, que ha sido declarada como la principal debilidad en un muro de fábrica. Debido a esto, lograr entender el fondo del problema se hace muy necesario para el estudio del comportamiento de la obra de fábrica bajo un estado de cargas, ya que es en estas juntas horizontales y verticales donde se concentra la mayor no linealidad debido a las grandes deformaciones que ocurren sumado al efecto de las cargas de compresión y corte.

4.1.3 Macro-modelo

Cuando es necesario realizar modelos a gran escala, el macro-modelo cuenta con una gran ventaja, ya que simplifica aquellas limitantes de considerar cada componente en su detalle y por el contrario lo toma como un solo componente juntando de esta forma las unidades de ladrillo y mortero como un todo. Para el caso de tensiones y deformaciones se ocupa la media en cada caso según corresponda el análisis, es por esta razón que se utiliza como primer acercamiento a la solución del problema antes de entrar en un análisis más profundo.

También es importante señalar un nuevo enfoque que ha ido surgiendo de modo de generar un equilibrio entre precisión y costo computacional, este nuevo enfoque es conocido como un "maso" modelo, el cual es abarcado en esta investigación.

4.1.4 Maso-modelo

En respuesta a buscar un equilibrio de ambos enfoques para el análisis numérico de la obra de fábrica, ha surgido una técnica que consiste en tomar lo mejor de un micro y macro modelo, de esta forma en esta investigación se generará un muro como un solo componente mediante el software Abaqus, y a través de particiones realizadas, se logrará modelar e identificar los componentes de unidades de ladrillo y los componentes de morteros asignándole las propiedades respectivas. Finalmente se buscará las similitudes y diferencias en el análisis de estos modelos al aplicar el método de los elementos finitos extendidos (XFEM).

4.2 Creación de un Maso-modelo

En este apartado se irá desarrollando paso a paso la creación del modelo a realizar, por este motivo se utiliza como referencia el ensayo experimental denominado: "Análisis no lineal de muros de gran espesor mediante aplicación de superficie de interacción en Abaqus" de Ariel A. Sanchez y otros. Este muro ensayado cuenta con ladrillos macizos, y morteros propios de la zona de El Algarrobal en Mendoza. Sus dimensiones principales son 1250 (mm) de altura, 980 (mm) de ancho y un espesor de 260 (mm). Dentro de las solicitaciones de carga, recibe en primer lugar una pre-compresión de 50.000 (N) distribuida en forma uniforme, y en segundo lugar, una carga lateral que permita una deformación de 6 (mm) distribuida también de manera uniforme sobre una cara del mismo sector, como se observa en la figura N°4.2 (puntos amarillos). La base del muro se encuentra completamente empotrada al suelo.

La técnica empleada es de un maso-modelo, con el fin de simular y analizar el comportamiento de estas estructuras cuando se ven sometidas a cargas.

A continuación se muestra el micro-modelo del muro realizado en Abaqus, a través del cual se extraen sus medidas y características para empezar a modelar.



Figura N°4.2: Micro-modelo de un muro de fábrica.

4.2.1 Creación de un muro implementando XFEM

Para la creación de cualquier simulación es de vital importancia tener claro el sistema de unidades con el cual se trabajará. Debido a que Abaqus no maneja unidades, es necesario que el usuario sea consistente a lo largo de todo el desarrollo del modelo, para esto los desarrolladores aportan la siguiente tabla.

Quantity SI		SI (mm)	US Unit (ft)	US Unit (inch)	
Length	m	mm	ft	in	
Force	N	N	lbf	lbf	
Mass	kg	tonne (103 kg)	slug	lbf s²/in	
Time	S	S	S	S	
Stress	Pa (N/m ²)	MPa (N/mm ²)	lbf/ff2	psi (lbf/in ²)	
Energy	J	mJ (10-3 J)	ft lbf	in lbf	
Density	kg/m ³	tonne/mm ³	slug/ft3	lbf s²/in4	

Figura N°4.3: Tabla de unidades consistentes recomendada por Abaqus.

4.2.1.1 Módulo de part

En primer lugar necesitamos la creación de un sólido prismático rectangular para poder simular la forma del muro, esto se logra a través del módulo de "Part" en el programa.

En el menú de "Part" se debe seleccionar "Create part" y se desplegará una nueva ventana. En esta nueva ventana se puede asignar un nombre a la pieza a diseñar ("Name"), seguido en "Modeling Space" se debe marcar 3D, lo cual indica que será generado en un espacio de tres dimensiones. El tipo de pieza se debe seleccionar en "Type" y marcar "Deformable" para finalmente escoger la característica mediante la cual se formará el sólido, en este caso debe ser "Solid" y generada mediante "Extrusion". Abaqus entrega un tamaño aproximado de cuadrícula, pero según la pieza que se dibuje permite variar el número acorde a las dimensiones dadas, en este caso ya que se trabaja en metros y el alto del muro es de 1,255[m] se deja un margen aceptable para dibujar, por lo tanto "Approximate size" es 3.

Module:	Part V Model: MasoModeloMuro V	1
	Create Part Name: Muro Modeling Space 3D \(2D) Planar \(\) Axisymmetric	
	Type Options Deformable Discrete rigid Analytical rigid Eulerian Document	
+ ∧ ↓↓ ⊘ ₩ ₫ ⊁ ❹ ♣	Shape Type Image: Solid Extrusion Shell Mire Point Sweep	
	Continue Cancel	

Figura N°4.4: Ventana de edición "Create Part".

Una vez que se ha desplegado la cuadricula para dibujar, existen diversas formas de generar la base del muro, una de ellas es seleccionar la opción de dibujar un rectángulo y luego acotarlo con las medidas correspondientes como se puede observar en la siguiente imagen.



Figura N°4.5: Cuadrícula para dibujar en Abaqus.

Cuando se tienen las medidas correctas, se da click en "Done" para proceder a la extrusión y se depliega una nueva ventana de edición. La característica principal de esta es darle el valor a la profundidad que será extruida la pieza. En este caso corresponde a 0.26[m] y los otros valores se dejan por defecto.

🔆 Edit Bas	e Extru	ision	x
End Condition			_
Type: Blind			
Depth: 0.2 6			
Options			
Note: Twist and draft of	annot be	e specified toget	her.
Include twist, pitch:	0	(Dist/Rev)	
Include draft, angle:	0	(Degrees)	
ОК		Cancel	

Figura N°4.6: Ventana de edición "Edit Base Extrusion".

Completado el último paso de la extrusión se da click en "OK" y aparece la pieza sólida en 3D que se ha construido en el software.



Figura N°4.7: Sólido 3D con dimensiones del muro.

Luego a este sólido 3D se le aplican particiones para simular el micro-modelo mostrado anteriormente. El primer paso consiste en la creación de planos "datum", a través de los cuales se realizarán las particiones.

Para esto, en el módulo de "Part" se encuentra la opción "Tools" en la parte superior donde se encuentran las ventanas de edición. Una vez que se despliega el menú de herramientas se debe seleccionar "Datum", se abre una nueva ventana llamada "Create Datum" y permite, como primera opción, asignar el tipo de referencia. En este caso se necesita crear un plano de referencia, para ello se marca la opción "Plane" y posteriormente la forma para construirlo. Por simplicidad se opta por "3 points".



Figura N°4.8: Ventana de edición "Create Datum".

Por lo tanto, mediante 3 puntos, se creará el plano de referencia. En la siguiente imagen se observan los puntos marcados, dos en color rojo y uno en naranja a punto de ser seleccionado. Cabe destacar que se crea en la misma cara exterior del sólido, tanto en la cara horizontal como en la vertical, ya que a partir de estos planos de referencia se pueden generar los demás planos con facilidad.



Figura N°4.9: Selección de puntos para generar el plano de referencia.

Teniendo los planos vertical y horizontal creados como muestra la siguiente imagen (Figura N°4.10b), a través de ellos se generan nuevos planos hasta conseguir las formas deseadas. Esta función se realiza mediante "offset from plane", la cual permite crear un nuevo plano a cierta distancia desde el plano de referencia seleccionado.



Figura N°4.10: a) Ventana de edición "Create Datum" y b) Sólido 3D con plano de referencia seleccionado.

Una vez seleccionado el plano, como se observa en color naranja, se procede a especificar la distancia a la cual debe ir el nuevo plano, para esto se selecciona mediante "Enter Value" que permite ingresar el valor exacto de distancia.



Figura N°4.11: Opción para ingresar distancia entre planos.

Los primeros planos que corresponden a las losas inferiores van a una distancia de 0,1[m] cada una, luego un mortero a 0,015[m], seguido de ladrillo 0,065[m] y mortero sucesivamente hasta llegar a la losa superior de 0,8[m]. Para facilidad de construcción se sabe que son 12 hileras de ladrillos, y por lo tanto serán 13 morteros ligantes.

Cuando se ingresa el valor de distancia, Abaqus muestra una flecha de color rojo, la cual indica hacia donde se desplegará el plano de referencia que se está construyendo. En la imagen mostrada a continuación se observa que está en la dirección correcta y por tanto se

da click en "OK". En caso que aparezca en dirección contraria la flecha, se puede cambiar el sentido mediante la opción "Flip" para generar el plano correctamente.



Figura N°4.12: Flecha que indica la dirección hacia donde se creará el plano.





Finalmente se tiene el plano de referencia creado, y se debe repetir sucesivamente hasta formar el muro por completo mediante planos de referencia.



Figura N°4.14: Construcción de planos de referencia creados

Cuando se ha finalizado la construcción de planos de referencia, sigue lo más importante del proceso: particionar el sólido 3D en su totalidad para que se asemeje al micro-modelo. De esta forma se generan distintas celdas a las cuales posteriormente se le otorgarán propiedades específicas.

Nuevamente se abre la opción "Tools" y luego "Partition". Se desplegará una nueva ventana "Create Partition", se debe seleccionar "Cell" para partir en las celdas ya mencionadas, y la forma de realizar esta partición será usando los planos de referencia. Por esta razón se debe seleccionar "Use datum plane".



Figura N°4.15: Ventana de edición "Create Partition".

En el modelo generado se debe marcar la zona donde se realizará la partición ("Create Partition") y luego seleccionar la celda para aplicar la partición como se observa en la figura mostrada. Finalmente dar click a "Done" para terminar la partición.



Figura N°4.16: Opción que permite crear la partición.



Figura N°4.17: Selección de celdas a particionar.



Figura N°4.18: Celda seleccionada para aplicar la partición a través del plano de referencia.

Tal como se realizó con los planos, las particiones se deben crear sucesivamente hasta alcanzar el modelo del muro deseado. A continuación se muestran las primeras particiones en forma horizontal comenzando desde la losa inferior hasta una segunda hilera de ladrillos.



Figura N°4.19: Particiones horizontales para losa inferior, morteros e hileras de ladrillos.

El siguiente paso es crear las particiones verticales para dar forma a los ladrillos y juntas de mortero vertical. En este caso se procede de la misma forma que con los horizontales hasta alcanzar el modelo completo. En las imágenes se puede observar un maso-modelo en construcción con los planos de referencia a la vista, y en la otra imagen desactivados para poder visualizar mejor el modelo.



Figura N°4.20: Particiones que permiten simular los ladrillos.

Se continua el proceso de construcción repitiendo los pasos hasta generar el modelo final. Se debe llegar al muro completo como se ilustra en las siguientes imágenes: a la izquierda el modelo final particionado con la gran cantidad de planos de referencia creados, y a la derecha exactamente el mismo modelo, con los planos desactivados para tener una mejor visualización del maso-modelo del muro.



Figura N°4.21: Maso-modelo final realizado por particiones.

4.2.1.2 Módulo de property

Las propiedades mecánicas usadas en el muro de mampostería son extraídas del trabajo "Análisis no lineal de muros de gran espesor mediante aplicación de superficie de interacción en Abaqus" de Ariel A. Sanchez y otros.

Para el desarrollo del modelo se han utilizado dos tipos de materiales con distintas propiedades mecánicas: la primera de ellas con el uso de las características de materiales de la zona de El Algarrobal en Mendoza, y la segunda con los valores obtenidos por Berto y otros (Berto et al, 2004), siendo estos últimos los valores que más estabilidad dieron a su modelo. Las propiedades mecánicas que han sido cuantificadas e incorporadas al modelo son (Tabla):

	LADRILLOS CERÁMICOS MACIZOS							
		Módulo de	Coef.	Energía	Tensión			
	Densidad	Young	Poisson	Fractura	Última			
	kg/cm^3	MPa	-	MPa x m	MPa			
Material								
local:	0.001431	2400	0.155	0.00301	0.94			

	MORTERO LIGANTE								
		Módulo de Coef. Energía Tensión							
	Densidad	Young	Poisson	Fractura	Última				
	kg/cm^3	MPa	-	MPa x m	MPa				
Material									
local:	0.0024	3136	0.21	0.00301	0.63				

Existen varios aspectos a comentar acerca de cómo se definen los campos a rellenar en Abaqus. Para que el programa Abaqus pueda implementar el XFEM es necesario ingresar a la ventana de edición "Edit material" y definir con exactitud las propiedades. Esto se consigue siguiendo la secuencia dentro de la ventana de propiedades: "Mechanical \rightarrow Damage for Traction Separation Laws \rightarrow Maxps Damage". En la casilla denominada "Max Principal Stress" lo que se pide es el nivel de tensión para el cual aparecerá la fisura, siendo para el caso considerado el valor de la resistencia a tracción del mortero y ladrillo según corresponda. Sin embargo, para terminar de crear correctamente esta propiedad del

material, es necesario especificar el criterio para la evolución de la grieta. Para ello se pulsa el botón "Suboptions → Damage Evolution" y se introduce la energía de fractura.

W.	Luit Material	
Name: ladrillo		
Description:		
Material Behaviors		
Maxps Damage		
Damage Evolution		
Density		
Elastic		

Y se ingresan al programa de la siguiente manera:

	Young's Modulus	Poisson's Ratio		Mass Density		Max Principal Stress		Fracture Energy
1	240000000	0.155	1	1431	1	940000	1	3010

Figura N°4.22: Ventana de edición "Edit Material", con propiedades mecánicas de tabla para ladrillo.

#			Edit Material		×
Name: mo	rtero				
Description	:				
- Material B	Behaviors				
Maxps Da Damage Density	mage Evolution				
Elastic					
<u>G</u> eneral	<u>M</u> echanical	<u>T</u> hermal	<u>Electrical/Magnetic</u>	<u>O</u> ther	*

	Young's Modulus	Poisson's Ratio		Mass Density		Max Principal Stress		Fracture Energy
1	3136000000	0.21	1	2400	1	630000	1	3010

Figura N°4.23: Ventana de edición "Edit Material", con propiedades mecánicas de tabla para mortero.



Figura N°4.24: Maso-modelo final con propiedades mecánicas asignadas para cada componente.

4.2.1.3 Módulo de assembly

En primer lugar se debe seleccionar "Create Instance", esta opción nos permite ensamblar cada una de las partes que componen el modelo (previamente construidas en el módulo de "Part"). En este caso como, se trata de un maso-modelo, corresponde ensamblar solo una parte, (debido a esto por defecto aparece marcada la única parte creada). En segundo lugar corresponde definir si será del tipo dependiente o independiente, según manual de Abaqus se recomienda usar del tipo dependiente cuando sean piezas que se repitan en el modelo, de esta forma permitiría mallar una sola vez y luego todas las piezas serian iguales debido a la dependencia, en este caso es una única pieza y por lo tanto lleva un mallado para todo su conjunto, es decir, se debe seleccionar la opción "independent".

+ Create Instance
Create instances from:
Parts Part-1
Instance Type
O Dependent (mesh on part)
Independent (mesh on instance)
Note: To change a Dependent instance's mesh, you must edit its part's mesh.
Auto-offset from other instances
OK Apply Cancel

Figura N°4.25: Maso-modelo final realizado por particiones.

Por último se da click en "OK" y aparece la pieza ensamblada en color azul dentro de la pantalla.



Figura N°4.26: Maso-modelo ensamblado.

4.2.1.4 Módulo de step

Para comenzar, se debe crear cada paso requerido en el análisis. Para el estudio del muro los pasos serán dos: Pre-compresión y Deformación. En el listado de opciones se debe seleccionar "Create Step" y se desplegará una nueva ventana de edición donde se le da nombre al nuevo paso creado, también se determina en que momento debe trabajar (por defecto el primer paso creado se inicia luego del paso inicial del programa) y el tipo de procedimiento de análisis (Estático, Dinámico, entre otros).



Figura N°4.27: Selección que permite crear pasos de análisis.

En primer lugar se debe crear el paso "Pre-compresión", el cual debe iniciar después del paso inicial por defecto, debe ser del tipo "General" y "Static General" como se muestra en la siguiente imagen:

< Cre	ate Step	×
Name: Pre-com	presió n	
Insert new step at	ter	
Initial		
Procedure type:	General	~
Dynamic, Temp-	disp, Explicit	^
Geostatic		
Heat transfer		
Mass diffusion		
Soils		
Static, General		
Static, Riks		¥
<	1	>
Continue	Cancel	

Figura N°4.28: Creación del paso "Pre-compresión".

Una vez que se tiene el paso creado, en la ventana de edición no hay necesidad de modificar ninguna opción, por lo tanto queda todo por defecto.

ame: Pre-compresion			
asic Incrementation	0 Other		
Description:			
ime period: 1	6		
llgeom: Off (Th On of	is setting controls the inclusion o large displacements and affects s	of nonlinear effects subsequent steps.)	
utomatic stabilization	None	×	

Figura N°4.29: Ventana de edición de paso "Pre-compresion".

En segundo lugar viene el paso donde se deben formar y propagar las grietas que serán estudiadas. Este paso se denomina "Deformación-6mm", y tal como fue ensayado en el muro citado en la literatura, se le aplica una deformación controlada de 6 (mm), con un procedimiento del tipo "Dynamic, Implicit", el cual debe iniciar luego del paso de "Pre-compresión" creado anteriormente.

*	Cre	ate Ste	р	×
Name:	Deforma	ción-6m r	n	
Insert n	ew step af	ter		
Initial				
Pre-co	mpresión			
Procedu	ure type:	General		~
Direct	cyclic			^
Dynam	iic, Implici	it		
Geosta	tic			
Soils				
Static,	General			
Static,	Riks			
Visco				¥
<			2	•
Co	ntinue		Cancel	

Figura N°4.30: Creación del paso "Deformacion-6mm".

En la ventana de edición del paso, en la pestaña "Basic", se debe seleccionar "Application"→ "Quasi-static". De esta manera, el paso realizado se realiza en forma dinámica pero a una velocidad muy lenta, que permite ignorar las fuerzas de inercia, como si se tratara del tipo estático.

Type: Dynam	macion-6mm ic, Implicit		
Basic Incre	ementation Other	e	
Description			
Time period:	1		
Nigeom:	Off (This setting On of large disp	controls the inclusion of nonlinear effects placements and affects subsequent steps.)	
Application:	Quasi-static	R	

Figura N°4.31: Ventana de edición de paso "Deformacion-6mm".

Por último, el "Step Manager", cuyas funciones son: crear nuevos pasos, editarlos, eliminarlos y visualizar en forma ordenada la secuencia, debe quedar de la siguiente forma:

÷	Step Manager			
	Name	Procedure	Nlgeom Time	
V	Initial	(Initial)	N/A N/A	
v	Pre-compresión	Static, General	OFF 1	
v	Deformación-6mm	Dynamic, Implicit	OFF 1	
0	T-D	Destas Destas	Numera	
Cr	reate Edit	Replace Rename Delete	Nlgeom Dismi	

Figura N°4.32: Ventana "Step Manager" con pasos creados.

Una vez que los pasos han sido creados, se precede a solicitar los campos de salida requeridos, mediante la opción "field output manager", para este análisis se necesita que Abaqus visualice la grieta y entregue la información correspondiente.



Figura N°4.33: Selección que permite solicitar datos de salida.

Como fue explicado en el apartado 3.3.6, para poder visualizar las grietas en Abaqus es indispensable solicitar aquella opción. Para esto, una vez que ha sido creado el campo de salida, se debe ir a la opción Failure/Fracture y marcar las opciones PHILSM Y PSILSM como muestra la secuencia a continuación.

🔶 Edit Field Output Request	🔶 Edit Field Output Request 🗙
Name: Información-Grietas Step: Deformacion-Grietas Procedure: Dynamic, Implicit Domain: Whole model Exterior only Frequency: Every n increments n: 10 Timing: Output at exact times Output Variables Select from list below Preselected defaults All Edit variables	Name: Información-Grietas Step: Deformación-Grim Procedure Dynamic, Implicit Domain: Whole model Complexity in the information only Frequency: Every n increments Rev nr. 10 Timing: Output at exact times Output Variables © Select from fist below Preselected defaults All Calify variables
Stresses Strains Strains Displacement/Velocity/Acceleration Forces/Reactions Contact Energy Failure/Fracture Thermal Electrical/Magnetic	PHILSM,PSILSM BRPRATIO, Ratio of principal strain rates used for Muschenborn-S ^ SHRRATIO, Shear stress ratio used for the shear damage initiation CSDMG, Scalar stiffness degradation for cohesive surfaces CSMAXSCRT, Maximum straction damage initiation criterion for c CSQUADSCRT, Quadratic traction damage initiation criterion CSQUADSCRT, Quadratic displacement damage initiation criterio CSQUADUCRT, Quadratic displacement damage initiation criterio OPHILSM, Level set value phi PHILSM, Level set value phi Thermal C
Note: Some error indicators are not available when Domain is Whole Model or Intr Output for rebar Output at shell, beam, and layered section points: Image: Use defaults Specify: Image: Include local coordinate directions when available Image: OK Cancel	Note: Some error indicators are not available when Domain is Whole Model or Intr Output for rebar Output at shell, beam, and layered section points: Image: Some of the section points: Image: Some of the section points: Image: Image: Some of the section points: Image: Some of the section points: Image: Image: Image: Some of the section points: Image: Some of the section points: Image: Image: Image: Image: Image: Some of the section points: Image: Im

Figura N°4.34: Campos de salida solicitados para la generación de grietas mediante XFEM.

También para obtener datos del estado de avance de XFEM, Abaqus recomienda activar STATUSXFEM, mediante la opción State/Field/User/Time, tal como muestra la secuencia:

≑ Edit Field Output Request	Edit Field Output Request
Name: Información-Grietas	Name: Información-Grietas
Step: Deformacion-6mm	Step: Deformacion-6mm
Procedure: Dynamic, Implicit	Procedure: Dynamic, Implicit
Domain: Whole model 🛛 🗹 🗆 Exterior only	Domain: Whole model
Frequency: Every n increments v n: 10	Frequency: Every n increments v n: 10
Timing: Output at exact times	Timing: Output at exact times
Output Variables	Output Variables
Select from list below Preselected defaults All Edit variables	Select from list below Preselected defaults All Edit variables
PHILSM,PSILSM	PHILSM, PSILSM, STATUSXFEM
Energy A	Acoustics
Failure/Fracture	Volume/Thickness/Coordinates
Thermal	Error indicators
Electrical/Magnetic	▼ ■ State/Field/User/Time
Porous media/Fluids	SDV, Solution dependent state variables
Acoustics	FV, Predefined field variables
Volume/Thickness/Coordinates	UVARM User-defined output variables
Error indicators	STATUS, Status (some failure and plasticity models; VUMAT)
Gitate/Field/User/Time	STATUSXFEM, Status of xfem element
< >>	< >
Note: Some error indicators are not available when Domain is Whole Model or Inte	Note: Some error indicators are not available when Domain is Whole Model or Inte
Output for rebar	Output for rebar
Output at shell, beam, and layered section points:	Output at shell, beam, and layered section points:
Use defaults Specify:	Use defaults Specify:
✓ Include local coordinate directions when available	✓ Include local coordinate directions when available
OK	OK Cancel

Figura N°4.35: Campos de salida solicitados para ver el estado de XFEM.

4.2.1.5 Módulo de interaction

En este módulo se encuentra presente la mecánica de la fractura en Abaqus. Para el estudio del muro será usada la herramienta XFEM que fue descrita en el apartado 3.3.6.

Para la creación de una grieta se debe ingresar a la opción "Special", "Crack" y "Create" como se muestra en la siguiente imagen.



Figura N°4.36: Creación de una grieta.

Luego se debe asignar un nombre (en este caso llamada "Grietas") y seleccionar el tipo método a utilizar, debido a que el estudio se centra en encontrar aquel lugar donde pueden aparecer grietas en forma arbitraria se selecciona XFEM.

Туре	
Contour integral	
XFEM	

Figura N°4.37: Selección del método de fractura.

A continuación Abaqus solicita el dominio donde puede aparecer esta grieta, por lo tanto se marca el contorno del muro y con esto se asegura que la grieta se puede originar en cualquier lugar.

x	Select the crack domain	single instance	¥
---	-------------------------	-----------------	---

Figura N°4.38: Selección del dominio donde se aplicará la fractura.

Posteriormente se abre la ventana de edición "Edit Crack" que muestra en rojo todas aquellas zonas donde se pueden generar grietas, y además se debe marcar la casilla "Allow crack growth" encargada de permitir el crecimiento de la grieta en el caso que aparezcan. El resto se deja por defecto. Cabe destacar la opción "Crack location", donde Abaqus permite establecer el origen de la grieta de acuerdo a lo que requiera el usuario.



Figura N°4.39: Región seleccionada en rojo donde puede ocurrir fractura en el modelo.

Una vez establecidos dominio y tipo de grieta se procede a cerrar el editor. Finalmente Abaqus muestra con cruces verdes las zonas del modelo donde pueden aparecer las grietas, en este caso puede existir en cualquier lugar del muro.



Figura N°4.40: XFEM aplicado a todo el modelo indicado por cruces verdes.

Luego se procede a crear la interacción de crecimiento de grieta, para esto se debe hacer click en "Create Interaction" dentro del mismo módulo.



Figura N°4.41: Selección para crear una interacción en el modelo.

El paso siguiente es asignar nombre a la interacción. Seleccionar desde que momento se encontrará activa y por último el tipo de interacción. Para el modelo generado se debe seleccionar "XFEM crack growth" cuya función será controlar el crecimiento de la grieta en caso que corresponda.

lame:	Grieta	
tep:	Initial 👻	
roced	ure:	
Type	for Selected Step	
Gener	al contact (Explicit)	
Gener	al contact (Standard)	
Surfa	e-to-surface contact (Standard	d)
Surfa	e-to-surface contact (Explicit)	
Self-c	ontact (Standard)	1.31
Self-c	ontact (Explicit)	E
Fluid	cavity	
Fluid	exchange	
XFEM	crack growth	
Cyclic	: symmetry (Standard)	
Elasti	foundation	-

Figura N°4.42: Selección de interacción para el crecimiento de grieta.

Una vez que ha sido seleccionado el tipo, Abaqus abre una nueva ventana de edición. En esta última se debe seleccionar la grieta creada por XFEM (como fue explicado anteriomente) y además marcar la opción de permitir el crecimiento en el paso correspondiente.

Type: XFEM	ana ali maan dh
	crack growth
Step: Initial	
XFEM crack:	Grieta 🚽
Allow crack	growth in this step

Figura N°4.43: Ventana que permite editar la interacción.

4.2.1.6 Módulo de load

En este módulo se incorporan al modelo todas las acciones a las cuales está sometido el modelo, sean del tipo condiciones de contorno o cargas aplicadas.

Para comenzar con las cargas a las que se encuentra sometido el modelo, se debe seleccionar "Create Load" y se desplegará una ventana de edición. La primera carga aplicada será la de gravedad asociada al paso de "Pre-compresión" de la categoría "Mechanical" y tipo "Gravity" tal como indica la figura N° 4.45.



Figura N°4.44: Selección que permite crear una carga.

*	Crea	ite Load ×
Name:	Gravedad	
Step:	Pre-compresión	~
Proced	ure: Static, Genera	I
Categ	jory	Types for Selected Step
Me	chanical	Concentrated force
O The	ermal	Moment
O Ac	oustic	Pressure
🔘 Flu	id	Shell edge load
⊖ Ele	ctrical/Magnetic	Pipe pressure
🔘 Ma	iss diffusion	Body force
Ot	her	Line load
		Gravity
		Bolt load 🗸 🗸
	Continue	Cancel

Figura N°4.45: Ventana de creación de una carga.

A continuación se debe ingresar el valor de magnitud de la carga aplicada. Por tratarse de la gravedad y trabajando en el sistema internacional de unidades (S.I) el valor es 9.81 (Nm/s²) y en valor negativo en la componente "y" del plano cartesiano, o componente 2 como lo indica Abaqus.
$\stackrel{a}{\Rightarrow}$	Edit Load 🛛 🗙
Name:	Gravedad
Type:	Gravity
Step:	Pre-compresión (Static, General)
Region:	(Whole Model) 🛛 🔒
Distribut	tion: Uniform 🗸 f(x)
Compor	nent 1:
Compor	nent 2: -9.81
Compor	nent 3:
Amplitu	de: (Ramp) 🗸 🏠
	OK Cancel

Figura N°4.46: Ventana que permite editar la carga.

Ya establecida la primera carga de gravedad, se debe incorporar una frecuencia de amplitud al programa antes de ingresar la segunda carga, mediante un archivo excel creado previamente. Se realiza una tabla, aumentando una centésima de segundo por cada salto, con el fin que la carga que se debe introducir sea lo suficientemente lenta para que el modelo trabaje de forma cuasi-estático.

Para ingresar esta tabla de frecuencia cuasi-estática, se debe ir al árbol de construcción del modelo al lado izquierdo de la pantalla, hacer click derecho en la opción "amplitudes" y seleccionar "create".



Figura N°4.47: Opción para creación de frecuencia.

Posteriormente ingresar el nombre y el tipo de datos a ingresar, en este caso corresponde a los datos tabulados en Excel, por lo tanto, la opción a elegir es "Tabular".



Figura N°4.48: Ventana de selección del tipo de frecuencia.

Finalmente se copian y pegan los datos desde el archivo Excel al programa tal como se muestra en la siguiente secuencia:

Name: Cu Type: Tal	asi-estática pular			Name: Cua Type: Tab	si-estática ular		
fime span: Smoothing	Step time 💌 © Use solver default © Specify:			Time span: Smoothing:	Step time 👻 Use solver default Specify:		
Amplitude	Data Baseline Correction			Amplitude	Data Baseline Correction		
	Time/Frequency	Amplitude	*	1	fime/Frequency	Amplitude	^
1	0	0	(E)	1984	19.83	19.83	
2	0.01	0.01		1985	19.84	19.84	
3	0.02	0.02		1986	19.85	19.85	
4	0.03	0.03		1987	19.86	19.86	
5	0.04	0.04		1988	19.87	19.87	
6	0.05	0.05		1989	19.88	19.88	
7	0.06	0.05		1990	19.89	19.89	
8	0.07	0.07		1991	19.9	19.9	
9	0.08	0.08		1992	19.91	19.91	
10	0.09	0.09		1993	19.92	19.92	
11	0.1	0.1		1994	19.93	19.93	
12	0.11	0.11		1995	19.94	19.94	
13	0.12	0.12		1996	19.95	19.95	
14	0.13	0.13		1997	19.96	19.96	
15	0.14	0.14		1998	19.97	19.97	
16	0.15	0.15		1999	19.98	19.98	
17	0.16	0.16		2000	19.99	19.99	
18	0.17	0.17	-	2001	20	20	

Figura N°4.49: Ventana que permite tabular los datos.

Con la frecuencia cuasi-estática ya creada, se procede a incorporar las cargas al modelo. En primer lugar, una carga de pre-compresión distribuida uniformemente a todo el muro con una frecuencia instantánea por defecto del programa, para luego introducir la deformación de 6mm impuesta en el ensayo. Esta irá aumentando lentamente conforme a la frecuencia

creada en el paso anterior, es decir, ira aumentando la carga en pequeñas porciones en lugar de cargar todo el muro de una sola vez.

Para crear la nueva carga, se ingresa Precompresión, del tipo "Pressure" y continuar. Enseguida se ingresa el valor de la carga, en este caso 50.000 (N) y la distribución de aquella presión como se dijo anteriomente será en forma uniforme en la cara superior del muro como muestra figura N°4.51.



Figura N°4.50: Ventana de creación de una carga.



Figura N°4.51: Ventana que permite editar la carga y asignar la región donde será impuesta.

El último paso consiste en aplicar la carga de deformación al muro para realizar la prueba. En este ensayo la deformación se realiza por medio de un desplazamiento lateral en forma controlada. Para esto se debe ingresar como una condición de contorno impuesta y no como una carga. Por lo tanto, el primer paso es crear la condición, seleccionando "Create Boundary Condition" dentro del menú de opciones.

Module: Load	▼ Model: Model-	1 Step: Pre-compresion	•
LL 📰			
Create			
Boundary Condition			

Figura N°4.52: Selección que permite crear una condición de contorno.

En la ventana de creación, asignar como nombre "Deformación-6mm" y que esta sea activada en el paso de "Deformación-6mm" creado previamente en el módulo de "Step", categoría "Mechanical" y del tipo "Displacement/Rotation" como se muestra a continuación:

#	Create	Boundary Condition
Name:	Deformación-6m	n
Step:	Deformación-6mr	n 🖌
Proced	ure: Dynamic, Imp	licit
Categ	jory	Types for Selected Step
● Me	echanical	Symmetry/Antisymmetry/Encastre
🔵 Flu	id	Displacement/Rotation
O Ele	ctrical/Magnetic her	Velocity/Angular velocity Acceleration/Angular acceleration Connector displacement Connector velocity Connector acceleration
	Continue	Cancel

Figura N°4.53: Ventana de creación de una condición de contorno.

Para aplicar este desplazamiento controlado, se realiza una partición en la esquina superior derecha como indica la imagen.



Figura N°4.54: Región del modelo donde es aplicada la condición.

Una vez seleccionada la zona de aplicación, se introduce la magnitud del valor de deformación. En este caso corresponde a 0.0005 (m) en la dirección negativa del eje "x". Este valor, multiplicado por cada paso de la frecuencia debe llegar a la deformación total aplicada. Para el ensayo del muro seria 0.0005 (m) x 20, es decir, los 6 (mm) que debe deformar el muro.

🔶 Edi	t Boundary Conditio	in ×
Name: Def	ormación-6mm	
Type: Disp	placement/Rotation	
Step: Def	ormación-6mm (Dynami	c, Implicit)
Region: Set-	3 🎝	
CSYS: (Glo	obal) 🔉 🙏	
Method:	Specify Constraints	~
Distribution:	Uniform 🗸	f(x)
√ U1:	-0.0005	
🗌 U2:		
🗌 U3:		
UR1:		radians
UR2:		radians
UR3:		radians
Amplitude:	Cuasi-estática 🗸	Ъ
Note: The d main	lisplacement value will be tained in subsequent step	e 05.
OK	Cano	el

Figura N°4.55: Ventana que permite editar la condición de contorno.

Finalmente se debe crear la condición de contorno que simula la fijación del muro con respecto al piso. Esta debe ser del tipo "Symmetry/Antisymmetry/Encastre", debe estar activa desde el primer momento del análisis y de nombre se asigna "Empotramiento".

Name:	Empotramiento	
Step: Proced	Initial ure:	Types for Selected Step
 Me Flu Ele Oti 	echanical id ctrical/Magnetic her	Symmetry/Antisymmetry/Encastre Displacement/Rotation Velocity/Angular velocity Acceleration/Angular acceleration Connector displacement Connector velocity Connector acceleration
	Continue	Cancel

Figura N°4.56: Ventana de creación de una condición de contorno.

A continuación, Abaqus solicita las regiones donde se aplica esta condición, marcando las zonas lateral-inferior de ambos lados y la cara inferior completa como se observa en la siguiente imagen.



Figura N°4.57: Región del modelo donde es aplicada la condición.

Para terminar el proceso se restringe todo tipo de movimiento y rotación, en cualquiera de los ejes. El muro debe quedar totalmente empotrado al suelo.

Name:	Empotramiento
Туре:	Symmetry/Antisymmetry/Encastre
Step:	Initial
Region:	Set-2
CSYS:	(Global) 🔉 🙏
O XSYN	/IM (U1 = UR2 = UR3 = 0)
O YSYI	/IM (U2 = UR1 = UR3 = 0)
S ZSYI	/IM (U3 = UR1 = UR2 = 0)
C XAS	/MM (U2 = U3 = UR1 = 0; Abaqus/Standard only
O YAS	/MM (U1 = U3 = UR2 = 0; Abaqus/Standard only
C ZAS	/MM (U1 = U2 = UR3 = 0; Abaqus/Standard only
	IED (U1 = U2 = U3 = 0)
O ENC	ASTRE (U1 = U2 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0)

Figura N°4.58: Ventana que permite editar la condición de contorno.

La ventana "Boundary Condition Manager" debe quedar de la siguiente forma: el empotramiento aplicado desde el inicio y debe mantenerse activado a lo largo del análisis, por el contrario la deformación aplicada solo debe activarse en la etapa de deformación.

\$		Bounda	ary Condition M	anager	×
	Name	Initial	Pre-compresión	Deformación-6mm	Edit
1	Deformación-6mm			Created	Move Left
V	Empotramiento	Created	Propagated	Propagated	morecere
					Move Right
					Activate
					Deactivate
Ste	procedure:				
Βοι	indary condition type	: Symmetry/	Antisymmetry/Enc	astre	
Βοι	indary condition state	us: Created in	this step		
	Create	Сору	Rename	Delete	Dismiss

Figura N°4.59: Ventana que muestra el administrador de condiciones de contorno.

4.2.1.7 Módulo de mesh

Para comenzar con el mallado se deben generar las "semillas" encargadas de subdividir el modelo en pequeñas partes finitas. El primer paso consiste en seleccionar "Seed Part Instance" e ingresar el valor 0.03 definido para este trabajo realizado al muro.



Figura N°4.60: Opción que permite incorporar las semillas en todo el modelo.



Figura N°4.61: Ventana de edición para modificar distancias entre semillas.

El siguiente paso es revisar todo el control del tipo de elementos a formar, por esta razón se debe ingresar a "Assign Mesh Control".



Figura N°4.62: Selección que permite asignar el control de malla.

Para este tipo de obra de fábrica lo más recomendado es un elemento del tipo "Hex" (hexaédrico), porque trabaja en forma óptima con geometrías no tan complejas como es el caso del muro. Posteriormente se usa una técnica del tipo estructurada a lo largo del modelo y se da click en "OK" para seleccionar el muro en su totalidad.

Element Shape Hex 🔘 Hex-do	minated	🔿 Tet () Wedge	
Technique As is Free Structured Sweep Bottom-up				
	Assign	Stack Dire	ction	

Figura N°4.63: Ventana que permite definir tipo de elementos y técnica a utilizar.

Luego se debe definir el tipo de cálculo y librería a utilizar, para esto se debe seleccionar "Assign Element Type" y luego, para asignar la región, se debe abarcar el muro en su totalidad.



Figura N°4.64: Opción que permite asignar las características del tipo de elemento a calcular.

Una vez que ha sido seleccionado el modelo, se abrirá un ventana de edición del tipo de elementos. La librería de elementos utilizada es "Standard", orden geométrico "Linear" y la formulación de cálculo para los elementos del tipo "Hex" debe ser "Reduced integration", es decir, una formulación de integración reducida entre nodos que permite reducir el tiempo de análisis.

Element Library	Family	
Standard O Explicit	3D Stress	
Annual of the	Acoustic	
Seometric Order	Cohesive	
Linear 🗇 Quadratic	Continuum Shell	
Her Western Tes		
E Hubrid formulation	Reduced integration	
Element Controls	a sences suchanne	
Line and the setting of		
Hourglass somess:	e ore service () specify	1
Viscosity:	Use default	Æ
Kinematic split:	🐵 Average strain 🔘 Orthogonal 💮 Centroid	
Second-order accuracy	: 🗇 Yes 💌 No	
Distortion control:	Use default Ves No	
	Leyneth ratio: 0.1	•
C3D8R: An 8-node linea	r brick, reduced integration, hourglass control.	
des. To calact an alamant	t change for maching	
and a second sec	a second s	
select "Mesh->Cont	rois from the main menu bar.	

Figura N°4.65: Ventana de edición que define las características de cálculo.

Module: Mo	esh 💌
En La	
Merh Part	
Instance	

Finalmente se procede a mallar el modelo mediante la función "Mesh Part Instance".

Figura N°4.66: Opción que permite mallar el modelo.

En forma inmediata Abaqus solicita confirmar el mallado, se da click en "Yes".



Figura N°4.67: Advertencia que confirma el mallado del modelo.

Como resultado se muestra la totalidad del muro mallada con elementos hexaédricos, distinguiendo los morteros en forma horizontal y en el caso de los morteros verticales no se pueden apreciar con claridad, pero si muestran algunas diagonales formadas por las particiones realizadas en el comienzo.



Figura N°4.68: Malla final maso-modelo del muro.

4.2.1.8 Módulo de job

Etapa que da término al modelado del muro. Es aquí donde el usuario manda a calcular al software realizando previamente un pre-check para evitar que el programa aborte por pequeños detalles, o también un gran tiempo de cálculo si los datos nos son los correctos.

Para generar un trabajo, se debe ingresar al módulo de job y presionar "Create Job" como se muestra a continuación.



Figura N°4.69: Selección para crear un nuevo trabajo.

Posteriormente se abre una ventada de edición para crear este trabajo. Para comenzar se le asigna un nombre, para el modelo del muro se define como: GrietasXFEM, la fuente siempre es el modelo que se necesita trabajar, previamente definido o un archivo que se puede importar al programa. Finalmente se da click "Continue..."

Name:	GrietasXFE M
Source:	Model 👻
MasoM	lodelo

Figura N°4.70: Creación de un trabajo en el modelo.

En pro de obtener los mejores resultados se recomienda ir a la pestaña de "Precision" y modificar "Nodal output precision" a "Full" como se observa en la siguiente imagen.

Edit Job Name: Grieta Model: Masol Analysis produ Description:	sXFEM Modelo ict: Abaqu	s/Standard			
Submission	General	Memory	Parallelization	Precision	
Nodal output	precision:	Full			
	ОК)		Cancel	

Figura N°4.71: Ventana de edición del trabajo creado.

De igual forma, es posible modificar más parámetros antes de mandar a calcular el programa, pero estos ya van más asociados al CPU que el usuario esté utilizando. Por ejemplo, se puede determinar la cantidad de memoria RAM destinada para los cálculos de manera que estos no afecten el comportamiento normal del computador (modificando la pestaña "Memory"), así como también funciones más específicas referidas a la cantidad de núcleos del procesador en la pestaña "Paralletization". El resto de funciones generalmente se dejan por defecto antes de dar click en "OK" para completar la creación del trabajo de análisis.

Con el trabajo ya creado se debe ir al "Job Manager" cuyas funciones son crear, modificar, eliminar cualquier trabajo, asi como también mandar a calcular "Submit", revisar si está correcto antes de realizar cálculos "Data Check", observar paso a paso el desarrollo de cálculos "Monitor..." y finalmente mostrar los resultados, es decir, el archivo .ODB mediante el botón "Results".

A continuación se muestra la ventana "Job Manager" con el trabajo previamente creado antes de calcular (Status: None) y luego con el trabajo terminado (Status: Completed). Una vez finalizado se da click en "Results" para poder visualizar los resultados en el siguiente módulo.

lame	Model	Туре	Status	Write Inpu
irietas XFEM	MasoModelo	Full Analysis	None	Data Chec
				Submit
				Continue
				Monitor.

Figura N°4.72: Job Manager con trabajo sin ejecutar.

lame	Model	Туре	Status	Write Inpu
irietasXFEM	MasoModelo	Full Analysis	Completed	Data Chec
				Submit
				Continue
				Monitor.

Figura N°4.73: Job Manager con el trabajo terminado.

4.2.1.9 Módulo de visualization

Es el último módulo utilizado dentro del modelo. Una vez que el programa ejecuta un modelo crea un archivo con la extensión ".ODB" que visualiza los resultados y además permite extraer todos aquellos datos que fueron solicitados.

Para obtener un primer acercamiento al resultado, Abaqus muestra el elemento en su estado deformado mediante la opción "Plot Contours on Deformed Shape":



Figura N°4.74: Job Manager con el trabajo terminado.

Abaqus muestra el resultado final de la simulación, destacando el lugar por donde deben aparecer y propagarse las grietas. Como se observa, ocurre en una diagonal escalonada en el sentido de aplicación de la carga. También, una clara zona de transición entre una parte del modelo que se encuentra sometida a tracción, y la otra por el contrario a compresión. Es en esta zona donde aparecen las primeras grietas y debido a limitaciones del software no pueden ramificarse como ocurre en el ensayo experimental.



Figura N°4.75: Resultado final de la simulación.

Además, si se desea se puede modificar la escala de deformación cuando las deformaciones son pequeñas y no se alcanzan a observar. Para esto se debe ingresar a "Common Options" y modificar el valor del "Deformation Scale Factor" como se muestra en la siguiente secuencia.



Figura N°4.76: Secuencia para modificar el factor de escala de deformación.

Finalmente para extraer los datos y gráficas de interés para el estudio del muro se debe acceder a "Create XY Data", y seleccionar entre las opciones de "Field output" o "History output" según donde se fueron solicitados las parámetros.



Figura N°4.77: Selección para obtener los datos de salida.

Para mostrar el paso a paso del comportamiento del modelo, se presentan dos secuencias a continuación, en primer lugar la etapa de pre-compresión del muro y en segundo lugar la deformación aplicada.

Pre-compresión:



Figura N°4.78: Secuencia etapa de pre-compresión.



Figura N°4.79: Secuencia etapa de pre-compresión.

Deformación:



Figura N°4.80: Secuencia etapa de deformación.



Figura N°4.81: Secuencia etapa de deformación.



Figura N°4.82: Secuencia etapa de deformación.



Figura N°4.83: Secuencia etapa de deformación.

4.2.2 Creación de un arco implementando Contour Integral

Para modelar el arco y aplicar el método de Contour Integral del programa, se utiliza como referencia el proyecto "Development of an automated methodology for structural calculation of 3D dry masonry arches using finite elements", que consiste en ensayar un arco formado por 9 dovelas de piedra, puestas una sobre otra sin ocupar ningún tipo de mortero. Sus dimensiones principales son: una altura de 1180 (mm), un ancho total de 2400 (mm) y un espesor de 400 (mm). La solicitación de carga se realiza mediante una prensa hidráulica, aplicada sobre la cara superior de la dovela Nª4 y cuenta con dos puntos de apoyo en los extremos que no permiten desplazamiento.

A continuación se observa una imagen del arco citado.



Figura N°4.84: Arco ensayado en laboratorio.

Modelando el arco en 3D mediante la técnica de un maso-modelo en Abaqus, tal y como se ha explicado, queda de la siguiente forma.



Figura N°4.85: Modelo 3D del arco simulado en Abaqus.

Las propiedades del material utilizadas corresponden a una piedra seca y se detallan en la siguiente tabla:

Piedra				
	Módulo de	Coef.		
Densidad	Young	Poisson		
kg/cm^3	GPa	-		
0.0023	20	0.22		

Para aplicar la integral de contorno como método de cálculo, al igual que el modelo anterior, es necesario ingresar al módulo de interacción y crear grietas. Antes de definir las características de la grieta es imprescindible realizar dos pasos: primero, generar una partición entre las dovelas 4 y 5 (Figura N°4.86), y segundo generar una zona o línea de fisura según sea el caso. Para el arco se debe marcar una zona entre las dovelas 4 y 5 como se muestra a continuación:



Figura N°4.86: Partición creada para definir del frente de la grieta.



Figura N°4.87: Asignación de zona o línea de fisura.



Figura N°4.88: Zona que durante el análisis debe abrir.

Luego viene el proceso de generar la grieta, se ingresa a la opción "Special", "Create Crack" y se selecciona el del tipo "Contour Integral".

+ Create Crack
Name: GrietaArc o
Туре
Contour integral
XFEM
Continue Cancel

Figura N°4.89: Selección de "Contour Integral".

En el momento de definir la punta de la grieta, se selecciona la partición realizada y posteriormente mediante un vector se indica la dirección de extensión de la grieta.

Name: GrietaArco Type: Contour integral Domain: Geometry	- Co
General Singularity	
On symmetry plane (half-crack model) Crack front: (Picked) Crack tip/line: (Same as crack front) Crack Extension Direction Normal to crack plane: (-0.172,0.985,-1.4e-016) Q q vectors Data	
q vectors (-0.172,0.985,-1.4e-016)	
OK Cancel	

Figura N°4.90: Vectores indicando dirección de extensión de la grieta.



Figura N°4.91: Cruces verdes que indican el lugar donde se producirá la grieta.

Una vez definida la grieta, sus características, condiciones de contorno, cargas a aplicar, pasos de análisis y mallado, se procede a solicitar los parámetros de interés para el estudio de la mecánica de fractura. Para esto es necesario ir al módulo de "Step" y crear nuevos "History Output request". El primero de ellos corresponde a los factores de intensidad de tensiones, denominado "FIT", cuyo dominio proviene de la grieta creada, con un número de contornos de cálculo equivalente a tres y criterio utilizado el de tasa de liberación de energía máxima (Figura N°4.92). El segundo parámetro corresponde a la tasa de liberación de energía mientras abre la grieta, denominado y calculado mediante "J-integral", con un número de contorno de tres.



Figura N°4.92: Solicitud de parámetros de salida.

Con los parámetros de salida pedidos se realiza la simulación de la grieta en el arco y los resultados se muestran a continuación:



Figura N°4.93: Vista isométrica simulación arco.



Figura N°4.94: Vista plano X-Y simulación arco.

Finalmente, en el módulo de visualización, se extraen los datos solicitados: factor de intensidad de tensiones y cálculo de la integral J como se muestra a continuación.

Para los valores de K_I y de Integral J:

+ History Output	🐥 History Output
Variables Steps/Frames	Variables Steps/Frames
Output Variables	Output Variables
Name filter:	Name filter:
Stress intensity factor K1: K1 at FIT_GRIETAARCO_PICKEDSET5-3_Contour_1 in ELSET ALL E	J-integral estimated from Ks: JKs at FIT_GRIETAARCO_PICKEDSET5-5_Contour_2 in ELSET A
Stress intensity factor K1: K1 at FIT_GRIETAARCO_PICKEDSET5-3_Contour_2 in ELSET ALL E	J-integral estimated from Ks: JKs at FIT_GRIETAARCO_PICKEDSET5-5_Contour_3 in ELSET A
Stress intensity factor K1: K1 at FIT_GRIETAARCO_PICKEDSET5-3_Contour_3 in ELSET ALL E	J-integral estimated from Ks: JKs at FIT_GRIETAARCO_PICKEDSET5-6_Contour_1 in ELSET A
Stress intensity factor K1: K1 at FIT_GRIETAARCO_PICKEDSET5-4_Contour_1 in ELSET ALL E	J-integral estimated from Ks: JKs at FIT_GRIETAARCO_PICKEDSET5-6_Contour_2 in ELSET A =
Stress intensity factor K1: K1 at FIT_GRIETAARCO_PICKEDSET5-4_Contour_2 in ELSET ALL E	J-integral estimated from Ks: JKs at FIT_GRIETAARCO_PICKEDSET5-6_Contour_3 in ELSET A
Stress intensity factor K1: K1 at FIT_GRIETAARCO_PICKEDSET5-4_Contour_3 in ELSET ALL E	J-integral: J at J-INTEGRAL_GRIETAARCO_PICKEDSET5-1_Contour_1 in ELSET_ALL ELEMEN
Stress intensity factor K1: K1 at FIT_GRIETAARCO_PICKEDSET5-5_Contour_1 in ELSET ALL E 👻	J-integral: J at J-INTEGRAL_GRIETAARCO_PICKEDSET5-1_Contour_2 in ELSET ALL ELEMEN 😓
۲	۰
Save As Plot Dismiss	Save As Plot Dismiss

Figura N°4.95: Solicitud de K_I e Integral J en "History Output".





_GRIETAARCO_PICKEDSETS-2_Contour_1 ELSET ALL ELEMENTS

Figura N°4.97: Gráfico Tasa de liberación de energía vs Tiempo.

Capítulo 5 Análisis de modelos

5.1 Análisis y discusión

Como se ha observado en las imágenes, durante el primer paso de pre-compresión la mayor concentración de esfuerzo recae sobre los morteros dispuestos en forma vertical, lo cual resulta lógico y cumple con el comportamiento esperado.

En el paso de la carga aplicada en forma cuasi-estática mediante la frecuencia ingresada, se puede notar como en forma lenta, a medida que va en aumento la carga, el muro comienza a pivotar sobre un lado, deformándose en el sentido de la carga aplicada. Además, dentro de las zonas de tensión, son marcadas claramente aquellas con un valor más alto (color rojo) y se puede ver como se genera una zona de transición entre la zona de compresión y tracción, formando una especie de camino. Es precisamente en esta zona donde aparecen las grietas que arroja el programa mediante la aplicación XFEM. Este comportamiento es igual al simulado mediante el micro-modelo del muro citado.

A diferencia del modelo real ensayado en laboratorio, este presenta una gran cantidad de grietas en forma diagonal-escalonada, desde un vértice a otro siguiendo la ruta del mortero y de paso rompiendo algunos ladrillos. Lamentablemente en Abaqus, debido a su programación, no es posible presenciar aquella ramificación. Hasta el momento solo se puede predecir el camino a través del cual aparecerá y crecerá la grieta.



Figura N°5.1: Ensayo de laboratorio muro de fábrica.

Se resalta este hecho porque fue la primera línea de investigación de esta memoria, pero al llegar a los resultados finales y conocer más de la aplicación del método, se establece aquella limitación por parte del software, que hace necesaria la intervención dentro de la programación interna de Abaqus. Por este motivo se ha creado una lista con las limitaciones al momento de usar un análisis mediante XFEM:

- Las grietas no pueden ramificarse.
- Las grietas no pueden cambiar la dirección en más de 90 grados en un solo incremento.
- XFEM no calcula con modelos que tengan contactos entre superficies.
- Un único elemento no puede ser atravesado por más de una grieta.
- No es compatible con un remallado.

Sin embargo, las ventajas del método XFEM son las siguientes:

- Fácil definición del inicio de grieta, debido a que no es necesaria una localización previa, como ocurre en el caso de un análisis mediante integral de contorno.
- El mallado es independiente de la grieta.
- Se automatiza el trabajo de remallado.
- Se puede utilizar en fractura frágil y dúctil.

El principal aporte de este método es la generación de los nodos "dummies" o más conocidos como nodos fantasmas, estos a medida que se va produciendo la grieta son capaces de ir superponiéndose con los originales, de manera tal de representar la discontinuidad. Cuando el modelo está sin cargas aplicadas, cada nodo fantasma está limitado a su respectivo nodo real. Luego, al aplicar cargas que producen fractura, el modelo se divide en dos partes, cada una formada por una combinación de nodos reales y fantasmas como se muestra a continuación.



Figura N°5.2: Separación mediante nodos fantasmas.

Este sistema de remallado es muy eficaz puesto que se pueden realizar modelos complejos de propagación de grieta y el usuario no tiene que intervenir en cada incremento de análisis. También es importante destacar la correcta identificación de las variables de salida que se deben usar, ya que de no ser usadas, Abaqus no realiza cálculos y tampoco muestra grietas. Estas variables son PHILSM, que describe la cara de fractura, PSILSM, describe el frente de la fractura inicial, y finalmente STATUSXFEM, donde se especifica si el elemento está totalmente, parcialmente o no agrietado.

En lo que respecta a la aplicación del método "Contour Integral" al arco, se logra el objetivo planteado de lograr producir una fractura, pero resaltando el hecho que es el usuario quien debe indicar el lugar y el tamaño de dicha fisura a analizar. Para la simulación esta se ubicó entre las dovelas 4 y 5 debido a que en esa zona fueron aplicadas las cargas. Modificando el inicio y dirección de extensión, no existe problema en cambiar el lugar. Para mejorar la precisión del cálculo mediante la integral de contorno alrededor de la grieta, sí es necesario implementar un mallado especial para representar las singularidades que se producen en el frente de la grieta como fue descrito en el apartado 3.3.4.



Figura N°5.3: Elementos recomendados para el frente de grieta.

Para la simulación del arco esto no fue incorporado debido a que su uso está enfocado a la plasticidad. El arco formado por dovelas de piedra presenta una fractura del tipo frágil al igual que los ladrillos y morteros del muro, por lo tanto, se puede tratar sin esta particular forma de mallar.

En caso de un material que sí presente zona de plasticidad, Abaqus recomienda utilizar al menos 20 elementos radiales, mallados en forma triangular y con una malla muy fina en la punta para aumentar la sensibilidad de esta, en virtud de obtener resultados buenos y más precisos.

Además de la malla, otra función de la visualización es identificar presencia de una zona de plasticidad en modelos, cuando al aplicar cargas, muestra que el estado de las tensiones representa gráficamente la zona plástica en el frente de la fisura como fue explicado en el apartado 3.3.9. Esto se puede apreciar en la siguiente imagen que muestra una simulación para una placa finita de aluminio, sometida a cargas de tracción y con una fisura inicial.



Figura N°5.4: Representación gráfica de la zona plástica.

Capítulo 6 Conclusiones

6.1 Conclusiones

- Como forma de acercamiento, el modelo cumple cabalmente con lo esperado, debido a que muestra claramente la zona por donde debe producirse la fractura y además permite una buena aproximación que se puede visualizar dentro del programa.
- Debido a limitaciones del programa, no es posible realizar con exactitud todas las grietas que aparecen en el ensayo del muro citado. Esto es debido a que el programa genera y propaga solo una grieta en el modelo, la cual no tiene la posibilidad de ramificarse como ocurre en algunos casos.
- Una razón importante que el programa detenga su post-procesamiento y no permite que las grietas se ramifiquen es sobre su forma de calcular, para evitar este problema se podría entrar a la base de cálculos de Abaqus mediante programación y de esta manera evitar que el modelo aborte.
- Para modelos que aborten en forma repentina, es posible solicitar a Abaqus que vuelva a realizar iteraciones, porque su programación interna le permite realizar 5 antes de abortar. En este estudio se descubre que al modificar el parámetro I_A (dentro del control de soluciones general), es posible solicitar una mayor cantidad de iteraciones de cálculo de manera tal que el programa pueda llegar a una solución en el caso que sea factible.
- La nueva herramienta XFEM brinda un gran aporte en cuanto a la mecánica de fractura, debido a que permite conocer el lugar donde se puede producir y propagar una grieta, sin la necesidad de volver a mallar y tampoco crear una malla especial.
- Aplicando Contour Integral se puede destacar su facilidad de uso, pero a la vez se debe tener previo conocimiento de la grieta, sus parámetros, su ubicación y condiciones por las cuales se ve afectada.
- Es posible determinar los factores de intensidad de tensiones mediante el software, que ayuda en gran medida a conocer si la grieta seguirá creciendo o si no se ve afectada, principalmente para materiales que fracturan al llegar a su límite elástico y

no generan o es despreciable su zona plástica. De lo contrario sería necesario de un método indirecto como el de la integral-J.

- Se establecen las funciones que presenta Abaqus para desarrollar la mecánica de la fractura, de esta manera generando una forma útil y práctica de trabajo aplicando los métodos ya conocidos.
- Es muy importante conocer de la mecánica de fractura en todo ámbito de cosas referentes al diseño, con esto se puede prevenir de gran forma pérdidas que pueden tener un costo muy alto.
- A futuro es posible seguir desarrollando modelos cada vez más precisos, con la mayor cantidad de datos posibles, de manera tal de comprobar la teoría con ensayos generados en el laboratorio de la escuela de Ingeniería Mecánica.

Capítulo 7 Bibliografía

7.1 Bibliografía

[1] "Mecánica de Fractura", José Luis Arana y Javier Jesús González.

[2] "Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales", William D. Callister, Jr.

[3] "Mecánica de Fractura" (Monografía tecnológica Nº1), Luis A. de Vedia.

[4] "Elementary engineering fracture mechanics", David Broek.

[5] "Análisis no lineal de muros de gran espesor mediante aplicación de superficie de intarcción en ABAQUS", Ariel A. Sanchez, Gerardo A. y otros.

[6] "Modelos simples para el análisis de muros de obra de fábrica cargados en su plano", Alvaro Viviescas Jaimes.

[7] "Cálculo del comportamiento de la mapostería mediante elementos finitos", J. López.

[8] "Stationary 3D crack analysis with Abaqus XFEM for integrity of subsea equipment", Michael Levén y Daniel Rickert.

[9] "Development of an automated methodology for structural calculation of 3D dry masonry arches using Finite elements", Rufino Goñi, Ignacio de Arteaga y Joaquín Torres.