

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIA
Departamento de Física



**Modelo analógico de temblores volcánicos: acoplamiento de acústica
y ondas sísmicas.**

Bárbara Valentina Sánchez Álvarez

Profesor Guía:
Francisco Melo Hurtado

**Tesis para optar al Título Profesional de
Ingeniero Físico.**

Santiago – Chile

2018

© **Bárbara Valentina Sánchez Álvarez, 2018.**

Algunos derechos reservados. Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas Chile 3.0. Sus condiciones de uso pueden ser revisadas en: <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>

**“MODELO ANALÓGICO DE TEMBLORES VOLCÁNICOS:
ACOPLAMIENTO DE ACÚSTICA Y ONDAS SÍSMICAS”**

BÁRBARA VALENTINA SÁNCHEZ ÁLVAREZ

Este trabajo de Graduación fue elaborado bajo la supervisión del profesor guía Dr. Francisco Melo, del Departamento de Física, ha sido aprobado por los miembros de la Comisión Calificadora, de, candidato, Dr. Belfor Galaz, Dr. Francisco Vivanco y el Dr. Leonardo Gordillo.

.....

Dr. Belfor Galaz

Miembro Comisión Clasificadora

.....

Dr. Leonardo Gordillo

Miembro Comisión Clasificadora

.....

Dr. Francisco Vivanco

Miembro Comisión Clasificadora

.....

Dr. Roberto Bernal

Director del Departamento

de Física

.....

Dr. Francisco Melo

Profesor Guía

Resumen

Esta tesis es parte de un proyecto en el que se requiere replicar un volcán estromboliano a escala para el estudio de su actividad. Este tipo de erupción está definido por explosiones de burbujas (1-10 m) de gas en el conducto volcánico debido a la sobrepresión. Estimar la sobrepresión dentro de la cavidad es una de las tareas más importantes de los vulcanólogos, ya que no existen técnicas para medir en el interior, por lo que usualmente la información es obtenida mediante mediciones indirectas de la actividad sísmica.

La identificación de fuentes sísmicas sobre la estructura de una onda de presión dentro del conducto central del volcán podría dar información y una posible interpretación de las observaciones sísmicas involucradas en el proceso. Debido a la continuidad del estrés normal en las paredes, las ondas estacionarias dentro de la cavidad pueden producir ondas sísmicas en el lecho rocoso circundante.

Para estudiar este proceso y si existe un vínculo entre la onda “sísmica” y la onda “acústica”, en este trabajo se modela numéricamente la sobrepresión y la caída de esta en el conducto volcánico para diferentes parámetros impuestos.

El modelo numérico se desarrolla con la ayuda del software COMSOL Multiphysics, que por la resolución por medio de elementos finitos permite resolver varias aplicaciones físicas y sobre todo fenómenos acoplados. Las simulaciones utilizan parámetros reales y a escala. El objetivo final de este trabajo se desarrolla en el estudio del material a utilizar en el modelo a escala en el laboratorio, para la futura medición y vinculación con datos reales en volcanes.

Palabras claves: Volcán estromboliano, fuentes sísmicas, sobrepresión, deformación.

Dedicatoria

*"Nadie tiene éxito sin esfuerzo.
Aquellos que tienen éxito se lo deben
a la perseverancia"*
-Romana Maharshi

*Dedicado a
mi familia
y mi abuela ♥*

Agradecimientos

Primero que todo quiero agradecer a mis papás que fueron los propulsores de quien soy hoy ahora, por darme una educación y no tener que endeudarme como la mayoría de mis compañeros de Universidad. Por enseñarme la responsabilidad de nunca faltar a clases, ni siquiera cuando me fracture el pie y tenía que subir al segundo piso de la EAO con yeso a clases de introducción a la física. Les estaré eternamente agradecida por todo lo que han hecho por mi en todos estos años y en especial de cumplir mi sueño de irme a vivir a Irlanda.

A la Pox, porque me encamino a esta carrera, cuando había dato todo por perdido en estudiar geofísica en la Chile, pero me enseñó que la física está en todas partes; además de seguir su trabajo con los volcanes y ayudarme hacer la practica en el Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur en Temuco, y la admiro por tener una cabeza tan grande de lo inteligente que es y de todo el camino que ha hecho como investigadora. A mi hermana Natalia enseñarme que a pesar de no ser seca en el colegio uno puede cumplir sus metas haciendo lo que le gusta, y por siempre acompañarme y apoyarme, darme fuerzas cuando ya estaba cansada de estudiar y de no dormir.

Cuando dicen que en la universidad se tienen pocos amigos pero de verdad en la universidad, yo los conseguí, a mis compañeros apañadores en todo este camino largo de la carrera, con noches de estudio, peleas, risas, juntas para realizar trabajos con mis compañeros José Hermosilla y Bastián Rodríguez por aguantarme todos estos años, aunque al entrar a la universidad no fuimos amigos hasta tercer año, creo que de verdad son los únicos que puedo confiar y que me gustaría trabajar a futuro con ellos en cualquier proyecto que nos propongamos. Ojalá que nunca perdamos el contacto, aunque sea para hablarlos para saber en que estamos, los quiero amigos muchos y gracias por todo.

Al profesor San Martín por apoyarme cuando me iba a nacionales y me aguantaba que le entregara los trabajos después, ya que la mayoría de los profes no me respaldaban cuando me iba a jugar basquetbol representando a la universidad. Al profe Melo por embarcarse conmigo en este proyecto de tesis y por enseñarme a trabajar a presión, al profesor Vivanco que siempre estuvo dispuesto a ayudarme a realizar la simulación en COMSOL, a los del Lab No lineal por ser todos carismáticos y buenos para comer galletas en el lab de ultrasonidos.

Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN	1
• <i>Objetivo General</i>	<i>3</i>
• <i>Objetivos Específicos</i>	<i>3</i>
• <i>Hipótesis.....</i>	<i>3</i>
1 CAPÍTULO	4
1.1 VOLCÁN STROMBOLI	4
1.1.1 <i>Tipo Estromboliano.....</i>	<i>4</i>
1.2 TEMBLOR VOLCÁNICO.....	5
1.2.1 <i>Tipo de Tremores</i>	<i>6</i>
1.3 EVENTOS VOLCANO- TECTÓNICOS.....	7
1.4 INFLACIÓN- DEFLACIÓN CONDUCTO VOLCÁNICO	7
2 CAPÍTULO	9
2.1 MOTIVACIÓN.....	9
2.2 COMSOL MULTIPHYSICS.....	11
2.2.1 <i>Procedimiento general de análisis de los elementos finitos</i>	<i>12</i>
2.3 MODELO	13
2.3.1 <i>Introducción</i>	<i>13</i>
2.3.2 <i>Parámetros</i>	<i>14</i>
2.3.3 <i>Geometría.....</i>	<i>19</i>
2.3.4 <i>Física del Modelo - Mecánica estructural</i>	<i>20</i>
2.3.5 <i>Malla</i>	<i>23</i>
2.3.6 <i>Estudio.....</i>	<i>24</i>
2.3.7 <i>Sensores.....</i>	<i>25</i>
2.3.8 <i>Desplazamiento</i>	<i>26</i>
2.3.9 <i>Resultados y postproceso</i>	<i>26</i>
2.3.10 <i>Exportar</i>	<i>27</i>
3 CAPÍTULO	28
3.1 DESARROLLO EXPERIMENTAL	28
3.2 RESULTADOS	28
3.2.1 <i>Volcán Stromboli (1:1).....</i>	<i>28</i>
3.2.2 <i>Volcán Stromboli: simulación del medio donde se propaga la onda con un material blando a escala (1:200).....</i>	<i>38</i>
CONCLUSIÓN	46
TRABAJO A FUTURO.....	47
<i>Geometría.....</i>	<i>47</i>
• <i>Focalización en el manto del volcán</i>	<i>47</i>
• <i>Topografía del volcán Stromboli.....</i>	<i>47</i>
4 ANEXOS O APÉNDICES.....	49
4.1 RESONANCIA.....	49
4.2 CAVIDAD RESONANTE	49
4.3 ONDAS DE CHOQUE.....	52
4.3.1 <i>Resonancia de Helmholtz</i>	<i>52</i>

4.4	OSCILACIONES EN LA SUPERFICIE.....	53
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Parámetros colocados en la simulación (1:1) del modelo numérico del volcán Stromboli.	18
Tabla 2.2 Ajuste de la deflación (liberación de la presión) del modelo para todos los sistemas con una configuración de presión inmediata.	18
Tabla 2.3 Ajuste de inflación y deflación de la configuración de sobrepresión lenta en el conducto.	18
Tabla 2.4. Simulación realizada en el software COMSOL.	18
Tabla 2.5 Datos reológicos utilizados para las simulaciones en COMSOL Multiphysics.	21
Tabla 2.6 Características de la simulación con un material más elástico (zhermack, s.f.).....	21
Tabla 2.7 Tiempo de duración del cálculo de la simulación en COMSOL.	24
Tabla 4.1 Frecuencias fundamentales calculadas por el largo del conducto.....	51
Tabla 4.2 Frecuencias fundamentales calculadas por el largo del conducto.....	52

Índice de Ilustraciones

Figura 1.1 Mapa de relieve sombreado de Stromboli y la posición del respiradero (Marchetti, 2013)	4
Figura 1.2 Imagen de la derecha es la Explosión de burbuja gigante (Slug) en el volcán Etna, Italia 2001 e izquierda explosión del volcán Stromboli 2003 (USGS).	5
Figura 1.3 (a) Tubo abierto en un extremo y cerrado por otro (modelo utilizado para realizar el proyecto) b) Resonancia tubo abierto (Paper en revisión V. Vidal).....	5
Figura 1.4 Monitoreo del volcán Stromboli de la estación STR, de la señal sísmica-acústica (Laboratorio Geofísica Sperimentale, s.f.).	6
Figura 1.5 Imagen de la sección transversal de un volcán que ejerce presión sobre las paredes al momento de generarse una burbuja de gas, luego de explotar genera una deflación en el sistema (Iguchi, 2008).....	8
Figura 2.1 Conceptualización del modelo, donde las flechas grises denotan la propagación acústica en la atmosfera y las flechas negras indican la propagación sísmica en la tierra (J. Johnson, 2008).	9
Figura 2.2 Señal “sísmica”, acústica y espectro de frecuencia del modelo realizado en el laboratorio (Sánchez, 2014).....	10
Figura 2.3 Reportan el periodo de la señal 1vo como función de la profundidad aparente de la fuente sísmica, así como la velocidad acústica en el conducto resonante [datos no publicados, agradecimientos a V. Vidal]	11
Figura 2.4 Etapas de la dinámica computacional en COMSOL.	13
Figura 2.5 Imagen de la interfaz de trabajo de COMSOL. Elaboración propia.	14
Figura 2.6 Sobrepresión y decaimiento de está, por la altura del conducto del modelo numérico del Volcán Stromboli.	15
Figura 2.7 Gráfica de la función por sección $p_b(t)$ colocada en las paredes del conducto para la liberación de presión, con ejemplo un $tespe = 0.6 s$ y $\tau_{rup} = 0.6 s$ para el caso (1:1).	16
Figura 2.8 Función por sección ($p_b(t)$) para una inflación lenta y luego una deflación exponencial, con un tiempo de espera de $tespe = 0.6 s$ y de caída $\tau_{rup} = 0.2 s$ como ejemplo.	17
Figura 2.9 Modelo realizado para la medición de ondas que pueden propagarse en la superficie en COMSOL Multiphysics (1:200) (Sánchez, 2014).....	19
Figura 2.10 Geometría del modelo numérico del volcán Stromboli. a) Geometría (1:1) y b) geometría escalada (1:200) para la roca basáltica y el material blando (Elite Double 8).	20
Figura 2.11 Contorno libre (4) del modelo numérico de la simulación (1:200), ubicada en la superficie.	22
Figura 2.12 Selección de contornos, para aplicar la presión en el sólido en el conducto volcánico.	22

Figura 2.13 Selección de contornos para la restricción fija en la geometría del modelo numérico (1:200).	23
Figura 2.14 Tipos de mallas seleccionadas para el estudio. a) Malla Gruesa, b) Malla Fina y c) Malla Extra Fina en el plano XY (superficie).	23
Figura 2.15 Malla impuesta en la simulación del modelo en COMSOL Multiphysics para el caso (1:1).	24
Figura 2.16 Ventana de ajustes del Resolvedor Temporal en el estudio de la simulación en COMSOL.	25
Figura 2.17 Imagen aumentada de la simulación del volcán mirada en el eje X e Y, para referenciar los puntos donde se colocarán los “sensores”.	26
Figura 2.18 a) Corte en el plano XY (superficie) del solido del volcán y b) Superficie del modelo del volcán.	26
Figura 2.19 Opciones para graficas en COMSOL Multiphysics.	27
Figura 2.20 Ajustes para guardar un video en la ventana de COMSOL.	27
Figura 3.1 Campo de desplazamiento en R, para un $\tau_{rup} = 0.1$ s en el modelo numérico del volcán Stromboli (1:1) y $DP = 10$ MPa.	29
Figura 3.2 Campo de desplazamiento, componente Z (m), en el modelo numérico (1:1) para un $\tau_{rup} = 0.1$ s y un $DP = 10$ MPa.	30
Figura 3.3 Campo de desplazamiento en la componente R, para un $\tau_{rup} = 0.2$ s en el modelo numérico del volcán Stromboli (1:1).	31
Figura 3.4 Campo de desplazamiento en la componente Z (m) en la superficie del modelo numérico del volcán Stromboli (1:1), para un $\tau_{rup} = 0.2$ s.	31
Figura 3.5 Campo de desplazamiento en R, en el eje XY en la superficie con un tiempo de caída de $\tau_{rup} = 0.4$ s.	32
Figura 3.6 Desplazamiento en la componente vertical (Z), para un $\tau_{rup} = 0.4$ s en la superficie del modelo.	33
Figura 3.7 Campo de desplazamiento en R, para un $\tau_{rup} = 0.6$ s en la superficie del modelo numérico del volcán Stromboli (1:1).	33
Figura 3.8 Campo de desplazamiento en Z para $\tau_{rup} = 0.6$ s del modelo numérico del volcán Stromboli (1:1).	34
Figura 3.9 Desplazamiento de la componente R, para el modelo número (1:1) para un tiempo de caída de $\tau_{rup} = 1$ s y un $DP = 10$ MPa.	35
Figura 3.10 Desplazamiento de la componente vertical, para el modelo número (1:1) para un tiempo de caída de $\tau_{rup} = 1$ s y un $DP = 10$ MPa.	36
Figura 3.11 Grafico de desplazamiento horizontal (R) en el punto MP10, alrededor del conducto (ver Figura 2.12) para los distintos tiempos de caída ($\tau_{rup} = 0.1, 0.2, 0.4, 0.6$ y 1 s) al aplicar la inflación-deflación en la simulación.	37

Figura 3.12 Desplazamiento horizontal (R) en la superficie de la simulación (1:200) del material blando para un tiempo de caída de $\tau_{rup} = 0.8$ ms y un DP = 10 kPa.	39
Figura 3.13 Campo de desplazamiento en Z, para la simulación (1:200) con un material blando para un tiempo de caída $\tau_{rup} = 0.8$ ms y un DP = 10 kPa.	39
Figura 3.14 Campo de desplazamiento en la componente horizontal (R), para la simulación (1:200) del material blando para un $\tau_{rup} = 1$ ms y un DP = 10 kPa.	40
Figura 3.15 Campo de desplazamiento en la componente vertical de la superficie, para un tiempo de caída de $\tau_{rup} = 1$ ms, del modelo (1:200) del material blando.	41
Figura 3.16 Campo de desplazamiento en la componente horizontal (R), en la simulación (1:200) del material blando para un $\tau_{rup} = 2$ ms y un DP = 10 kPa.	41
Figura 3.17 Campo de desplazamiento en la componente Z, para un tiempo de caída $\tau_{rup} = 2$ ms y un DP = 10 kPa para la simulación (1:200) de un material blando.	42
Figura 3.18 Campo de desplazamiento en R, la simulación (1:200) del material blando, con un $\tau_{rup} = 5$ ms y un DP = 10 kPa	42
Figura 3.19 Campo de desplazamiento en la componente vertical para el modelo (1:200) del material blando, con un tiempo de caída $\tau_{rup} = 5$ ms y un DP = 10 kPa	43
Figura 3.20 Grafico de desplazamiento en la componente vertical de la simulación (1:200) con un material blando Elite Double 8 dado por el software COMSOL Multipysics.	44
Figura 3.21 Desarrollo del desplazamiento en el conducto cuando se produce el overshoot por la liberación de la sobrepresión.	45
Figura 3.22 Modelo numérico del volcán Stromboli escalado para el análisis del manto.	47
Figura 3.23 Modelo numérico de la topografía del volcán Stromboli en COMSOL.	48
Figura 4.1 Volcán Reventador, Ecuador. Se muestra la señal acústica completa para 30 minutos, la energía acumulada y su densidad espectral. Se puede observar que existe una resonancia, debido a los peaks regulares en el espectro de energía.	49
Figura 4.2 Medición tiempo de caída de presión τ_{prop} . Este tiempo se mide en la primera bajada de presión.	50
Figura 4.3 a) Señal acústica registrada en Stromboli (Chouet B. , 1988) b) modelo de Vergnolle et al. 1994 para explicar la generación de esta señal.	53

Introducción

Los volcanes emiten infrasonido (sonido $<20\text{Hz}$) siempre que la presión del gas se libere a la atmósfera durante una actividad explosiva o una desgasificación. Este parámetro proporciona información importante, ya que es una expresión directa del material que sale a la atmósfera, que combinado con otros parámetros geofísicos puede proporcionar una imagen más completa del proceso dinámico que produce las erupciones volcánicas (Ripepe P. P., 1996)

Las erupciones explosivas son fenómenos sismo-acústicos, que generan ondas acústicas de gran amplitud (infrasonido) y sísmicas, con la señal infrasónica comúnmente registrada a grandes distancias ((Ripepe M. , 2001),(Ripepe R. G., 2010)). Se cree que las perturbaciones volcánicas que preceden a las erupciones (ondas sísmicas) se producen por una variedad de procesos, incluidas las interacciones entre el magma subsuperficial y el agua, la desgasificación de magma, el comportamiento frágil del propio magma y los procesos relacionados a una falla en el estado sólido. Chouet & Matoza (Chouet B. A., 2013) relacionan esta señal sísmica con el movimiento de magma y los cambios de presión. Estas señales también son producidas por la misma erupción explosiva, a medida que los fragmentos de magma (se rompen en pequeños pedazos) y las columnas de ceniza se expulsan a través de respiraderos y cráteres volcánicos. La expresión sísmica típica de una erupción explosiva sostenida es una señal de banda ancha (~ 0.1 a 20 Hz) llamada tremor de erupción. Las señales sísmicas que preceden y acompañan a las erupciones generalmente tienen una distancia de propagación limitada, por lo general unas pocas decenas de kilómetros o hasta unos cientos de kilómetros para erupciones más grandes. En contraste, explosivo de tamaño similar las erupciones producen señales infrasónicas potentes de banda ancha (~ 0.01 a 20 Hz) que se pueden canalizar de manera eficiente en largas distancias (miles de kilómetros) en las guías de onda atmosféricas ((Ripepe M. , 2013) (Matoza, 2017)).

Stromboli es uno de los pocos volcanes en el mundo que se encuentra permanentemente en actividad eruptiva. La actividad típica de este volcán es conocida como “Estromboliana” (de ahí su nombre), que es generalmente leve y es caracterizada por explosiones cada 7-10 minutos. La persistente actividad explosiva leve de Stromboli se explica en términos de la dinámica de las grandes bolas de gas que ascienden por el conducto para finalmente explotar en la superficie libre de lava. Este modelo, tiene ahora una fuerte evidencia del ámbito geofísico como geoquímico ((Ripepe P. P., 1996), (Ripepe M. a., 2003)). En los últimos años, se combinaron análisis de datos geofísicos, como Infrasonicos y térmicos, integrando además con datos sismológicos (Ripepe R. G., 2010). Gracias a esta información se ha mejorado la idea de la burbuja en la dinámica del conducto. Existe una expansión de gas que precede a la explosión de 2 a 20 s y que se produce a una profundidad de $\sim 260\text{ m}$ dentro del conducto (Ripepe M. a., 2003).

La explosión de esta burbuja gigante de gas genera una onda acústica en el conducto volcánico puede generar una resonancia en el sistema (Ripepe M. , 2001), debido a la presión. También esta onda puede viajar varios kilómetros debido a su poca dispersión en la atmosfera.

Las ondas acústicas pueden acoplarse con el suelo y pueden convertirse en ondas terrestres que sacuden un sismómetro como lo hacen las ondas sísmicas.

Por otro lado, la actividad volcánica puede producir una gran variedad de señales sísmicas que, según el intervalo de tiempo del fenómeno, generalmente se dividen en dos clases diferentes. El temblor volcánico, llamado “tremor” (armónico, espasmódico, en bandas, etc.) es una señal persistente, que dura desde varias horas a varios días, generalmente asociadas con movimientos de magma en el conducto y la cámara magmática. Por otro lado, algunos eventos transitorios generalmente están relacionados con explosiones aisladas de una burbuja de gas en la parte superior de la columna de magma (Chouet B. , 1985).

Una de las preguntas de este trabajo de tesis es: ¿la onda acústica (infrasónica), que se produce por la explosión de una burbuja de gas gigante dentro del conducto, puede acoplarse con el medio que lo circunda y generar ondas sísmicas?.

El presente escrito se estructura en tres capítulos. El primer capítulo está dedicado al estudio del vínculo entre una señal acústica que genera una señal sísmica en un volcán de tipo Estromboliano. En el segundo se describe como se realizó la simulación en el software COMSOL Multiphysics y la justificación de los parámetros utilizados. Finalmente, en el tercer capítulo se muestran los resultados obtenidos de la simulación del volcán Stromboli, en una primera instancia enfocados en el conducto volcánico con las dimensiones reales (Delle Donne, 2015) y luego se escala con un material blando, para ver si se puede replicar en el laboratorio experimentalmente.

Objetivos

- **Objetivo General**

Trabajar con un modelo numérico que simula las características y parámetros como la cantidad de sobrepresión, geometría y densidad del medio para entender el comportamiento de la onda “sísmica” producto de la caída de sobrepresión en el conducto volcánico.

- **Objetivos Específicos**

- Realizar un modelo numérico del volcán Stromboli.
- Estudiar el fenómeno de inflación y deflación del conducto volcánico con el modelo numérico para diferentes escalas (1:1 y 1:200) y parámetros (densidad variable y sobrepresión).
- Realizar el análisis de la onda sísmica de la superficie del volcán del modelo numérico.

- **Hipótesis**

La explosión de una gran burbuja de gas en la parte superior de un lago de lava o un volcán de ventilación genera una onda acústica resonante dentro del cuerpo de la burbuja, generando una onda “sísmica”.

1 Capítulo

1.1 Volcán Stromboli

El volcán Stromboli es uno de los más activos de Italia. Se encuentra localizado en el mar Tirreno dentro de las islas Eolias, un archipiélago volcánico al norte de Sicilia en la Latitud 38.798 y longitud 15.213 con una elevación de 924 metros sobre el nivel del mar, se caracteriza por tener un conducto abierto con una desgasificación persistente y una gran dinámica explosiva.

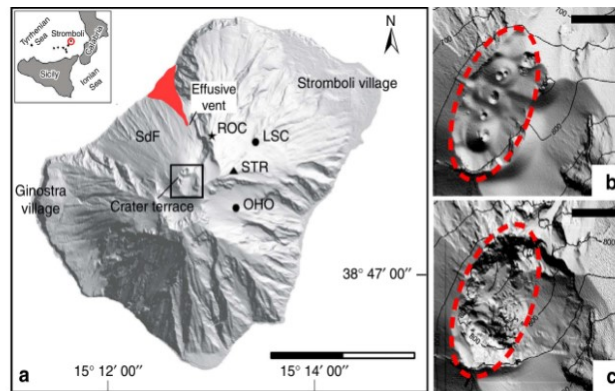


Figura 1.1 Mapa de relieve sombreado de Stromboli y la posición del respiradero (Marchetti, 2013)

1.1.1 Tipo Estromboliano

Stromboli se caracteriza por su persistente y frecuente actividad eruptiva, por tanto, su escenario es ideal para observaciones de campo cercano. El Volcán Stromboli es uno de los volcanes mejor estudiados del mundo (Ripepe M. , 1993). Ya que, se caracteriza por explosiones relativamente cortas y leves, ricas en fragmentos de lava balística fundida, y se ha establecido así el nombre de “erupción estromboliana” para volcanes de estilo eruptivo similar en todo el mundo, en Chile se caracteriza el volcán Villarrica por este tipo de erupción.



Figura 1.2 Imagen de la derecha es la Explosión de burbuja gigante (Slug) en el volcán Etna, Italia 2001 e izquierda explosión del volcán Stromboli 2003 (USGS).

Este estilo eruptivo se origina a partir de la explosión de una gran burbuja presurizada cerca de la superficie de la columna de magma en el conducto (Blackburn, 1976). Esta actividad genera ondas acústicas en la banda infrasónica de baja frecuencia inaudible (<20 Hz). Este proceso a veces se detecta como un temblor volcánico en la etapa final (<10 s antes de la explosión), profundizaremos más en el punto siguiente.

1.2 Temblor volcánico

Producto de la resonancia, para la energía que queda atrapada en el conducto volcánico después de la explosión de la burbuja (J. Neuberg, 2006), (Blackburn, 1976), (Buckingham, 1996)). Una fracción de energía es liberada y se propaga a través del medio sólido que lo rodea y puede ser medida como una señal sísmica (J.W. Neuberg, 2006).

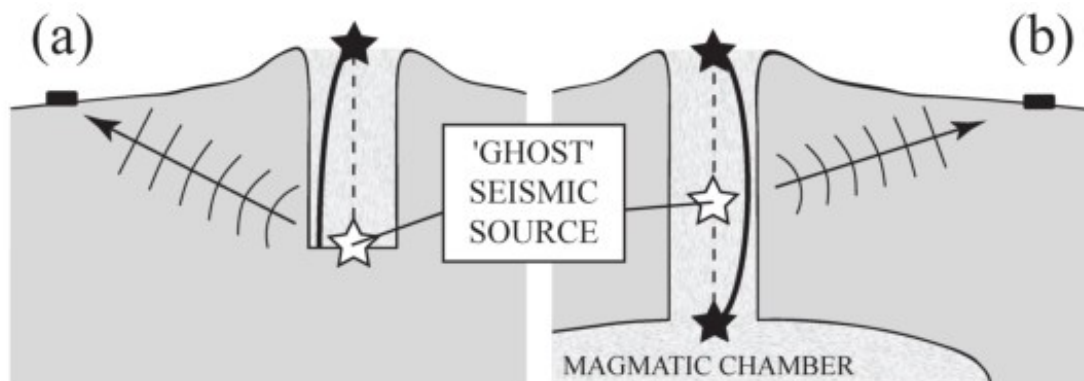


Figura 1.3 (a) Tubo abierto en un extremo y cerrado por otro (modelo utilizado para realizar el proyecto) b) Resonancia tubo abierto (Paper en revisión V. Vidal).

El temblor volcánico ha recibido una gran atención en los últimos 60 años, principalmente porque se considera el mejor precursor de las erupciones volcánicas. A pesar de que aun el mecanismo físico del temblor volcánico sigue siendo incierto para los geofísicos (Ripepe M. , 2015).

El temblor volcánico llamado o “tremor” es un término general que se usa para señales sísmicas sostenidas en el tiempo con un rango diverso de actividad volcánica (ejemplo de esto (McNutt S. R., 1992) y (Chouet B. A., 2013)). A veces los tremores perduran hasta varios días y son asociados al movimiento del magma en el conducto volcánico y la cámara magmática (Prejean, 2011). Por otro lado, algunos eventos más esporádicos, pero de largo periodo, son vinculados a explosiones aisladas de slug (burbuja gigante alargada de gas) en la parte superior de la columna magmática (Ripepe P. P., 1996).

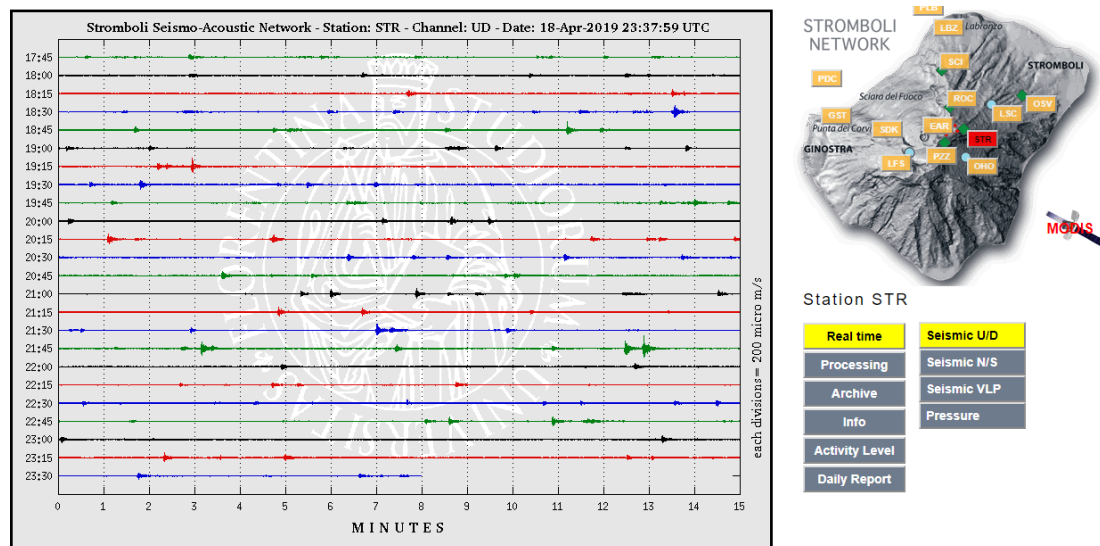


Figura 1.4 Monitoreo del volcán Stromboli de la estación STR, de la señal sísmica-acústica (Laboratorio Geofisica Sperimentale, s.f.).

1.2.1 Tipo de Tremores

T_H : Es un tremor volcánico con contenido en altas frecuencias (> 6 Hz). A veces aparecen después de explosiones y pueden durar horas.

T_I : Tremor volcánico a frecuencias medias (1-6 Hz). Pueden ser vibraciones de diversa duración, entre minutos a varias horas. En fases preruptivas la frecuencia varia hasta el orden de los 3 Hz y las fases tranquilas el tremor está centrado a bajas frecuencias (1Hz).

T_L : Es un tremor de bajas frecuencias (0.5 Hz o menos) que requiere sensores de banda ancha para poder ser registrados.

1.3 Eventos volcano- tectónicos

Los eventos volcano-tectónicos (VT) se caracterizan por presentar la llegada de las fases P y S. Estas ondas se propagan por un medio elástico y son diferentes dependiendo de la forma en que viajen.

- Ondas P: ondas de volumen que son compresión y viajan a una velocidad v_p .

$$v_p = \sqrt{\frac{\kappa+4/3\mu}{\rho}} \quad (1.1)$$

- Ondas S: son ondas de cizalle y viajan a una velocidad v_s .

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (1.2)$$

donde κ es el módulo de compresibilidad, μ módulo de corte y ρ la densidad. También, existen ondas de Rayleigh y Love, son ondas que se propagan en la superficie del medio elástico donde el primero son elípticas, cuya amplitud disminuye exponencialmente con la profundidad y su velocidad en un noventa por ciento de la velocidad v_s . En cambio, las ondas de Love producen un movimiento horizontal de corte en la superficie y su velocidad es del orden de las ondas de Rayleigh, pero un poco más grande.

La velocidad de la onda vertical es la onda transversal que la denominaremos v_s y la velocidad tangencial es la velocidad de la onda longitudinal v_p .

1.4 Inflación- deflación conducto volcánico

Las explosiones grandes ($VEI^1 > 3$) y de larga duración ($>10^3 s$) generan deformaciones de alrededor de los micrómetros y milímetros causadas por cambios de tensión relacionados con la acumulación de presión dentro de un conducto volcánico. Se han reportados ciclos de inflación/deflaciones similares asociados con actividad explosiva en los volcanes Sakurajima, Suwanosejima y Semeru (Iguchi, 2008) y, en una escala más pequeña, en el géiser Onikobe. En estos casos la deformación sugiere que la explosión está precedida por un aumento gradual de la presión en el conducto, y seguida por la fase de deflación, que se explica como la contracción interna de las paredes del conducto en respuesta a la expulsión de gas y magma, o líquido (Iguchi, 2008). La dinámica de la burbuja de gas ascendente induce una aceleración de la tasa de deformación mientras se acerca a la superficie (Nishimura, 2009).

¹ **VEI**: índice de explosividad volcánica, es una escala de 8 grados, con que los vulcanólogos miden la magnitud de una erupción volcánica.

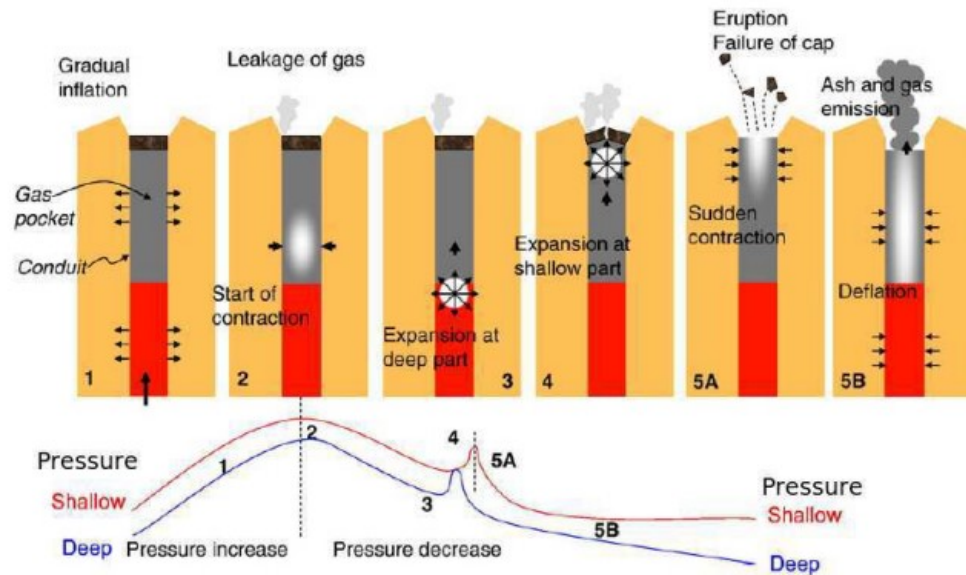


Figura 1.5 Imagen de la sección transversal de un volcán que ejerce presión sobre las paredes al momento de generarse una burbuja de gas, luego de explotar genera una deflación en el sistema (Iguchi, 2008).

En la Figura 1.5 es un modelo que explica las erupciones vulcanianas que se describe en cinco etapas:

1. La presión y la acumulación de gas volcánico aumentan gradualmente dentro del conducto por debajo del cráter. Este fenómeno observado con el aumento de la deformación del conducto – Inflación.
2. En el punto 2 la fuerza interna dentro del conducto sale, produciendo liberación de gas debido a la explosión de la burbuja- Deflación.
3. Al disminuir abruptamente la presión en el conducto interno, se registra como un pico en la deformación que corresponde a la expansión del volumen interno, por lo que se mide por la primera de energía que corresponde a la primera onda (P) del evento. Aunque, puede estar relacionado a la fuente más profunda.
4. Este proceso de expansión se traslada a la parte superior, y puede estar relacionado con la onda (S).
5. Al explotar en el conducto, causando una contracción en la parte poco profunda, registra por sismómetros. El conducto se libera se las explosiones de emisiones de gas y fumarolas.

2 Capítulo

2.1 Motivación

En el capítulo anterior, se vio que la energía sísmica puede ser generada por el acoplamiento de las ondas acústicas con el medio elástico que lo circunda. La *Figura 2.2* muestra un esquema como la explosión de una burbuja y su acústica pueden producir también una señal “sísmica en el sistema.

Existen modelos que tratan de explicar las señales sísmicas asociadas a los tremores. Estas se deben a la geometría del conducto y los efectos resonantes que son inducidos por fluctuaciones de presión del conducto lleno de fluido (Chouet B. , 1985). Las señales en el medio son muy dispersivas (dependen de la longitud de onda), el diámetro del conducto y los parámetros elásticos del medio (J. Neuberg, 2006).

Debido a la continuidad del estrés normal en las paredes del conducto (McNutt G. M., 1997) las ondas estacionarias dentro de la cavidad pueden producir ondas sísmicas en el lecho rocoso circundante.

Se construirá un modelo donde habrá una sobrepresión controlada en las paredes del conducto, para posteriormente realizar un análisis de las ondas implicadas en el modelo (*Figura 2.9*). Luego se observará si existen ondas P y S en el sólido modelado.

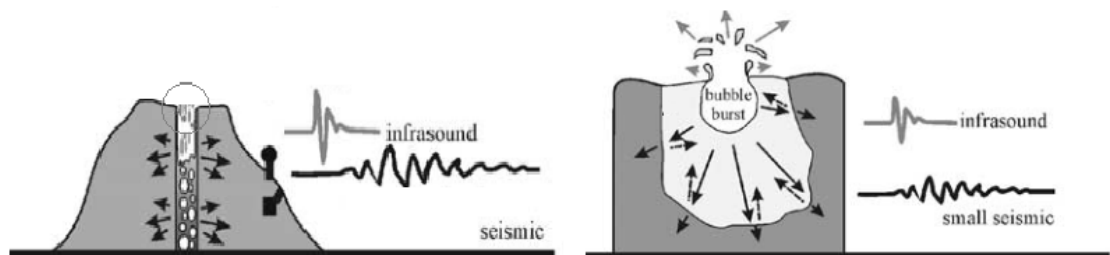


Figura 2.1 Conceptualización del modelo, donde las flechas grises denotan la propagación acústica en la atmosfera y las flechas negras indican la propagación sísmica en la tierra (J. Johnson, 2008).

Trabajos anteriores trataron de modelizar experimentalmente la señal acústica producto de la resonancia en el tubo (Sánchez, 2014). Ellos construyeron un modelo análogo a la geometría del volcán utilizando un volumen de plexiglas y un conducto cilíndrico vacío en el centro, cerrado por una membrana elástica de manera de imponer sobrepresión en el sistema. Previos resultados trataron de vincular los datos acústicos, de la resonancia del conducto, con datos “sísmicos” medidos en un volumen “infinito” (Figura 2.4). Se registraron señales de presión dentro del tubo y la señal del acelerómetro que mide en la superficie del sistema rectangular (Figura

2.9). Preliminarmente los datos en frecuencia muestran que existe un acople entre la señal sísmica y la señal acústica (Figura 2.2). El espectro de la señal "sísmica" tiene las frecuencias de resonancia del conducto y además frecuencias más altas debido al mismo sistema.

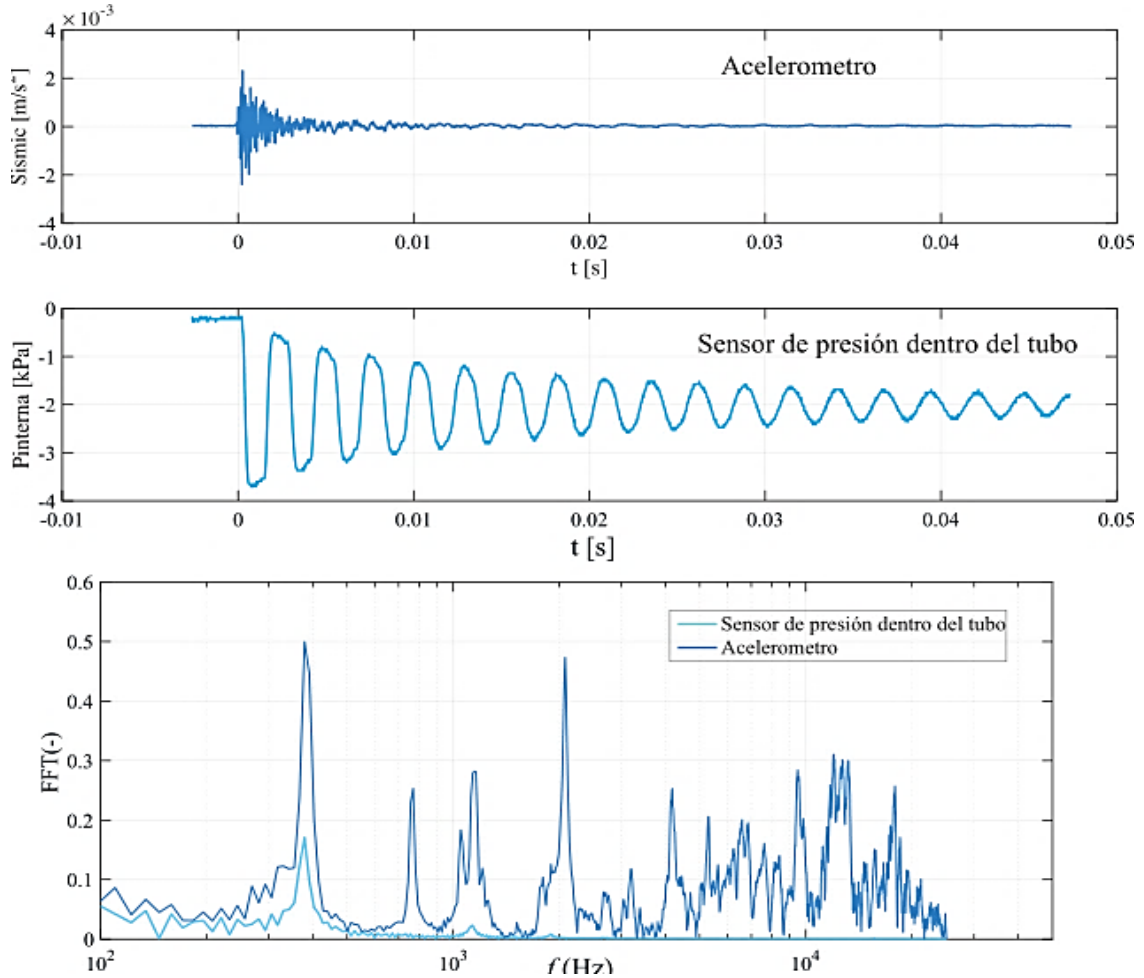


Figura 2.2 Señal "sísmica", acústica y espectro de frecuencia del modelo realizado en el laboratorio (Sánchez, 2014).

En la *Figura 2.2* se muestran los datos de una onda "sísmica" que se propaga por el medio sólido y es captada por el acelerómetro en el borde del sistema. La fuente de la propagación de la onda está ubicada donde la presión es máxima (DP). Desde ahí, se propaga una onda a una velocidad alrededor de 700 m/s con un 5% de error experimental. Existe una onda que se propaga con mayor velocidad que la onda de sonido, y se sabe que la velocidad de la onda superficial es un 90% del valor de v_s , pero, en esta experiencia no son suficientes las dimensiones escaladas para poder diferenciar las ondas superficiales de las de volumen. Las limitaciones de este experimento fue cuantificar cual es el tipo de onda (volumen o superficial) que se propaga en el sistema (Sánchez, 2014).

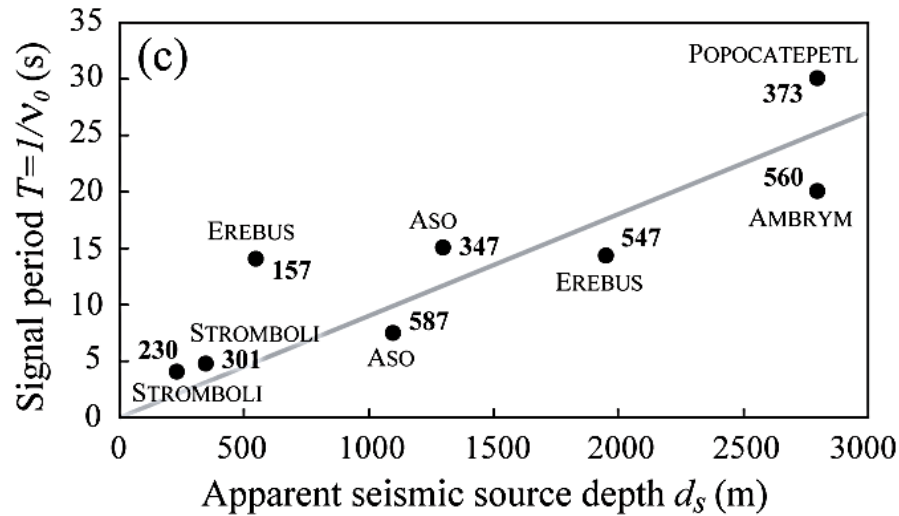


Figura 2.3 Reportan el periodo de la señal $1/v_0$ como función de la profundidad aparente de la fuente sísmica, así como la velocidad acústica en el conducto resonante [datos no publicados, agradecimientos a V. Vidal]

Estudios anteriores [Vidal (datos no publicados)], estudian como la resonancia en un tubo puede producir ondas sísmicas en un medio elástico. Suponen una impedancia entre el magma y las paredes del conducto, y consideran la resonancia del conducto como la fuente de presión al interior del suelo elástico. Proponen, que una onda resonante dentro del conducto, provocada por la explosión de una burbuja gigante, la coalescencia de burbujas dentro del magma o un crack del magma sólido puede inducir la aparición de una señal sísmica llamada “fantasma” cuya frecuencia está limitada por el largo del conducto (ver *Figura 1.3*).

En este trabajo de tesis se quiere estudiar si existe al aplicar una sobrepresión (burbuja de gas) y posteriormente al liberar (explota) se genera una onda “sísmica” en el sistema, con condiciones “ideales”, debido a que el conducto este vacío sin ningún fluido en su interior, porque nos enfocamos en simular la sobrepresión en la paredes y la liberación (punto 2.3.2.3). Al mismo tiempo, se estableció que el modelo como si fuera un material elástico lineal, por tanto, como un sólido isotrópico.

2.2 COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics es un potente software de simulación que puede ser de gran interés en diferentes ramas como ciencia, matemáticas o ingeniería entre otras. Esto es debido a que COMSOL resulta una herramienta muy versátil independientemente del área de estudio ya que puede reproducir una gran variedad de fenómenos físicos, permitiendo la implementación de estos tanto de uno en uno como a través de la creación de un modelo multifísico. Todos estos

fenómenos son posibles debido a su implementación de diferentes módulos que son presentados como áreas de aplicación, que además llevan implementándolos las ecuaciones y cálculos numéricos que resolver, permitiendo así que el usuario puede utilizar este software sin necesidad de ser experto en ese ámbito.

Utilizando las interfaces de los módulos físicos se pueden construir modelos mediante la definición de cantidades físicas tales como sus propiedades materiales, límites y etc.

Algunas de las áreas de aplicación de COMSOL se muestra a continuación:

- Acústica
- Dinámica de Fluidos
- Geofísica
- Transferencia de calor
- Mecánica estructural
- Propagación de ondas
- Etc.

2.2.1 Procedimiento general de análisis de los elementos finitos

Los pasos necesarios para llevar a cabo un análisis de elementos finitos de un problema físico son comunes para la mayoría de los campos de aplicación del método, y están incorporados en los paquetes de software. Por lo que hay seguir la siguiente metodología:

- **Preproceso:** está dedicado a definir el modelo, es decir, la geometría del problema, el tipo de elemento utilizado en el mallado y sus características geométricas, las propiedades del material, las condiciones de contorno y la física del modelo.
- **Proceso:** se procede a resolver la ecuación o ecuaciones del problema, donde COMSOL reúne las ecuaciones algebraicas en forma matricial y calcula los valores de la variable o variables primarias.
- **Postproceso:** consiste en el análisis y la evaluación de los resultados obtenidos, incluyendo la representación de estos en tablas, gráficos en 3D, 2D y 1D, etc., aunque principalmente se debe dedicar a juzgar si los resultados son físicamente razonables.

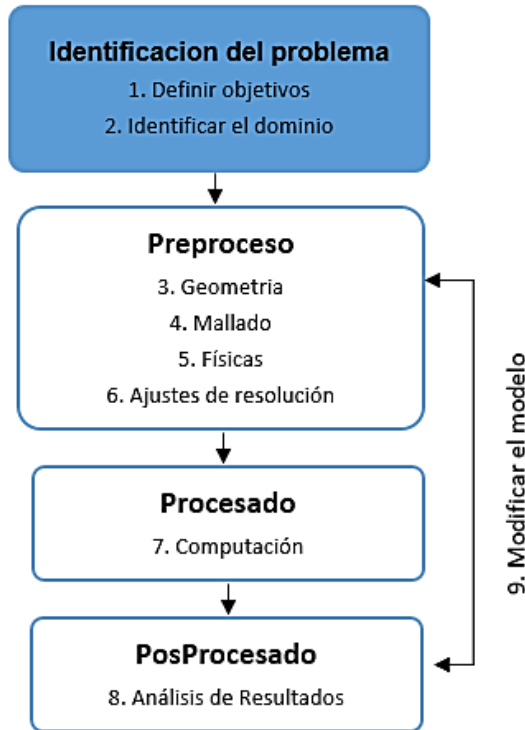


Figura 2.4 Etapas de la dinámica computacional en COMSOL.

2.3 Modelo

2.3.1 Introducción

COMSOL comienza con la elección del tipo de modelo 2D, asimétrico, 3D, etc. Para el modelo que realizaremos será en 3D.

Una vez elegido el modelo se nos abre la interfaz de COMSOL, donde se muestra una ventana gráfica donde visualizar el modelo que se va creando y una barra de navegación situada en la parte izquierda que contiene los pasos a seguir para la creación del modelo Definitivos, Geometry, Materials, Physics, Mesh, Study, Results.

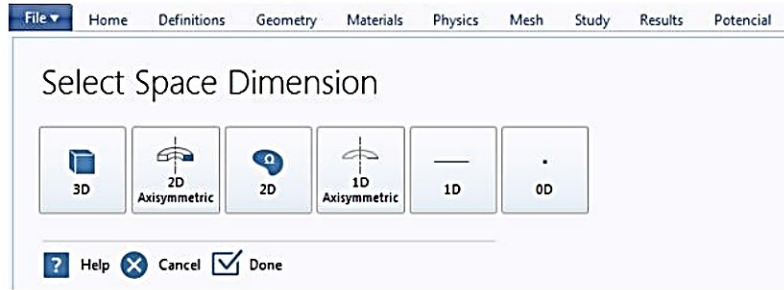


Figura 2.5 Imagen de la interfaz de trabajo de COMSOL. Elaboración propia.

2.3.2 Parámetros

COMSOL también nos ofrece la posibilidad de crear una tabla de parámetros donde podremos asignarles unos determinados valores o expresiones. Estos parámetros podrán ser utilizado en diferentes partes del modelo y nos permitirá que, si en algún momento queremos cambiar el valor o la expresión del parámetro, simplemente podemos ir a la tabla donde está definido y cambiarlo ahí (ejemplo presión, tiempo de caída, etc.). Para poder crear esta tabla debemos dirigirnos al comienzo de la barra de navegación al apartado de Definiciones Globales, pulsar botón derecho y escoger la opción Parámetros (P_i), automáticamente aparece la tabla en blanco (ver **Tabla 2.1**).

2.3.2.1 Conducto

Enmarcando el campo de la acústica en el conducto volcánico, las ecuaciones de movimiento para la propagación acústica son un especial caso de la ecuación linealizada de Navier-Stokes (Sánchez, 2014). Una onda de sonido propagándose se rige por la siguiente ecuación (Morse, 1968):

$$\nabla^2 P - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = 0 \quad (2.1)$$

donde c es la velocidad del sonido del aire ($\sim 343 \text{ m/s}$), p es la presión acústica definida como la diferencia entre la presión instantánea y la presión atmosférica (o en equilibrio) P_0 ,

$$p = P - P_0 \quad (2.2)$$

2.3.2.2 Configuración de Presión en el modelo con sobrepresión inmediata

La repentina caída de presión produce un frente de onda que viaja a lo largo del tubo. Denominaremos como τ_{rup} al tiempo de caída de presión, dado por el largo del tubo L y la velocidad del sonido c , y t_{espe} el tiempo donde se mantiene la sobrepresión en el conducto (tiempo de propagación (Sánchez, 2014):

$$t_{espe} = \frac{L}{c} \quad (2.3)$$

El modelo consiste en una primera instancia como una sobrepresión alrededor de todo el conducto como se ve en la *Figura 2.6*:

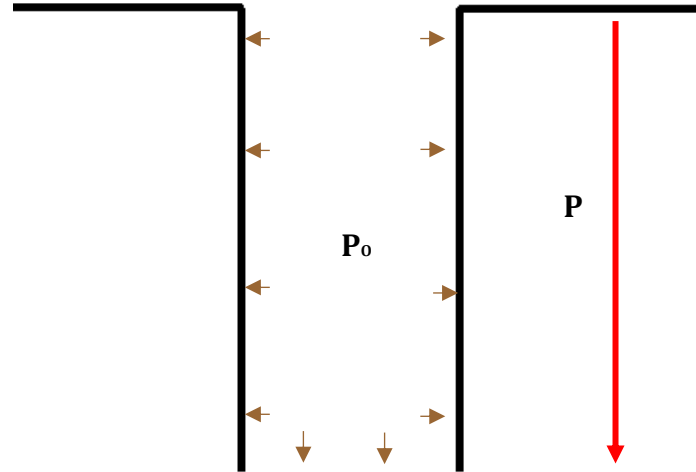


Figura 2.6 Sobrepresión y decaimiento de está, por la altura del conducto del modelo numérico del Volcán Stromboli.

Para aplicar la deflación en el conducto se utiliza el tiempo de espera y de la caída de presión en el sistema, como:

$$P = P_0 e^{-(t-t_{espe})/\tau_{rup}} \quad (2.4)$$

$P_0 = 10 \text{ [MPa]}$ para el caso (1:1) y $P_0 = 10 \text{ [kPa]}$ para el caso de (1:200) de la goma Elite Double 8.

La grafica de la ecuación contiene como una primera estancia que al aplicar una sobrepresión de $DP = 10 \text{ MPa}$ en $t = 0 - t_{espe}$, luego se libera con un τ_{rup} seleccionado, para un t igual a 2 segundos:

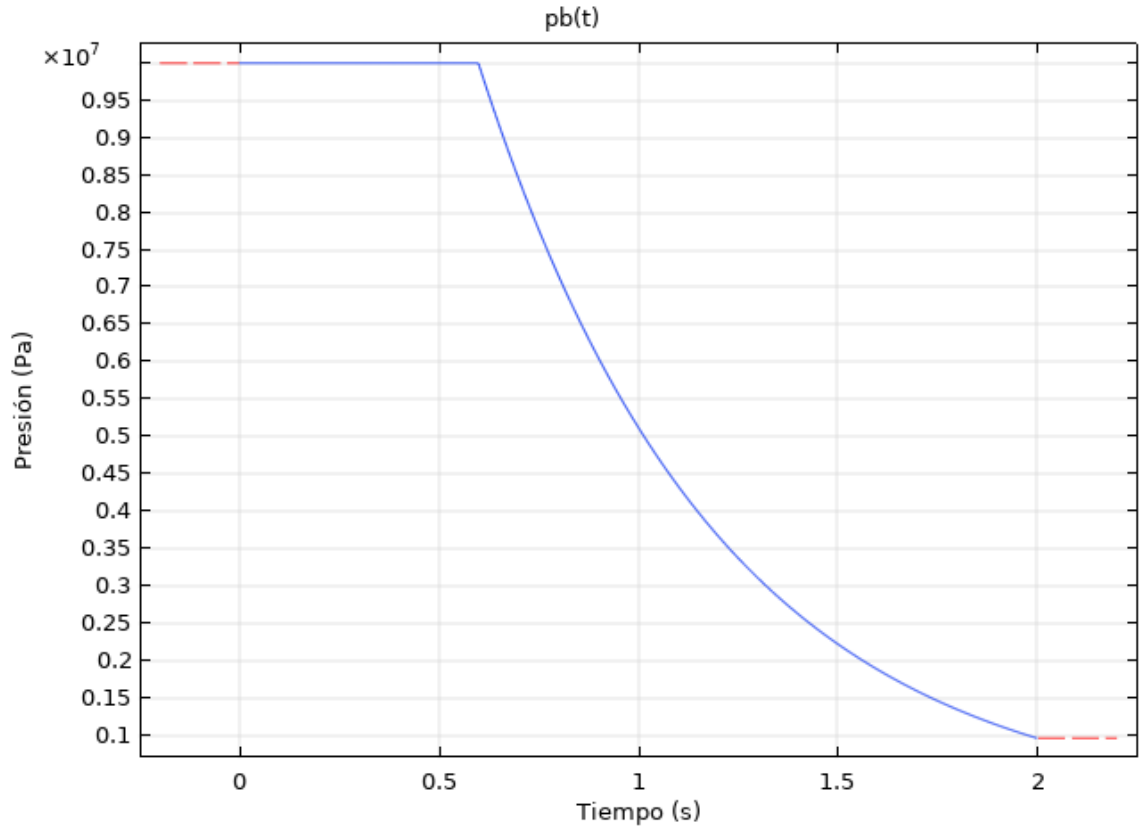


Figura 2.7 Gráfica de la función por sección $pb(t)$ colocada en las paredes del conducto para la liberación de presión, con ejemplo un $t_{espe} = 0.6$ s y $\tau_{rup} = 0.6$ s para el caso (1:1).

2.3.2.3 Configuración de Presión en el modelo con sobrepresión lenta

La segunda configuración que se realizó para la inflación de la presión es la siguiente:

$$P = \frac{P_o}{2} - \frac{P_o}{2} \cos\left(\frac{\pi}{t_{espe}} t\right) \quad (2.5)$$

Y la deflación del conducto como el punto 2.3.2.2:

$$P = P_o e^{-(t-t_{espe})/\tau_{rup}}$$

La grafica de esta función por sección ($pb2(t)$), es aplicada en las paredes del conducto, como:

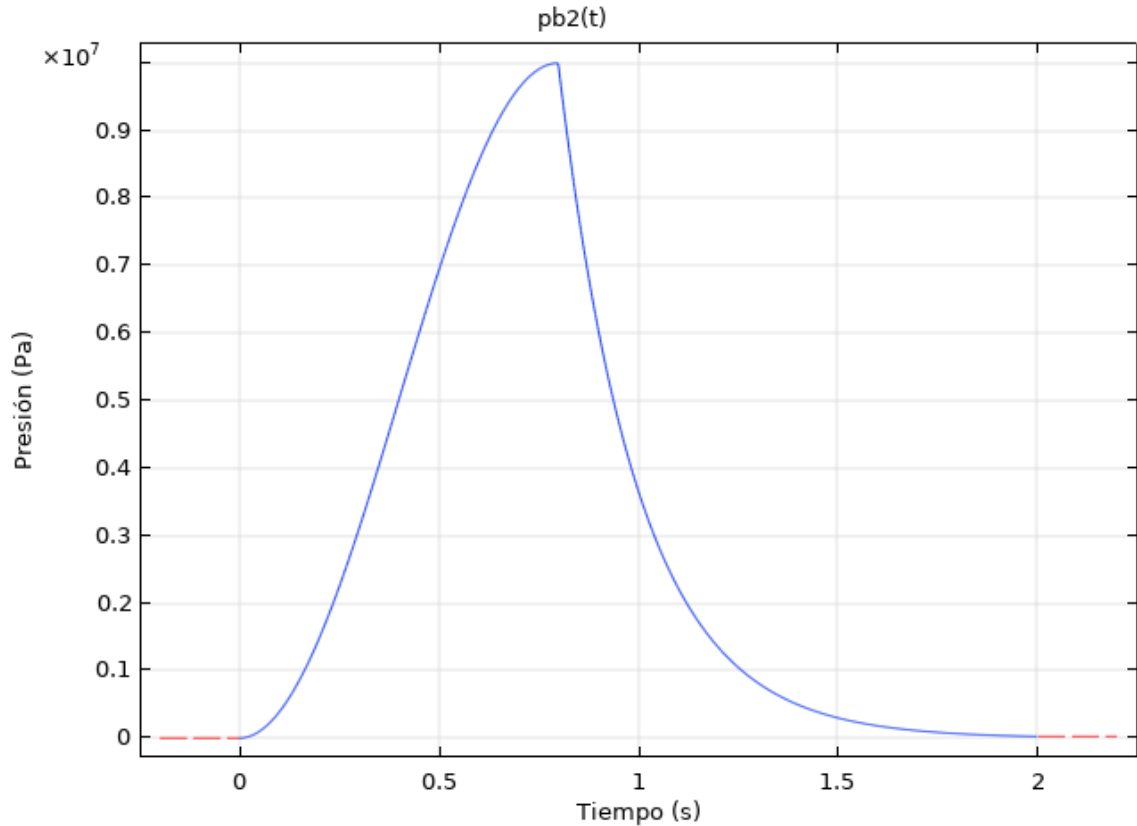


Figura 2.8 Función por sección ($pb_2(t)$) para una inflación lenta y luego una deflación exponencial, con un tiempo de espera de $t_{espe} = 0.6$ s y de caída $\tau_{rup} = 0.2$ s como ejemplo.

En este caso, la sobrepresión del conducto es lenta a diferencia del caso anterior que la sobrepresión es impuesta a $t = 0$ s para un $DP = 10$ MPa.

Se analizará el modelo cuando un “tiempo de ruptura (tiempo de caída)” es menor en comparación al tiempo de propagación (tiempo de espera) que demora la onda en recorrer el tubo $\tau_{rup} < t_{espe}$ y cuando $\tau_{rup} > t_{espe}$ (Sánchez, 2014).

2.3.2.4 Definiciones Globales

Las variables globales consisten en parámetros constantes definidos con anterioridad para ser empleados en el futuro durante la definición de propiedades. Este paso es completamente opcional, aunque bastante útil para definir la geometría y determinadas propiedades para el desarrollo del estudio (Modelo > Definiciones > Parámetros).

Nombre	Expresión	Descripción
p_0	10 [MPa]	Sobrepresión
t_0	τ_{rup}	Tiempo de caída (τ_{rup})
$tespe$	0.6 [s]	Tiempo de espera

Tabla 2.1 Parámetros colocados en la simulación (1:1) del modelo numérico del volcán Stromboli.

Para el caso de las simulaciones (1:1 y 1:200) se cambia el tiempo de caída y de espera, debido al largo del conducto. Además, se configura una función por secciones (piecewise) para imponer una sobrepresión de 10 MPa y 10 kPa en el sistema y luego liberar (ver **Tabla 2.2**):

Iniciar	Fin	Función
0	$tespe$	p_0
$tespe$	2	$p_0 * \exp(-(t - tespe)/t_0)$

Tabla 2.2 Ajuste de la deflación (liberación de la presión) del modelo para todos los sistemas con una configuración de presión inmediata.

En nuestra simulación se utilizara el modelo del punto **2.3.2.3** variando el tiempo de caída $\tau_{rup} = t_0$, para ver si existen ondas que se propagan en la vertical y horizontal de la superficie (como una onda de choque Anexo 4.3).

Iniciar	Fin	Función
0	$tespe$	p_0
$tespe$	2	$p_0/2 - p_0/2 * \cos * (\pi * t/tespe)$

Tabla 2.3 Ajuste de inflación y deflación de la configuración de sobrepresión lenta en el conducto.

2.3.2.4.1 Presiones para cada simulación

Como se ha mencionado anteriormente, partimos del objetivo de crear con el programa COMSOL un modelo que se asemeje al conducto del volcán Stromboli. Por lo que se realizara una simulación de las dimensiones del volcán Stromboli (Delle Donne, 2015) y otros escalados numéricamente la geometría y la presión dentro del modelo (*Figura 2.10*).

Simulación Stromboli [m]	Presión
1: 1	10 [MPa]
Escalada (1: 200) – Elite Double 8	10 [kPa]

Tabla 2.4. Simulación realizada en el software COMSOL.

Se aplica una sobrepresión (Tabla 2.4) para todos los modelos, para analizar la deformación y las ondas que se propagan en el sólido.

2.3.3 Geometría

2.3.3.1 Modelo que procesar

El sistema modelado en COMSOL, consiste en un sólido con una cavidad cilíndrica hueca con un extremo abierto, como se ve en la *Modelo realizado para la medición de ondas que pueden propagarse en la superficie en COMSOL* Figura 2.9.

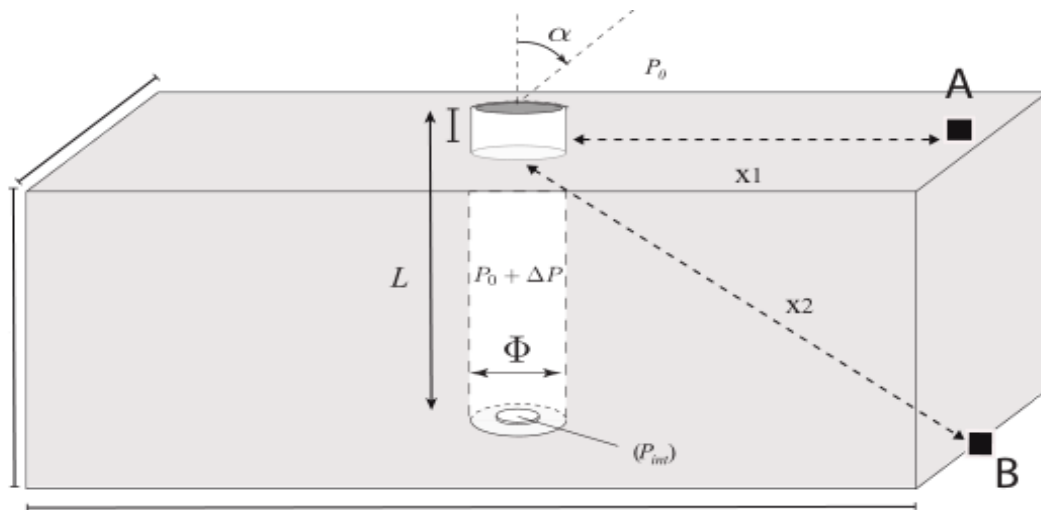


Figura 2.9 Modelo realizado para la medición de ondas que pueden propagarse en la superficie en COMSOL Multiphysics (1:200) (Sánchez, 2014).

En este caso los puntos A y B son los sensores colocados en (Sánchez, 2014) para medir las velocidades de propagación de la onda. En nuestro modelo será alrededor del conducto y en el extremo (punto 2.3.71).

2.3.3.2 Configuración del modelo numérico del volcán Stromboli.

La geometría de la simulación se compone de un cilindro de radio 5 m y 283 m de largo, luego un bloque de dimensiones $200 \times 200 \times 400 \text{ m}^3$ (Delle Donne, 2015), se quiso concentrar lo que sucede en el conducto:

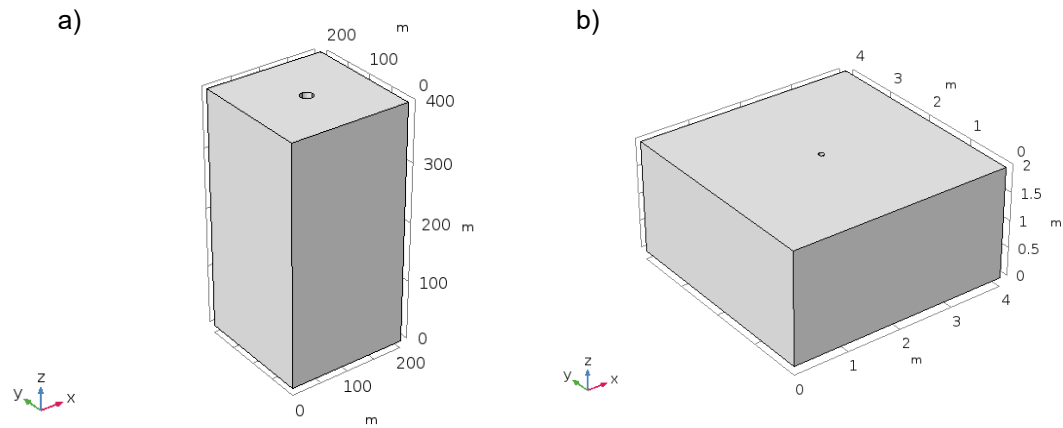


Figura 2.10 Geometría del modelo numérico del volcán Stromboli. a) Geometría (1:1) y b) geometría escalada (1:200) para la roca basáltica y el material blando (Elite Double 8).

El sólido es un modelo numérico enfocado principalmente en la cavidad cilíndrica del volcán Stromboli en una primera instancia (1:1) del cráter central ubicado en el sector Sciara del Fuoco (Global Volcanism Program, s.f.), luego será escalado 1:200 el conducto ($R = 2,5 \text{ cm}$ y $L = 1.415 \text{ m}$ y un bloque de $4 \times 4 \times 2 \text{ m}^3$) para ver si se puede replicar en un laboratorio.

2.3.4 Física del Modelo - Mecánica estructural

El módulo de mecánica estructural está dedicado al análisis de las estructuras mecánicas que están sujetos a cargas estáticas o dinámicas; se puede utilizar para una amplia gama de tipos de análisis que incluyen el análisis estacionario, transitorio, paramétrico, cuasi estático, respuesta en frecuencia, pandeo y pretensado.

2.3.4.1 Mecánica de sólidos

Es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real.

COMSOL se basa en análisis de elementos finitos, el paquete de software de simulación se utiliza para diversas aplicaciones de la física y de la ingeniería. Ofrece conjuntos de herramientas para una gran variedad de posibilidades de programación, procesamiento y postprocesamiento. Los paquetes son multiplataformas (Windows, Mac, Linux). Además de las interfaces de usuario basados en la física convencional, COMSOL también permite introducir sistemas acoplados de ecuaciones en derivadas parciales (PDE).

2.3.4.2 Configuración de la física

2.3.4.2.1 Material elástico Lineal

En este proceso se configura las propiedades del sólido seleccionando su dominio y el material elástico lineal. Por lo que el material es isotrópico y se compone de una roca basáltica (andesitic), donde los datos reológicos de esta roca se muestran en la

Tabla 2.5, y son dados por el software y comparados con la base de datos de la USGS (USGS, s.f.) y el Departamento de Ciencias Geológicas de la Universidad Nacional de Rosario (Canoba, 2004).

Propiedad	Valor
Módulo de Young	30 GPa
Coefficiente de Poisson	0.25
Densidad	2900 kg/m ³
Velocidad del sonido	3190 m/s

Tabla 2.5 Datos reológicos utilizados para las simulaciones en COMSOL Multiphysics.

Los datos de la

Tabla 2.5 fueron utilizados para la simulación 1:1. Además, se realizará otra simulación con un material llamado Goma (Vinylpolysiloxone Rosada) o Elite double 8 con las dimensiones 1:200 con las características siguientes:

Propiedad	Valor
Módulo de Young	800 kPa
Coefficiente de Poisson	0.50
Densidad	1190 kg/m ³
Velocidad del sonido	1.45 m/s

Tabla 2.6 Características de la simulación con un material más elástico (zhernack, s.f.).

2.3.4.3 Condiciones de Borde

2.3.4.3.1 Libre

Es un contorno libre, que significa que no hay restricciones ni cargas que actúen sobre el límite. Cuando se agregan las interfaces físicas (mecánica de sólidos en nuestro modelo) se observará que en el contorno no tienen ninguna condición límite aplicada a diferencia en el conducto como una carga superficial.

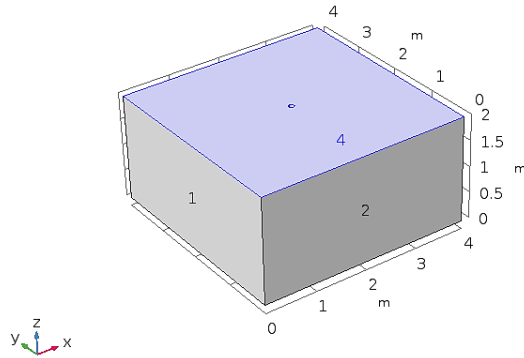


Figura 2.11 Contorno libre (4) del modelo numérico de la simulación (1:200), ubicada en la superficie.

2.3.4.3.2 Carga superficial

En este caso, la carga de contorno es una restricción que se escoge para seleccionar ciertos dominios que se aplica la sobrepresión (“la explosión de la burbuja”). La selección de estos es en la cavidad cilíndrica hueca (contornos 6,7,8,9 y 10), como se ve en la siguiente imagen:

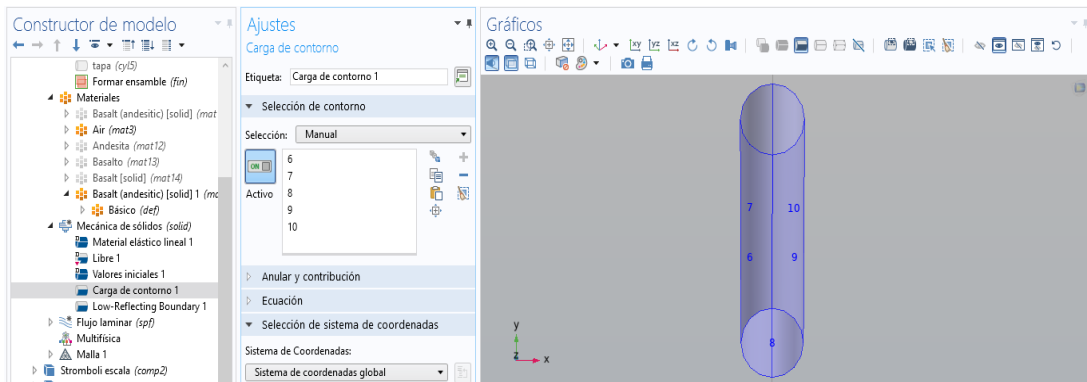


Figura 2.12 Selección de contornos, para aplicar la presión en el sólido en el conducto volcánico.

En los puntos mencionados en el párrafo anterior, son los seleccionados para aplicar la sobrepresión y luego la caída de esta, dependiendo de su altura con la **Tabla 2.2**, en el ajuste de fuerzas como presión de esta función por sección (punto 2.3.2).

2.3.4.4 Restricción fija (Fixed Constraint)

La condición de restricción fija significa que en los contornos no hay restricciones ni cargas que actúen sobre el límite. El contorno que se selecciona la base (contorno 3), ya que así se aplica la condición de no desplazar a ningún lado, como una condición fija y no sufre ninguna deformación. También para los contornos de las paredes externas del sólido (1, 2, 5 y 11).

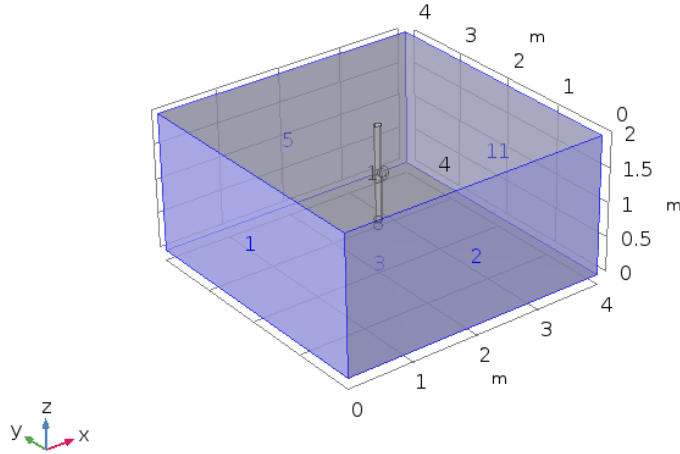


Figura 2.13 Selección de contornos para la restricción fija en la geometría del modelo numérico (1:200).

2.3.5 Malla

Todos los datos obtenidos en este trabajo se basaron en el modelo numérico que permite variar los parámetros de sobrepresión, densidad, constantes elásticas para el cálculo de desplazamientos y velocidades de la onda en el medio. Ya que, COMSOL es un programa basado en la resolución por el método de los elementos finito (Finite Element Method, FEM). Este método se basa en dividir un conjunto continuo que es modelado por ecuaciones diferenciales a un conjunto dividido en partes que será modelado por un conjunto de ecuaciones lineales. Sin embargo, hay que destacar que el método FEM es un método aproximado que no alcanza soluciones exactas, con lo que aquí reside la importancia del mallado en el modelo. Ya que, cuanto más fina y pequeña sea la malla alcanzaremos unos resultados más exactos.

Por lo que se seleccionarán el tipo y el mallado de los elementos finitos en los que se seccionara la geometría del modelo numérico del volcán Stromboli. La exactitud y calidad del resultado del mallado depende del tamaño de elemento escogido, por lo que este paso es tremendamente importante. Mientras más pequeña fuese la malla más exactos serían los resultados obtenidos del modelo es crucial, ya que la calidad de los resultados depende de ella. Porque puede causar una deformación en el conducto de la siguiente forma:

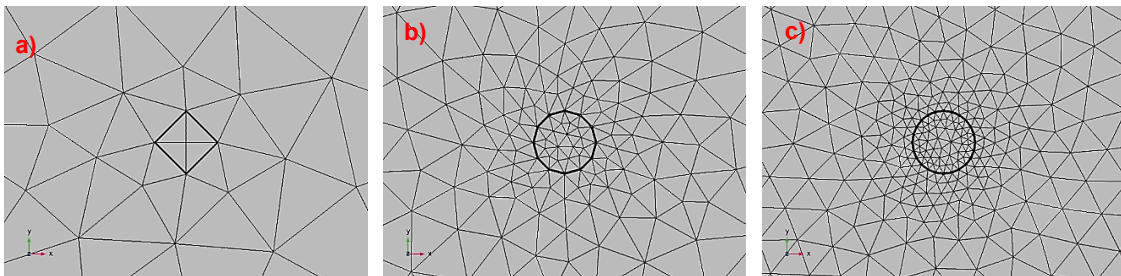


Figura 2.14 Tipos de mallas seleccionadas para el estudio. a) Malla Gruesa, b) Malla Fina y c) Malla Extra Fina en el plano XY (superficie).

Para el primer mallado de la *Figura 2.14* el conducto da como resultado un cuadrado mirado en el plano XY de la superficie, por lo que se decidió para el caso de la simulación (1:1) cambiar a un malla más pequeña (extra Fina) como se ve en c). Para el caso de la simulación (1:200) la malla también debe ser extra Fina para calcular los números de elementos necesarios en el sólido.

Simulación modelo del Stromboli [m]	Tamaño Malla
1: 1	<i>Extra Fina</i>
1: 200 - Elite double 8	<i>Extra Fina</i>

Tabla 2.7 Tiempo de duración del cálculo de la simulación en COMSOL.

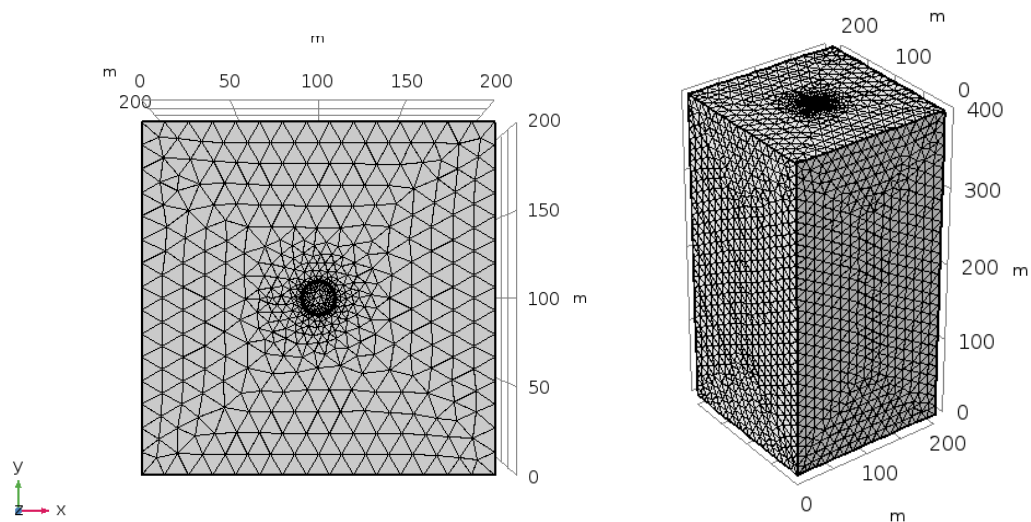


Figura 2.15 Malla impuesta en la simulación del modelo en COMSOL Multiphysics para el caso (1:1).

En la *Figura 2.15* se puede ver como la malla sufre deformaciones cuando existe el elemento del conducto vacío. Mientras próximo a la cavidad cilíndrica, existen más elementos debido al tamaño del cilindro.

2.3.6 Estudio

Para finalizar el modelo debemos añadir el tipo de estudio que queremos. COMSOL ofrece diferentes posibilidades como Estacionario, Tiempo Temporal, Dominio de Frecuencia, etc. En nuestro caso tanto para el modelo (1:1) y (1:200) fue un estudio de Tiempo temporal (ver punto 2.3.6.1) y Frecuencias propias.

2.3.6.1 Estudio Temporal

El estudio del modelo es temporal, se escoge como una variante de tiempo con un rango que determinado (dependiente del tiempo de caída de presión para cada conducto). Además, en la configuración del estudio, en el configurador del Resolvedor - *Manual* resolvedor temporal se

cambia la escala de tiempo en los pasos tomados por el resolvidor como *Manual*, con un paso de tiempo en el caso (1:1) de 0.0005 puntos y en (1:200) de 0.00005 puntos.

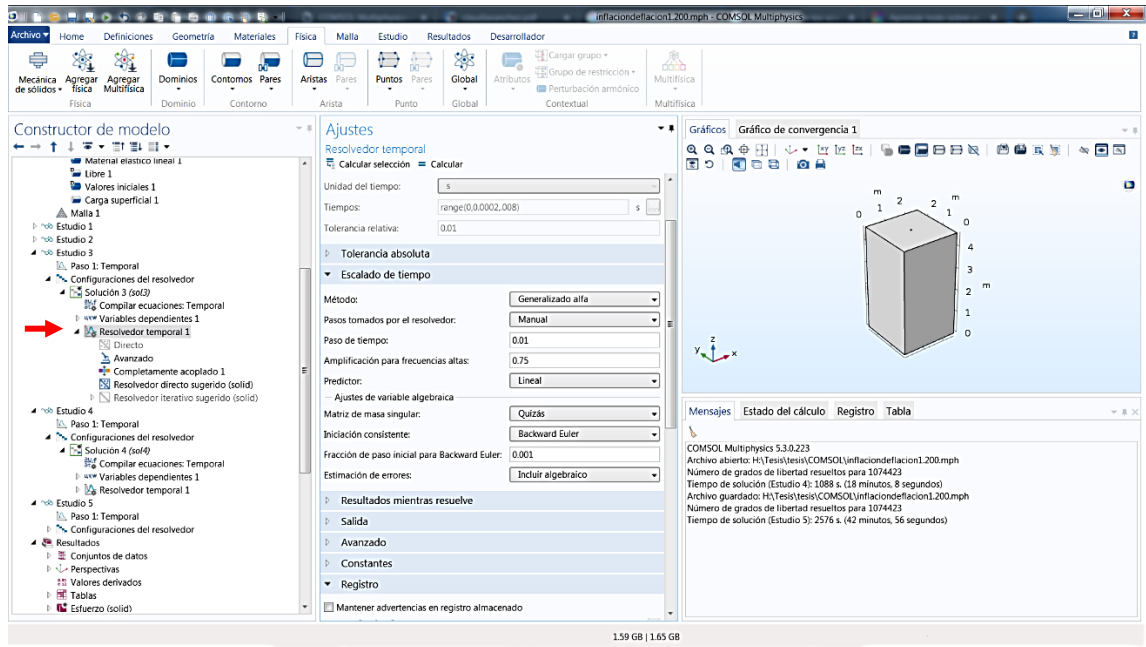


Figura 2.16 Ventana de ajustes del Resolvidor Temporal en el estudio de la simulación en COMSOL.

2.3.7 Sensores

Se simulará unos “sensores” colocados alrededor del cráter, y otro lejano para comparar la señal sísmica provocada por la sobrepresión del conducto. En una primera instancia como se nota en la Figura 2.17, se escogerá uno de los puntos de alrededor del cilindro (6, 10, 12 y 8) para analizar la deformación y las ondas que se propagan en la superficie del volcán. Se denominará al punto 10 como MP10 (ejemplo).

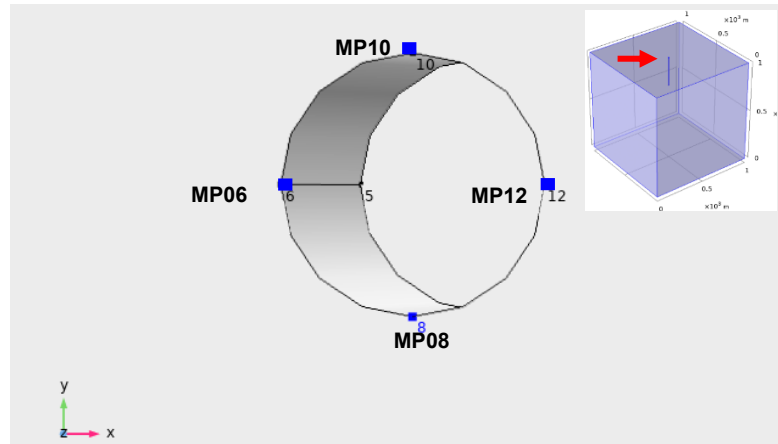


Figura 2.17 Imagen aumentada de la simulación del volcán mirada en el eje X e Y, para referenciar los puntos donde se colocarán los “sensores”.

2.3.8 Desplazamiento

Para las tres simulaciones se efectuará un corte en el plano de la superficie XY y en lo largo de la cavidad cilíndrica (YZ). Aplicando la sobrepresión se analizará si en estos planos se produce un desplazamiento del conducto.

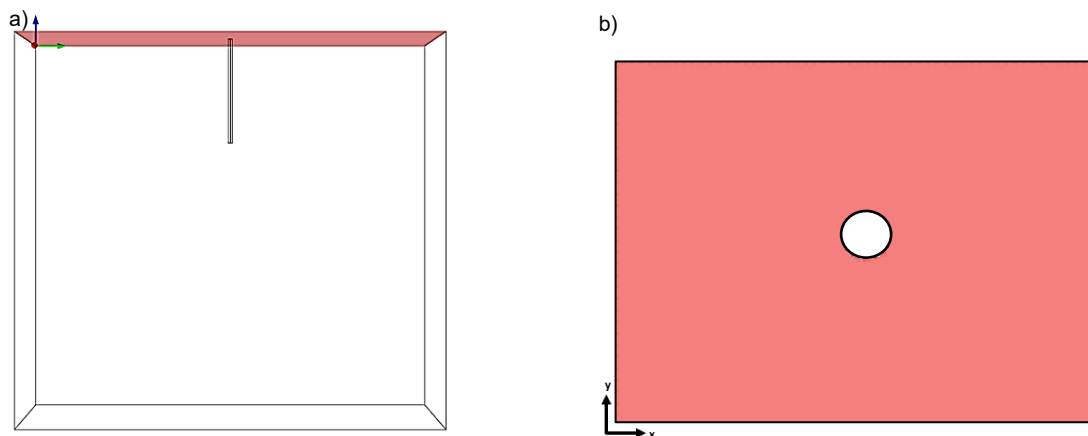


Figura 2.18 a) Corte en el plano XY (superficie) del sólido del volcán y b) Superficie del modelo del volcán.

En la Figura 2.18 es el sólido simulado y corte que se realiza en el plano del modelo, para ver si existen desplazamientos radiales y ondas en la superficie.

2.3.9 Resultados y postprocesado

Las capacidades de visualización incluyen superficies, cortes, isosuperficies, planos de corte, flechas y graficas de líneas de corriente, así como muchos otros gráficos.

Una gama de herramientas de postprocesado están disponibles para la evaluación e integración; se pueden calcular el máximo, el mínimo, el promedio y valores integrados de cualquier cantidad o cantidades de material compuesto, a lo largo de volúmenes, superficies, bordes y en puntos.

Los resultados que se ven en el constructor de modelo dependen de la física seleccionada. En este caso como es mecánica de sólidos. Pero, se puede seleccionar hacer gráficos en 1D, 2D y 3D, para analizar en profundidad el desplazamiento en los ejes x, y, z. Además de los parámetros en los ejes y el tiempo que se quiere analizar.

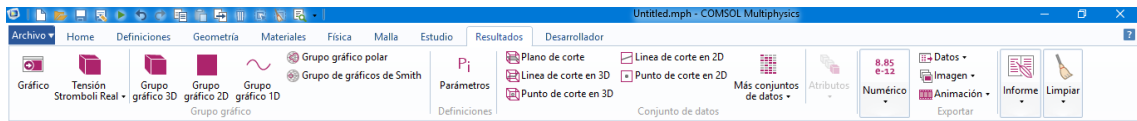


Figura 2.19 Opciones para graficas en COMSOL Multiphysics.

2.3.10 Exportar

Los gráficos se pueden exportar como imágenes (formato .jpg, .eps, .png, etc.) o videos (formato .gif, .avi, etc.), al igual que las tablas.

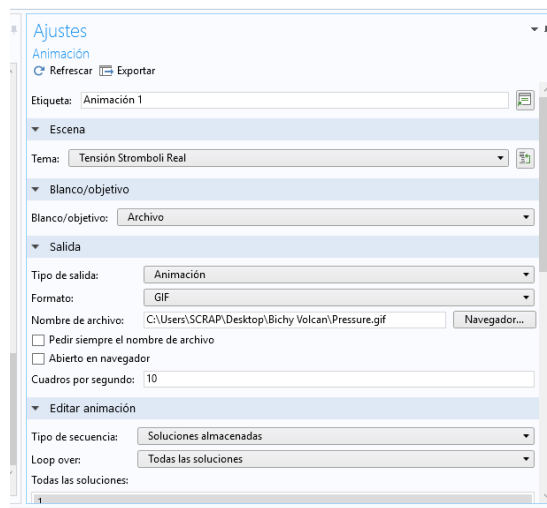


Figura 2.20 Ajustes para guardar un video en la ventana de COMSOL.

3 Capítulo

3.1 Desarrollo Experimental

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para los distintos estudios y simulaciones llevados a cabo. Las preguntas que se plantearon con respecto a la naturaleza de deformación del conducto volcánico; ya sea la inflación y deflación: ¿Cuáles son los parámetros que se pueden controlar y modelizar en la simulación?. ¿Existen ondas sísmicas que produce al liberar la presión en la superficie? ¿Cuál es la información que puede entregar la señal para saber instalar colocar los sensores sísmicos?

A continuación, se muestran los datos simulados para dimensiones reales y dimensiones a escala de laboratorio. Se estudian las ondas producidas debido a la deformación del suelo producto de la explosión del slug dentro del conducto volcánico.

3.2 Resultados

Las simulaciones se realizan vía COMSOL, programa basado en elementos finitos, el que requiere que cada uno de los objetos sea mallado con el fin de resolver las ecuaciones correspondientes para cada uno de los elementos.

3.2.1 Volcán Stromboli (1:1)

El resultado de la simulación (1:1) con los parámetros seleccionados (Modulo de Young 30 GPa , Densidad 2900 kg/m^3 y coeficiente de Poisson 0.2), las dimensiones son de $200 \times 200 \times 400 \text{ m}^3$ para bloque y la cavidad cilíndrica de radio 5 m y 283 m .

El tiempo de solución de la simulación (1:1) es de 2 hora 29 minutos con 21 segundos (para un estudio de 2 segundos), y la cantidad de elementos resueltos fue de 2.109.192.

Los parámetros que se controlan en el sistema es la sobrepresión $DP = 10 \text{ MPa}$ con una subida y posteriormente la liberación con la ecuación 2.4 respecto a dos tiempos: de caída τ_{rup} y de espera $t_{espe} = 0.6 \text{ s}$.

En el modelo el tiempo de caída (τ_{rup}) se puede controlar y además se varia este parámetro, por lo que es bueno tener una estimación de la amplitud del desplazamiento provocado al colocar un DP. En particular, si el τ_{rup} es del orden o mayor al tiempo de propagación de la onda dentro de la cavidad, t_{espe} .

3.2.1.1 Desplazamiento

Para determinar el campo de desplazamiento en el conducto (inflación-deflación) en la superficie Figura 2.18 para el caso de una inflación lenta (punto 2.3.2.3) se configuraron cinco tiempos de caídas distintos ($\tau_{rup} = 0.1, 0.2, 0.4, 0.6$ y 1 s).

En el primer caso para un $\tau_{rup} = 0.1$ s se graficaron los campos de desplazamiento, en \mathbf{Z} y en la componente radial \mathbf{R} ($R = \sqrt{X^2 + Y^2}$ m) con un tiempo de espera $t_{espe} = 0.6$ s en un gráfico de 2D para mostrar una cantidad en un domino (\mathbf{R} y \mathbf{Z}).

COMSOL muestra los resultados del desplazamiento en la componente \mathbf{X} como una expresión denominada \mathbf{u} , en el caso de la componente \mathbf{Y} como \mathbf{v} , y finalmente la componente \mathbf{Z} como \mathbf{w} .

El campo de desplazamiento de \mathbf{R} es la suma de $\sqrt{u^2 + v^2}$ m; las imágenes tienen un rango en el eje x de $38 - 162$ m e y de $55 - 152$ m :

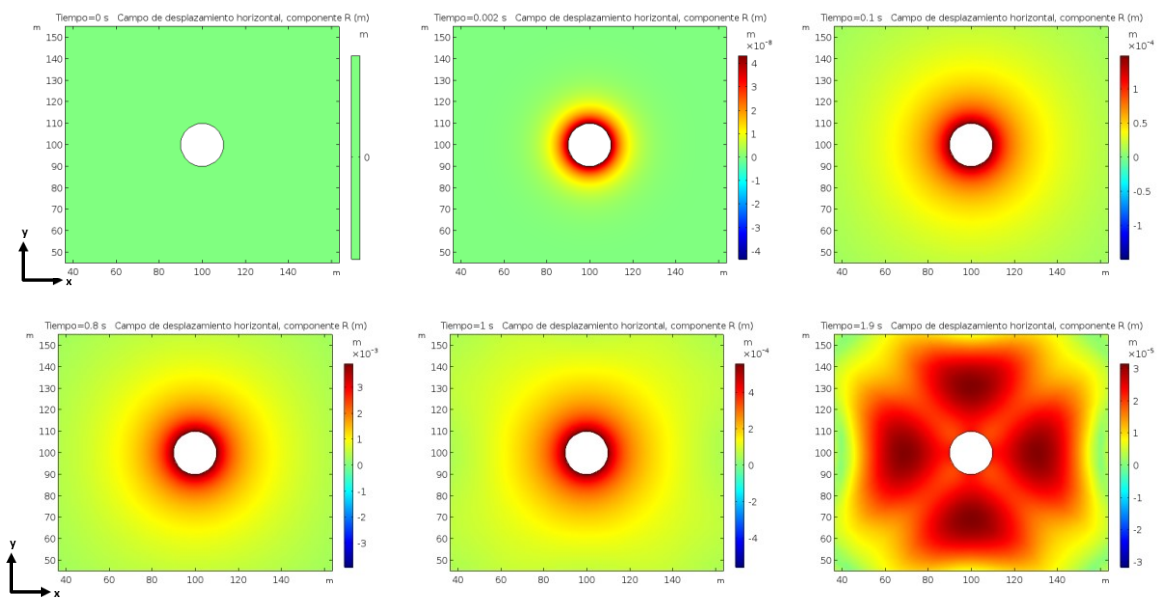


Figura 3.1 Campo de desplazamiento en R, para un $\tau_{rup} = 0.1$ s en el modelo numérico del volcán Stromboli (1:1) y $DP = 10$ MPa.

La secuencia de imágenes se aprecia que cada una tiene tiempos que van de $0 - 2$ s, es el transcurso del tiempo de estudio que se seleccionó para esta simulación (punto 2.3.6.1). Además, contienen una barra de color que expresa el desplazamiento en distintas tonalidades de color para diferenciar los rangos de los campos en la superficie al aplicar el DP .

Se distingue que alrededor del conducto hay un aumento progresivo en su radio al aplicar la presión en $t = 2$ ms. Para el $t_{espe} = 0.6$ s el desplazamiento es de 4 mm donde se empieza a

liberar la presión con la ecuación 2.4, en cambio, la tercera imagen de la segunda fila en un tiempo de $t = 1.9 \text{ s}$, el desplazamiento es del orden $3 \mu\text{m}$ debido a la deflación del conducto.

Para apreciar si existe un desplazamiento en la componente vertical **Z**, se realiza la misma metodología que en el caso de la componente **R**, pero con rango en el eje **x** de $0 - 200 \text{ m}$ e **y** de $0 - 200 \text{ m}$ como:

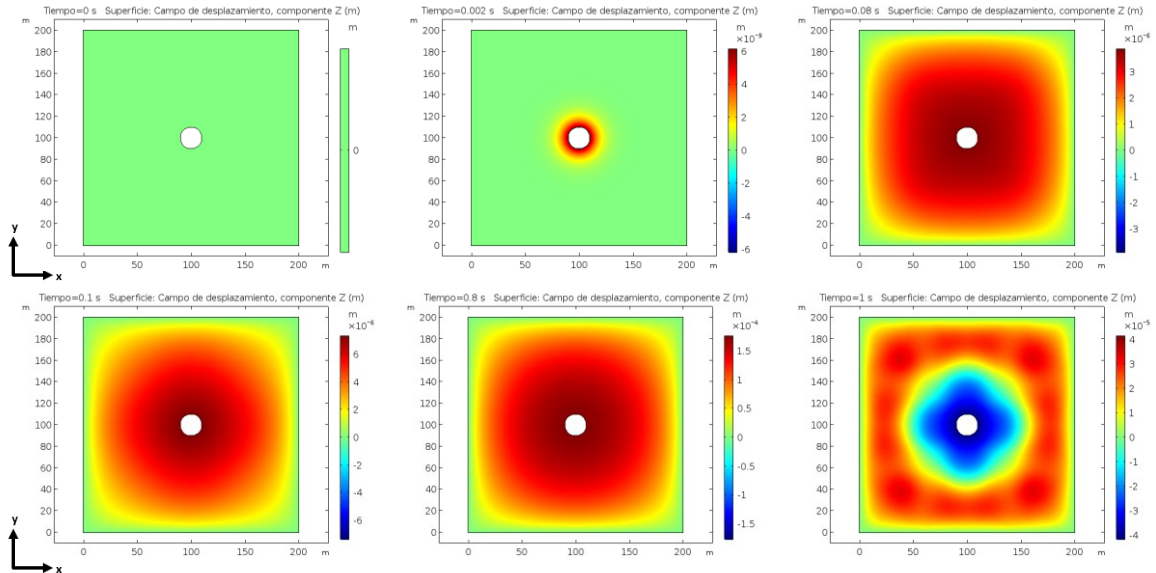


Figura 3.2 Campo de desplazamiento, componente Z (m), en el modelo numérico (1:1) para un $\tau_{rup} = 0.1 \text{ s}$ y un $DP = 10 \text{ MPa}$.

Se aprecia que al aplicar una presión de 10 MPa el sólido se excita y provoca un desplazamiento en la componente vertical, para un $t_{espe} = 0.6 \text{ s}$ el desplazamiento es mayor del orden 0.2 mm . La tercera imagen de la segunda fila en $t = 1 \text{ s}$ se nota que el sólido se desplaza hacia abajo en el conducto, esto es debido a que el tiempo de caída es muy rápido y el modelo no se relaja en ese tiempo.

Para un tiempo de caída mayor de $\tau_{rup} = 0.2 \text{ s}$, se realizó la misma metodología, para la componente **R** de la superficie, el rango en la gráfica 2D en el eje **x** $0 - 200 \text{ m}$ y en el eje **y** $0 - 200 \text{ m}$ se ve de la siguiente forma:

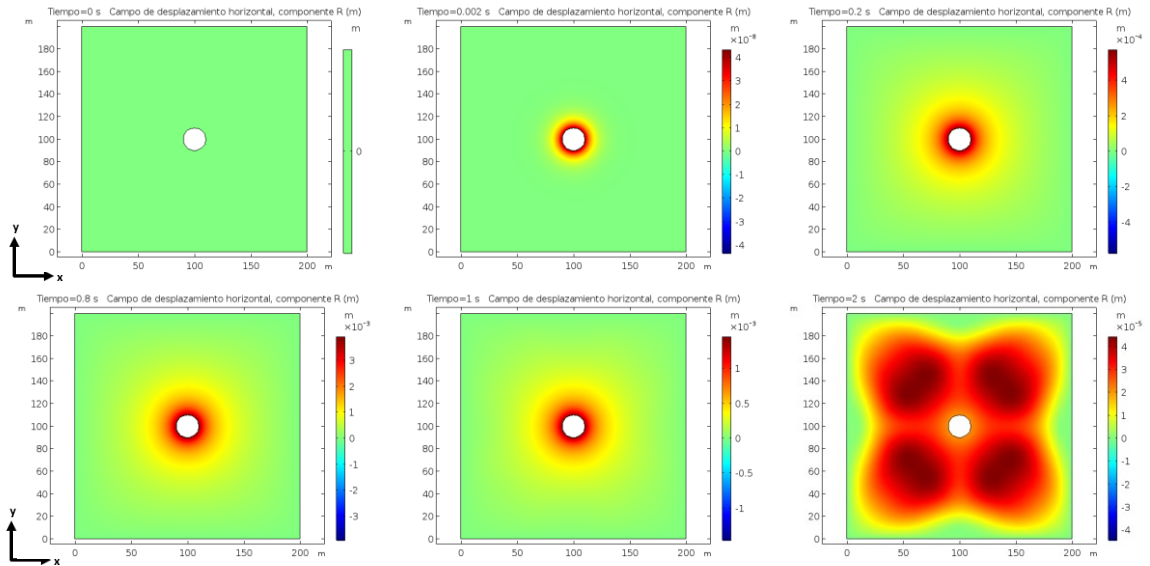


Figura 3.3 Campo de desplazamiento en la componente R , para un $\tau_{rup} = 0.2$ s en el modelo numérico del volcán Stromboli (1:1).

Al igual que en el caso de $\tau_{rup} = 0.1$ s, el tiempo de espera 0.6 segundos el desplazamiento es mayor y del orden 4 mm. Rápidamente va decayendo según la ecuación 2.4 en $t = 2$ s del orden 5 μ m provocada por la deflación del sistema. Para ver el desplazamiento vertical en la superficie del modelo numérico (1:1):

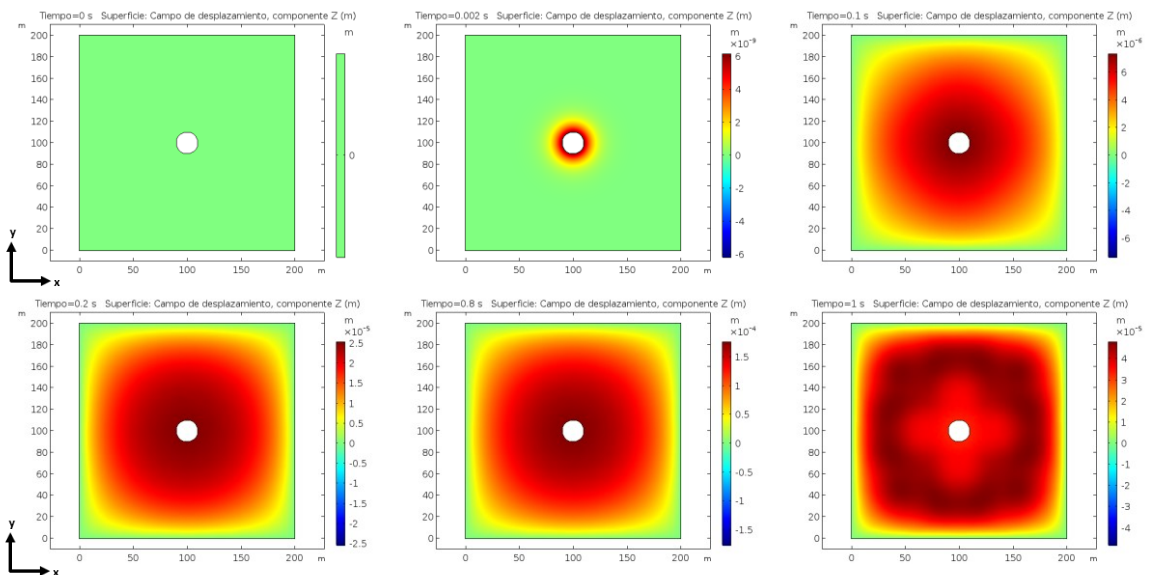


Figura 3.4 Campo de desplazamiento en la componente Z (m) en la superficie del modelo numérico del volcán Stromboli (1:1), para un $\tau_{rup} = 0.2$ s.

A diferencia del caso anterior en $t = 1$ s en la segunda fila la tercera imagen se aprecia que el desplazamiento es positivo con respecto al eje vertical (ver Figura 3.2), ya que el tiempo de caída

es mayor. Y el desplazamiento en $t_{espe} = 0.6 \text{ s}$ del orden de los 0.2 mm luego al aplicar la deflación es del orden $5 \mu\text{m}$ (en $t = 1 \text{ s}$).

Se analizo en el modelo numérico del volcán Stromboli variando por tercera vez el tiempo de caída, para este caso es de $\tau_{rup} = 0.4 \text{ s}$ para el campo de desplazamiento en **R** en la superficie de la simulación (1:1):

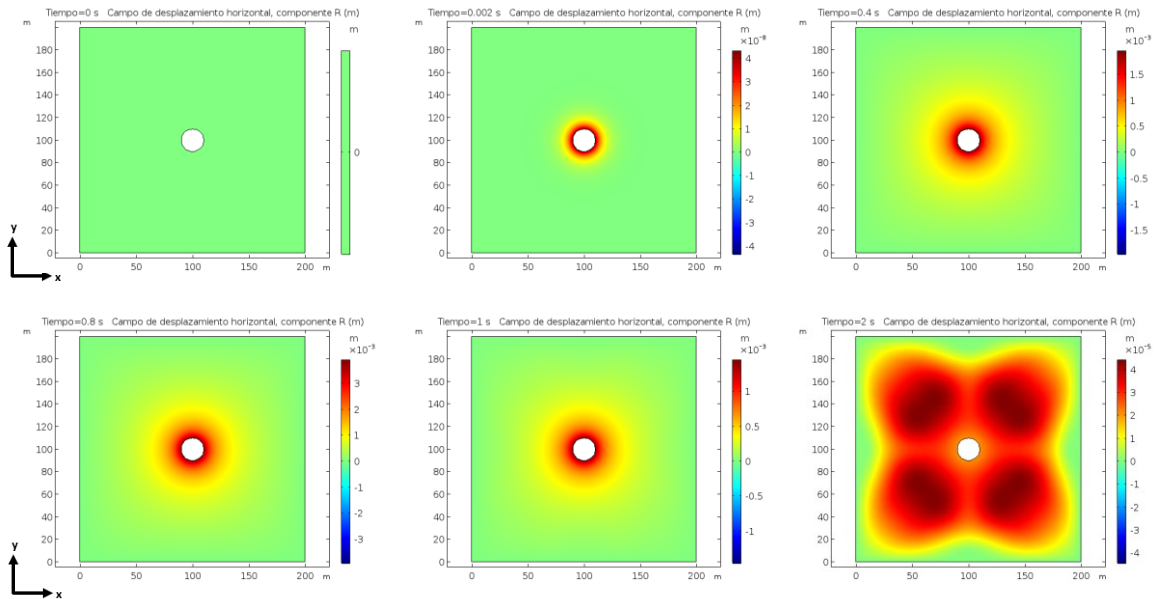


Figura 3.5 Campo de desplazamiento en **R**, en el eje XY en la superficie con un tiempo de caída de $\tau_{rup} = 0.4 \text{ s}$.

En este caso el tiempo de espera en 0.6 segundos el desplazamiento es mayor de 4 mm , y luego liberar la presión con la ecuación 2.4 va decayendo el desplazamiento como se ve en la Figura 3.5 la última imagen de la segunda fila en $t = 2 \text{ s}$ el desplazamiento es de $5 \mu\text{m}$.

Para el campo de desplazamiento en la componente vertical (**Z**) con un tiempo de caída igual a 0.4 s en la superficie del volcán (Figura 2.18), el resultado es el siguiente:

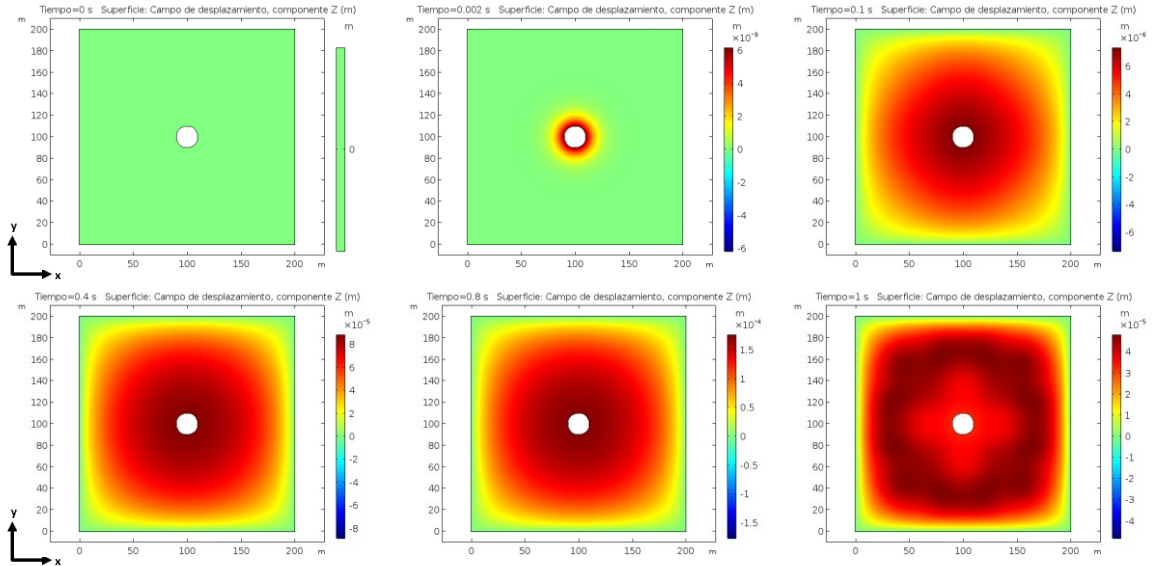


Figura 3.6 Desplazamiento en la componente vertical (Z), para un $\tau_{rup} = 0.4$ s en la superficie del modelo.

En este caso también el mayor desplazamiento es del orden de los 0.2 mm en el tiempo de espera de 0.6 segundos y luego provoca una deflación, lo cual su desplazamiento va decreciendo en un tiempo de 2 s en 5 μm .

Ahora para un tiempo de caída de $\tau_{rup} = 0.6$ s el desplazamiento vertical es de 4 mm para el tiempo de espera 0.6 segundos y la deflación es de 5 μm :

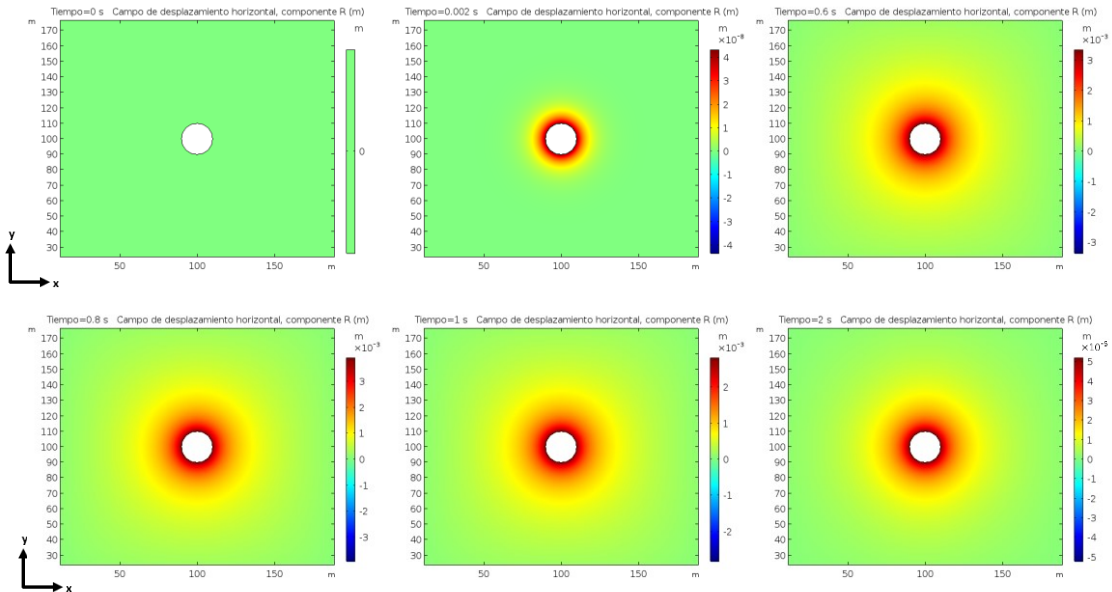


Figura 3.7 Campo de desplazamiento en R, para un $\tau_{rup} = 0.6$ s en la superficie del modelo numérico del volcán Stromboli (1:1).

Para el campo de desplazamiento en la componente vertical de la superficie (**Z**) para este tiempo de caída y una presión de 10 MPa el resultado es el siguiente:

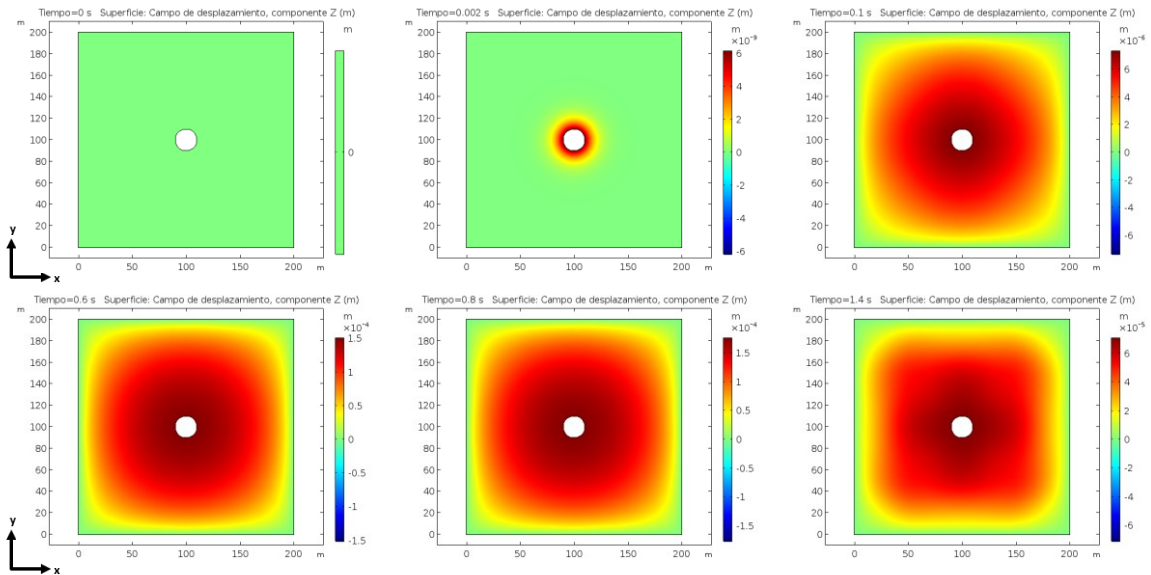


Figura 3.8 Campo de desplazamiento en Z para $\tau_{rup} = 0.6$ s del modelo numérico del volcán Stromboli (1:1).

Se ve que el mayor desplazamiento al igual que los tres casos anteriores es del rango 0.2 mm y luego al aplicar la ecuación 2.4 el conducto produce una deflación y va decreciendo su desplazamiento $7 \mu m$.

Con las mismas propiedades del tiempo de espera anterior (Modulo de Young, Densidad, Coeficiente de Poisson, Presión, condiciones de borde (punto 2.3.4.3), escala de imágenes y tiempo de estudio) pero con un tiempo de caída de $\tau_{rup} = 1$ s, el campo de desplazamiento en **R** en la superficie en el eje (XY) es lo siguiente:

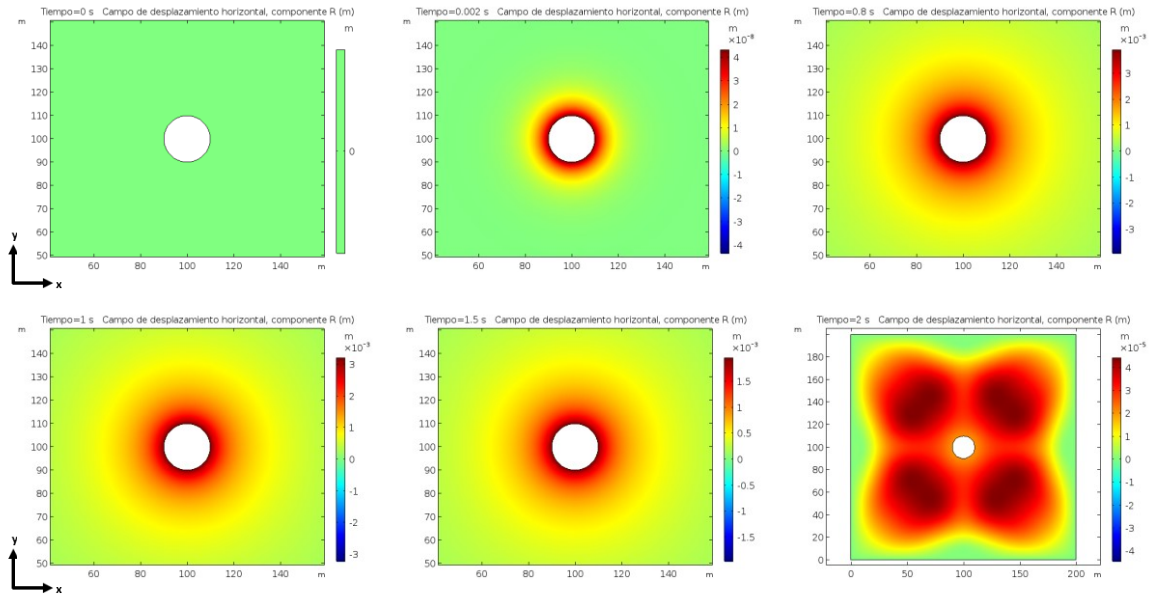


Figura 3.9 Desplazamiento de la componente R , para el modelo número (1:1) para un tiempo de caída de $\tau_{rup} = 1$ s y un DP= 10 MPa.

A diferencia de los tiempos de caída anteriores, el desplazamiento máximo del rango 4 mm pero hasta un mayor tiempo de $t = 1$ s y no decae rápidamente, ya que el tiempo de caída es un poco más lento, lo que pasa que la deflación es más lenta, aunque en $t = 2$ s se ve en la tercera imagen de la segunda fila que el desplazamiento disminuye en el conducto de $5 \mu\text{m}$.

Para el campo de desplazamiento en Z , el resultado se mantiene hasta un tiempo de 1 segundo el mayor desplazamiento alrededor de los 0.2 mm, ya que la caída de tiempo es mayor y se demora más en liberar toda la presión en el conducto.

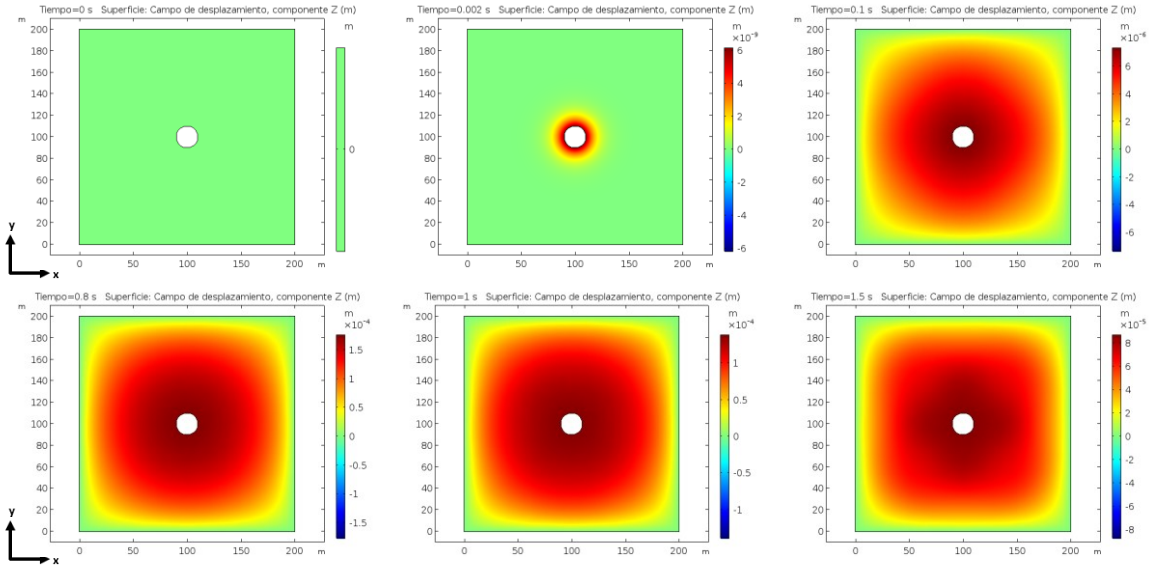


Figura 3.10 Desplazamiento de la componente vertical, para el modelo número (1:1) para un tiempo de caída de $\tau_{rup} = 1$ s y un DP= 10 MPa.

3.2.1.2 Conclusión

Para cada caso al aplicar tiempos de caídas distintos la deformación máxima de conducto radialmente es de 4 mm en el eje horizontal de la superficie (R), pero al aplicar la deflación en un tiempo mayor de 1.5 s los desplazamientos son distintos, debido a que la deformación depende del tiempo de caída como $\tau = 1/\sqrt{\delta}$, donde δ es el desplazamiento provocado en el conducto. A mayor deformación menor es el tiempo de caída (Sánchez, 2014).

En la componente vertical de la superficie (Z) el mayor desplazamiento al aplicar la sobrepresión es de 0.2 mm , pero al igual que el caso anterior al liberar la presión sus desplazamientos son de $3\text{ }\mu\text{m}$ para el primer tiempo de caída ($\tau_{rup} = 0.1\text{ s}$), para el caso del último tiempo de caída ($\tau_{rup} = 1\text{ s}$) es de $8\text{ }\mu\text{m}$.

Al comparar estos datos obtenidos en nuestra simulación y comparados con datos extraídos en terreno por la Università degli studi Firenze (Laboratorio de Geofísica Experimental) del volcán Stromboli, es necesario para que exista una deformación observable (*amplitud de $\sim 10^{-3}\text{ m}$*), debe ser inducida por una caída de presión de 10 MPa (Ripepe R. G., 2010).

A continuación, se graficó en COMSOL el desplazamiento horizontal en la superficie, con respecto al tiempo de estudio de la simulación (1:1) del volcán Stromboli:

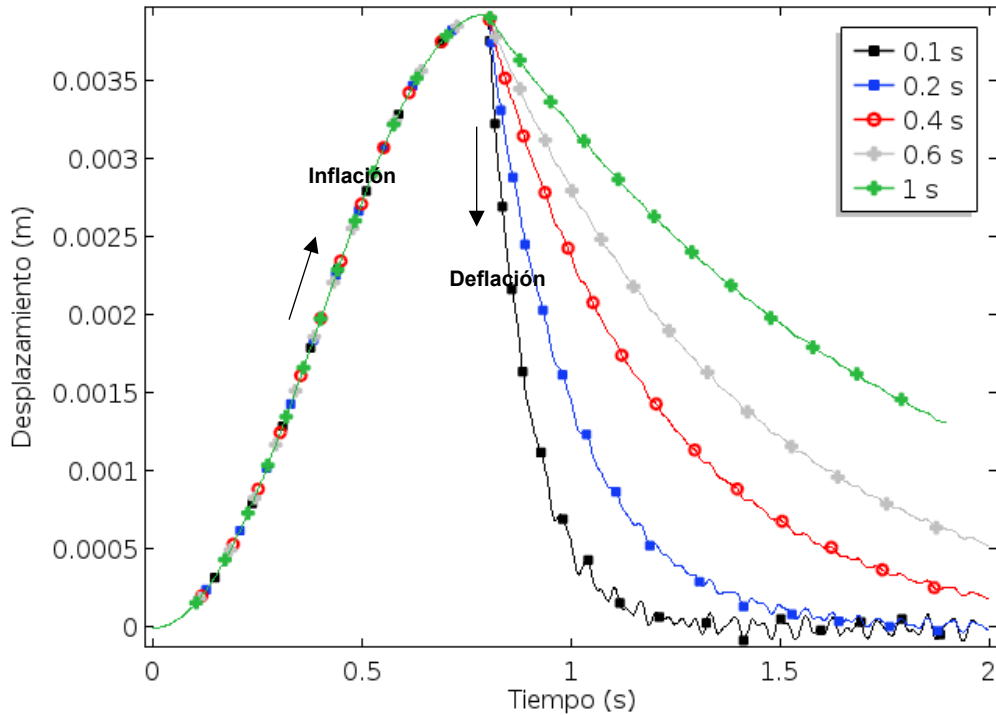


Figura 3.11 Gráfico de desplazamiento horizontal (R) en el punto MP10, alrededor del conducto (ver Figura 2.12) para los distintos tiempos de caída ($\tau_{rup} = 0.1, 0.2, 0.4, 0.6$ y 1 s) al aplicar la inflación-deflación en la simulación.

En la *Figura 3.11* se aprecia cuando el tiempo de caída es $\tau_{rup} = 0.1, 0.2$ y 0.4 s, se forman “ondas” debido a la deflación del sistema cuando el tiempo de espera ($t_{espe} = 0.6$ s) va decayendo, además cuando $\tau_{rup} < t_{espe}$ se esperaba ver cambios en el comportamiento lineal, a diferencia para el caso cuando $\tau_{rup} \geq t_{espe}$ cae la amplitud de la señal y la energía total del sistema, por eso no se aprecian ondas para los tiempos mayores que el de espera ($\tau_{rup} = 0.6$ y 1 s).

Para muchas mediciones, tanto acústicas como sísmicas, es difícil tener una ecuación que relacione directamente las múltiples mediciones, que incluyen ruido, pérdidas, etc. Los vulcanólogos recurren entonces a la inversión, que es una forma matemática de estimar una respuesta, verificarla en función de las observaciones y modificarla hasta que sea aceptable. Para poder hacer este tipo de modelado en este problema, el conducto volcánico es considerado como resonante (Buckinham, 1996) y así pueden estimar la sobrepresión dentro del conducto en el caso del volcán Stromboli (Taddeucci, 2012).

COMSOL tiene la opción de dar las frecuencias propias de cada modelo (como un estudio), se escoge el número deseado de frecuencias propias del modelo (en este caso fueron 6) son de $\nu = 7.34, 9.26, 9.81, 9.82, 10.14$ y 10.15 Hz. Al comparar con la *Figura 3.11* el periodo de los

primeros ciclos ($n = 10$) es de 1.5, donde su primera frecuencia fundamental es de $\nu_0 = 6 \text{ Hz}$, y luego con $n = 12$ y con un tiempo de 1.6 s es de $\nu = 7.69 \text{ Hz}$.

La frecuencia fundamental del tubo es de $\nu = 0.3 \text{ Hz}$, teniendo la información de los modos normales de modelo del párrafo anterior, podemos deducir que la “onda sísmica” que se propaga por el sistema es consecuencia de la resonancia en el conducto (Anexo 4.1). Es decir, es difícil cuantificar cual es el tipo de onda (Volumen o superficial) que se propaga en el sistema debido a la excitación del conducto debido a la presión colocada. Si bien, al analizar las frecuencias del modelo podemos decir que es un tipo de tremor de alta frecuencia (ver punto 1.2.1), pero solo es una suposición, debido a que las “ondas sísmicas” producidas es debido a la resonancia del conducto.

3.2.2 Volcán Stromboli: simulación del medio donde se propaga la onda con un material blando a escala (1:200).

Se simula a escala (1:200) el conducto y también las propiedades del medio en el cual se propaga la onda. Las características impuestas del material simulado en el programa COMSOL son las de un material elástico de densidad de $1190 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ (**Tabla 2.6**), con las mismas condiciones de borde del sistema anterior (1:1), pero cambiando la geometría del sistema (ver *Figura 2.10 b*) y la presión que también se escala a 10 kPa .

El estudio realizado es temporal de rango es $0 - 0.03 \text{ s}$, con un paso de 1 ms , y un tiempo de espera calculado con respecto al largo del conducto escalado ($L = 1.145 \text{ m}$) de $t_{espe} = 4 \text{ ms}$. El número de elementos resueltos para este caso fueron de 1.124.994 y la duración de la simulación es de 40 minutos.

3.2.2.1 Desplazamiento en la goma Elite Double 8

Para determinar el campo de desplazamiento en el conducto (inflación-deflación) en la superficie *Figura 2.18* para el caso de una inflación lenta (punto 2.3.2.3) se configuraron cuatro tiempos de caídas distintos ($\tau_{rup} = 0.8, 1, 2$ y 6 ms).

En el primer caso para un $\tau_{rup} = 0.8 \text{ ms}$ se graficaron dos tipos de campo de desplazamiento, en **Z** y en la componente radial **R** ($R = \sqrt{X^2 + Y^2}$ m) con un tiempo de espera $t_{espe} = 4 \text{ ms}$. La *Figura 3.12* muestra en campo de desplazamiento de **R** en el eje **x** de $0 - 3 \text{ m}$ e **y** de $1.2 - 2.8 \text{ m}$ como:

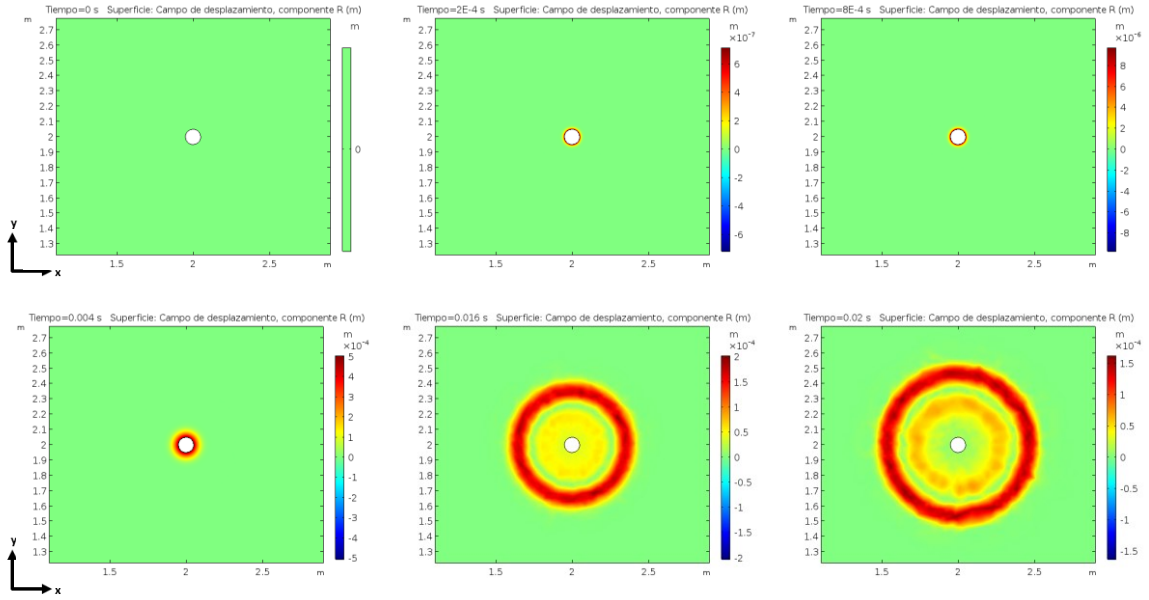


Figura 3.12 Desplazamiento horizontal (R) en la superficie de la simulación (1:200) del material blando para un tiempo de caída de $\tau_{rup} = 0.8 \text{ ms}$ y un DP = 10 kPa.

Se aprecia que existe un frente de onda al aplicar la sobrepresión en el conducto en la vertical de la superficie, luego de liberar la presión. El desplazamiento es máximo cuando el conducto se libera la sobrepresión en un tiempo de espera 4 ms, es alrededor de 0.55 mm y posteriormente al liberar la presión su desplazamiento empieza a contraerse alrededor de 0.15 mm.

Para el caso del desplazamiento vertical en el eje XY, se realizó la misma metodología para graficar la superficie en 2D (ver Figura 2.17):

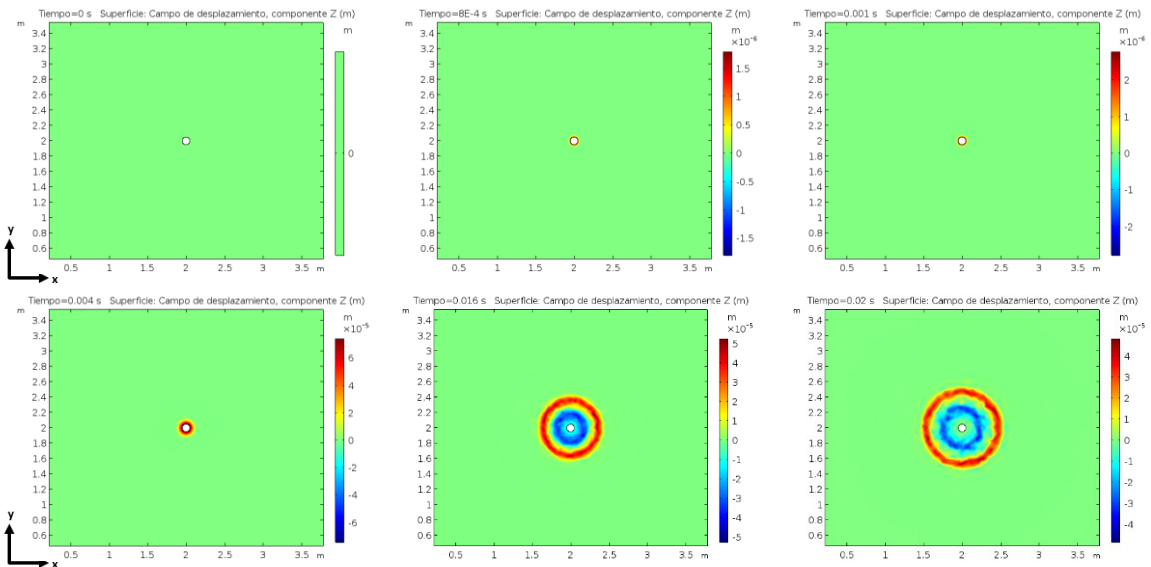


Figura 3.13 Campo de desplazamiento en Z, para la simulación (1:200) con un material blando para un tiempo de caída $\tau_{rup} = 0.8 \text{ ms}$ y un DP = 10 kPa.

La simulación al igual que en el caso anterior en $t_{espe} = 4$ ms al liberar la presión alcanza el mayor desplazamiento para un tiempo de caída de 0.8 ms de alrededor de los 7 μm . Y en las imágenes de la superficie se ve que existe un frente de onda radial en el modelo numérico del volcán Stromboli escalado con un material blando, disminuyendo su presión con respecto al tiempo su desplazamiento es de 3 μm . Se distingue un “overshoot” como la parte azul del desplazamiento, debido a que al liberar la presión sobrepasa el punto de equilibrio y produce una oscilación en la superficie (Anexo 4.4).

Ahora, para un tiempo de caída mayor $\tau_{rup} = 1$ ms el campo de desplazamiento R , para un tiempo de espera $t_{espe} = 4$ ms, su mayor desplazamiento es de 0.55 mm, luego al liberar la presión el desplazamiento se contrae en un tiempo de 0.02 s de 0.15 mm, como se nota a continuación:

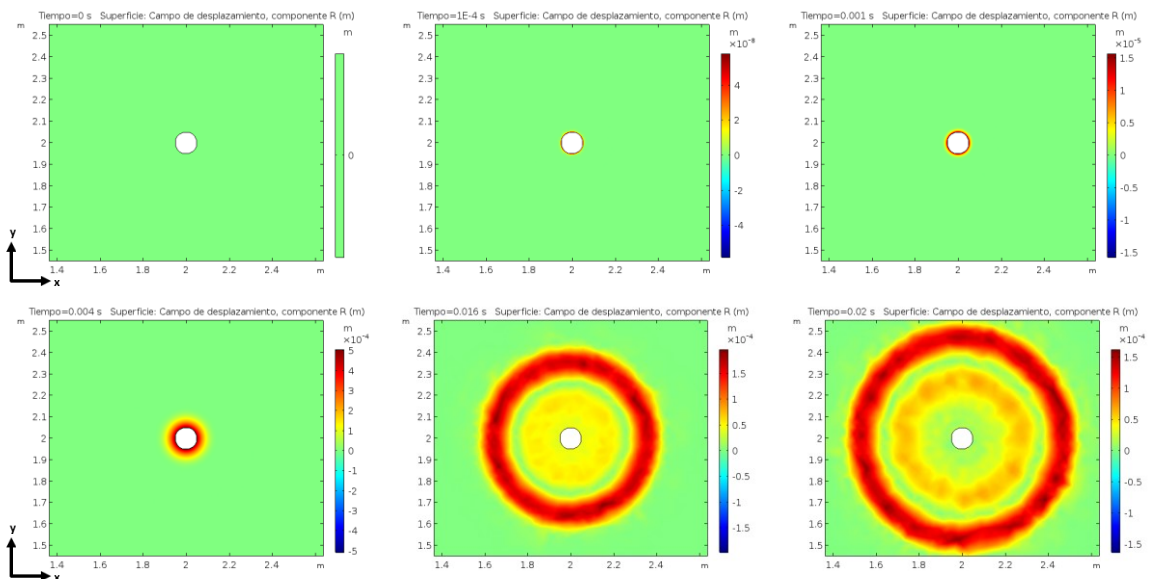
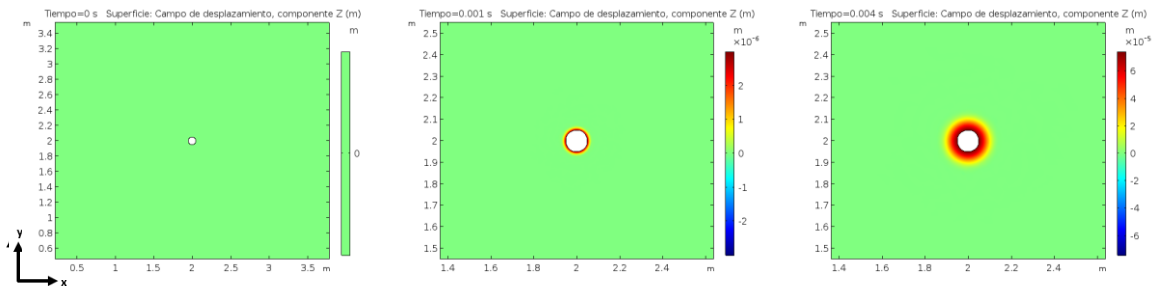


Figura 3.14 Campo de desplazamiento en la componente horizontal (R), para la simulación (1:200) del material blando para un $\tau_{rup} = 1$ ms y un $DP = 10$ kPa.

Para el campo de desplazamiento vertical en la superficie del modelo numérico, se puede apreciar que existe un desplazamiento alrededor de toda la superficie de forma de onda radial e el conducto y la superficie de 7 μm :



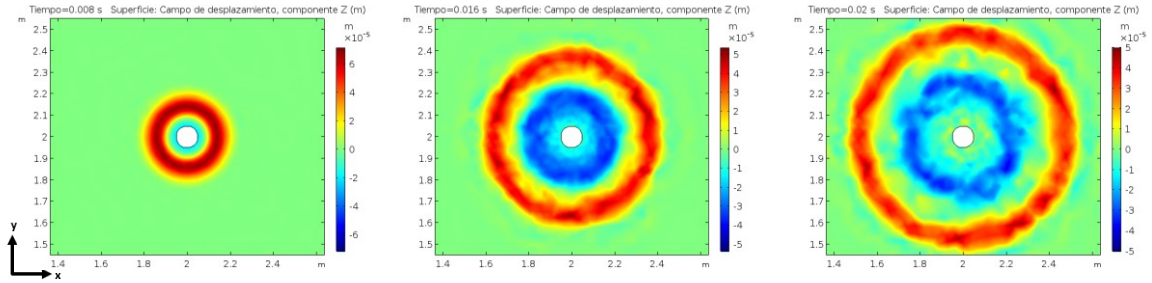


Figura 3.15 Campo de desplazamiento en la componente vertical de la superficie, para un tiempo de caída de $\tau_{rup} = 1$ ms, del modelo (1:200) del material blando.

La deflación al liberar la presión el desplazamiento $3 \mu\text{m}$ a un tiempo de 0.02 s; como el material es blando a diferencia de la roca basáltica, se aprecia en la barra de color que es negativo, debido a que se deforma en la superficie y se hunde.

En un tiempo de caída de $\tau = 2$ ms se graficaron los campos de desplazamiento, en Z y en la componente radial R ($R = \sqrt{X^2 + Y^2}$ m) con un tiempo de espera $t_{espe} = 4$ ms. La Figura 3.16 muestra en campo de desplazamiento de R en el eje x de $1.2 - 2.7$ m e y de $1.4 - 2.6$ m como:

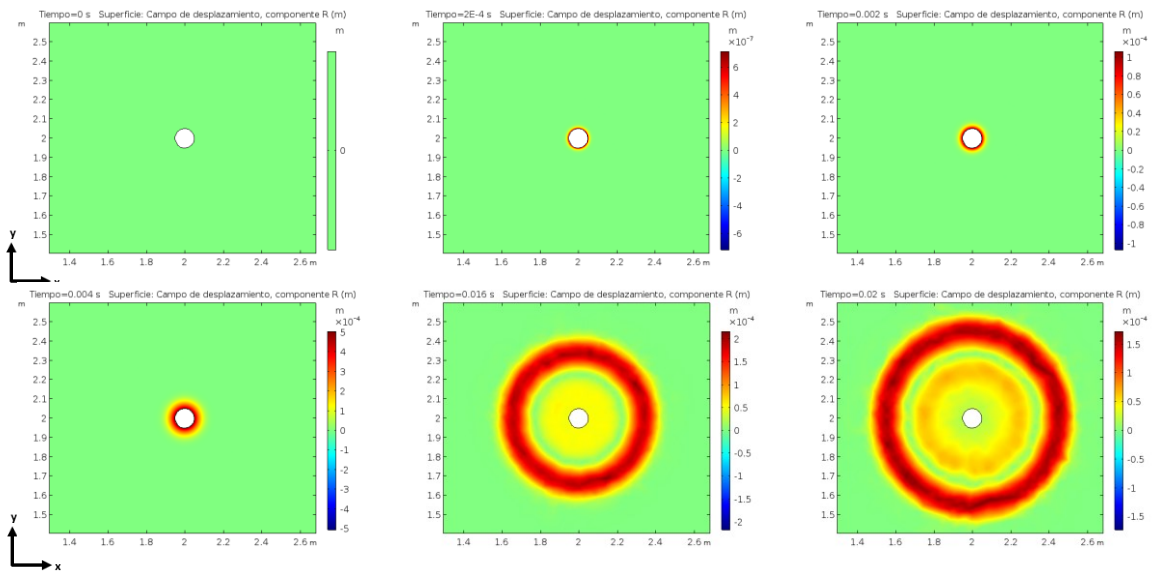


Figura 3.16 Campo de desplazamiento en la componente horizontal (R), en la simulación (1:200) del material blando para un $\tau_{rup} = 2$ ms y un $DP = 10$ kPa.

Se aprecia en las imágenes de la superficie en 2D, que el desplazamiento es máximo para 0.6 mm (primera imagen de la segunda fila) y luego al liberar la presión el conducto se contrae con un desplazamiento de 0.15 mm. Para el campo de desplazamiento en la componente vertical en (Z), el resultado es el siguiente:

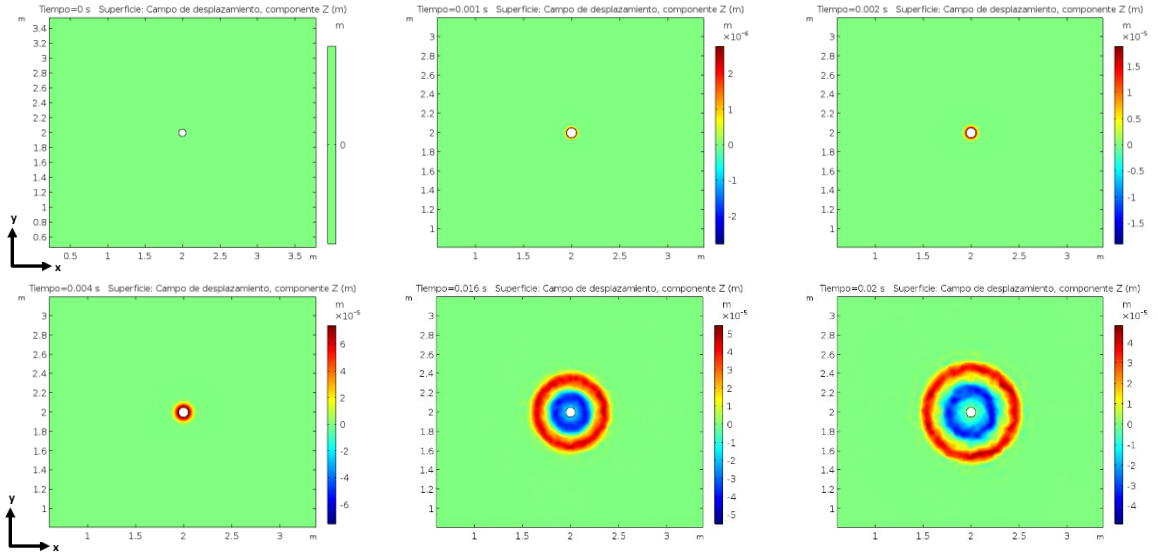


Figura 3.17 Campo de desplazamiento en la componente Z, para un tiempo de caída $\tau_{rup} = 2$ ms y un DP = 10 kPa para la simulación (1:200) de un material blando.

En este caso el mayor desplazamiento en la superficie vertical es de $7 \mu\text{m}$ en un tiempo de 4 ms, luego decae con el tiempo en $3 \mu\text{m}$.

Analizando el último tiempo de caída en $\tau_{rup} = 5$ ms, el desplazamiento en la componente horizontal en R es de:

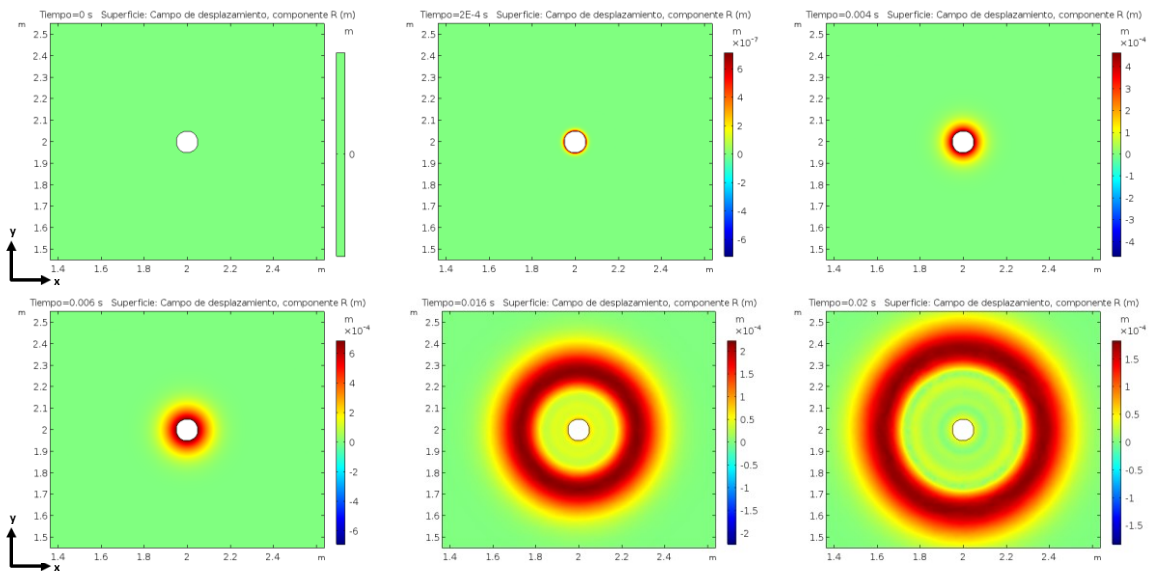


Figura 3.18 Campo de desplazamiento en R, la simulación (1:200) del material blando, con un $\tau_{rup} = 5$ ms y un DP = 10 kPa .

El campo de desplazamiento en Z, en la superficie del modelo numérico del volcán Stromboli (1:200) del material Elite Double 8, es de:

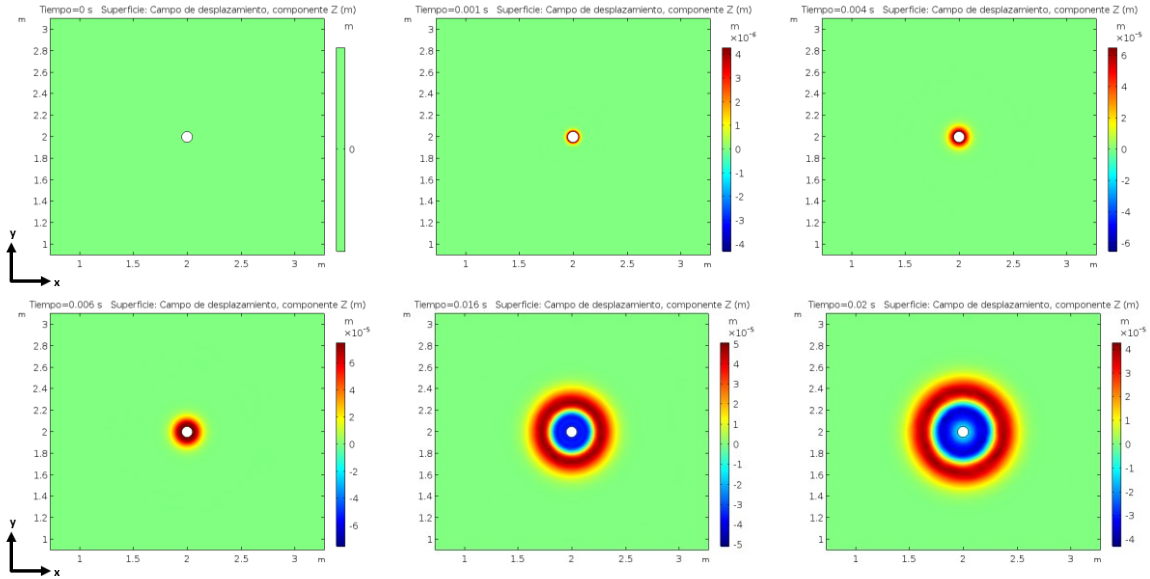


Figura 3.19 Campo de desplazamiento en la componente vertical para el modelo (1:200) del material blando, con un tiempo de caída $\tau_{rup} = 5 \text{ ms}$ y un DP = 10 kPa .

El mayor desplazamiento en la superficie horizontal es de 0.7 mm y al liberar la presión es de 0.15 mm . En cambio, en la componente vertical el desplazamiento al aplicar la sobrepresión es de $7 \mu\text{m}$ para un tiempo de 5 ms , al liberar la presión el desplazamiento es de $3 \mu\text{m}$.

3.2.2.2 Conclusión desplazamiento

Al aplicar tiempos de caídas distintos la deformación máxima de conducto radialmente es de 0.55 mm en el eje horizontal de la superficie (**R**) para $\tau_{rup} = 0.8 \text{ y } 1 \text{ ms}$, en cambio para los tiempos de caída $\tau_{rup} = 2 \text{ y } 5 \text{ ms}$ el desplazamiento es mayor, a diferencia de lo que pasa con la simulación (1:1), aunque al aplicar la deflación en un tiempo mayor de 6 ms los desplazamientos son distintos , debido a que la deformación depende del tiempo de caída como se vio en el resultado de la simulación (1:1).

En la componente vertical de la superficie (**Z**) el mayor desplazamiento al aplicar la sobrepresión es de $7 \mu\text{m}$ pero al igual que el caso anterior al liberar la presión sus desplazamientos disminuyen a $3 \mu\text{m}$ para todos los tiempos de caída.

La mayor parte de la energía sísmica que puede tener un volcán queda atrapada en el conducto volcánico lleno de magma y produce resonancia, y solo una pequeña parte de esta energía es liberada y se propaga a través del medio sólido que lo rodea y puede ser medida como una señal sísmica (Neuberg, 2006).

Se aprecia en todas las imágenes de los distintos tiempos de caída ($\tau_{rup} = 0.9, 1, 2 \text{ y } 6 \text{ ms}$), una onda propagativa en la superficie del volcán con una longitud de onda de $\lambda_{goma} = \sim 2 \text{ m}$, además

de visualizar en la componente vertical un *overshoot* (ver que sobrepasa el punto de equilibrio al aplicar la sobrepresión y luego liberación de esta, por lo que produce una oscilación en el modelo. En el estudio de frecuencias propias se seleccionó que mostrara solo seis modos de resonancia $\nu = 4.08, 4.37, 4.98, 5.85, 6.01, 6.32 \text{ Hz}$ y la frecuencia fundamental del conducto es de $\nu_o = 60 \text{ Hz}$ (ver Anexo 4.2).

Al igual que en el caso de la componente horizontal, existe un desplazamiento radial en la superficie, pero no podemos identificar si es una onda de tipo superficial o de volumen, ya que al colocar restricciones en las paredes esta “onda sísmica” se concentra solo en la superficie del modelo numérico (1:200) del material Elite Double 8.

Aunque para ver en más detalle el desplazamiento horizontal, se graficó con respecto al tiempo al igual que la simulación anterior 1:1 (ver *Figura 3.11*):

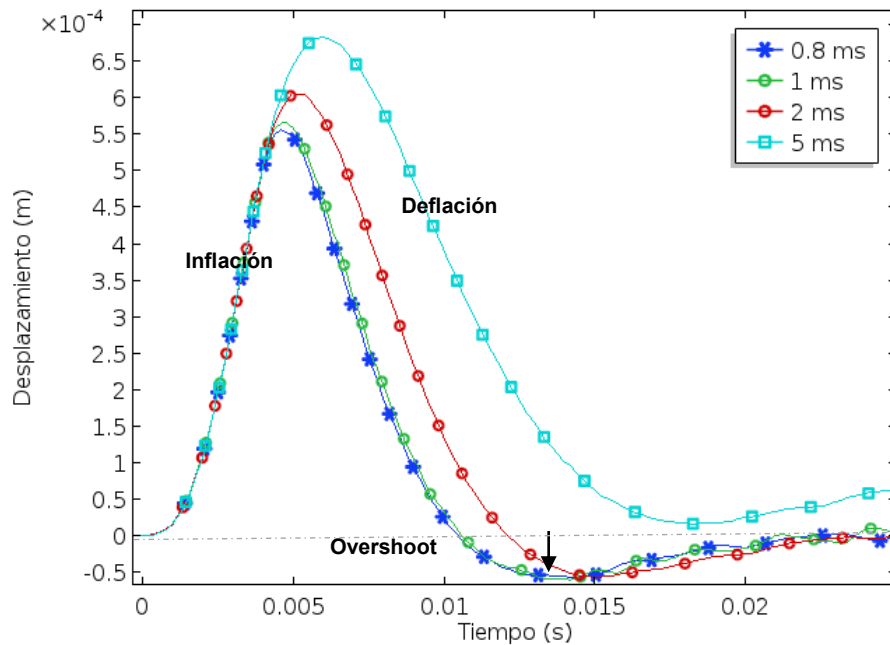


Figura 3.20 Grafico de desplazamiento en la componente vertical de la simulación (1:200) con un material blando Elite Double 8 dado por el software COMSOL Multipysics.

Se aprecia cuando el tiempo de caída es $\tau_{rup} = 0.8, 1 \text{ y } 2 \text{ ms}$, se forman “ondas” debido a la deflación del sistema cuando el tiempo de espera ($t_{espe} = 4 \text{ ms}$) va decayendo, pero para el caso cuando se produce el overshoot la señal empieza a oscilar en estos tres casos, además cuando $\tau_{rup} < t_{espe}$ se esperaba ver cambios en el comportamiento lineal, a diferencia para el caso cuando $\tau_{rup} \geq t_{espe}$ cae la amplitud de la señal y la energía total del sistema, por eso no se aprecian ondas para los tiempos mayores que el de espera ($\tau_{rup} = 0.5 \text{ ms}$). Además, como el

material tiene mayor elasticidad que en el caso de la simulación (1:1) el overshoot para tiempos mas lentos produce un mayor desplazamiento por la deflación del sistema (ver *Figura 3.21*) .

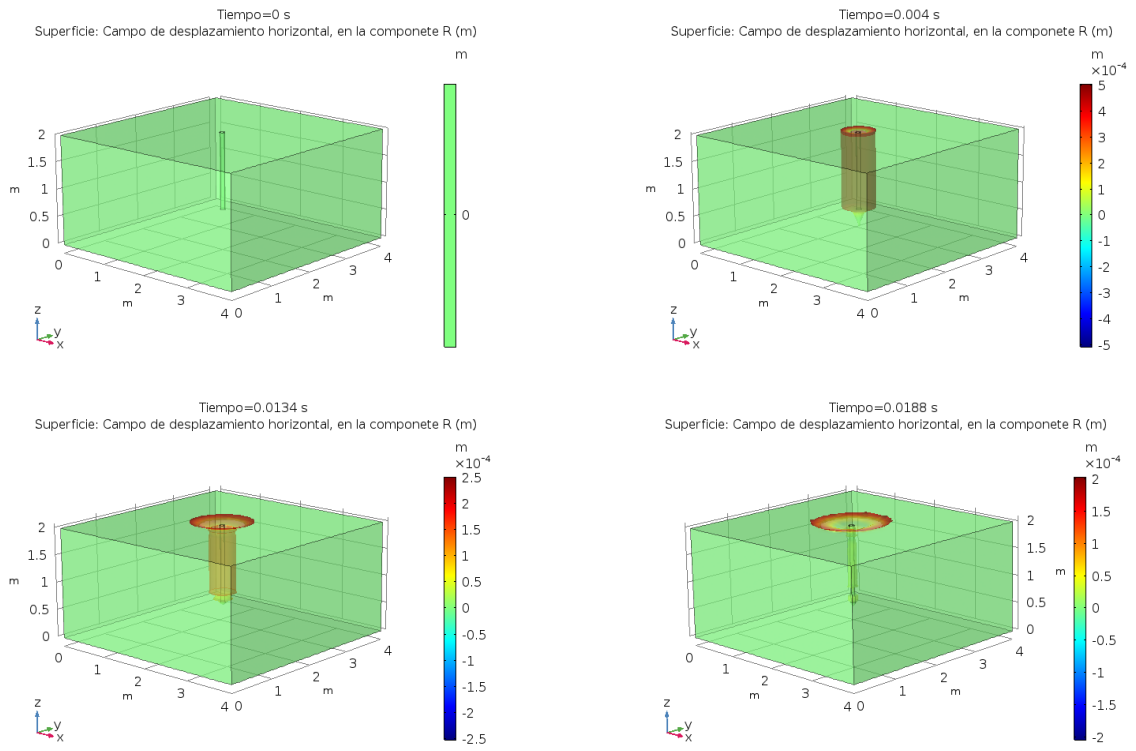


Figura 3.21 Desarrollo del desplazamiento en el conducto cuando se produce el *overshoot* por la liberación de la sobrepresión para un tiempo de caída de $\tau_{rup} = 0.5 \text{ ms}$.

Conclusión

Tras el trabajo realizado y el estudio de resultados se puede llegar a una serie de conclusiones.

Como podemos recordar el objetivo principal de este trabajo era la creación a través del programa COMSOL Multiphysics de un modelo numérico del volcán Stromboli con dimensiones reales y escala.

Tras el proyecto expuesto, podemos concluir que COMSOL ha resultado una herramienta válida tanto para la creación del modelo buscado, como para la obtención y estudio de los resultados que se deseaban, aportándonos incluso diversas herramientas como gráficos 2D y 3D que complementan una mejor visión de los resultados. Añadiendo además que nos ha permitido cumplir nuestro objetivo de crear un modelo.

Con la idea de comprender la física asociada a la sobrepresión aplicada por una burbuja gigante de gas en el volcán Stromboli, se realizó un modelo numérico a una cavidad volcánica para poder estudiar de forma controlada este tipo de actividad. Para el análisis de desplazamiento y de señales sísmicas en nuestro modelo, se tuvo en cuenta que el volcán Stromboli es un sistema mucho más complejo, por lo que se utilizaron distintas variables (reología del volcán, presión, el tiempo de caída de presión, las dimensiones del conducto, datos del desplazamiento en terreno) que ayudaron a entender aún más las características eruptivas de la actividad estromboliana.

Un punto clave para el análisis de nuestro modelo con los datos en terreno, es la información que puede traer la presión acústica monitoreada en volcanes. Donde se encontró para el caso de la simulación 1:1 producto de la liberación de la presión (10 MPa) en el conducto sus modos de resonancia, regidos principalmente por la geometría del conducto (modos longitudinales), están en el rango infrasónico ($< 20 \text{ Hz}$). Pero, no podemos definir si existen ondas sísmicas generadas por la liberación de la presión (“explosión de la burbuja”) en el conducto, aunque en algunos modelos proponen que por medio de la resonancia del conducto volcánico, el antinodo de presión puede ser una fuente de señales sísmica llamada “ghost seismic source”, sin embargo como se mencionó en este escrito debido en algunos volcanes muestran, que la aparente fuente de sismicidad sería la resonancia en el mismo conducto volcánico (ver *Figura 2.3*).

En el caso del modelo numérico (1:200) del material blando Elite Double 8 con una presión 10 kPa , se aprecia que existe una onda propagativa en la superficie, pero no podemos definir si es una onda de tipo superficial o de volumen, debido a las condiciones de borde que colocamos a nuestro sistema (punto 2.3.4.4) que hace que en algunos contornos este restringida, es decir los desplazamientos son ceros en todas las direcciones. Y si hay grados de libertad de rotación, también son cero.

Aún falta por entender varios puntos de este estudio, pero gracias a la simulación es un buen pie para comenzar a explorar el acoplamiento entre estas dos señales, ya que son estos datos los que ocupan los vulcanólogos para comprender mejor y anticiparse a las erupciones volcánicas, que en un país como Chile, son tan recurrentes.

Trabajo a Futuro

Geometría

- **Focalización en el manto del volcán**

Para este punto se quiere cambiar la geometría del modelo numérico del volcán Stromboli, como un cono, para ver si existen ondas propagativas en el manto del volcán, ya que la situación en terreno los vulcanólogos colocan sensores alrededor del cráter y en la superficie del volcán (manto), así no colocar la condición de borde de paredes fijas, como se realizó con las simulaciones anteriores (1:1 y 1:200)

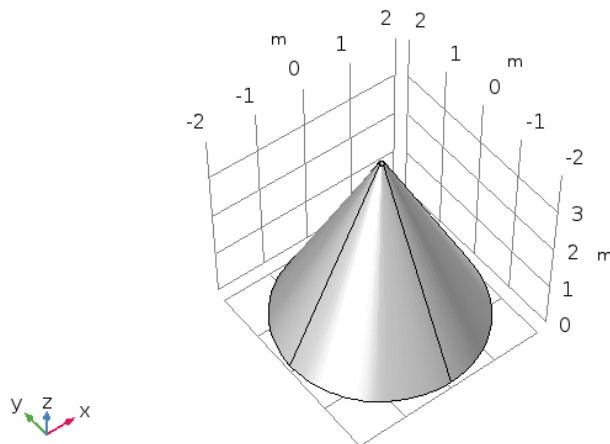


Figura 3.22 Modelo numérico del volcán Stromboli escalado para el análisis del manto.

- **Topografía del volcán Stromboli**

Se quiere realizar una simulación de la topografía del modelo numérico del volcán Stromboli en COMSOL, con su módulo de Young $30 [GPa]$, densidad de $2900 [kg/m^3]$ y coeficiente de poisson 0.2 . La topografía será descargada de AutoCAD, para ver si se puede analizar los desplazamientos en el conducto volcánico. El modelo es una imagen en 3D:

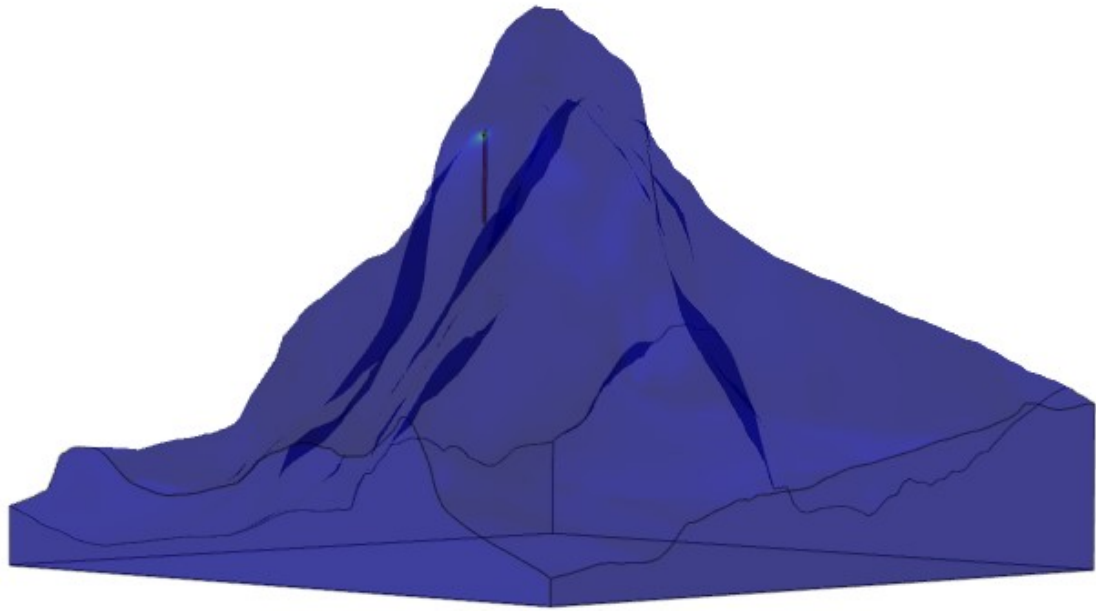


Figura 3.23 Modelo numérico de la topografía del volcán Stromboli en COMSOL.

En la imagen se puede ver la topografía del volcán Stromboli, donde se quiere analizar a futuro, su desplazamiento, energía, las ondas sísmicas, etc.

Además, el siguiente nivel de estudio es incluir datos geofísicos registrados como el flujo de gas, química e inclinación, así como datos vulcanológicos físicos, como los contenidos en las burbujas de gas. Con la restricción total del comportamiento y la dinámica del sistema (tiempo de caída), se pueden aplicar a modelos y enfoques experimentales para ajustar la gama completa de datos, produciendo modelos robustos que prueban los posibles conductos y escenarios de origen durante erupciones volcánicas explosivas estrombolianas como el volcán Villarrica en Chile.

4 Anexos o Apéndices

4.1 Resonancia

La resonancia acústica consiste en la interferencia constructiva de ecos y de la natural respuesta de fluidos confinados. La resonancia acústica es similar a la idea de producir tonos armónicos con instrumentos musicales [35] y es un efecto inevitable en la mayoría de los sistemas volcánicos debido a su geometría (conducto volcánico y cámara magmática). Si la perturbación de la presión ocurre en algún volumen del fluido confinado, la energía acústica es parcialmente atrapada y el volumen resonante tiene su frecuencia propia natural. Como la energía elástica escapa desde esta región, el resultado es una señal sísmica y una señal acústica con una resonancia y atenuación implícita a las características del volumen. Esto permite el modelamiento de la forma de la onda, tanto sísmica como acústica que puede ayudar a inferir la geometría.

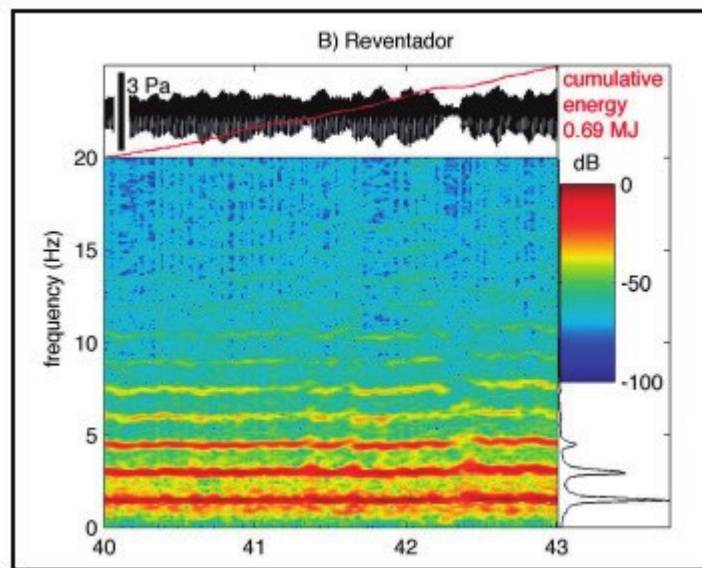


Figura 4.1 Volcán Reventador, Ecuador. Se muestra la señal acústica completa para 30 minutos, la energía acumulada y su densidad espectral. Se puede observar que existe una resonancia, debido a los peaks regulares en el espectro de energía.

4.2 Cavity resonante

El conducto volcánico se modela como una cavidad resonante, como el campo de presión asociado a una onda acústica. La ecuación que gobierna la onda acústica en el sistema está dada por:

$$\nabla^2 P - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = 0 \quad (4.1)$$

donde c es la velocidad del sonido del aire (~ 343 [m/s]), p es la presión acústica definida como la diferencia entre la presión instantánea y la presión atmosférica (o en equilibrio) P_0 ,

$$p = P - P_0 \quad (4.2)$$

La repentina caída de presión produce un frente de onda que viaja a lo largo del tubo. Denominaremos como τ al tiempo de propagación de este frente de onda, dado por el largo del tubo L y la velocidad del sonido c . El tiempo de caída de la presión dentro de la cavidad τ_{prop} , se mide en la primera bajada de presión (punto (1)).

$$\tau = \frac{L}{c} \quad (4.3)$$

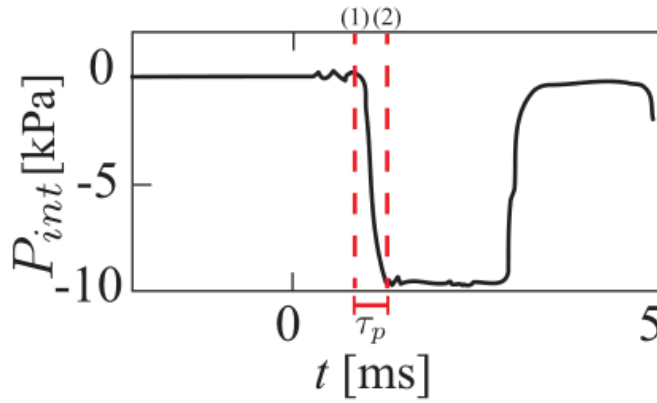


Figura 4.2 Medición tiempo de caída de presión τ_{prop} . Este tiempo se mide en la primera bajada de presión. La presión interna modelada en la simulación dentro de la cavidad, $P(t)$, en el régimen lineal (Vidal, 2006), está descrita por:

$$P(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{4\Delta P}{\pi} \sin\left[\frac{2\pi V_n t}{2n+1}\right] \exp(-t/\tau_n) \quad (4.4)$$

donde τ_n es el tiempo de amortiguación de la señal y depende del tiempo de amortiguación debido a la disipación viscosa en las paredes τ_n^v , la reflexión en el dónde del tubo τ_n^r , y la radiación fuera de la cavidad, τ_n^z , dados por:

$$\tau_n^v = \frac{\phi}{2} \sqrt{\frac{\pi \eta_v (1 + (Y-1) P_r^{-0.5})}{v_n^{-1/2}}} \quad (4.5)$$

$$\tau_n^z = 4\pi \frac{c^2}{\phi^2} \frac{2n+1}{\omega^3} \quad (4.6)$$

$$\tau_n^r = \frac{1-r_o}{1+r_o} \frac{1}{4v_n} \quad (4.7)$$

donde $P_r = 0.7$, es el número de Prandtl, r_o es el coeficiente de reflexión en el fondo del tubo, $\eta = 1.5 \times 10^{-5} [m^2/s]$ es la viscosidad cinemática del aire y $\gamma = 1.4$, el calor específico del aire.

En la *Figura 4.2* muestra el tiempo de caída dependiendo del largo del conducto, por lo que se modeliza la presión en la simulación como:

$$P(x, t) = \Delta p \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right) + \delta P \sum_{n=0}^{\infty} a_n \sin[w_n t + \theta_n] \exp(-t/\tau_n^d) \quad (4.8)$$

donde w_n es la frecuencia, a_n es la amplitud y ϕ_n es la fase en el modo n dado por:

$$w_n \equiv (2n + 1) \frac{\pi c}{2L} \quad (4.9)$$

$$a_n \equiv \frac{4 \omega_o}{\pi \omega_n} \frac{(-1)^n}{\sqrt{1+(\omega_n \tau_p)^2}} \quad (4.10)$$

$$\tan(\theta_n) \equiv \frac{1}{\omega_n \tau_p} \quad (4.11)$$

donde además τ_p^d representa la amortiguación de la señal debido a la radiación, dada por

$$\frac{1}{\tau_p^d} = \frac{1}{\tau_n^z} + \frac{1}{\tau_n^r} + \frac{1}{\tau_n^v} \quad (4.12)$$

La señal calculada con el modelo esta dado por $v_o = c/4L$, es la frecuencia fundamental para cada conducto.

Simulación	Frecuencia Fundamental v_o [Hz]
Modelo (1:1)	0.3
Modelo (1:200) Elite double 8	60.3

Tabla 4.1 Frecuencias fundamentales calculadas por el largo del conducto.

Nombre	Expresión	Descripción
c	343 [m/s]	Velocidad del sonido
p_0	7 [MPa]	Sobrepresión
L	1.43 [m]	Largo del conducto
t_0	1 [s]	Tiempo propagacion
γ	1.48	Decaimiento
Φ	0.05 [m]	Diámetro del tubo
η	1.5×10^{-5} [m ² /s]	Viscosidad cinemática del aire
P_r	0.7	Numero de Prandtl
t_{prop}	$2L/c$	Tiempo de propagación
$f_{0_{theo}} = freq$	$c/4L$	Frecuencia de resonancia del conducto
Φ_{in}	$\pi/2$	
t_{theo}	1 [s]	Tiempo de estudio
τ_r	$(1 - r_0)/(1 + r_0) * 1/(4 * freq)$	Tiempo de amortiguación
τ_{visc}	$(\Phi/2)/\sqrt{\pi*\eta*(1+(\gamma-1)*Pr^{(-0.5)})}/freq^{(1/2)}$	Tiempo de disipación en las paredes del tubo
$inv\tau$	$1/\tau_{rad}+1/\tau_r+1/\tau_{visc}$	Tiempo de reflexión del tubo
τ_{un}	$1/inv\tau$	

Tabla 4.2 Frecuencias fundamentales calculadas por el largo del conducto.

4.3 Ondas de Choque

Las ondas de Choque son ondas de sonido con un presión y duración específicas, capaces de propagarse sin perder porcentajes significativos de su energía. A diferencia de la onda ultrasónica de características sinusoidales y propiedades mecánicas longitudinales, las ondas de choque son disarmonicas, tienen características de presión no lineal, una amplitud importante, una duración considerable del pulso y un abrupto frente de onda.

4.3.1 Resonancia de Helmholtz

Un resonador de Helmholtz es una cavidad de pared rígida conectada a la atmósfera a través de una abertura en forma de cuello (Fig. 2.8a). Cuando el fluido es empujado fuera de la cavidad, se crea una baja presión dentro de la cavidad que responde tirando el aire de nuevo, y viceversa. El sistema puede entonces sostener las oscilaciones a una frecuencia dada por:

$$f_h = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_h}{VL_h}}$$

Donde S_h es el cuello de la cavidad, V el volumen de la cavidad, c la velocidad del sonido y L el largo de la cavidad.

Algunas señales acústicas en volcanes fueron interpretadas como resonancias de Helmholtz, debidas a la geometría del cráter parecida a la de un resonador de Helmholtz. Estudios previos de temblores Infrasonicos en Kilauea y Villarrica [42] han vinculado el peak dominante del temblor, a las oscilaciones de Helmholtz de la cavidad por encima del nivel magma en el conducto. El magma desgasifica constantemente en la parte inferior, éxita el volumen y produce una resonancia acústica.

4.4 Oscilaciones en la superficie

En los volcanes, la vibración de un slug que llega a la superficie de un lago de lava puede emitir infrasonidos de alrededor de 7Hz. Al alcanzar la superficie, la burbuja se expande debido a que sobrepasa su punto de equilibrio ("overshoot") y produce una sola oscilación, como un pistón y explota (Figura 4.3).

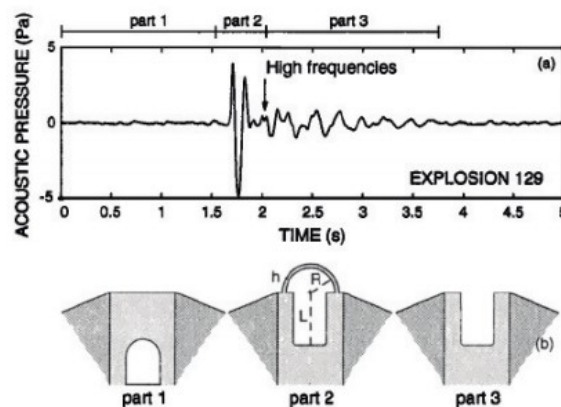


Figura 4.3 a) Señal acústica registrada en Stromboli (Chouet B. , 1988) b) modelo de Vergnolle et al. 1994 para explicar la generación de esta señal.

Referencias Bibliográficas

(s.f.). Obtenido de zhermack: <https://www.zhermack.com/es/product/elite-double-8-es/>

Blackburn, E. A. (1976). Mechanisms and dynamics of strombolian activity. *J. Geo. Soc.* , 429-440.

Buckinham, M. J. (1996). Canonical model of volcano acoustics. *Journal of geophysical Research*.

Canoba, C. . (2004). *Propiedades elasticas de las rocas*.

Chouet, B. (1985). Excitation of a Buried Magmatic Pipe: A Seismic Source Model for Volcanic Tremor. *J. Geophys. Res.*, 13,967–13,992.

Chouet, B. (1988). Resonance of a fluid-driven crack: radiation properties and implication for the source of long-period events and harmonic tremor. *Journal Geophysical Research*, 4735-4400.

Chouet, B. A. (2013). A multi-decadal view of seismic methods for detecting precursors of magma movement and eruption. *Journal Volcanology Geothermal*, 108-175.

Delle Donne, .. D. (2015). Volcano seismicity and ground deformation unveil the gravity-driven magma discharge dynamics of a volcanic eruption. *Nature Communications*.

Global Volcanism Program. (s.f.). Obtenido de <http://www.volcano.si.edu>

Gonnermann H., a. M. (2007). The fluid mechanics inside a volcano. *Annu. Rev. Fluid Mech*, 321-356.

Iguchi, M. (2008). Mechanism of explosive eruption revealed by geophysical observations at the Sakurajima, Suwanosejima and Semeru volcano. *J. Volcanol. Geotherm*, 1-9.

J. Caplan-Auerbach, M. S. (2003). New insights into the 1999 eruption of the Shishaldin volcano, Alaska based on acoustic data. *Bull. Volcanology*, 405-417.

J. Johnson, R. A. (2008). Acoustic source characterization of impulsive Strombolian eruptions from the Mount Erubus lava lake. *Journal Volcanology Geothermical*, 673-686.

J. Neuberg, H. T. (2006). The trigger mechanism of low-frequency earthquakes Montserrat. *J. Volcanol. Geotherm.* , 37-50.

J.W. Neuberg, H. T. (2006). The trigger. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 37–50.

Laboratorio Geofisica Sperimentale. (s.f.). Obtenido de <http://lgs.geo.unifi.it/index.php/monitoring/volcanoes/stromboli2>

Lis. (s.f.). Obtenido de <http://www.lis.ucr.ac.cr/7>

Marchetti, E. ., (2013). Blast waves from violent explosive activity at Yasur Volcano, Vanuatu. *Geophysical Research Letters*, 5838-5843.

Matoza, R. F. (2017). Seismic equivalents of volcanic jet scaling laws and multipoles in acoustic. *Geophysical Research International*, 623-636.

McNutt, G. M. (1997). Theory of the airborne sound field generated in a resonant magma conduit. *J. Volcanol. Geotherm.*, 155-178.

McNutt, S. R. (1992). Volcanic tremor. En L. Brekhovskikh, *Encyclopedia of Earth System Science* (pág. Vol.4).

Morse, P. (1968). Theoretical acoustic. *Princeton University Press*.

Neuberg, J. ., (2006). The trigger mechanism of low-frequency earthquakes on Montserrat . *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 37-50.

Nishimura, T. (2009). Ground deformation caused by magma ascent in an open conduit. *J. Volcanol. Geotherm*, 178-192.

OVDAS. (2010). *PLATAFORMA DE PROCESAMIENTO Y GESTIÓN DE SEÑALES SÍSMICAS*.

Prejean, S. G. (2011). Volcanic plume height measured by seismic waves based on a mechanical model. *Journal Geophysical Research*, 116.

Ripepe, M. (1993). Interaction of seismic and air waves as recorded at Stromboli Volcano. *Geophys. Res. Lett.*, 65-68.

Ripepe, M. (2001). Time constraints for modeling source dynamics of volcanic explosions at Stromboli. *J. Geophys. Res*, 8713–8727.

Ripepe, M. (2013). Infrasound reveals transition to oscillatory discharge regime during lava fountaining: Implication for early warning. *Geophys. Res. Lett.*, 3008-3013.

Ripepe, M. (2015). Volcano seismicity and ground deformation unveil the gravity-driven magma discharge dynamics of a volcanic eruption . *Nature communications*, 1-6.

Ripepe, M. a. (2003). Dynamics of Strombolian Activity. *Journal Geo. Research*.

Ripepe, P. P. (1996). Infrasonic waves and volcanic tremor at Stromboli. *Geophysical Research Letter*, 181-184.

Ripepe, R. G. (2010). Inflation-Deflation cycles revealed by tilt and seismic records at Stromboli volcano. *Geophysical Research Letters*.

Sánchez, C. (2014). *Modelo experimental de la dinámica de estallido y emisión acústica en volcanes*. Santiago.

Taddeucci, J. ,.-I. (2012). Physical parameterization of strombolian eruptions via experimentally-validated modeling of high-speed observations. *Geophys. Res. Lett.*, 39.

USGS. (s.f.). Obtenido de <https://pubs.usgs.gov/gip/hawaii/page17.html>

USGS. (s.f.). Obtenido de <https://pubs.usgs.gov/gip/volc/structures.html>

Vidal, V. J.-C. (2006). Acoustic signal associated with the bursting of soap film which initially closes an overpressurized cavity. *Eur. Phys. J. B*, 321-339.

www.comsol.com. (s.f.). Obtenido de COMSOL: <https://www.comsol.com>

