



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ESFUERZOS EN TUBERÍAS ENTERRADAS, EN FUNCIÓN DE LAS
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SUELO, FRENTE A TRONADURAS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

DIEGO ALONSO ZERENE VILLAR

PROFESOR GUÍA:
ALEJANDRO FONT FILAX

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ROGER BUSTAMANTE PLAZA
MÓNICA ZAMORA ZAPATA

SANTIAGO DE CHILE
2024

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: DIEGO ALONSO ZERENE VILLAR
FECHA: 2024
PROF. GUÍA: ALEJANDRO FONT FILAX

ESFUERZOS EN TUBERÍAS ENTERRADAS, EN FUNCIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SUELO, FRENTE A TRONADURAS

La realización de tronaduras en las proximidades de tuberías enterradas, plantea un desafío significativo para la industria minera, en busca de priorizar y garantizar la integridad estructural de toda estructura cercana perteneciente a la faena, las normativas actuales, imponen límites estrictos en los valores de velocidad peak de partícula inducida en estructuras cercanas, restringiendo el diseño óptimo de tronaduras y por ende aumentando los costos operativos. En base a la buena respuesta ante deformaciones de los mineroductos actuales, este estudio tiene como objetivo establecer límites más permisivos de PPV que aseguren el buen funcionamiento de los mismos, mediante simulaciones en elementos finitos en conjunto con la aplicación de los criterios de daño presentes en el código ASME B31.4.

Para realizar este estudio, se desarrolla un modelo de elementos finitos 3D que representa la respuesta mecánica de una tubería API 5L X60 de tamaño 8 5/8, ante la transmisión del pulso generado por una tronadura de carga única cercana. Se simuló tres pulsos con tres extensiones transversales en cinco tipos de macizos rocosos, evaluando el esfuerzo de von Mises y deformación porcentual en la tubería. Esto último por el uso de estas magnitudes al aplicar los criterios de diseño presentes en el código ASME B31.4, empleados para limitar a los esfuerzos presentes en la misma.

Como resultados más importantes, se determinaron las velocidades peak de partícula máximas admisibles en la zanja, según cada criterio, para todos los macizos rocosos en los distintos escenarios simulados, además de estimar la ubicación aproximada de la tronadura que generaría el pulso simulado con respecto al mineroducto. Los resultados destacan al criterio de sobre esfuerzos transientes, basado en la magnitud del esfuerzo generado en la tubería, como el criterio a emplear a la hora de evaluar los efectos que una tronadura tendrá en un mineroducto cercano. El esfuerzo de von Mises se instaura como el parámetro clave para delimitar las velocidades peak de partícula generadas por la tronadura.

El análisis de los resultados, evidencia el impacto que las constantes elásticas del suelo, principalmente el modulo de elasticidad, tienen sobre los esfuerzos máximos experimentados por el mineroducto ante la propagación del pulso originado por tronadura. Resaltando la importancia de determinar con la mayor precisión posible las constantes elásticas del suelo, teniendo en consideración la calidad del macizo rocoso.

Finalmente, los resultados obtenidos en este estudio permitirán guiar futuros procesos de tronadura en condiciones similares de carga única. Por otro lado, el modelo computacional desarrollado ofrece la capacidad de simular a futuro diversos escenarios de tronadura con mineroductos cercanos.

*A los que estuvieron,
y estarán.*

Gracias por todo

Agradecimientos

Estos agradecimientos solo pueden comenzar agradeciéndole a mi familia por todo lo que han hecho por mí, principalmente a mis padres, Alejandra, Francisco y mi hermanito Pablo, quienes me han entregado todo el cariño, apoyo y comprensión que he necesitado durante todo este proceso, quiero que sepan que son mi razón de existir. También quiero agradecer a mis abuelos, que siempre se han encargado de hacerme saber su preocupación y cariño a su manera.

A mis amistades, las que he conocido durante toda la vida y aún mantengo el vínculo. A mis amigos que he hecho en la universidad, durante Plan Común y Mecánica, a los primeros, gracias por acompañarme durante los primeros años y especialmente durante la pandemia, a los últimos, muchas gracias por ser una gran red de apoyo y permitirme pasar tantos buenos durante la especialidad.

Quiero agradecer a los integrantes de mi comisión, al profesor Alejandro Font por darme la confianza para realizar la continuación de su estudio, que además durante estos últimos semestres me ha servido como un gran guía en el desarrollo del mismo, respondiendo a mis inquietudes y dándome consejo. Al profesor Roger Bustamante, ser parte de este proyecto y confiarme su computador, sin el cual no podría haber realizado este estudio, además por su buena disposición para resolver cada una de mis consultas. También a Rodrigo Benavides, por su labor durante el estudio previo y su buena disposición para enseñarme a utilizar el software COMSOL.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Alcances	2
2. Antecedentes	4
2.1. Tuberías enterradas	4
2.1.1. Configuración mineroducto	4
2.1.2. Instalación de tubería enterrada	5
2.1.3. Cargas sobre tuberías enterradas	5
2.2. Tronadura	6
2.2.1. Objetivos de la tronadura	6
2.2.2. Detonación	6
2.2.2.1. Mecanismo de la detonación	6
2.3. Macizo rocoso	7
2.3.1. Roca intacta	7
2.3.2. Discontinuidades	7
2.3.3. Propiedades elásticas macizo rocoso	7
2.3.4. Estimación módulo de elasticidad en macizos rocosos	8
2.3.5. Rock Mass Rating	8
2.3.6. Propiedades mecánicas Roca Intacta	8
2.3.7. Propiedades mecánicas Zanja	9
2.3.7.1. Módulo de deformabilidad confinado	9
2.4. Vibraciones	10
2.4.1. Tipos de ondas generadas por la tronadura	10
2.4.1.1. Ondas internas	11
2.4.1.2. Ondas superficiales	11
2.4.2. Velocidad de avance	11
2.4.3. Velocidad peak de partícula	11
2.4.3.1. Modelo de Devine	12
2.4.4. Esfuerzos teóricos en tuberías	13
2.5. API 5L X60	13
2.5.1. Propiedades de tracción	13
2.5.2. Constantes elásticas API 5L X60	14
2.6. ASME B31.4	14

2.6.1.	Factor de diseño	14
2.6.2.	Criterio de von Mises	15
2.6.2.1.	Esfuerzo combinado de von Mises	15
2.6.3.	Criterio de sobre esfuerzo transiente	16
2.6.4.	Criterio de deformación de tubería	16
2.7.	Método de elementos finitos	16
2.7.1.	Elasticidad Lineal	17
2.8.	Estudio previo	18
3.	Modelación en Elementos Finitos	21
3.1.	Metodología	21
3.2.	Esquema modelo computacional	22
3.3.	Modelación Macizo Rocosó	22
3.3.1.	Material	23
3.4.	Modelación Zanja	23
3.4.1.	Material	24
3.5.	Modelación Tubería	24
3.5.1.	Material	25
3.6.	Modelación Fluido	25
3.6.1.	Material	25
3.7.	Modelación Placa generadora	26
3.7.1.	Material	28
3.8.	Condiciones de Contacto	28
3.9.	Condiciones de borde	28
3.9.1.	Velocidad prescrita del pulso	28
3.9.2.	Restricción fija base del macizo	29
3.10.	Convergencia de mallado	30
3.10.1.	Mallado	31
3.11.	Convergencia tiempo de generación	32
3.12.	Post Procesamiento	33
4.	Resultados	34
4.1.	Esfuerzo de von Mises	34
4.1.1.	Esfuerzos principales	34
4.1.2.	Zona de tracción y distancia	36
4.2.	Deformación máxima	37
4.3.	Pulso de dos metros	38
4.3.1.	Esfuerzo de von Mises	38
4.3.1.1.	PPV de generación igual a 450 mm/s	39
4.3.1.2.	PPV de generación igual a 500 mm/s	39
4.3.1.3.	Discusión	40
4.3.2.	Deformación máxima	41
4.3.2.1.	PPV de generación igual a 450 mm/s	41
4.3.2.2.	PPV de generación igual a 500 mm/s	42
4.3.2.3.	Discusión	42
4.4.	Pulso de tres metros	43
4.4.1.	Esfuerzo de von Mises	43

4.4.1.1.	PPV de generación igual a 450 mm/s	43
4.4.1.2.	PPV de generación igual a 500 mm/s	44
4.4.1.3.	Discusión	44
4.4.2.	Deformación máxima	45
4.4.2.1.	PPV de generación igual a 450 mm/s	45
4.4.2.2.	PPV de generación igual a 500 mm/s	46
4.4.2.3.	Discusión	46
4.5.	Pulso de cinco metros	47
4.5.1.	Esfuerzo de von Mises	47
4.5.1.1.	PPV de generación igual a 450 mm/s	47
4.5.1.2.	PPV de generación igual a 500 mm/s	48
4.5.1.3.	Discusión	48
4.5.2.	Deformación	49
4.5.2.1.	PPV de generación igual a 450 mm/s	49
4.5.2.2.	PPV de generación igual a 500 mm/s	50
4.5.2.3.	Discusión	50
4.6.	Caso de estudio, coeficiente de Poisson = 0,25	51
4.6.1.	Esfuerzo de von Mises	51
4.6.1.1.	Discusión	52
4.6.2.	Deformación máxima	52
4.6.2.1.	Discusión	53
4.7.	Valores admisibles ASME B31.4	53
4.7.1.	Esfuerzo de von Mises admisible API 5L X60	53
4.7.2.	Deformación admisible API 5L X60	53
4.7.3.	PPV admisible en zanja	54
4.8.	PPV admisible en zanja criterio de sobre esfuerzos	56
4.8.1.	Discusión	57
4.8.2.	Comparación con caso de estudio, coeficiente de Poisson = 0,25	57
4.9.	PPV admisible en zanja criterio de deformación	58
4.9.1.	Discusión	59
4.9.2.	Comparación con caso de estudio, coeficiente de Poisson = 0,25	60
5.	Conclusiones	62
5.1.	Trabajo propuesto	63
	Bibliografía	63

Índice de Tablas

2.1.	Clase de RMR según puntuación total.	8
2.2.	Propiedades mecánicas roca intacta.	9
2.3.	Módulo de deformabilidad confinado de roca triturada.	9
2.4.	Valores de factor de sitio estándar.	13
2.5.	Propiedades de tracción del API 5L X60 [15].	14
2.6.	Constantes elásticas tubería API 5L X60.	14
2.7.	Constantes elásticas rocas dura y blanda, estudiadas en [2].	19
2.8.	PPV admisible según la distancia tronadura a zanja, para cada escenario de tubería y macizo rocoso, presente en [2].	19
3.1.	Propiedades mecánicas macizos rocosos.	23
3.2.	Propiedades mecánicas zanjas.	24
3.3.	Características tubería.	24
3.4.	Propiedades del fluido al interior de la tubería.	26
3.5.	Convergencia de mallado.	31
3.6.	Número de elementos y nodos del mallado.	31
3.7.	Resultados estudio de convergencia tiempos de generación.	33
4.1.	Esfuerzo de von Mises, PPV en zanja, Zona de tracción y Distancia aproximada de los distintos macizos rocosos, escenario 2-450	39
4.2.	Esfuerzo de von Mises, PPV en zanja, Zona de tracción y Distancia aproximada de los distintos macizos rocosos, escenario 2-500.	40
4.3.	Deformación máxima porcentual y PPV en zanja de los distintos macizos rocosos, escenario 2-450.	41
4.4.	Deformación máxima porcentual y PPV en zanja de los distintos macizos rocosos, escenario 2-500.	42
4.5.	Esfuerzo de von Mises, PPV en zanja, Zona de tracción y Distancia aproximada de los distintos macizos rocosos, escenario 3-450	44
4.6.	Esfuerzo de von Mises, PPV en zanja, Zona de tracción y Distancia aproximada de los distintos macizos rocosos, escenario 3-500.	44
4.7.	Deformación máxima porcentual y PPV en zanja de los distintos macizos rocosos, escenario 3-450.	46
4.8.	Deformación máxima porcentual y PPV en zanja de los distintos macizos rocosos, escenario 3-500.	46
4.9.	Esfuerzo de von Mises, PPV en zanja, Zona de tracción y Distancia aproximada de los distintos macizos rocosos, escenario 5-450.	48
4.10.	Esfuerzo de von Mises, PPV en zanja, Zona de tracción y Distancia aproximada de los distintos macizos rocosos, escenario 5-500.	48
4.11.	Deformación máxima porcentual y PPV en zanja de los distintos macizos rocosos, escenario 5-450.	50

4.12.	Deformación máxima porcentual y PPV en zanja de los distintos macizos rocosos, escenario 5-500.	50
4.13.	Esfuerzo de von Mises y PPV en zanja, caso de estudio coeficiente de Poisson = 0,25	52
4.14.	Deformación máxima porcentual y PPV en zanja, caso de estudio coeficiente de Poisson = 0,25.	53
4.15.	Cambio porcentual del coeficiente de Poisson y PPV admisible según criterio de sobre esfuerzos, en comparación al escenario real de 3-450.	58
4.16.	Cambio porcentual del coeficiente de Poisson y PPV admisible según criterio de deformación, en comparación al escenario real de 3-450.	61

Índice de Ilustraciones

2.1.	Configuración típica de una tubería enterrada, adaptado de [3].	4
2.2.	Zonas del proceso de detonación [5].	7
2.3.	Ondas sísmicas generadas por la explosión de explosivos, adaptado de [10]. . .	10
2.4.	Superficie de medición PPV zanja.	12
2.5.	Discretización en elementos finitos utilizando elementos triangulares. Presente en [17].	17
2.6.	Vista isométrica modelo computacional en "Estudio de tronaduras próximas a minerodutos y sus efectos sobre los mismos, Etapa 1".	19
2.7.	Relación PPV admisible y distancia tronadura zanja Tuberías 7 y 8 pulgadas en roca dura y blanda, [2].	20
3.1.	Esquema ubicación y distancias relativas entre componentes, en milímetros. . .	22
3.2.	Vistas geometría macizo rocoso, en milímetros.	23
3.3.	Vistas geométricas zanja, en milímetros.	24
3.4.	Vistas geométricas tubería, en milímetros.	25
3.5.	Vistas geométricas fluido, en milímetros.	25
3.6.	Transmisión pulso longitudinal en el sólido, adaptado de [10].	26
3.7.	Vistas geométricas de placa generadora, de extensión transversal (paralela a la tubería) igual a dos metros, en milímetros.	27
3.8.	Vistas geométricas de placa generadora, de extensión transversal (paralela a la tubería) igual a tres metros, en milímetros.	27
3.9.	Vistas geométricas de placa generadora, de extensión transversal (paralela a la tubería) igual a cinco metros, en milímetros.	28
3.10.	Velocidad prescrita en dirección x.	29
3.11.	Base del macizo rocoso fijada.	29
3.12.	Distribución de esfuerzos de von Mises, segunda iteración.	30
3.13.	Relación entre el esfuerzo de von Mises máximo y el tiempo de cómputo. . . .	31
3.14.	Mallado empleado por el modelo.	32
3.15.	Ratio de los doce tiempos de generación estudiados.	33
4.1.	Distribución de esfuerzos normales en las componentes X e Y.	35
4.2.	Vista en corte, distribución de esfuerzo de von Mises. Factor de escala 100:1. . .	36
4.3.	Distribución de esfuerzos en los componentes X e Y.	37
4.4.	Deformación principal. Factor de escala 100:1.	38
4.5.	Distribución esfuerzo de von Mises casos límite, escenario 2-450.	39
4.6.	Distribución esfuerzo de von Mises casos límite, escenario 2-500.	39
4.7.	Distribución deformación máxima casos límite, escenario 2-450.	41
4.8.	Distribución deformación máxima casos límite, escenario 2-500.	42
4.9.	Distribución esfuerzo de von Mises casos límite, escenario 3-450.	43
4.10.	Distribución esfuerzo de von Mises casos límite, escenario 3-500.	44

4.11.	Distribución deformación máxima casos límite, escenario 3-450.	45
4.12.	Distribución deformación máxima casos límite, escenario 3-500.	46
4.13.	Distribución esfuerzo de von Mises casos límite, escenario 5-450.	47
4.14.	Distribución esfuerzo de von Mises casos límite, escenario 5-500.	48
4.15.	Distribución deformación máxima casos límite, escenario 5-450.	49
4.16.	Distribución deformación máxima casos límite, escenario 5-500.	50
4.17.	Distribución deformación máxima casos límite, escenario 3-450 coeficiente de Poisson = 0,25.	51
4.18.	Distribución deformación máxima casos límite, escenario 3-450 coeficiente de Poisson = 0,25.	52
4.19.	Relación entre PPV admisible en zanja y extensión del pulso inicial en distintos macizos rocosos, según criterio de von Mises.	56
4.20.	Comparación de PPV admisible según criterio de sobre esfuerzos entre macizos reales y Poisson = 0,25.	57
4.21.	Relación entre PPV admisible en zanja y extensión del pulso inicial en distintos macizos rocosos, según criterio de deformación.	59
4.22.	Comparación de PPV admisibles según criterio de deformación entre macizos reales y Poisson = 0,25.	60

Capítulo 1

Introducción

La industria minera es un actor principal en el desarrollo económico de Chile, su principal efecto se evidencia con su participación directa en el 14,6% del PIB [1], esta industria presente en 13 de las 15 regiones del país se dedica a la extracción de 25 productos distintos. El gran tamaño de este sector y su enorme impacto nacional, generan un gran interés por parte de las compañías mineras y las empresas de ingeniería en realizar estudios e investigaciones en los yacimientos, en pos de optimizar o mejorar los procesos desarrollados en los mismos.

La perforación y tronadura es un proceso ampliamente utilizado en el sector minero tanto para reducir el tamaño de la roca presente, y facilitar su extracción, como para crear nuevas zanjas o secciones en las cuales instalar nuevas tuberías que cubran necesidades específicas de la faena.

Cualquiera sea el uso de la tronadura, el ingeniero a cargo del proceso, busca instalar los explosivos de la manera más eficiente posible para fragmentar el macizo rocoso en la ubicación deseada, la problemática se origina en el caso en que exista una tubería instalada en las cercanías, a raíz de esto se realiza el estudio en búsqueda de asegurar el buen funcionamiento de dicha tubería cercana y evitar pérdidas monetarias.

El estudio presente es la continuación del estudio de nombre "Estudio de tronaduras próximas a minerodutos y sus efectos sobre los mismos, Etapa 1" [2], en el cual se evaluaron los efectos de la transmisión de tres pulsos generados por tronadura en distintos escenarios. Continuando estos resultados, el estudio actual busca ampliar el análisis considerando diferentes macizos rocosos, velocidades del frente de tronadura y añadiendo un criterio presente en ASME B31.4, con el objetivo de establecer un valor de PPV admisible que garantice la seguridad de la tubería cercana y que el ingeniero de tronadura pueda emplear para posicionar el disparo y la carga de explosivo.

1.1. Motivación

En vista de la problemática originada por la necesidad de realizar un proceso de tronadura en las cercanías de una tubería previamente instalada, surge el desafío para el profesional a cargo del diseño de determinar la respuesta mecánica de dicha tubería enterrada al interior de una zanja, ante la propagación del pulso generado a raíz de la detonación de explosivos. En la actualidad, existen normas empleadas para delimitar la velocidad inducida en estruc-

turas cercanas por la detonación, limitando en consecuencia también la cantidad de explosivo o la distancia entre tronadura y estructura, estas restricciones pueden, en ciertos casos, impedir la realización de una tronadura óptima, lo que se traduce en mayores costos económicos.

Dichas normas empleadas en la actualidad, no consideran en sus limitaciones la buena respuesta ante deformaciones que poseen los mineroductos enterrados en faena. Por lo que, este estudio tiene como objetivo, a través de simulaciones en elementos finitos de diversos escenarios de tronaduras cercanas a tuberías enterradas, y el uso del código ASME B.31.4, instaurar nuevos límites más permisivos a la hora de diseñar tronaduras, reduciendo costos operativos.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo 3D de elementos finitos representando la respuesta mecánica generada en tuberías enterradas API 5L X60, frente a la transmisión del pulso generado por una tronadura cercana. Esto, con el objetivo de establecer mediante el análisis de sus simulaciones en conjunto al código ASME B31.4, nuevos límites de velocidad de partícula admisible para el diseño de tronaduras en distintos macizos rocosos.

1.2.2. Objetivos específicos

- Modelar computacionalmente el sistema tronadura-zanja-mineroducto en elementos finitos, en base al esquema presente en la etapa 1, considerando las constantes elásticas de los distintos componentes presentes.
- Simular mediante elementos finitos los escenarios, y obtener los esfuerzos generados en los mineroductos durante la transmisión del pulso en los distintos escenarios.
- Emplear los criterios de falla presentes en ASME B31.4 para limitar las velocidades de partícula admisibles en cada escenario.
- Analizar los resultados de la modelación.
- Determinar impacto de las constantes elásticas en los resultados.

1.3. Alcances

Dado que las normativas actuales, imponen valores límite de velocidad de partícula demasiado bajos para lograr la fragmentación de las rocas, en ciertos escenarios. El presente estudio tiene como objetivo principal determinar, mediante simulaciones con un modelo computacional en elementos finitos, representando la transmisión del pulso generado por una tronadura cercana a una tubería enterrada, los límites admisibles de velocidad peak de partícula (PPV) generada por una tronadura única, que aseguren la integridad y el buen funcionamiento de la tubería cercana.

Los alcances específicos del estudio se enuncian a continuación:

- La tronadura representada corresponde una tronadura de carga única.
- El modelo computacional supone un comportamiento elástico en base a las constantes elásticas de cada componente.
- Se considera únicamente una tubería tipo API 5L X60 de tamaño 8 5/8.
- Se consideran los dos criterios de diseño presentes en ASME B31.4
- La zanja se modela con relleno de roca triturada compactada, sin considerar variaciones en la configuración del relleno.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Tuberías enterradas

Las tuberías enterradas tienen diversas aplicaciones en una gran cantidad de industrias, sin embargo, en el contexto de la industria minera, se utilizan principalmente como mineroductos empleados para transportar minerales a largas distancias. Específicamente diseñados para transportar la pulpa con mineral al interior de la planta de procesamiento o hacia el exterior.

2.1.1. Configuración mineroducto

La configuración típica de un mineroducto se puede apreciar en la figura 2.1.

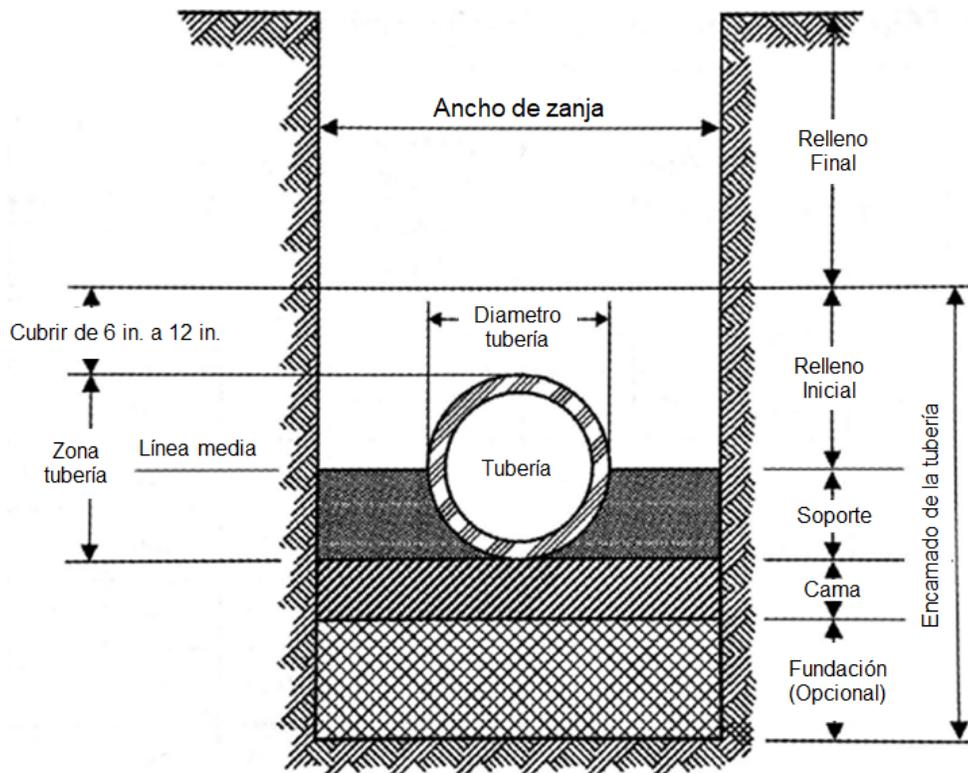


Figura 2.1: Configuración típica de una tubería enterrada, adaptado de [3].

2.1.2. Instalación de tubería enterrada

La instalación de una tubería enterrada sigue el siguiente procedimiento general detallado por el código ASME B31.4 [4].

- Creación de zanja (Ditching): La zanja a crear debe poseer una profundidad en base al tipo de superficie, características del terreno, y cargas presentes. Esta zanja debe considerar la implementación de la cama (Bedding) presente, la tubería se instala sobre una cama de apoyo, hecha de material fino y compactado empleado para evitar movimiento de la tubería respecto a la fundación, originando esfuerzos cortantes en la superficie inferior de la tubería. Previo a instalar la tubería, es necesario instalar el material que será encargado del soporte o Houching, la labor del soporte en la zanja es la de entregar un soporte a la tubería que no cambie a través del tiempo. ASME B31.4 Párrafo 434.6 "Ditching".
- Instalación de tubería en la zanja: Al momento de instalar la tubería en la zanja, es de vital importancia que los esfuerzos sobre la misma durante su instalación, sean los mínimos posibles. La tubería debe apoyarse en la zanja sin la ayuda de una fuerza externa. ASME B31.4 Párrafo 434.10 "Installation of Pipe in the Ditch"
- Relleno de la zanja (Backfilling): Las porciones del relleno final son esenciales para proteger a la tubería de las cargas provenientes del exterior, es por esto que debe ser un material compactado.

2.1.3. Cargas sobre tuberías enterradas

El diseño de la tubería a instalar se debe realizar en consideración de las cargas capaces de generar posibles daños, a fin de evitar esfuerzos en su montaje o fallas en su funcionamiento, que impliquen pérdidas de producción. El código ASME B31.4 [4], párrafo 401.1.1 "Classification of Loads", clasifica las cargas para el diseño de una tubería enterrada en cuatro tipos:

- Permanentes: Corresponden a las cargas que afectan constantemente a la tubería instalada, estas pueden ser originadas como consecuencia del uso de la tubería misma en el proceso productivo. Ejemplos son el peso del fluido al interior y presión hidrostática. O se pueden presentar por factores externos, peso del suelo sobre la tubería y vibración de equipos cercanos.
- Ocasionales: Estas cargas se originan por factores externos incontrolables para el yacimiento, ejemplos son, lluvias, sismos, cambios de temperatura, etc.
- De construcción: Son aquellas originadas por el armado e instalación de la tubería enterrada, ejemplos son, manipulación del tubo, instalación del tubo en la zanja, etc.
- Transientes: Los fenómenos transientes son aquellos que provocan una alta liberación de energía al medio durante una ventana de tiempo reducida, que a pesar de su breve periodo de tiempo son capaces de generar gran daño en el funcionamiento de la tubería. Ejemplos de cargas transientes son el derrumbamiento, colisiones con equipos, golpes de ariete y movimientos del suelo.

Este último tipo de clasificación es a la cual corresponde el fenómeno de tronadura y así se considera durante el estudio a realizar.

2.2. Tronadura

La realización de una tronadura comienza con el proceso de perforación, esta operación consiste en la creación de huecos en el macizo rocoso, denominados tiros, con una geometría que permita aprovechar al máximo la energía liberada por los explosivos. Normalmente se realiza con equipos de rotopercusión.

El siguiente proceso es el de la tronadura misma, esta considera la colocación de los explosivos en los tiros, para luego ser detonados y reducir efectivamente el tamaño del macizo rocoso. La liberación de energía de la detonación genera el pulso a modelar en el suelo.

2.2.1. Objetivos de la tronadura

La tronadura se puede realizar en busca de dos objetivos, el primero es conseguir un tamaño de fragmentación óptimo que permita facilitar las operaciones de transporte o chancado de la roca.

Otro objetivo posible es la generación de zanjas, como las presentes en este estudio, en las cuales se puedan instalar mineroductos nuevos.

2.2.2. Detonación

Proceso físico químico caracterizado por una elevada velocidad de reacción, generando una gran cantidad de gases a altas temperaturas con elevada fuerza expansiva.

El proceso comienza con el suministro de la energía de iniciación a las primeras moléculas del explosivo, generando la primera onda de choque al interior del explosivo que deforma a las moléculas vecinas y aumenta altamente su temperatura. A su vez que se genera esta onda, la masa del explosivo que ha reaccionado produce una gran cantidad de gases a elevadas temperaturas. Este proceso se repite en toda la masa explosiva provocando así una reacción en cadena.

2.2.2.1. Mecanismo de la detonación

Durante el desarrollo de una detonación, se puede apreciar la aparición de la zona de reacción primaria dentro del explosivo detonante. En la figura 2.2 se ve el caso de una carga colocada al interior de roca comprimida. Esta zona que se propaga a una alta velocidad produce el movimiento energético en las moléculas próximas, en forma de onda de choque a alta presión. Simultáneamente, detrás y en la misma dirección a la onda de choque, se desplaza la explosión de los gases producto de las moléculas detonadas [5].

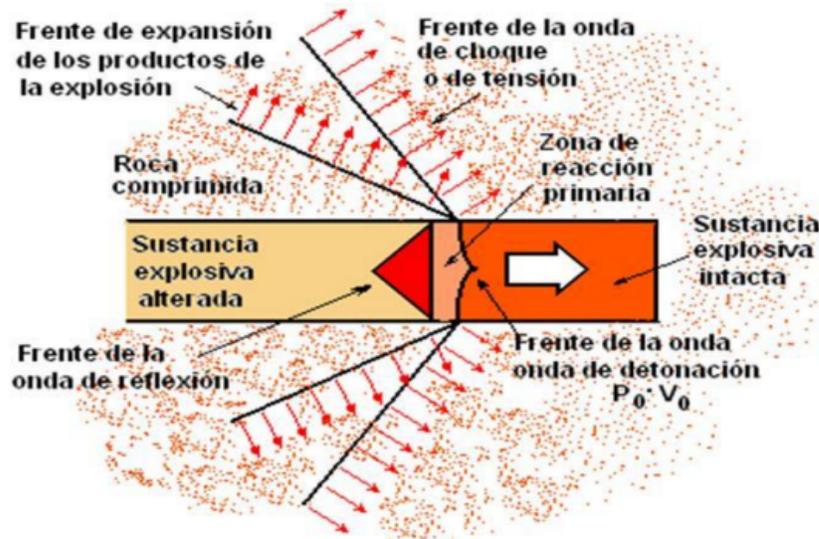


Figura 2.2: Zonas del proceso de detonación [5].

2.3. Macizo rocoso

Colección de matrices rocosas junto a discontinuidades, estas últimas le dotan características heterogéneas, además de un comportamiento discontinuo y características mecánicas isentrópicas [6].

2.3.1. Roca intacta

Material rocoso sin discontinuidades, mecánicamente se caracteriza por su densidad y resistencia a la deformación, dadas por parámetros de roca intacta: resistencia a la compresión y a la tracción, módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, etc.

2.3.2. Discontinuidades

Separación al interior del continuo de roca, que no aporta resistencia a las deformaciones al macizo rocoso.

2.3.3. Propiedades elásticas macizo rocoso

Las propiedades elásticas permiten caracterizar el comportamiento que tendrá el macizo rocoso frente a la aplicación de una fuerza. Para definir al macizo rocoso como un material elástico y lineal basta con definir dos de estas propiedades. Para efectos de este estudio estas son:

- **Módulo de Elasticidad:** Caracteriza la rigidez del material, según la dirección en que se aplica la fuerza. Su valor es determinado empíricamente mediante un ensayo de tracción.
- **Coefficiente de Poisson:** Constante elástica que representa la proporción entre la deformación lateral y la deformación axial, cuando se somete un material a carga.

2.3.4. Estimación módulo de elasticidad en macizos rocosos

Las propiedades de un macizo rocoso no se pueden determinar directamente, sino que deben ser estimadas en base a las propiedades de la roca intacta presente en forma de matrices dentro del macizo.

La estimación del módulo de elasticidad de los macizos rocosos a representar se realiza en base al modelo de Galera, el cual emplea el sistema de clasificación geotécnico RMR presente en [7]. Determinando al módulo de elasticidad mediante la expresión 2.1, presente en [8].

$$E_{mr} = E_i \cdot e^{\frac{RMR-100}{36}} \quad (2.1)$$

E_{mr} : módulo de elasticidad macizo rocoso.

E_i : módulo de elasticidad roca intacta.

RMR = Rock Mass Rating.

2.3.5. Rock Mass Rating

Sistema de clasificación geomecánica desarrollado por Bieniawski [7], para evaluar la calidad y estabilidad de un macizo rocoso. Este método facilita la estimación de la calidad del macizo mediante la cuantificación de parámetros sencillos de medir in situ. La puntuación asignada de 0-100 se basa en los siguientes parámetros:

- Resistencia de la roca sana.
- RQD (Rock Quality Designation).
- Separación de discontinuidades.
- Estado de las discontinuidades.
- Presencia de agua.
- Corrección por orientación de las discontinuidades.

La suma del puntaje otorgado a cada ítem, resulta en el RMR final del macizo rocoso.

Tabla 2.1: Clase de RMR según puntuación total.

RMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	<20
Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy Buena	Buena	Media o Regular	Mala	Muy mala

2.3.6. Propiedades mecánicas Roca Intacta

Para estimar precisamente las propiedades mecánicas de un macizo rocoso, es esencial conocer primeramente las propiedades mecánicas de la roca intacta sin discontinuidades en su interior. Las cuales se pueden determinar mediante una caracterización geotécnica que

contemple ensayos uniaxiales, que permitan clasificar a estas rocas por su resistencia y deformabilidad. En la tabla 2.2 se presentan los valores escogidos presentes en [9] para las propiedades módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y densidad.

Tabla 2.2: Propiedades mecánicas roca intacta.

Roca Intacta	Módulo de Elasticidad (GPa)	Coefficiente de Poisson	Densidad ($\frac{g}{cm}$)
Andesita	25	0,27	2,3
Arenisca	5	0,23	2,45
Basalto	6,6	0,25	2,8
Granito	40	0,18	2,65
Toba	12,5	0,24	2,1

2.3.7. Propiedades mecánicas Zanja

Las propiedades mecánicas dentro de la zanja difieren de las presentes en el resto del macizo debido a los procesos de "Ditching" y "Backfilling" realizados para crear un entorno adecuado para la tubería que se instalará. La prioridad al rellenar una zanja es la compactación del material, ya que un material mal compactado podría provocar desplazamientos verticales de la tubería en el futuro [3].

Por eso, para determinar las propiedades mecánicas de la zanja, se emplea el parámetro geotécnico del módulo de deformabilidad confinado.

2.3.7.1. Módulo de deformabilidad confinado

El módulo de deformabilidad confinado representa la relación esfuerzo y deformación del material bajo una carga axial, que además posee restringido su movimiento lateralmente. En otras palabras, representa la rigidez del material, en este caso el relleno de la zanja en condiciones de confinamiento. Este módulo se calcula mediante la ecuación 2.2, presente en [3].

$$M_r = \frac{E_r(1 - \nu_r)}{(1 + \nu_r)(1 - 2\nu_r)} \quad (2.2)$$

M_z : Módulo de deformabilidad confinado del relleno.

E_z : Módulo de elasticidad del relleno.

ν_z : Coeficiente de Poisson del relleno.

Tabla 2.3: Módulo de deformabilidad confinado de roca triturada.

Compactación del relleno	Módulo de deformabilidad confinado (lb/in ²)
Baja	2000 - 4000
Alta	5000 - 10000

2.4. Vibraciones

Las vibraciones corresponden a los fenómenos de transmisión de energía, mediante la propagación de un movimiento ondulatorio a través de un medio.

La detonación de explosivos durante la tronadura genera vibraciones al interior del macizo rocoso, esta vibración puede caracterizarse mediante la medición de los parámetros de dicha vibración generada por la detonación. Permitiendo así determinar el comportamiento de las partículas al interior del macizo, la zanja y la tubería enterrada y sus consecuencias.

Los principales parámetros a considerar en este estudio están asociados a la velocidad de la vibración. El parámetro de la velocidad asociada a la vibración generada tiene dos aspectos bien diferenciados:

- Velocidad de avance, asociada a la propagación o transmisibilidad de la vibración a través del medio.
- Velocidad de partícula, asociada al movimiento propio que la vibración induce en las partículas del medio.

2.4.1. Tipos de ondas generadas por la tronadura

La onda de choque generada por la tronadura es asimilada como una onda sísmica. La tronadura en si produce inicialmente ondas P, el avance de estas mismas ondas genera ondas de cizalla al encontrarse con discontinuidades y ondas superficiales al alcanzar la superficie del macizo rocoso.

Las ondas generadas por la tronadura corresponden a las ondas elásticas, estas se dividen en internas y superficiales. La figura 2.3 representa la propagación de las ondas generadas.

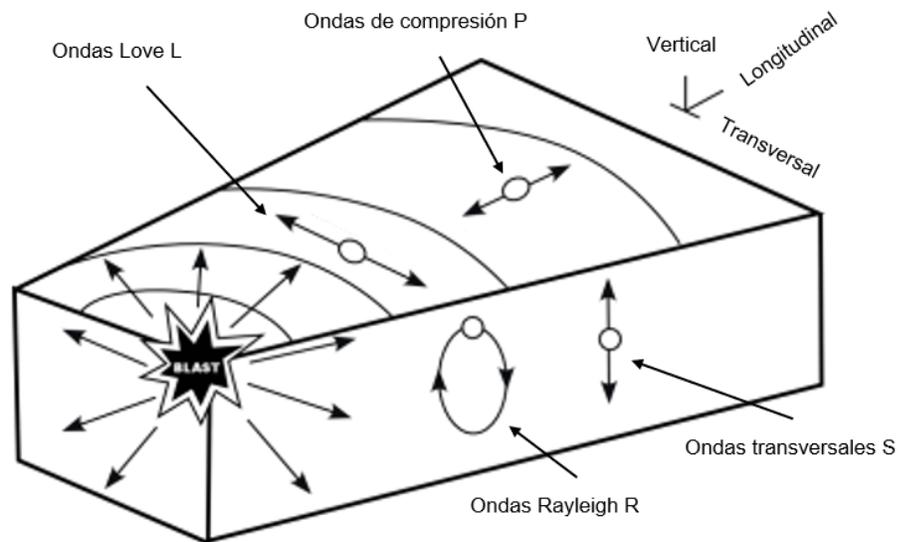


Figura 2.3: Ondas sísmicas generadas por la explosión de explosivos, adaptado de [10].

2.4.1.1. Ondas internas

Su medio de propagación es el interior del macizo rocoso, estas ondas son dos, las ondas de compresión P y las ondas transversales S.

- Ondas de compresión P: Se caracterizan por provocar la oscilación de las partículas en la dirección de propagación de la onda. Es la onda más rápida y de mayor amplitud. El modelo computacional empleado en este estudio se basa en la propagación de estas ondas al interior del macizo rocoso.
- Ondas transversales S: Se caracterizan por provocar la oscilación de las partículas en dirección perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Poseen una velocidad menor a la onda P.

2.4.1.2. Ondas superficiales

Únicamente se transmiten en la superficie del material, en este caso el macizo rocoso, son dos, las ondas Rayleigh (R) y las ondas Love L. Para facilitar su descripción se instaure que el eje X corresponde a la dirección de propagación de las ondas, el eje Y a la horizontal y el Z a la altura perpendicular.

- Ondas Rayleigh R: Las ondas Rayleigh Posee un patrón de movimiento elíptico en el eje XZ, su efecto en las partículas disminuye exponencialmente a medida que se alejan de la superficie. Su velocidad es aproximadamente 0.9 de las ondas transversales S.
- Ondas Love L: Se propagan en el plano XY a través de oscilaciones de corte. Son más rápidas que las ondas Rayleigh.

2.4.2. Velocidad de avance

La velocidad de avance en un sólido se refiere a la rapidez con la que el pulso generado, se propaga a través del material. Al tratarse de un pulso longitudinal la velocidad de avance depende de las propiedades elásticas del material, y se calcula mediante la fórmula 2.3, presente en [11].

$$v_l = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (2.3)$$

v_l : Velocidad longitudinal de la onda.

E : Módulo de elasticidad del material.

ν : Coeficiente de Poisson material.

ρ : Densidad del material.

2.4.3. Velocidad peak de partícula

La velocidad peak de partícula, (PPV por sus siglas en ingles), representa a la velocidad máxima alcanzada por las partículas del suelo durante la vibración.

La PPV asociada al pulso de la tronadura se utilizará como parámetro para evaluar el daño generado en la tubería. Específicamente la velocidad peak de partícula en la superficie frontal de la zanja (PPV zanja), destacada en la figura 2.4. En la actualidad, la PPV tolerada en tuberías enterradas corresponde a 127 mm/s, presente en [12].

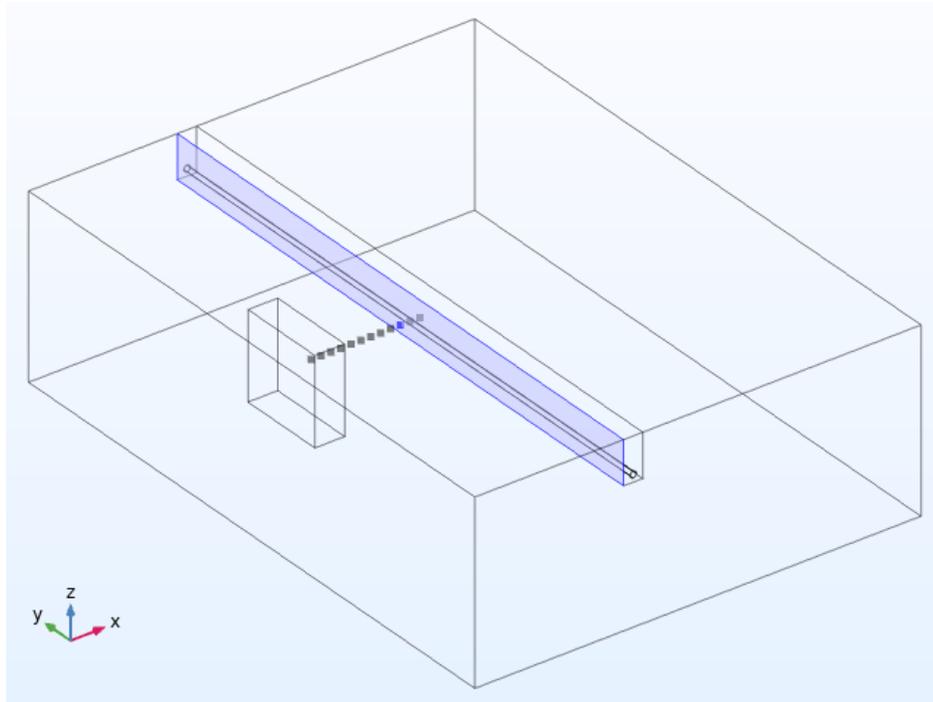


Figura 2.4: Superficie de medición PPV zanja.

Se utiliza esta superficie para la medición, basado en que el modelo computacional emplea una configuración de zanja estándar. Facilitando la aplicación de los resultados de este estudio como referencia o guía.

2.4.3.1. Modelo de Devine

Este modelo empírico es empleado para predecir la PPV generada en el suelo por acción de la tronadura, mediante la ecuación 2.4, presente en [13].

$$PPV = K \cdot \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-\beta} \quad (2.4)$$

PPV : Velocidad peak de partícula.

D : Distancia entre tronadura y medición.

Q : Cantidad de carga expresada en kilogramos.

β : Exponente de atenuación del sitio.

K : Factor de sitio, determinado por las características geológicas y el confinamiento de la roca en el sitio. Los valores estándar se presentan en la tabla 2.4.

Tabla 2.4: Valores de factor de sitio estándar.

Confinamiento de roca	Factor de Sitio
Confinamiento bajo	500
Confinamiento normal	1140
Confinamiento alto	5000

2.4.4. Esfuerzos teóricos en tuberías

Al considerar una única carga, detonada en la cercanía de una tubería enterrada, Esparza en [14], desarrolla la fórmula empírica 2.5 para determinar el esfuerzo total generado en la tubería.

$$\frac{\sigma}{E} = 4.44 \left(\frac{nW}{\sqrt{Eh}R^{2.5}} \right)^{0.77} \quad (s = \pm 34\%) \quad (2.5)$$

σ : Máximo esfuerzo inducido por tronadura (psi).

n : Energía equivalente liberada por el explosivo.

w : Peso total de carga (lb).

E : Módulo de elasticidad de la tubería (psi).

h : Espesor de la tubería (in).

R : Distancia entre la tubería y la carga (ft).

s : Error estimado en el estudio.

2.5. API 5L X60

Las tuberías objetivo del estudio a realizar son API 5L de grado X60, estas tuberías de acero al carbono siguen el estándar presente en el código API 5L [15], son de carácter dúctil y su composición química presenta como agregados Manganeso, Fósforo, Azufre, Vanadio, Niobio y Titanio.

2.5.1. Propiedades de tracción

A continuación se presentan las propiedades de tracción de las tuberías API 5L X60, estas son iguales sin importar si la tubería es soldada o es sin costura según establece el código API [15].

Tabla 2.5: Propiedades de tracción del API 5L X60 [15].

Propiedad de tracción				
Esfuerzo de fluencia		Resistencia a la tracción		Elongación
mín	máx	mín	máx	mín
MPa (psi)		MPa (psi)		%
415 (60200)	565 (81900)	520 (75400)	760 (110200)	18,5 ^a

^a La elongación es calculada mediante la ecuación 2.6 , presente en [15].

$$A_f = C \frac{A_{xc}^{0.2}}{U^{0.9}} \quad (2.6)$$

$C = 1940$.

$A_{xc} = 130 \text{ mm}^2$.

$U =$ Resistencia a la tracción mínima (520 MPa).

2.5.2. Constantes elásticas API 5L X60

A continuación se presentan las propiedades elásticas de las tuberías API 5L X60, estas propiedades representan la respuesta mecánica de las tuberías ante vibraciones y esfuerzos externos. Se presentan en la tabla 2.6.

Tabla 2.6: Constantes elásticas tubería API 5L X60.

Propiedad ^a	Valor
Módulo de elasticidad (GPa)	210
Coefficiente de Poisson	0.3
Densidad (kg/m^3)	7850

^a Constantes elásticas presentes en [16].

2.6. ASME B31.4

El Código ASME B31 para Tuberías a Presión consta de varias Secciones publicadas individualmente, siendo cada una de ellas una norma para diversas aplicaciones y necesidades de transporte de fluidos.

El estudio a realizar se basa en lo establecido en la norma ASME B31.4, de título "Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries", esta norma como indica su nombre es específica para el diseño, construcción y mantenimiento de sistemas de tuberías transportadores de fluidos y slurry.

2.6.1. Factor de diseño

Una vez se determinan las cargas totales que afectan a la tubería en funcionamiento, se designa un factor de diseño el cual actúa como ponderador de las cargas presentes, para así a

la hora de escoger el material de la tubería a enterrar, exista una holgura entre cargas teóricas y las cargas reales, y así evitar la aparición de fallas durante el funcionamiento del tubo enterrado. La holgura proporcionada por el factor de diseño considera posibles variaciones en el sistema, por ejemplo: imprecisión en las dimensiones o propiedades elásticas de la tubería, errores cometidos durante la instalación y la exactitud de las formulas teóricas empleadas.

El código ASME B31.4, párrafo C403.2 "Criteria for Pipe Wall Thickness and Allowances" [4], establece que a la hora de diseñar tuberías transportadoras de pulpa se debe considerar un factor de diseño $F = 0.80$. Se emplea este factor de diseño a la hora de determinar los esfuerzos máximos generados por la tronadura en la tubería.

2.6.2. Criterio de von Mises

El esfuerzo de von Mises es una magnitud ampliamente utilizada en ingeniería para evaluar la resistencia de materiales bajo deformaciones. A diferencia de otros esfuerzos, que pueden considerar solo una dirección, el esfuerzo de von Mises considera los tres esfuerzos principales, proporcionando una medida completa de la intensidad de esfuerzo en un punto.

El código ASME B31.4 establece emplear el Criterio de von Mises para limitar los esfuerzos presentes en la tubería, este criterio indica que el material dúctil falla, cuando su esfuerzo combinado de von Mises alcanza al valor de esfuerzo de fluencia del material ($\sigma_{f \text{ min}}$).

Como la tubería objeto del estudio se encuentra previamente dimensionada, se asume que su diseño para la operación, considera el empleo del Factor de diseño = 0.80, establecido por el código ASME B31.4, implicando en un límite de esfuerzo de von Mises, representado por la expresión 2.7.

$$\sigma_{VM} \leq FD \cdot \sigma_f \quad (2.7)$$

FD: Factor de diseño.

σ_{VM} : Esfuerzo combinado de von Mises en tres dimensiones.

σ_f : Esfuerzo de fluencia inferior.

2.6.2.1. Esfuerzo combinado de von Mises

El esfuerzo de von Mises se puede calcular considerando los esfuerzos principales de cada eje, estos esfuerzos principales se determinan en base a la geometría del sistema, en el caso de tres dimensiones se emplea la siguiente fórmula:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (2.8)$$

σ_{VM} : Esfuerzo combinado de von Mises en tres dimensiones.

σ_1 : Esfuerzo principal eje 1.

σ_2 : Esfuerzo principal eje 2.

σ_3 : Esfuerzo principal eje 3.

2.6.3. Criterio de sobre esfuerzo transiente

El código ASME B31.4, en su párrafo 403.3.4. "Criteria for Transient Overpressure", permite que se presente una sobre carga en el esfuerzo de diseño de la tubería en funcionamiento, equivalente al 10 %, en cualquier punto de esta mientras sea consecuencia de un fenómeno de tipo transiente.

En este contexto, considerando que la tronadura genera un fenómeno del tipo transiente, la carga generada por la tronadura debe cumplir con la condición en 2.9.

$$\sigma_t \leq 0,1 \cdot FD \cdot \sigma_f \quad (2.9)$$

σ_t : Esfuerzos originados por acción de la tronadura.

FD : Factor de diseño.

σ_f : Esfuerzo de fluencia inferior.

Considerando esta condición, en conjunto con las secciones 2.6.2 y 2.6.1, finalmente, un esfuerzo de von Mises admisible de tronadura debe obedecer la expresión 2.10. Al emplear el termino de "admisible" durante el estudio, se hace referencia al valor máximo que cumple dicha expresión.

$$\sigma_{VMt} \leq 0,1 \cdot FD \cdot \sigma_f \quad (2.10)$$

σ_{VMt} : Esfuerzo de von Mises originado por acción de la tronadura.

FD : Factor de diseño, de valor 0,80.

σ_f : Esfuerzo de fluencia inferior API 5L X60.

2.6.4. Criterio de deformación de tubería

El código ASME B31.4 establece en su párrafo 403.3.3 "Strain Criteria for Pipelines" el posible reemplazo del criterio de von Mises, por un valor límite a la deformación del 2 %, únicamente en caso que las consecuencias por emplear este criterio no impidan el buen funcionamiento de la tubería.

Además, el código establece que si se anticipa una deformación plástica al emplear este criterio, deben considerarse la excentricidad de la tubería y la capacidad de la soldadura para soportar dicha deformación sin presentar efectos perjudiciales.

2.7. Método de elementos finitos

El método de elementos finitos (FEM) es una poderosa herramienta de análisis computacional. Permite obtener una solución numérica aproximada del caso real, mediante la resolución de las ecuaciones que caracterizan el comportamiento físico del problema. El FEM puede aplicarse a problemas discretos y continuos, incluyendo respuestas lineales y no lineales.

El FEM discretiza el dominio de estudio dividiéndolo en subdominios llamados elementos, que corresponden a piezas de tamaño reducido con formas geométricas como tetraedros o hexaedros, cada elemento posee en sus vértices puntos representativos, denominados nodos. Un nodo en el vértice de un elemento, puede pertenecer a varios elementos adyacentes, la totalidad de nodos forman la malla del sistema, como se observa en 2.5. La calidad de la solución mejora con un malla más fina, o sea, una mayor cantidad de elementos.

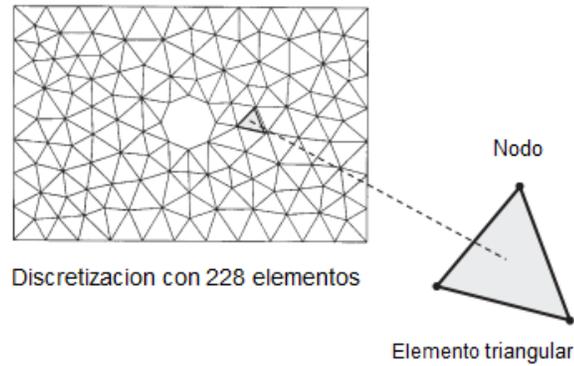


Figura 2.5: Discretización en elementos finitos utilizando elementos triangulares. Presente en [17].

Los pasos básicos en un análisis de elementos finitos, presentes en [17] se enumeran a continuación:

1. Discretizar el dominio en una malla de elementos finitos.
2. Desarrollar una solución aproximada en cada elemento en términos de los valores en los nodos. Una expresión matricial se desarrolla para relacionar las variables en los nodos de cada elemento. La matriz resultante se conoce comúnmente como matriz elemental.
3. Ensamblar los elementos finitos en componentes del dominio. Las matrices elementales se "ensamblan" para formar un conjunto de ecuaciones algebraicas que describen el sistema global.
4. Incorporar las condiciones de borde.
5. Resolver el sistema de ecuaciones mediante las simulaciones.

2.7.1. Elasticidad Lineal

La teoría de la elasticidad lineal describe el comportamiento de los componentes del sistema a estudiar mediante elementos finitos. Esta teoría aplicable a cuerpos sometidos a deformaciones pequeñas, relaciona a las componentes del tensor de esfuerzos en un punto determinado con las componentes del tensor de deformaciones en dicho punto, mediante la ecuación constitutiva 2.11, presente en [17].

$$\sigma_{ij} = \sum C_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (2.11)$$

σ_{ij} : Componente ij tensor de esfuerzos.

C_{ijkl} : Componente ijkl tensor de rigidez.

ϵ_{kl} : Componente kl tensor de deformaciones.

La teoría de la elasticidad lineal solo es aplicable a sólidos sometidos a pequeñas deformaciones, en los cuales sus esfuerzos y deformaciones estén relacionados linealmente y al igual que sus deformaciones con los desplazamientos.

En la teoría de la elasticidad lineal las pequeñas deformaciones generadas, se relacionan con los desplazamiento mediante la ecuación 2.12, presente en [17].

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.12)$$

ϵ_{ij} : Componente ij tensor de deformaciones.

u_i y u_j : Componentes vector desplazamiento.

x_i y x_j : Coordenadas espaciales.

2.8. Estudio previo

A fin de representar computacionalmente el efecto de las vibraciones generadas por la tronadura, se presenta el modelo del estudio desarrollado por A. Font y R. Benavides de nombre "Estudio de tronaduras próximas a minerodutos y sus efectos sobre los mismos, Etapa 1" [2].

La realización de este estudio se origina ante la problemática planteada por el cliente (CMIDC), quien se ve obligado a llevar a cabo una tronadura cercana a una tubería enterrada. El problema se origina porque las normas actuales sobre el control de daños por tronaduras, limitan excesivamente su magnitud de velocidad peak de partícula (PPV). Estas regulaciones se basan en estructuras de materiales con propiedades elásticas frágiles, y por lo tanto, hay una falta de investigación basada en estructuras con carácter dúctil, como lo son los minerodutos en faena.

Por lo que, con datos iniciales de, constantes elásticas de la roca en faena, materialidad y dimensiones de las tuberías cercanas. Se crea el modelo computacional presente en 2.6, utilizando el software COMSOL Multiphysics 5.6 [18], en su módulo de mecánica estructural, con el objetivo de generar la PPV asociada a una tronadura mediante el movimiento acelerado de una placa al interior del macizo rocoso, este movimiento acelerado desde el reposo genera un pulso que se transmite a través del macizo rocoso en dirección a la tubería enterrada al interior del modelo. Deformándola y generando esfuerzos en esta última.

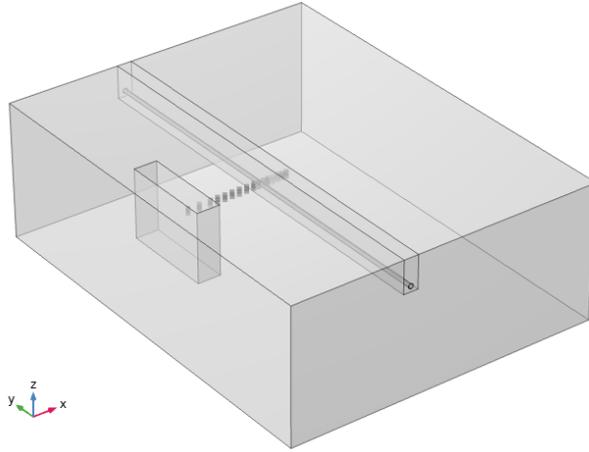


Figura 2.6: Vista isométrica modelo computacional en "Estudio de tronaduras próximas a minerodutos y sus efectos sobre los mismos, Etapa 1".

Las constantes elásticas de los macizos rocosos "Roca Dura" y "Roca Blanda" estudiados se presentan en 2.7.

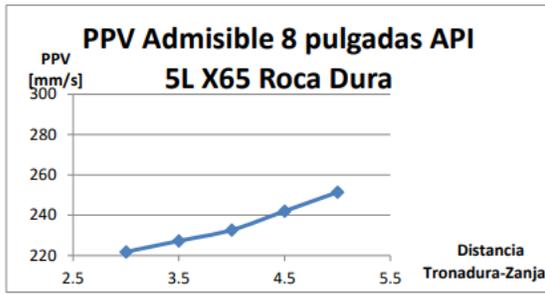
Tabla 2.7: Constantes elásticas rocas dura y blanda, estudiadas en [2].

Constante elástica	Roca Dura	Roca Blanda
Módulo de elasticidad (GPa)	1,2	0,49
Coefficiente de Poisson	0,25	0,25
Densidad (kg/cm ³)	2450	2400

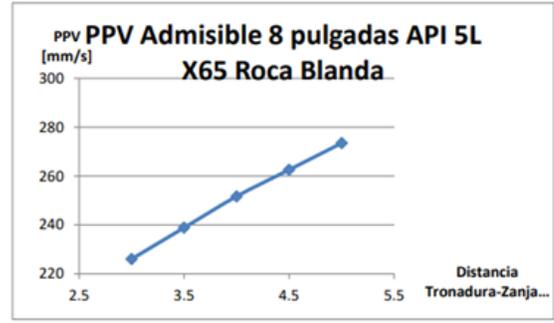
Para determinar la PPV admisible, se emplea el criterio de sobre esfuerzos transientes del código ASME B31.4 2.6.3. Los resultados obtenidos por el estudio presentan una relación directa entre la PPV admisible y la distancia en que se realiza la detonación, estos se presentan en 2.8.

Tabla 2.8: PPV admisible según la distancia tronadura a zanja, para cada escenario de tubería y macizo rocoso, presente en [2].

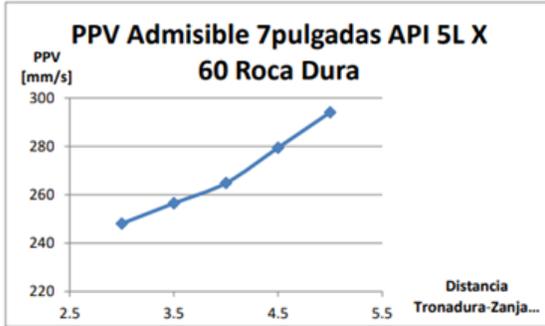
Distancia tronadura a zanja (m)	PPV admisible (mm/s)			
	API 5L X65 8" Roca dura	API 5L X65 8" Roca blanda	API 5L X60 7" Roca dura	API 5L X60 7" Roca blanda
3	248	231	226	222
3,5	256	245	239	227
4	265	259	252	233
4,5	279	273	263	242
5	294	288	273	251



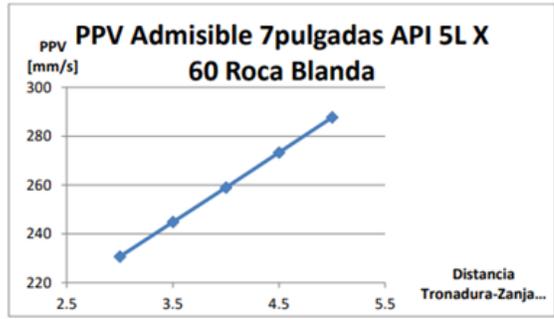
(a) Relación PPV admisible y distancia Tronadura-Zanja, API 5L X65-8"-Roca Dura.



(b) Relación PPV admisible y distancia Tronadura-Zanja, API 5L X65-8"-Roca Blanda.



(c) Relación PPV admisible y distancia Tronadura-Zanja, API 5L X60-7"-Roca dura.



(d) Relación PPV admisible y distancia Tronadura-Zanja, API 5L X60-7"-Roca Blanda.

Figura 2.7: Relación PPV admisible y distancia tronadura zanja Tuberías 7 y 8 pulgadas en roca dura y blanda, [2].

Se aprecia primeramente de las figuras en 2.7, que el valor de PPV admisible en los cuatro escenarios simulados, oscila entre los valores de 220 mm/s y 300 mm/s, según la distancia tronadura-zanja.

Los resultados del estudio "Estudio de tronaduras próximas a minerodutos y sus efectos sobre los mismos, Etapa 1", indican un aumento en la PPV admisible que varía entre un 73 % y un 136 % en comparación al límite establecido en [12] de 127 mm/s.

Capítulo 3

Modelación en Elementos Finitos

3.1. Metodología

A fin de modelar computacionalmente el efecto de una tronadura en una tubería enterrada, se procede con las etapas a continuación:

- Geometría de componentes: Los componentes presentes en el sistema macizo-zanja y tubería se modelan en el software COMSOL Multiphysics, siguiendo el esquema del modelo computacional desarrollado en [2].
- Pre-procesamiento: Con las geometrías generadas en el software COMSOL Multiphysics, se proceden a realizar todas las acciones requeridas para realizar una simulación de elementos finitos, estas son: instaurar la posición espacial de cada componente, asignar materiales, crear funciones asociadas al fenómeno, definir condiciones de borde y mallado de cada componente. Finalmente se configura el solver a utilizar para resolver el sistema planteado. Vale considerar que esto se realiza para el total de 30 escenarios a modelar computacionalmente, los cuales presentan variaciones de macizo rocoso y PPV asociada a la tronadura.
- Post-procesamiento: El post-procesamiento considera el análisis de los resultados obtenidos por la simulación de elementos finitos, lo que considera gráficos de distribución de esfuerzos de von Mises y deformaciones generadas en las tuberías. Junto a la obtención de las PPV presentadas en las zanjas, la extensión de tubería afectada por el pulso simulado y la aproximación de una distancia entre tronadura y tubería.

3.2. Esquema modelo computacional

El esquema utilizado para ubicar y determinar, las distancias entre los componentes del sistema, en el modelo computacional del presente estudio, corresponde a la figura 3.1, originada durante el desarrollo del estudio previo 2.8.

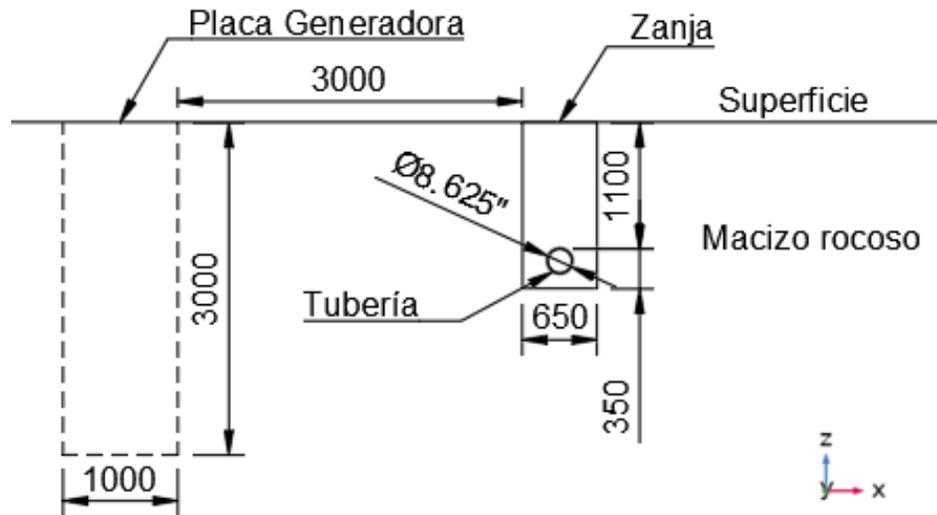


Figura 3.1: Esquema ubicación y distancias relativas entre componentes, en milímetros.

3.3. Modelación Macizo Rocoso

El macizo rocoso además de contener en su interior a todo el resto de componentes del sistema, es el medio principal por donde se transmiten las vibraciones originadas por la tronadura.

Las dimensiones seleccionadas durante el diseño de la geometría del macizo rocoso, se basan en dos condiciones:

- Las dimensiones seleccionadas deben representar una porción suficientemente grande del terreno, que permita la correcta propagación del pulso generado por tronadura, evitando que los límites del dominio interfieran en los resultados.
- La extensión del macizo rocoso en el plano transversal (eje y), debe permitir la correcta visualización de las deformaciones generadas en la tubería, por efecto de la transmisión de los pulsos estudiados.

La geometría seleccionada para representar al macizo rocoso computacionalmente se observa en las figuras 3.2.a y 3.2.b.

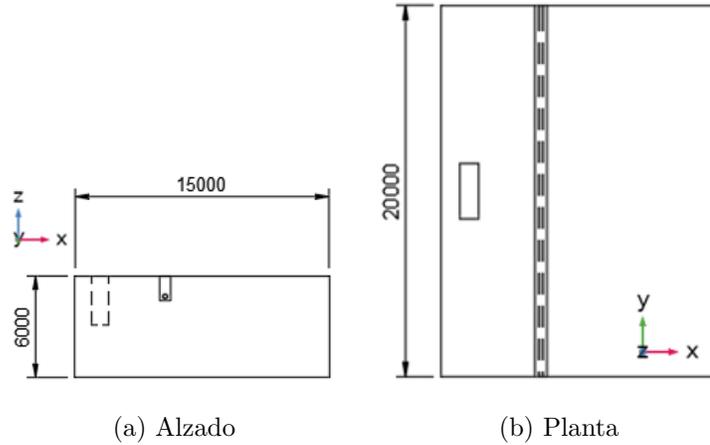


Figura 3.2: Vistas geometría macizo rocoso, en milímetros.

3.3.1. Material

Para modelar el macizo rocoso, se realizan simplificaciones a su naturaleza, que es inherentemente heterogénea debido a la presencia de discontinuidades. En el modelo computacional, se considera el macizo como un componente de material lineal e isotrópico. Esto nos permite representar su comportamiento mecánico mediante dos propiedades elásticas clave, como son el módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson. A fin de representar fielmente a un macizo rocoso real, se consideran en las propiedades mecánicas calificaciones geotécnicas (RMR) presentes en la literatura, índice que recopila el estado de las discontinuidades, presencia de humedad, etc.

En este estudio, con el fin de estudiar una amplia gama de suelos, se analizan cinco macizos rocosos diferentes, cada uno compuesto por una única matriz rocosa junto con sus discontinuidades. Las propiedades asociadas a cada modelo de macizo rocoso se presentan en la tabla 3.1, en orden creciente de módulo de elasticidad, para indicar el rango esperado de los resultados.

Tabla 3.1: Propiedades mecánicas macizos rocosos.

Roca	Rock Mass Rating ^a	E_{mr} (GPa). ^b	ν_{mr}	ρ_{mr} (g/cm ³)
Arenisca	54	1,4	0,23	2,45
Basalto	61	2,1	0,25	2,8
Toba	64	4,6	0,24	2,1
Andesita	65	9,5	0,27	2,3
Granito	60	13,2	0,18	2,65

^a Valores de RMR presentes en [20], [21], [22] y [23].

^b Modelo de Galera (2007) [8].

3.4. Modelación Zanja

Tras la modelación computacional del macizo rocoso, se procede a definir la geometría de la zanja donde se alojará la tubería enterrada. Se considera que esta zanja esta rellena

compactamente con la roca intacta presente en el macizo pero triturada.

La representación de esta geometría esta presente en las vistas de la figura 3.3.

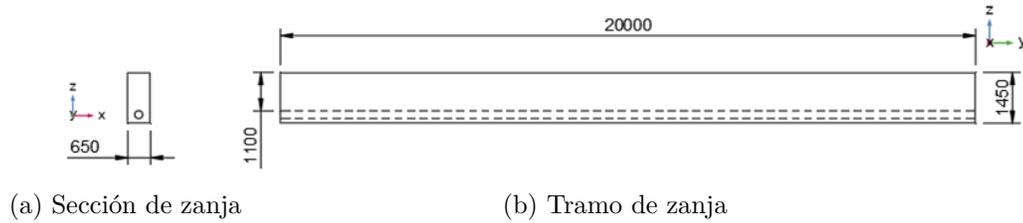


Figura 3.3: Vistas geométricas zanja, en milímetros.

3.4.1. Material

Similar a como se realiza en el macizo rocoso, la zanja asociada a cada macizo se representa computacionalmente como un componente de material lineal e isotrópico. Y su comportamiento mecánico también es descrito mediante módulo de elasticidad y coeficiente de poisson, el primero se calcula en base a la formula del módulo restringido, asociado al relleno de la zanja.

Tabla 3.2: Propiedades mecánicas zanjas.

Roca Triturada de relleno	$M_{zanja}(GPa)^a$	$E_{zanja}(GPa)$	ν_{zanja}	Densidad $_{zanja}z$ g/cm 3 ^b
Andesita	0,0689	0,0551	0,27	2
Arenisca	0,0689	0,0594	0,23	2,16
Basalto	0,0689	0,0574	0,25	2,46
Granito	0,0689	0,0634	0,18	2,33
Toba	0,0689	0,0584	0,24	1,85

^a Se emplea el valor de M_z acorde a una zanja rellena de roca triturada bien compactada.

^b Densidad $_z$ = Densidad roca intacta. \cdot 0,88.

3.5. Modelación Tubería

La tubería es el componente clave de este estudio. El esfuerzo que se genera en su superficie debido a la tronadura constituye el núcleo del análisis y es el valor principal que se busca determinar a través de la simulación por elementos finitos. La tubería a modelar corresponde a la tamaño 8 5/8, la cual posee las características geométricas en la tabla 3.3 y sus vistas geométricas principales en las figuras 3.4.a y 3.4.b.

Tabla 3.3: Características tubería.

Tamaño	Diámetro externo(in)	Espesor(in)	Diámetro interno(in)
8 5/8	8.625	0.250	8.125

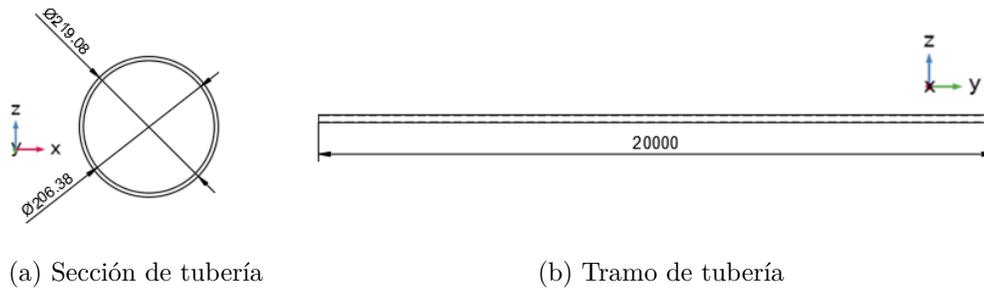


Figura 3.4: Vistas geométricas tubería, en milímetros.

3.5.1. Material

Para caracterizar el comportamiento que posee la tubería frente a las vibraciones, se emplea un material material lineal e isotrópico con las propiedades mecánicas de las tuberías de acero API 5L X60. Empleando el módulo de elasticidad, coeficiente de poisson y densidad presentes en la tabla 2.6.

3.6. Modelación Fluido

EL estudio contempla el análisis de una tubería que se encuentra en pleno funcionamiento dentro de una zanja, dicho funcionamiento incluye la presencia de pulpa de mineral al interior del mineroducto.

La geometría adoptada por el fluido de trabajo al interior de la tubería se presenta en las figuras 3.5.a y 3.5.b.

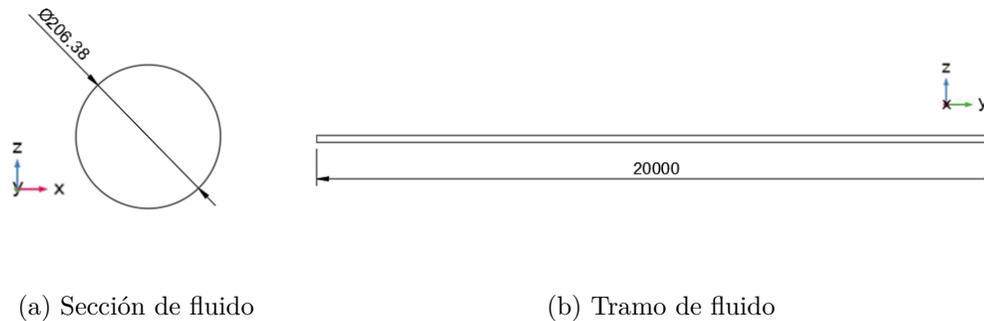


Figura 3.5: Vistas geométricas fluido, en milímetros.

3.6.1. Material

Para simplificar el análisis, la representación de la pulpa minera asume que las propiedades del fluido exceptuando la densidad son equivalentes a las del agua.

Esto, junto con la capacidad de COMSOL Multiphysics de aproximar el fluido a un sólido en base a su módulo de compresibilidad y módulo de cizalla, permite realizar una modelación más eficiente sin comprometer el objetivo final del estudio.

Las propiedades del fluido a emplear durante la modelación se presentan en la tabla 3.4.

Tabla 3.4: Propiedades del fluido al interior de la tubería.

Propiedad Fluido	Valor
Densidad (kg/m^3)	1600
Viscosidad dinámica ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	1
Módulo de compresibilidad (GPa) ^a	2.2
Módulo de cizalla (GPa) ^b	10^{-6}

^a Valor presente en [24].

^b Valor presente en [25].

3.7. Modelación Placa generadora

Para simular la tronadura y sus efectos en el macizo rocoso, se utiliza el método de aproximación para representar el pulso de choque, presente en 2.8. Esta aproximación se basa en la aceleración de una placa generadora a tres metros de la zanja, con el objetivo de inducir la velocidad peak de partícula generada por el pulso de tronadura.

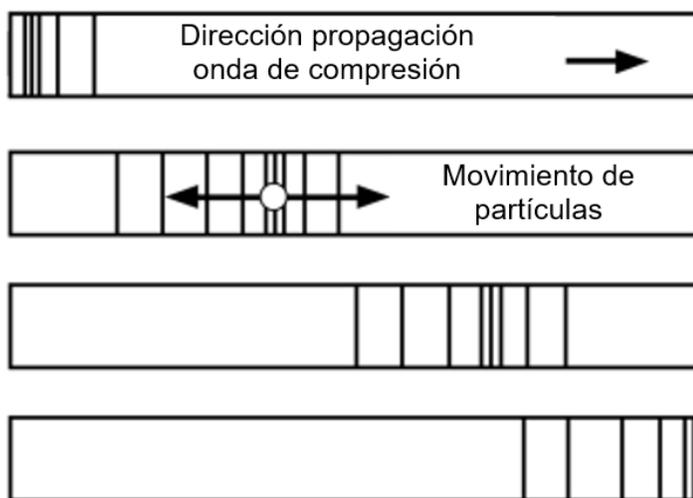


Figura 3.6: Transmisión pulso longitudinal en el sólido, adaptado de [10].

Esta placa se acelera desde el reposo hasta alcanzar la velocidad peak de partícula (PPV) seleccionada para el escenario, generando así el movimiento continuo de partículas dentro del macizo rocoso hasta la zanja visto en 3.6.

Finalmente, se consideran placas con tres extensiones transversales (paralelas a la tubería) distintas, con el objetivo de representar frentes de pulsos generados por tronaduras a diferentes distancias de la tubería. Las tres placas son colocadas a igual distancia de la tubería para evitar la influencia de la atenuación del pulso generado en los resultados.

Las configuraciones geométricas seleccionadas para las tres placas del estudio se presentan en las figuras 3.7, 3.8 y 3.9.

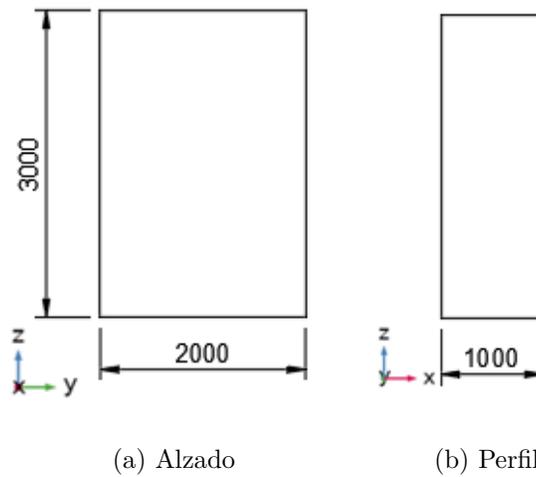


Figura 3.7: Vistas geométricas de placa generadora, de extensión transversal (paralela a la tubería) igual a dos metros, en milímetros.

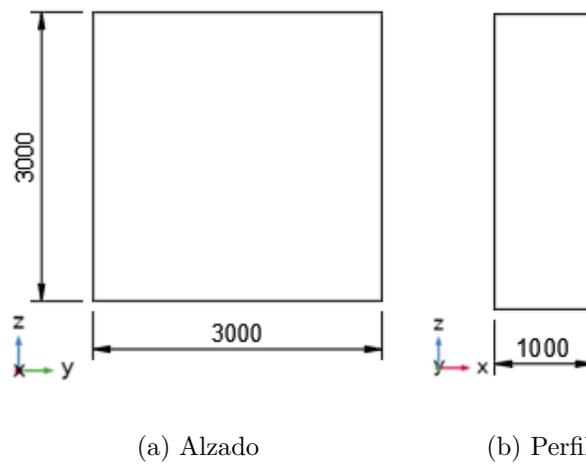


Figura 3.8: Vistas geométricas de placa generadora, de extensión transversal (paralela a la tubería) igual a tres metros, en milímetros.

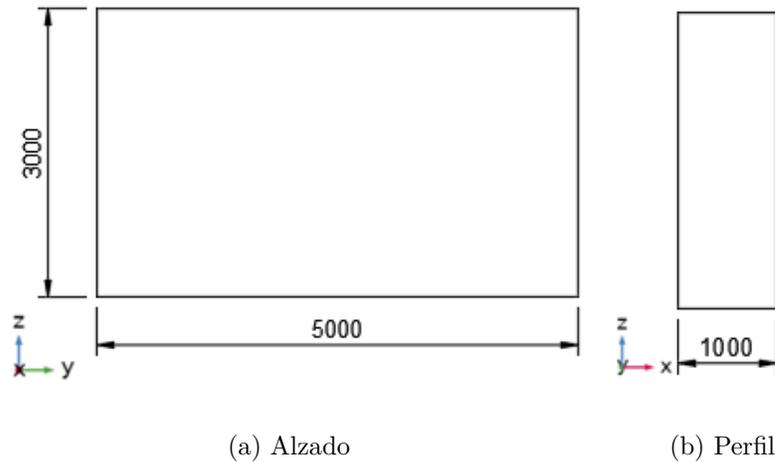


Figura 3.9: Vistas geométricas de placa generadora, de extensión transversal (paralela a la tubería) igual a cinco metros, en milímetros.

3.7.1. Material

Dado que la placa generadora simula la acción de una onda de choque al interior del macizo rocoso, el material de esta misma coincide con el macizo rocoso del escenario 3.1.

3.8. Condiciones de Contacto

Los contactos entre las superficies de macizo rocoso - placa generadora, macizo rocoso - zanja, tubería - zanja y tubería - fluido se consideran como unidos, mediante la condición "Formar unión" de COMSOL Multiphysics.

El software mediante este método divide las geometrías partícipes del sistema en dominios delimitados por sus fronteras, físicamente esto implica que los distintos dominios del modelo no presentan movimiento relativo entre ellos.

3.9. Condiciones de borde

Antes de detallar las condiciones de borde empleadas en la modelación, es importante señalar que los valores iniciales de los dominios se establecen en estado de reposo. Esto implica que los valores iniciales en todos los dominios son iguales a cero para las tres coordenadas del campo de desplazamiento y campo de velocidad.

3.9.1. Velocidad prescrita del pulso

La condición de velocidad prescrita, se aplica en la superficie posterior de la placa generadora destacada en la figura 3.10, dicha superficie se acelera hasta alcanzar la velocidad peak de partícula en dirección x establecida para el escenario, mediante la función por partes 3.1. No se prescribe velocidad en las direcciones y y z.

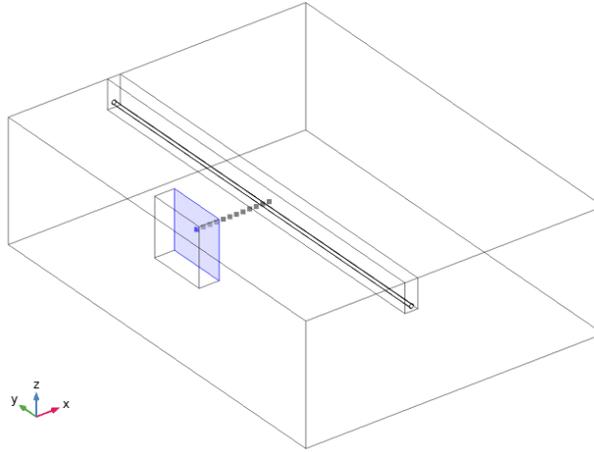


Figura 3.10: Velocidad prescrita en dirección x.

$$V_x(t) = \begin{cases} \frac{PPV}{t_g} \cdot t & , \text{si } t \leq t_g, \\ 0 & , \text{si } t > t_g. \end{cases} \quad (3.1)$$

V_x : Velocidad en la dirección x en un instante t (mm/s).

PPV : Velocidad peak de partícula (PPV) asignada al pulso (mm/s).

t_g : Tiempo requerido para alcanzar la PPV máxima en el estudio (s).

t : Tiempo (s).

El estudio considera magnitudes de PPV iguales a 450 mm/s y 500 mm/s.

3.9.2. Restricción fija base del macizo

Con el fin de asemejar el modelo a la realidad, que considera a la base de la sección de macizo rocoso representada por el estudio, unida al resto de la corteza terrestre. Se aplica una restricción fija en la base del macizo rocoso, en la superficie destacada en la figura 3.11, esto implica que los desplazamientos en dicha superficie son cero en todas las direcciones.

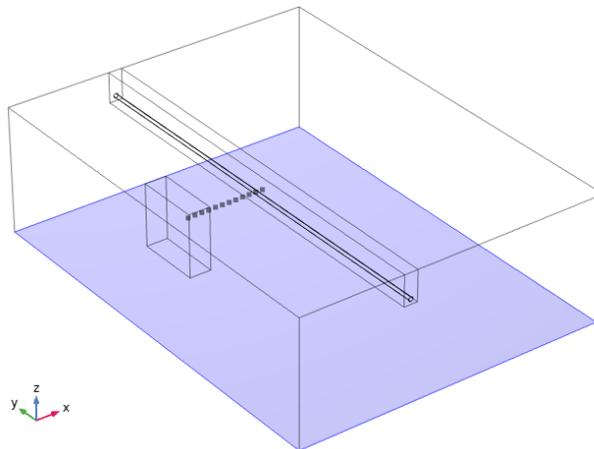


Figura 3.11: Base del macizo rocoso fijada.

3.10. Convergencia de mallado

En esta sección se presentan las pruebas realizadas para determinar el mallado óptimo, con el objetivo de representar con precisión el fenómeno de transmisión del pulso por el macizo rocoso, al menor costo computacional posible.

El análisis de convergencia consiste en un aumento progresivo de la cantidad de elementos de los dominios presentes en el sistema. Para evaluar convergencia, se registra el esfuerzo de von Mises máximo de cada iteración. Las simulaciones corresponden a la transmisión del frente de tronadura, de extensión transversal igual a tres metros en andesita.

Al realizar la segunda iteración con la menor cantidad de elementos, se puede identificar la zona de concentración de los esfuerzos en la tubería, y su valor de esfuerzo de von Mises máximo. Como se aprecia en la figura 3.12.

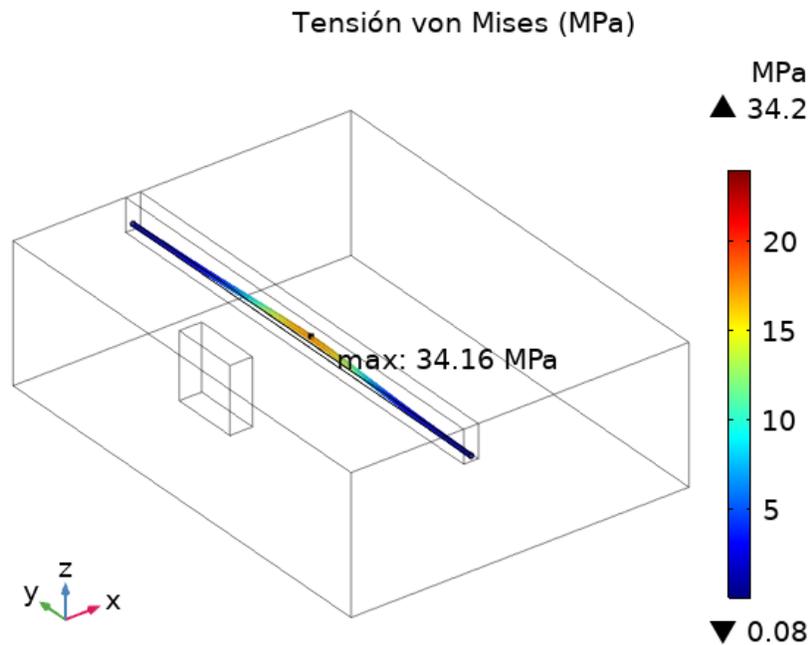


Figura 3.12: Distribución de esfuerzos de von Mises, segunda iteración.

A medida que se incrementa la cantidad de elementos y se reduce su tamaño en cada iteración, el modelo empieza a mostrar una mayor precisión en los resultados, a la vez que aumenta el tiempo destinado al cómputo, como se aprecia en la tabla 3.5.

La relación entre el esfuerzo de von Mises máximo y el tiempo de cómputo de las iteraciones, se presenta en 3.13.

Tabla 3.5: Convergencia de mallado.

Iteración	1	2	3	4	5	6	7
# de elementos	85765	213530	259911	305446	354380	413752	474299
$\sigma_{VM \text{ máx}}$ (MPa)	37	34,2	29,7	30,5	28,6	28,3	28
Tiempo (s)	624	1561	2141	2563	3507	4595	90353

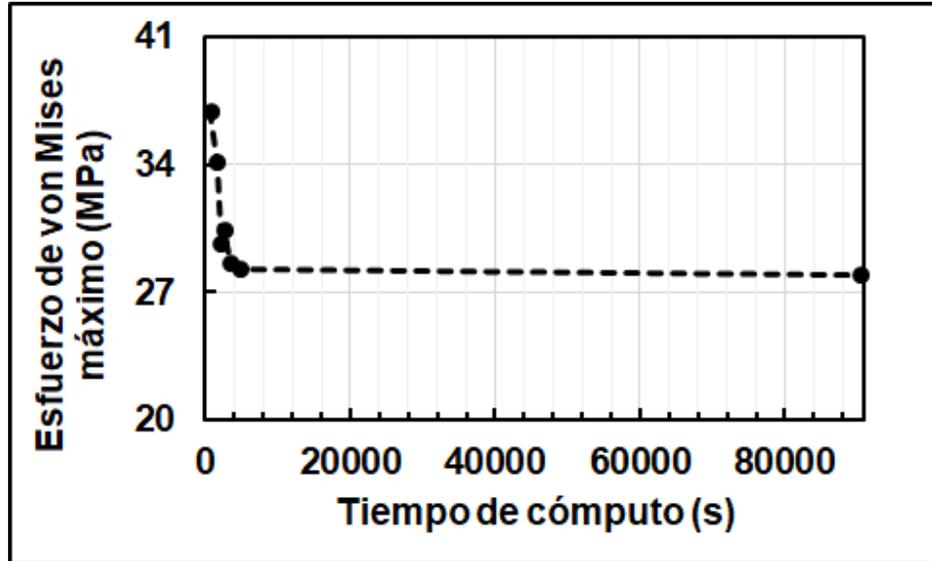


Figura 3.13: Relación entre el esfuerzo de von Mises máximo y el tiempo de cómputo.

3.10.1. Mallado

El mallado seleccionado corresponde a la cuarta iteración de la convergencia de mallado en la tabla 3.5, empleando geometría tetraédrica para los elementos de la malla. En la tabla 3.6 se detalla el número de elementos asignado a cada componente y en la figura 3.14 se observa el modelo con el mallado empleado para el estudio.

Tabla 3.6: Número de elementos y nodos del mallado.

Componente	Elementos	Nodos
Macizo Rocoso	30992	6272
Zanja	205077	41833
Tubería	80183	26768
Fluido	98300	23639

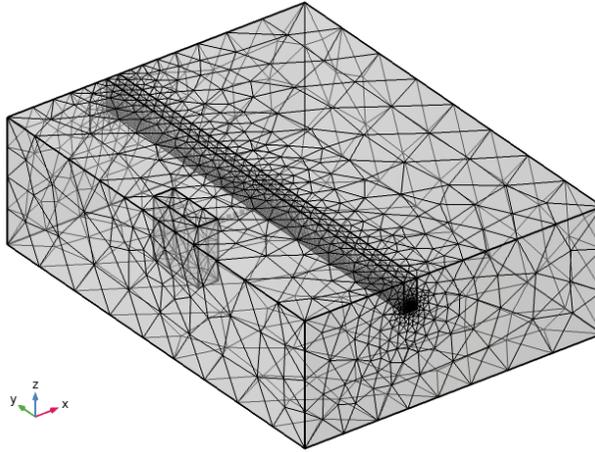


Figura 3.14: Mallado empleado por el modelo.

3.11. Convergencia tiempo de generación

A continuación se presentan las pruebas realizadas para determinar el tiempo de generación, a utilizar en la función por partes 3.1. El tiempo de generación representa, al periodo entre el inicio de la propagación del frente de ondas de choque al interior de la placa generadora, y el instante en que la superficie posterior de la misma, alcanza la magnitud de PPV asociada al escenario.

El tiempo de generación guarda estrecha relación con la velocidad de avance que posea el frente de ondas al interior del macizo rocoso del escenario, dependiente de las constantes elásticas del mismo, pero, por simplicidad, el tiempo de generación hallado en este estudio de convergencia realizado en andesita, se emplea en los cinco macizos rocosos considerados para el estudio.

El análisis de convergencia consiste en un aumento progresivo del tiempo de generación, registrando en cada iteración el esfuerzo de von Mises máximo y la PPV en zanja. Las simulaciones corresponden a la transmisión del frente de tronadura, de extensión transversal igual a tres metros en andesita.

Para realizar un estudio conservador del fenómeno, se busca un tiempo de generación que maximice la relación entre el esfuerzo de von Mises y la PPV en zanja. Por lo que, la convergencia se evalúa en base al ratio entre el esfuerzo de von Mises máximo en la tubería y la PPV en zanja 3.2 de cada iteración.

$$\text{Ratio} = \frac{\sigma_{\text{VM máx}}}{\text{PPV}_{\text{zanja}}} \left[\frac{\text{MPa}}{\text{mm/s}} \right] \quad (3.2)$$

$\sigma_{\text{VM máx}}$: Esfuerzo de von Mises máximo en la tubería (MPa).

$\text{PPV}_{\text{zanja}}$: PPV en zanja (mm/s).

Ratio : Relación obtenida por la división del esfuerzo de von Mises máximo entre la PPV en zanja. $\left(\frac{\text{Pa}}{\text{mm/s}} \right)$.

Tabla 3.7: Resultados estudio de convergencia tiempos de generación.

Tiempo (ms)	$\sigma_{VM\ 450}$ (MPa)	PPV _{máx. zanja} (mm/s)	Ratio (MPa/(mm/s))
1	3,2	98	0,0330
2	4,9	202	0,0242
3	9,7	299	0,0324
4	7,3	224	0,0324
5	14,4	342	0,0419
6	12	285	0,0420
7	10,3	244	0,0420
8	14,7	308	0,0476
8,1	14,5	304	0,0477
8,2	14,3	300	0,0477
9	13,1	274	0,0477
10	11,7	246	0,0477

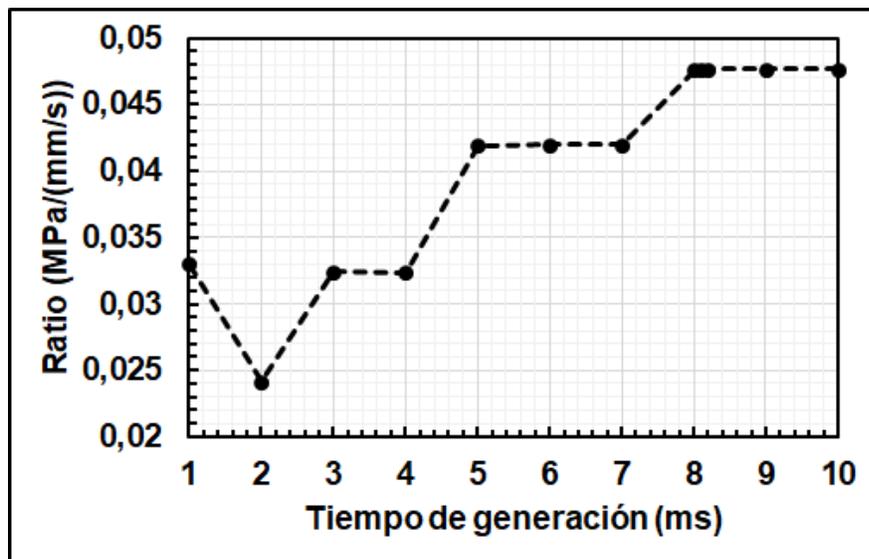


Figura 3.15: Ratio de los doce tiempos de generación estudiados.

En la figura 3.15 y la tabla 3.7, se aprecia la convergencia del Ratio en el tiempo = 8,2 ms. Finalmente se opta a emplear dicho tiempo de generación durante el desarrollo del estudio.

3.12. Post Procesamiento

El post procesamiento se centra en la obtención de tres magnitudes clave a lo largo del tiempo total de estudio. Estas magnitudes son fundamentales para el análisis de los distintos escenarios simulados y se presentan a continuación:

- Esfuerzo de von Mises en tubería.
- Deformación % de tubería.
- PPV en zanja.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo, se presentan los resultados de los escenarios simulados durante el desarrollo del estudio, considerando la generación de pulsos con distintas extensiones transversales, en busca de determinar el daño causado por la transmisión de los mismos, mediante el uso de los criterios determinados por el código ASME B31.4.

- Se han ocultado los dominios restantes del sistema para enfocar el análisis en la tubería.
- Los resultados de cada magnitud se subdividen en base al escenario descrito, específicamente la extensión transversal del pulso generado y la PPV asociada a su generación. Los resultados de los macizos rocosos se ordenan según módulo de elasticidad en forma ascendente.
- La nomenclatura de cada escenario corresponde a : "Extensión transversal del pulso en metros"- "PPV de generación en mm/s"- "Macizo rocoso" (Ejemplo: 5-450-Granito).
- Los resultados relevantes se presentan en base a las magnitudes normalizadas por el código ASME B31.4, en sus criterios de sobre esfuerzos 2.6.3 y de deformación 2.6.4.

4.1. Esfuerzo de von Mises

El esfuerzo de von Mises es una magnitud empleada para representar los esfuerzos generados en un punto, considerando los tres esfuerzos principales.

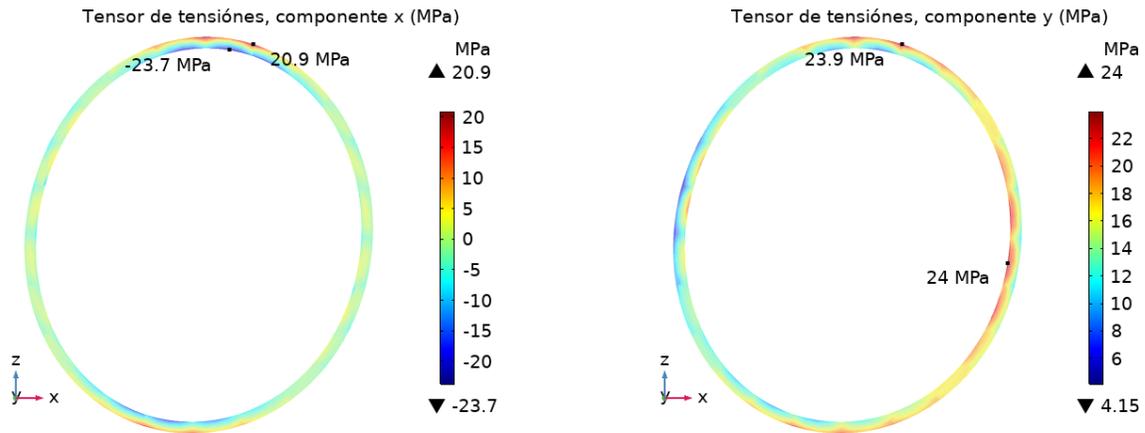
Los resultados se presentan inicialmente mostrando la distribución del esfuerzo de von Mises registrado en las tuberías por efecto del pulso, específicamente en los escenarios de macizos rocosos que representan los valores extremos del esfuerzo máximo de von Mises, denominados como casos límite de los resultados. Con el objetivo de proporcionar el rango completo de resultados obtenidos en las simulaciones.

Finalmente, se incluyen tablas que contienen el esfuerzo de von Mises máximo, extensión zona de tracción, distancia aproximada de tronadura y PPV en zanja en todos los macizos rocosos estudiados.

4.1.1. Esfuerzos principales

A continuación, se presentan las componentes del esfuerzo en vista de corte al centro de la tubería, a fin de identificar los puntos críticos de la tubería frente a la transmisión del

pulso. Los puntos críticos son comunes en todas las tuberías sin importar el macizo rocoso, la variación presente esta asociada netamente a las magnitudes que presenten los esfuerzos máximos en dichos puntos.



(a) Vista en corte, distribución de esfuerzos normales componente X. Factor de escala 100:1.

(b) Vista en corte, distribución de esfuerzos normales componente Y. Factor de escala 100:1.

Figura 4.1: Distribución de esfuerzos normales en las componentes X e Y.

La vista en corte del esfuerzo normal en la componente X enseña una concentración de esfuerzos tanto de tracción (positivos) como de compresión (negativos) en la parte superior (top) e inferior (bottom) de la tubería. Indicando que dichas partes son puntos críticos.

Esta distribución de esfuerzos indica una disminución del diámetro longitudinal de la tubería, debido a la compresión causada por la propagación del pulso al interior de la zanja, provocando la ovaladura de la tubería.

La vista en corte de la componente normal Y del esfuerzo, posee una distribución similar a la observada en la componente x, con una concentración de esfuerzos en la parte superior (top) e inferior (bottom) de la tubería. Además, se aprecia que la zona frontal de la tubería presenta esfuerzos de tracción bajos, y la zona posterior esfuerzos de tracción más elevados. Esto indica que la tubería esta siendo altamente estirada en su parte posterior, presentando una curvatura y concentrando el esfuerzo longitudinal en esa zona, representando a un punto crítico de la tubería.

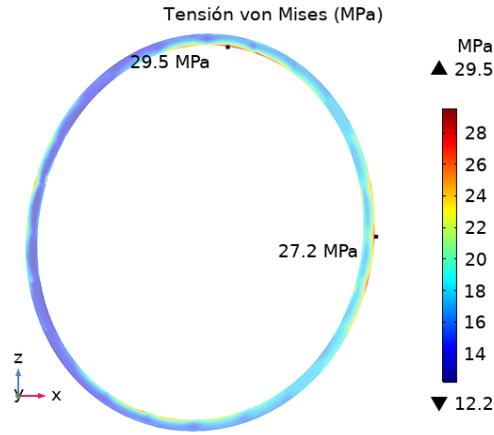


Figura 4.2: Vista en corte, distribución de esfuerzo de von Mises. Factor de escala 100:1.

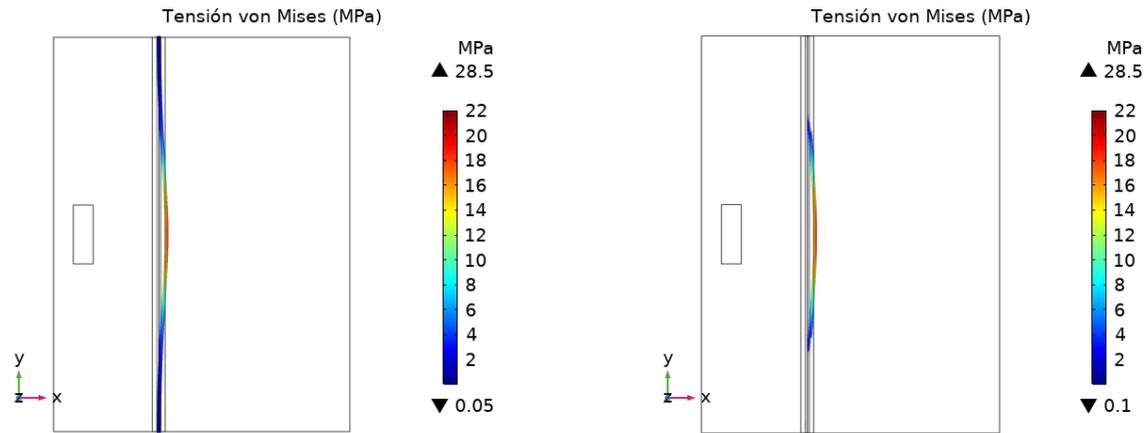
La distribución del esfuerzo de von Mises presenta una concentración en la zona superior asociada a la ovaladura de la tubería y en la zona posterior asociada a la flexión de la tubería. El valor máximo se presenta en la zona superior, indicando que el fenómeno de ovaladura es el más crítico según el criterio de von Mises.

Además, se observa que los valores máximos coinciden con los puntos críticos previamente identificados por los esfuerzos normales de las componentes x e y, lo que respalda su elección como medida de la intensidad del esfuerzo y justifica su uso según el código ASME B31.4.

4.1.2. Zona de tracción y distancia

Los resultados de esfuerzo de von Mises, además permiten determinar la sección de la tubería donde se concentra la mayor parte del daño generado, denominada durante el estudio como "zona de tracción". Esta zona se caracteriza por valores positivos de σ_{yy} , indicando la presencia de esfuerzos de tracción en los elementos de la tubería, dicha tracción esta asociada al estiramiento generado en la tubería como efecto de la transmisión del pulso al interior de la zanja.

Por lo tanto, la zona de tracción señala la sección de tubería que concentra el daño generado por la transmisión del pulso, como se aprecia en las figuras 4.3.a, 4.3.b.



(a) Esfuerzo de von Mises en tubería. Factor de escala 300:1.

(b) Esfuerzo de von Mises en zona de tracción. Factor de escala 300:1.

Figura 4.3: Distribución de esfuerzos en los componentes X e Y.

La utilidad de la zona de tracción consiste en su empleo para estimar geoméricamente la distancia entre tronadura y tubería.

4.2. Deformación máxima

ASME B31.4 permite sustituir el límite tradicional en base al esfuerzo de von Mises y el esfuerzo de fluencia del material de la tubería, por un límite de deformación admisible bajo ciertas condiciones.

Según ASME B31.4, la deformación máxima permitida está limitada al 2%. Este límite de deformación garantiza que la tubería pueda experimentar deformación plástica sin comprometer su integridad general o su funcionalidad.

Para limitar la deformación experimentada por la tubería, se emplea la deformación principal máxima, que consiste en la máxima deformación en un punto del material, sometido a esfuerzos.

En un punto cualquiera del material, existen tres deformaciones principales, estas consisten en las deformaciones máximas asociadas a las direcciones principales de deformación, y se obtienen al encontrar los valores propios de la matriz de deformaciones. En este escenario, la dirección de la deformación máxima principal, coincide con la dirección de propagación del pulso en el sentido positivo del eje x.

En la figura 4.4, se aprecia la distribución de la deformación en la dirección principal.

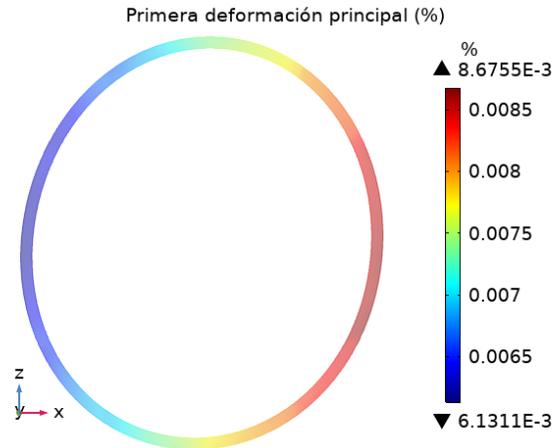


Figura 4.4: Deformación principal. Factor de escala 100:1.

En la imagen se aprecia una concentración de la deformación en la zona posterior de la tubería, indicando, de manera similar a lo presentado por el esfuerzo de von Mises, una zona crítica en la zona posterior de la misma, en este caso según el criterio de deformación.

Los resultados se presentan mediante una vista en corte enseñando la deformación máxima porcentual en el centro de la tubería por efecto de la transmisión del pulso, en los escenarios de macizos rocosos que representan los valores límite registrados. Finalmente, se incluyen tablas que además de esta vista de la deformación principal contienen la PPV en zanja.

4.3. Pulso de dos metros

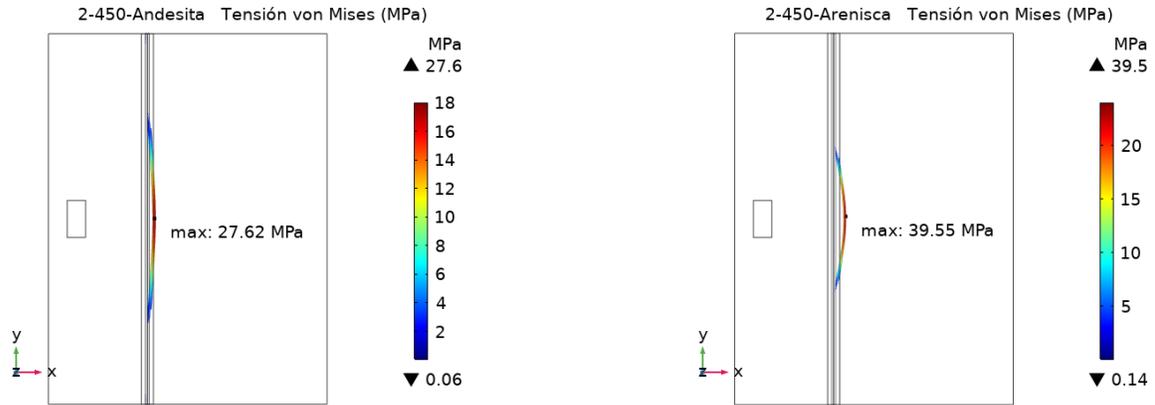
A continuación se presentan y discuten los resultados obtenidos en todas las simulaciones con un pulso generado de extensión transversal igual a dos metros. Los resultados son divididos en consideración de los criterios de sobre esfuerzos y deformación máxima presentes en ASME B31.4.

Inicialmente, se presentan gráficos con las distribuciones límite de las magnitudes asociadas a cada criterio considerado. Finalmente se presenta una tabla que contiene los resultados relevantes en cada macizo rocoso.

4.3.1. Esfuerzo de von Mises

Se presenta la distribución de esfuerzo de von Mises en la tubería por el pulso de dos metros. Con PPV de origen de 450 mm/s y 500 mm/s.

4.3.1.1. PPV de generación igual a 450 mm/s



(a) Distribución de esfuerzo de von Mises, Andesita. Factor de escala 300:1.

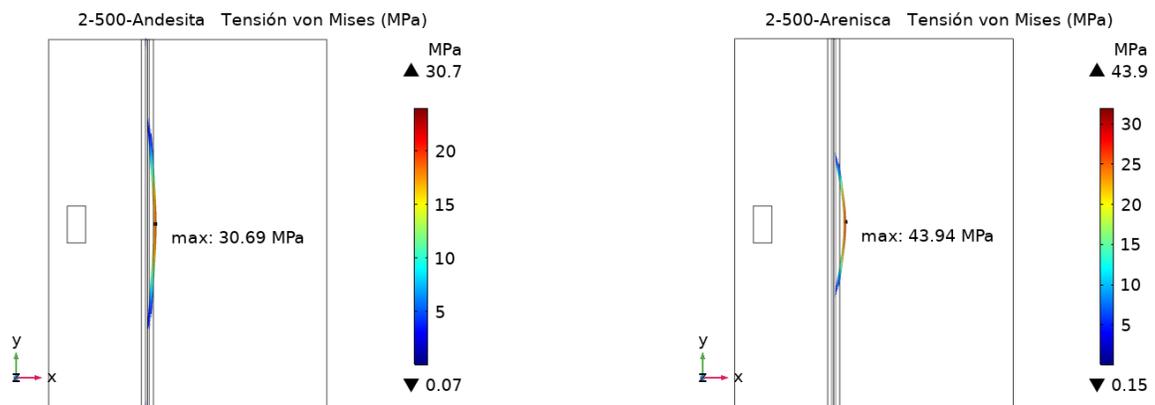
(b) Distribución de esfuerzo de von Mises, Arenisca. Factor de escala 300:1.

Figura 4.5: Distribución esfuerzo de von Mises casos límite, escenario 2-450.

Tabla 4.1: Esfuerzo de von Mises, PPV en zanja, Zona de tracción y Distancia aproximada de los distintos macizos rocosos, escenario 2-450

PPV 450				
Macizo	Esfuerzo de von Mises (MPa)	PPV Zanja (mm/s)	Zona de tracción (m)	Distancia (m)
Arenisca	39,6	280	8,0	4,0
Basalto	38,5	270	8,6	3,9
Toba	30,9	277	9,6	3,8
Andesita	27,6	281	11,9	3,6
Granito	28,6	279	12,2	3,6

4.3.1.2. PPV de generación igual a 500 mm/s



(a) Distribución de esfuerzo de von Mises, Andesita. Factor de escala 300:1.

(b) Distribución de esfuerzo de von Mises, Arenisca. Factor de escala 300:1.

Figura 4.6: Distribución esfuerzo de von Mises casos límite, escenario 2-500.

Tabla 4.2: Esfuerzo de von Mises, PPV en zanja, Zona de tracción y Distancia aproximada de los distintos macizos rocosos, escenario 2-500.

PPV 500				
Macizo	Esfuerzo de von Mises (MPa)	PPV Zanja (mm/s)	Zona de tracción (m)	Distancia (m)
Arenisca	43,9	311	8,0	4,0
Basalto	42,8	300	8,6	3,9
Toba	34,3	308	9,6	3,8
Andesita	30,7	312	11,9	3,6
Granito	31,8	310	12,2	3,6

4.3.1.3. Discusión

La discusión de los resultados en esta sección, se enfoca en el esfuerzo de von Mises, presente en las tablas 4.1 y 4.2 esta magnitud empleada por el criterio 2.6.3 para determinar el esfuerzo admisible por la tubería, presenta una diferencia máxima del 43 % entre los macizos rocosos límite a igual velocidad de generación, lo que evidencia que las constantes elásticas asignadas a cada material tienen un gran impacto en los esfuerzos registrados. En ambos casos, el esfuerzo de von Mises máximo se presenta al centro de la tubería.

El esfuerzo de von Mises admisible por la tubería API 5L X60, calculado en 4.7.1, corresponde a 33,2 MPa, en el primer escenario de simulaciones, con PPV de generación igual a 450 mm/s, únicamente en arenisca y basalto se presentan valores superiores, (19 % y 16 % respectivamente), excediendo e incumpliendo el criterio de sobreesfuerzo transiente en ASME B31.4, por lo que su PPV admisible en zanja debe ser inferior a la obtenida en las simulaciones. Al aumentar la PPV de generación a 500 mm/s, los macizos rocosos arenisca, basalto y toba exceden el límite instaurada por le criterio de sobreesfuerzos, en un 32 %, 29 % y 3 % respectivamente.

Los valores de von Mises más elevados presentan a su vez desplazamientos máximos de tubería superiores y zonas de tracción más acotadas, implicando que los macizos con menor esfuerzo de von Mises poseen la capacidad de distribuir las tensiones en una mayor extensión del tubo.

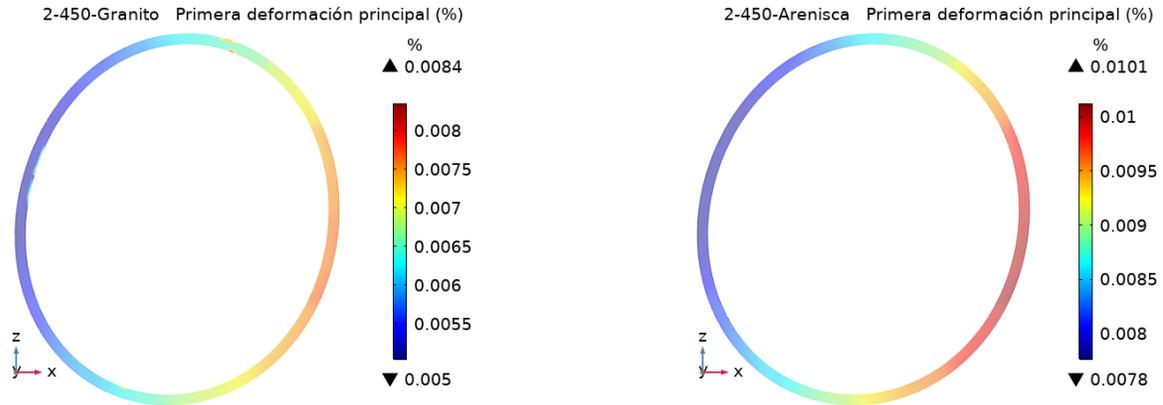
Las figuras 4.5.a y 4.5.b confirman que la zona de tracción de la tubería, caracterizada por los $\sigma_{yy} \geq 0$, coincide con la sección de tubería donde se presentan desplazamientos y esfuerzo de von Mises considerables, debido a a la tracción elevada que impone la transmisión del pulso, producto del estiramiento generado en la tubería.

Al entrar en comparación con el escenario con velocidad de generación 500 mm/s, se observan incrementos en las magnitudes de esfuerzo de von Mises y PVV en zanja, sin embargo, la longitud de zona de tracción se mantiene constante a pesar del aumento en la velocidad inicial, lo que respalda el uso de la zona de tracción para determinar la distancia comprendida entre tubería y tronadura, ya que su extensión no depende de la PPV de generación.

4.3.2. Deformación máxima

Se presenta la deformación máxima porcentual en la tubería por el pulso de dos metros. Con PPV de origen de 450 mm/s y 500 mm/s.

4.3.2.1. PPV de generación igual a 450 mm/s



(a) Distribución de deformación máxima, Granito. Factor de escala 100:1.

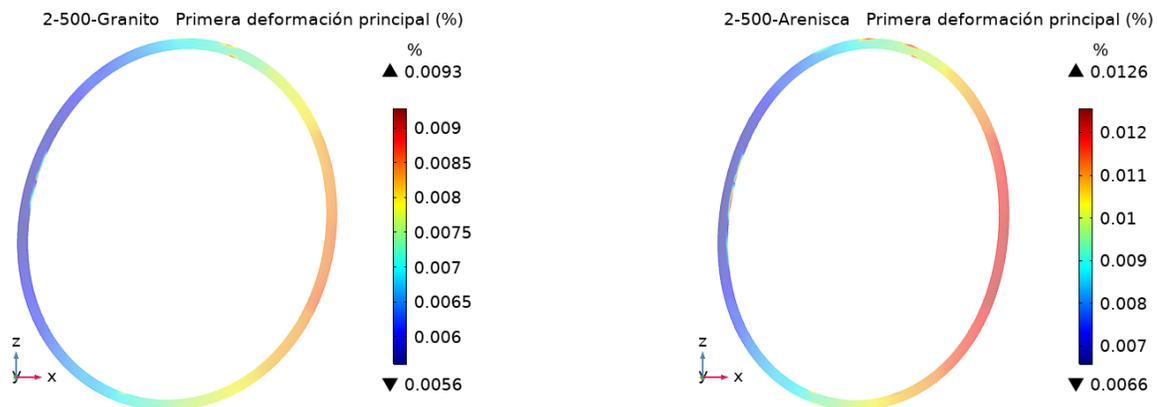
(b) Distribución de deformación máxima, Arenisca. Factor de escala 100:1.

Figura 4.7: Distribución deformación máxima casos límite, escenario 2-450.

Tabla 4.3: Deformación máxima porcentual y PPV en zanja de los distintos macizos rocosos, escenario 2-450.

PPV 450		
Macizo	Deformación máxima (%)	PPV Zanja (mm/s)
Arenisca	$1,131 \cdot 10^{-2}$	280
Basalto	$1,13 \cdot 10^{-2}$	270
Toba	$8,64 \cdot 10^{-3}$	277
Andesita	$8,38 \cdot 10^{-3}$	281
Granito	$8,35 \cdot 10^{-3}$	279

4.3.2.2. PPV de generación igual a 500 mm/s



(a) Distribución de deformación máxima, Granito. Factor de escala 100:1.

(b) Distribución de deformación máxima, Arenisca. Factor de escala 100:1.

Figura 4.8: Distribución deformación máxima casos límite, escenario 2-500.

Tabla 4.4: Deformación máxima porcentual y PPV en zanja de los distintos macizos rocosos, escenario 2-500.

PPV 500		
Macizo	Deformación máxima (%)	PPV Zanja (mm/s)
Arenisca	$1,256 \cdot 10^{-2}$	311
Basalto	$1,256 \cdot 10^{-2}$	300
Toba	$9,59 \cdot 10^{-2}$	308
Andesita	$9,31 \cdot 10^{-3}$	312
Granito	$9,28 \cdot 10^{-3}$	310

4.3.2.3. Discusión

Al igual que en el análisis basado en el esfuerzo de von Mises, se observa en los resultados presentes en 4.3 y 4.4, que los cinco macizos rocosos presentan diferentes valores de deformación máxima bajo la misma velocidad de generación inicial. Alcanzando una diferencia máxima en los casos límite del 35% entre las deformaciones alcanzadas por arenisca y granito, lo que confirma que las constantes elásticas del material tienen un impacto directo en las deformaciones inducidas en las tuberías debido a las tronaduras.

El código ASME B31.4 establece un límite de deformación del 2% para las tuberías en su criterio 2.6.4. Sin embargo, los resultados obtenidos en las simulaciones muestran que las deformaciones máximas alcanzadas en los escenarios de PPV = 450 mm/s y PPV = 500 mm/s son significativamente inferiores a este límite, con la mayor deformación registrada en arenisca de 0,01256%, deformación aproximadamente 160 veces menor que el límite crítico establecido por ASME.

Dado que las deformaciones observadas son tan bajas en comparación con el límite crítico, se puede concluir que las PPV presentes en las zanjas no implican ningún riesgo significativo si se utilizara exclusivamente este criterio para su evaluación. Además, en las figuras 4.7.a, 4.7.b, 4.8.a y 4.8.b se aprecia que la deformación se concentra en la zona posterior de la tubería, donde el pulso sale de la estructura.

4.4. Pulso de tres metros

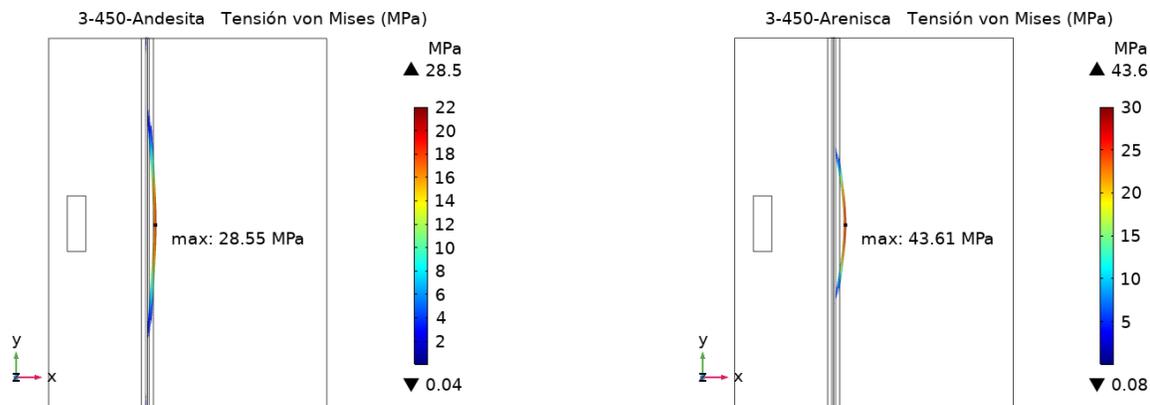
A continuación se presentan y discuten los resultados obtenidos en todas las simulaciones con un pulso generado de extensión transversal igual a tres metros. Los resultados son divididos en consideración de los criterios de sobre esfuerzos y deformación máxima presentes en ASME B31.4.

Inicialmente, se presentan gráficos con las distribuciones límite de las magnitudes asociadas a cada criterio considerado. Finalmente se presenta una tabla que contiene los resultados relevantes en cada macizo rocoso.

4.4.1. Esfuerzo de von Mises

Se presenta la distribución de esfuerzo de von Mises en la tubería por el pulso de tres metros. Con PPV de origen de 450 mm/s y 500 mm/s.

4.4.1.1. PPV de generación igual a 450 mm/s



(a) Distribución de esfuerzo de von Mises, Andesita. Factor de escala 300:1.

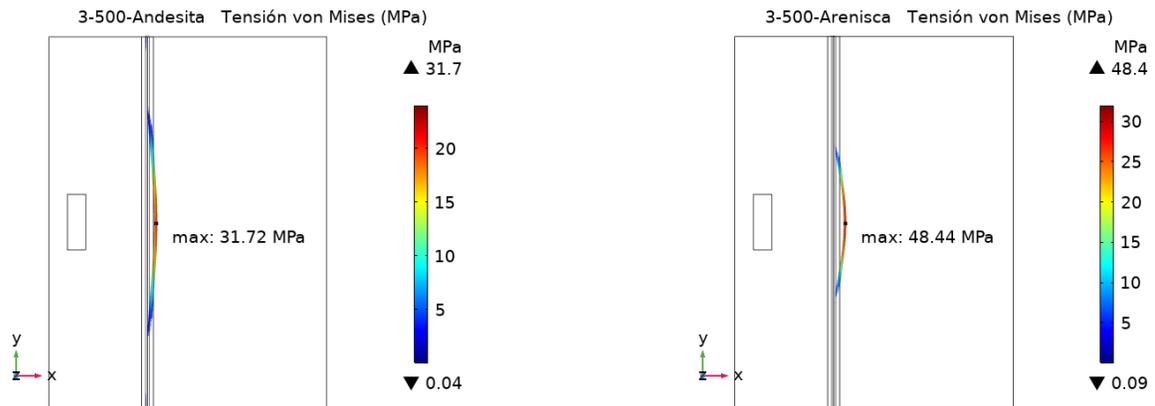
(b) Distribución de esfuerzo de von Mises, Arenisca. Factor de escala 300:1.

Figura 4.9: Distribución esfuerzo de von Mises casos límite, escenario 3-450.

Tabla 4.5: Esfuerzo de von Mises, PPV en zanja, Zona de tracción y Distancia aproximada de los distintos macizos rocosos, escenario 3-450

PPV 450				
Macizo	Esfuerzo de von Mises (MPa)	PPV Zanja (mm/s)	Zona de tracción (m)	Distancia (m)
Arenisca	43,6	316	8,5	4,6
Basalto	41,3	302	9,0	4,5
Toba	32,5	301	10,2	4,2
Andesita	28,6	300	12,9	3,9
Granito	29,3	298	13,1	3,9

4.4.1.2. PPV de generación igual a 500 mm/s



(a) Distribución de esfuerzo de von Mises, Andesita. Factor de escala 300:1.

(b) Distribución de esfuerzo de von Mises, Arenisca. Factor de escala 300:1.

Figura 4.10: Distribución esfuerzo de von Mises casos límite, escenario 3-500.

Tabla 4.6: Esfuerzo de von Mises, PPV en zanja, Zona de tracción y Distancia aproximada de los distintos macizos rocosos, escenario 3-500.

PPV 500				
Macizo	Esfuerzo de von Mises (MPa)	PPV Zanja (mm/s)	Zona de tracción (m)	Distancia (m)
Arenisca	48,4	351	8,5	4,6
Basalto	45,9	335	9,0	4,5
Toba	36,1	335	10,2	4,2
Andesita	31,7	334	12,9	3,9
Granito	32,6	331	13,1	3,9

4.4.1.3. Discusión

Esta sección discute los resultados presentes en las tablas 4.5 y 4.6. En todos los macizos rocosos, La magnitud de esfuerzo de von Mises máximo en la tubería aumentó, en diferentes proporciones. El incremento más significativo, se tuvo en arenisca, con un aumento del 10 %, mientras que el mínimo aumento generado se observo en granito, con un 3 %.

Los casos límite de la magnitud de este esfuerzo en este escenario presentan una diferencia del 53 %, superior a la de 43 % presentada por el pulso de dos metros. Además, el esfuerzo de von Mises también se presenta concentrado en el centro de la tubería.

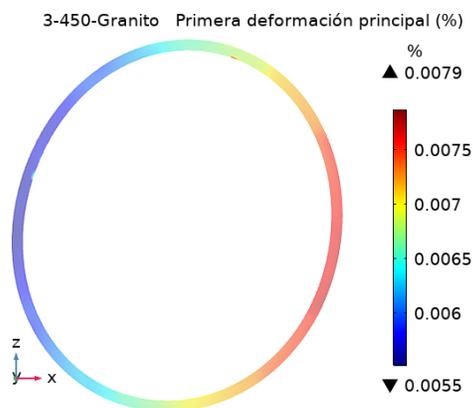
Al emplear PPV de generación igual a 450 mm/s, únicamente los macizos rocosos arenisca y basalto presenta esfuerzo de von Mises máximo superiores al establecido por el criterio de sobreesfuerzos igual a 33,2 MPa. Al aumentar la PPV de generación a 500 mm/s los macizos rocosos arenisca, basalto y toba exceden el límite.

En referencia a la zona de tracción, el único cambio generado al aumentar la extensión del pulso paralelamente a la tubería, es un aumento en la longitud de dicha zona para cada macizo rocoso. Al igual que en el escenario del pulso de dos metros, los macizos que presentan los esfuerzos de von Mises máximos superiores presentan las zonas de tracción más acotadas, las zonas de tracción contienen la gran concentración de esfuerzos generados en la tubería y La longitud de zona de tracción en la tubería se mantiene constante al aumentar la PPV de generación.

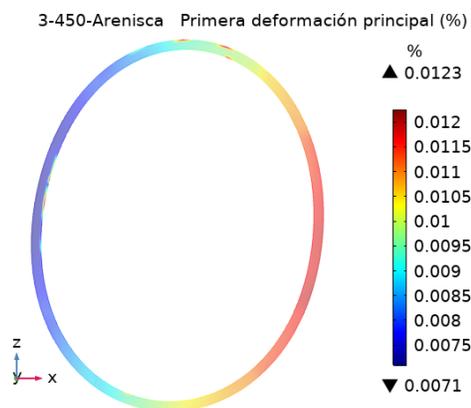
4.4.2. Deformación máxima

Se presenta la deformación máxima porcentual en la tubería por el pulso de tres metros. Con PPV de origen de 450 mm/s y 500 mm/s.

4.4.2.1. PPV de generación igual a 450 mm/s



(a) Distribución de deformación máxima, Granito. Factor de escala 100:1.



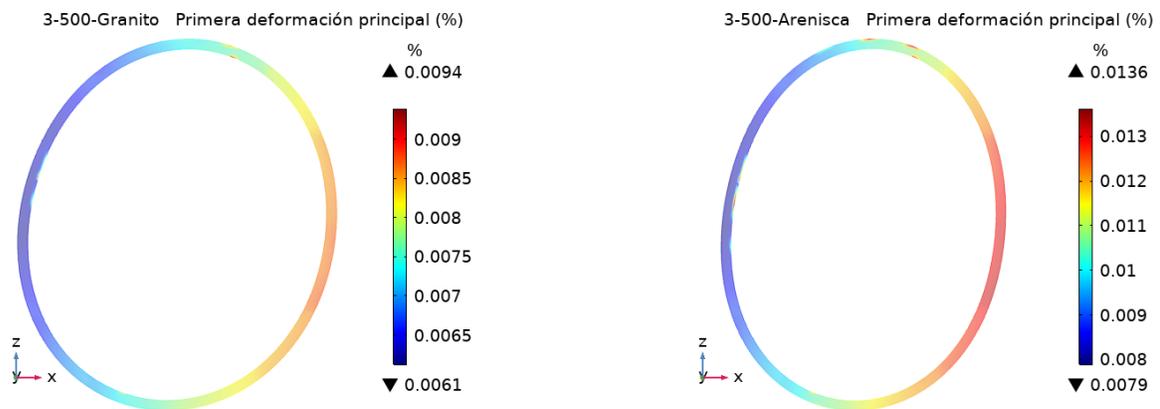
(b) Distribución de deformación máxima, Arenisca. Factor de escala 100:1.

Figura 4.11: Distribución deformación máxima casos límite, escenario 3-450.

Tabla 4.7: Deformación máxima porcentual y PPV en zanja de los distintos macizos rocosos, escenario 3-450.

PPV 450		
Macizo	Deformación máxima (%)	PPV Zanja (mm/s)
Arenisca	$1,225 \cdot 10^{-2}$	316
Basalto	$1,214 \cdot 10^{-2}$	302
Toba	$9,04 \cdot 10^{-3}$	301
Andesita	$8,68 \cdot 10^{-3}$	300
Granito	$8,45 \cdot 10^{-3}$	298

4.4.2.2. PPV de generación igual a 500 mm/s



(a) Distribución de deformación máxima, Granito. Factor de escala 100:1.

(b) Distribución de deformación máxima, Arenisca. Factor de escala 100:1.

Figura 4.12: Distribución deformación máxima casos límite, escenario 3-500.

Tabla 4.8: Deformación máxima porcentual y PPV en zanja de los distintos macizos rocosos, escenario 3-500.

PPV 500		
Macizo	Deformación máxima (%)	PPV Zanja (mm/s)
Arenisca	$1,361 \cdot 10^{-2}$	351
Basalto	$1,347 \cdot 10^{-2}$	335
Toba	$1,005 \cdot 10^{-2}$	335
Andesita	$9,64 \cdot 10^{-3}$	334
Granito	$9,39 \cdot 10^{-3}$	331

4.4.2.3. Discusión

Similar a lo descrito en los resultados de esfuerzo de von Mises, los resultados de deformación presentes en 4.7 y 4.8 indican un aumento en diferentes proporciones, en comparación al

pulso anterior. Registrándose el aumento más significativo en arenisca, de un 8 %, y el menor aumento en granito, de 1 %.

Aun así, las deformaciones generadas continúan siendo considerablemente menores al límite establecido por el criterio 2.6.4, ya que, el valor más elevado, presentado en arenisca con $PPV = 500 \text{ mm/s}$, es de 0,01361 %, es 147 veces menor que el 2 % límite.

Los casos límite de deformación presentan una diferencia del 45 % , superior al 35 % observado en el pulso de dos metros de extensión. Por último, las deformaciones en las tuberías también se concentran en la zona posterior.

4.5. Pulso de cinco metros

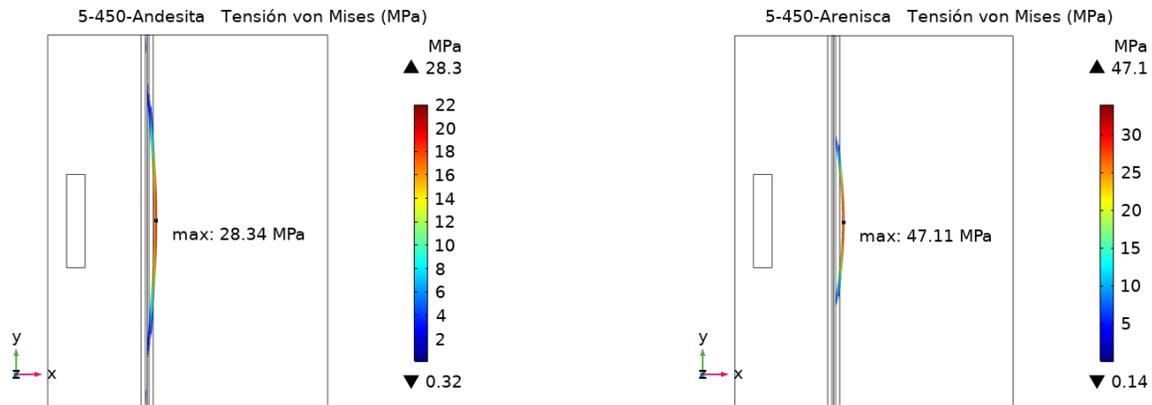
A continuación se presentan y discuten los resultados obtenidos en todas las simulaciones con un pulso generado de extensión transversal igual a cinco metros. Los resultados son divididos en consideración de los criterios de sobre esfuerzos y deformación máxima presentes en ASME B31.4.

Inicialmente, se presentan gráficos con las distribuciones límite de las magnitudes asociadas a cada criterio considerado. Finalmente se presenta una tabla que contiene los resultados relevantes en cada macizo rocoso.

4.5.1. Esfuerzo de von Mises

Se presenta la distribución de esfuerzo de von Mises en la tubería por el pulso de cinco metros. Con PPV de origen de 450 mm/s y 500 mm/s .

4.5.1.1. PPV de generación igual a 450 mm/s



(a) Distribución de esfuerzo de von Mises, Andesita. Factor de escala 300:1.

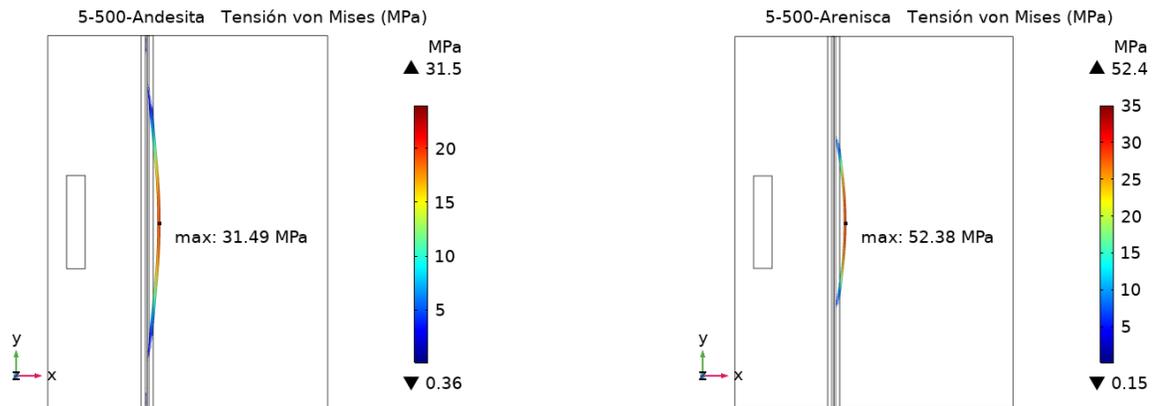
(b) Distribución de esfuerzo de von Mises, Arenisca. Factor de escala 300:1.

Figura 4.13: Distribución esfuerzo de von Mises casos límite, escenario 5-450.

Tabla 4.9: Esfuerzo de von Mises, PPV en zanja, Zona de tracción y Distancia aproximada de los distintos macizos rocosos, escenario 5-450.

PPV 450				
Macizo	Esfuerzo de von Mises (MPa)	PPV Zanja (mm/s)	Zona de tracción (m)	Distancia (m)
Arenisca	47,1	362	9,6	6,3
Basalto	43,5	346	10,3	5,9
Toba	33,2	331	11,9	5,1
Andesita	28,3	323	14,9	4,5
Granito	28,7	320	15,2	4,5

4.5.1.2. PPV de generación igual a 500 mm/s



(a) Distribución de esfuerzo de von Mises, Andesita. Factor de escala 300:1.

(b) Distribución de esfuerzo de von Mises, Arenisca. Factor de escala 300:1.

Figura 4.14: Distribución esfuerzo de von Mises casos límite, escenario 5-500.

Tabla 4.10: Esfuerzo de von Mises, PPV en zanja, Zona de tracción y Distancia aproximada de los distintos macizos rocosos, escenario 5-500.

PPV 500				
Macizo	Esfuerzo de von Mises (MPa)	PPV Zanja (mm/s)	Zona de tracción (m)	Distancia (m)
Arenisca	52,4	403	9,6	6,3
Basalto	48,4	384	10,3	5,9
Toba	36,9	368	11,9	5,1
Andesita	31,5	359	14,9	4,5
Granito	31,9	356	15,2	4,5

4.5.1.3. Discusión

Se observa en 4.9 y 4.10, resultados originados por la transmisión del pulso de extensión paralela a la tubería de cinco metros. El límite inferior en este escenario se presenta en granito, a diferencia de los pulsos anteriores que se presentaban en andesita, la tubería enterrada en arenisca sigue presentando la mayor magnitud de esfuerzo de von Mises máximo.

La diferencia entre los casos límites del escenario es del 66 %, siendo esta la mayor diferencia entre los tres pulsos simulados, se aprecia nuevamente la concentración de los esfuerzos al centro de la tubería.

Con respecto a las magnitudes, solo arenisca, basalto y toba presentan aumento en comparación con lo generado por el pulso de tres metros, de 8 %, 5 % y 2 % respectivamente, registrando los tres un aumento menor en comparación al aumento asociado al pulso anterior. A la vez que registran valores de esfuerzo superiores al límite asociado al criterio en ambas PPV de generación.

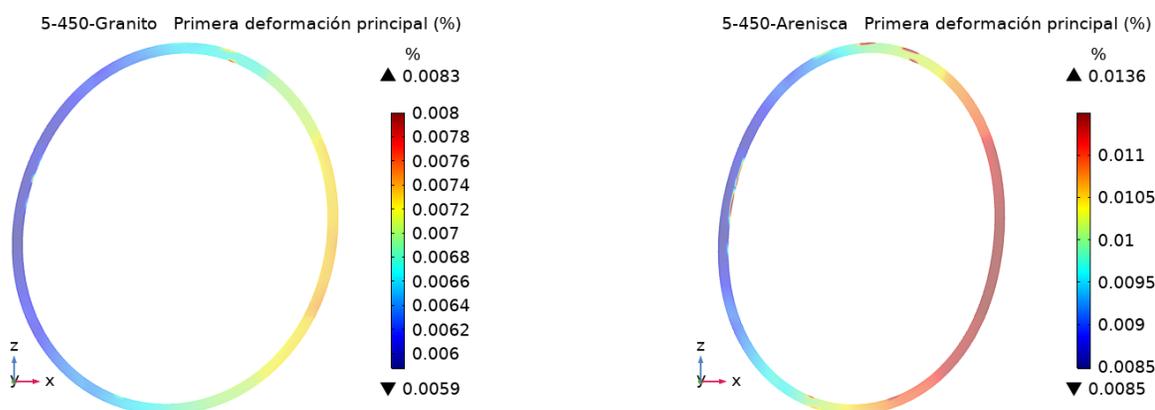
Por otro lado, los macizos andesita y granito presentan una disminución del 1 % y 2 % respectivamente, al simular con ambas PPV de generación. Se atribuye al hecho de que estos macizos presentan un mayor módulo de elasticidad, lo que implica en una mayor zona de tracción que distribuye mejor los esfuerzos en la superficie de la tubería.

Implicando que al extenderse el pulso paralelamente, o en base al planteamiento del modelo, se aumente la distancia entre tronadura y tubería, al alcanzar una cierta distancia, los esfuerzos máximos no aumentaran. Incluso si un pulso de mayor extensión provoca la aceleración de más partículas del suelo hacia la tubería, esto solo aumentará la longitud de tubería que se ve afectada por el pulso, pero el esfuerzo máximo se mantendrá estable.

4.5.2. Deformación

Se presenta la deformación máxima porcentual en la tubería por el pulso de cinco metros. Con PPV de origen de 450 mm/s y 500 mm/s.

4.5.2.1. PPV de generación igual a 450 mm/s



(a) Distribución de deformación máxima, Granito. Factor de escala 100:1.

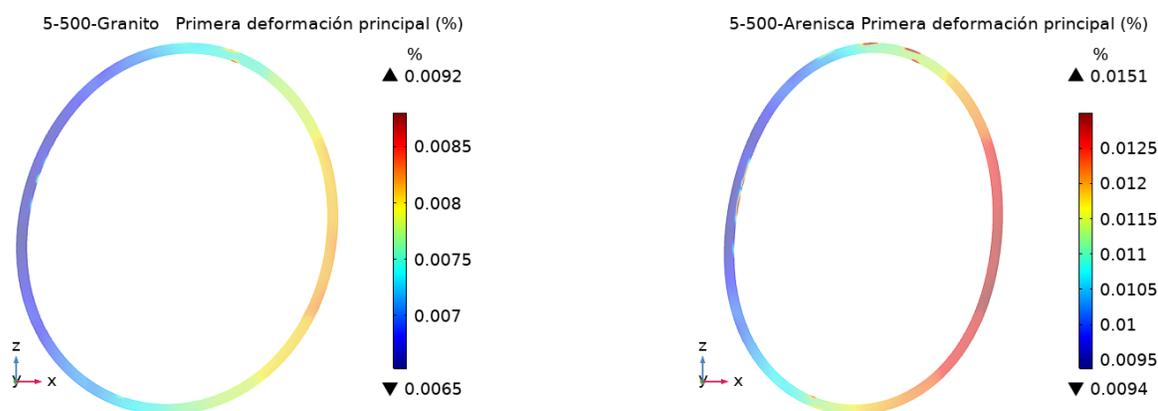
(b) Distribución de deformación máxima, Arenisca. Factor de escala 100:1.

Figura 4.15: Distribución deformación máxima casos límite, escenario 5-450.

Tabla 4.11: Deformación máxima porcentual y PPV en zanja de los distintos macizos rocosos, escenario 5-450.

PPV 450		
Macizo	Deformación máxima (%)	PPV Zanja (mm/s)
Arenisca	$1,359 \cdot 10^{-2}$	362
Basalto	$1,216 \cdot 10^{-2}$	346
Toba	$8,99 \cdot 10^{-3}$	331
Andesita	$8,42 \cdot 10^{-3}$	323
Granito	$8,30 \cdot 10^{-3}$	320

4.5.2.2. PPV de generación igual a 500 mm/s



(a) Distribución de deformación máxima, Granito. Factor de escala 100:1.

(b) Distribución de deformación máxima, Arenisca. Factor de escala 100:1.

Figura 4.16: Distribución deformación máxima casos límite, escenario 5-500.

Tabla 4.12: Deformación máxima porcentual y PPV en zanja de los distintos macizos rocosos, escenario 5-500.

PPV 500		
Macizo	Deformación máxima (%)	PPV Zanja (mm/s)
Arenisca	$1,511 \cdot 10^{-2}$	403
Basalto	$1,351 \cdot 10^{-2}$	384
Toba	$9,99 \cdot 10^{-3}$	368
Andesita	$9,36 \cdot 10^{-3}$	359
Granito	$9,22 \cdot 10^{-3}$	356

4.5.2.3. Discusión

Se puede apreciar en 4.11 y 4.12, resultados originados por la transmisión del pulso de extensión paralela a la tubería de cinco metros. La diferencia registrada entre los casos límite

es de un 64 % entre los macizos arenisca y granito, superior a la registrada en las deformaciones del pulso de 3 metros.

En este escenario la deformación presenciada en arenisca presenta un considerable aumento en comparación al escenario anterior del 10,9 %, y basalto un imperceptible aumento de 0,2 %. Aún en presencia de estos aumentos, la mayor deformación registrada en arenisca de 0,01511 %, es 132 veces menor al límite establecido por el criterio de 2 %.

Los tres macizos restantes, toba, andesita y granito, presentan disminuciones del 0,6 %, 3 % y 1,8 %, indicando un comportamiento similar al presenciado en los resultados de esfuerzo de von Mises, la deformación máxima se estabiliza con el aumento de la extensión paralela de los pulsos, el único cambio que presenta este aumento es la mayor longitud de tubería que es afectada por la transmisión del pulso.

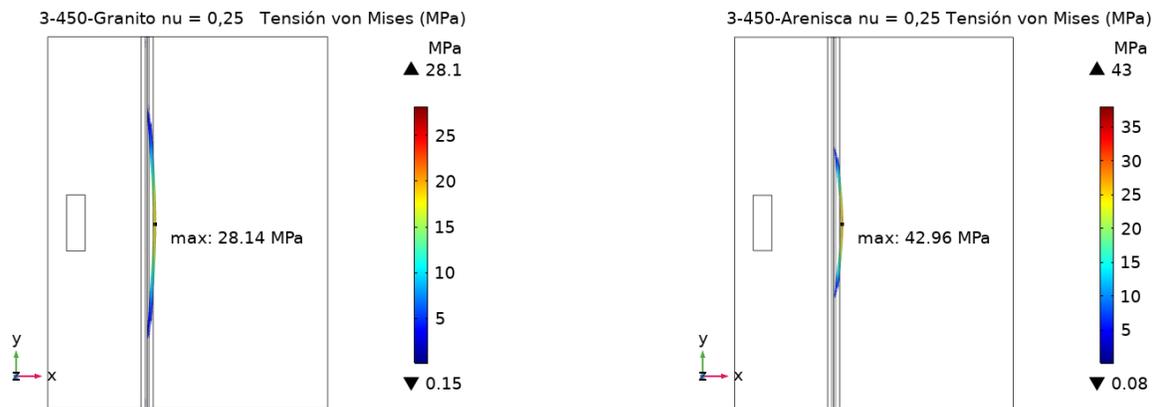
4.6. Caso de estudio, coeficiente de Poisson = 0,25

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones asociadas al caso de estudio, que consiste en emplear un coeficiente de Poisson fijado en 0,25, valor comúnmente empleado para modelar, en los cinco macizos reales del estudio. El objetivo es evaluar la influencia de este coeficiente en los resultados del modelo, mediante su comparación con los resultados obtenidos con el coeficiente real de cada macizo.

Se simula únicamente el escenario del pulso con extensión igual a 3 metros y 450 PPV de generación, se enfoca el análisis exclusivamente a los criterios de ASME B31.4.

4.6.1. Esfuerzo de von Mises

Se presenta la distribución de esfuerzo de von Mises en la tubería por el pulso de tres metros. Con PPV de origen de 450 y coeficiente de Poisson igual a 0,25 en todos los macizos.



(a) Distribución de esfuerzo de von Mises, Granito. Factor de escala 300:1.

(b) Distribución de esfuerzo de von Mises, Arenisca. Factor de escala 300:1.

Figura 4.17: Distribución deformación máxima casos límite, escenario 3-450 coeficiente de Poisson = 0,25.

Tabla 4.13: Esfuerzo de von Mises y PPV en zanja, caso de estudio coeficiente de Poisson = 0,25

PPV 450		
Macizo	Esfuerzo de von Mises (MPa)	PPV Zanja (mm/s)
Arenisca	43	315
Basalto	41,3	302
Toba	31,9	302
Andesita	28,9	300
Granito	28,1	301

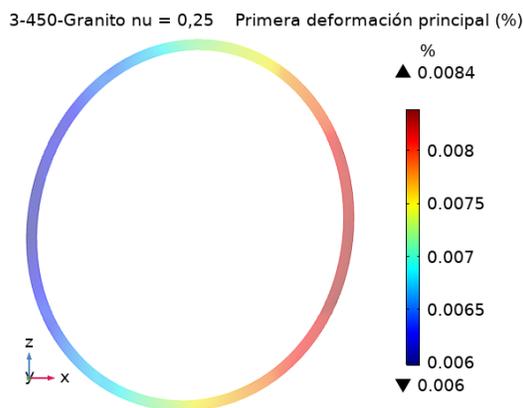
4.6.1.1. Discusión

Los resultados en 4.13, permiten determinar con mayor seguridad la relación inversa entre el módulo de elasticidad y los esfuerzos generados en la tubería enterrada. Ya que, se aprecia que si andesita y granito presentan igual coeficiente de Poisson, el esfuerzo generado en andesita es superior al generado en granito, debido a su módulo de elasticidad inferior. Variando el resultado que se presentó con los coeficiente de Poisson reales, en que andesita presentaba el menor esfuerzo de von Mises. Implicando que el aumento de esfuerzos en la tubería enterrada en granito se debía a su coeficiente de Poisson de 0,18.

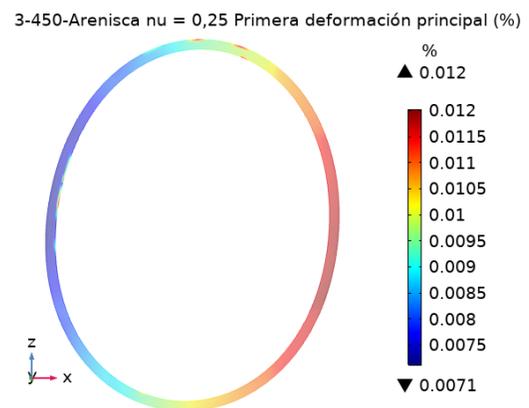
Aún así, vale considerar, que el comportamiento del macizo no solo está determinado por módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson, la densidad del macizo también es relevante, y posee impacto en la respuesta del macizo rocoso ante la propagación del pulso y los esfuerzos generados en la tubería.

4.6.2. Deformación máxima

Se presenta la deformación máxima porcentual en la tubería por el pulso de tres metros. Con PPV de origen de 450 y coeficiente de Poisson igual a 0,25 en todos los macizos.



(a) Distribución de deformación máxima, Granito. Factor de escala 100:1.



(b) Distribución de deformación máxima, Arenisca. Factor de escala 100:1.

Figura 4.18: Distribución de deformación máxima casos límite, escenario 3-450 coeficiente de Poisson = 0,25.

Tabla 4.14: Deformación máxima porcentual y PPV en zanja, caso de estudio coeficiente de Poisson = 0,25.

PPV 450		
Macizo	Deformación máxima (%)	PPV Zanja (mm/s)
Arenisca	$1,202 \cdot 10^{-2}$	315
Basalto	$1,214 \cdot 10^{-2}$	302
Toba	$9,06 \cdot 10^{-3}$	302
Andesita	$8,55 \cdot 10^{-3}$	300
Granito	$8,39 \cdot 10^{-3}$	301

4.6.2.1. Discusión

Se puede apreciar en los resultados de deformación presentes en 4.14, obtenidos mediante la fijación del coeficiente de Poisson en 0,25. La relación inversa que existe entre las deformaciones generadas en la tubería enterrada, con el módulo de elasticidad del macizo rocoso, sin embargo, a diferencia de los resultados de von Mises, en el escenario simulado con constantes elásticas reales, la tubería enterrada en granito presentaba igualmente la menor deformación.

Este resultado confirma la relación inversa entre el módulo de elasticidad y la deformación máxima presentada por la tubería.

4.7. Valores admisibles ASME B31.4

El objetivo de esta sección es proveer los valores admisibles al encargado del diseño de una tronadura cercana a la tubería, de forma que pueda emplear estos resultados como referencia durante el diseño. Indicando primeramente los valores admisibles de esfuerzo y deformación en las tuberías API 5L X60, en base a los criterios establecidos por el código ASME B31.4. Para finalmente determinar el valor de velocidad peak de partícula admisible para cada escenario simulado.

4.7.1. Esfuerzo de von Mises admisible API 5L X60

El calculo del máximo valor permitido por el criterio 2.6.3, requiere determinar el Esfuerzo de von Mises admisible por tronadura ($\sigma_{VMtm\acute{a}x}$) para las tuberías de API 5L X60, por lo que se emplea la fórmula presente en 2.10, con los valores a continuación:

$$FD = 0.80$$

$$\sigma_f = 415\text{MPa}$$

Resultando un $\sigma_{VMtm\acute{a}x}$ igual a 33,2 MPa.

4.7.2. Deformación admisible API 5L X60

El valor máximo permitido por el criterio 2.6.4, corresponde al valor admisible de deformación máxima que es directamente igual a 2%.

4.7.3. PPV admisible en zanja

El termino "PPV admisible en zanja" se utiliza para referirse al valor de velocidad peak de partícula que se presenta en la zanja, cuando las magnitudes asociadas a los criterios establecidos por ASME, alcanzan su valor admisible para las tuberías API 5L X60, consideradas en el estudio.

Dado que los escenarios simulados mediante elementos finitos presentan valores de esfuerzo de von Mises distintos al admisible calculado en 4.7.1, y que los valores obtenidos de deformación máxima también son inferiores al valor límite de 2% presente en 4.7.2, se realiza el procedimiento a continuación.

Con el objetivo de determinar la PPV admisible en la zanja para cada configuración del modelo, se realiza una interpolación (o extrapolación, según el caso) de la relación numérica observada en cada escenario simulado, entre la PPV en la zanja y el esfuerzo de von Mises o la deformación, según el criterio. La interpolación considera la velocidad peak de partícula en la zanja como la variable independiente y al esfuerzo de von Mises o deformación como las variables dependientes.

Se asume en base a las características elásticas del modelo, que la relación entre la PPV y las magnitudes de deformación tiene un carácter lineal y proporcional. La interpolación de los valores de PPV en cada escenario, se realiza en base a los resultados obtenidos con las velocidades asociadas a la generación del pulso de 450 mm/s y 500 mm/s, siguiendo las igualdades en 4.1 y 4.2.

$$\frac{\sigma_{VM\ 450}}{PPV_{450}} = \frac{\sigma_{VM\ 500}}{PPV_{500}} \quad (4.1)$$

$$\frac{Deformación_{450}}{PPV_{450}} = \frac{Deformación_{500}}{PPV_{500}} \quad (4.2)$$

Finalmente la extrapolación obedece la formula presentada en 4.3 para el criterio basado en el esfuerzo de von Mises máximo, y 4.4 para el criterio de deformación máxima.

$$PPV_{\text{admissible en zanja}} = \frac{\sigma_{VMt\ adm}}{\frac{\sigma_{VMt\ 500} - \sigma_{VMt\ 450}}{PPV_{500} - PPV_{450}}} \quad (4.3)$$

$$PPV_{\text{admissible en zanja}} = \frac{Deformación_{\text{máx}}}{\frac{Deformación_{500} - Deformación_{450}}{PPV_{500} - PPV_{450}}} \quad (4.4)$$

$\sigma_{VMt\ adm}$: Esfuerzo de von Mises admisible por tronadura.

$\sigma_{VM\ 450}$: Esfuerzo de von Mises máximo pulso de PPV 450 mm/s.

$\sigma_{VM\ 500}$: Esfuerzo de von Mises máximo pulso de PPV 500 mm/s.

$Deformación_{\text{máx}\ t}$: Deformación admisible por tuberías API 5L X60.

Deformación₄₅₀ : Deformación máxima pulso de 450 mm/s de PPV.

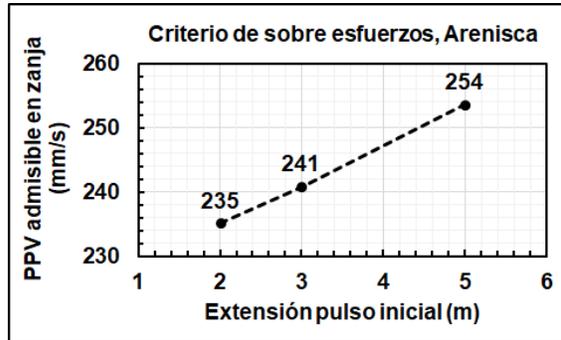
Deformación₅₀₀ : Deformación máxima en la tubería asociada a un pulso generado con 500 mm/s de PPV.

PPV_{en zanja 450} :PPV máxima en la zanja pulso de 450 mm/s.

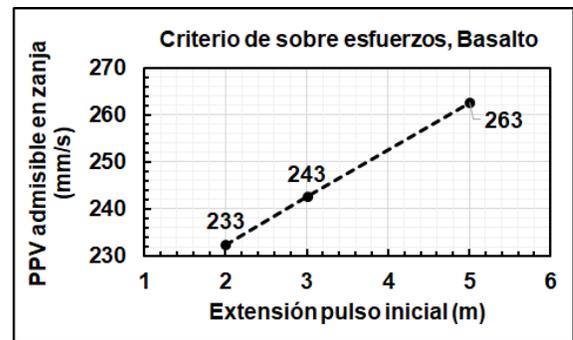
PPV_{en zanja 500} : PPV máxima en la zanja pulso de 500 mm/s.

4.8. PPV admisible en zanja criterio de sobre esfuerzos

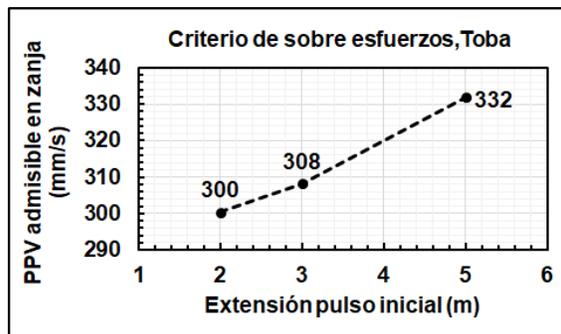
En esta sección se condensan los resultados obtenidos de PPV admisible según criterio de sobre esfuerzos 2.6.3. En cada pulso simulado, para los cinco macizos rocosos estudiados.



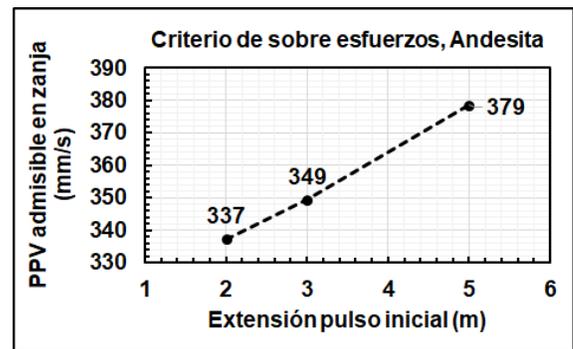
(a) Relación entre PPV admisible en zanja y extensión del pulso inicial, según criterio de sobre esfuerzos transientes en arenisca.



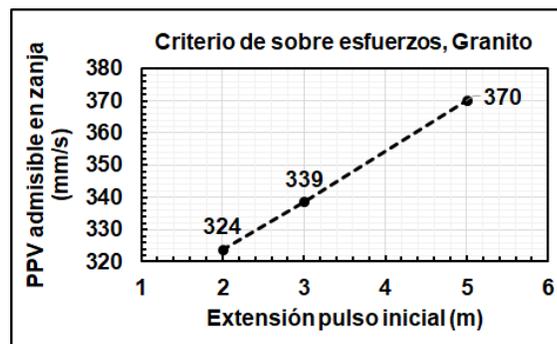
(b) Relación entre PPV admisible en zanja y extensión del pulso inicial, según criterio de sobre esfuerzos transientes en basalto.



(c) Relación entre PPV admisible en zanja y extensión del pulso inicial, según criterio de sobre esfuerzos transientes en toba.



(d) Relación entre PPV admisible en zanja y extensión del pulso inicial, según criterio de sobre esfuerzos transientes en andesita.



(e) Relación entre PPV admisible en zanja y extensión del pulso inicial, según criterio de sobre esfuerzos transientes en granito.

Figura 4.19: Relación entre PPV admisible en zanja y extensión del pulso inicial en distintos macizos rocosos, según criterio de von Mises.

4.8.1. Discusión

Los resultados presentes de PPV admisible representan a la máxima magnitud de PPV que podrá registrarse en la zanja para evitar que el pulso de extensión transversal asociada, produzca esfuerzos superiores a los limitados por el criterio de sobre esfuerzos del código ASME B31.4

Los resultados obtenidos comparación a la limitación de PPV actual de 127 mm/s [12], presentan aumentos que varían desde un 45 % a un máximo de 66 %.

El análisis de los resultados de PPV admisible en base a la extensión del pulso inicial, primeramente enseñan la relación directa entre la extensión del pulso, y la PPV admisible en zanja según criterio de sobre esfuerzos transientes, en los cinco macizos rocosos estudiados.

Además, se observa una tendencia a que los valores de PPV admisible en zanja aumenten conforme se incrementa el módulo de elasticidad del macizo rocoso. Sin embargo, se presenta una excepción a esta tendencia, en las tres extensiones de pulso, o distancias entre tubería y tronadura, andesita, de módulo de elasticidad considerablemente inferior al granito, presenta valores de PPV admisible en zanja superiores a los del granito.

4.8.2. Comparación con caso de estudio, coeficiente de Poisson = 0,25

A continuación se presenta un gráfico comparativo de las PPV admisibles según el criterio de esfuerzo de von Mises del escenario 3-450, entre los casos de macizos rocosos con coeficiente de poisson real, y coeficiente de Poisson igual a 0,25.

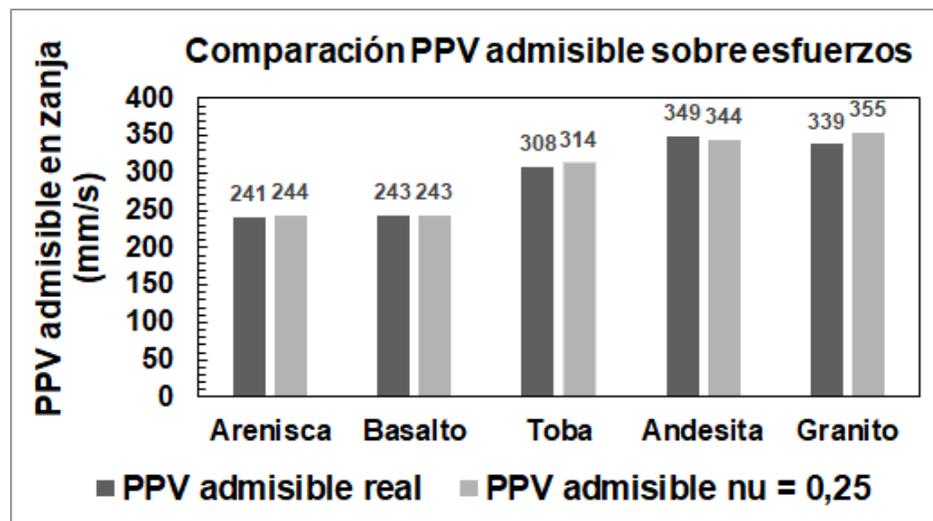


Figura 4.20: Comparación de PPV admisible según criterio de sobre esfuerzos entre macizos reales y Poisson = 0,25.

La figura 4.20 enseña cómo los macizos arenisca, toba y granito experimentan un aumento en su PPV admisible al considerar un coeficiente de Poisson superior al real. En el caso de basalto, al poseer un ν real de 0,25, no se genera cambio en su PPV admisible. Por último, arenisca, macizo rocoso con ν real igual a 0,27, al considerar un coeficiente inferior de 0,25,

se presencia una disminución en su PPV admisible.

Esto indica una relación directa entre el coeficiente de Poisson del macizo rocoso, y la PPV admisible por la tubería enterrada en el mismo, bajo el criterio de sobre esfuerzos.

Tabla 4.15: Cambio porcentual del coeficiente de Poisson y PPV admisible según criterio de sobre esfuerzos, en comparación al escenario real de 3-450.

Macizo Rocoso	Módulo de elasticidad (MPa)	Cambio Coeficiente de Poisson (%)	Cambio PPV admisible en zanja sobre esfuerzos (%)
Arenisca	1,4	9	1,2
Basalto	2,1	0	0
Toba	4,6	4	1,9
Andesita	9,5	-7	-1,4
Granito	13,2	39	4,7

Los resultados en la tabla 4.15 presentan los cambios porcentuales del coeficiente de Poisson al fijar su valor en los cinco macizos rocosos igual a 0,25, y el cambio porcentual que esta fijación refleja en la PPV admisible en zanja.

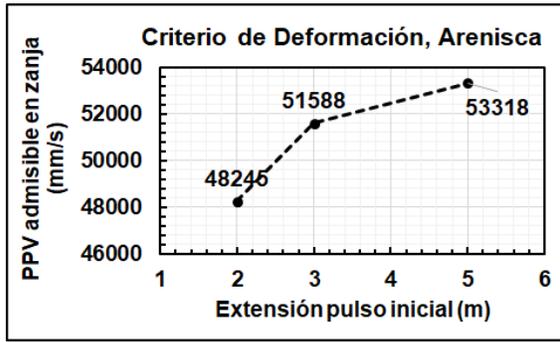
En tema del cambio provocado por la fijación de la constante elástica para todos los macizos rocosos, se aprecia inicialmente que el cambio de 9% y 4% al ν original de arenisca y toba implican leves cambios en su PPV admisible de zanja del 1,2% y del 1,9%, continuando con esta tendencia, el gran aumento de ν en granito del 39% implica un discreto cambio del 4,7% en la PPV admisible del macizo. Por otro lado, andesita es el único macizo rocoso que ve disminuida su magnitud de ν al fijar dicha constante en un 0,25, la disminución generada en el mismo es del 1,4%.

Estos resultados confirman que un incremento en el coeficiente de Poisson de los macizos rocosos se traduce en una reducción de los esfuerzos generados en la tubería enterrada. Este comportamiento indica que macizos con mayores coeficientes de Poisson tienen una mayor capacidad de disipar los esfuerzos inducidos por la propagación del pulso generado por la tronadura.

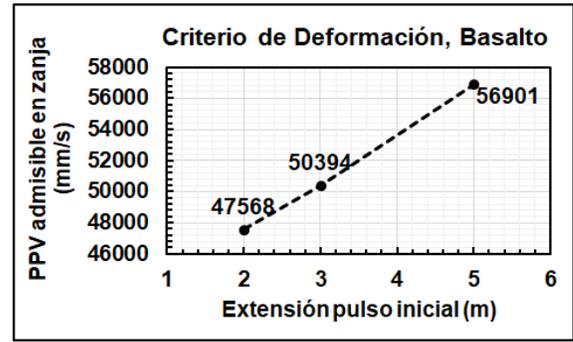
Al considerar la definición del coeficiente de Poisson, esto es coherente. Un mayor coeficiente de Poisson implica una mayor deformación transversal en comparación a la longitudinal, esto implica que la transmisión del pulso a través del macizo rocoso pierde más energía en la dirección transversal, lo que a su vez reduce los esfuerzos generados en la tubería.

4.9. PPV admisible en zanja criterio de deformación

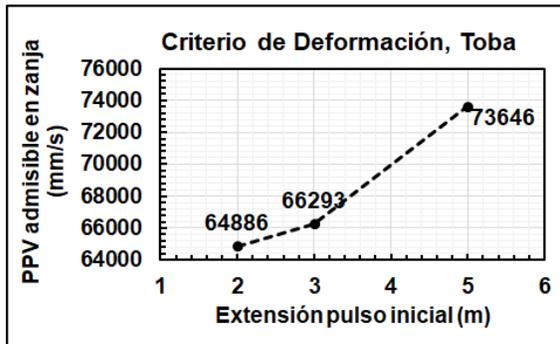
En esta sección se condensan los resultados obtenidos de PPV admisible según criterio de deformación máxima porcentual 2.6.4. En cada pulso simulado, para los cinco macizos rocosos estudiados.



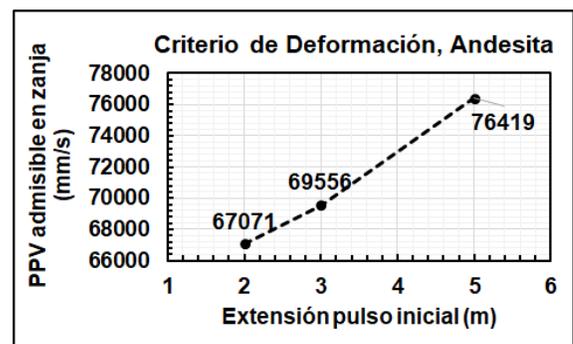
(a) Relación entre PPV admisible en zanja y extensión del pulso inicial, según criterio de deformación en arenisca.



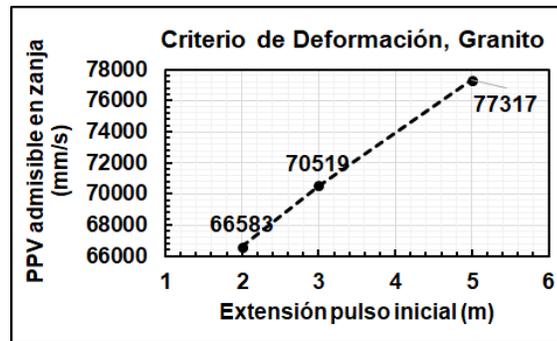
(b) Relación entre PPV admisible en zanja y extensión del pulso inicial, según criterio de deformación en basalto.



(c) Relación entre PPV admisible en zanja y extensión del pulso inicial, según criterio de deformación en toba.



(d) Relación entre PPV admisible en zanja y extensión del pulso inicial, según criterio de deformación en andesita.



(e) Relación entre PPV admisible en zanja y extensión del pulso inicial, según criterio de deformación en granito.

Figura 4.21: Relación entre PPV admisible en zanja y extensión del pulso inicial en distintos macizos rocosos, según criterio de deformación.

4.9.1. Discusión

Las figuras en 4.21, representan la relación entre la PPV admisible en la zanja y la extensión del pulso inicial. Estableciendo el límite de velocidad peak de partícula medida en la zanja para cumplir con la limitación establecida del criterio de deformación 2.6.4 presente en ASME B31.4.

Similar a lo presentado por el criterio de sobre esfuerzos, las PPV admisibles en los cinco macizos se relación directamente con la extensión del pulso inicial.

Finalmente, en vista de los valores de PPV admisibles significativamente superiores a los alcanzados en la industria durante tronaduras, se determina en caso de emplear este criterio para el diseño, debe ir acompañado de pruebas que aseguren el cumplimiento de las condiciones indicadas por ASME B31.4, y no basarse únicamente en el valor máximo de deformación en el mineroducto.

4.9.2. Comparación con caso de estudio, coeficiente de Poisson = 0,25

A continuación se presenta un gráfico comparativo de las PPV admisibles según el criterio de deformación máxima porcentual del escenario 3-450, entre los casos de macizos rocosos con coeficiente de poisson real, y coeficiente de Poisson igual a 0,25.

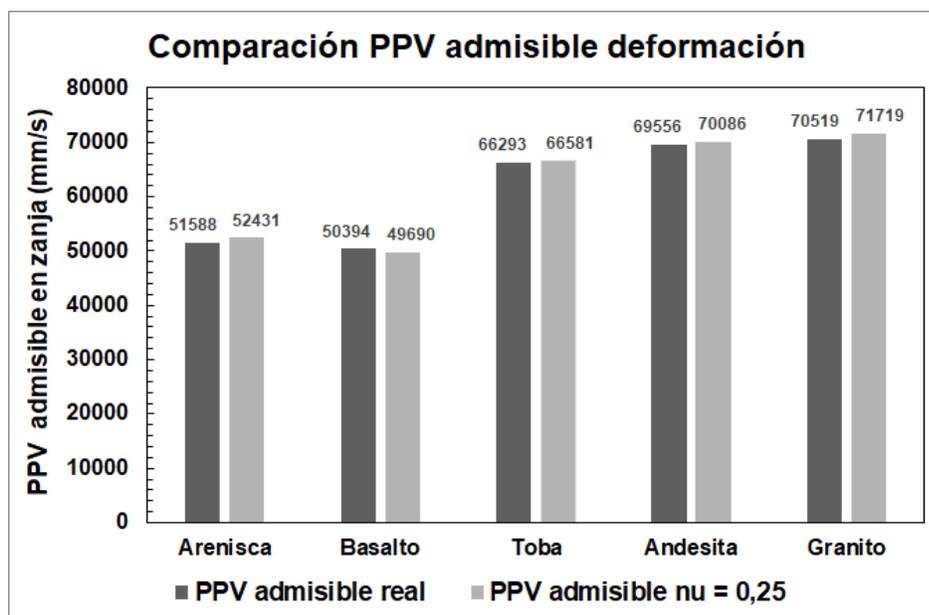


Figura 4.22: Comparación de PPV admisibles según criterio de deformación entre macizos reales y Poisson = 0,25.

La figura 4.22 al considerar todos los macizos rocosos con un coeficiente de Poisson fijado en 0,25, confirma, en primer lugar, la relación directa entre el módulo de elasticidad y la PPV admisible bajo el criterio de deformación.

La comparativa entre caso real y caso fijado, evidencia un aumento en la PPV admisible según criterio de deformación de los macizos rocosos que poseen coeficientes de Poisson reales inferiores a 0,25, como son arenisca, toba y granito. En el caso de andesita, esta posee un ν real superior a 0,25, sin embargo, presenta un aumento en su PPV admisible con coeficiente de Poisson igual a 0,25.

Tabla 4.16: Cambio porcentual del coeficiente de Poisson y PPV admisible según criterio de deformación, en comparación al escenario real de 3-450.

Macizo Rocoso	Módulo de elasticidad (MPa)	Cambio Coeficiente de Poisson (%)	Cambio PPV admisible en zanja deformación(%)
Arenisca	1,4	9	1,6
Basalto	2,1	0	0
Toba	4,6	4	0,4
Andesita	9,5	-7	0,8
Granito	13,2	39	1,7

El comportamiento particular de andesita se puede explicar a través de la relación inversa entre el coeficiente de Poisson y el módulo de elasticidad del relleno de la zanja, presente en la fórmula 2.2. En este caso, el incremento del coeficiente de Poisson por encima de 0,25 en el macizo rocoso no compensa la disminución resultante en el módulo de elasticidad del relleno de la zanja. Esto sugiere que, bajo el criterio de deformación, un coeficiente de Poisson elevado no siempre es beneficioso, ya que puede reducir la capacidad de la zanja para resistir las deformaciones generadas por la transmisión del pulso de tronadura.

Capítulo 5

Conclusiones

El presente estudio ha logrado desarrollar un modelo 3D de elementos finitos capaz de simular los esfuerzos y deformaciones generados en una tubería API 5L X60, debido a la transmisión del frente de ondas de choque generado por una tronadura realizada en las cercanías. Este modelo permite la simulación de variados escenarios mediante la consideración de las constantes elásticas de distintos macizos rocosos y distintas distancias entre tronadura-tubería.

La transmisión del pulso al interior de la zanja, provoca dos efectos físicos en la tubería enterrada, primeramente se produce una ovaladura, que consiste en una reducción del diámetro horizontal de la tubería, producida por la compresión del pulso. Y, en segundo lugar, se produce una curvatura y estiramiento en el plano longitudinal de la misma.

El análisis de los resultados y de un caso comparativo, ha permitido relacionar directamente la distancia entre tronadura y tubería, con la PPV admisible en zanja. Implicando que para tronaduras más lejanas es posible presentar una mayor PPV en zanja, sin sobre pasar los límites establecidos por este estudio. Además, se pudo identificar el impacto que poseen las constantes elásticas del macizo rocoso sobre las magnitudes claves del estudio, los esfuerzos y deformaciones generadas en la tubería. En términos de esfuerzos, se identifica una relación inversa entre el módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson del macizo rocoso con la magnitud del esfuerzo máximo generado en la tubería. Referente a deformaciones, también se identifica una relación inversa entre el módulo de elasticidad y la magnitud de deformación máxima, pero, con respecto al coeficiente de Poisson, esta constante posee un efecto más complejo, que debe ser analizado caso a caso.

Los resultados obtenidos durante la simulación de los distintos escenarios, permitieron instaurar nuevos límites de velocidad peak de partícula más permisivos en las zanjas, sin representar un peligro a la operación de la tubería enterrada, presentando un aumento desde el 45 % al 66 % en comparación a la normativa actual.

Finalmente, se indica emplear las limitaciones de velocidad peak de partícula, obtenidas en base a los esfuerzos, para diseñar tronaduras en escenarios similares. Por el contrario, en vista que las limitaciones a la velocidad peak de partícula, basadas en deformación no son aplicables, se sugiere no emplear dichos resultados para el diseño de procesos de tronadura.

5.1. Trabajo propuesto

Durante el desarrollo del presente estudio, en base a las simplificaciones empleadas, han surgido las siguientes ideas con objetivo de proponer posibles estudios futuros:

- Incorporar al modelo la velocidad de la pulpa en el interior de la tubería, simulando un funcionamiento más representativo de los mineroductos en la industria, y analizar el impacto de esta.
- Modelar el macizo rocoso en base a tecnologías de obtención de datos geotécnicos, que permita una representación más fiel de un macizo rocoso real.

Bibliografía

- [1] Winkler, M. C. (2023). *Impactos socio económicos de la minería en Chile, 2023*
- [2] Font, A. & Benavides R. (2021). *Estudio de tronaduras próximas a mineros y sus efectos sobre los mismos, Etapa 1.*
- [3] Moser, A. P. (2001). *Buried Pipe Design, 2nd Edition.* McGraw Hill Professional.
- [4] ASME (American Society of Mechanical Engineers) (2009). *B31.4: Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries.*
- [5] Alonso, J. B., Gómez, J. C., & Herbert, J. H. (2013). *Perforación y Voladura de Rocas en Minería.*
- [6] De Vallejo, L. I. G. (2002). *Ingeniería Geológica.* PRENTICE HALL.
- [7] Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering.* John Wiley & Sons.
- [8] Galera, M., Álvarez, M., Bieniawski, Z. & José, N. (2007) *Evaluation of the deformation modulus of rock masses using RMR.*
- [9] Salinas Riveros, E. (2018). *Análisis de Propiedades Geotécnicas de Algunas Rocas Comunes de Chile.*
- [10] Richards, A. B. & Moore, A. J. (1995). *Blast Vibration Course: Measurement, Assessment, Control.*
- [11] Brown University School of Engineering *EN175: Mechanics of Solids - Waves and vibrations in elastic solids.*
- [12] Siskind, D. E. (2000). *Vibrations from Blasting.* International Society of Explosives.
- [13] Devine, J. F. (1966). *Effect of Charge Weight on Vibration Levels from Quarry Blasting.*
- [14] Esparza, Edward. (1991). *Pipeline response to blasting in rock.*
- [15] Institute, A. P. (2004). *Standard API Spec-5L-2004: Specification for Line Pipe: Upstream Segment.*
- [16] Chan, P., Tshai, K., Johnson, M., & Li, S. (2013). *Finite element analysis of combined static loadings on offshore pipe riser repaired with fibre-reinforced composite laminates.* Journal of Reinforced Plastics and Composites, 33(6), 514–525, doi.org/10.1177/0731684413500159
- [17] Saadd, M. H. (2014). *Elasticity: Theory, Applications and Numerics.*
- [18] *COMSOL Multiphysics® v. 5.6 . www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.*
- [19] Howard, A. (2011) *Constrained modulus of crushed rock for pipeline embedment.* Pipelines 2011: A Sound Conduit For Sharing Solutions © ASCE 2011,

[doi.org/10.1061/41187\(420\)29](https://doi.org/10.1061/41187(420)29).

- [20] Morales Cárdenas, M. O. (2009). *Caracterización geotécnica y determinación de ángulos de talud en yacimiento Franke*.
- [21] Plataforma de Contratación del Sector Público *Clasificaciones geomecánicas. Datos de campo*.
- [22] Zamora Pacheco, P. I. (2007). *Clasificaciones geomecánicas del macizo rocoso y aplicaciones para el túnel de conducción del proyecto hidroeléctrico "San Francisco"*.
- [23] Neri Moreno, B. A. (2018). *Interpretación de resultados de explotación para el diseño de una presa*.
- [24] Ling, S. J., Sanny, J., & Moebs, W. (2017). *University Physics*.
- [25] Apakashev, R. A., & Pavlov, V. V. (1997). *Determination of the shear strength and modulus of water at low flow velocities. Fluid Dynamics, 32(1)*, doi.org/10.1007/bf02697929.