

# **CURVAS DE VULNERABILIDAD PARA TUBERÍAS CONTINUAS DE ACERO ANTE DESLIZAMIENTOS**

Presentado por

Manuel Alejandro Botía Díaz  
Johana Angélica Rodríguez Jiménez

Trabajo de grado presentado a la

Facultad de Ingeniería  
Pontificia Universidad Javeriana

Como requisito para optar el título de  
Magister en Ingeniería Civil

Bogotá, Colombia 2018

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**

Aprobado por

CARLOS EDUARDO RODRÍGUEZ PINEDA  
IC, MG, MSc, DIC, PhD.

GILMAR IVAN PATIÑO  
Ing. Geólogo, Esp. Geotecnia  
Jurado 1

EDGAR ALEXÁNDER RODRÍGUEZ  
Ing. Geólogo, M. Sc., Geotecnia  
Jurado 2

Aprobada en Bogotá, el día 25 de mayo de 2018

Pontificia Universidad Javeriana  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ingeniería Civil  
Bogotá 2018

## **RESUMEN**

El objetivo general del trabajo de grado fue establecer curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de conducción de hidrocarburos ante deslizamientos, de tal forma que las metodologías de evaluación de riesgo estimen la vulnerabilidad de una tubería de forma cuantitativa y no cualitativa, como se hace actualmente en la mayoría de los casos.

Por tanto y para dar alcance al cumplimiento del objetivo general, se establecieron las variables involucradas en la modelación numérica de la interacción suelo-tubería. Para esto, se llevó a cabo una revisión bibliográfica de modelos constitutivos para el suelo y la tubería y se seleccionó el modelo elasto-plástico para la tubería y el modelo elástico para el suelo (material de carácter arcillo-limoso); así mismo mediante análisis de información secundaria se seleccionaron los parámetros para cada modelo constitutivo. De igual forma se definieron las condiciones geométricas del bloque de suelo estable e inestable con cuatro (4) longitudes de deslizamiento y dos tipos de tubería (2), con tres (3) diámetros y seis (6) espesores, de los cuales tres (3) corresponden a espesores de desgaste y tres (3) a espesores de fábrica. Por último, se establecieron dos condiciones de presión en la tubería, sin presión y en condición de operación.

Una vez definidas estas variables, se procedió con la modelación numérica de la totalidad de los modelos de análisis en el software Abaqus CAE, ingresando la geometría del bloque de suelo y de la tubería, creando y asignando los materiales de acuerdo con los modelos constitutivos seleccionados, definiendo condiciones de contorno en la tubería y el bloque de suelo y enmallando y refinando la malla según los requerimientos particulares de resultados. Por último, se realizó la definición de la formulación de contacto para la interacción suelo tubería mediante un contacto superficie-superficie (de la librería de Abaqus).

Como resultado de lo anterior se obtuvieron un total de 96 modelaciones que permitieron establecer las curvas de vulnerabilidad conforme a tuberías presurizadas y sin presurizar, tomando en cuenta los tipos de tubería, diámetro y anchos de deslizamiento.

## **ABSTRACT**

The general objective of the degree work was to establish vulnerability curves for continuous hydrocarbon conduction pipes in the event of landslides, in such a way that risk assessment methodologies estimate the vulnerability of a pipeline in a quantitative and not qualitative manner, as is currently done in most of the cases.

Therefore, to reach the fulfillment of the general objective, the variables involved in the numerical modeling of the soil-pipeline interaction were established. For this, a bibliographic review of constitutive models for the soil and the pipeline was carried out and the elasto-plastic model for the pipe and the elastic model for the soil (clay-silty material) was selected; likewise, by means of secondary information analysis, the parameters for each constitutive model were selected. Likewise, the geometric conditions of the block of stable and unstable soil were defined with four (4) sliding lengths and two types of pipe (2), with three (3) diameters and six (6) thicknesses, of which three (3) correspond to wear thickness and three (3) to factory thickness. Finally, two pressure conditions were established in the pipeline, without pressure and in operating condition.

Once these variables were defined, we proceeded with the numerical modeling of all the analysis models in the Abaqus CAE software, entering the geometry of the soil block and the pipe, creating and assigning the materials according to the selected constitutive models, defining boundary conditions in the pipe and floor block and netting and refining the mesh according to the particular requirements of results. Finally, the definition of the contact formulation for the soil-pipe interaction was made through a surface-surface contact (from the Abaqus library).

As a result of the above, a total of 96 models were obtained that allowed to establish the vulnerability curves according to pressurized and non-pressurized pipes, taking into account pipe types, diameter and slip widths.

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos

## **PALABRAS CLAVES**

Curvas de vulnerabilidad, Tuberías de Acero, Deslizamiento.

## **KEYWORDS**

Vulnerability curves, Steel Pipes, Slide.

## ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN .....	11
1.1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	11
1.2.	JUSTIFICACIÓN .....	13
1.3.	OBJETIVOS .....	14
1.3.1.	Objetivo general .....	14
1.3.2.	Objetivos específicos.....	14
1.4.	HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES.....	14
1.5.	DESCRIPCIÓN DEL DOCUMENTO.....	15
1.6.	LIMITACIONES .....	15
2.	MARCO DE REFERENCIA.....	16
2.1.	MARCO DE ANTECEDENTES.....	16
2.1.1.	Vulnerabilidad en tuberías .....	16
2.1.2.	Interacción suelo – tubería.....	20
2.2.	MARCO CONCEPTUAL.....	27
2.2.1.	Vulnerabilidad.....	27
2.2.2.	Modelo constitutivo.....	28
2.2.3.	Método de elementos finitos .....	28
2.3.	MARCO TEÓRICO.....	29
2.3.1.	Movimientos en taludes y laderas.....	29
3.	METODOLOGÍA .....	39
3.1.	TIPO DE DESLIZAMIENTO CONSIDERADO .....	39
3.2.	PARÁMETROS DE MODELADO .....	39
3.3.	MODELO NUMÉRICO.....	43
3.3.1.	Geometría del modelo.....	43
3.3.2.	Modelos de análisis.....	44
3.3.3.	Condiciones de frontera en el suelo .....	47
3.3.4.	Condiciones de frontera en la tubería.....	48
3.3.5.	Contacto suelo – tubería .....	48
3.3.6.	Campo de desplazamientos .....	51
3.3.7.	Enmallado.....	54
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	56
4.1.	EVALUACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS Y DEFORMACIONES.....	56
4.1.1.	Análisis ancho de deslizamiento vs deformación crítica.....	56
4.1.2.	Análisis ancho de deslizamiento vs deformación unitaria.....	59
4.2.	CURVAS DE VULNERABILIDAD .....	62
4.2.1.	Tubería API 5L X42 D=12” e=0,01 m.....	63
4.2.2.	Tubería API 5L X42 D=12” e=0,007 m.....	64
4.2.3.	Tubería API 5L X42 D=16” e=0,013 m.....	65
4.2.4.	Tubería API 5L X42 D=16” e=0,01 m.....	66
4.2.5.	Tubería API 5L X42 D=18” e=0,015 m.....	67

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**

4.2.6.	Tubería API 5L X42 D=18" e=0,012 m.....	68
4.2.7.	Tubería API 5L X70 D=12" e=0,016 m.....	69
4.2.8.	Tubería API 5L X70 D=12" e=0,013 m.....	70
4.2.9.	Tubería API 5L X70 D=16" e=0,02 m.....	71
4.2.10.	Tubería API 5L X70 D=16" e=0,017 m .....	72
4.2.11.	Tubería API 5L X70 D=18" e=0,022 m .....	73
4.2.12.	Tubería API 5L X70 D=18" e=0,019 m .....	74
4.3.	TIPO Y NIVELES DE DAÑO.....	77
4.4.	PROCEDIMIENTO PRÁCTICO PARA LA UTILIZACIÓN DE LOS RESULTADOS	
	77	
5.	CONCLUSIONES .....	79
6.	TRABAJO FUTURO.....	81
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	82

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1	Tipos y tamaños de deslizamientos asociados con los días que estuvo fuera de servicio la tubería de oleoductos en Colombia (Sweeney et al. 2004).....	12
Figura 2	Curva de vulnerabilidad para tubería de diámetro 20" y 0.01113 m de espesor en acero X52 (González 2010). .....	17
Figura 3	Fuerzas actuantes y resistentes en un proceso de interacción suelo-tubería (Rodríguez 2016). .....	18
Figura 4	Curva de fragilidad que relaciona el valor de aceleración sísmica con la probabilidad de estado límite de la tubería (Lanzano et al. 2013). .....	19
Figura 5	Curva de fragilidad del valor de aceleración sísmica en función de la probabilidad de ocurrencia de un estado de daño (Kakderi, Alexoudi, and Pitilakis 2007). .....	19
Figura 6	Geometría del modelo propuesto por Pereira (2009) para la simulación de la interacción suelo tubería. ....	20
Figura 7	Geometría y enmallado del modelo propuesto por Popescu and Nobahar (2003) para la simulación de la interacción suelo tubería. ....	22
Figura 8	Modelo de elementos finitos que simula el efecto de una falla sísmica en una tubería de acero enterrada (Vazouras, Karamanos, and Dakoulas 2012). .....	23
Figura 9	Modelo de elementos finitos propuesto para evaluar el comportamiento de una tubería de acero ante una falla sísmica (Trifonov 2015).....	24
Figura 10	Análisis de esfuerzos y deformaciones en la tubería para un bloque de suelo continuo y uno discontinuo (Trifonov 2015).....	24
Figura 11	Representación esquemática del modelo 3D usado por Zheng et al. (2012) para simular el efecto de un deslizamiento sobre una tubería de acero. ....	25
Figura 12	Modelo de elementos finitos que representa una tubería enterrada en un bloque de suelo (P. Liu et al. 2010). .....	26
Figura 13	Distribución de esfuerzo de Von Mises (a), deformación unitaria (b) y desplazamiento en la tubería (c) (P. Liu et al. 2010). .....	26

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**

Figura 14 Zonas de concentración de esfuerzos de tensión y compresión a lo largo de la tubería analizada Li and Wu (2017). ..... 27

Figura 15 Alineamiento transversal de la tubería con relación al sentido del movimiento de la ladera (Pereira 2009). ..... 32

Figura 16 Alineamiento longitudinal de la tubería con relación al sentido del movimiento de la ladera (Pereira 2009). ..... 32

Figura 17 Alineamiento diagonal de la tubería con relación al sentido del movimiento de la ladera (Pereira 2009). ..... 33

Figura 18 Tensor de esfuerzos y representación gráfica en el paralelepípedo (Pereira 2009). ..... 34

Figura 19 Tensor de esfuerzos (P. Liu et al. 2010). ..... 35

Figura 20 Izquierda: Efecto de un deslizamiento perpendicular a la tubería, González (2010), Derecha: Perspectiva de la posición de la tubería en el deslizamiento considerado en el análisis. .... 39

Figura 21 Curva esfuerzo-deformación para las tuberías consideradas en el modelo numérico (Ramberg and Osgood 1943). ..... 41

Figura 22 Representación gráfica 3D del bloque de suelo que hace parte del modelo numérico. .... 43

Figura 23 Representación gráfica en 2D de la sección transversal del bloque de suelo. . 44

Figura 24 Condición de restricción por desplazamiento en los tres ejes en la zona estable. .... 47

Figura 25 Condición de restricción por desplazamiento en el eje x en la zona estable (cara posterior y anterior). .... 47

Figura 26 Condición de restricción por desplazamiento y rotación en las tres direcciones para la tubería. .... 48

Figura 27 Representación gráfica del contacto superficie – superficie (Li and Wu 2017). 49

Figura 28 Representación gráfica del desplazamiento de la tubería, en negro el trazado inicial de construcción y en naranja el desplazamiento de la tubería (Pereira 2009). ..... 52

Figura 29 Representación del campo de desplazamiento para ancho de deslizamiento de 25 m. .... 52

Figura 30 Representación del campo de desplazamiento para ancho de deslizamiento de 62.5 m. .... 53

Figura 31 Representación del campo de desplazamiento para ancho de deslizamiento de 100 m. .... 53

Figura 32 Representación del campo de desplazamiento para ancho de deslizamiento de 137.5 m. .... 53

Figura 33 Formas de los elementos (Adoptado de Simulia,2002) ..... 54

Figura 34 Representación del campo de desplazamiento para ancho de deslizamiento de 137.5 m. .... 55

Figura 35 Representación del campo de desplazamiento para ancho de deslizamiento de 137.5 m. .... 55



**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**

Figura 36 Curva de desplazamiento máximo para una tubería de 12" de diámetro en función del ancho del deslizamiento para diferentes relaciones t/d. ....	57
Figura 37 Curva de desplazamiento máximo para una tubería de 16" de diámetro en función del ancho del deslizamiento. ....	58
Figura 38 Curva de desplazamiento máximo para una tubería de 18" de diámetro en función del ancho del deslizamiento. ....	58
Figura 39 Curva de deformación unitaria teórica para una tubería de 12" de diámetro en función del ancho del deslizamiento. ....	59
Figura 40 Curva de deformación unitaria teórica para una tubería de 16" de diámetro en función del ancho del deslizamiento. ....	60
Figura 41 Curva de deformación unitaria teórica para una tubería de 18" de diámetro en función del ancho del deslizamiento. ....	61
Figura 42 Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X42 D=12" e=0,01 m, en el centro del deslizamiento. ....	64
Figura 43 Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X42 D=12" e=0,01 m, en el flanco del deslizamiento. ....	64
Figura 44 Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X42 D=12" e=0,007 m, en el centro del deslizamiento. ....	65
Figura 45 Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X42 D=12" e=0,007 m, en el flanco del deslizamiento. ....	65
Figura 46 Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X42 D=16" e=0,013 m, en el centro del deslizamiento. ....	66
Figura 47 Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X42 D=16" e=0,013 m, en el flanco del deslizamiento. ....	66
Figura 48 Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X42 D=16" e=0,01 m, en el centro del deslizamiento. ....	67
Figura 49 Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X42 D=16" e=0,01 m, en el flanco del deslizamiento. ....	67
Figura 50 Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X42 D=18" e=0,015 m, en el centro del deslizamiento. ....	68
Figura 51 Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X42 D=18" e=0,015 m, en el flanco del deslizamiento. ....	68
Figura 52 Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X42 D=18" e=0,012 m, en el centro del deslizamiento. ....	69
Figura 53 Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X42 D=18" e=0,012 m, en el flanco del deslizamiento. ....	69
Figura 54 Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X70 D=12" e=0,016 m, en el centro del deslizamiento. ....	70
Figura 55 Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X70 D=12" e=0,016 m, en el flanco del deslizamiento. ....	70
Figura 56 Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X70 D=12" e=0,013 m, en el centro del deslizamiento. ....	71

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**

Figura 57 Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X70 D=12" e=0,013 m, en el flanco del deslizamiento.....	71
Figura 58 Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X70 D=16" e=0,02 m, en el centro del deslizamiento.....	72
Figura 59 Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X70 D=16" e=0,02 m, en el flanco del deslizamiento.....	72
Figura 60 Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X70 D=16" e=0,017 m, en el centro del deslizamiento.....	73
Figura 61 Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X70 D=16" e=0,017 m, en el flanco del deslizamiento.....	73
Figura 62 Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X70 D=18" e=0,022 m, en el centro del deslizamiento.....	74
Figura 63 Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X70 D=18" e=0,022 m, en el flanco del deslizamiento.....	74
Figura 64 Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X70 D=18" e=0,019 m, en el centro del deslizamiento.....	75
Figura 65 Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X70 D=18" e=0,019 m, en el flanco del deslizamiento.....	75

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Tipos de movimientos de taludes y laderas (Varnes 1978) y (Suárez 1998). ....	29
Tabla 2. Velocidades conforme al tipo de movimiento (Cruden and Varnes 1996).....	31
Tabla 3. Parámetros de Ramberg y Osgood para tuberías de acero (ALA 2001).....	36
Tabla 4. Parámetros físicos y mecánicos del suelo considerado en la modelación. ....	40
Tabla 5. Parámetros definidos para simulación en tubería.....	42
Tabla 6. Diámetros considerados en el modelo de análisis.....	42
Tabla 7. Diámetros considerados en el modelo de análisis.....	42
Tabla 8. Condiciones geométricas para el bloque de suelo. ....	44
Tabla 9. Relación modelos de análisis establecidos. ....	44
Tabla 10. Deformaciones unitarias a fluencia y a rotura de los aceros considerados.....	62
Tabla 11. Tipo y niveles de daño establecidos para una tubería de acero. ....	77

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Los sistemas de transporte de hidrocarburos y gas (oleoductos, poliductos y gasoductos) afrontan en su trazado problemas asociados con procesos de inestabilidad geotécnica propios de las laderas donde se emplazan; los cuales se reflejan en la pérdida de integridad de la tubería.

En Colombia, las zonas montañosas en las que se han construido la mayoría de los proyectos lineales con los que cuenta el país para transportar hidrocarburos, sus derivados y gas, se caracterizan por presentar alta susceptibilidad a deslizamientos en suelo debido a la multiplicidad de factores detonantes de estos procesos a saber: geoformas del terreno, alta pluviosidad, susceptibilidad de los suelos y sismicidad.

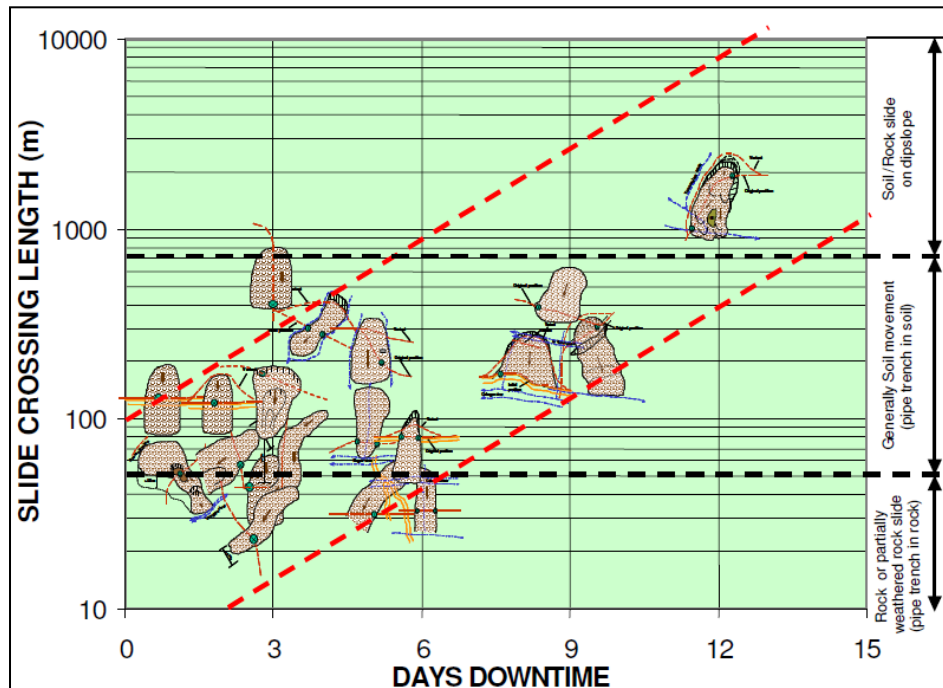
En este tipo de obras lineales de gran extensión, no es posible tener un plan de exploración específico y durante la etapa de ingeniería de detalle son pocos los sitios a los que se les hace diseño, por lo que es de esperarse procesos de inestabilidad durante la operación de la línea.

La mayoría de las tuberías que transportan hidrocarburos se construyen enterradas para garantizar soporte, durabilidad y seguridad al sistema. Una vez la tubería ha sido enterrada, entra en interacción con el suelo, razón por la cual los movimientos del terreno generados en sitios inestables tienen incidencia directa sobre la misma, desplazándola en cualquier sentido dependiendo del alineamiento del tramo involucrado y de las características del movimiento de la masa de suelo (O'Rourke and Liu 1999). Estos desplazamientos redundan en deformaciones permanentes, fisuramiento o ruptura, generando a su vez un impacto económico, ambiental y social (Pereira 2009).

En el marco global de ocurrencia de deslizamientos y su interacción con tuberías de transporte de hidrocarburos (Sweeney et al. 2004), tan solo el 3% de las causas de derrames están asociadas a este tipo de procesos. Sin embargo, cuando se particulariza a tuberías enterradas en sistemas montañosos, las estadísticas son diferentes, los deslizamientos incrementan su frecuencia 40 veces en Los Alpes en comparación con el valor medio de toda Europa, 80 veces en la zona montañosa de Estados Unidos en comparación con el valor medio de ese país y 140 veces en Los Andes, en comparación con el valor medio del continente americano (Sweeney et al. 2004).

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos

La mayoría de los sistemas de transporte de hidrocarburos que hacen parte de la infraestructura colombiana fueron construidos hace más de 25 años; tiempo en el cual las tuberías han acumulado deformaciones como consecuencia de la ocurrencia de deslizamientos y por tectónica. (Sweeney et al. 2004) realizaron un compendio de roturas de tubería de estos sistemas en Colombia (**Figura 1**), ocurridas por flexión, tracción o compresión y asociadas con movimientos del terreno.



**Figura 1** Tipos y tamaños de deslizamientos asociados con los días que estuvo fuera de servicio la tubería de oleoductos en Colombia (Sweeney et al. 2004).

Para evaluar el nivel de daño potencial de la tubería ante deslizamientos se han empleado métodos analíticos, como el usado por Gonzalez (2010) y Rodriguez (2016); sin embargo, es necesario definir tipos de daño y niveles de cada uno de estos tipos de daño para poder hacer evaluaciones de riesgo. La evaluación de riesgo requiere determinar la vulnerabilidad de la tubería de manera cuantitativa con base en curvas de fragilidad, con las cuales no se contaba hasta el momento.

Por lo anterior, es necesario construir curvas de vulnerabilidad a partir de modelaciones numéricas mediante elementos finitos, que relacionen el nivel de daño de la tubería con las deformaciones inducidas por los desplazamientos de un deslizamiento.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN**

La ingeniería geotécnica colombiana ha concentrado esfuerzos en la implementación de medidas que mitiguen los efectos generados por emergencias de ruptura en tuberías de transporte de hidrocarburos. Estas medidas están enfocadas a restablecer el bombeo en el menor tiempo posible, por tanto, responden a un análisis técnico cualitativo en el que se desconoce el potencial de daño de la tubería ante el deslizamiento.

Para que un sistema sea eficiente, no basta con ahondar en las bases de diseños mecánicos, es necesario evaluar la vulnerabilidad de las tuberías ante deslizamientos como parte de la ingeniería de detalle y como una de las amenazas a la integridad del sistema, tal como lo incluye la norma API 1160; de modo que el trazado no sólo tenga el costo más bajo en construcción, sino también durante el tiempo de operación.

El diseño de medidas de estabilización geotécnica para derechos de vía de transporte de hidrocarburos incluye la evaluación de riesgo por procesos de remoción en masa, la determinación de la amenaza es cuantitativa y en la mayoría de los casos se calcula bajo metodologías probabilísticas confiables (Muhlbauer 2004). Sin embargo, la evaluación de vulnerabilidad de la tubería como elemento expuesto no es cuantitativa debido a la falta de curvas de fragilidad de la misma.

Esta condición ha llevado a que los análisis de riesgo sean semi-cuantitativos y poco confiables, por cuanto se desconocen los niveles y tipos de daño de la tubería ante los deslizamientos.

Mediante modelación numérica es posible entender la interacción suelo-tubería bajo un escenario de deslizamiento, empleando modelos constitutivos adecuados para el suelo y la tubería e incluyendo la acción combinada de cargas como el empuje del suelo y la presión interna de flujo (Pereira 2009).

La presente investigación está orientada a la evaluación de la vulnerabilidad de tuberías continuas de acero ante deslizamientos, desarrollando una guía metodológica basada en los fundamentos de la modelación numérica de elementos finitos, cuantificando el nivel de daño potencial o grado de pérdida de una tubería ante un deslizamiento de una magnitud dada, mediante la relación entre los desplazamientos del deslizamiento y los desplazamientos y esfuerzos de tubería asociadas a estos. Al establecer las curvas de vulnerabilidad de la tubería, se busca

tener un insumo adicional para la evaluación del riesgo geotécnico en derechos de vía de líneas de transporte de hidrocarburos.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Establecer curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de conducción de hidrocarburos ante deslizamientos.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

Establecer las variables involucradas en la modelación numérica de la interacción suelo-tubería.

Determinar las deformaciones de la tubería de acero ante diferentes escenarios de desplazamiento del suelo.

Identificar tipo y niveles de daño en la tubería ante deslizamientos.

Generar curvas de vulnerabilidad para las tuberías que relacionen el daño potencial de la tubería con los desplazamientos producidos por el deslizamiento.

### **1.4. HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES**

Para llevar a cabo la modelación numérica objeto del presente proyecto de grado se utilizó el software Abaqus CAE (Complete Abaqus Environment), el cual utiliza el método de elementos finitos que permite la aproximación de soluciones de problemas físicos partiendo de un modelo constitutivo que represente de forma aproximada el comportamiento real del material en términos de esfuerzos y deformaciones.

El procesamiento de esta herramienta comprende la definición de geometrías, propiedades de materiales, condiciones de contorno, campo de desplazamientos, propiedades de interacción y definición de enmallado.

## **1.5. DESCRIPCIÓN DEL DOCUMENTO**

El presente trabajo de grado está conformado por 7 capítulos que abordan la problemática planteada y logran dar alcance a los objetivos trazados.

En el primer capítulo se presenta el planteamiento y justificación del problema de investigación, el objetivo general y los objetivos específicos que se pretenden alcanzar. En el capítulo 2 se presenta el marco conceptual que enmarca la investigación, una revisión de antecedentes y los fundamentos teóricos en los cuales se fundamenta este trabajo.

En el tercer capítulo se presenta la modelación realizada, el planteamiento de las propiedades de los modelos constitutivos y del modelo numérico de análisis, así como las condiciones de contorno, enmallado, contacto y cargas. En el cuarto capítulo se presenta los resultados de la modelación y el análisis y discusión de los mismos.

En los últimos capítulos se presentan las conclusiones de la investigación y el trabajo futuro, la bibliografía y lista de anexos al documento.

## **1.6. LIMITACIONES**

A continuación, se presentan las limitaciones contenidas en el desarrollo del presente trabajo.

El bloque de suelo se representó con un modelo constitutivo elástico, aunque se intentó representar mediante el modelo elastoplástico Mohr Coulomb contenido en la librería de Abaqus CAE, el mismo presentó problemas de convergencia y gastos computacionales excesivos, por lo que fue necesario descartar el uso de este. Para los modelos más sencillos se efectuaron corridas de hasta 24 horas sin obtener convergencia alguna.

La tubería se modeló como un elemento continuo, no se tuvo en cuenta la soldadura longitudinal de fábrica ni tampoco las juntas soldadas entre tubos.

El modelo de contacto entre el suelo y la tubería tiene una formulación basada estrictamente en la fricción entre superficies, por lo que se desprecia el efecto del carácter cohesivo del suelo en este proceso.

## **2. MARCO DE REFERENCIA**

### **2.1. MARCO DE ANTECEDENTES**

Con la creciente demanda de recursos energéticos a nivel mundial, la construcción de proyectos lineales como oleoductos, poliductos y gasoductos ha aumentado considerablemente y con esta la oportunidad de optimizar las metodologías de evaluación de riesgo enfocadas a garantizar la integridad de la tubería durante el tiempo de operación e integración con el entorno (Phillips et al. 2008).

Aunque la respuesta de una tubería enterrada ante deslizamientos depende en gran medida de las propiedades geomecánicas del suelo en el cual está enterrada, características de la tubería como el diámetro, espesor y grado del acero también constituyen variables que influyen en el tipo y grado de daño de esta por efecto de las fuerzas de empuje causadas por los deslizamientos.

Las investigaciones de referencia se han enfocado en tres aspectos fundamentales: ensayos en especímenes a escala real, modelación física en centrifuga y simulaciones numéricas, encontrando correlaciones entre los resultados de diferentes técnicas que han permitido caracterizar el daño generado en la tubería al someterse a una fuerza externa.

El considerable aumento en el uso de tuberías flexibles en proyectos lineales como oleoductos, poliductos y gasoductos y la frecuencia en ocurrencia de eventos asociados con deslizamientos que afectan la integridad de la tubería ha aumentado el uso de modelaciones numéricas en un intento por simular el comportamiento e interacción suelo – tubería, para tratar de explicar el mecanismo de falla en este tipo de escenarios.

A continuación, se presenta una recopilación de los estudios realizados para la evaluación del daño en tuberías bajo diferentes enfoques objetivos.

#### **2.1.1. Vulnerabilidad en tuberías**

El estudio de vulnerabilidad de tuberías de transporte de hidrocarburos ante deslizamientos ha sido limitado y aún no se cuenta con una herramienta cuantitativa que permita evaluar el grado de daño en una tubería ante un deslizamiento y que constituya un input para la evaluación de riesgo y la toma de decisiones.



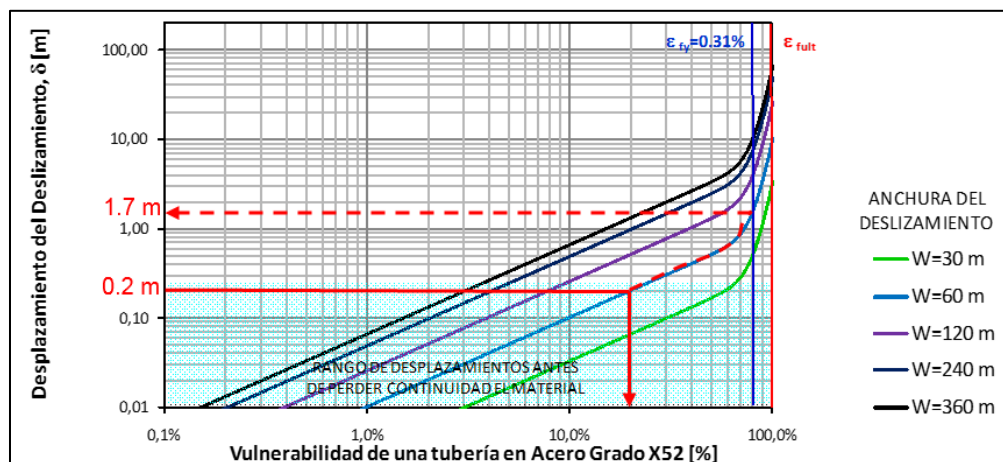
## Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos

Gonzalez (2010), construyó 360 curvas de vulnerabilidad las cuales relacionaron el porcentaje de vulnerabilidad de la tubería con el desplazamiento del deslizamiento, mediante una metodología analítica que estimó las fuerzas actuantes sobre la tubería y las fuerzas resistentes de la misma.

La investigación se llevó a cabo en tuberías de 6 diámetros, 4 espesores de pared y 3 grados de acero en 5 anchos de deslizamiento, con el fin de evaluar la incidencia de cada una de las variables en los resultados del análisis; igualmente se tuvieron en cuenta 7 tipos de suelo.

El porcentaje de daño de la tubería se definió como el cociente del esfuerzo axial aplicado y el esfuerzo a rotura del acero. Los desplazamientos y deformaciones unitarias axiales de la tubería se evaluaron con el método simplificado de (X. Liu and O'Rourke 1997).

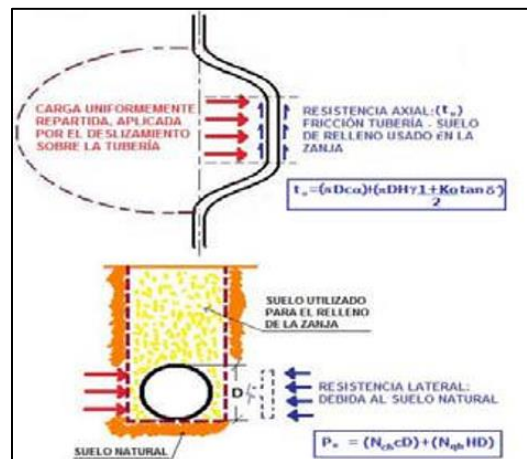
En la **Figura 2** se presenta un ejemplo de la curva de vulnerabilidad ante deslizamiento, en la que se relaciona la vulnerabilidad de la tubería con el desplazamiento del deslizamiento.



**Figura 2** Curva de vulnerabilidad para tubería de diámetro 20" y 0.01113 m de espesor en acero X52 (González 2010).

Rodriguez (2016) desarrolló una metodología para la evaluación cuantitativa del riesgo por rotura en líneas de hidrocarburos debido a deslizamientos en la que estimó la vulnerabilidad de una tubería a partir del cálculo de las fuerzas resistentes del suelo y las fuerzas actuantes sobre la misma haciendo uso de una metodología propuesta por Liu and O'Rourke (1997) para una tubería elástica (**Figura 3**).

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**



**Figura 3** Fuerzas actuantes y resistentes en un proceso de interacción suelo-tubería (Rodríguez 2016).

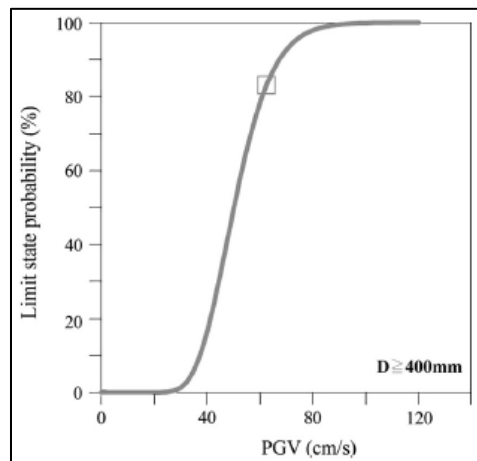
En contraste con las investigaciones realizadas acerca de la vulnerabilidad de tuberías ante deslizamientos, varios autores han indagado acerca de la vulnerabilidad de tuberías ante eventos sísmicos

Lanzano et al. (2013) realizaron un análisis de vulnerabilidad sísmica para tuberías de acero enterradas que transportan gas natural, mediante el uso y análisis de registros sísmicos, eventos geotécnicos y condiciones estructurales de la tubería. La metodología se basó en la recopilación de datos posteriores a los eventos sísmicos y en la definición de clases de falla de la tubería en función de los indicadores estructurales de estado de daños (DS) y de estado de riesgos (ER).

Los resultados los presentan en términos de la probabilidad de pérdida de confinamiento con respecto a la velocidad sísmica pico (PGV). Igualmente, se presentan curvas de fragilidad y los valores de umbral de intensidad sísmica para la falla y para la pérdida de confinamiento del sistema de tubería (**Figura 4**).

(Lee et al. 2016) realizaron un análisis de vulnerabilidad para una tubería de transporte de gas en acero API X65 localizada en Korea; para esto, llevaron a cabo un análisis no lineal sobre 15 modelos de tubería enterrada con diferentes parámetros. Se adoptó un análisis no lineal tipo Winkler para representar la interacción suelo-tubería y mediante el uso de 12 eventos sísmicos de gran importancia se estableció una escala de severidad sísmica. Finalmente, se desarrollaron curvas de fragilidad que relacionaran la escala de severidad sísmica con los estados de daño de la tubería, los cuales se definieron en función de la resistencia axial de la misma.

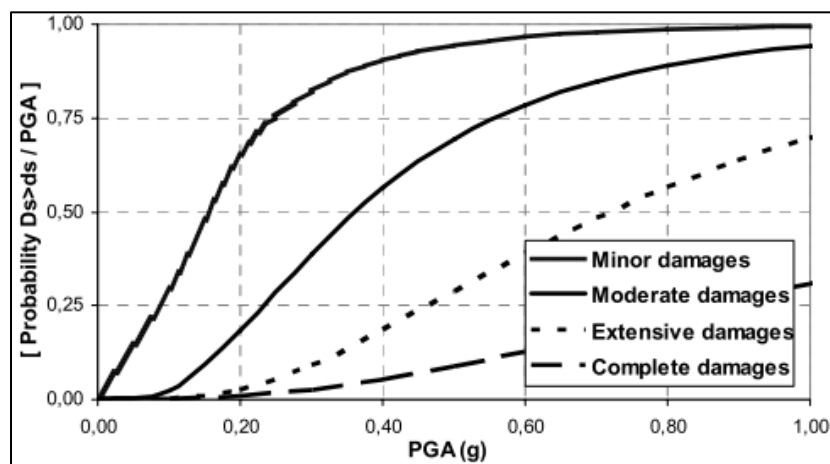
**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos



**Figura 4** Curva de fragilidad que relaciona el valor de aceleración sísmica con la probabilidad de estado límite de la tubería (Lanzano et al. 2013).

(Kakderi, Alexoudi, and Pitilakis 2007) proponen una metodología analítica para la estimación del riesgo sísmico de diferentes sistemas lineales que interactúan entre sí, a partir del análisis de los componentes individuales que los pudiesen llegar a afectar.

Los autores proponen curvas de fragilidad que relacionan el valor pico de aceleración sísmica con la probabilidad de ocurrencia de un estado de daño, estableciendo a su vez cuatro escalas de daño (menor, moderado, extenso y completo), tal como se presenta en la **Figura 5**.

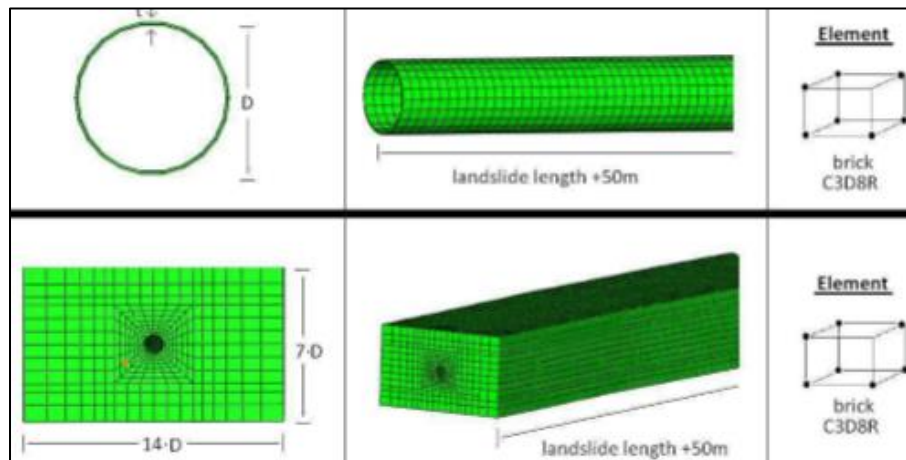


**Figura 5** Curva de fragilidad del valor de aceleración sísmica en función de la probabilidad de ocurrencia de un estado de daño (Kakderi, Alexoudi, and Pitilakis 2007).

### 2.1.2. Interacción suelo – tubería

El proceso de interacción suelo – tubería ha sido estudiado por varios autores, los cuales han intentado a través de la modelación numérica, establecer las condiciones que mejor representen este proceso, mediante la implementación de diferentes modelos constitutivos para el suelo y la tubería, condiciones geométricas y condiciones de carga.

Pereira (2009) desarrolló una metodología para la evaluación de tubería de oleoductos, poliductos y gasoductos en sitios con problemas de inestabilidad geotécnica mediante modelos numéricos de elementos finitos, limitando la evaluación a sitios con velocidades de desplazamientos lenta a extremadamente lenta. Este autor propuso un modelo numérico empleado el software Abaqus/Standard e implementando el modelo constitutivo elástico lineal, elasto plástico (Mohr-Coulomb) y visco hipoplástico en el suelo y el modelo constitutivo elasto plástico en la tubería; la modelación se realizó en un suelo duro y un suelo blando, con una tubería de acero API-5LX-70 (**Figura 6**).



**Figura 6** Geometría del modelo propuesto por Pereira (2009) para la simulación de la interacción suelo tubería.

Esta implementación permitió establecer comparaciones con modelos analíticos, encontrar regiones críticas de análisis de acuerdo con el comportamiento del suelo y la respuesta de la tubería, la influencia de la rigidez del suelo, la influencia de la longitud del deslizamiento, del modelo constitutivo del suelo y finalmente de la profundidad de enterramiento de la tubería. Adicionalmente, Pereira (2009) logro correlacionar los resultados de la herramienta inteligente ILI (In Line Inspection) con

los resultados de la modelación numérica para un caso específico de un oleoducto colombiano.

Feliciano (2006) realizó una simulación numérica en el software Abaqus/Standard del proceso de interacción suelo-tubería empleando los modelos constitutivos elástico, elástico perfectamente plástico y viscohipoplástico para un suelo correspondiente a la arcilla de Bogotá y cinco tipos de tubería: acero, plástico reforzado con fibra de vidrio (FRPV), policloruro de vinilo (PVC), fibrocemento y concreto.

El modelo numérico se enfocó en la simulación del proceso constructivo en tres etapas: análisis geoestático, excavación de la zanja, instalación de la tubería y relleno de la zanja con material seleccionado.

El autor compara los resultados de la simulación con la teoría de los métodos de diseño para cada tipo de tubería con el objeto de comprender la bondad del uso de modelos no elásticos con relación al uso de las fórmulas convencionales.

(Castaño 2008) implementó una modelación numérica de la interacción suelo tubería mediante el uso del software Abaqus CAE, evaluando cuatro etapas de construcción, el primero correspondiente al equilibrio geoestático del suelo natural, el segundo a la excavación de la zanja, el tercero al proceso de bajado de tubería y tapado de zanja y el cuarto a la aplicación de carga viva.

El autor utiliza el modelo visco-hipoplástico para representar el comportamiento del suelo mientras que en el caso de la tubería hace uso de un modelo elasto – plástico perfecto. La interacción entre los dos materiales la representa como una fricción tangencial a la superficie de contacto dependiente únicamente de la fuerza normal a la superficie y del coeficiente de fricción entre los dos materiales.

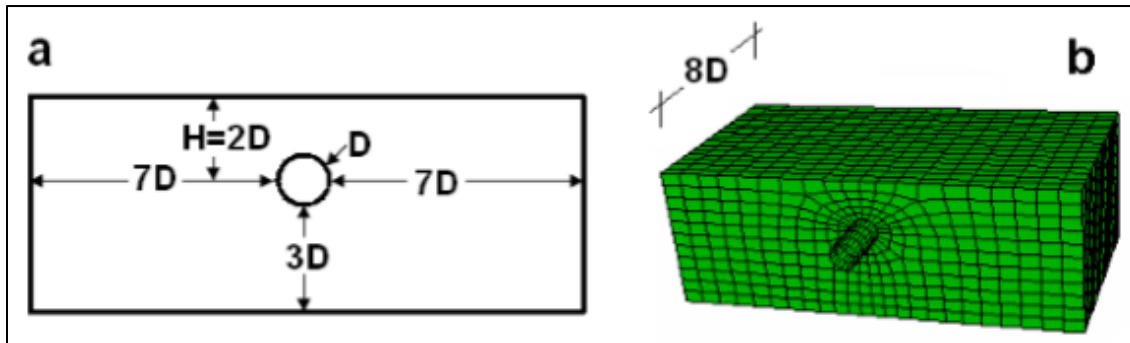
En relación con el tipo de elemento de enmallado, el autor hace uso de elementos cuadrados de 8 nodos (CPE8) o triangulares de 6 nodos (CPE6) para el suelo mientras que para la tubería elementos cuadrados de 4 nodos (CPE4) o triangulares de 3 nodos (CPE3).

Popescu and Nobahar (2003) realizaron una modelación numérica en Abaqus CAE de la interacción suelo – tubería, considerando dos tipos de suelo: arcilla y arena.

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos

En el primer caso, consideraron un modelo constitutivo Von-Mises para el suelo elastoplástico para la tubería; en el segundo caso, consideraron un modelo constitutivo Mohr Coulomb para la arena y mantuvieron el de la tubería (**Figura 7**).

Así mismo, la interacción entre el suelo y la tubería fue representada como fricción tangencial.



**Figura 7** Geometría y enmallado del modelo propuesto por Popescu and Nobahar (2003) para la simulación de la interacción suelo tubería.

Otros autores, además de ahondar en el modelado de la interacción suelo – tubería, han incorporado otros objetivos en sus investigaciones que involucran este aspecto como input a su objeto final.

Karimian (2006) realizó una modelación numérica para contraste de pruebas en escala real, haciendo uso del software Flac 2D (elementos finitos en dos dimensiones). En este caso, se implementó el modelo constitutivo elasto plástico perfecto con criterio de falla Mohr Coulomb para el suelo y sus parámetros se seleccionaron a partir de pruebas de laboratorio y validaciones con modelos a escala, mientras que para la tubería se usó un modelo elasto - plástico, la interfaz entre suelo y tubería se representó mediante el criterio de resistencia al corte de Coulomb.

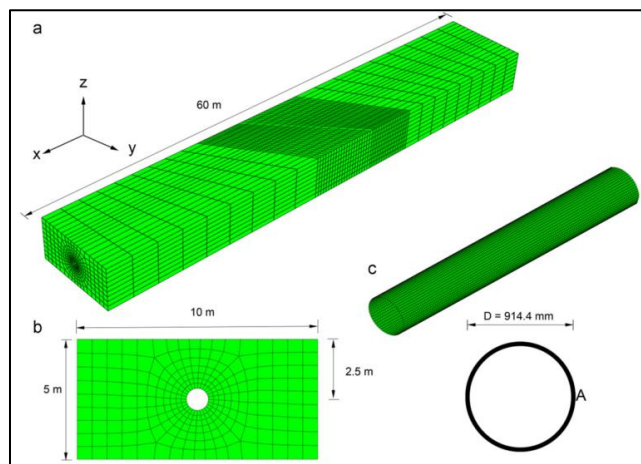
En este caso, la modelación incluyó escenarios de tuberías sujetas a desplazamientos generados por movimientos transversales y longitudinales a la misma.

(Vazouras, Karamanos, and Dakoulas 2012), evaluaron el comportamiento mecánico de una tubería de acero enterrada y sometida a la acción de una falla sísmica activa. Para esto, realizaron una modelación 3D en Abaqus CAE, planteando un modelo de bloque de suelo en el cual se encontraba embebida la

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos

tubería y establecieron una parte de este bloque como la zona de influencia directa de la falla. El suelo fue representando mediante el modelo elasto – plástico perfecto Mohr Coulomb mientras que la tubería se representó con el modelo plástico de Von Mises con endurecimiento isotrópico (**Figura 8**).

La interface suelo – tubería se simuló mediante un algoritmo de contacto, representado por un coeficiente de fricción  $\mu$ , que en este caso adoptaron como 0.3. El enmallado se realizó con elementos de integración reducida de 4 nodos (S4R) para la tubería y elementos de 8 nodos y de integración reducida (C3D8R) para el suelo.



**Figura 8** Modelo de elementos finitos que simula el efecto de una falla sísmica en una tubería de acero enterrada (Vazouras, Karamanos, and Dakoulas 2012).

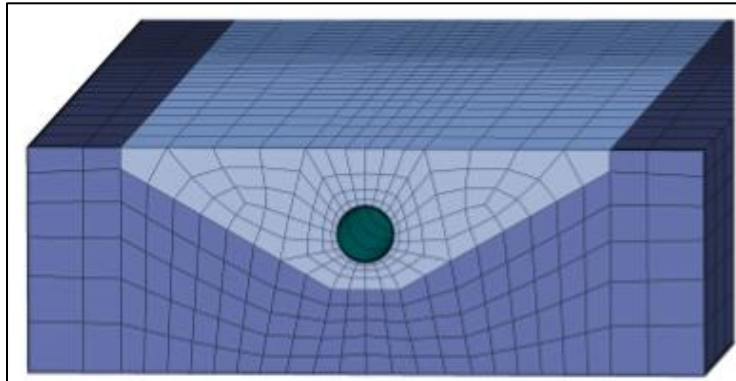
Takada, Hassani, and Fukuda (2001) realizaron una modelación numérica para calcular las deformaciones máximas en la tubería en el punto que cruza con la falla para diferentes ángulos del alineamiento de la falla con respecto a la tubería. Para esto se implementó un modelo 3D en el software Abaqus CAE, modelando la tubería como una viga simplemente apoyada, esta última se representó mediante un modelo constitutivo elastoplástico para tres tipos de tubería. Este análisis permitió establecer las condiciones de esfuerzos y deformaciones en los puntos críticos de la tubería.

Trifonov (2015) realizó una modelación numérica con elementos finitos mediante el software Ansys para conocer el comportamiento de una tubería continua de acero ante la influencia de una falla, para esto generó un modelo 3D en el que representó el suelo natural y el suelo de la zanja a partir de un modelo constitutivo elastoplástico Drucker-Prager y la tubería de acero a partir de un modelo constitutivo elastoplástico

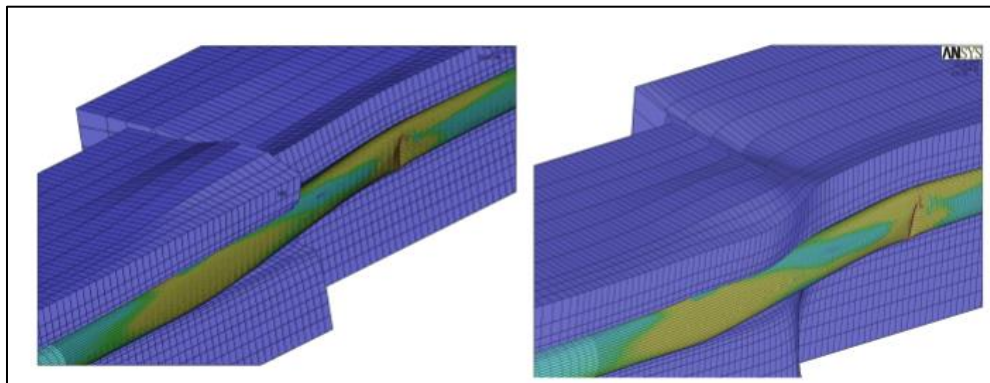
**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**

Von Mises; la interacción entre los dos materiales la representó con un problema de contacto superficie a superficie (**Figura 9**).

Este trabajo permitió conocer las deformaciones en la tubería en los puntos de mayor criticidad, es decir, el tramo de la tubería localizada en el área aferente a la falla sísmica; este análisis tuvo en cuenta un bloque de suelo modelado de forma continua y un bloque de suelo modelado de forma discontinua (**Figura 10**).



**Figura 9** Modelo de elementos finitos propuesto para evaluar el comportamiento de una tubería de acero ante una falla sísmica (Trifonov 2015).



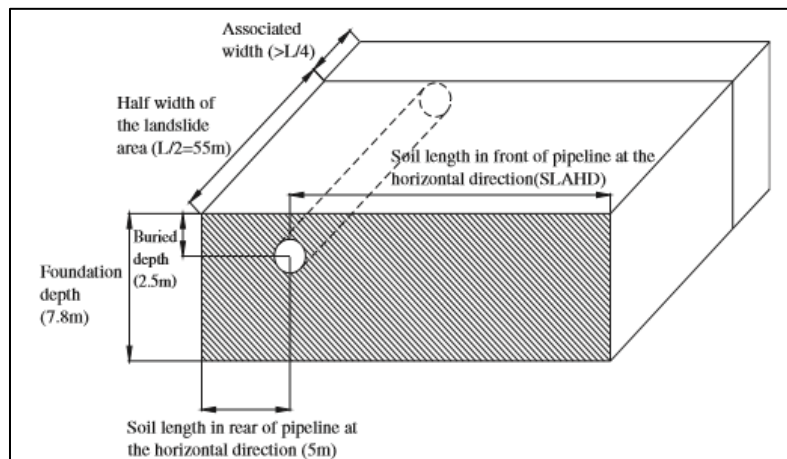
**Figura 10** Análisis de esfuerzos y deformaciones en la tubería para un bloque de suelo continuo y uno discontinuo (Trifonov 2015).

(Zheng et al. 2012), realizaron un análisis de falla real de una tubería enterrada sometida a deflexión por efecto de un deslizamiento. Para esto, implementaron un modelo de elementos finitos en 3D en el que representaron el suelo como un bloque con la tubería embebida en el mismo, simulando condiciones de contacto entre el suelo y la tubería superficie a superficie con deslizamiento finito y la presión interna de la tubería (**Figura 11**).



## Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide

### Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos



**Figura 11** Representación esquemática del modelo 3D usado por Zheng et al. (2012) para simular el efecto de un deslizamiento sobre una tubería de acero.

El suelo se representó mediante un modelo elástico lineal y la tubería de acero mediante un modelo elastoplástico e isotrópico; las condiciones de carga se generaron a partir de un campo de desplazamientos representado por una ecuación polinómica de cuarto orden y derivado de las mediciones reales de campo a la tubería afectada.

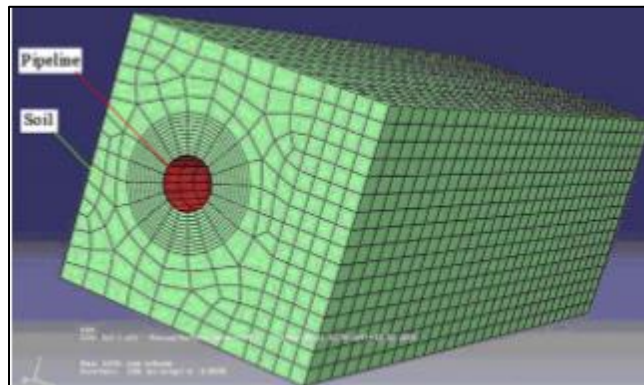
Esta modelación permitió establecer de forma aproximada la condición de esfuerzos a la cual la tubería presentó falla durante el deslizamiento que la afectó; así mismo, los autores resaltan la influencia de variables como el espesor y el diámetro y la presión interna de la tubería en la capacidad de respuesta de la misma.

De igual forma P. Liu et al. (2010) realizaron un análisis mediante elementos finitos en Abaqus CAE para analizar el mecanismo de falla de una tubería de acero enterrada de conducción de gas sometida a cargas de deflexión producto de un deslizamiento de suelo que terminó por generar su rotura.

Al igual que en las anteriores investigaciones, el suelo se representó mediante un bloque con modelo constitutivo elástico lineal mientras que la tubería se representó mediante un modelo constitutivo elastoplástico e isotrópico; en este caso, la interface suelo-tubería se modeló sin defectos.

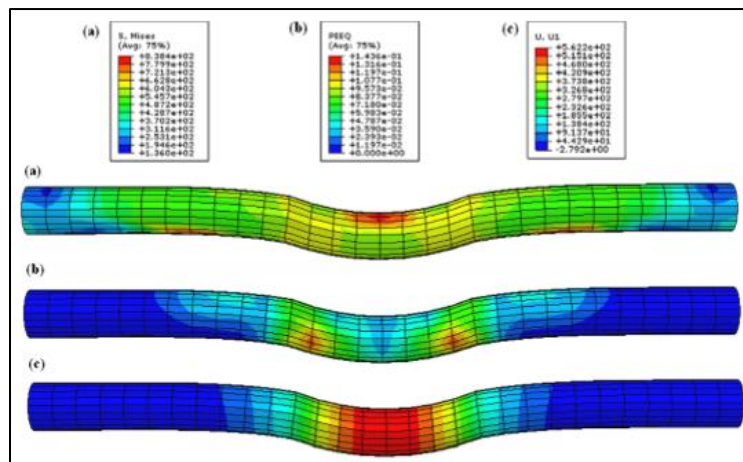
Por último, para el enmallado se consideraron elementos hexagonales de 8 nodos C3D8 (**Figura 12**).

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos



**Figura 12** Modelo de elementos finitos que representa una tubería enterrada en un bloque de suelo (P. Liu et al. 2010).

El autor centra el análisis de resultados en variables como el esfuerzo de tensión que se presenta en la tubería, las deformaciones unitarias axiales y los desplazamientos de la tubería (**Figura 13**) y mediante curvas esfuerzo-deformación, determina los puntos de colapso plástico de la tubería y los puntos de falla mecánica de la misma.



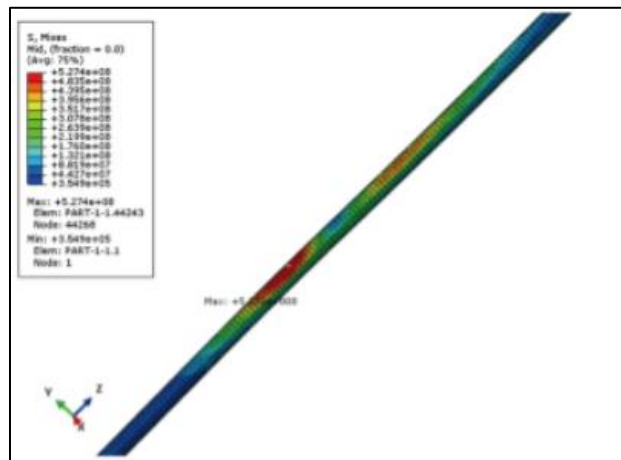
**Figura 13** Distribución de esfuerzo de Von Mises (a), deformación unitaria (b) y desplazamiento en la tubería (c) (P. Liu et al. 2010).

Li and Wu (2017) realizaron un análisis para tuberías de gas enterradas sometidas a deslizamientos, en este caso representaron la tubería mediante un modelo constitutivo elastoplástico y el efecto del suelo lo simularon a partir de coeficientes de reacción horizontal y vertical (resortes).

Los autores analizaron la distribución del esfuerzo y deformación máxima de la tubería y el esfuerzo axial y deformación a lo largo de la línea para algunos casos

## Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos

prácticos documentados, concluyendo que las deformaciones y esfuerzos máximos aumentan gradualmente con el desplazamiento del deslizamiento (**Figura 14**).



**Figura 14** Zonas de concentración de esfuerzos de tensión y compresión a lo largo de la tubería analizada Li and Wu (2017).

## 2.2. MARCO CONCEPTUAL

### 2.2.1. Vulnerabilidad

La vulnerabilidad corresponde al grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos en riesgo, ubicados dentro del área de influencia de un elemento amenazante. La vulnerabilidad se considera como un componente principal cuando se aplica cualquier metodología de determinación de riesgo, toda vez que éste se define como la medida de la probabilidad y severidad de un evento adverso para la vida, salud, propiedad o medio ambiente (Muhlbauer 2004).

También se puede definir como el grado en que un sistema o parte de este pueden reaccionar adversamente ante la materialización de una amenaza. La respuesta está condicionada por la capacidad del sistema de absorber y recuperarse después de materializada la amenaza (Prieto 2011).

### Vulnerabilidad de tuberías ante deslizamientos

La vulnerabilidad de tuberías de acero usadas para transportar hidrocarburos y gas ha evolucionado dejando de ser considerada únicamente la vulnerabilidad mecánica y dando relevancia a la vulnerabilidad química, vulnerabilidad ante amenazas

naturales y finalmente una vulnerabilidad ante actos antrópicos como el terrorismo o el hurto.

La vulnerabilidad ante procesos de remoción en masa se da por la exposición de esta a los diferentes relieves, donde las deformaciones del terreno inciden de forma directa en la integridad del ducto. Sin embargo, la magnitud de un deslizamiento no determina por sí sola el potencial de daño sobre la tubería involucrada en el movimiento.

Este potencial estará condicionado además por la magnitud, tiempo y localización del proceso, además de la interacción con el entorno (factores internos y externos del proceso de remoción en masa) y con otros elementos expuestos, (Gonzalez 2010).

En el contexto de un deslizamiento, la vulnerabilidad de una tubería se entiende como el nivel de daño potencial o grado de pérdida de la tubería ante un deslizamiento de una magnitud dada, el cual está controlado por el campo de esfuerzos generados por éste. Para contrarrestar el grado de vulnerabilidad en la tubería, en los últimos años se incluyeron obras de geotecnia preliminar y definitiva en nuevos proyectos con el objeto de contrarrestar o dar manejo a los procesos de inestabilidad; de igual forma en tuberías existentes se han implementado programas de mantenimiento y en casos extremos realineamientos de ductos (Rodriguez 2016).

### **2.2.2. Modelo constitutivo**

Se define como un conjunto de expresiones matemáticas que de forma conjunta pueden simular el comportamiento de un sistema físico. En el contexto del suelo y su interacción con tuberías de acero, un modelo constitutivo hace referencia a las expresiones que relacionan cargas-desplazamientos o esfuerzos-deformaciones de un medio continuo haciendo uso de las variables que caracterizan las propiedades del suelo y de la tubería (Pereira 2009).

### **2.2.3. Método de elementos finitos**

El método de los elementos finitos corresponde a una metodología numérica que permite dar solución a ecuaciones diferenciales parciales que representan un problema físico de un medio continuo (Celigueta 2011).

La finalidad de este método es la discretización del medio continuo en elementos de menor tamaño que a su vez estarán representados por nodos, los cuales conformarán una malla y sobre estos tendrán lugar los cálculos para determinar las variables desconocidas, también llamadas grados de libertad.

Estos últimos hacen referencia a los desplazamientos nodales mediante los cuales se pueden determinar los esfuerzos y deformaciones a partir de la implementación de la ecuación constitutiva que mejor se aproxime al comportamiento del material analizado (Reddy 2005).

## 2.3. MARCO TEÓRICO

### 2.3.1. Movimientos en taludes y laderas

En la **Tabla 1** se relacionan los tipos de movimiento que se pueden encontrar dentro de una ladera de acuerdo con la clasificación propuesta por Varnes (1978) y Suárez (1998).

**Tabla 1.** Tipos de movimientos de taludes y laderas (Varnes 1978) y (Suárez 1998).

Tipo de Movimiento		Descripción
Reptación		La reptación suele ocurrir en laderas con pendiente media a baja. Se les atribuye a las alteraciones climáticas relacionadas con procesos de humedecimiento y secado en suelos usualmente arcillosos, muy blandos o alterados, con características expansivas. La reptación consiste en movimientos del suelo subsuperficial que van desde muy lentos a extremadamente lentos, sin una superficie definida de falla.
Deslizamientos	Rotacional	Si la superficie de falla es circular o cicloidal, su cinemática dicta que la masa puede moverse a lo largo de la superficie con deformaciones internas pequeñas. Un deslizamiento rotacional puede interrumpir drenajes naturales que humedecerán continuamente la masa desplazada, perpetuando los movimientos del talud, hasta que ésta alcance una pendiente con un gradiente suficientemente bajo para detener el movimiento.
	Traslacional	En los desplazamientos traslacionales la masa se desplaza a lo largo de una superficie de rotura plana u ondulada, deslizándose sobre la superficie original del terreno. Los desplazamientos traslacionales generalmente son más pequeños que los deslizamientos rotacionales.

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**

Tipo de Movimiento	Descripción
Flujos	En un flujo ocurren movimientos relativos de las partículas o bloques pequeños, dentro de una masa que se mueve o se desliza sobre una superficie. Las deformaciones relativas internas son muy grandes y fluyen en forma similar a un líquido viscoso. Los flujos de detritos son movimientos relativamente rápidos que llegan a ser extremadamente rápidos, compuestos principalmente por materiales gruesos.
Avalancha	Una avalancha por colapso ocurre cuando una roca meteorizada, altamente porosa y muchas veces saturada, cae y causa la destrucción de la cohesión del material y la generación de exceso de presión de agua en el flujo de la masa desplazada. Si la estructura del material es destruida por un sismo, un material saturado puede licuarse y luego fluir, llevándose en ocasiones material seco con él.
Caídas	Las caídas comienzan con la separación de bloques de suelo o de roca de la parte alta de una pendiente pronunciada, a lo largo de una superficie con poca posibilidad de deslizamiento. Es considerado un movimiento rápido o extremadamente rápido.
Avalancha de rocas	Un caso especial de caídas lo constituyen las avalanchas de rocas, flujos extremadamente rápidos de detritos de rocas, secos, causados por grandes caídas y deslizamientos.

**2.3.1.1. Clasificación según su velocidad**

El daño producido por un deslizamiento o movimiento de masa se encuentra proporcionalmente relacionado a la velocidad del mismo, dado que si el movimiento generado es súbito puede producir más daños que un deslizamiento con movimientos bajos e imperceptibles, y aunque es uno de los factores asociados a tener en cuenta su determinación es difícil y en muchos casos se realiza solo hasta que la masa se encuentra visiblemente deformada o desplazada, la medición de la misma se puede realizar mediante reconstrucción de trayectoria de campos de desplazamientos conforme a los elementos desplazados.

La clasificación de movimientos conforme a su velocidad se encuentra relacionada por Cruden and Varnes (1996) donde realiza una relación de velocidades de deslizamiento con niveles probables de daños (**Tabla 2**).

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**

**Tabla 2.** Velocidades conforme al tipo de movimiento (Cruden and Varnes 1996).

Tipo	Descripción	Vel. (mm/s)	Desplazamiento	Efectos
1	Extremadamente lenta			Movimiento imperceptible sin el uso de instrumentación. Movimiento admisible con precauciones.
2	Muy lenta	$5 \times 10^{-7}$	16 mm / año	Algunas estructuras permanentes pueden permanecer sin sufrir daños por parte del deslizamiento.
3	Lenta	$5 \times 10^{-5}$	1.6 m / año	Después del movimiento se deben hacer reparaciones constructivas. Algunas estructuras menores pueden ser conservadas con trabajos de mantenimiento frecuentes, siempre que el movimiento total no sea muy grande durante las fases de aceleración del deslizamiento.
4	Moderada	$5 \times 10^{-3}$	13 m / mes	Algunas estructuras temporales y poco sensitivas pueden mantenerse temporalmente.
5	Rápida	$5 \times 10^{-1}$	1.8 m / hora	Posibilidad de escape. Estructuras, posesiones y equipos destruidos.
6	Rápida	$5 \times 10^1$	3 m / min	Algunas vidas perdidas. Velocidad muy grande para permitir que todas las personas puedan escapar.
7	Extremadamente rápida	$5 \times 10^3$	5 m / s	Catástrofe violenta. Edificaciones destruidas por el impacto del material desplazado. Muchas muertes.

### 2.3.1.2. Clasificación según su alineamiento con la tubería

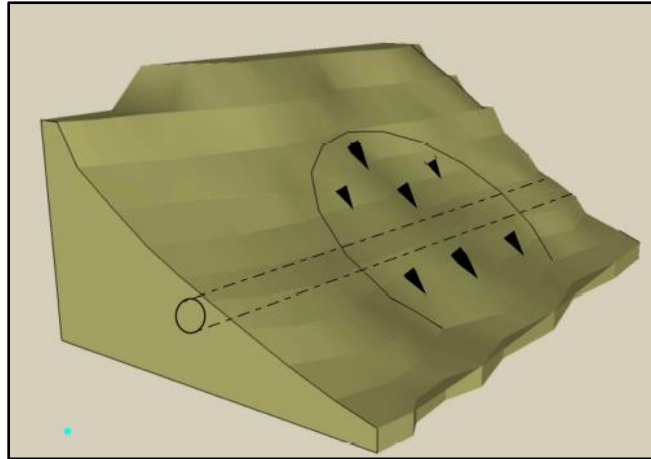
El enterramiento de la tubería en laderas susceptibles a la ocurrencia de procesos de inestabilidad genera diferentes escenarios que dependen del alineamiento de la tubería con relación al sentido de movimiento de la ladera. Cada escenario condiciona el comportamiento y respuesta mecánica de la tubería ante los desplazamientos del terreno. A continuación se describen de forma general los tres posibles alineamientos de una tubería de acero que interactúa con un proceso de inestabilidad.

#### Alineamiento Transversal

Si la tubería se encuentra alineada perpendicularmente al sentido de movimiento de la ladera, se esperan grandes deformaciones en el tramo medio de la tubería

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos

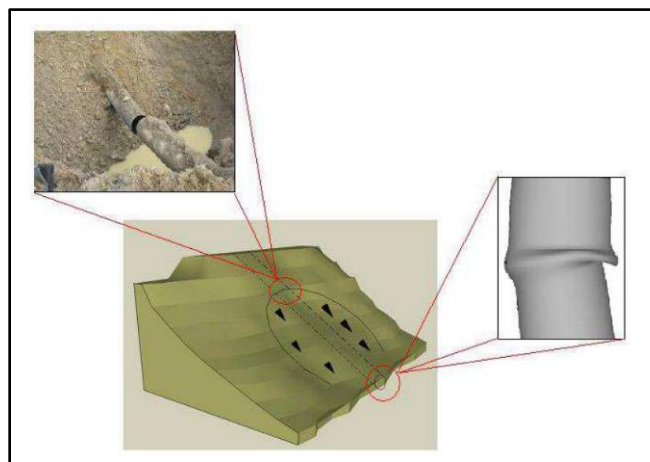
involucrada, y arrugas por acumulación de esfuerzos de compresión o adelgazamiento y rotura de la pared de la tubería en los flancos del deslizamiento por efecto de esfuerzos de tensión (**Figura 15**).



**Figura 15** Alineamiento transversal de la tubería con relación al sentido del movimiento de la ladera (Pereira 2009).

### Alineamiento Longitudinal

Si la tubería se encuentra alineada de forma paralela al sentido de movimiento de la ladera (**Figura 16**), se esperan esfuerzos de tensión hacia la zona de corona del deslizamiento y por tanto pérdida de espesor y/o rotura mientras que en la parte baja de la ladera se esperan esfuerzos de compresión materializados en arrugas en la tubería.

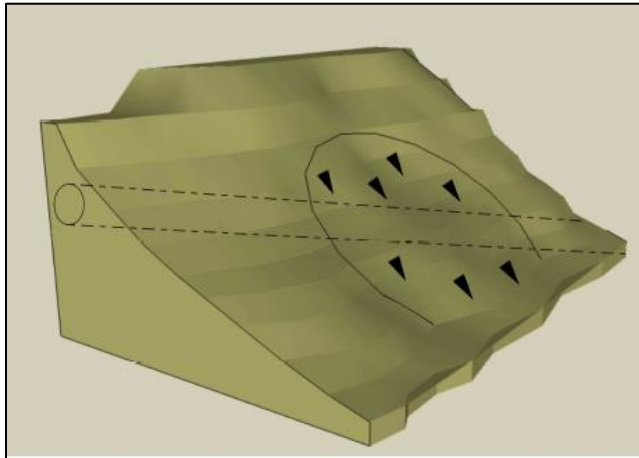


**Figura 16** Alineamiento longitudinal de la tubería con relación al sentido del movimiento de la ladera (Pereira 2009).



## **Alineamiento diagonal**

Aunque este tipo de alineamiento es poco común, puede presentar una combinación de fallas por compresión y tensión en cualquiera de los flancos del deslizamiento (**Figura 17**).



**Figura 17** Alineamiento diagonal de la tubería con relación al sentido del movimiento de la ladera (Pereira 2009).

En este trabajo se ha considerado el caso de alineamiento transversal, es decir, la tubería se encuentra alineada de forma perpendicular al sentido de movimiento de la ladera.

### **2.3.2. Modelos Constitutivos**

Un modelo constitutivo es una formulación matemática que intenta representar procesos físicos, que en este caso corresponde a esfuerzos y deformaciones en el suelo y la tubería de acero.

En este proyecto se seleccionó el modelo constitutivo elástico-lineal para representar el comportamiento del suelo y un modelo constitutivo elastoplástico para representar el comportamiento de la tubería de acero.

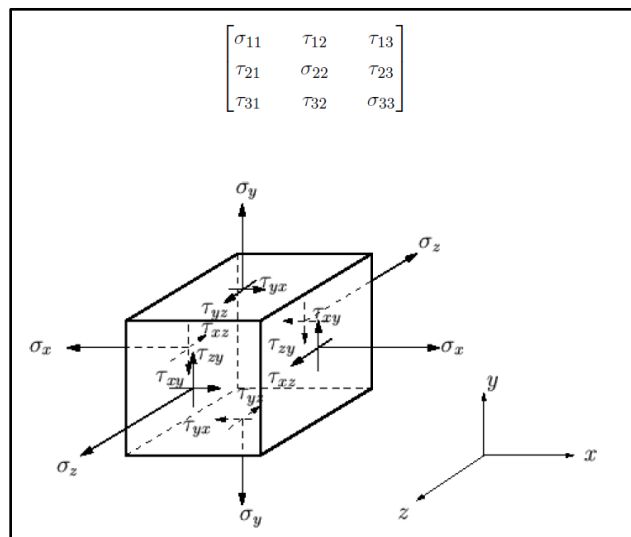
#### **2.3.2.1. Elasticidad**

Los modelos de la elasticidad se basan principalmente en la recuperación de un material a su forma inicial después de ser sometido a cargas o esfuerzos de tensión o compresión, esta teoría se soporta principalmente con la Ley de Hooke, quien

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**

expone que los esfuerzos y las deformaciones son inversamente proporcionales y generan relaciones lineales entre los mismos.

La aplicación de este modelo al suelo se enfoca principalmente en el desarrollo de tensores de esfuerzos, que permiten evaluar los esfuerzos y deformaciones de forma tridimensional como se evidencia en el paralelepípedo que se muestra en la **Figura 18**, lo anterior es válido solo en casos donde las deformaciones del material sean pequeñas.



**Figura 18** Tensor de esfuerzos y representación gráfica en el paralelepípedo (Pereira 2009).

Los esfuerzos se encuentran definidos a partir de deformaciones elásticas, como lo muestra la Ecuación 1.

$$\sigma = D^{el} * \varepsilon^{el} \text{ Ecuación 1}$$

Donde  $D^{el}$  es definido como el tensor de esfuerzo de cuarto orden representado en la matriz de rigidez elástica.

La ley de Hooke define el comportamiento de material como isotrópico lineal que actúa bajo condiciones elásticas  $E$  y  $\nu$  (módulo de elasticidad y relación de Poisson respectivamente), como se evidencian en las Ecuaciones 2 y 3.

$$E = \frac{\mu*(3\lambda+2\mu)}{\lambda+\mu} \text{ Ecuación 2}$$

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad \text{Ecuación 3}$$

Los parámetros  $\lambda$  y  $\mu$  son constantes elásticas de Lamé y pueden obtenerse de manera experimental, y pueden formularse de la siguiente manera:

$$\lambda = \frac{\nu * E}{(1 + \nu) * (1 - 2\nu)} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} = G \quad \text{Ecuación 5}$$

De lo anterior se define como ecuación constitutiva de cuerpo lineal:

$$\sigma = 2G \left\{ \varepsilon \frac{\nu}{1 - 2\nu} * e1 \right\} \quad \text{Ecuación 6}$$

Para expresar las deformaciones en función de los esfuerzos, se invierte la ecuación constitutiva elástica donde:

$$\varepsilon = \frac{1}{2G} * \sigma * \nu / (1 - 2\nu) \{e1\} \quad \text{Ecuación 7}$$

El cual se encuentra inmerso dentro del tensor de esfuerzos tal y como se observa en la **Figura 19**.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/2G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2G \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{bmatrix}$$

**Figura 19** Tensor de esfuerzos (P. Liu et al. 2010).

### 2.3.2.2. Elastoplasticidad

La relación de elastoplasticidad es considerada como combinación de dos teorías aplicadas a materiales que al igual que la teoría de elasticidad tienen la característica de deformarse hasta llegar al estado límite donde pueden recuperar sus propiedades ante disipación de esfuerzos, sin embargo desde este punto y hasta el punto de falla se deben considerar la teoría inicial combinada con

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**

plasticidad donde se observa la fluencia del material hasta el punto de rotura del mismo, llegando a su estado de esfuerzos máximos e irreversibles.

Para la aplicación de esta teoría se usan modelos constitutivos del medio continuo, donde básicamente se aplican tres criterios principales conformados por la ley de fluencia, la ley de flujo y la ley de endurecimiento. La aplicación de la ley de fluencia busca establecer el criterio donde se evidencie que el esfuerzo y las deformaciones de un material pasan el límite de fluencia y desde este punto inicia un comportamiento plástico del mismo (Muhlbauer 2004).

El comportamiento uniaxial esfuerzo-deformación de la tubería de acero modelado en este trabajo se caracteriza mediante la ecuación de Ramberg – Osgood (Ramberg and Osgood 1943).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left[ 1 + \frac{n}{1+r} \left( \frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^r \right] \text{ Ecuación 8}$$

Dónde:

$\varepsilon$ : Deformación

$\sigma$ : Esfuerzo axial del tubo

E: Módulo de Young

$\sigma_y$ : Esfuerzo de fluencia del material del tubo

n, r: Parámetros de Ramberg – Osgood

En la **Tabla 3** se presentan los parámetros n y r para diferentes tipos de tubería de acero.

**Tabla 3.** Parámetros de Ramberg y Osgood para tuberías de acero (ALA 2001).

Grado de Tubería	Grado B	X42	X52	X65	X70
Esfuerzo de Fluencia (MPa)	227	310	358	448	517
n	10	15	9	7.8	5.5
r	100	32	10	14.3	16.6

De acuerdo con el código API (1990), las tuberías continuas de acero para oleoductos y gasoductos deben garantizar deformaciones unitarias permanentes del terreno menores o iguales a 3% en tensión y a 0.175t/R en compresión, donde t corresponde al espesor de la pared del tubo, y R al radio de la sección del mismo (Gonzalez 2010).

### **2.3.3. Construcción de curvas**

Para la construcción de las diferentes curvas derivadas del presente trabajo se han establecido datos de entrada básicos como el diámetro, el espesor de la pared y el grado de acero de la tubería y el ancho de deslizamiento que se busca evaluar.

#### **2.3.3.1. Curvas de desplazamiento crítico de la tubería y el ancho del deslizamiento**

Las curvas que relacionan la anchura del deslizamiento con el desplazamiento máximo o crítico permiten establecer cuál es el máximo desplazamiento que alcanzara la tubería de acuerdo con las deformaciones del suelo, que a su vez dependen de la longitud inestable.

Para la construcción de estas curvas se llevaron a cabo los siguientes pasos:

a. Selección de parámetros de entrada:

Diámetro, espesor de pared y presión de tubería.  
Parámetros del suelo  
Ancho del deslizamiento.

b. Modelación numérica del proceso de interacción suelo tubería.

c. Determinación de los desplazamientos máximos de la tubería.

d. Construcción de curvas que relacionan el ancho del deslizamiento con el desplazamiento máximo de la tubería.

#### **2.3.3.2. Curvas de vulnerabilidad**

Para la construcción de estas curvas se llevaron a cabo los siguientes pasos:

a. Selección de parámetros de entrada:

Diámetro, espesor de pared y presión de tubería.  
Parámetros del suelo  
Ancho del deslizamiento.

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**

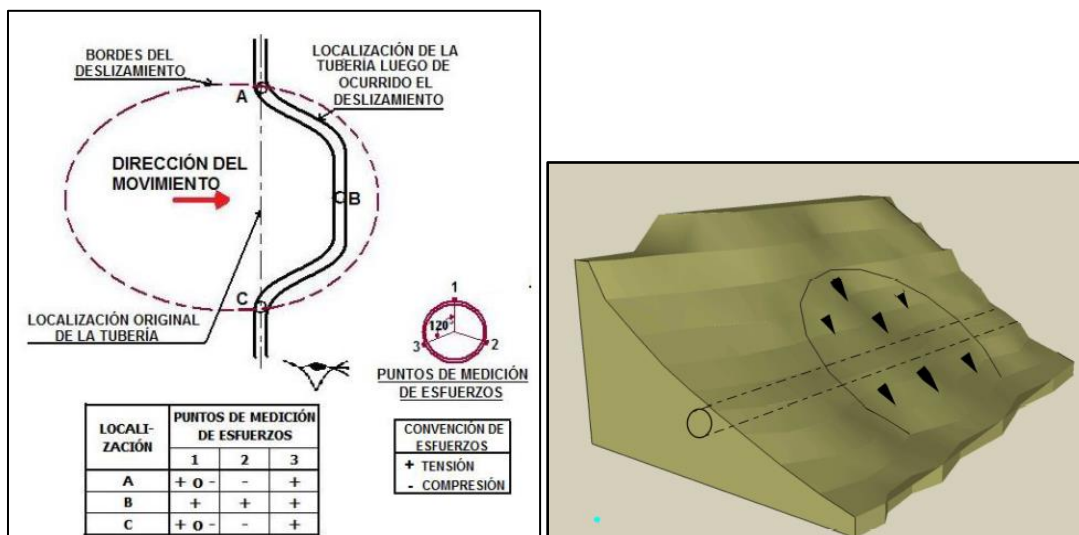
- b. Modelación numérica del proceso de interacción suelo tubería.
- c. Selección de valores de esfuerzo axial entre cero “0” y el esfuerzo a rotura del acero considerado en los puntos de mayor criticidad de la tubería.
- d. Cálculo de la deformación unitaria axial causada por el esfuerzo seleccionado, según la ecuación de comportamiento uniaxial esfuerzo – deformación de una tubería de acero.
- e. Selección de los valores de desplazamiento en la tubería correspondientes a los valores de esfuerzo axial determinados en el paso c.
- f. Cálculo del porcentaje de vulnerabilidad, como el cociente del esfuerzo axial seleccionado, sobre el esfuerzo axial último del acero de la tubería.
- g. Construcción de curvas que relacionan el porcentaje de vulnerabilidad calculado en el paso f, con los desplazamientos necesarios en la tubería para alcanzar los esfuerzos axiales considerados.

### 3. METODOLOGÍA

En este capítulo se describen las actividades necesarias para dar respuesta a los objetivos planteados en la presente investigación. El capítulo se enfoca en seis aspectos importantes así: tipo de deslizamiento, parámetros de los modelos constitutivos, geometría del modelo numérico, condiciones de contorno y cargas, enmallado del modelo y contacto suelo-tubería.

#### 3.1. TIPO DE DESLIZAMIENTO CONSIDERADO

En la presente investigación se ha considerado un deslizamiento rotacional cuya dirección de movimiento es en sentido perpendicular al alineamiento de la tubería y que involucra la masa de material tipo suelo en la cual se encuentra enterrada la tubería. Si la tubería se encuentra alineada perpendicularmente al sentido de movimiento de la ladera, se esperan grandes deformaciones en el tramo medio de la tubería involucrada, y arrugas por acumulación de esfuerzos de compresión o adelgazamiento y rotura de la pared de la tubería en los flancos del deslizamiento por efecto de esfuerzos de tensión (**Figura 20**).



**Figura 20** Izquierda: Efecto de un deslizamiento perpendicular a la tubería, González (2010), Derecha: Perspectiva de la posición de la tubería en el deslizamiento considerado en el análisis.

#### 3.2. PARÁMETROS DE MODELADO

En torno a la explicación del marco teórico acerca del modelo constitutivo para el suelo y la tubería, se seleccionaron propiedades físicas y mecánicas para un suelo

cohesivo arcillo-limoso y para tubería de acero al carbono de referencias API 5L X42 y API 5L X70.

### 3.2.1. Parámetros del suelo

Las propiedades físicas y mecánicas del suelo fueron establecidas a partir de fuentes bibliográficas, es decir, teniendo en cuenta valores típicos correspondientes a un material de carácter arcillo-limoso, material similar a los mencionados por Sweeney et al. (2004).

En este caso se consideró un material correspondiente a un suelo residual por tratarse del material que predomina en las zonas donde se emplazan las tuberías de conducción de hidrocarburos y que son producto de procesos de meteorización de la roca parental.

En la **Tabla 4** se presentan los parámetros físico-mecánicos utilizados en el modelo para representar el suelo en el cual se encuentra enterrada la tubería.

**Tabla 4.** Parámetros físicos y mecánicos del suelo considerado en la modelación.

<b>Peso unitario (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Angulo de fricción (°)</b>	<b>Angulo de dilatación (°)</b>	<b>Cohesión (kPa)</b>	<b>Modulo Elasticidad (kPa)</b>	<b>Relación de Poisson</b>
18	20	5	15	12000	0.28

### 3.2.2. Parámetros de la tubería

Las tuberías continuas de acero se fabrican con aceros dúctiles, con penetración completa de soldaduras a tope en las juntas. Sus propiedades físicas respecto al grado de la tubería, diámetro, espesor de la pared, peso por unidad de longitud, esfuerzos de fluencia y resistencia a la tensión se tomaron de las especificaciones del American Petroleum Institute (API 1990).

Para el caso de la tubería, se establecieron dos tipos de tubería de acuerdo con un análisis de información existente, en relación con los diámetros de mayor uso comercial para el transporte de hidrocarburos (Sweeney et al. 2004). De esta manera se seleccionaron dos tuberías de acero con las siguientes referencias.

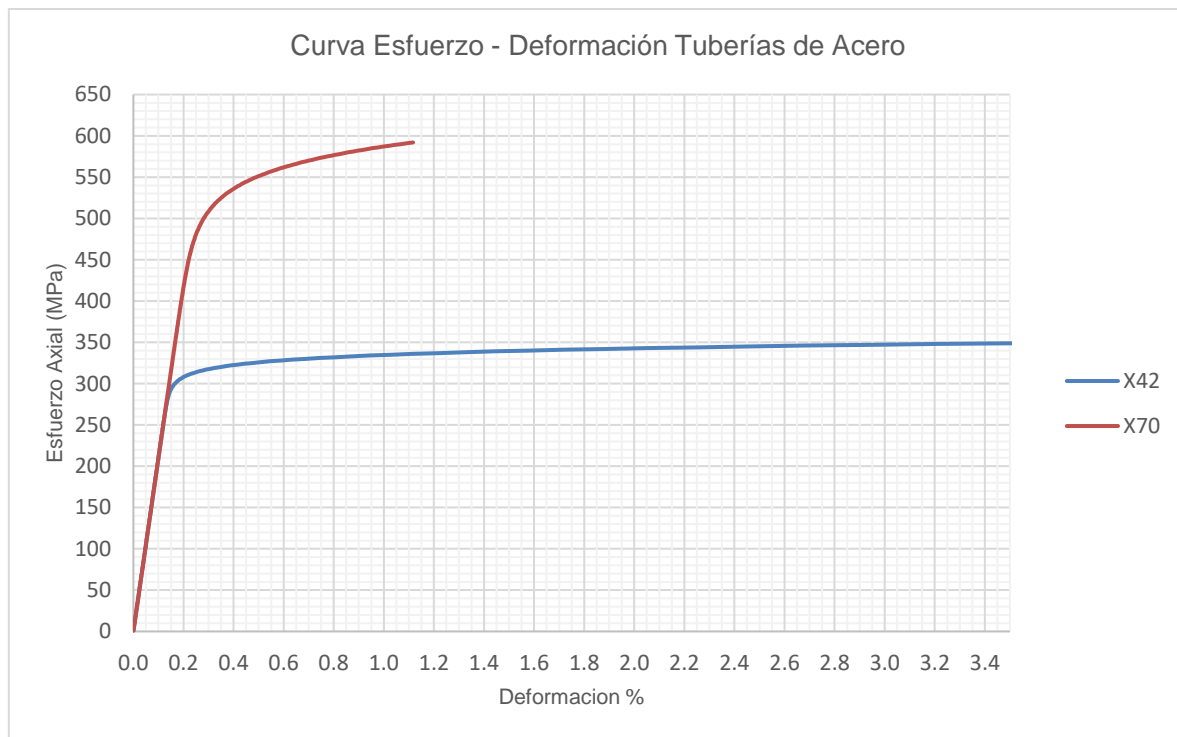
Referencia No. 1: API-5L-X42

Referencia No. 2: API-5L-X70



**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos

Teniendo en cuenta los dos tipos de tubería seleccionados, a partir de la formulación de Ramberg–Osgood (Ramberg and Osgood 1943), que describe el comportamiento elastoplástico, es posible establecer la curva de esfuerzo-deformación axial unitaria (**Figura 21**); la misma que se introduce en el software Abaqus para representar el comportamiento esfuerzo-deformación de la tubería en el rango elástico y plástico.



**Figura 21** Curva esfuerzo-deformación para las tuberías consideradas en el modelo numérico (Ramberg and Osgood 1943).

En esta curva se observa que el acero grado X42 es extremadamente dúctil, y antes de llegar a rotura puede soportar deformaciones unitarias mayores al 3% definido por el Código API como límite de deformación unitaria a tensión.

Igualmente, se observa que el acero de grado X70 alcanza resistencias mayores pero sus deformaciones unitarias últimas no superan el 2%.

El parámetro de peso unitario del acero se estableció a partir de información bibliográfica con un valor de 78.5 kN/m<sup>3</sup>.

En la **Tabla 5** se aprecian los respectivos valores de esfuerzo de fluencia y de resistencia última a la tensión.

**Tabla 5.** Parámetros definidos para simulación en tubería.

Tubería	Peso (kN/m <sup>3</sup> )	Limite elástico (kPa)	Carga de rotura (kPa)
API 5L X42	78,5	289000	413000
API 5L X70	78,5	482000	565000

En el análisis se consideró además un módulo de elasticidad del acero  $E_s$  de  $210 \times 10^6$  kPa y una relación de Poisson de 0.33, ambos datos extraídos de fichas técnicas de fabricantes de este tipo de tubería.

### 3.2.2.1. Diámetro y espesor

En relación con la geometría de la tubería, se establecieron 3 diámetros en función de los diámetros de mayor uso comercial en la construcción de líneas de flujo y diferenciados entre sí por su capacidad de transporte (**Tabla 6**).

**Tabla 6.** Diámetros considerados en el modelo de análisis.

Diámetro (")	Característica
12	Capacidad baja de transporte
16	Capacidad media de transporte
18	Capacidad alta de transporte

Los espesores que se tuvieron en cuenta consideran para cada tipo de tubería y cada diámetro, un espesor de fábrica, extraído del análisis de información bibliográfica y un espesor por desgaste de uso, extraído de documentos técnicos de integridad y programas de mantenimiento (Ocensa, 2015) (**Tabla 7**).

**Tabla 7.** Diámetros considerados en el modelo de análisis.

Tipo de tubería	Diámetro (")	Espesor fabrica (m)	Espesor de uso (m)
API 5L X42	12	0.01	0.007
	16	0.013	0.01
	18	0.015	0.012
API 5L X70	12	0.016	0.013
	16	0.02	0.017
	18	0.022	0.019

### 3.2.2.2. Presión interna

Para el presente trabajo se realizaron modelaciones con dos estados de presión en la tubería, el primero correspondiente a una presión de operación, establecida en

900 psi, valor promedio de operación de los oleoductos, poliductos y gasoductos en Colombia (Pereira 2009) y el segundo a un estado despresurizado.

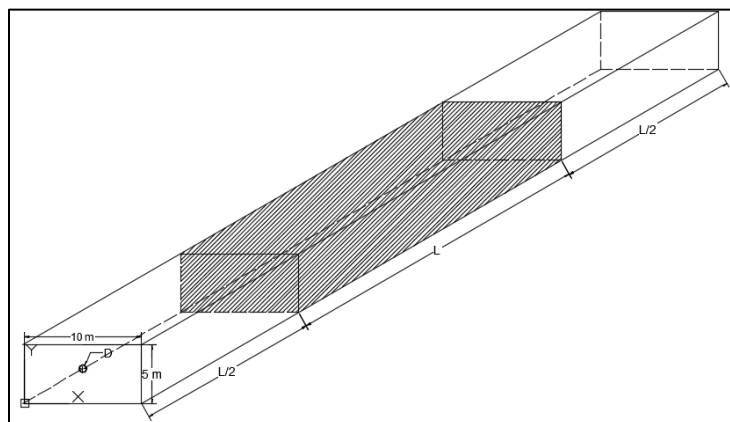
### 3.3. MODELO NUMÉRICO

El modelo numérico constituye un modelo 3D el cual se implementó mediante software Abaqus/Standard, donde se aplicó un modelo geométrico homogéneo, combinando las diferentes variables tanto del suelo como de la tubería.

#### 3.3.1. Geometría del modelo

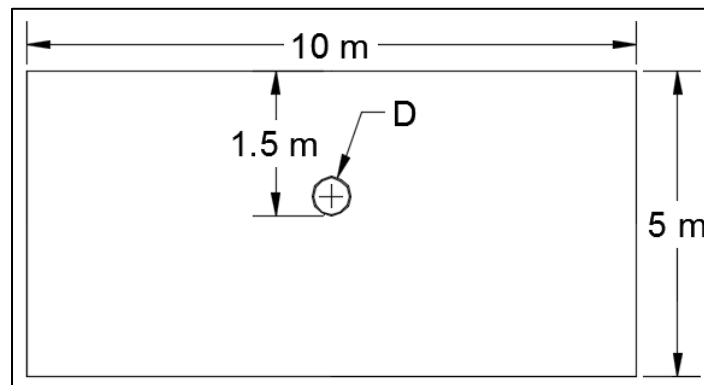
El suelo se modeló como un bloque sin la parte ocupada por la tubería. El bloque tiene una longitud  $L$  que representa la zona inestable y por tanto la zona que ejercerá influencia directa sobre la tubería, por cada costado de esta zona se modeló un bloque de longitud  $L/2$  que representa la zona estable, de tal manera que el límite entre estas zonas representará los flancos del deslizamiento (**Figura 22**). Así mismo, se estableció que el bloque tiene un ancho de 10 m y una altura de 5 m, esto a partir del análisis de modelaciones precedentes en otras investigaciones, donde han representado el suelo como un bloque (**Figura 23**).

La tubería se modeló con una geoforma sólida y homogénea, asignándole el espesor y diámetro correspondiente. La longitud de la tubería se tomó como la longitud correspondiente a la suma de la longitud del tramo de zona inestable y la longitud de los tramos de las zonas estables, su alineamiento es rectilíneo y se localizó en la parte central del bloque y a 1.5 m de profundidad con relación a la parte superior del mismo, suponiendo una condición de enterramiento típica en la construcción de líneas de flujo (**Figura 23**).



**Figura 22** Representación gráfica 3D del bloque de suelo que hace parte del modelo numérico.

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**



**Figura 23** Representación gráfica en 2D de la sección transversal del bloque de suelo.

En la **Tabla 8** se presentan las dimensiones del bloque de suelo que se han considerado en esta investigación, en la cual se han considerado cuatro anchos de deslizamientos cuyas longitudes fueron establecidas mediante un análisis de información de eventos de deslizamientos en Colombia (Sweeney et al. 2004), que muestra la mayor ocurrencia de deslizamientos en longitudes de tubería involucrada que oscila en este rango.

**Tabla 8.** Condiciones geométricas para el bloque de suelo.

Ancho zona inestable (L, m)	Ancho zona estable (L/2, m)	Ancho bloque suelo (m)	Alto bloque suelo (m)
25	12.5	10	5
62.5	31.25		
100	50		
137.5	68.75		

### 3.3.2. Modelos de análisis

En la **Tabla 9** se establecen los modelos de análisis resultantes de la combinación de las variables de diámetro, espesor, presión, ancho de deslizamiento y tipo de acero.

**Tabla 9.** Relación modelos de análisis establecidos.

No. Modelo	Ancho de Deslizamiento (m)	Tipo de Acero	Diámetro Interno Tubería (")	Espesor (m)	Presión (kPa)
A-1	25	API 5L X42	12	0,01	6205,28
A-2	25	API 5L X42	12	0,01	0
A-3	25	API 5L X42	12	0,007	6205,28
A-4	25	API 5L X42	12	0,007	0
A-5	25	API 5L X42	16	0,013	6205,28
A-6	25	API 5L X42	16	0,013	0

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**

No. Modelo	Ancho de Deslizamiento (m)	Tipo de Acero	Diámetro Interno Tubería (")	Espesor (m)	Presión (kPa)
A-7	25	API 5L X42	16	0,01	6205,28
A-8	25	API 5L X42	16	0,01	0
A-9	25	API 5L X42	18	0,015	6205,28
A-10	25	API 5L X42	18	0,015	0
A-11	25	API 5L X42	18	0,012	6205,28
A-12	25	API 5L X42	18	0,012	0
A-13	25	API 5L X70	12	0,016	6205,28
A-14	25	API 5L X70	12	0,016	0
A-15	25	API 5L X70	12	0,013	6205,28
A-16	25	API 5L X70	12	0,013	0
A-17	25	API 5L X70	16	0,02	6205,28
A-18	25	API 5L X70	16	0,02	0
A-19	25	API 5L X70	16	0,017	6205,28
A-20	25	API 5L X70	16	0,017	0
A-21	25	API 5L X70	18	0,022	6205,28
A-22	25	API 5L X70	18	0,022	0
A-23	25	API 5L X70	18	0,019	6205,28
A-24	25	API 5L X70	18	0,019	0
B-1	62,5	API 5L X42	12	0,01	6205,28
B-2	62,5	API 5L X42	12	0,01	0
B-3	62,5	API 5L X42	12	0,007	6205,28
B-4	62,5	API 5L X42	12	0,007	0
B-5	62,5	API 5L X42	16	0,013	6205,28
B-6	62,5	API 5L X42	16	0,013	0
B-7	62,5	API 5L X42	16	0,01	6205,28
B-8	62,5	API 5L X42	16	0,01	0
B-9	62,5	API 5L X42	18	0,015	6205,28
B-10	62,5	API 5L X42	18	0,015	0
B-11	62,5	API 5L X42	18	0,012	6205,28
B-12	62,5	API 5L X42	18	0,012	0
B-13	62,5	API 5L X70	12	0,016	6205,28
B-14	62,5	API 5L X70	12	0,016	0
B-15	62,5	API 5L X70	12	0,013	6205,28
B-16	62,5	API 5L X70	12	0,013	0
B-17	62,5	API 5L X70	16	0,02	6205,28
B-18	62,5	API 5L X70	16	0,02	0
B-19	62,5	API 5L X70	16	0,017	6205,28
B-20	62,5	API 5L X70	16	0,017	0
B-21	62,5	API 5L X70	18	0,022	6205,28
B-22	62,5	API 5L X70	18	0,022	0
B-23	62,5	API 5L X70	18	0,019	6205,28
B-24	62,5	API 5L X70	18	0,019	0
C-1	100	API 5L X42	12	0,01	6205,28

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**

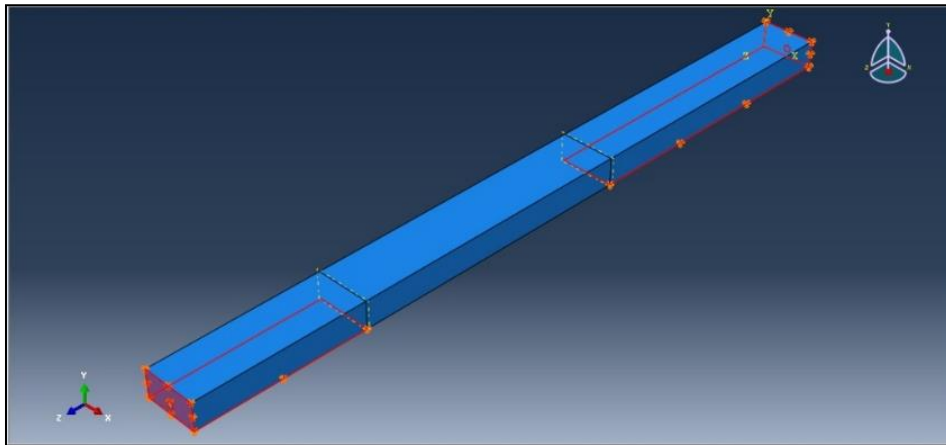
No. Modelo	Ancho de Deslizamiento (m)	Tipo de Acero	Diámetro Interno Tubería (")	Espesor (m)	Presión (kPa)
C-2	100	API 5L X42	12	0,01	0
C-3	100	API 5L X42	12	0,007	6205,28
C-4	100	API 5L X42	12	0,007	0
C-5	100	API 5L X42	16	0,013	6205,28
C-6	100	API 5L X42	16	0,013	0
C-7	100	API 5L X42	16	0,01	6205,28
C-8	100	API 5L X42	16	0,01	0
C-9	100	API 5L X42	18	0,015	6205,28
C-10	100	API 5L X42	18	0,015	0
C-11	100	API 5L X42	18	0,012	6205,28
C-12	100	API 5L X42	18	0,012	0
C-13	100	API 5L X70	12	0,016	6205,28
C-14	100	API 5L X70	12	0,016	0
C-15	100	API 5L X70	12	0,013	6205,28
C-16	100	API 5L X70	12	0,013	0
C-17	100	API 5L X70	16	0,02	6205,28
C-18	100	API 5L X70	16	0,02	0
C-19	100	API 5L X70	16	0,017	6205,28
C-20	100	API 5L X70	16	0,017	0
C-21	100	API 5L X70	18	0,022	6205,28
C-22	100	API 5L X70	18	0,022	0
C-23	100	API 5L X70	18	0,019	6205,28
C-24	100	API 5L X70	18	0,019	0
D-1	137,5	API 5L X42	12	0,01	6205,28
D-2	137,5	API 5L X42	12	0,01	0
D-3	137,5	API 5L X42	12	0,007	6205,28
D-4	137,5	API 5L X42	12	0,007	0
D-5	137,5	API 5L X42	16	0,013	6205,28
D-6	137,5	API 5L X42	16	0,013	0
D-7	137,5	API 5L X42	16	0,01	6205,28
D-8	137,5	API 5L X42	16	0,01	0
D-9	137,5	API 5L X42	18	0,015	6205,28
D-10	137,5	API 5L X42	18	0,015	0
D-11	137,5	API 5L X42	18	0,012	6205,28
D-12	137,5	API 5L X42	18	0,012	0
D-13	137,5	API 5L X70	12	0,016	6205,28
D-14	137,5	API 5L X70	12	0,016	0
D-15	137,5	API 5L X70	12	0,013	6205,28
D-16	137,5	API 5L X70	12	0,013	0
D-17	137,5	API 5L X70	16	0,02	6205,28
D-18	137,5	API 5L X70	16	0,02	0
D-19	137,5	API 5L X70	16	0,017	6205,28
D-20	137,5	API 5L X70	16	0,017	0

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**

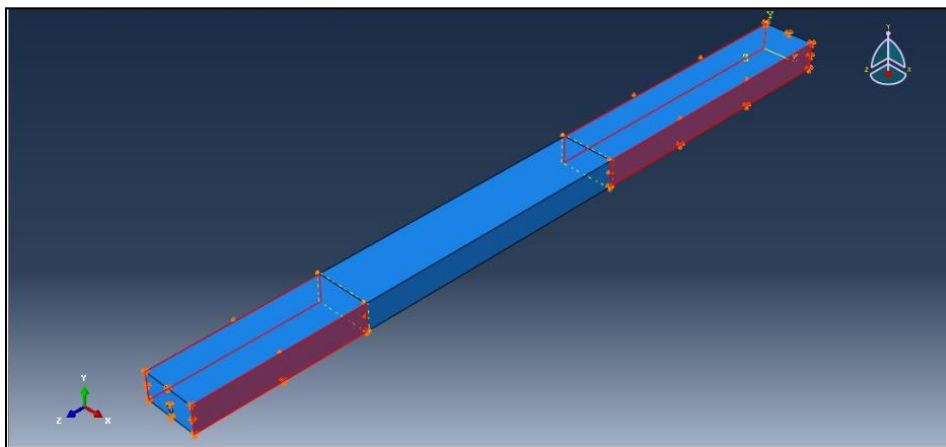
No. Modelo	Ancho de Deslizamiento (m)	Tipo de Acero	Diámetro Interno Tubería (")	Espesor (m)	Presión (kPa)
D-21	137,5	API 5L X70	18	0,022	6205,28
D-22	137,5	API 5L X70	18	0,022	0
D-23	137,5	API 5L X70	18	0,019	6205,28
D-24	137,5	API 5L X70	18	0,019	0

**3.3.3. Condiciones de frontera en el suelo**

Las restricciones en el bloque de suelo son aplicables a la zona estable, en primer lugar, se establece una restricción por desplazamiento en las tres direcciones para la base y la cara transversal (**Figura 24**) y en segundo lugar se establece una restricción por desplazamiento en dirección x en las caras posterior y anterior (**Figura 25**).



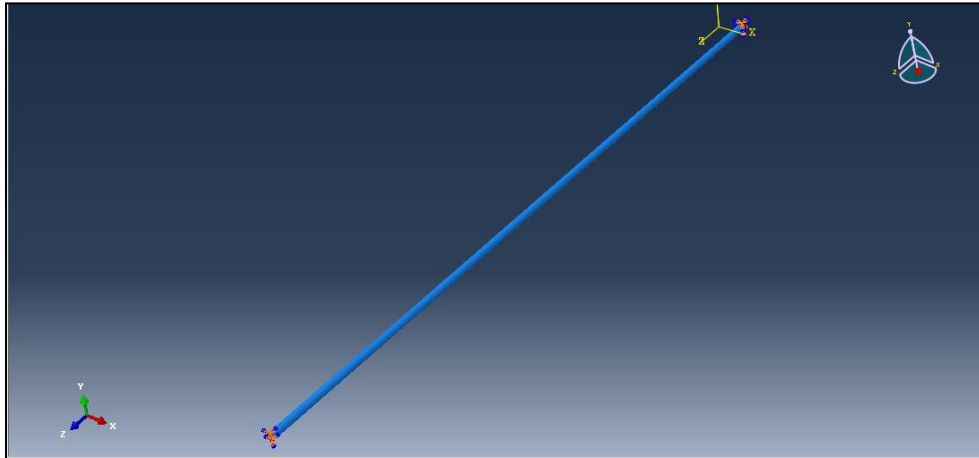
**Figura 24** Condición de restricción por desplazamiento en los tres ejes en la zona estable.



**Figura 25** Condición de restricción por desplazamiento en el eje x en la zona estable (cara posterior y anterior).

### 3.3.4. Condiciones de frontera en la tubería

En el caso de la tubería, la condición de restricción es de empotramiento, restringiendo así el desplazamiento y la rotación en las tres direcciones (**Figura 26**).



**Figura 26** Condición de restricción por desplazamiento y rotación en las tres direcciones para la tubería.

### 3.3.5. Contacto suelo – tubería

Dado que el problema planteado tiene involucrado dos superficies de materiales con características geomecánicas diferentes, es necesario incluir en el modelo numérico una formulación de contacto entre superficies que represente la interacción suelo-tubería, para esto se realizó una revisión bibliográfica, estableciendo las diferentes formulaciones que utilizaron varios autores así como la revisión al manual del software y su librería (Hibbit, Karlsson, and Soreson 2001).

Abaqus ofrece dos algoritmos para modelar un contacto, General Contact y Surface-to-Surface. Para este trabajo, se seleccionó el algoritmo Surface-to-Surface, que está basado en la definición de contacto entre una superficie maestra (master) y una superficie esclava (Slave), en la cual los nodos de las dos superficies en contacto se agrupan para formar la superficie dominante y la superficie dominada (**Figura 27**).

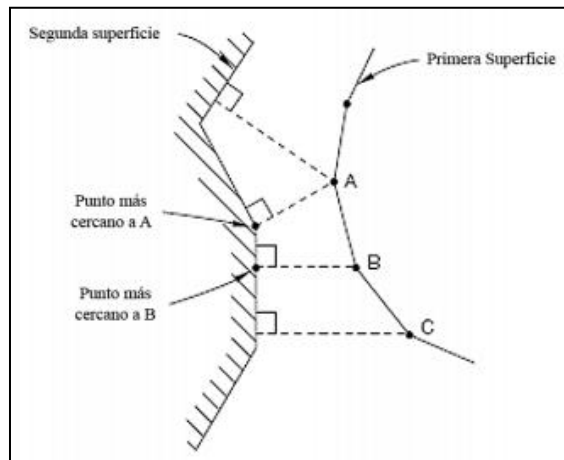
Después de escoger qué superficies serán las dominantes y las subordinadas, Abaqus determina la dirección de los esfuerzos normales y las restricciones de penetración basada en el tipo de superficie (Campos 2016). En este trabajo se



## Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide

### Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos

seleccionó el algoritmo superficie a superficie como modelo de contacto entre el suelo y la tubería.



**Figura 27** Representación gráfica del contacto superficie – superficie (Li and Wu 2017).

Para poder definir cuál superficie será la maestra y cual la esclava se debe tener en cuenta que los nodos de la superficie dominada deberá ser la superficie con mayor deformabilidad, la superficie dominante será definida como la superficie más rígida.

Abaqus cuenta con restricciones específicas para este tipo de contactos los cuales se citan a continuación.

- Los nodos de la superficie dominada no están permitidos penetrar la superficie dominante, sin embargo, la superficie dominante si puede penetrar la superficie dominada.
- La dirección del contacto es siempre perpendicular a la superficie dominante.
- Sólo la superficie dominante es usada como superficie, donde la geometría y dirección son tomadas en consideración. Los datos obtenidos de la superficie dominada están restringidos a los lugares de los nodos dominados y al área asociado a cada nodo.

A su vez el contacto Surface-to-Surface establece dos técnicas para la discretización de elementos, denominadas Nodo - Superficie y Superficie – Superficie, no obstante, y luego de realizar un análisis de modelado completo con cada una de las técnicas se tiene que la metodología Nodo - Superficie presenta

problemas de convergencia en el modelo asociados a problemas con las superficies normales discontinuas.

Por tanto se decidió trabajar con la técnica denominada superficie-superficie donde se debe tener como consideración especial un refinado en la malla de la superficie dominada, dado que este contacto realiza una integración sobre la región alrededor del nodo dominado, por tanto si el refinado de nodos del elemento dominante es mayor se acopla con los nodos dominados, en consideración a lo anterior se encuentra que la técnica reduce la probabilidad de penetraciones localizadas y la sensibilidad de resultados.

Dentro de la librería de Abaqus se puede realizar la aplicación de la restricción estricta, directa o Penalty; la restricción estricta utiliza el método de multiplicadores de Lagrange, no obstante, la misma realiza iteraciones Newton desafiantes para la convergencia del problema, la restricción directa también utiliza multiplicadores de Lagrange, pero los adicionan al sistema de ecuaciones por tanto su gasto computacional no es tan grande como el anterior.

La restricción Penalty se define como una aproximación rígida de un contacto duro, esta restricción mejora la tasa de convergencia, tiene un buen tratamiento de sobre restricciones y un mejor rendimiento de resolución de ecuaciones porque no hay multiplicador de Lagrange por grado de libertad a no ser que la rigidez de contacto sea muy alta, generando pequeñas cantidades de penetración (Campos 2016).

En este trabajo, las propiedades de contacto serán de comportamiento tangencial con una formulación de fricción del tipo Penalty. El coeficiente de fricción se determinó a partir de la siguiente expresión.

$$\mu = \tan \delta \text{ Ecuación 10}$$

Donde,

$$\delta = (0,5 - 1)\varphi \text{ Ecuación 11}$$

Los valores de  $\delta$  oscilan entre el 50% y el 100% del ángulo de fricción interna del suelo, según recomendaciones de la American Lifeline Alliance (ALA 2001). Con el objeto de ser conservadores y teniendo en cuenta que los efectos del carácter cohesivo del suelo no se tuvieron en cuenta en el modelo de contacto, se adoptó un valor de  $\delta$  de 75%, por lo que el coeficiente de fricción estará definido así.

$$\delta = (0.75) * 20^\circ = 15^\circ$$

$$\mu = \tan 15 = 0.26$$

### 3.3.6. Campo de desplazamientos

El campo de desplazamientos consiste en la representación del movimiento que se debe aplicar sobre la cara interna del bloque inestable del modelo para que el mismo, se desplace y deforme la tubería conforme al empuje aplicado.

De acuerdo con mediciones en tuberías de casos reales, así como la revisión de referencias bibliográficas se estableció que el campo de desplazamiento aplicable al modelo responde a una función polinomial de cuarto orden tal como se presenta a continuación.

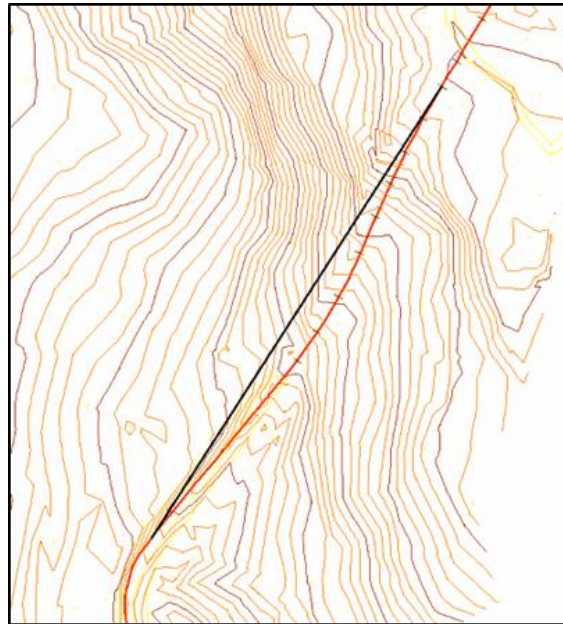
$$y = A + B * x + C * x^2 + D * x^3 + E * x^4 \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde x corresponde a la abscisa en la sección transversal del deslizamiento y, y corresponde al desplazamiento de la tubería en el punto x. Esta ecuación fue determinada con base en el estudio de Lizcano and Goldscheider (2004), quienes realizaron estudios experimentales en escala real y lograron establecer este tipo de comportamiento.

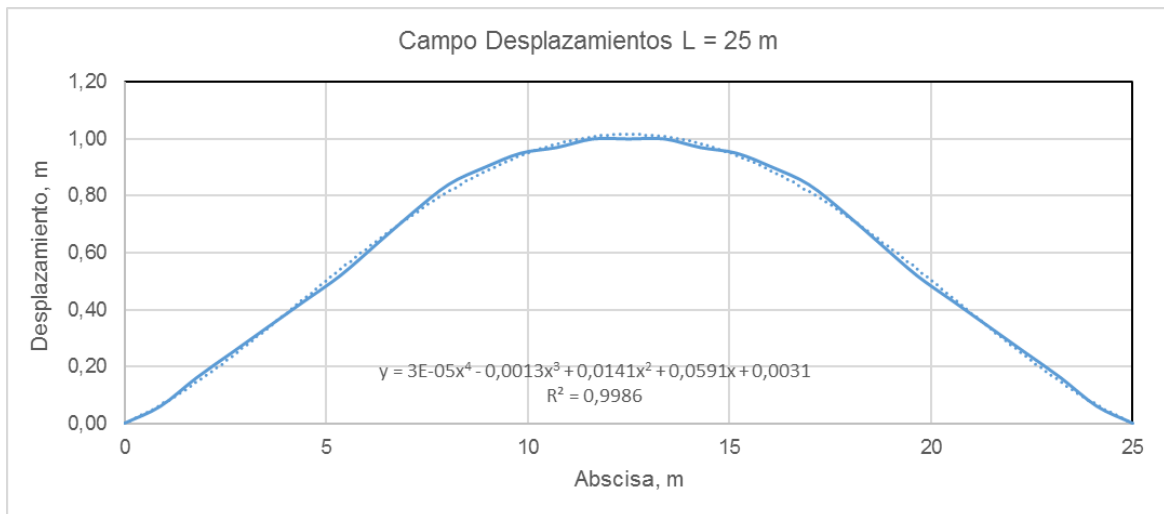
Para el presente estudio se realizó la revisión conforme a un caso real de un deslizamiento sobre una tubería alineada transversalmente con un ancho de zona inestable de 25 metros y otro con ancho de zona inestable de 100.

A partir de las mediciones de campo de las deformaciones de la tubería (**Figura 28**) se establecieron los campos de desplazamiento para los anchos de deslizamiento de 25 m y 100 m y a partir de estos se determinó en rangos medios los campos de desplazamiento para anchos de deslizamiento 62.5 m y 137.5 m tal como se aprecia en la **Figura 29, Figura 30, Figura 31 y Figura 32**.

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**

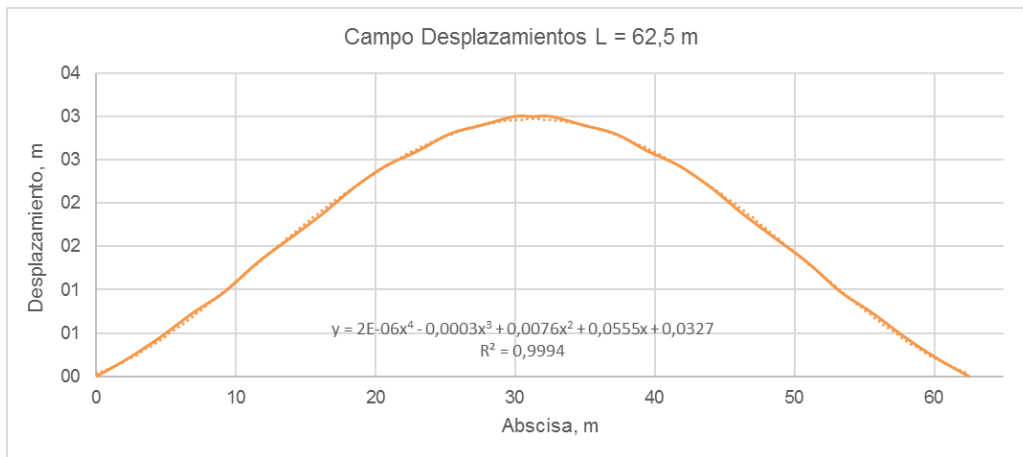


**Figura 28** Representación gráfica del desplazamiento de la tubería, en negro el trazado inicial de construcción y en naranja el desplazamiento de la tubería (Pereira 2009).

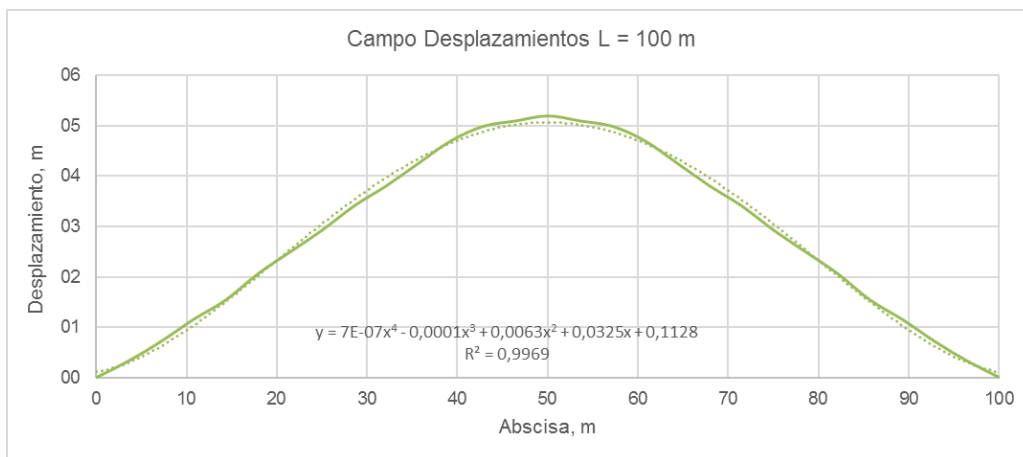


**Figura 29** Representación del campo de desplazamiento para ancho de deslizamiento de 25 m.

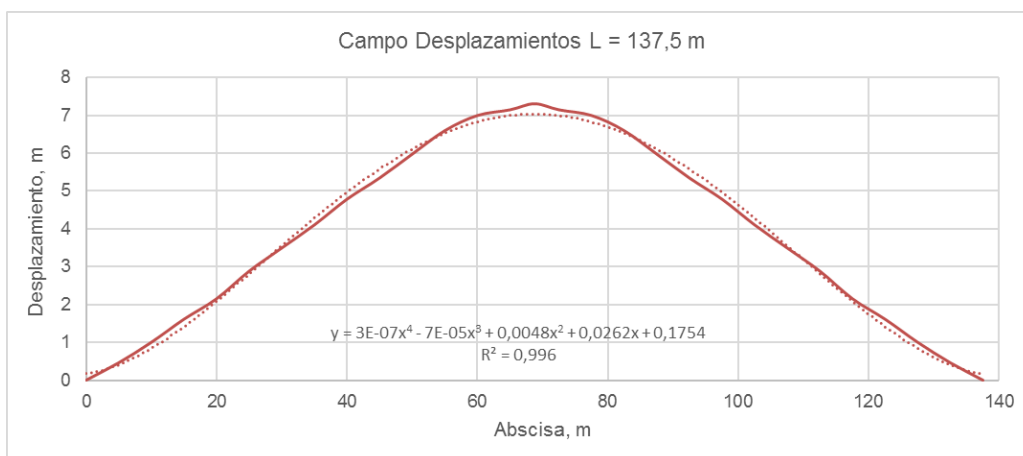
**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**



**Figura 30** Representación del campo de desplazamiento para ancho de deslizamiento de 62.5 m.



**Figura 31** Representación del campo de desplazamiento para ancho de deslizamiento de 100 m.



**Figura 32** Representación del campo de desplazamiento para ancho de deslizamiento de 137.5 m.

### 3.3.7. Enmallado

El principio básico de la modelación mediante elementos finitos consiste en la subdivisión de la geometría en nodos que permitan evaluar matemáticamente cada punto establecido, para ello el programa Abaqus, establece como paso fundamental el enmallado, el cual se aplica básicamente a la geometría establecida, para lo anterior y conforme a ser un paso fundamental dentro de la modelación se deben considerar una serie de pasos dado que el número de elementos, nodos y refinado de la misma puede precisar una mejor solución, no obstante se debe tener en cuenta que dependiendo del tipo de elementos a definir pueden tener una connotación importante en el tiempo computacional dado que el mismo tiende a aumentar.

Por tanto, para el presente trabajo se realizó un enmallado independiente con fines de discretizar por separados las superficies de contacto creando un refinado especial en la malla que envuelve la interacción de ambas superficies, donde se seleccionó una forma triangular (tetraedros 3D) en el elemento y una técnica libre donde las partes a refinar del suelo tuvieron que ser divididas y discretizadas por separado debido a la complejidad de la geometría, en la **Figura 33** se encuentran las formas de los elementos que permite realizar el programa Abaqus mientras que en la **Figura 34** y **Figura 35** se encuentra un ejemplo de la aplicación de la malla en una de las modelaciones para el suelo y la tubería respectivamente.

La asignación del tipo de elemento depende del problema planteado, en este caso se seleccionó el elemento (Stress 3D) que se define para el uso de elementos sólidos continuos, tridimensionales, tipo Brik de ocho nodos con integración reducida, los cuales se encuentran dentro de la biblioteca de Abaqus como C3D8R.

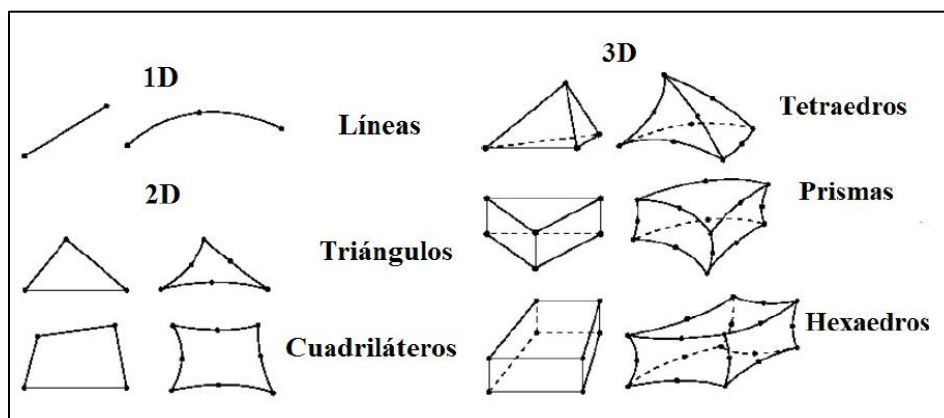
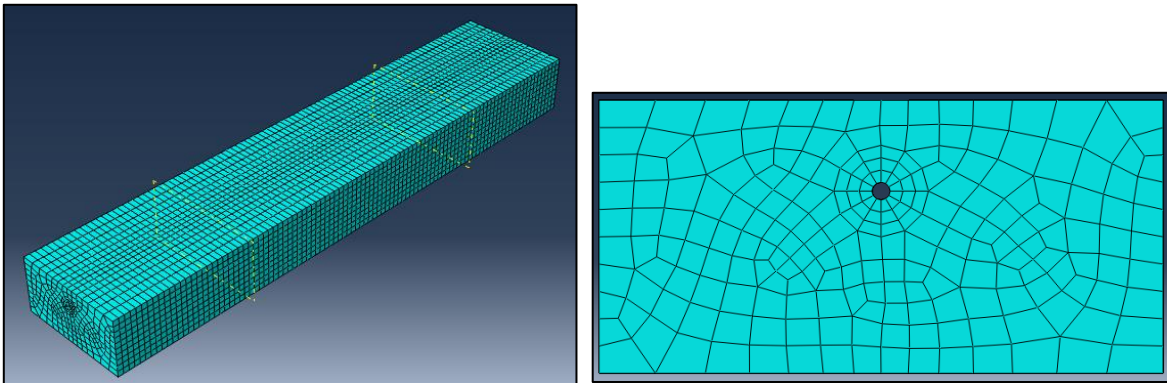
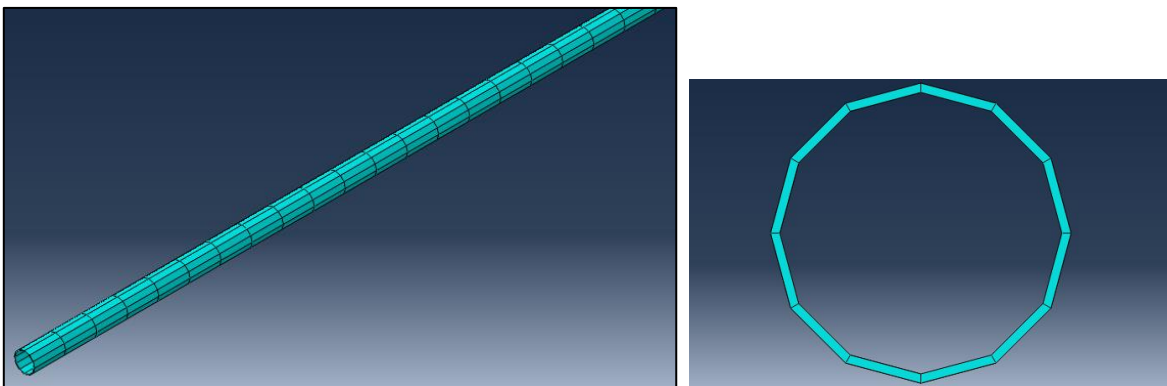


Figura 33 Formas de los elementos (Adoptado de Simulia,2002)

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos



**Figura 34** Representación del campo de desplazamiento para ancho de deslizamiento de 137.5 m.



**Figura 35** Representación del campo de desplazamiento para ancho de deslizamiento de 137.5 m.

Es importante mencionar que para la verificación de la malla el software Abaqus, cuenta con la opción verify mesh, que permite revisar la forma y número de nodos y elementos mediante datos estadísticos arrojando un porcentaje de advertencias o errores de la malla conforme a la angularidad y tamaño de los elementos.

Dicha verificación permite discretizar de forma precisa la interacción entre los elementos de cada modelo establecido, la anterior fue realizada en todas las modelaciones con fines de verificar que la discretización permitiera la interacción deseada entre el suelo y la tubería.

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la modelación numérica y el análisis de los mismos para cada uno de los escenarios considerados en este trabajo, producto de la combinación de todas las variables que se tuvieron en cuenta en la modelación numérica.

### 4.1. EVALUACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS Y DEFORMACIONES

En una primera etapa del análisis se evaluó el comportamiento de tuberías enterradas caracterizadas por tres diámetros, cada una con dos espesores y dos grados de acero diferentes, en estado de operación y sin presión; todo para un único tipo de suelo y en cuatro anchos de deslizamiento.

Con el fin de evaluar la variación de las deformaciones críticas respecto a los espesores y diámetros de la tubería, se estableció la relación entre el ancho del deslizamiento con la deformación crítica en la tubería. De forma similar se analizaron el ancho del deslizamiento con la deformación unitaria obtenida para cada deformación crítica.

A continuación, se presenta una descripción detallada de los resultados obtenidos a partir de cada evaluación considerada.

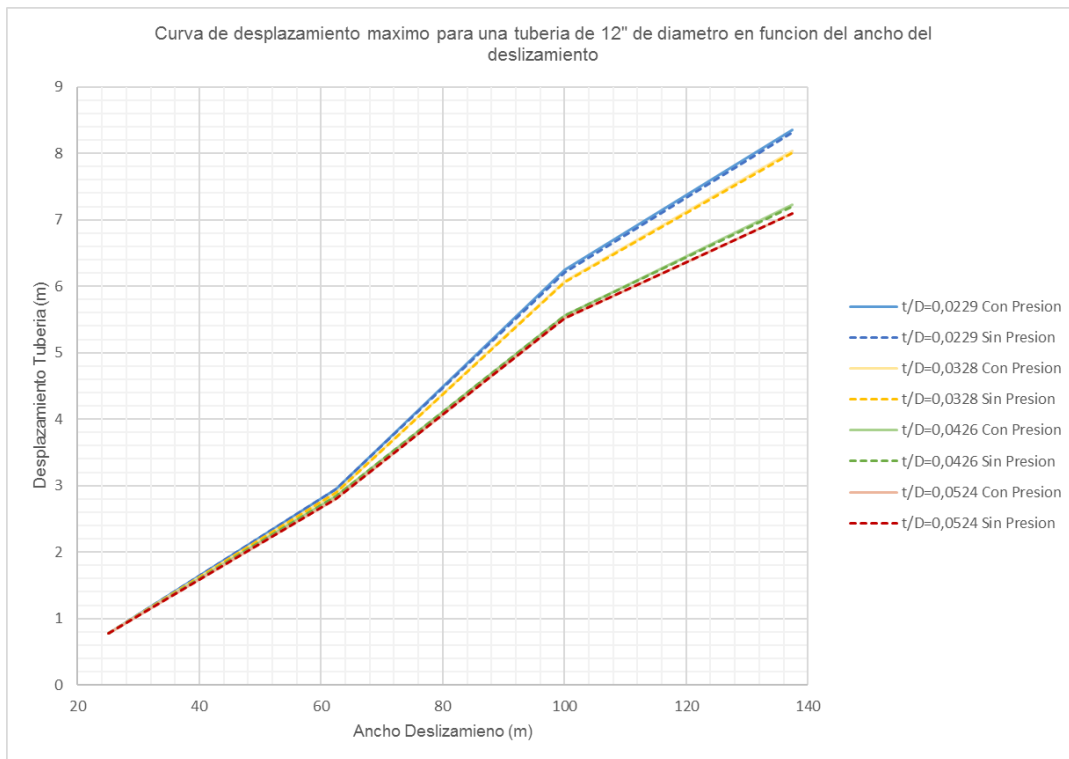
#### 4.1.1. Análisis ancho de deslizamiento vs deformación crítica

En la **Figura 36**, **Figura 37** y **Figura 38** se presentan los datos correspondientes a la deformación crítica (máximo desplazamiento de la tubería en la zona central de la parte inestable) en función del ancho del deslizamiento para diferentes relaciones de  $t/D$ , donde  $t$  corresponde al espesor de la tubería y  $D$  al diámetro de la tubería.

Para el caso de la tubería de diámetro 12" (**Figura 36**) se evidencian desplazamientos que varían desde 0.8 m hasta 8.4 m y que aumentan con el ancho del deslizamiento. Igualmente, se observa que la deformación crítica es una función inversa del diámetro de la tubería; en iguales circunstancias, la deformación crítica también se reduce al incrementar el espesor de la pared de la tubería. Esto indica que la deformación crítica es una función inversamente proporcional de la rigidez de la tubería; a mayor rigidez, menor será la deformación crítica.



## Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos



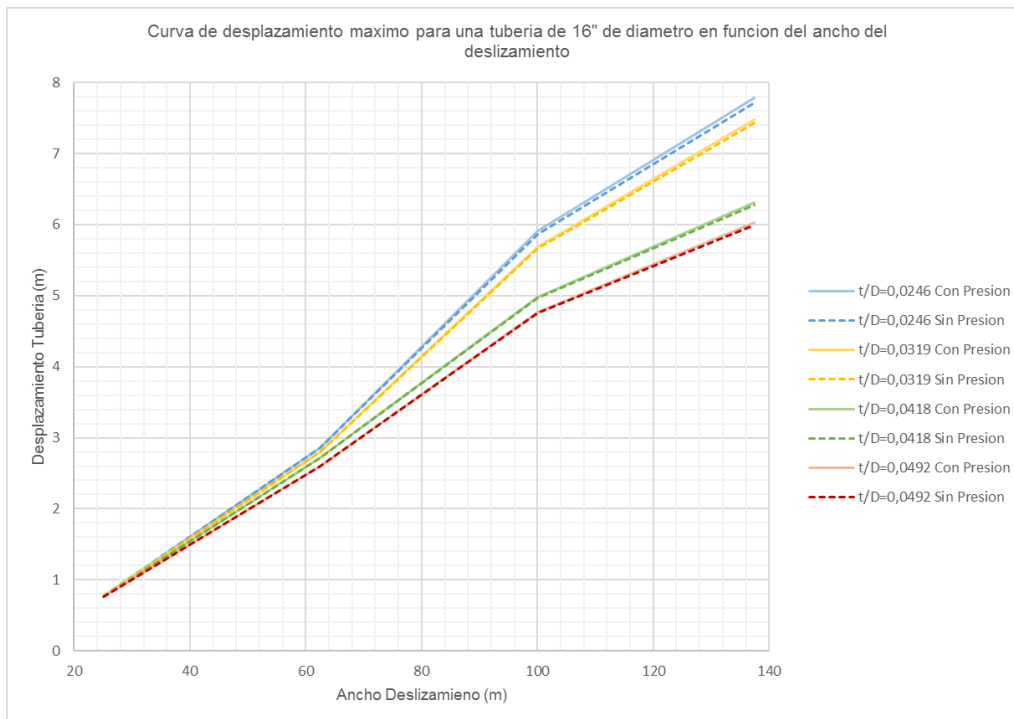
**Figura 36** Curva de desplazamiento máximo para una tubería de 12" de diámetro en función del ancho del deslizamiento para diferentes relaciones t/d.

Para el caso de la tubería de diámetro 16" (**Figura 37**) se evidencian desplazamientos que varían desde 0.8 m hasta 7.8 m y que son crecientes con el ancho del deslizamiento. En este caso se observa que los desplazamientos críticos para cualquier ancho de deslizamiento disminuyen con el aumento del diámetro y el espesor de la tubería debido al aumento en la rigidez de la misma.

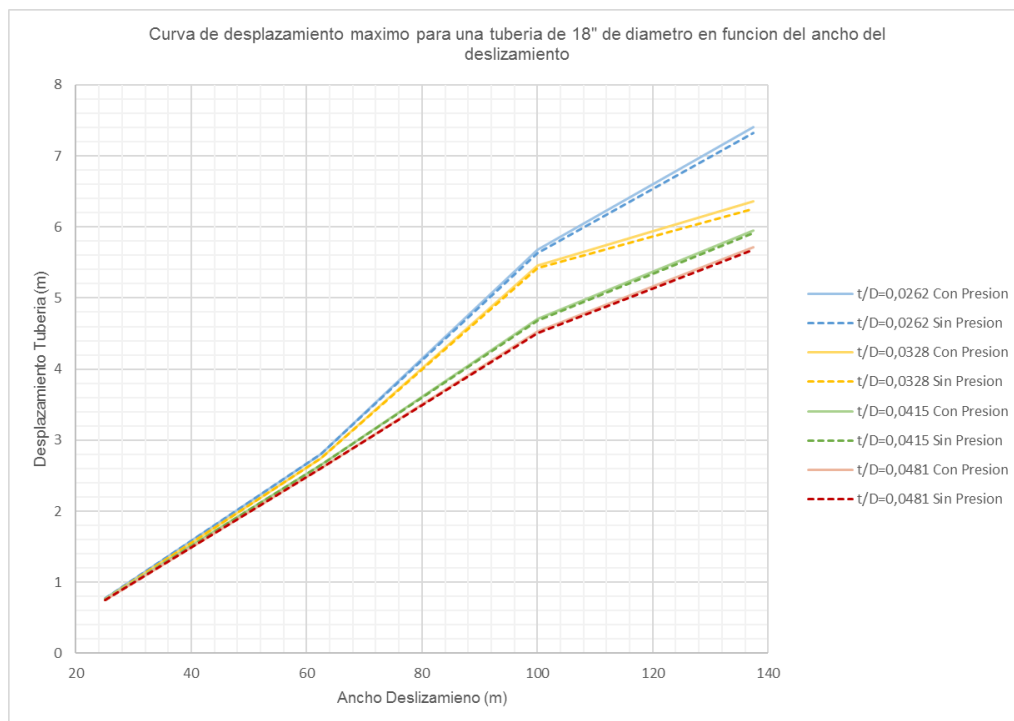
Una condición similar se evidencia en el caso de la tubería de diámetro 18" donde las deformaciones críticas para el caso del mayor ancho de deslizamiento evaluado (137.5 m) es de 7.4 m (**Figura 38**). De esta manera, se evidencia que en un aumento de 6" de diámetro y 1 cm de espesor de la tubería se logra disminuir los desplazamientos en esta hasta en 1 m para una misma condición de deslizamiento.

Igualmente, las curvas de desplazamiento crítico vs ancho de deslizamiento dejan ver que para anchos de deslizamiento hasta de 70 m, el comportamiento en términos de deformación no es variable para diferentes espesores de la tubería en un mismo diámetro de la misma.

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**



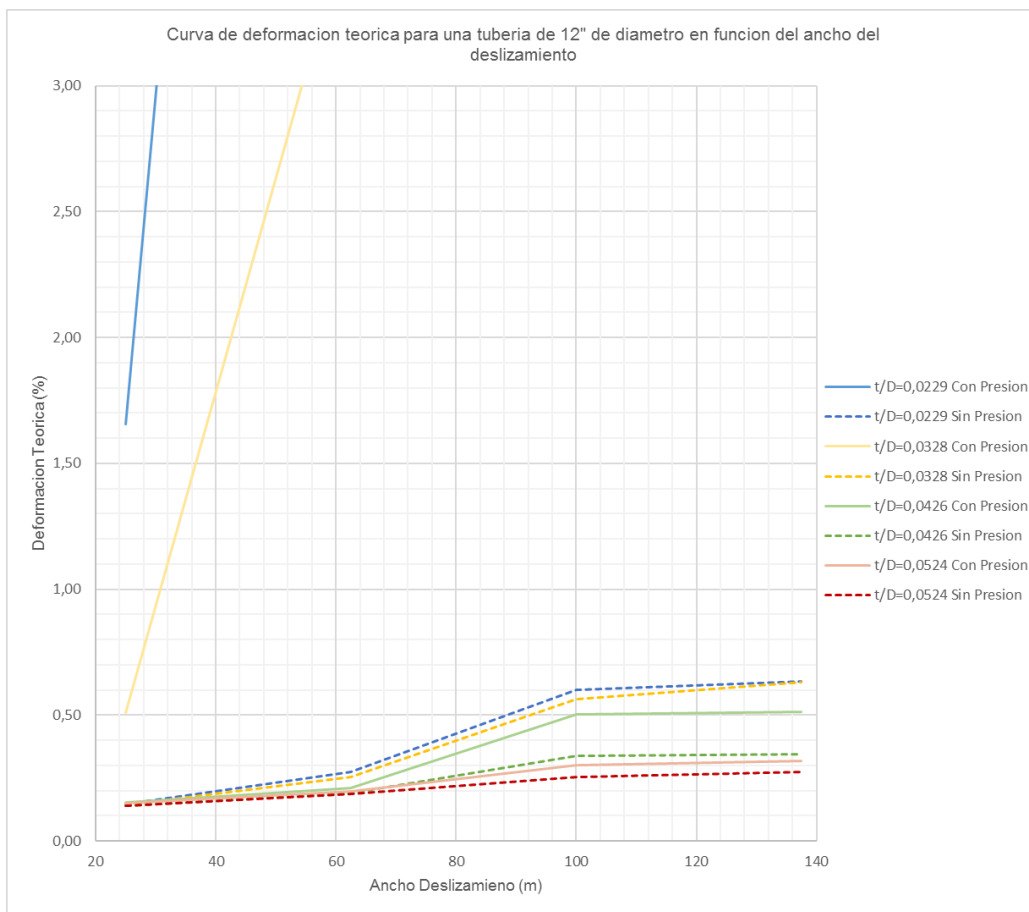
**Figura 37** Curva de desplazamiento máximo para una tubería de 16" de diámetro en función del ancho del deslizamiento.



**Figura 38** Curva de desplazamiento máximo para una tubería de 18" de diámetro en función del ancho del deslizamiento.

#### 4.1.2. Análisis ancho de deslizamiento vs deformación unitaria

De igual forma se realizó una evaluación de las deformaciones unitarias derivadas de los esfuerzos máximos producidos en la zona de mayor desplazamiento de la tubería. Estas deformaciones unitarias fueron determinadas a partir de la curva de esfuerzo-deformación que define el comportamiento de la tubería. En este caso, nuevamente se analizan los resultados para los tres diámetros y en función del ancho del deslizamiento para diferentes relaciones de  $t/D$ , donde  $t$  corresponde al espesor de la tubería y  $D$  al diámetro de la tubería (**Figura 39**, **Figura 40** y **Figura 41**).

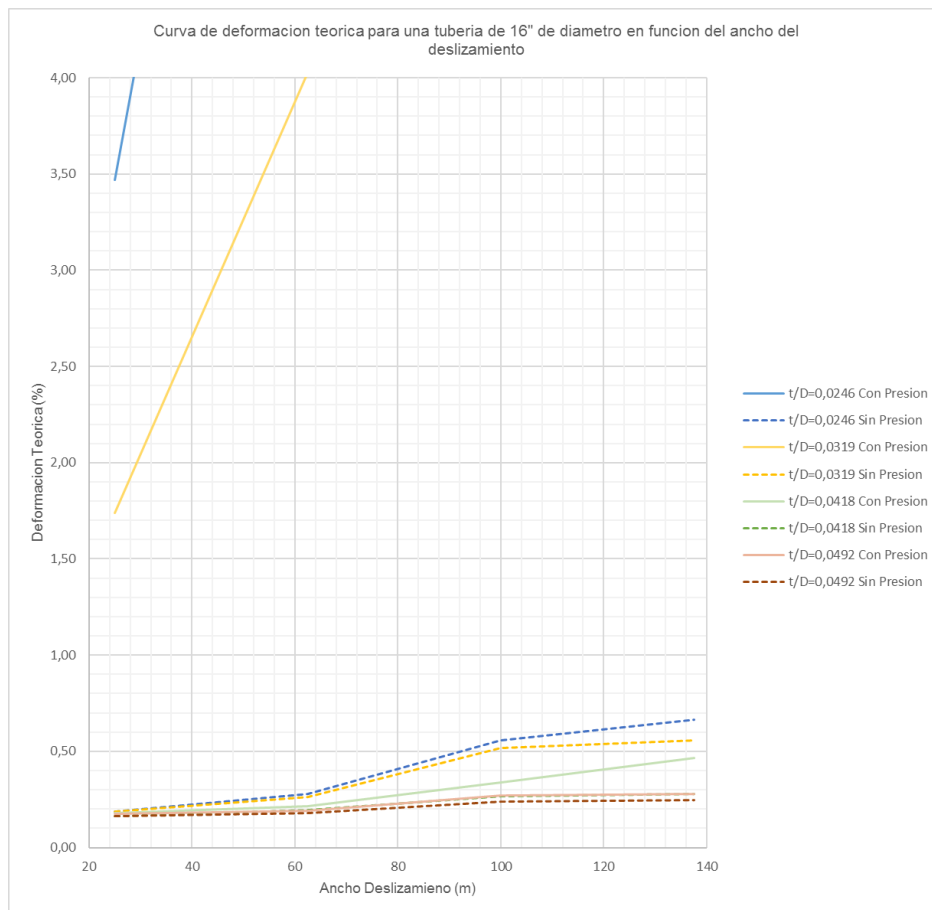


**Figura 39** Curva de deformación unitaria teórica para una tubería de 12" de diámetro en función del ancho del deslizamiento.

Al observar los resultados obtenidos para los tres diámetros se evidencia que dos 2 de las 8 curvas presentan deformaciones de gran magnitud, inclusive mayores a las permitidas por la normativa que rige los diseños de líneas de transporte de hidrocarburo y gas. Este comportamiento corresponde a la tubería de referencia API

## Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos

5L X42 en sus menores espesores para todos los diámetros, es decir, para las relaciones  $t/D$  más bajas.

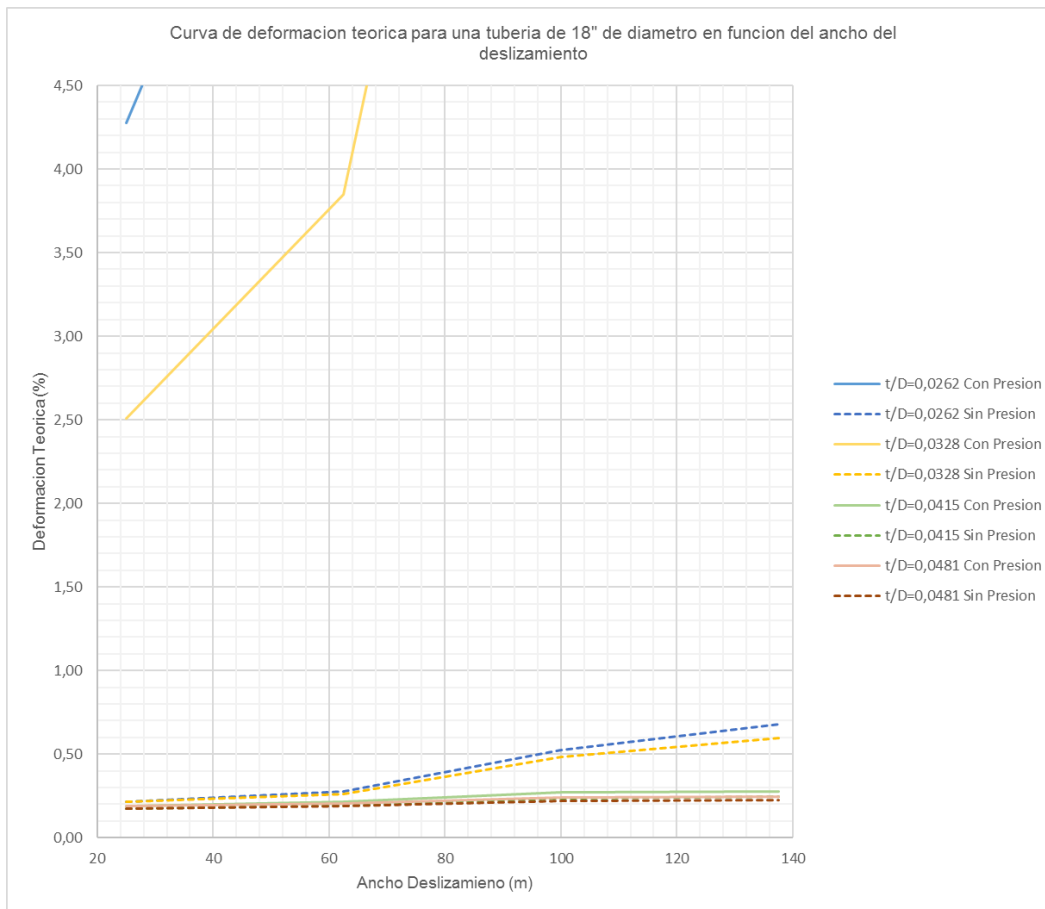


**Figura 40** Curva de deformación unitaria teórica para una tubería de 16" de diámetro en función del ancho del deslizamiento.

Tal como se dijo antes, esta tubería presenta un comportamiento muy dúctil y puede alcanzar grandes deformaciones a niveles bajos de esfuerzos; en relación con el ancho del deslizamiento, este comportamiento se evidencia inclusive para anchos de deslizamiento pequeños.

Por otra parte, se evidencia que para el resto de curvas de la tubería API 5L X42 las deformaciones unitarias no superan el 0,7%; por lo que en los dos primeros casos se esperan deformaciones que puedan alcanzar la rotura de la tubería mientras que en los dos casos restantes alcanzara deformaciones unitarias que generan fluencia a la tubería mas no rotura.

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**



**Figura 41** Curva de deformación unitaria teórica para una tubería de 18” de diámetro en función del ancho del deslizamiento.

En el caso de la tubería API 5L X70, las deformaciones unitarias máximas alcanzadas no superan el 0.5%, por lo que en ninguno de los casos (tres diámetros) se esperara rotura en la tubería, sin embargo para el caso de la tubería de diámetro de 12” y 16” las deformaciones unitarias pueden superar las deformaciones que generan fluencia en la tubería, caso contrario sucede en la tubería de diámetro de 18” donde las deformaciones unitarias no superan 0.25%, por debajo de las deformaciones que generan fluencia (0.33%).

En todo caso, se puede apreciar la gran importancia del espesor de la pared del tubo, pues las deformaciones unitarias se reducen con el incremento de dicho espesor. En este análisis no es posible ver una incidencia directa en las deformaciones unitarias debidas a la condición de presurización o no presurización de la tubería.

Con el fin de comparar los resultados obtenidos con las deformaciones unitarias a fluencia y a rotura de los aceros seleccionados para esta evaluación, se presentan en la **Tabla 10** los parámetros de referencia en cada caso.

**Tabla 10.** Deformaciones unitarias a fluencia y a rotura de los aceros considerados.

<b>GRADO DE ACERO</b>	<b>DEFORMACIÓN UNITARIA A FLUENCIA</b>	<b>DEFORMACIÓN UNITARIA A ROTURA</b>
X42	0.20%	3.00%
X70	0.33%	1.57%

## **4.2. CURVAS DE VULNERABILIDAD**

En la evaluación de vulnerabilidad de una tubería enterrada sometida a un deslizamiento, normalmente se dispone de información respecto a la geometría y propiedades de resistencia de la tubería, y a la geometría y magnitud del deslizamiento.

En este sentido, se generó un conjunto de gráficas que permitan evaluar la vulnerabilidad de una tubería enterrada, sometida a la acción de un deslizamiento, de manera que se ingresa en estas con datos de desplazamientos del deslizamiento o de la tubería y se puedan estimar porcentajes de vulnerabilidad.

Para esto se le asignó a la tubería un nivel de daño del 100% en rotura, aunque también se tuvo en cuenta el punto de fluencia del material como punto de daño materializado, en razón a que este punto condiciona el cambio en las propiedades del acero que compone la tubería.

Para establecer el nivel de daño de la tubería se tomó como porcentaje de daño de la tubería, el cociente del esfuerzo axial aplicado en un momento dado, sobre el esfuerzo a rotura del acero utilizado en su fabricación.

En el caso de la tubería de acero de grado 5L X42 en el cual se considera que alcanza la falla a tensión cuando ocurre una deformación unitaria axial de 3%, se tomó como esfuerzo de rotura el correspondiente a dicha deformación unitaria.

En este sentido, el análisis de vulnerabilidad se realiza en dos puntos críticos de la tubería identificados durante el análisis de los resultados de la modelación numérica, el primero correspondiente al centro de la tubería en el tramo inestable, punto en el cual se presentan esfuerzos de tensión importantes en la tubería por ser el mayor punto de desplazamiento.

El segundo correspondiente a los flancos del deslizamiento donde la tubería tiene una condición de transición entre la zona inestable y estable y en la cual se pueden llegar a presentar esfuerzos importantes de compresión y tensión.

La construcción de las curvas se realizó para una tubería de grado de acero y espesor determinada, evaluando la vulnerabilidad por los esfuerzos predominantes en el centro del deslizamiento y en el flanco del deslizamiento, para diferentes anchos de deslizamiento y en cada caso, considerando la tubería en estado presurizado y sin presión.

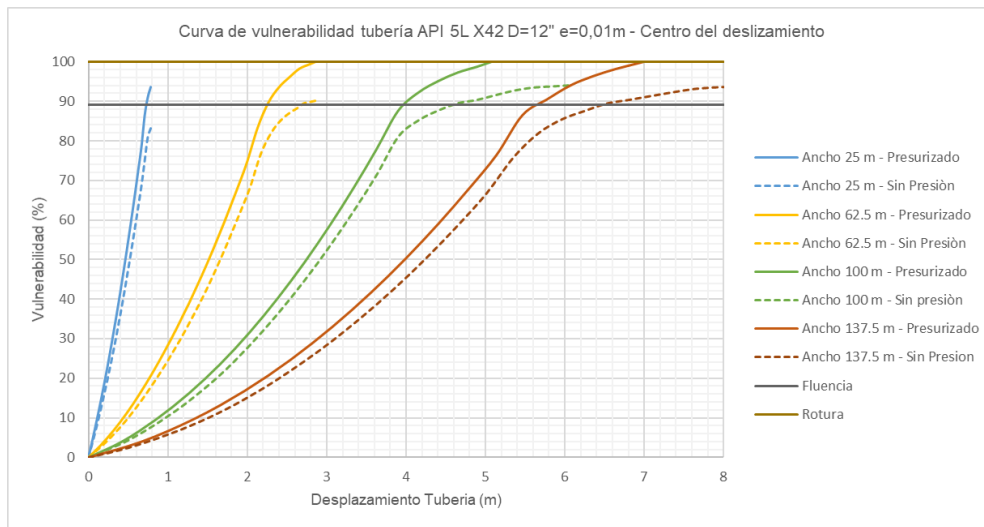
De igual forma, se han establecido en las gráficas los niveles de vulnerabilidad que corresponden al límite teórico de fluencia y al límite de rotura de acuerdo con cada tipo de tubería, esto con el fin de identificar los diferentes niveles de daño que se pueden presentar en la tubería cuando se somete a una condición de esfuerzos generada por el desplazamiento del terreno en el cual se encuentra enterrada.

El análisis de vulnerabilidad se presenta para la tubería en el centro del deslizamiento y en los flancos del mismo, por cuanto en estas zonas se da la mayor concentración de esfuerzos en tensión y compresión, sin embargo, en ambos casos, la vulnerabilidad se asocia al mayor desplazamiento que tiene la tubería en el centro del deslizamiento, esto en razón a que por lo general estos desplazamientos son fácilmente medibles en campo o mediante la corrida de herramienta inteligente en la tubería.

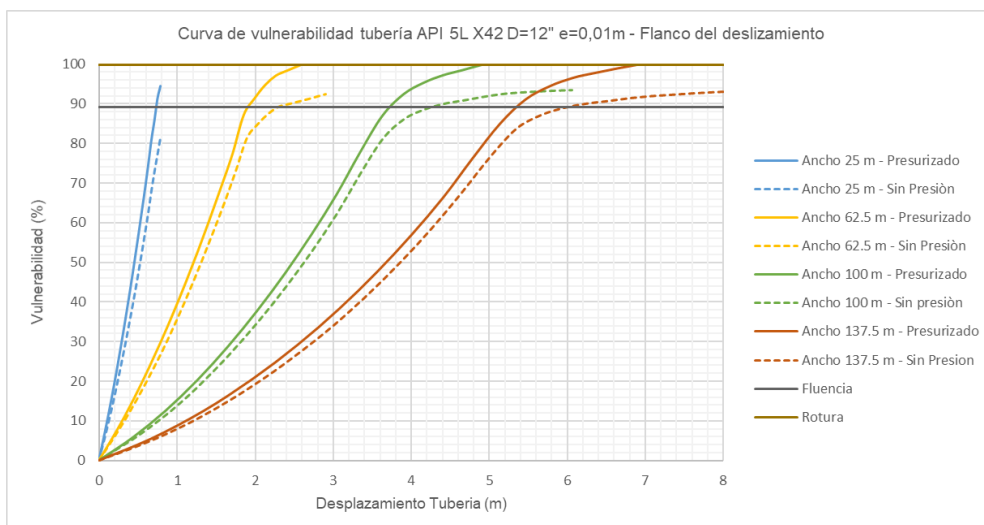
#### **4.2.1. Tubería API 5L X42 D=12" e=0,01 m**

En este caso se observa que para el ancho más pequeño de deslizamiento (25 m) la vulnerabilidad solo supera el límite de fluencia para el mayor desplazamiento producido, en los demás casos los niveles de vulnerabilidad llegan al 100%, es decir, se pueden esperar roturas, además de pérdidas de espesor por fluencia del material. Igualmente se observa que las tuberías en estado presurizado presentan una mayor vulnerabilidad ante un deslizamiento, por cuanto son estas las que alcanzan los niveles de vulnerabilidad del 100% (**Figura 42** y **Figura 43**).

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**



**Figura 42** Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X42 D=12" e=0,01 m, en el centro del deslizamiento.



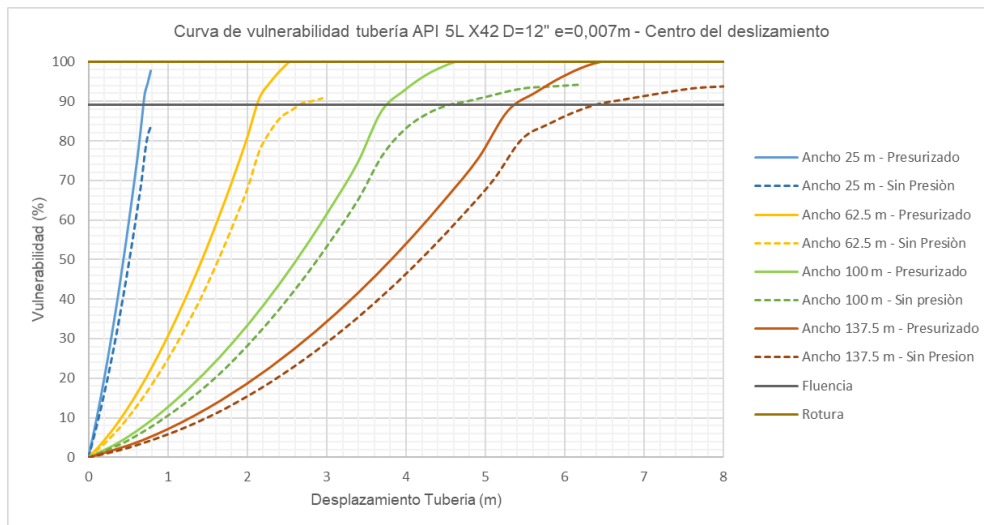
**Figura 43** Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X42 D=12" e=0,01 m, en el flanco del deslizamiento.

**4.2.2. Tubería API 5L X42 D=12" e=0,007 m**

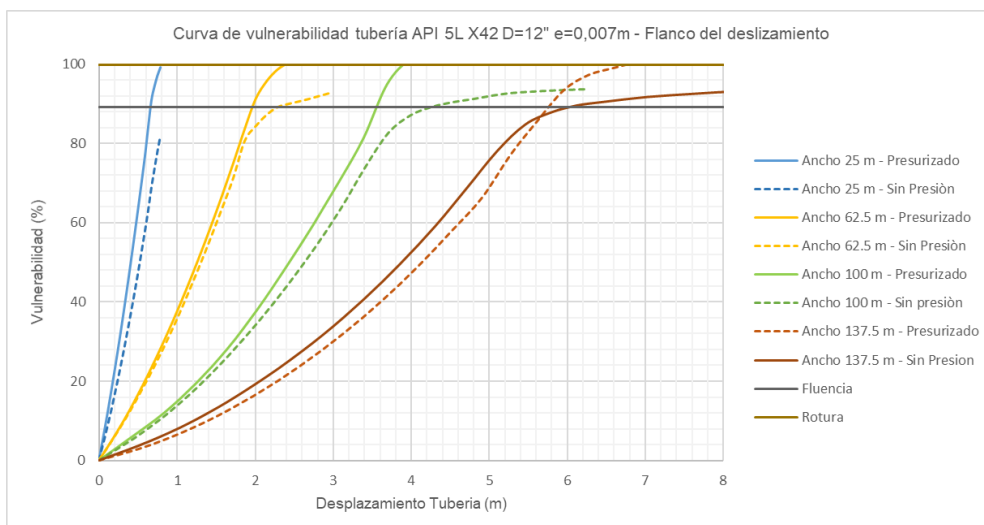
En este caso, donde se presenta la misma tubería que el caso anterior, pero con un espesor menor, se evidencia una tendencia similar, aunque en mayor severidad. Para el ancho más pequeño de deslizamiento (25 m) la vulnerabilidad alcanza 98%, es decir, se acerca a la rotura; en los demás anchos de deslizamiento, los niveles de vulnerabilidad llegan al 100% para la condición de tubería presurizada y superan el nivel de vulnerabilidad de fluencia para la condición de tubería sin presurizar (**Figura 44** y **Figura 45**).



**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**



**Figura 44** Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X42 D=12" e=0,007 m, en el centro del deslizamiento.

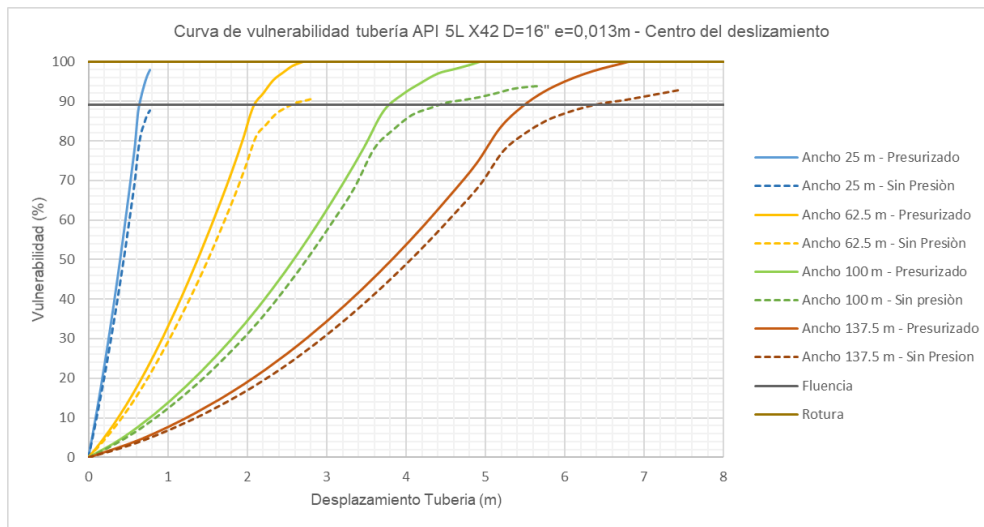


**Figura 45** Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X42 D=12" e=0,007 m, en el flanco del deslizamiento.

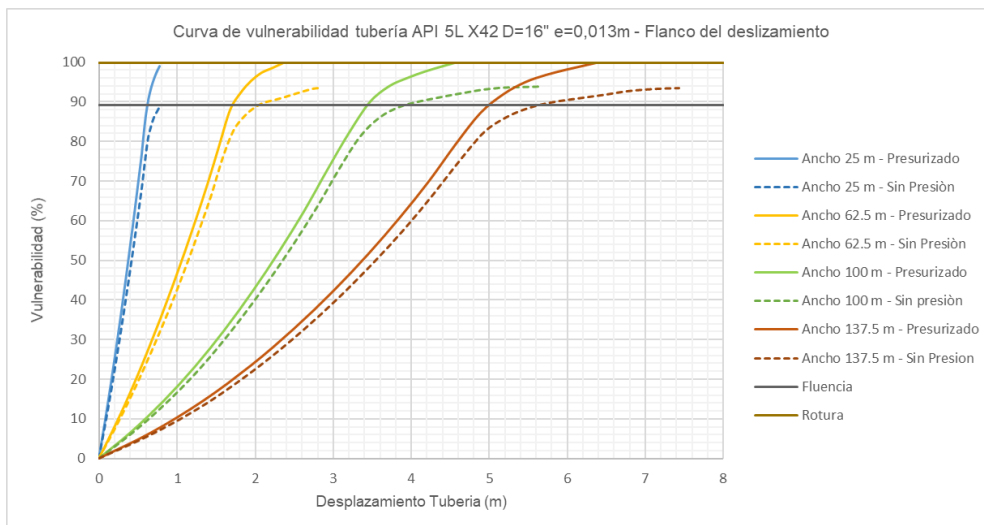
**4.2.3. Tubería API 5L X42 D=16" e=0,013 m**

Para este caso, donde la tubería sigue siendo la misma que en los casos anteriores, pero en mayor diámetro y mayor espesor, se observa un comportamiento similar en la respuesta de la tubería. La tubería en estado presurizado alcanza niveles de vulnerabilidad del 100% para anchos de deslizamiento mayores a 62.5 m mientras que sin presión alcanza niveles de vulnerabilidad que superan el límite de fluencia, excepto en el ancho de deslizamiento de 25 m donde no se llega a este límite (Figura 46 y Figura 47).

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**



**Figura 46** Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X42 D=16" e=0,013 m, en el centro del deslizamiento.

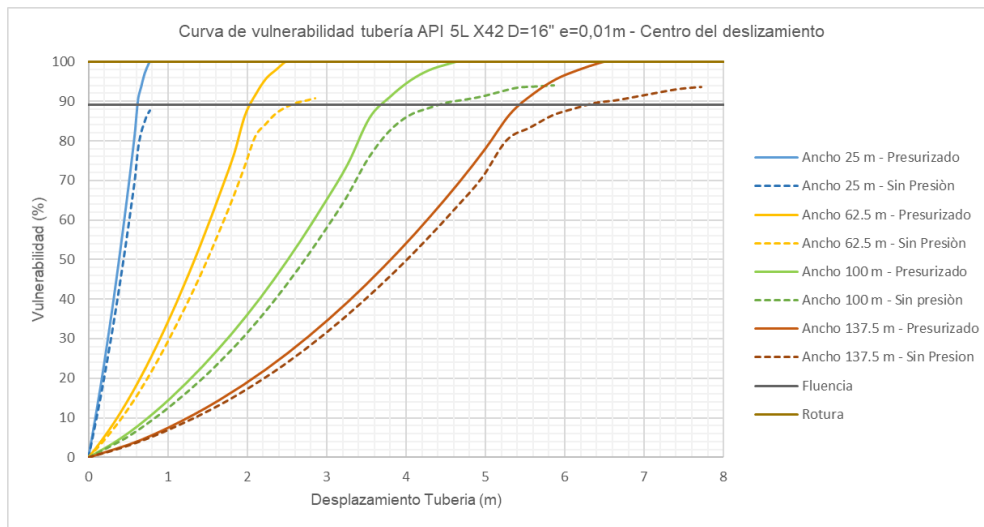


**Figura 47** Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X42 D=16" e=0,013 m, en el flanco del deslizamiento.

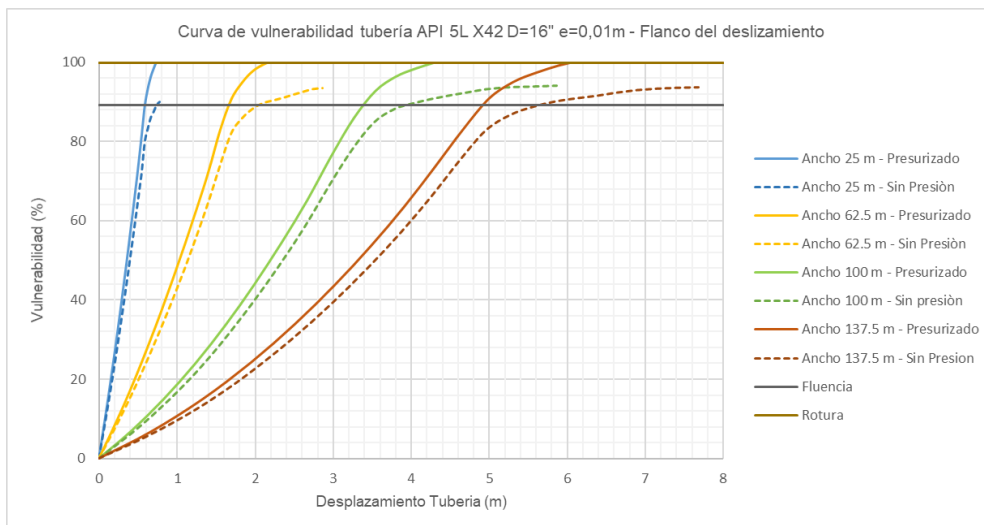
**4.2.4. Tubería API 5L X42 D=16" e=0,01 m**

En este caso, donde hay pérdida de espesor de la tubería, se alcanzan niveles de vulnerabilidad de 100% en todos los anchos de deslizamiento para la tubería en estado presurizado tanto en el centro del deslizamiento como en los flancos. La tubería sin presión presenta niveles de vulnerabilidad por encima del límite de fluencia para todos los anchos de deslizamiento en ambos escenarios, excepto para el ancho de 25 m en el centro de deslizamiento (**Figura 48** y **Figura 49**).

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**



**Figura 48** Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X42 D=16" e=0,01 m, en el centro del deslizamiento.

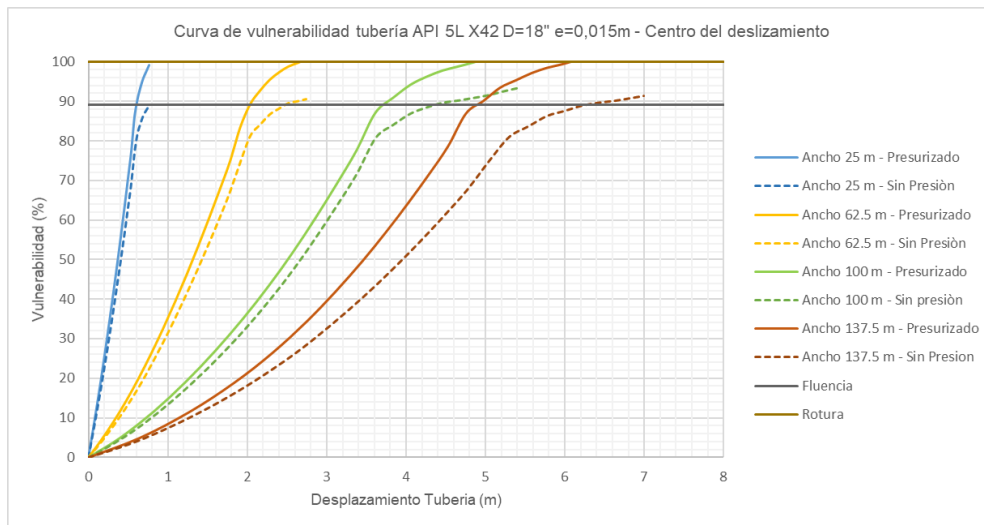


**Figura 49** Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X42 D=16" e=0,01 m, en el flanco del deslizamiento.

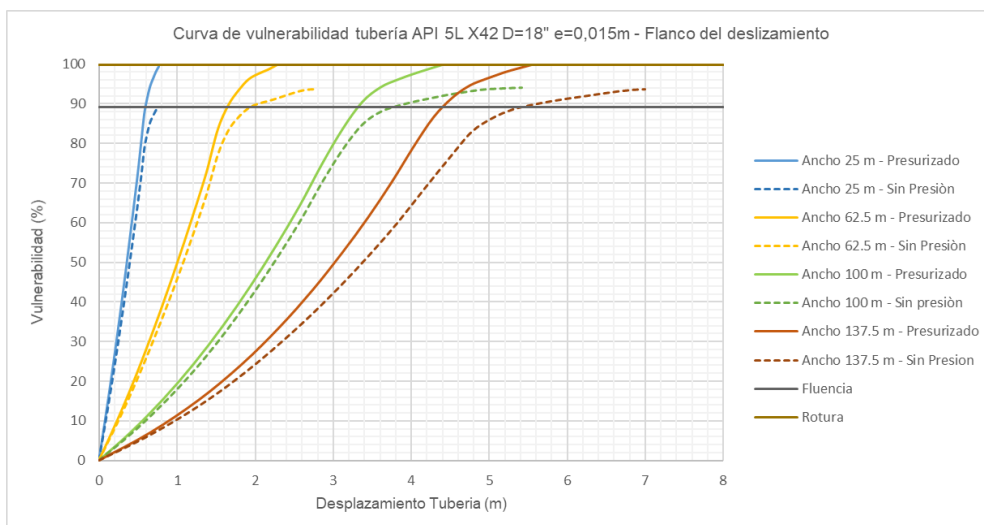
**4.2.5. Tubería API 5L X42 D=18" e=0,015 m**

Para una tubería de 18" de diámetro se evidencia una respuesta similar a los diámetros de 12" y 16", persiste la condición de vulnerabilidad hasta del 100% en la tubería presurizada y condición de vulnerabilidad por arriba del límite de fluencia, pero sin llegar a rotura para la tubería sin presión. Tanto en el centro del deslizamiento como en el flanco se evidencian condiciones de vulnerabilidad similares, dada la similitud en las magnitudes de esfuerzos de tensión que se alcanzan en estas dos zonas de la tubería (**Figura 50** y **Figura 51**).

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**



**Figura 50** Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X42 D=18" e=0,015 m, en el centro del deslizamiento.

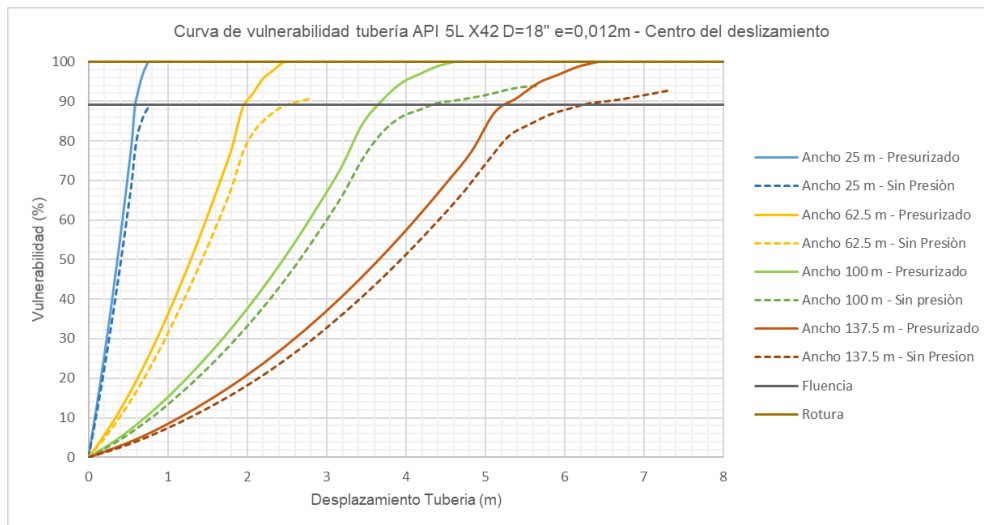


**Figura 51** Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X42 D=18" e=0,015 m, en el flanco del deslizamiento.

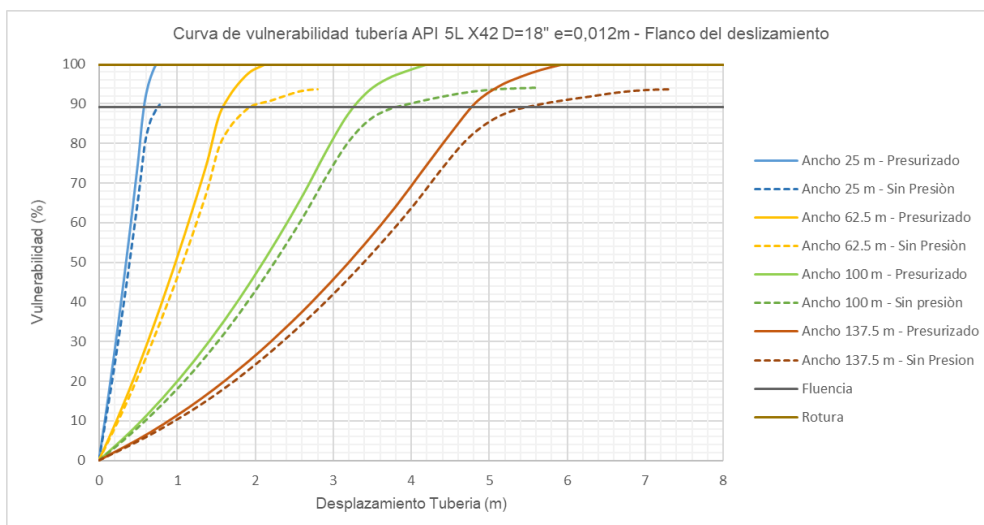
**4.2.6. Tubería API 5L X42 D=18" e=0,012 m**

Al disminuir el espesor de la tubería y conservar el diámetro y tipo de acero de la misma se observa que los niveles de vulnerabilidad se mantienen con relación al caso anterior, aunque se presentan mayores desplazamientos en la tubería; en ambos escenarios la tubería alcanza niveles de vulnerabilidad de rotura para tubería presurizada y niveles de vulnerabilidad cercanos al límite de fluencia para tuberías sin presión (**Figura 52** y **Figura 53**).

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**



**Figura 52** Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X42 D=18" e=0,012 m, en el centro del deslizamiento.



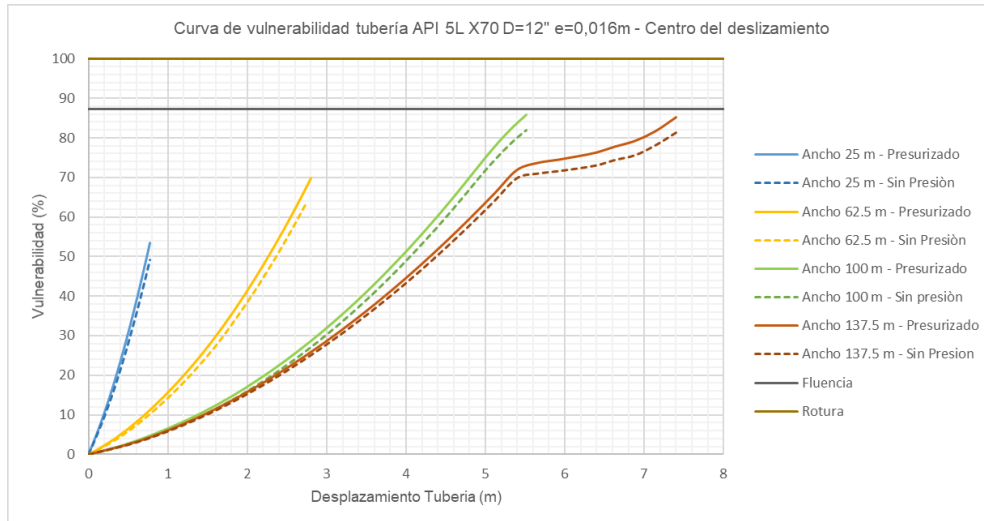
**Figura 53** Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X42 D=18" e=0,012 m, en el flanco del deslizamiento.

**4.2.7. Tubería API 5L X70 D=12" e=0,016 m**

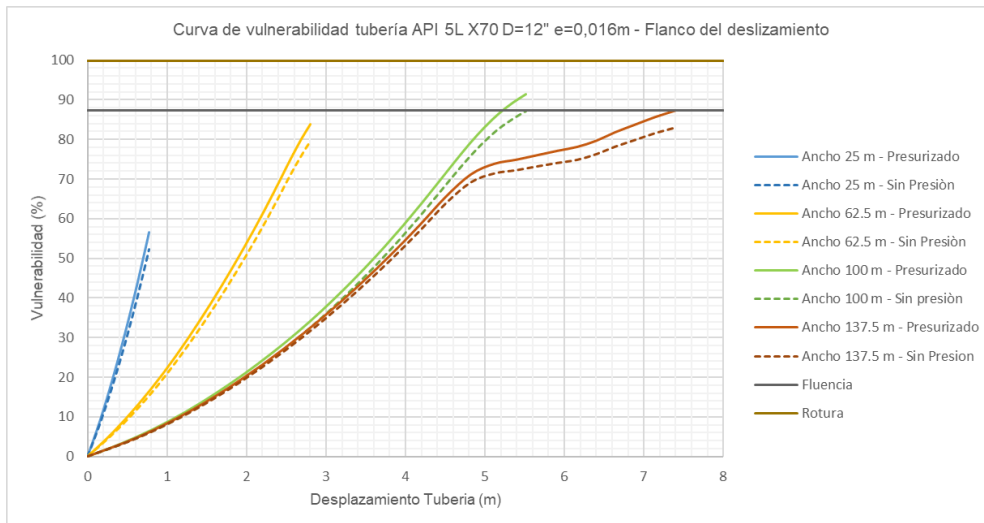
Al evaluar una tubería de mayor grado de acero, para los mismos diámetros y manteniendo los órdenes de magnitud de espesores, se evidencia una respuesta diferente con relación a la otra tubería evaluada. En este caso se observa que en el centro del deslizamiento no se presentan niveles de vulnerabilidad que alcancen el límite de fluencia ni tampoco la rotura del material. Sin embargo, en este caso hay una diferencia más marcada en la respuesta de la tubería en el centro del deslizamiento y en el flanco de la misma, existiendo en este último mayores

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**

esfuerzos y por tanto mayor vulnerabilidad a tasas de desplazamiento similares (Figura 54 y Figura 55).



**Figura 54** Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X70 D=12" e=0,016 m, en el centro del deslizamiento.



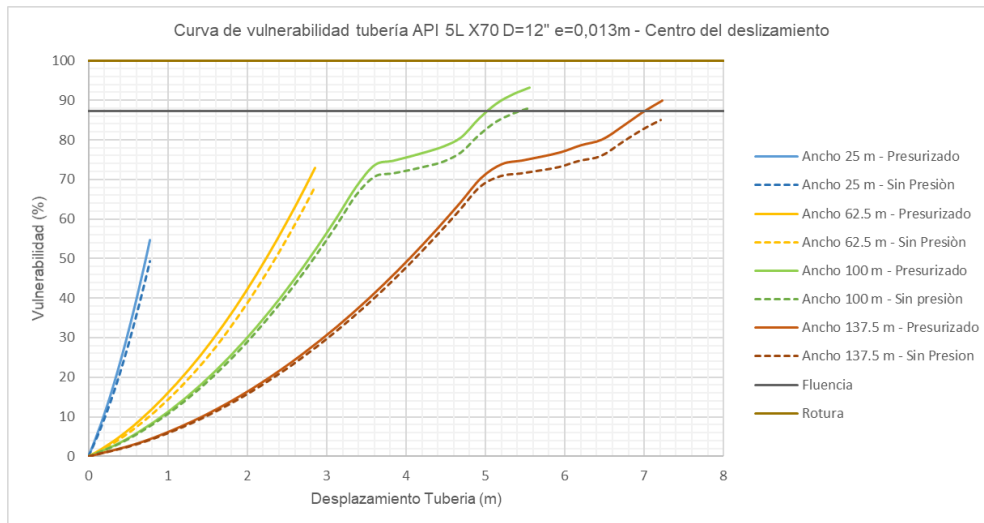
**Figura 55** Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X70 D=12" e=0,016 m, en el flanco del deslizamiento.

**4.2.8. Tubería API 5L X70 D=12" e=0,013 m**

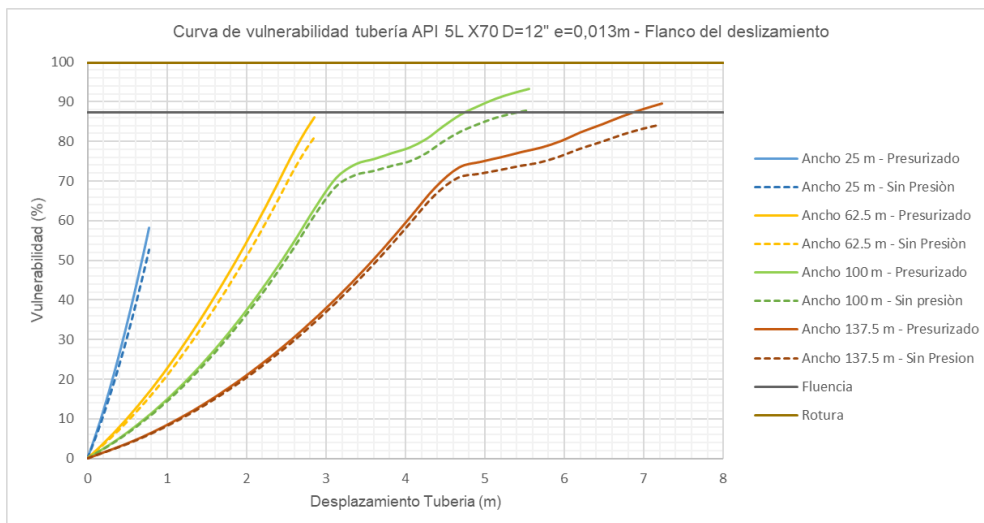
En este caso, al disminuir el espesor de la pared de la tubería y manteniendo el diámetro, se puede observar que la condición de vulnerabilidad cambia considerablemente, para anchos de deslizamiento mayores a 100 m se empiezan a ver niveles de vulnerabilidad que pasan el límite de fluencia del material y que

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**

aumentan en la zona del flanco del deslizamiento con respecto al centro del mismo (Figura 56 y Figura 57).



**Figura 56** Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X70 D=12" e=0,013 m, en el centro del deslizamiento.



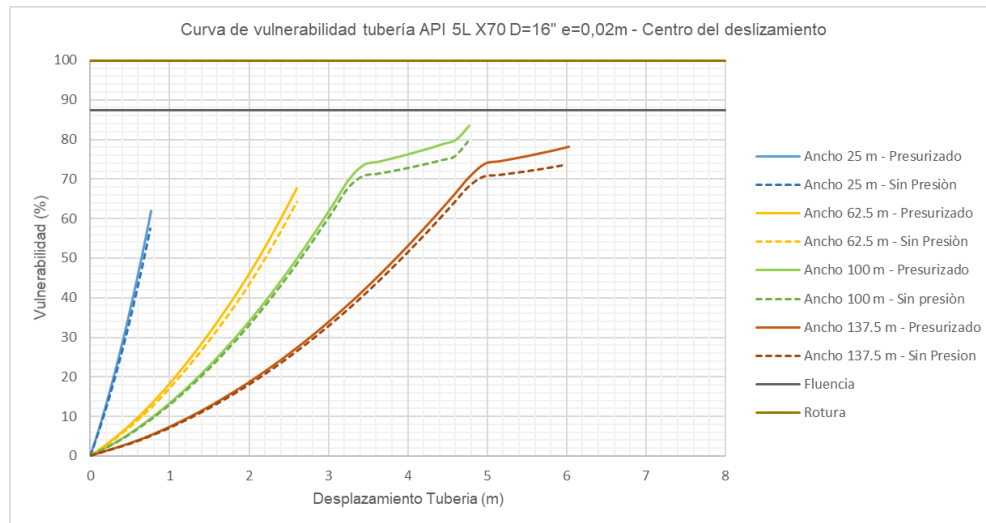
**Figura 57** Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X70 D=12" e=0,013 m, en el flanco del deslizamiento.

**4.2.9. Tubería API 5L X70 D=16" e=0,02 m**

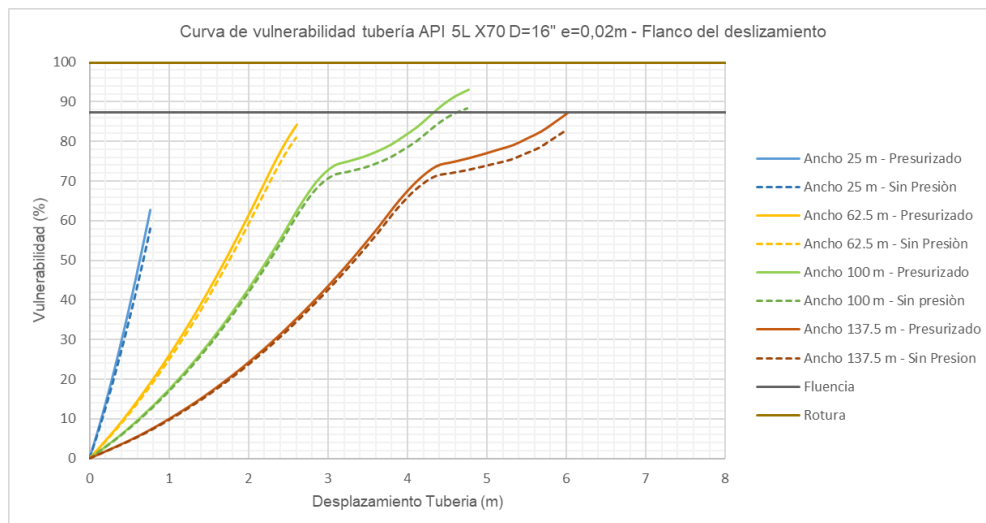
Para este caso, donde se aumenta tanto el diámetro de la tubería como el espesor de la misma, es claro ver que el aumento en la rigidez hace que la capacidad de respuesta aumente considerablemente, los niveles de vulnerabilidad son menores a los alcanzados para la tubería de 12" y tampoco alcanzan el límite de fluencia en

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**

el centro del deslizamiento, si lo hace en los flancos para anchos de deslizamiento mayores a 100 m (**Figura 58** y **Figura 59**).



**Figura 58** Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X70 D=16" e=0,02 m, en el centro del deslizamiento.



**Figura 59** Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X70 D=16" e=0,02 m, en el flanco del deslizamiento.

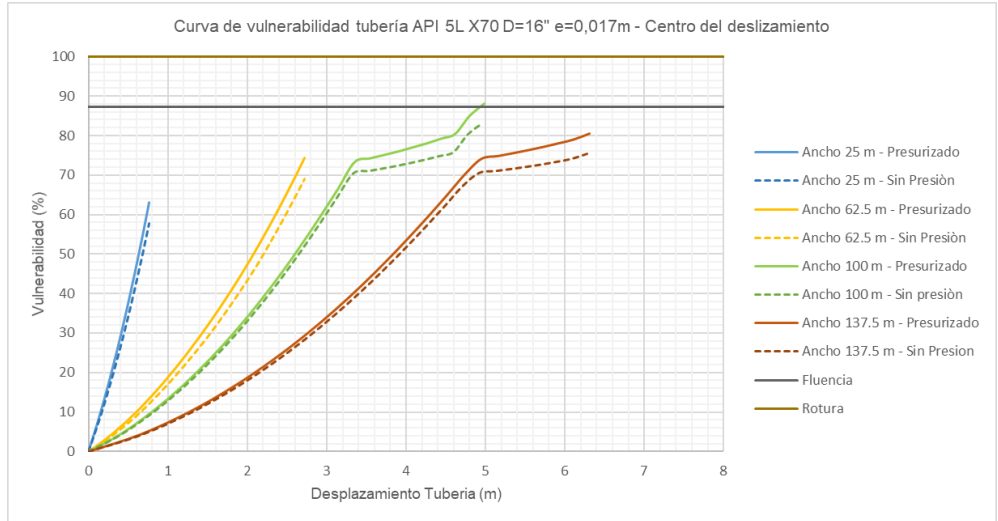
**4.2.10. Tubería API 5L X70 D=16" e=0,017 m**

Para este mismo caso, pero con un espesor menor de la tubería, se observa que la capacidad de respuesta de la tubería disminuye y se empieza a notar como el comportamiento de la tubería es similar para anchos mayores a 100 m. En la zona de flanco de deslizamiento se alcanzan niveles de vulnerabilidad que superan el

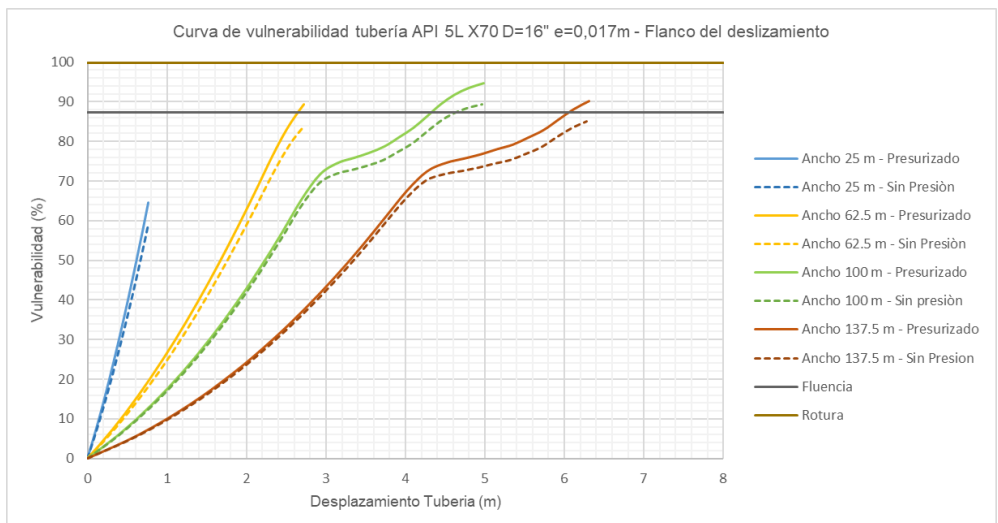


**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**

límite de fluencia teórico, inclusive para deslizamiento de 62.5 m de ancho mientras que en el centro del deslizamiento nunca se logra esta condición (**Figura 60** y **Figura 61**).



**Figura 60** Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X70 D=16" e=0,017 m, en el centro del deslizamiento.



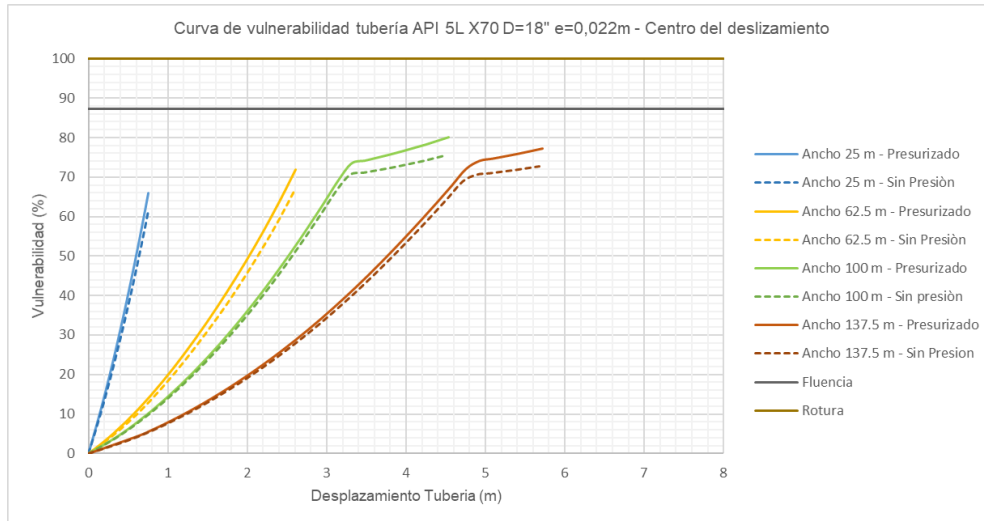
**Figura 61** Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X70 D=16" e=0,017 m, en el flanco del deslizamiento.

**4.2.11. Tubería API 5L X70 D=18" e=0,022 m**

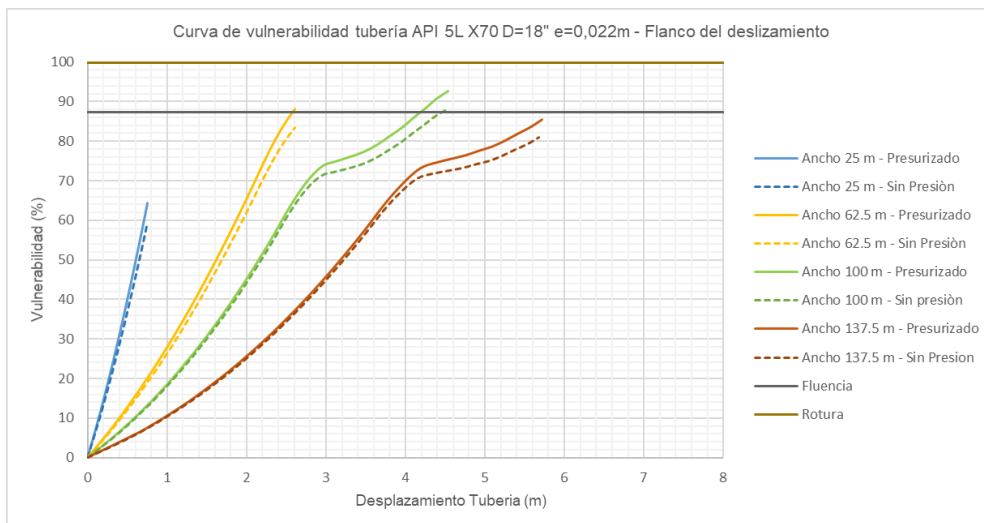
En este último caso, donde la tubería presenta el mayor diámetro y el mayor espesor, se aprecia que la capacidad de respuesta del material es el mejor por cuanto se alcanzan niveles de vulnerabilidad muy por debajo del límite de fluencia

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**

en el caso del centro del deslizamiento, en el caso de los flancos del deslizamiento, apenas se aproximan los niveles de vulnerabilidad máximos al límite de fluencia por cuanto no se esperan mayores afectaciones bajo esta condición (**Figura 62** y **Figura 63**).



**Figura 62** Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X70 D=18" e=0,022 m, en el centro del deslizamiento.



**Figura 63** Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X70 D=18" e=0,022 m, en el flanco del deslizamiento.

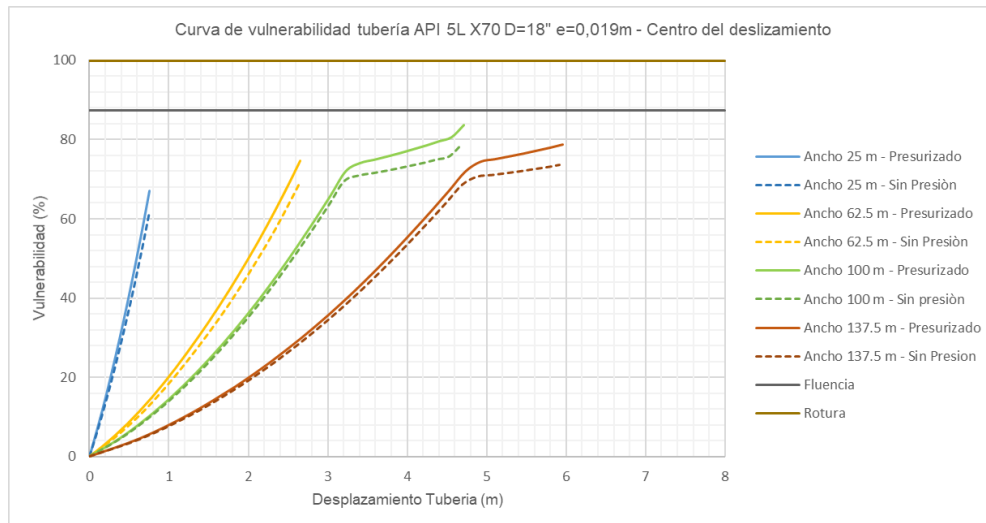
**4.2.12. Tubería API 5L X70 D=18" e=0,019 m**

Al disminuir el espesor de la pared de la tubería, se evidencia especialmente en la zona de los flancos del deslizamiento que la capacidad de respuesta de la tubería

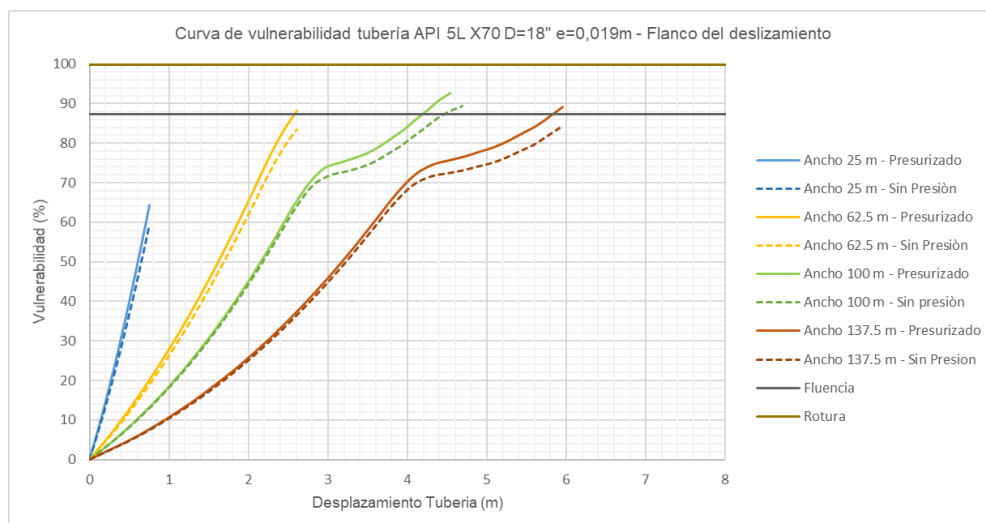
## Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide

### Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos

disminuye, generando condiciones de vulnerabilidad para los mayores desplazamientos de la tubería que logran sobrepasar el límite de fluencia del material. En el centro del deslizamiento los niveles de vulnerabilidad se mantienen similares a los encontrados en el anterior caso y en ningún ancho de deslizamiento se alcanza el límite de rotura (**Figura 64** y **Figura 65**).



**Figura 64** Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X70 D=18" e=0,019 m, en el centro del deslizamiento.



**Figura 65** Curva de vulnerabilidad tubería API 5L X70 D=18" e=0,019 m, en el flanco del deslizamiento.

Una vez presentadas y analizadas la totalidad de las curvas generadas tras la modelación numérica de los diferentes escenarios considerados en este trabajo, se presentan los siguientes comentarios generales.

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**

A mayor anchura de deslizamiento, mayores son las deformaciones que debe alcanzar la tubería para llegar a un mismo porcentaje de daño.

La vulnerabilidad a fluencia corresponde a un 89% del esfuerzo a rotura en el acero grado X42, un 87% del esfuerzo último del acero grado X70.

Al comparar el comportamiento de tuberías enterradas para las anchuras de deslizamiento extremas incluidas en el presente análisis: 30 y 137.5 m, se encontró que las deformaciones que debe sufrir la tubería para alcanzar niveles de rotura y aún niveles de fluencia de los diferentes aceros considerados son mayores a las causadas por un solo evento, por lo que se puede deducir que una tubería enterrada rara vez falla como consecuencia de un solo deslizamiento. Sus propiedades de resistencia le permiten aguantar varios movimientos en el tiempo, antes de llegar a la falla total.

Al incrementar el espesor de la pared del tubo crece la rigidez del mismo, y se reduce el desplazamiento que puede experimentar para una misma condición de deslizamiento, este parámetro es uno de los más influyentes en la capacidad de respuesta de la tubería por cuanto muestra mayores bondades en términos de esfuerzos y deformaciones y por tanto puede constituir como una alternativa para aumentar el factor de seguridad ante la incertidumbre de daño mecánico en la tubería en sitios de alta complejidad geotécnica.

Se observa una capacidad de respuesta diferente en tuberías de acero API 5L X42 con respecto a tuberías de acero API 5L X70, en el primer caso, la ductilidad de este acero hace que el comportamiento sea similar en los diferentes anchos de deslizamiento evaluados y para los diferentes diámetros y espesores, alcanzando deformaciones unitarias mayores a las permitidas por la normativa de diseño de tuberías. En el segundo caso, se evidencia un comportamiento más dependiente de la rigidez del material, en este caso el espesor de la pared de la tubería es el factor de mayor influencia en la respuesta del material.

La vulnerabilidad de una tubería fabricada en acero grado X70 es inferior a la de tuberías de características similares que estén fabricadas en aceros grado X42, por cuanto el rango de deformaciones elásticas de este tipo de acero es mayor que el de los otros aceros. Esto hace que una tubería fabricada en acero grado X70 pueda volver a su condición inicial desde desplazamientos totales mayores que si hubiera sido hecha con acero grado X42.

### 4.3. TIPO Y NIVELES DE DAÑO

En términos de daño en la tubería y de acuerdo con los resultados obtenidos, es posible establecer en términos de vulnerabilidad de la tubería, niveles de daño que pueden responder a acciones de intervención; a continuación, se realiza una clasificación de estos niveles de daño (**Tabla 11**).

**Tabla 11.** Tipo y niveles de daño establecidos para una tubería de acero.

<b>Nivel de Daño</b>	<b>Vulnerabilidad</b>	<b>Acción a Implementar</b>
Nulo	0% - 10%	Ninguna
Bajo	11% - 25%	Monitoreo visual
Medio	26% - 50%	Monitoreo instrumentado
Severo	51% - 70%	Alivio de esfuerzos
Muy Severo	>70%	Cambio de tubería

Estos niveles de daño y su relación con la vulnerabilidad de la tubería serán aplicables únicamente para tuberías en tramos rectos con los diámetros y espesores considerados en este trabajo e involucradas en un proceso de inestabilidad cuyo sentido de movimiento se de en sentido perpendicular al alineamiento de la tubería.

### 4.4. PROCEDIMIENTO PRÁCTICO PARA LA UTILIZACIÓN DE LOS RESULTADOS

Las Curvas de vulnerabilidad junto con las correspondientes curvas de los desplazamientos máximos que pueden realizar la tubería en función del ancho del deslizamiento, permiten adelantar evaluaciones de vulnerabilidad, partiendo de información conocida conformada por parámetros geométricos y de resistencia de la tubería. Las gráficas también permiten realizar los siguientes estimativos:

Cálculo rápido de los desplazamientos que se deben presentar en sentido perpendicular al eje para que el acero de fabricación de la tubería alcance fluencia y posteriormente rotura.

Un nivel de daño de la tubería a partir de mediciones de desplazamientos de la tubería y por tanto del deslizamiento.

El porcentaje de vulnerabilidad en el que se encuentre una tubería, con base en los desplazamientos de ésta en sentido perpendicular a su eje. Dependiendo del rango de desplazamientos en que se encuentre la tubería con respecto a los requeridos por el material de fabricación para alcanzar rotura, se podrá determinar el nivel de

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**

daño permanente en el cual se encuentra en ese momento la tubería, para tomar decisiones y establecer planes de acción a seguir.

El procedimiento de utilización de las gráficas se resume a continuación.

Conocidos el diámetro y el espesor de pared de una tubería afectada por un deslizamiento y el estado de presión, se selecciona una de las curvas disponibles en este documento en las que se relaciona el desplazamiento de la tubería con el porcentaje de vulnerabilidad

A partir de la medida del desplazamiento de la tubería en sentido perpendicular al sentido de movimiento del deslizamiento, se ingresa a la curva seleccionada con este valor y se avanza hacia la curva del ancho de deslizamiento seleccionado, estimando el porcentaje de vulnerabilidad que presente la tubería para esa condición de desplazamiento.

## **5. CONCLUSIONES**

Se concluye que la deformación crítica es una función decreciente del diámetro de la tubería; y que la misma se reduce al incrementar el espesor de la pared de la tubería. Esto indica que la deformación crítica es una función inversamente proporcional de la rigidez de la tubería.

Se concluye que en un aumento de 6" de diámetro y 1 cm de espesor de la tubería se logra disminuir los desplazamientos en esta hasta en 1 m para una misma condición de deslizamientos.

Se concluye que la tubería API 5L X42 presenta un comportamiento muy dúctil y puede alcanzar grandes deformaciones a niveles bajos de esfuerzos.

Se concluye que la tubería API 5L X70, las deformaciones unitarias máximas alcanzadas no superan el 0.5%, por lo que en ninguno de los casos se esperara rotura en la tubería.

En todo caso, se puede apreciar la gran importancia del espesor de la pared del tubo, pues las deformaciones unitarias se reducen con el incremento de dicho espesor.

Se concluye que la tubería alcanza niveles de vulnerabilidad de rotura para tubería presurizada y niveles de vulnerabilidad cercanos al límite de fluencia para tuberías sin presión.

Se concluye que una tubería enterrada rara vez falla como consecuencia de un solo deslizamiento. Sus propiedades de resistencia le permiten aguantar varios movimientos en el tiempo, antes de llegar a la falla total.

Se concluye que la vulnerabilidad de la tubería es un proceso dinámico que depende de la cantidad de desplazamientos que se vayan acumulando a lo largo de su vida útil. La acumulación será más rápida cuanto más próximo se esté del punto de fluencia del material de fabricación.

Se concluye que la vulnerabilidad de una tubería es baja hasta el punto de fluencia, pues hasta ese umbral de deformaciones el acero utilizado en su fabricación se podrá recuperar totalmente, si de alguna manera se libera de la masa de suelo que lo esté empujando, como suele hacerse dentro de los programas de mantenimiento

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**

de las líneas de tubería. Cuando esto no sucede, la tubería comienza a acumular deformaciones e incrementa rápidamente su vulnerabilidad hasta llegar a 100% que corresponde a rotura.

Las “Curvas de Vulnerabilidad”, complementadas con las gráficas que relacionan las anchuras de los deslizamientos con los máximos desplazamientos que pueden llegar a realizar los deslizamientos y las tuberías juntos, se constituyen en una herramienta práctica de trabajo para los profesionales que se dediquen a evaluar la integridad de tuberías de acero que se vean sometidas a la acción de deslizamientos, pues con ellas pueden realizar un cálculo rápido de los desplazamientos que se deben presentar en sentido perpendicular al eje para alcanzar fluencia y rotura del material. Las gráficas también permiten estimar un nivel de daño de la tubería a partir de mediciones de desplazamientos del deslizamiento, y por consiguiente de la tubería.

Los niveles de daño en función de la vulnerabilidad establecidos serán aplicables únicamente para tuberías en tramos rectos con los diámetros y espesores considerados en este trabajo e involucradas en un proceso de inestabilidad cuyo sentido de movimiento se de en sentido perpendicular al alineamiento de la tubería.



## **6. TRABAJO FUTURO**

Contactarse con algún grupo de Ingeniería que se dedique a hacer mantenimiento de tuberías, con el fin de recoger mediciones directas de los desplazamientos de deslizamientos, de movimientos de tubería y de ser posible, de resultados de la instrumentación convencional que se realice dentro de los tubos. Esta información se podría comparar con la información obtenida en las curvas resultantes de esta investigación.

Crear una alianza estratégica que involucre un grupo investigador de la sección de Geotecnia con un operador de tuberías, con el fin de instrumentar algunos deslizamientos que hayan generado problemas recurrentes sobre algunas tuberías, y obtener de allí información valiosa para mejorar los ábacos presentados en este trabajo.

Realizar simulaciones variando los campos de desplazamiento que permitan observar la influencia de la velocidad del deslizamiento en la vulnerabilidad con fines de ampliar las curvas no solo conforme a los anchos de deslizamiento, si no teniendo en cuenta velocidades planteadas por los autores conforme a los tipos de movimiento.

Realizar modelaciones que involucren el modelo Mohr Coulomb de la librería abaqus que permita confrontar resultados del modelo elástico del suelo el cual se estableció para la presente investigación conforme a la plasticidad del suelo que no fue tomada en cuenta en el presente trabajo, relacionando si la misma tiene influencia y cambia sustancialmente los resultados ya presentados por otros autores analíticamente y por esta investigación.

Realizar modelaciones con los mismos anchos de deslizamiento teniendo en cuenta la soldadura longitudinal y la unión entre tuberías considerando que comercialmente son de 6 metros, por tanto, los resultados obtenidos pueden ser más realistas teniendo en cuenta que son puntos neurálgicos y que muchas de las roturas de las tuberías en un deslizamiento pueden presentarse incluso en estos puntos.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- ALA. 2001. "Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe."
- API. 2001. *1160 Managing System Integrity for Hazardous Liquid Pipelines*. First edi.
- Campos, Dianet. 2016. "Influencia Del Tamaño y Bajas Proporciones de Bloques En Los Parámetros de Resistencia de Bimsoils No Cementados." Pontificia Universidad Javeriana.
- Castaño, Diana. 2008. "Simulación Numérica de La Interacción Suelo Tubería." Universidad de los Andes.
- Celigueta, J. 2011. *Método de Los Elementos Finitos Para Análisis Estructural. Unicopia, San Sebastian, España*. San Sebastian, España.
- Cruden, David M, and David J Varnes. 1996. "Landslides: Investigation and Mitigation. Chapter 3-Landslide Types and Processes." *Special Report 247*(August): 36–75.  
[https://www.researchgate.net/publication/269710355\\_CrudenDM\\_Varnes\\_DJ\\_1996\\_Landslide\\_Types\\_and\\_Processes\\_Special\\_Report\\_Transportation\\_Research\\_Board\\_National\\_Academy\\_of\\_Sciences\\_24736-75](https://www.researchgate.net/publication/269710355_CrudenDM_Varnes_DJ_1996_Landslide_Types_and_Processes_Special_Report_Transportation_Research_Board_National_Academy_of_Sciences_24736-75).
- Feliciano, Mauricio. 2006. "Simulacion Numerica de La Interaccion Suelo Tuberia." Universidad de los Andes.
- Gonzalez, Marta. 2010. "Análisis de Vulnerabilidad de Tuberías Sometidas a Deslizamientos." Universidad Nacional de Colombia.
- Hibbit, M, M Karlsson, and M Soreson. 2001. *ABAQUS/Standard User ' s Manual*. States. ed. United Hibbit, Karlsson & Soreson, Inc.
- Kakderi, Kalliopi, Maria Alexoudi, and Kyriazis Pitilakis. 2007. "Seismic Risk Analysis of Interdependent Lifeline Systems." *4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering* (1578): 1–12.
- Karimian, Seyed. 2006. "Response of Buried Steel Pipelines Subject to Longitudinal and Transverse Ground Movement." The University of British Columbia.
- Lanzano, Giovanni et al. 2013. "Seismic Vulnerability of Natural Gas Pipelines." *Reliability Engineering and System Safety* 117: 73–80.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2013.03.019>.
- Lee, Tae et al. 2016. "Seismic Fragility Analysis of a Buried Gas Pipeline Based on Nonlinear Time-History Analysis." *International Journal of Steel Structures*: 231–42.
- Li, Sheng, and Si-ning Wu. 2017. "Stress Analysis on Large-Diameter Buried Gas Pipelines under Catastrophic Landslides." *Petroleum Science* 14(3): 579–85.
- Liu, P, J Zheng, B Zhang, and P Shi. 2010. "Failure Analysis of Natural Gas Buried X65 Steel Pipeline under Deflection Load Using Finite Element Method."

- Materials and Design* 31(3): 1384–91.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2009.08.045>.
- Liu, Xuejie, and Michael O'Rourke. 1997. "Behaviour of Continuous Pipeline Subject to Transverse PGD." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 26: 989–1003.
- Lizcano, A, and M Goldscheider. 2004. "Standortsicherheitsuntersuchung Für Ein Räumliches Böschungssystem – Teil 2 Durchführung Der Berechnung Und Ergebnisse." *Journal Bautechnik* 81.
- Muhlbauer, Kent. 2004. *Pipeline Risk Management Manual*. Third edit. Elsevier.
- O'Rourke, Michael, and Xuejie Liu. 1999. "8. Response of Buried Pipelines Subject to Earthquake Effects.Pdf."
- Pereira, Mauricio. 2009. "Modelación Numérica de Interacción Suelo-Tubería En Deslizamientos de Tierra."
- Phillips, Ryan et al. 2008. "Pipeline Integrity for Ground Movement Hazards." (709).
- Popescu, Radu, and Arash Nobahar. 2003. "3D Finite Element Analysis of Pipe-Soil Interaction – Effects of Groundwater." (February).
- Prieto, Claudia. 2011. "Metodología Para La Evaluación de Riesgos Por Deslizamientos En Líneas de Conducción de Hidrocarburos." Universidad Nacional de Colombia.
- Ramberg, W, and WR. Osgood. 1943. "Description of Stress–strain Curves by Three Parameters." *National Advisory Committee for Aeronautics* (July): 1943.
- Reddy, J. 2005. *Introduction to the Finite Element Method*. 3rd Editio. ed. McGrall-Hill.
- Rodriguez, Paula. 2016. "Metodología Para Evaluación Cuantitativa Del Riesgo Por Rotura En Líneas de Hidrocarburos Debido a Deslizamientos." Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Suárez, Jaime. 1998. "Deslizamientos y Estabilidad de Taludes En Zonas Tropicales." *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*: 429–72.
- Sweeney, M, A Gasca, M Garcia, and A Palmer. 2004. "Pipelines and Landslides in Rugged Terrain, a Database, Historic Risk and Pipeline Vulnerability." : 1–19.
- Takada, Shiro, Nemat Hassani, and Katsumi Fukuda. 2001. "A New Proposal for Simplified Design of Buried Steel Pipes Crossing Active Faults." 1257(July 2000): 1243–57.
- Trifonov, Oleg V. 2015. "Numerical Stress-Strain Analysis of Buried Steel Pipelines Crossing Active Strike-Slip Faults with an Emphasis on Fault Modeling Aspects." 6(1): 1–10.
- Varnes, D. J. 1978. "Slope Movement Types and Processes." *Transportation Research Board Special Report* (176): 11–33.

**Vulnerability curves for continuous steel pipes subjected to landslide**  
**Curvas de vulnerabilidad para tuberías continuas de acero ante deslizamientos**

- Vazouras, Polynikis, Spyros A Karamanos, and Panos Dakoulas. 2012. "Mechanical Behavior of Buried Steel Pipes Crossing Active Strike-Slip Faults." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 41: 164–80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.05.012>.
- Zheng, J Y, B J Zhang, P F Liu, and L L Wu. 2012. "Failure Analysis and Safety Evaluation of Buried Pipeline Due to Deflection of Landslide Process." 25: 156–68.