

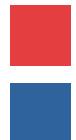


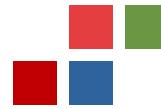
MÉTODO NUMÉRICO APROXIMADO PARA EVALUAR DUCTOS EN SITIOS CON PROBLEMAS DE INESTABILIDAD GEOTÉCNICA

Paola Murcia Dávila
Esp. Geotecnia

Jose Vicente Amórtegui Gil
IGL

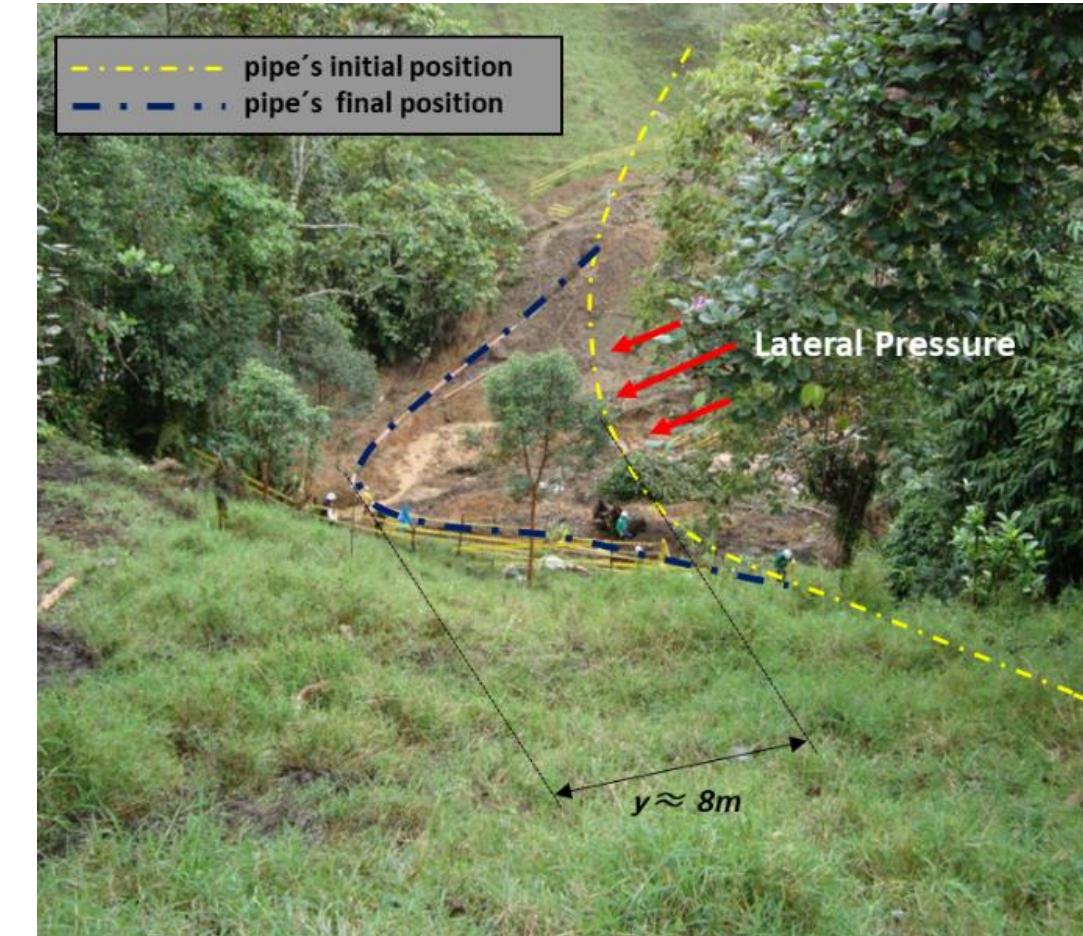
Johan Camilo Garzón
Cubides
IGL





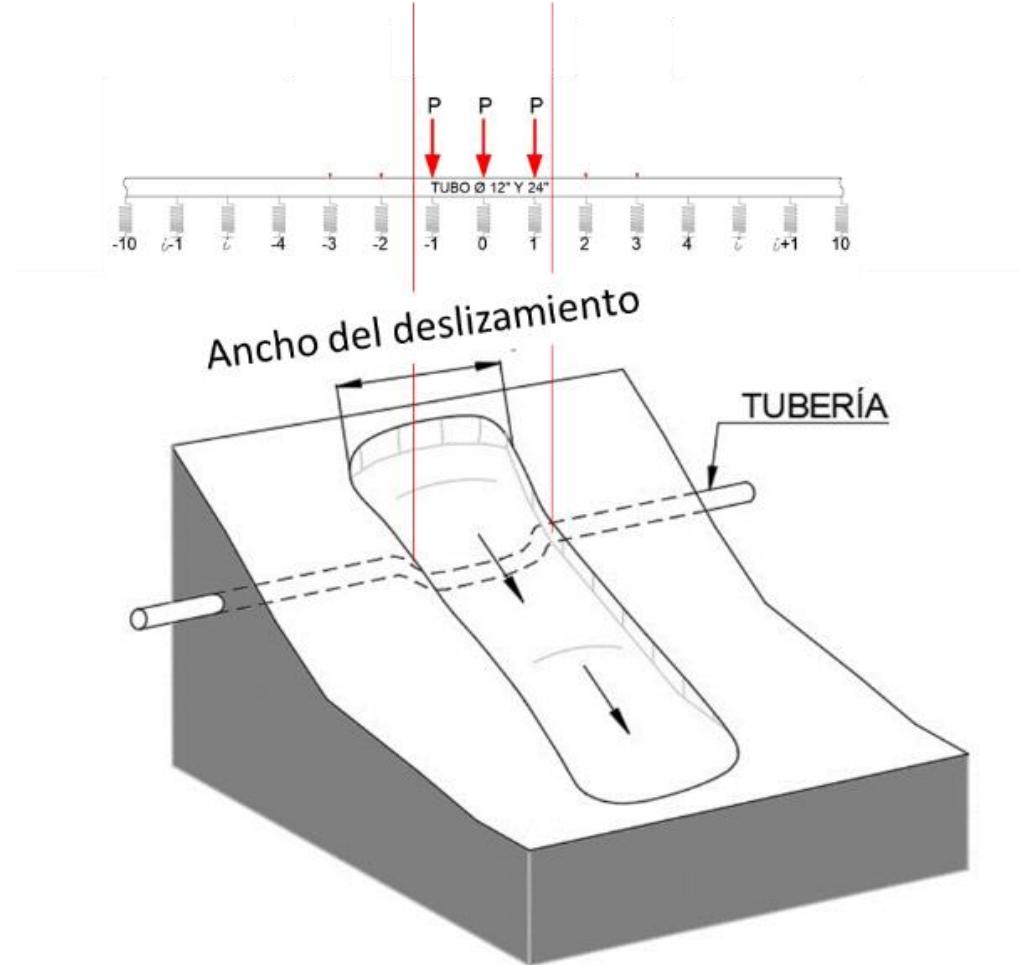
INTRODUCCIÓN

Dadas las condiciones topográficas, climatológicas, geológicas y tectónicas en Colombia se presentan cientos de deslizamientos al año que afectan directamente las líneas de conducción de hidrocarburos. las afectaciones causadas por los procesos de inestabilidad a oleoductos, poliductos y gasoductos dependen directamente de la magnitud de las cargas aplicadas y de los límites de esfuerzos permisibles del material de la tubería. bajo estas circunstancias, la falla de la tubería se puede alcanzar por diferentes mecanismos; uno de ellos debido al aumento de cargas laterales en sentido ortogonal a la longitud de la tubería causado por la masa de suelo o roca deslizado, otro mecanismo de falla común consiste en la pérdida de soporte vertical ocasionada por el deslizamiento, en muchos casos las tuberías pueden fallar por la combinación de estos dos mecanismos.





TUBERÍA COMO UNA ESTRUCTURA ESTÁTICAMENTE INDETERMINADA



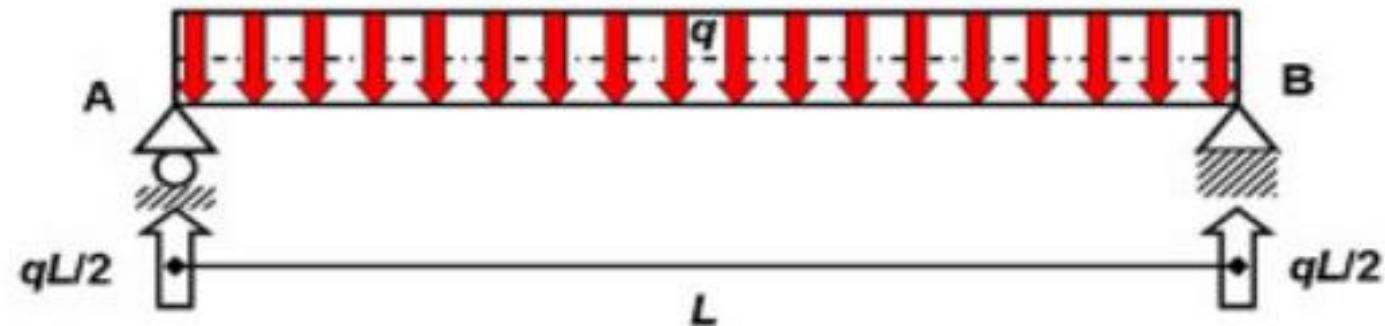
Estructura estáticamente indeterminada:

- ✓ Número de reacciones o fuerzas internas desconocidas es mayor que el número de ecuaciones de equilibrio disponibles para su análisis.
- ✓ Las ecuaciones adicionales requeridas para encontrar las reacciones desconocidas se obtienen mediante la relación entre las cargas aplicadas y las reacciones, con el desplazamiento o giro en puntos diferentes sobre la estructura.
- ✓ Ecuaciones adicionales se conocen como **ecuaciones de compatibilidad** y se escriben en términos de las propiedades geométricas y físicas de la estructura.



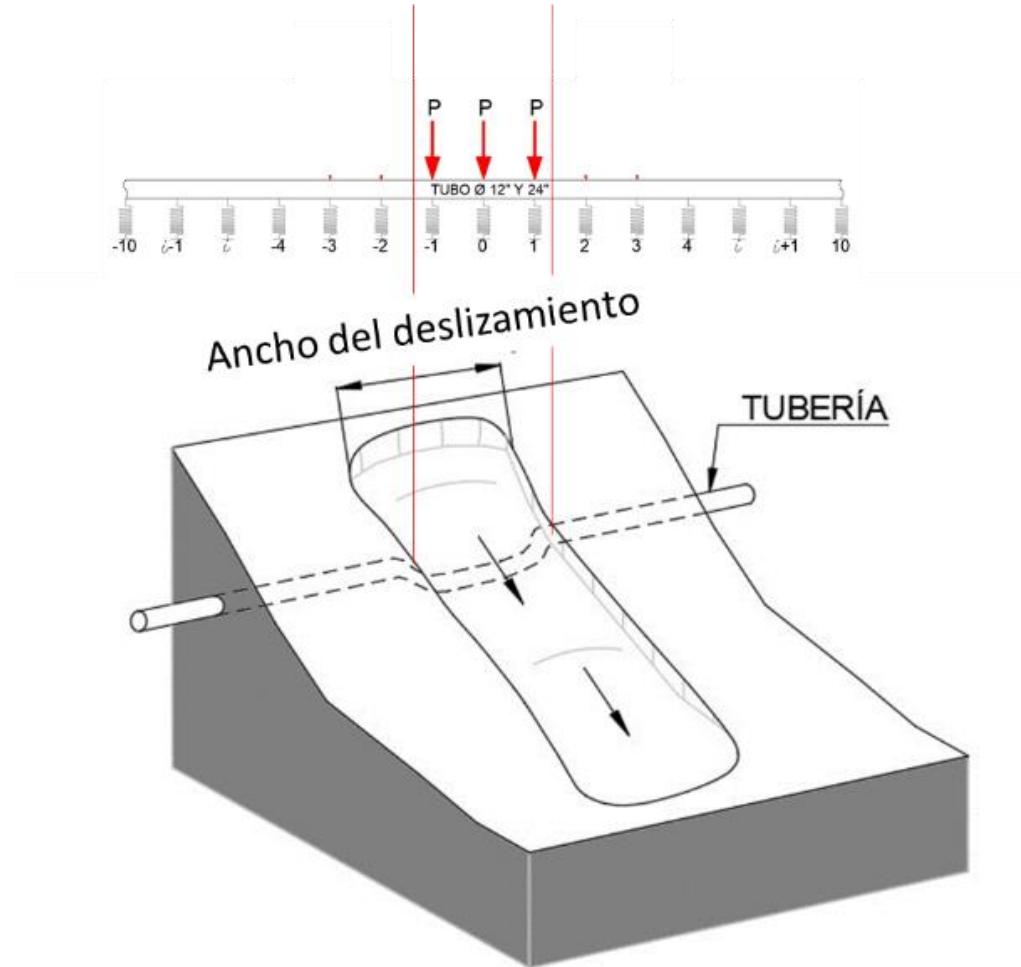
Para estimar el momento flector máximo que se desarrolla en la sección, la práctica común consiste en considerar la tubería como una viga de longitud L , simplemente apoyada y sobre la cual actúa una carga distribuida (W), con esta simplificación el momento máximo se calcula como:

$$M_{máx} = \frac{WL^2}{8}$$





TUBERÍA COMO UNA ESTRUCTURA ESTÁTICAMENTE INDETERMINADA



En las estructuras estáticamente indeterminadas:

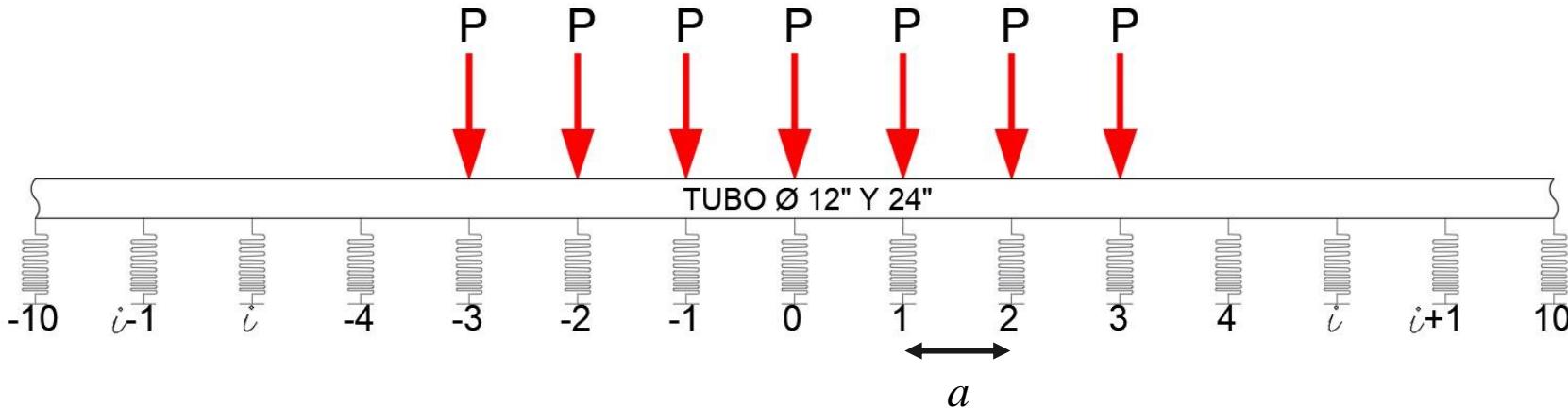
- ✓ Para una carga dada, el esfuerzo y la deflexión máximos calculados son generalmente más pequeños que en su contraparte estáticamente determinada.
- ✓ Tienden a redistribuir la carga hacia los soportes redundantes representando así de forma más aproximada la situación real.
- ✓ Para resolverlas existen diversas metodologías, una de ellas conocida como el **método de la flexibilidad**.



METODOLOGÍA DE CÁLCULO

Se propone modelar el mecanismo de interacción entre una tubería y el suelo que la rodea en un proceso de inestabilidad considerando la tubería como una viga estáticamente indeterminada de longitud L :

- ✓ La viga se compone de 20 elementos de longitud a
- ✓ Los elementos están limitados por nodos en sus extremos
- ✓ Sobre los nodos centrales de la viga actúa una carga que simula el empuje pasivo del deslizamiento
- ✓ Cada nodo se apoya sobre un resorte que simula el suelo circundante
- ✓ El resorte se deforma y reacciona ante la carga externa aplicada





METODOLOGÍA DE CÁLCULO

La reacción promedio del resorte en el nodo i se escribe como:

$$q_i = \frac{a}{8} (q_{i-1} + 6q_i + q_{i+1})$$

Para determinar los giros que se producen en el nodo i se utiliza la ecuación constitutiva de la viga:

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = M(x)$$

Del equilibrio de momentos y por doble integración de la ecuación de la viga, se llega a la expresión de los giros en los apoyos:

$$\theta_{i-1} = \frac{dy}{dx} = \frac{\Delta_{i-1} - \Delta_i}{a} = \frac{a}{6EI} (M_{i-1} + 2M_i)$$

$$\theta_{i+1} = \frac{\Delta_{i+1} - \Delta_i}{a} = \frac{dy}{dx} = \frac{a}{6EI} (2M_i + M_{i+1})$$

El equilibrio angular para restituir es:

$$\frac{6EI}{a^2} (\Delta_{i-1} - 2\Delta_i + \Delta_{i+1}) = M_{i-1} + 4M_i + M_{i+1}$$

Según el concepto de resorte de Winkler $\Delta_i = \frac{q_i}{k_i}$

Reemplazando lo anterior y organizando los términos, se obtiene para un nodo i la expresión de compatibilidad angular escrita en forma matricial:

$$\left\{ -g_i \frac{k_i}{k_{i-1}}, 1, 2g_i, 4, -g_i \frac{k_i}{k_{i+1}}, 1 \right\} \begin{Bmatrix} q_{i-1} \\ M_{i-1} \\ q_i \\ M_i \\ q_{i+1} \\ M_{i+1} \end{Bmatrix} = \{0\}$$

Donde g_i es un operador de simplificación:

$$g_i = \frac{6EI}{a^2 k_i}$$



METODOLOGÍA DE CÁLCULO

Al hacer equilibrio en el elemento conformado por los nodos ($i - 1, i, i + 1$) se obtiene:

$$M_{i-1} - 2M_i + M_{i+1} = a(P_i - Q_i)$$

Se escriben las ecuaciones de equilibrio en cada nodo considerando las cargas y reacciones actuantes, así mismo, se escriben las ecuaciones de compactibilidad nodal en todos los nodos y se ensambla la matriz de flexibilidad

Las condiciones de frontera de la viga están determinadas por las restricciones aplicadas a los nodos terminales inicial y final.

Del ejercicio anterior resulta una matriz de 40 X 40 que se ensambla en una hoja de cálculo. El sistema matricial permite con las ecuaciones de los nodos inicial, final e intermedios, calcular para cada nodo el valor del momento flector de restitución del giro y la reacción en el resorte.

$$\left\{ \frac{a^2}{8}, 1, \frac{3a^2}{4}, -2, \frac{a^2}{8}, 1 \right\} \begin{Bmatrix} q_i \\ M_i \\ q_{i+1} \\ M_{i+1} \\ q_{i+2} \\ M_{i+2} \end{Bmatrix} = \{aP_i\}$$

Ecuación de equilibrio para nodo inicial:

$$q_{i-10} = \frac{a}{8}(3q_{i-10} + q_{i-9})$$

Ecuación de equilibrio para nodo final:

$$q_{i+10} = \frac{a}{8}(q_{i+9} + 3q_{i+10})$$





METODOLOGÍA DE CÁLCULO



DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Para la implementación del modelo numérico aproximado, se simuló el comportamiento ante cargas de deslizamiento de una tubería tipo API 5LX de 12" de diámetro.

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y LAS PROPIEDADES ELÁSTICAS DE LAS TUBERÍAS

Pipeline	External diameter (m)	Thickness (m)	Moment of Inertia (m ⁴)	Modulus of elasticity (MPa)
12"	0.305	0.0095	0.0004	203395.34

MÓDULOS DE REACCIÓN DE LOS RESORTES

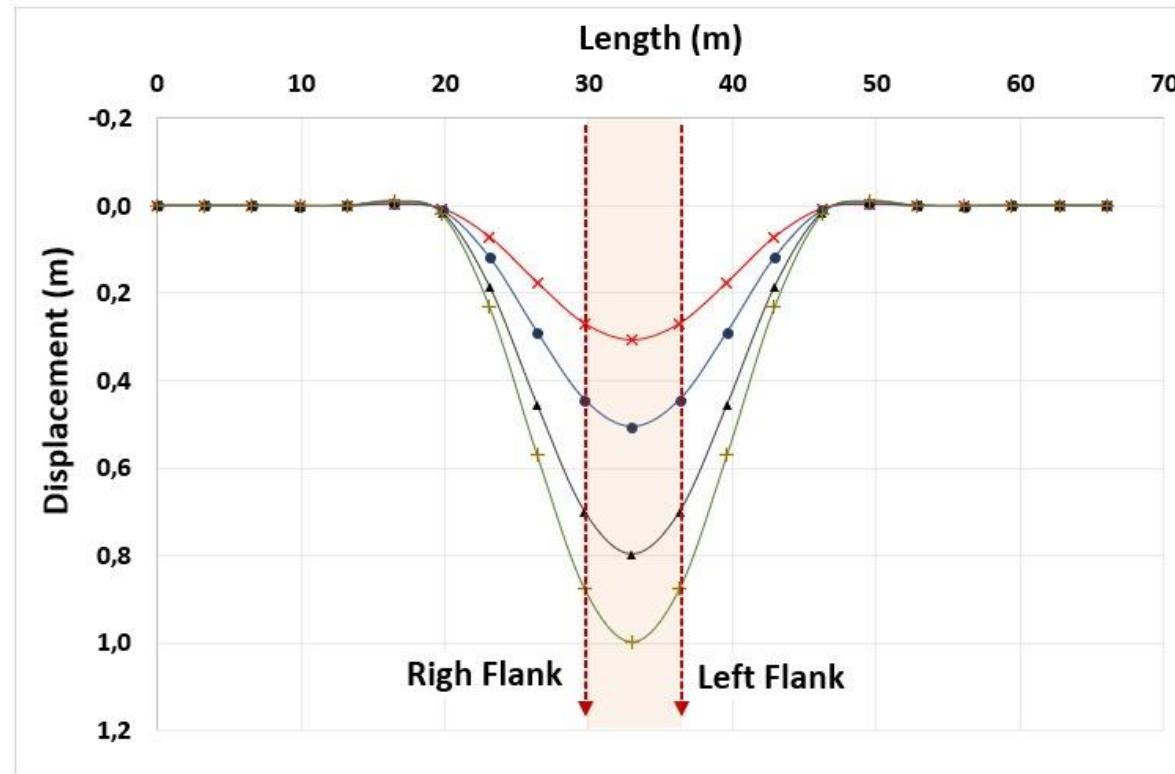
Node	0	±1	±2	±3	±4	±5	±6	±7	±8	±9	±10
K (kPa)	10	10	10	10	10	500	1000	2000	4000	5000	10000

CARACTERÍSTICAS DE RESISTENCIA DE LAS TUBERÍAS

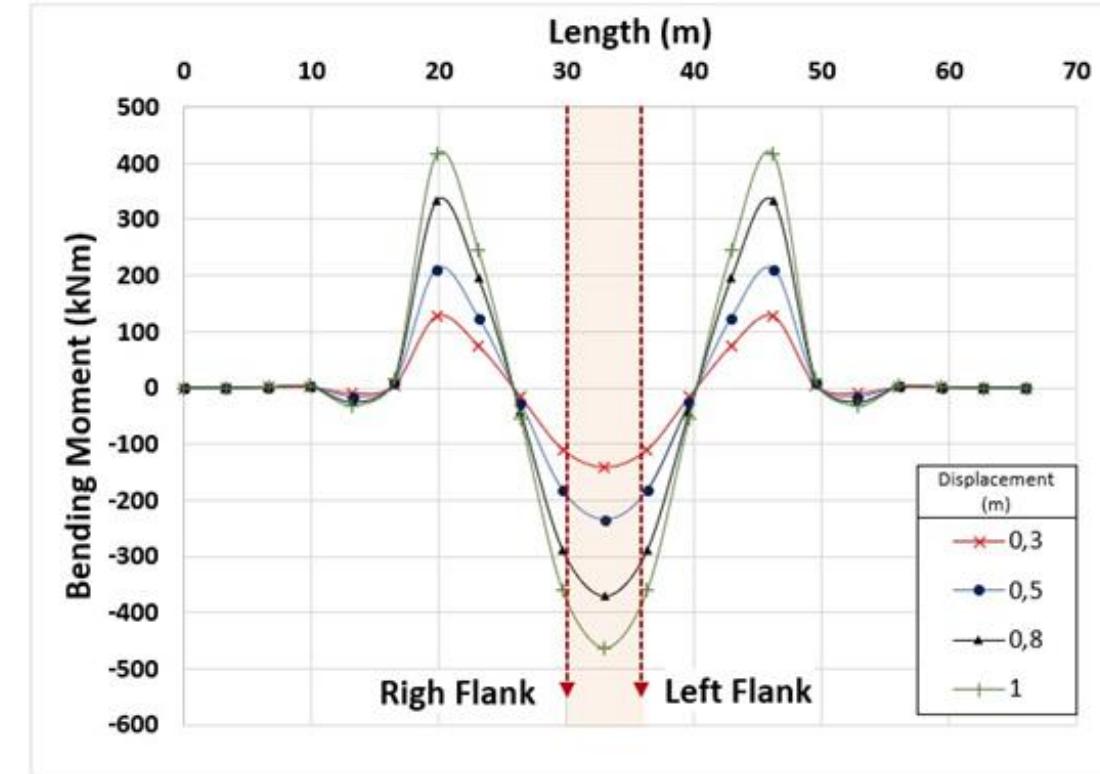
Tubería	Resistencia a la fluencia (MPa)	Resistencia a la fluencia (PSI)
API 5LX 52	358	52000
API 5LX 56	386	56000
API 5LX 60	413	60000
API 5LX 65	448	65000



RESULTADOS Y DISCUSIÓN



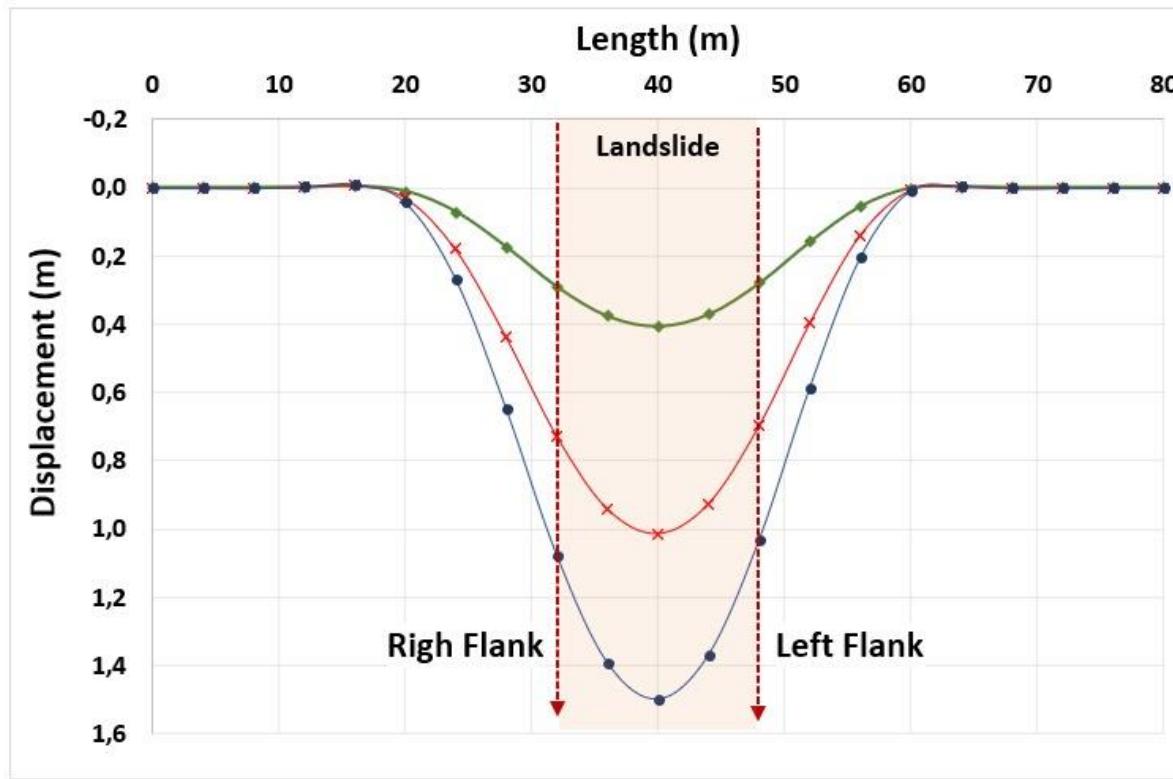
Desplazamientos de una tubería para diferentes magnitudes de carga,
que simulan un deslizamiento de 7m de ancho



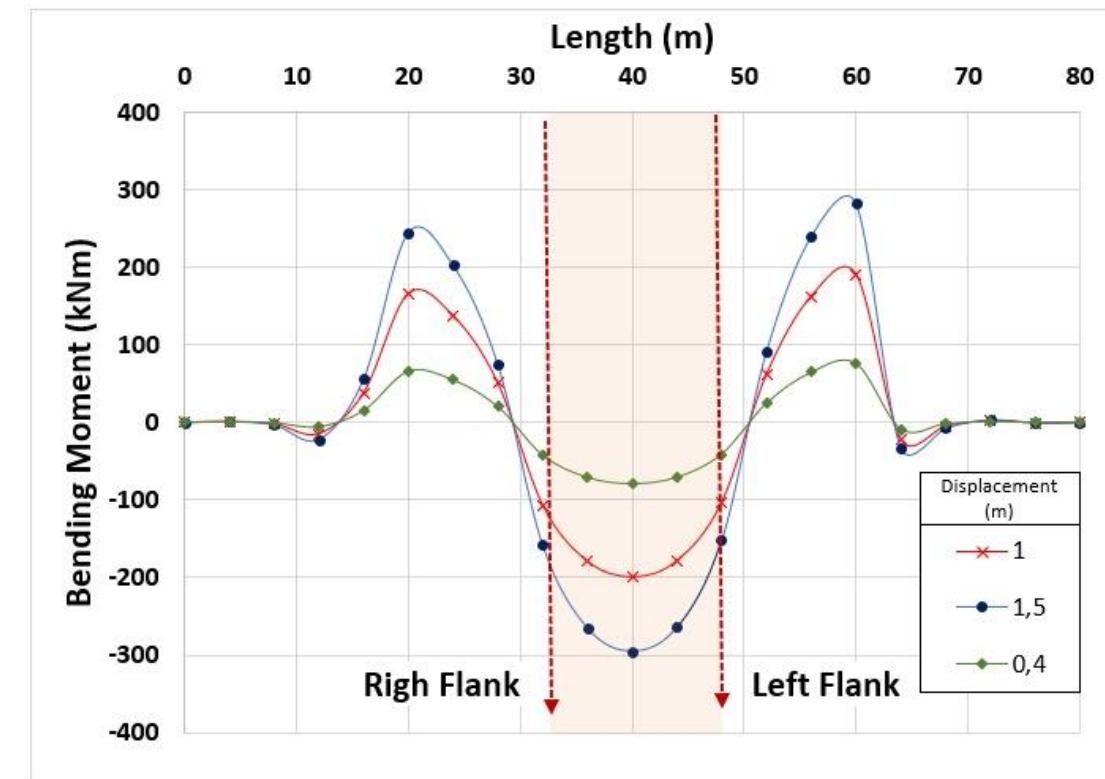
Momento flector obtenido para una tubería para un deslizamiento de
7m de ancho



RESULTADOS Y DISCUSIÓN



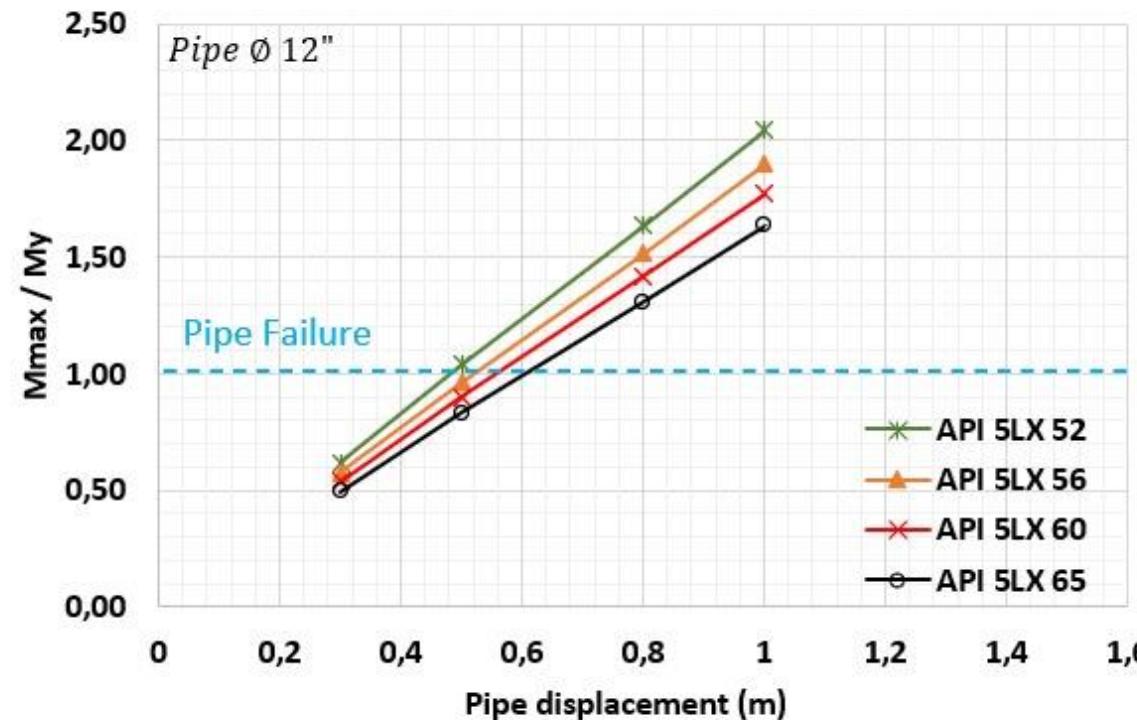
Desplazamientos de una tubería para diferentes magnitudes de carga, que simulan un deslizamiento de 16m de ancho



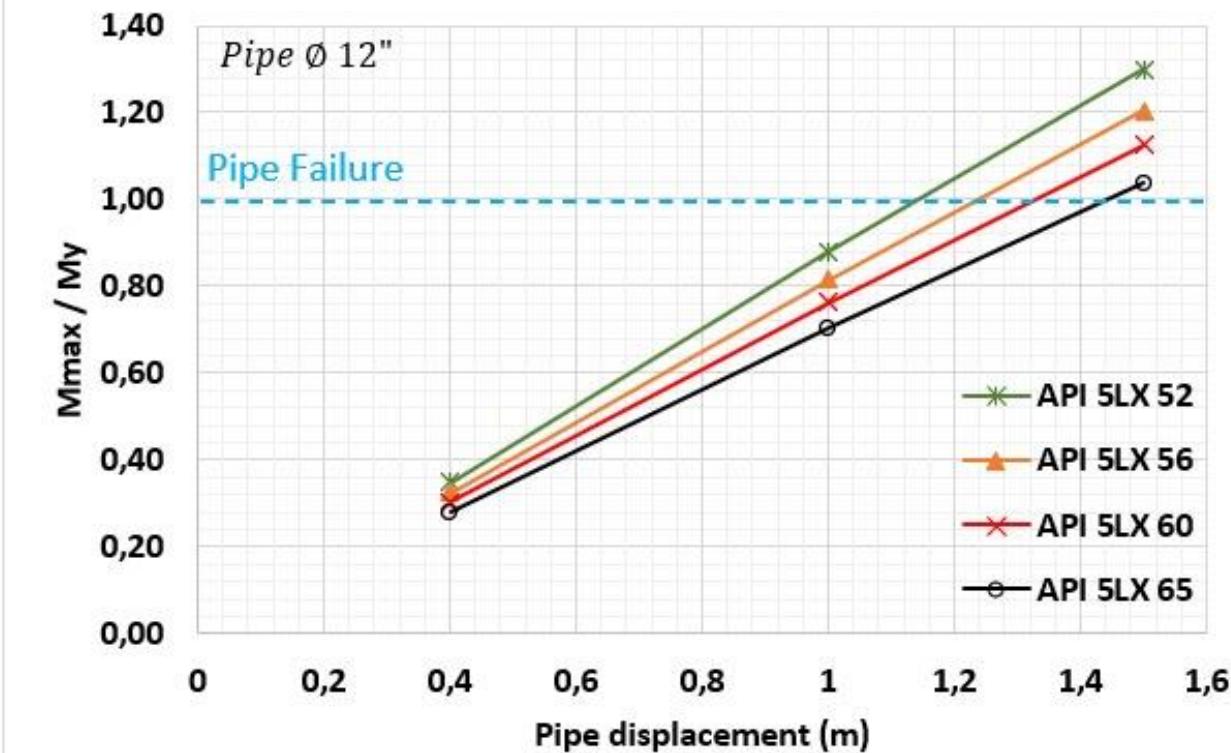
Momento flector obtenido para una tubería para un deslizamiento de 16m de ancho



RESULTADOS Y DISCUSIÓN



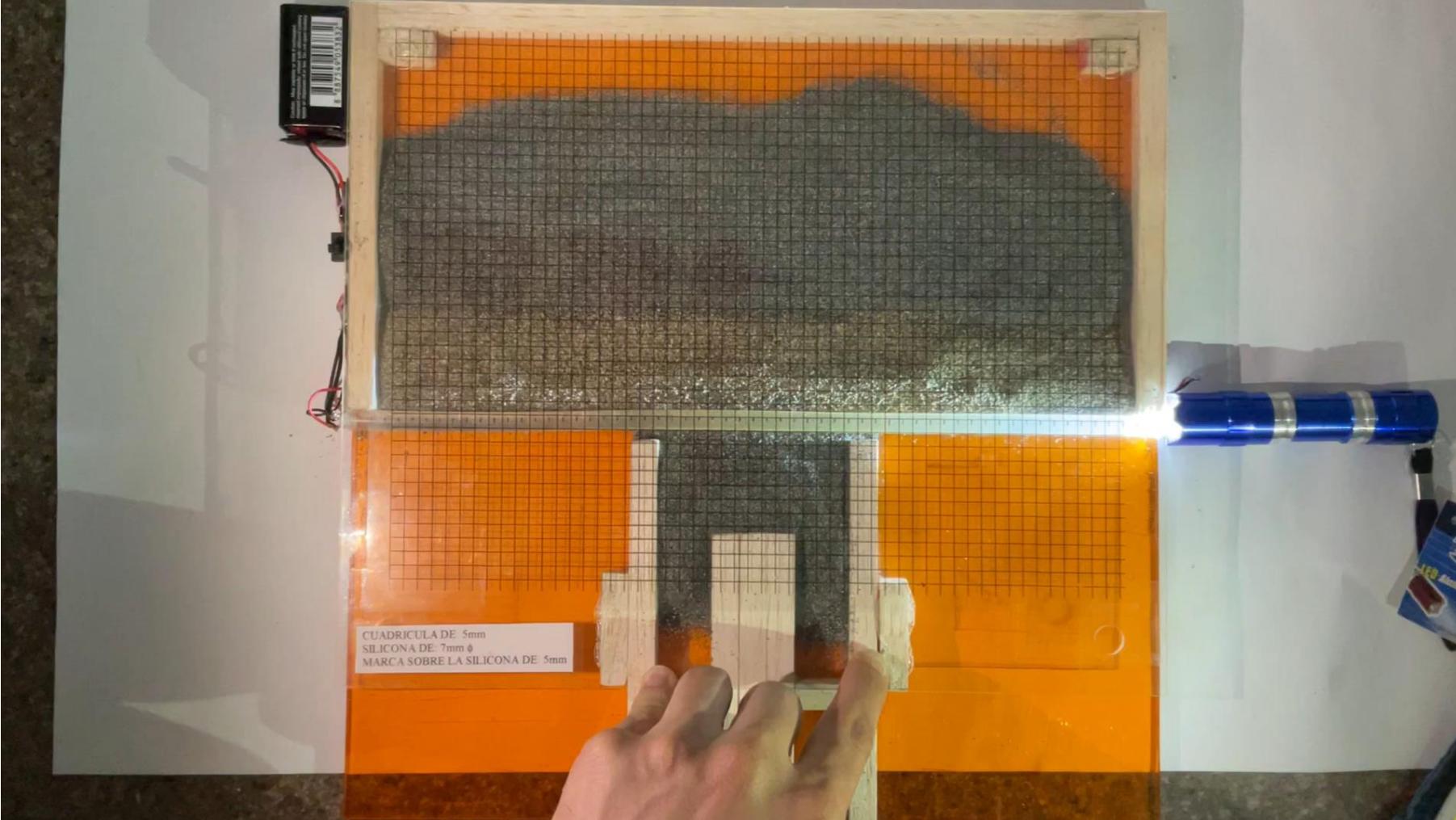
Cociente ($M_{máx}/M_y$) contra desplazamientos máximos, tubería de 12" y deslizamiento de 7m de ancho



Cociente ($M_{máx}/M_y$) contra desplazamientos máximos, tubería de 12" y deslizamiento de 16m de ancho

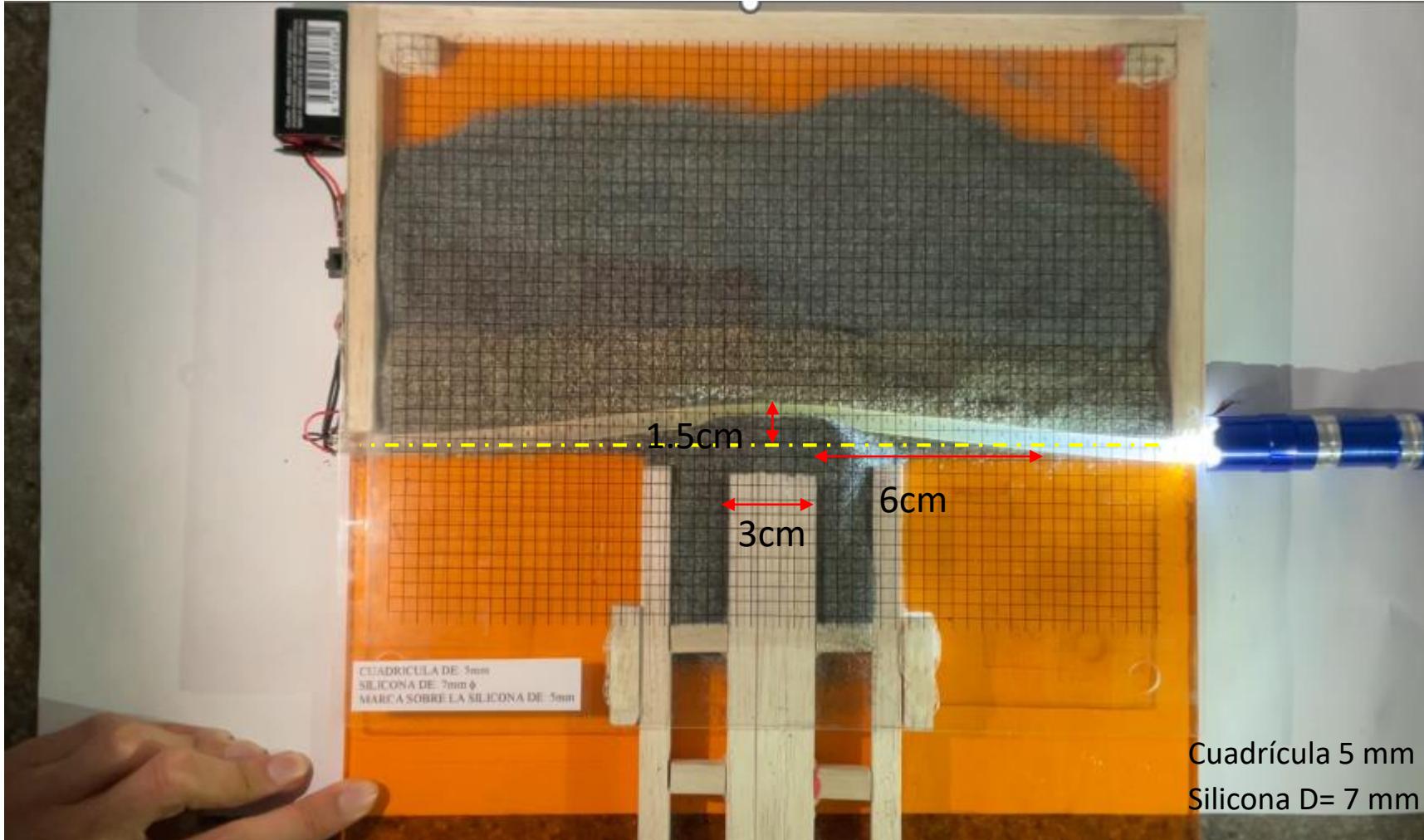


RESULTADOS Y DISCUSIÓN





RESULTADOS Y DISCUSIÓN

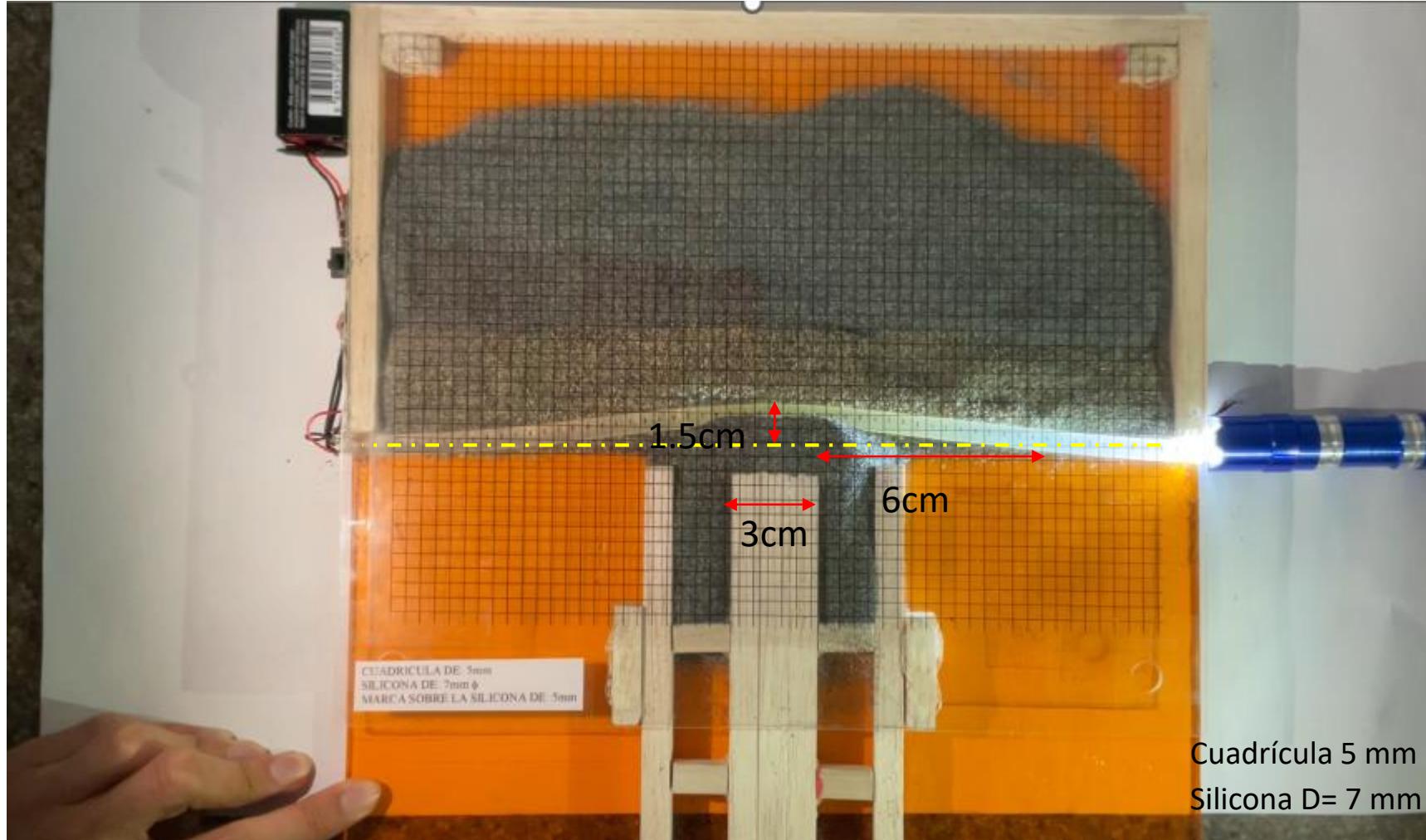


El ducto sometido a cargas laterales aplicadas de forma perpendicular a su longitud tiende a desplazarse en el sentido del movimiento del terreno.

En condiciones de integridad y continuidad de sus elementos una tubería está en capacidad de resistir los esfuerzos externos aplicados y como respuesta se deforma en el sentido del movimiento del terreno.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN



El punto de inflexión ocurre por fuera del ancho del deslizamiento.

El suelo al frente de la tubería ofrece una reacción al movimiento y se puede asimilar como un soporte continuo (se modelan como múltiples resortes).

Durante el deslizamiento alguna porción del suelo fluye por encima y debajo de la tubería.

Existe una longitud donde la deflexión de la tubería es nula.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El uso de estructuras estáticamente indeterminadas en el análisis tiene como ventaja que para una carga dada, el esfuerzo y la deflexión máximos calculados son generalmente más pequeños que en su contraparte estáticamente determinada. Las estructuras indeterminadas tienden a redistribuir la carga hacia los soportes redundantes representando así de forma más aproximada la situación real.

La metodología presentada permite calcular los desplazamientos máximos que pueden ocurrir en una tubería inmersa en un deslizamiento y a partir de estos, estimar el momento flector máximo que se desarrolla en la tubería para compararlo con el momento de rotura. En los cálculos se adoptaron valores del módulo de reacción del suelo típicos para suelos blandos y se estudiaron anchos de deslizamientos de 7m y 16m. Por lo tanto, los resultados presentados son válidos específicamente para los casos analizados a manera de ejemplo. Aplicar la metodología presentada a un caso de estudio real, implica determinar con detalle las condiciones del terreno, estimar adecuadamente los módulos de reacción del suelo, la geometría y magnitud de las cargas impuestas por el deslizamiento.

En los análisis se supone que la tubería se comporta como una viga continua, sin cambios de rigidez a lo largo de su longitud.



GRACIAS POR SU ATENCIÓN.

