



## MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS PARA EL DISEÑO DE DUCTOS ANTE PROCESOS DE INESTABILIDAD GEOTÉCNICA Y FUERZAS DE IMPACTO

Johan Camilo Garzón  
Cubides

IGL

Jose Vicente Amórtegui  
Gil  
IGL

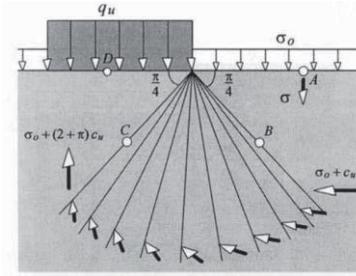
Antonio Jose Lopez  
IGL



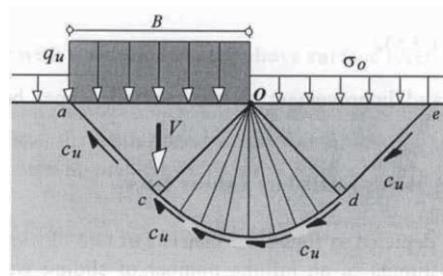


## SOFTWARE OPTUM G2 Y G3

El programa OptumG2 y OptumG3 (Krabbenhøft et al., 2018), analiza la estabilidad de modelos bidimensionales y tridimensionales (2D y 3D) del terreno mediante el método de los elementos finitos combinado con análisis límite (teoría de plasticidad).



Máxima solución de límite inferior (LB)  
 $q_u = \sigma_o + (2 + \pi) c_u$

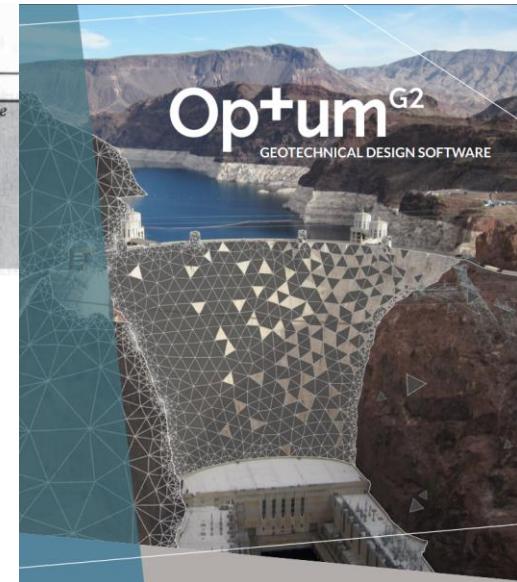


Mínima solución de límite superior (UB)  
 $q_u = \sigma_o + (2 + \pi) c_u$

Límite inferior (LB)

Solución exacta

Límite superior (UB)



El algoritmo de análisis de elementos finitos de OptumG2 realiza cálculos directos de límite superior (para un campo cinemáticamente posible) e inferior (para un campo estáticamente admisible) combinado con la técnica de reducción de la resistencia al corte (Strength Reduction) de problemas de estabilidad, incluyendo estabilidad de taludes naturales y artificiales, cimentaciones y estructuras de contención, entre otros.



## SOFTWARE OPTUM G2 Y G3

Para ilustrar las ventajas del uso de modelos de elementos finitos para el diseño de ductos, se ilustrarán diferentes ejemplos que hemos analizado en Ingeniería y Geotecnia IGL.

Caso 1: Fuerzas de impacto sobre la infraestructura del transporte de hidrocarburos

Caso 2: Estructura de contención

Caso 3: Tubería sometida a cargas de deslizamiento

Caso 4: Análisis numérico en una zona de alta complejidad geotécnica





## CASO 1: FUERZAS DE IMPACTO SOBRE LA INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS





## CASO 1: FUERZAS DE IMPACTO SOBRE LA INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS

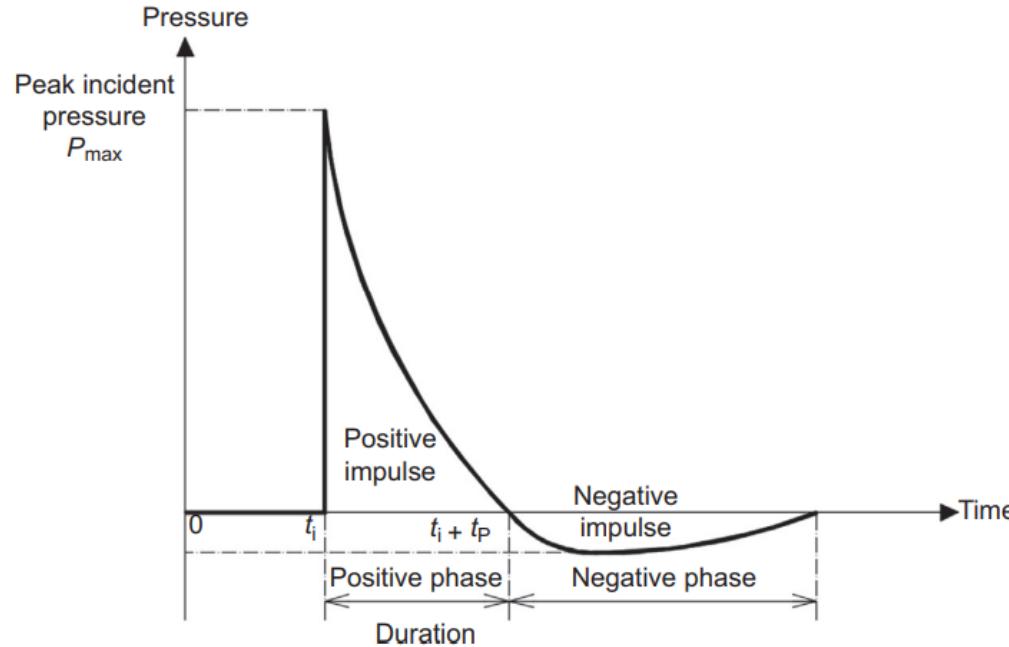
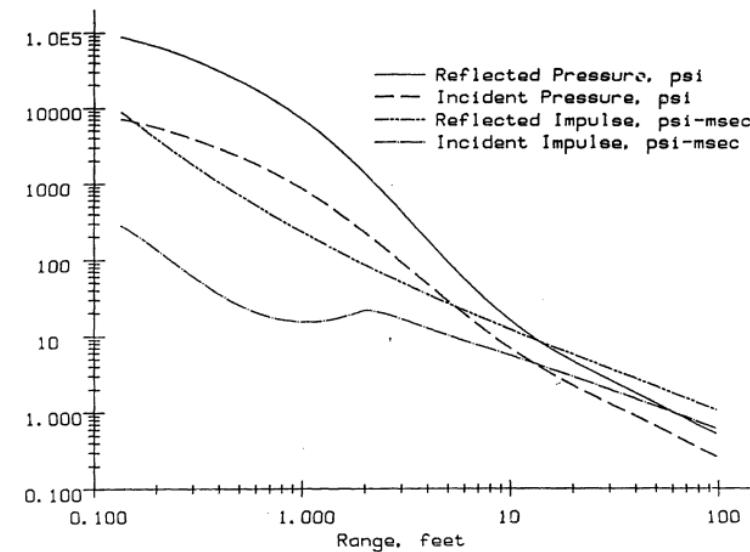
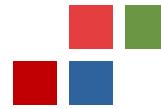


Figure 3-4a Blast Wave Parameters  
1 lb Spherical Free-Air Burst



A continuación, se ilustra una gráfica desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros Militares de Estados Unidos en el año 1984



## CASO 1: FUERZAS DE IMPACTO SOBRE LA INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS

Tipo de explosivo:

TNT

Peso de carga (kg):

54

Peso en TNT para presión (kg):	54.00	Peso en TNT para impulso (kg):	54.00
Presión del incidente (kPa):	54465.29	Impulso del incidente (kPa-ms):	10824.19
Presión refleja (kPa):	715261.68	Impulso reflejo (kPa-ms):	314452.87
Tiempo de llegada (ms):	0.04	Duración de fase positiva (ms):	
Velocidad del frente de choque (m/s):	6975.30		

Tipo de explosivo:

Composition C4

Peso de carga (kg):

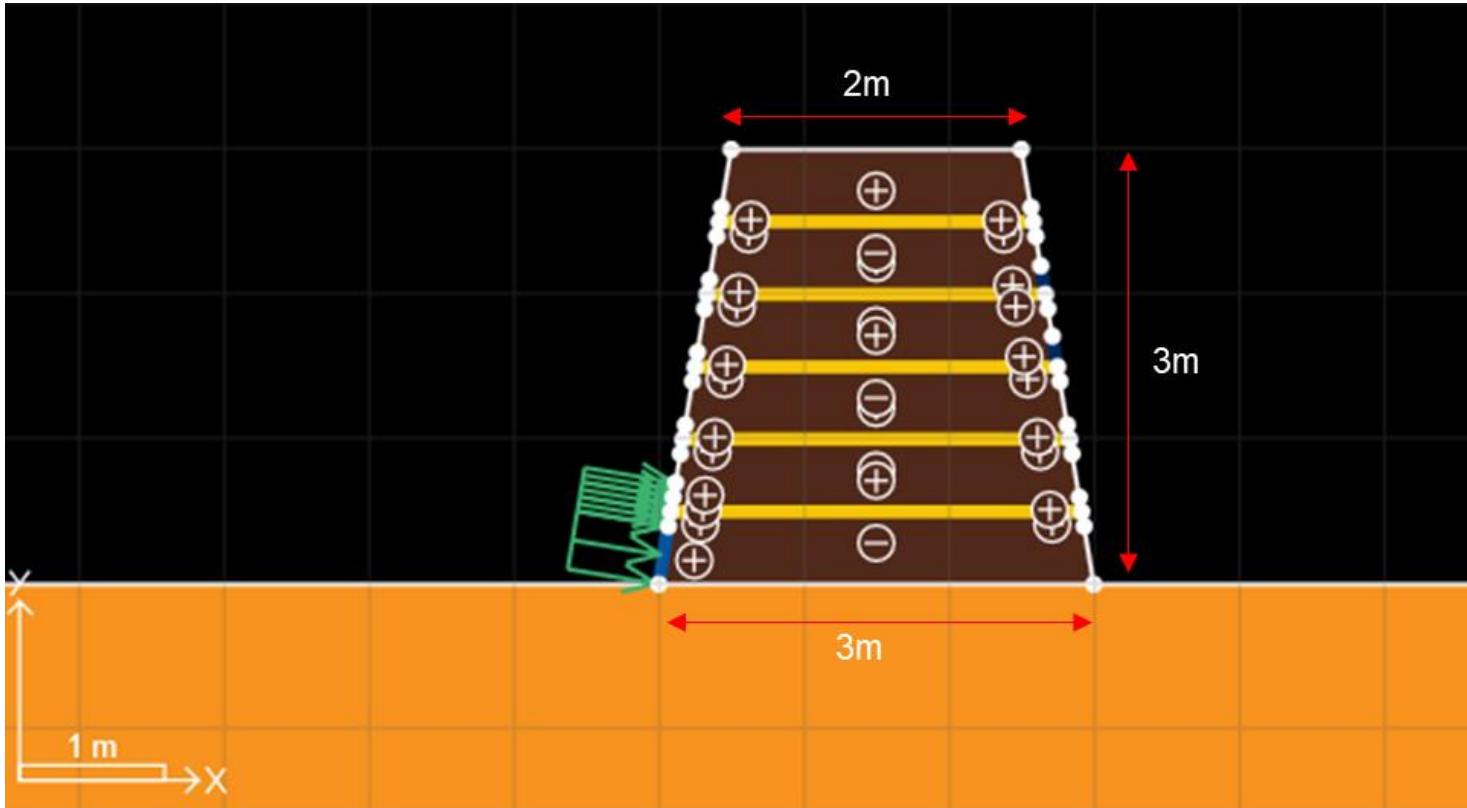
54

Peso en TNT para presión (kg):	73.98	Peso en TNT para impulso (kg):	10.26
Presión del incidente (kPa):	54262.44	Impulso del incidente (kPa-ms):	6177.97
Presión refleja (kPa):	711535.85	Impulso reflejo (kPa-ms):	179143.52
Tiempo de llegada (ms):	0.02	Duración de fase positiva (ms):	
Velocidad del frente de choque (m/s):	6963.18		

Fuente: Parámetros de Explosión en el Aire obtenidos de Explosión Esférica al Aire Libre y Explosión Semiesférica en la Superficie de TNT" de Charles N. Kingery y Gerald Bulmash, Informe técnico ARBL-TR-02555, de abril de 1984.



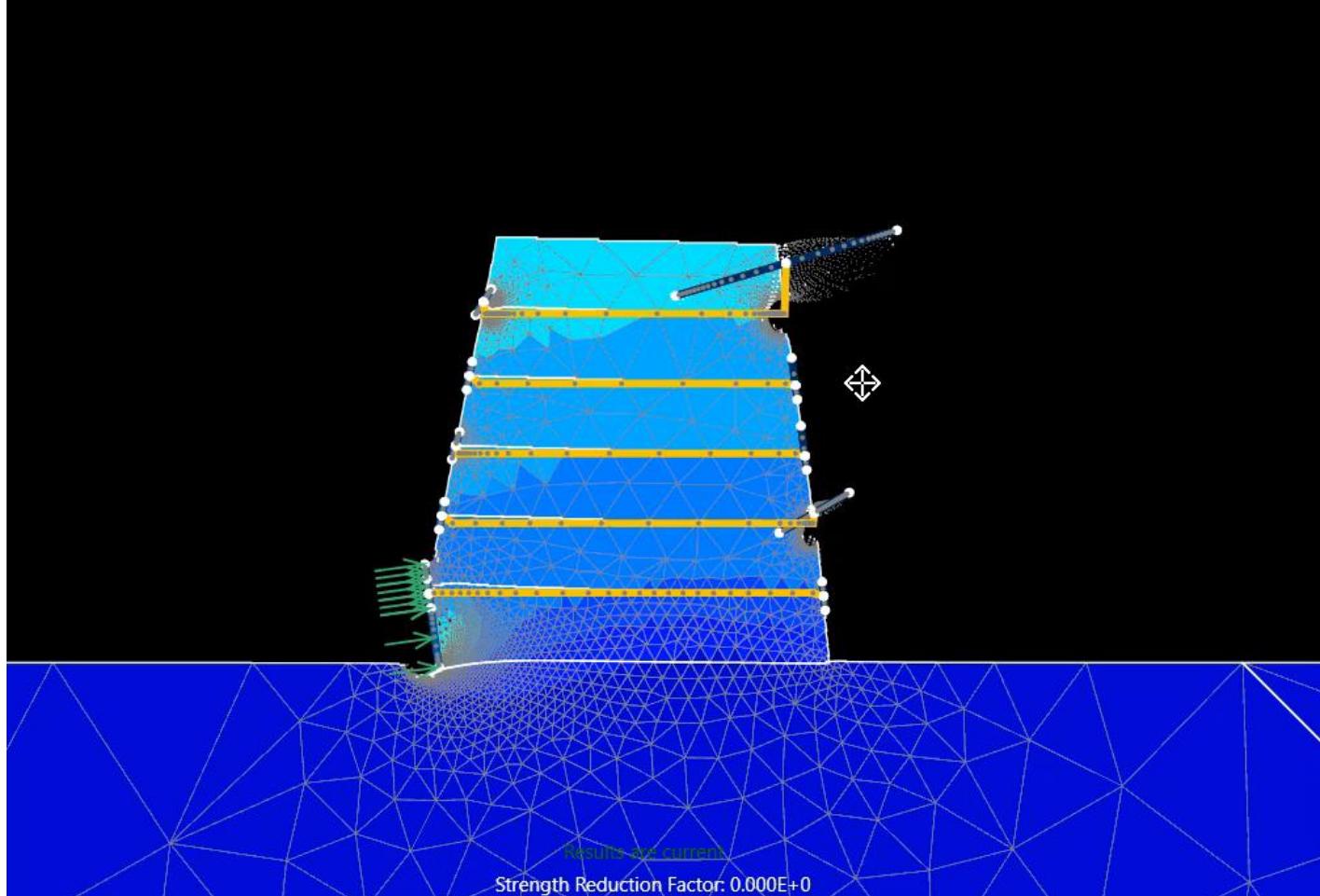
## TIPOS DE MATERIAL PARA PROTECCIÓN – RELLENO EN SUELO REFORZADO CON GEOTEXTIL BIAXIAL



Suelo	Peso Unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Angulo de Fricción (°)	Cohesión (kPa)	Módulo de elasticidad (MPa)
Arena	20	30	5	30

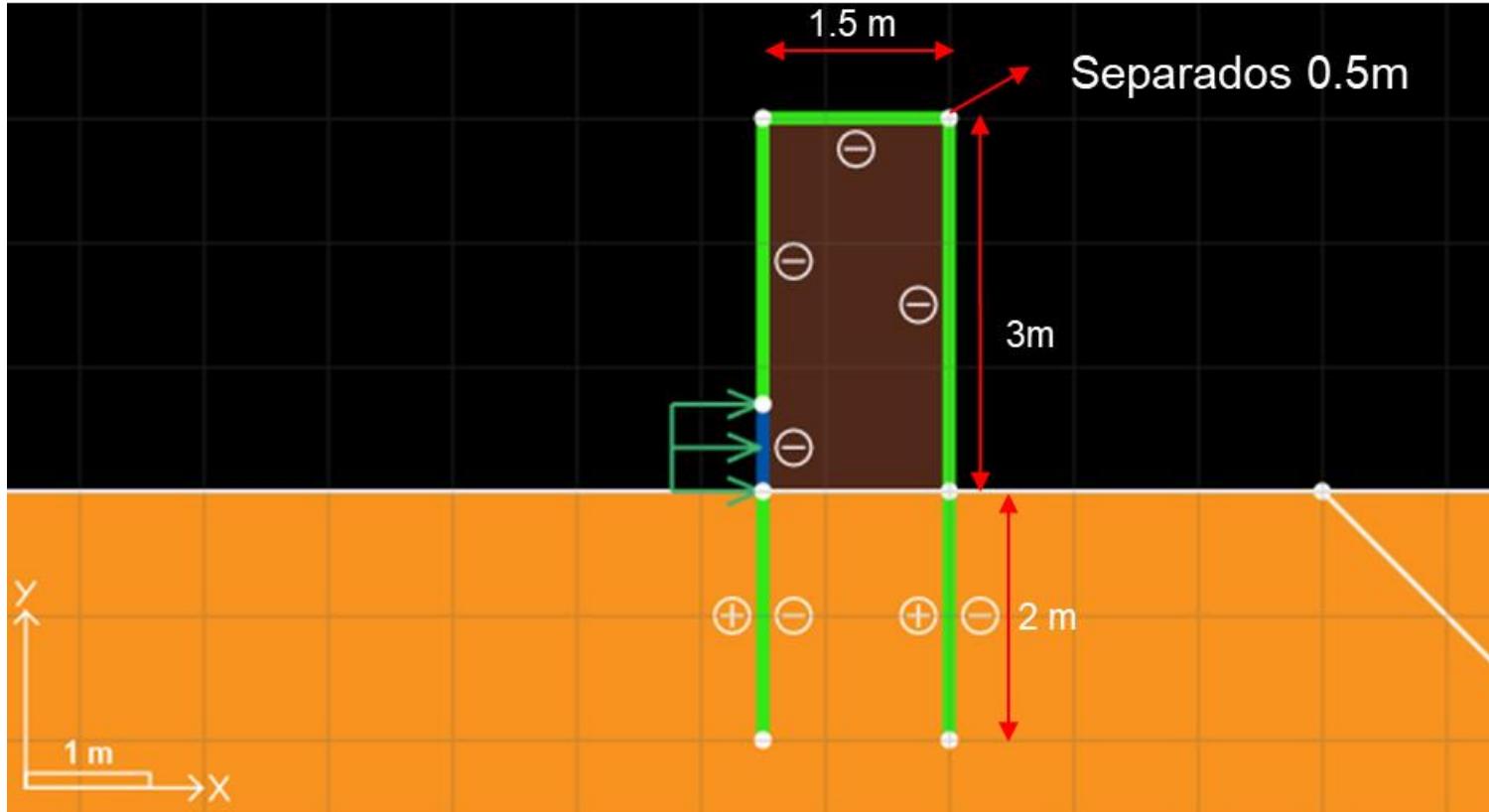


## TIPOS DE MATERIAL PARA PROTECCIÓN – RELLENO EN SUELO REFORZADO CON GEOTEXTIL BIAXIAL



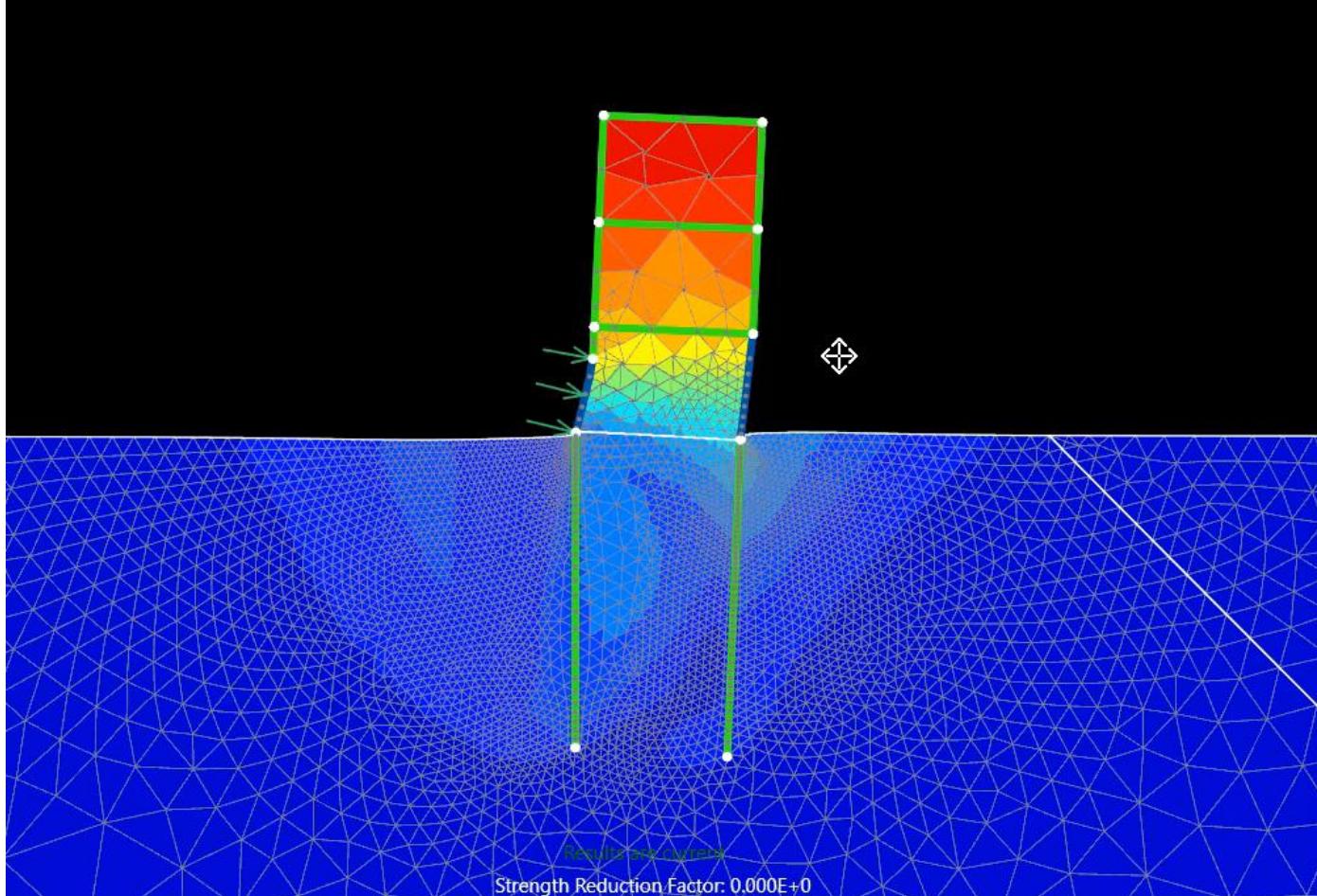


## TUBERÍA METÁLICA DE 3 ½" DE DIÁMETRO CON SACOS LLENOS DE ARENA



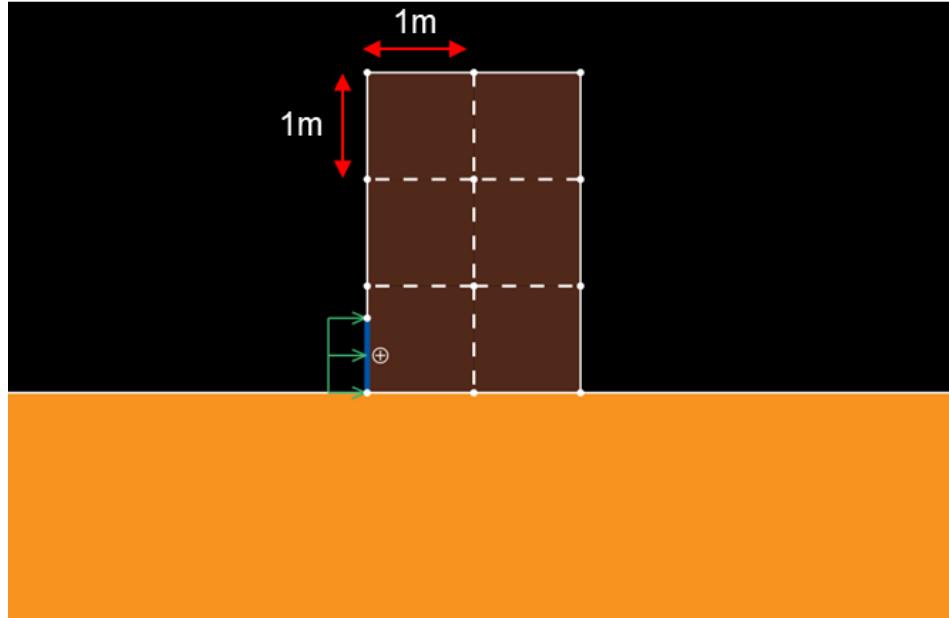


## TUBERÍA METÁLICA DE 3 ½" DE DIÁMETRO CON SACOS LLENOS DE ARENA





## GAVIONES CON SACOS DE ARENA

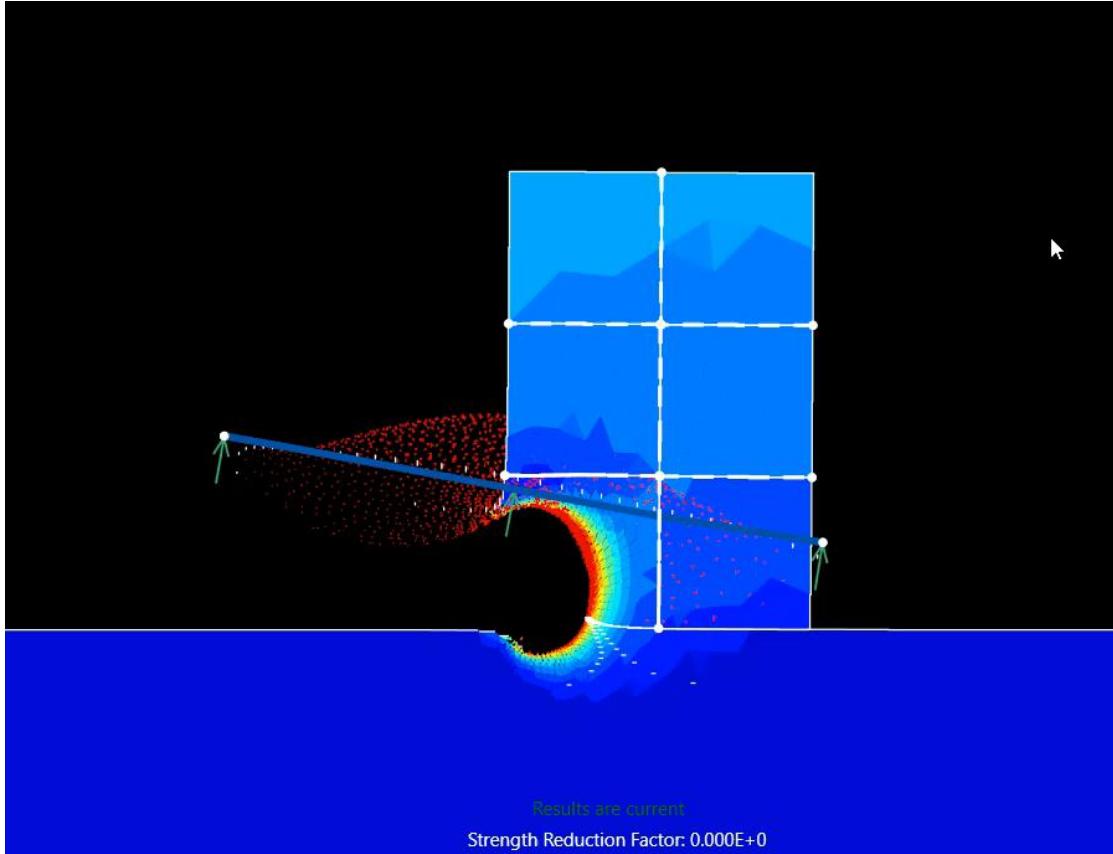


Suelo	Peso Unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Angulo de Fricción (°)	Cohesión (kPa)	Módulo de elasticidad (MPa)
Arena	20	30	5	30
Gaviones	20	35	12	45



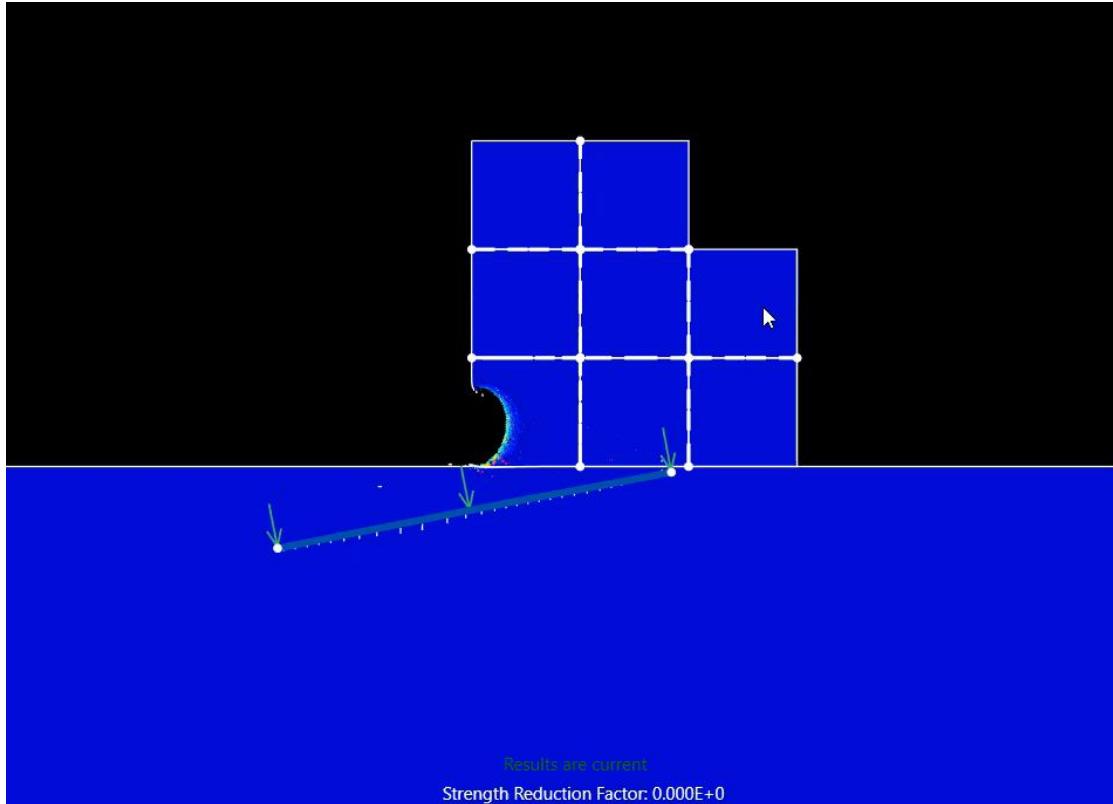


## GAVIONES CON SACOS DE ARENA





## GAVIONES CON SACOS DE ARENA





## CASO 2: ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN

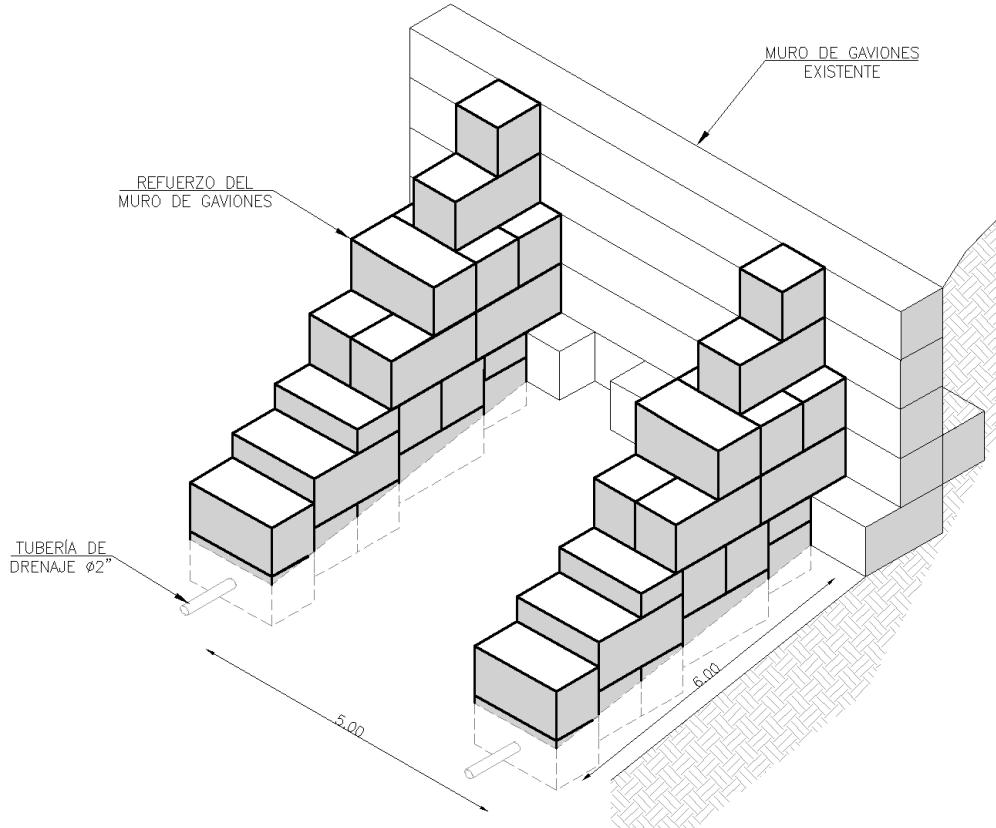
Para la conformación de un DDV de una línea de flujo, se instaló una estructura de gravedad tipo gaviones para confinar el relleno y la tubería se instaló en la parte alta del muro sobre la superficie del terreno.





## CASO 2: ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN

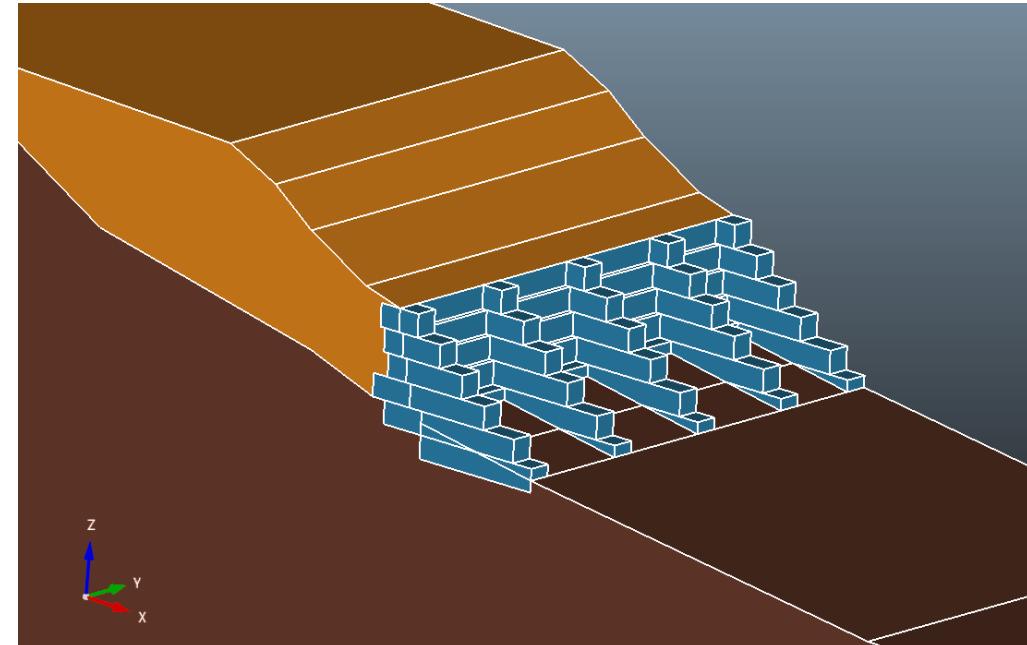
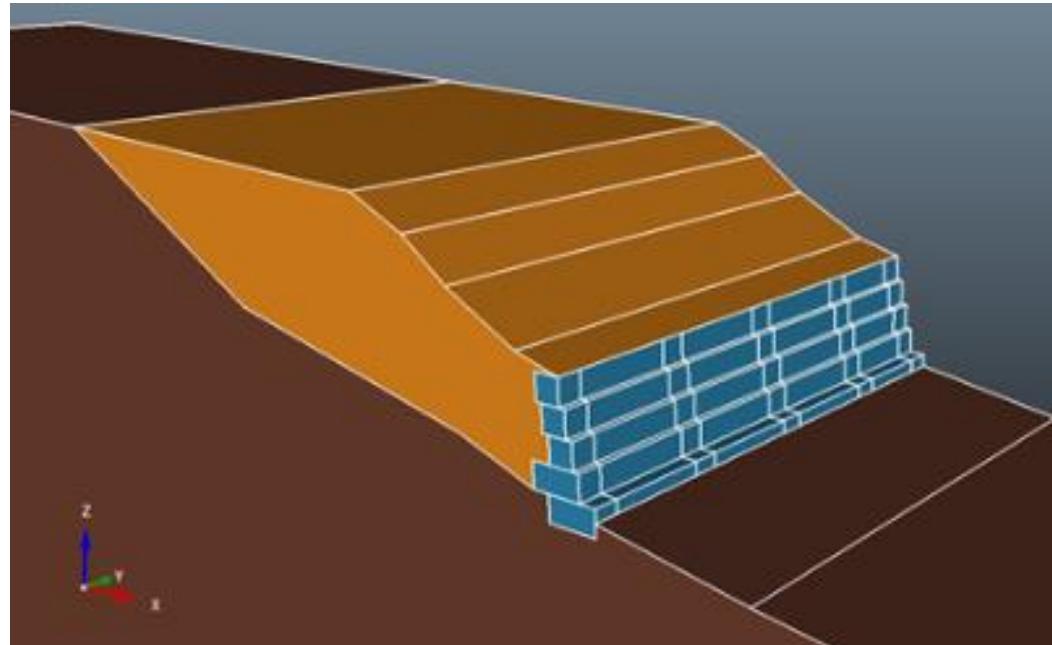
Para evitar que sigan incrementando los desplazamientos de la estructura de contención, se recomendó instalar gaviones adicionales que soporten cargas de compresión, dispuestos de manera de puntales





## CASO 2: ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN

Para evitar que sigan incrementando los desplazamientos de la estructura de contención, se recomendó instalar gaviones adicionales que soporten cargas de compresión, dispuestos de manera de puntales

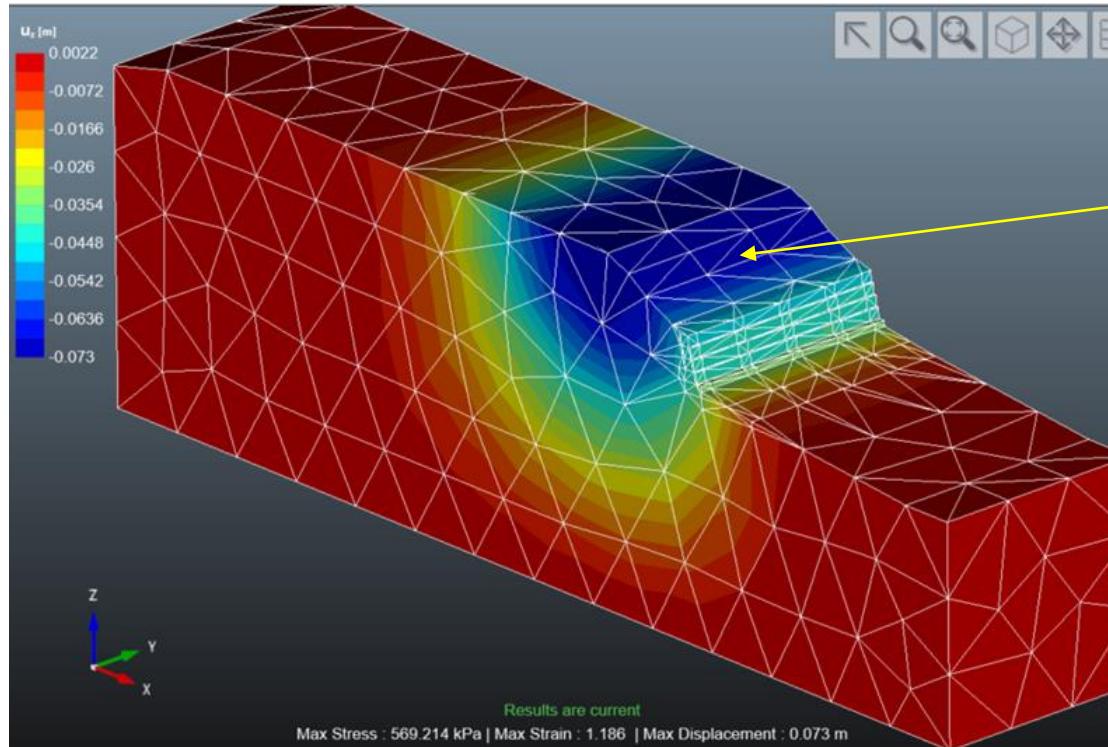


Material	E (MPa)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	C' (kPa)	φ (°)
Material Natural	25	18.0	15	32
Relleno	30	19.0	5	30
Gaviones	50	17.0	70	60



## CASO 2: ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN

Para evitar que sigan incrementando los desplazamientos de la estructura de contención, se recomendó instalar gaviones adicionales que soporten cargas de compresión, dispuestos de manera de puntales

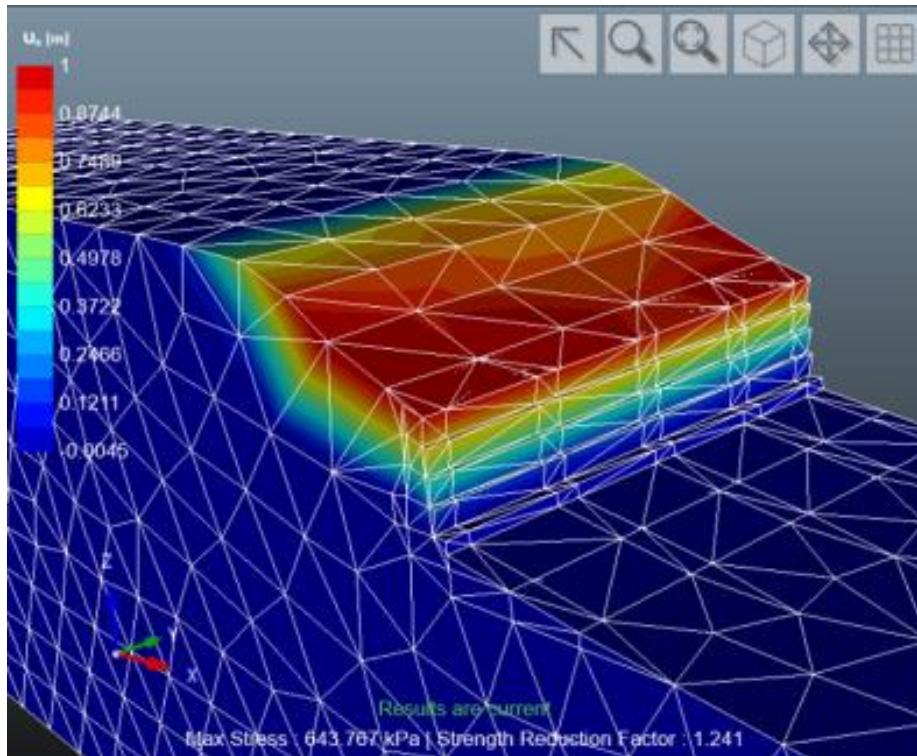


Desplazamiento del orden de 10cm

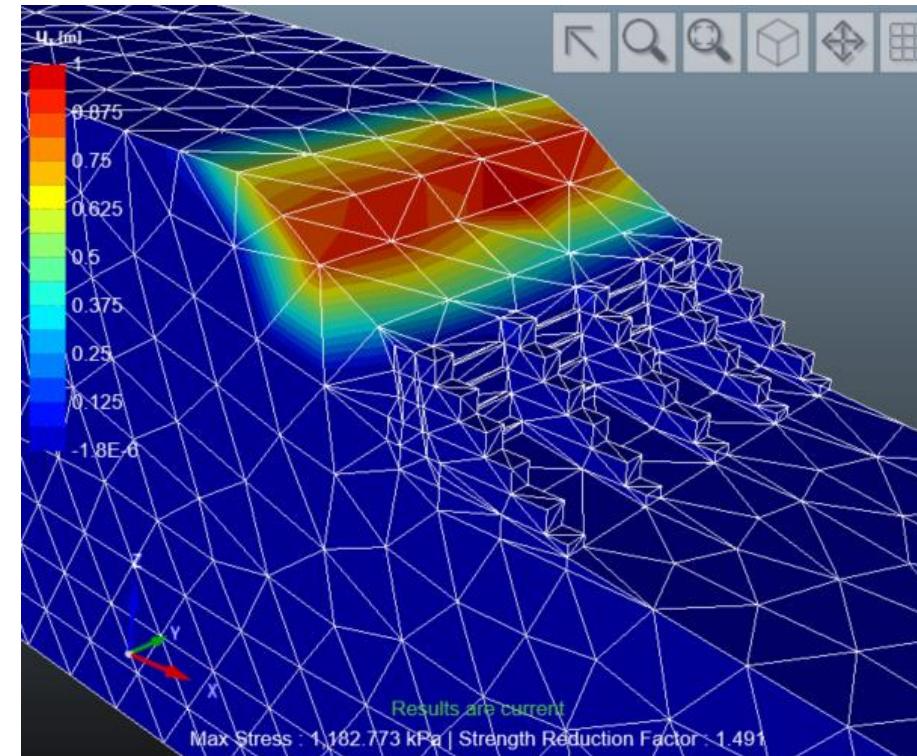


## CASO 2: ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN

Para evitar que sigan incrementando los desplazamientos de la estructura de contención, se recomendó instalar gaviones adicionales que soporten cargas de compresión, dispuestos de manera de puntales



FS = 1.2



FS = 1.5



## CASO 2: ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN

Para evitar que sigan incrementando los desplazamientos de la estructura de contención, se recomendó instalar gaviones adicionales que soporten cargas de compresión, dispuestos de manera de puntales





## CASO 3: TUBERÍA SOMETIDA A CARGAS DE DESLIZAMIENTO



\*Fotografías tomadas por el Ingeniero Jaime Aristizábal



\*Fotografías tomadas por Jose Vicente Amórtegui Gil



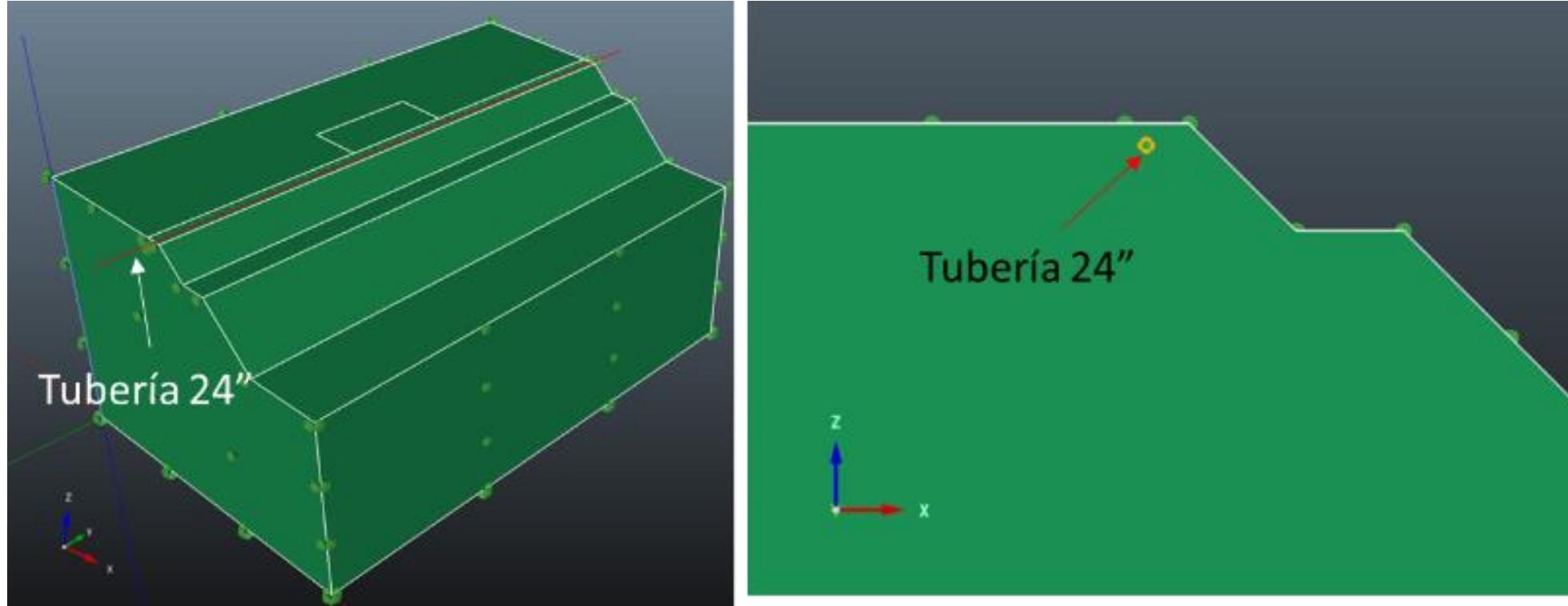
## CASO 3: TUBERÍA SOMETIDA A CARGAS DE DESLIZAMIENTO





## CASO 3: TUBERÍA SOMETIDA A CARGAS DE DESLIZAMIENTO

Modelo tridimensional en el programa Optum G3 para determinar el comportamiento de una tubería ante un proceso de inestabilidad

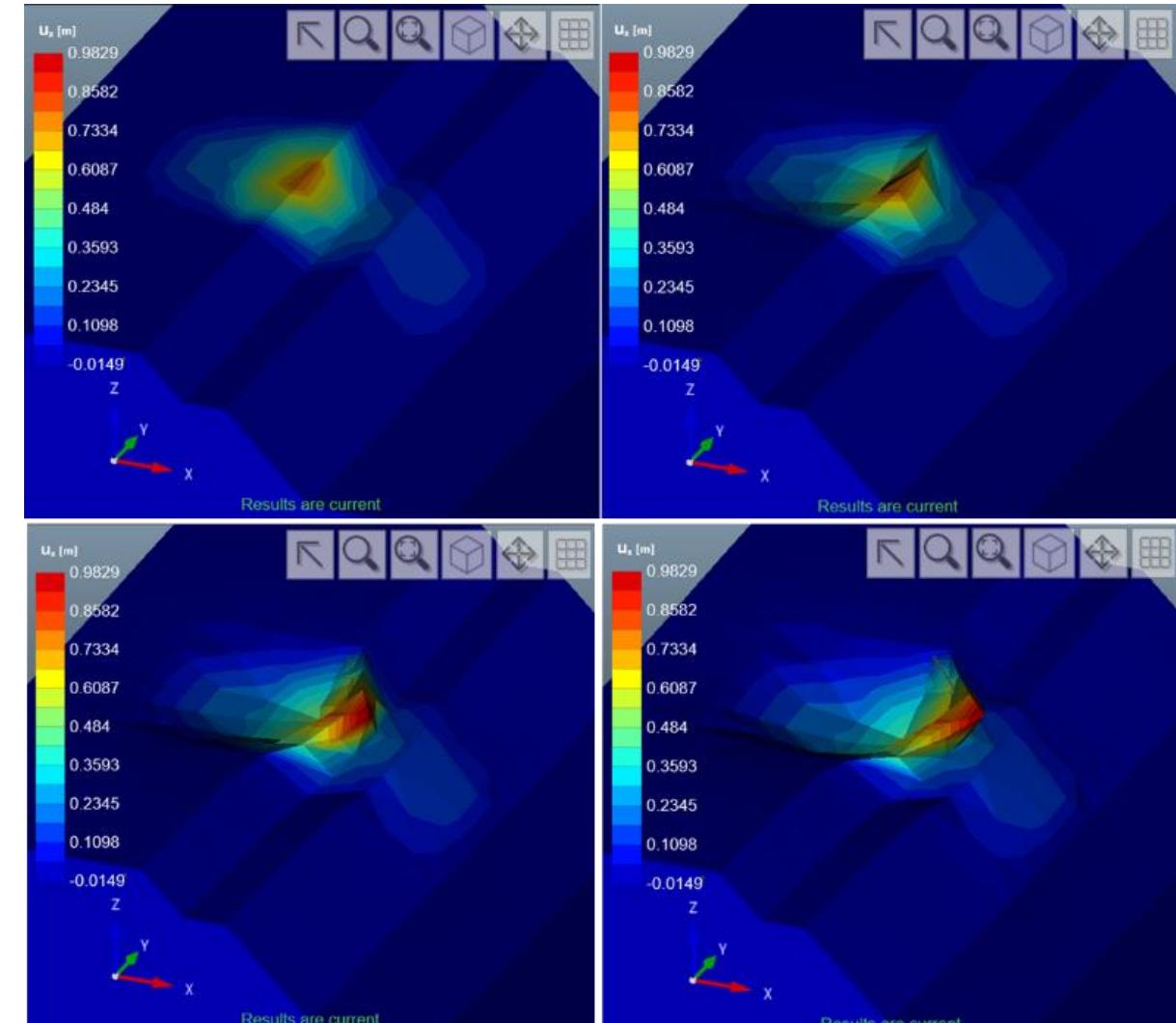
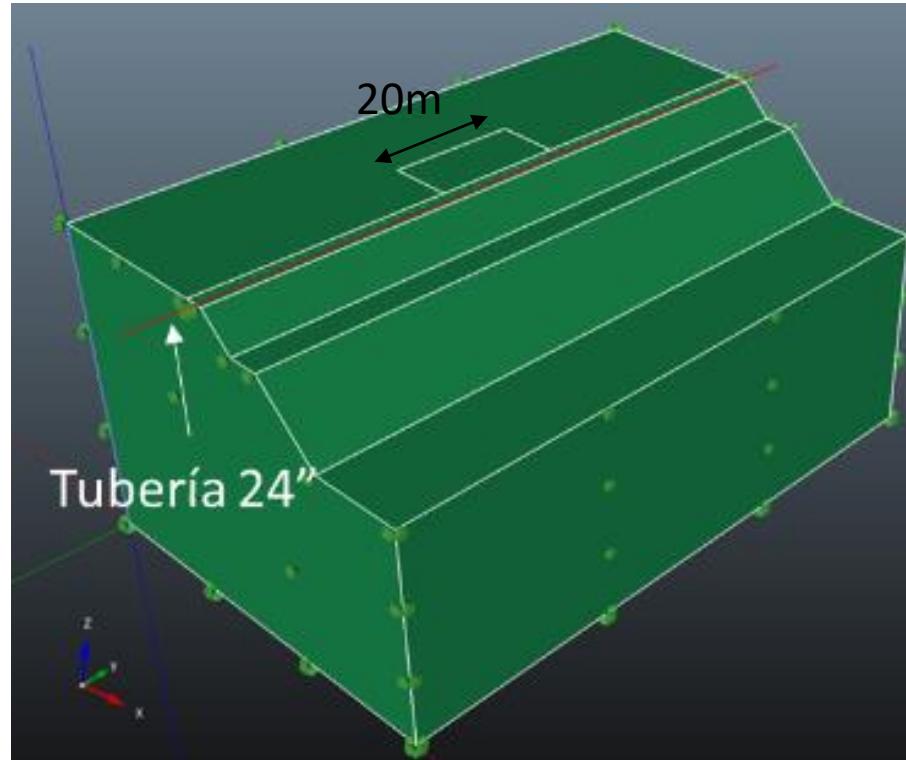


Material	E (MPa)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	C' (kPa)	φ (°)
<b>Suelo</b>	30	18.0	10	35
<b>Tubería</b>	E (MPa)	Momento de inercia (m <sup>4</sup> /m)	Resistencia de fluencia (MPa)	Sección área (m <sup>2</sup> /m)
<b>API 5LX65</b>	2E+05	7E-08	448	9.525E-3



## CASO 3: TUBERÍA SOMETIDA A CARGAS DE DESLIZAMIENTO

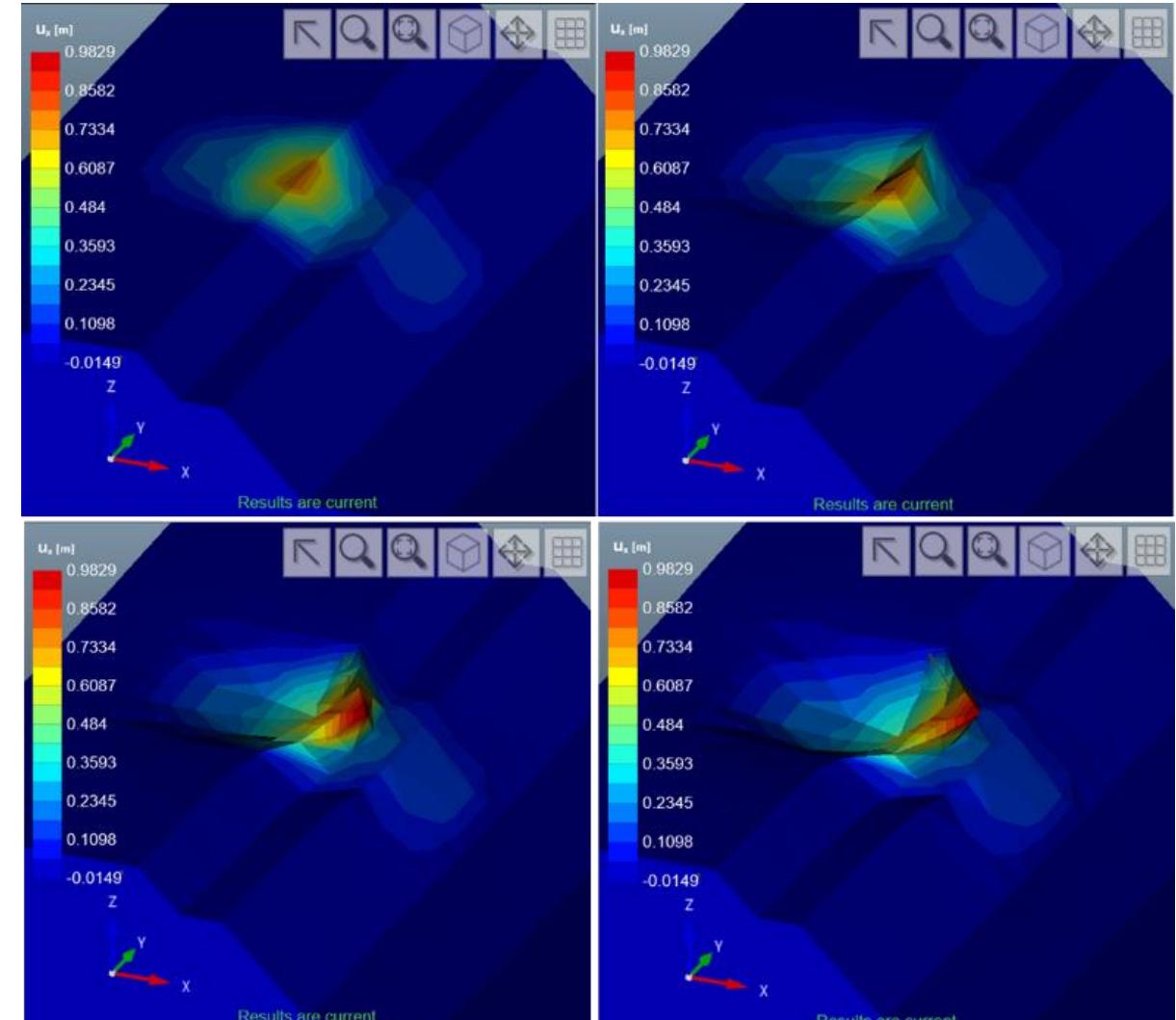
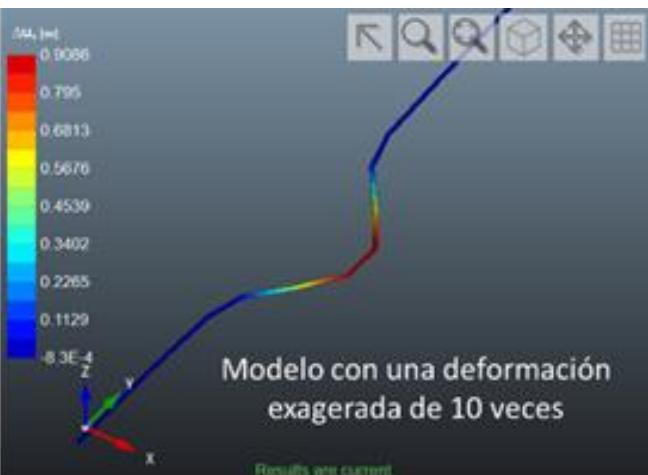
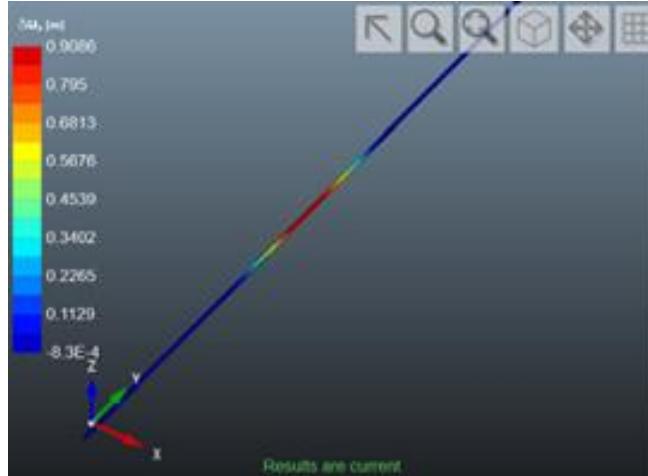
Modelo tridimensional en el programa Optum G3 para determinar el comportamiento de una tubería ante un proceso de inestabilidad





## CASO 3: TUBERÍA SOMETIDA A CARGAS DE DESLIZAMIENTO

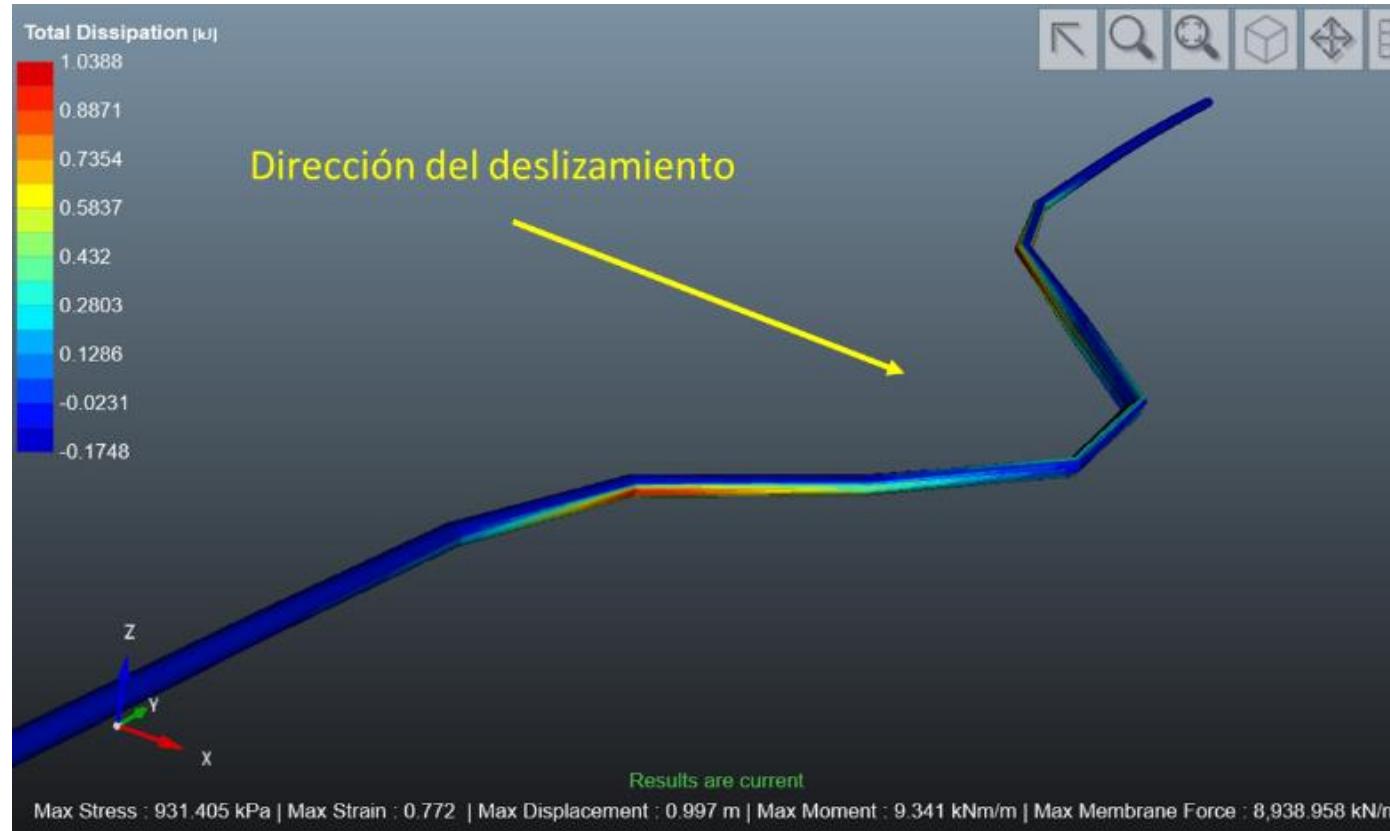
Modelo tridimensional en el programa Optum G3 para determinar el comportamiento de una tubería ante un proceso de inestabilidad





## CASO 3: TUBERÍA SOMETIDA A CARGAS DE DESLIZAMIENTO

Modelo tridimensional en el programa Optum G3 para determinar el comportamiento de una tubería ante un proceso de inestabilidad



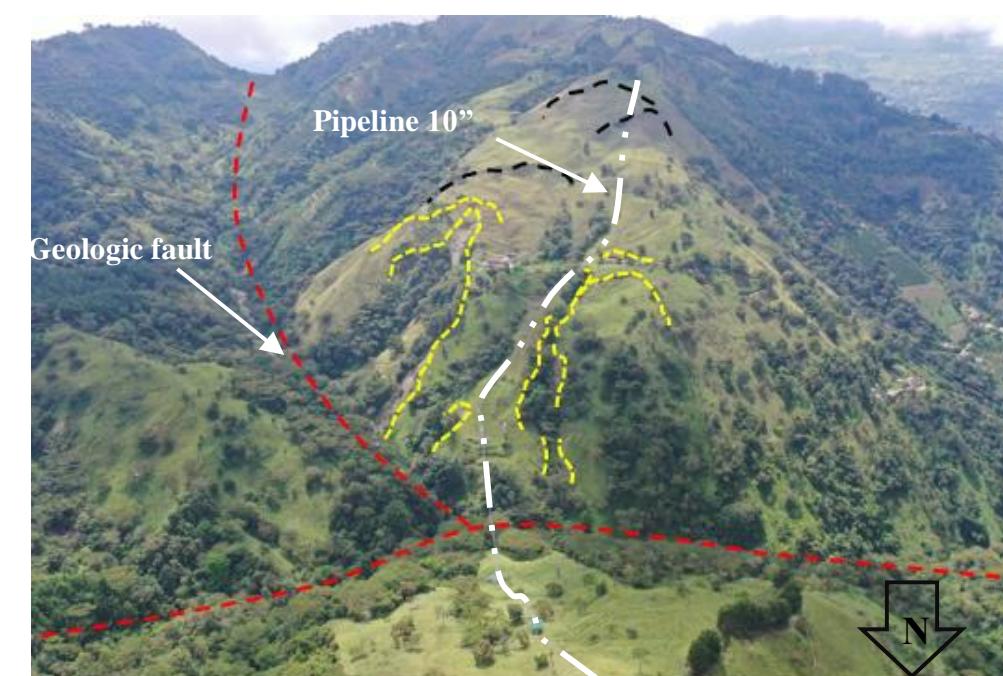
Al incluir dentro del modelo de análisis las propiedades de resistencia y deformación de la tubería, es posible obtener los momentos flectores y cargas axiales que sufre la tubería ante un proceso de inestabilidad, para este caso el momento flector máximo obtenido del análisis en elementos finitos es de 9340 kNm/m y una fuerza axial de 8938 kN/m



## CASO 4: ANÁLISIS NUMÉRICO EN UNA ZONA DE ALTA COMPLEJIDAD GEOTÉCNICA

Los deslizamientos de tierra son parte de los procesos naturales de denudación de la tierra y como tales, no se consideran totalmente manejables, pero los riesgos que pueden generar eventualmente pueden evitarse.

En las líneas de transporte de hidrocarburos, los deslizamientos de tierra son una de las principales amenazas que causan daños. Se presenta un análisis detallado para una zona de alta complejidad geotécnica, donde el oleoducto se ve afectado constantemente por movimientos del terreno.





## CASO 4: ANÁLISIS NUMÉRICO EN UNA ZONA DE ALTA COMPLEJIDAD GEOTÉCNICA



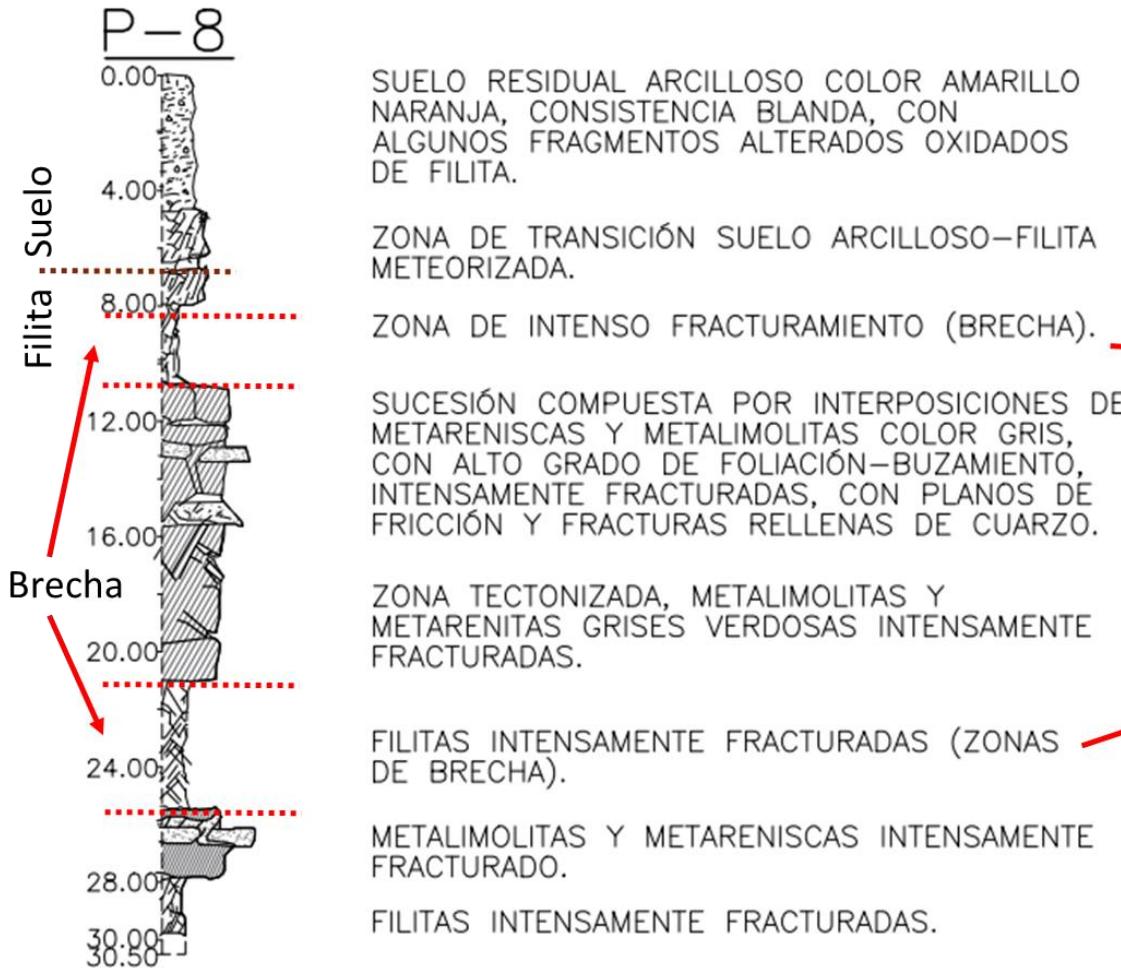


## CASO 4: ANÁLISIS NUMÉRICO EN UNA ZONA DE ALTA COMPLEJIDAD GEOTÉCNICA





## CASO 4: ANÁLISIS NUMÉRICO EN UNA ZONA DE ALTA COMPLEJIDAD GEOTÉCNICA



M2: 0.70m  
- 1.20m



M12: 5.70m  
- 6.20m



M15: 8.00m  
- 9.50m

M20: 15.50m - 17.00m



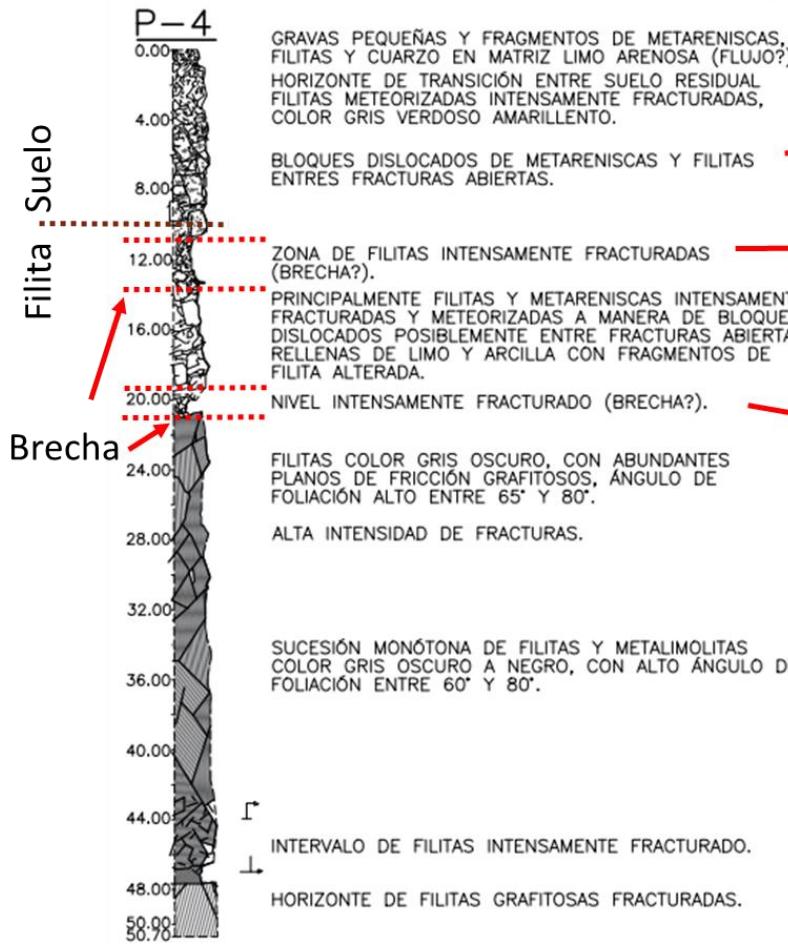
M25: 23.00m -  
24.50m

M27: 26.00m -  
27.50m





## CASO 4: ANÁLISIS NUMÉRICO EN UNA ZONA DE ALTA COMPLEJIDAD GEOTÉCNICA



M1: 0.00m  
- 0.50m



M4: 2.50m  
- 3.00m



M7: 4.00m  
- 5.00m



M15: 11.00m - 12.50m



M18: 15.50m  
- 16.30m

M22: 20.00m  
- 21.50m

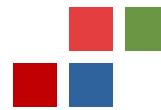


M23: 21.50m -  
23.00m

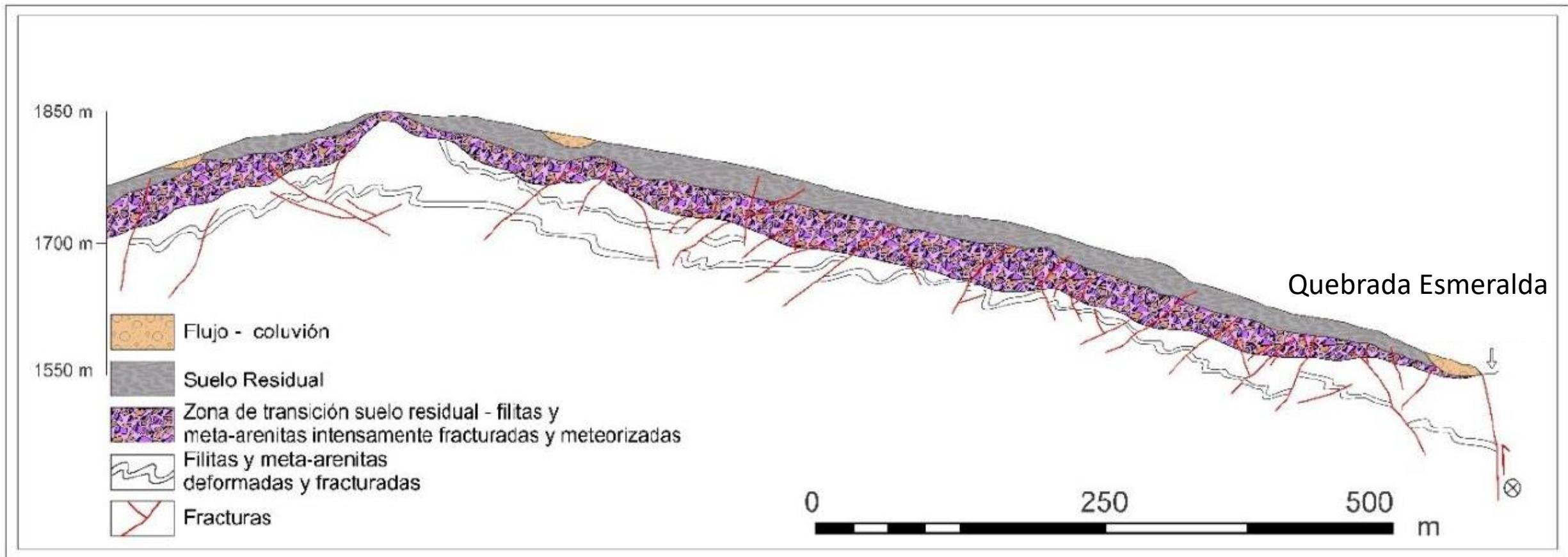


M32: 34.00m -  
35.00m





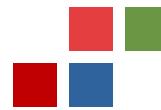
## CASO 4: ANÁLISIS NUMÉRICO EN UNA ZONA DE ALTA COMPLEJIDAD GEOTÉCNICA



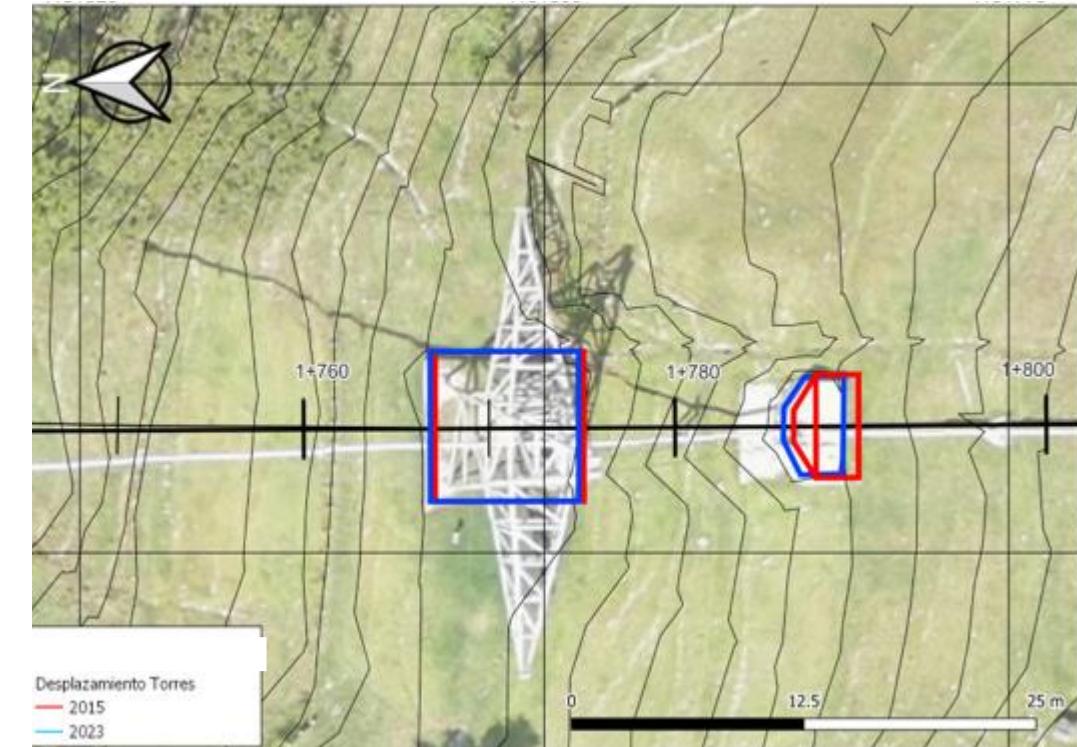
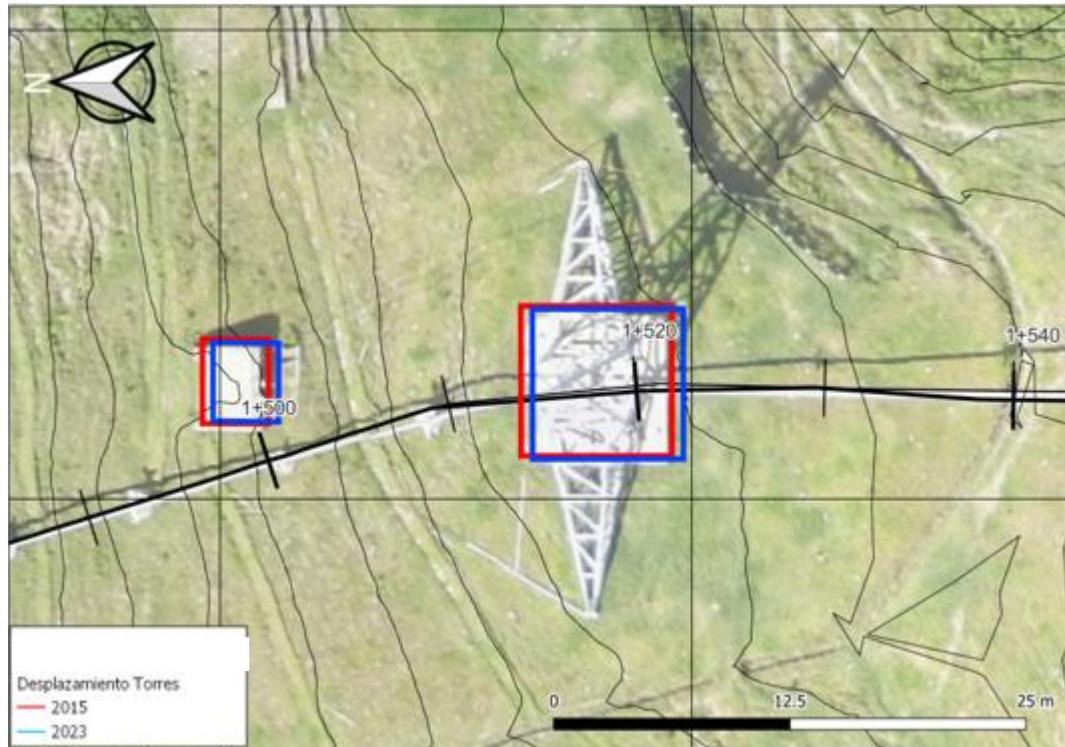


## CASO 4: ANÁLISIS NUMÉRICO EN UNA ZONA DE ALTA COMPLEJIDAD GEOTÉCNICA



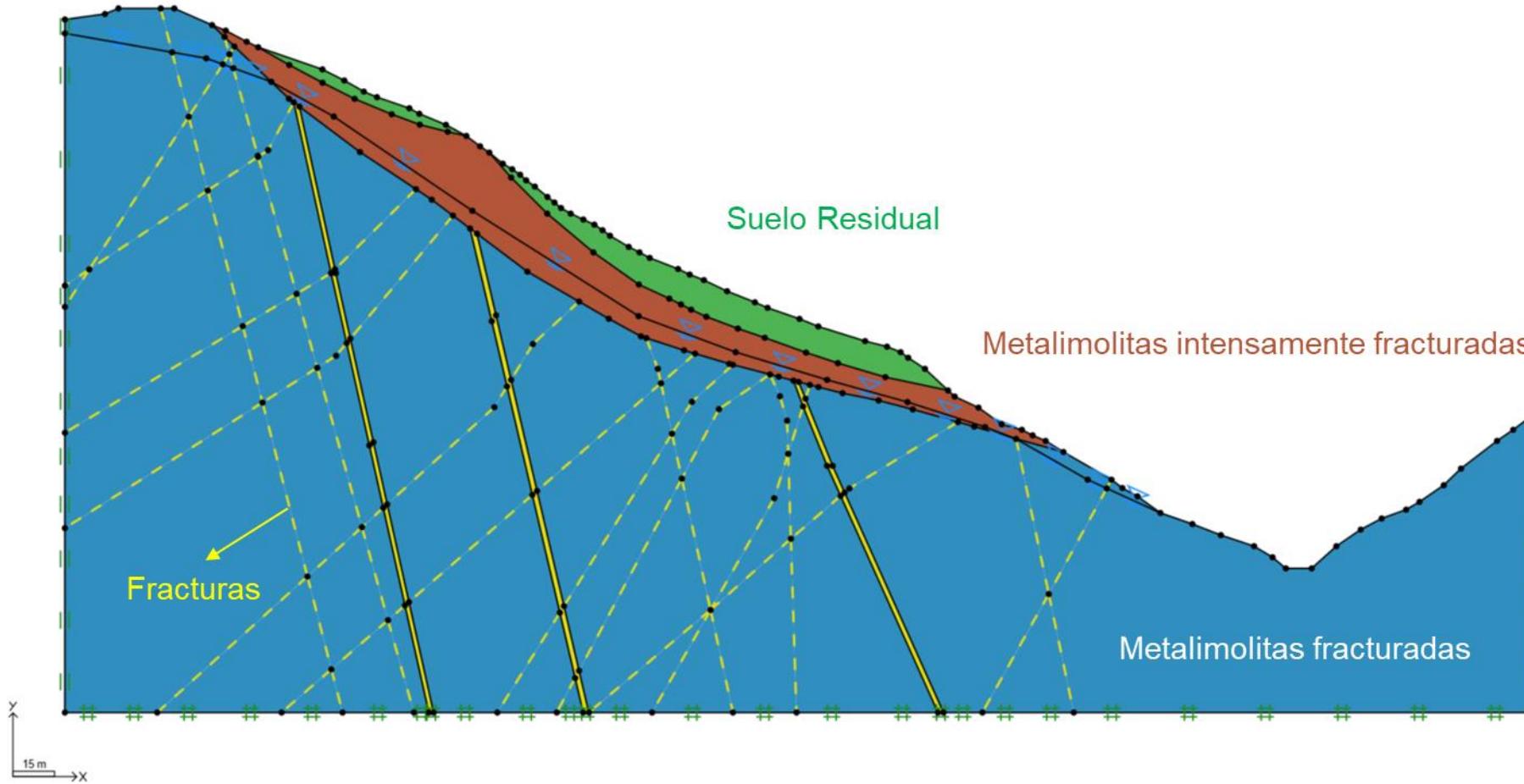


## CASO 4: ANÁLISIS NUMÉRICO EN UNA ZONA DE ALTA COMPLEJIDAD GEOTÉCNICA



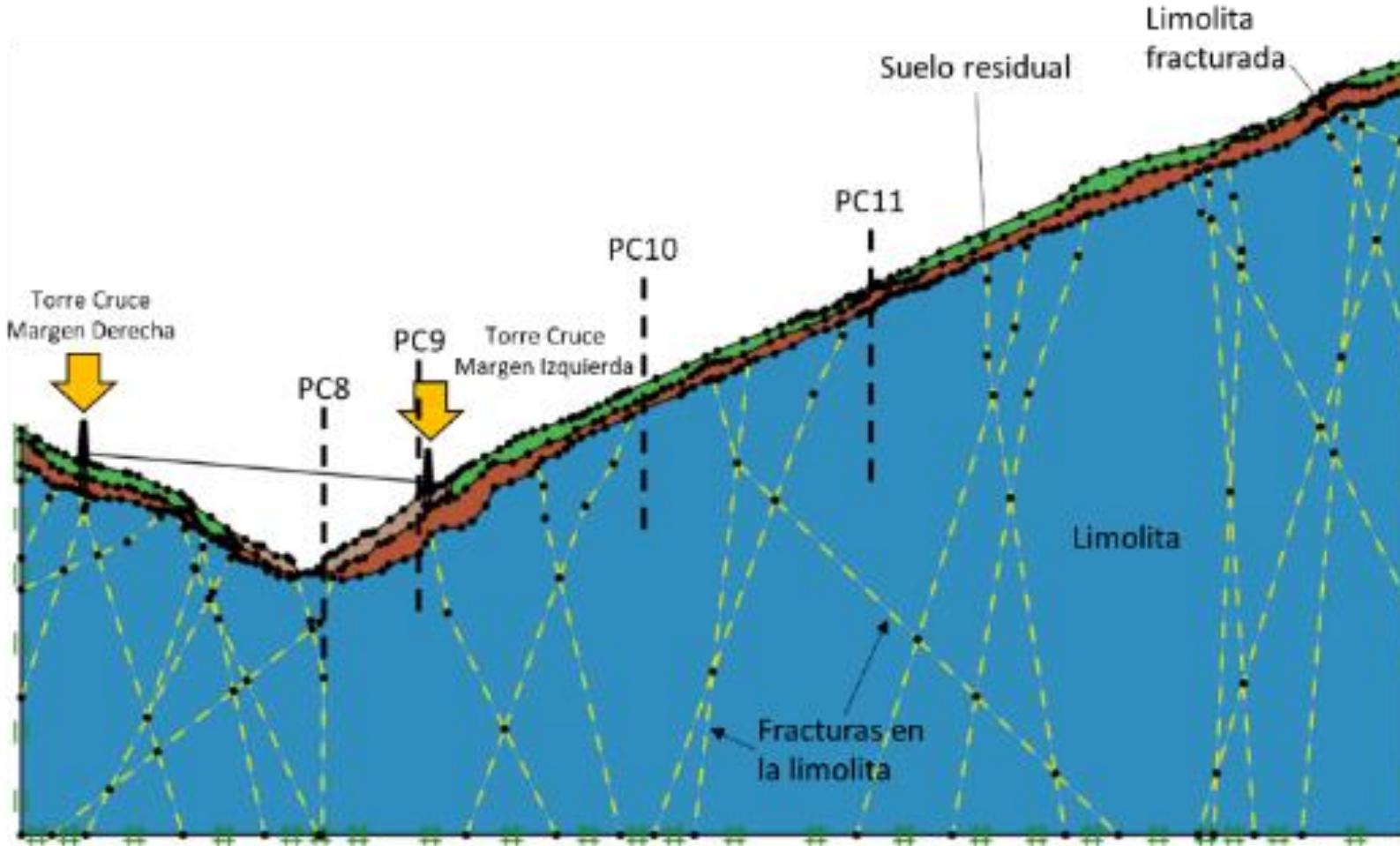


## CASO 4: ANÁLISIS NUMÉRICO EN UNA ZONA DE ALTA COMPLEJIDAD GEOTÉCNICA





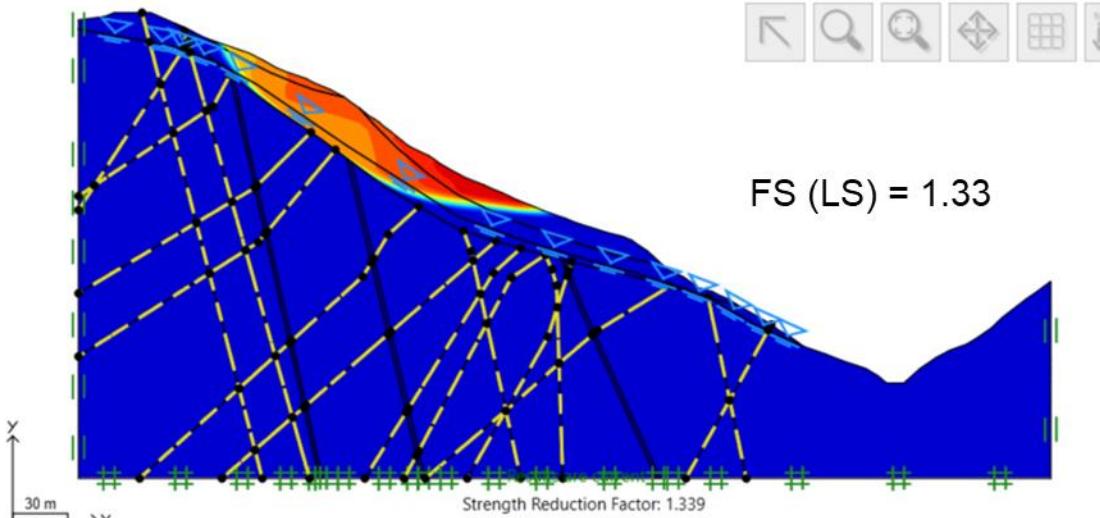
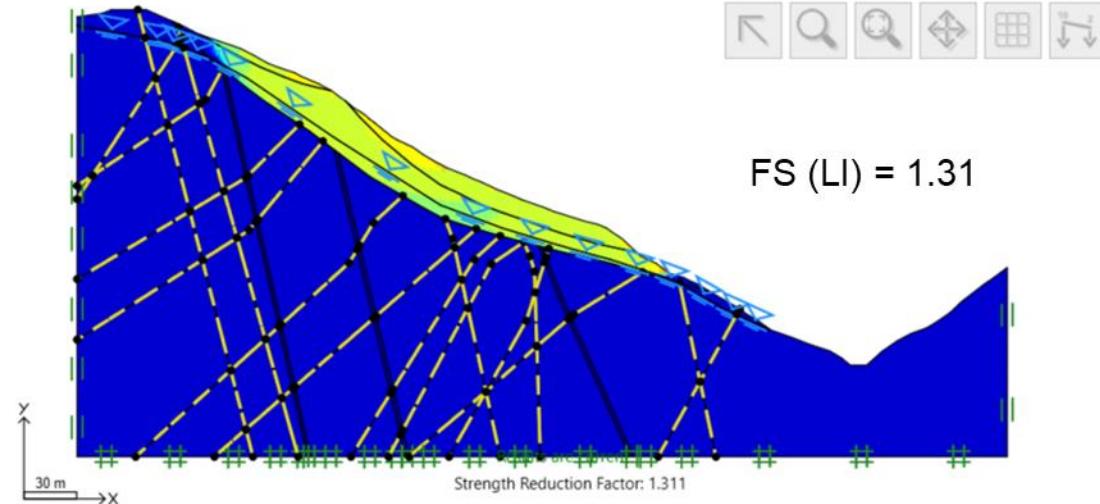
## CASO 4: ANÁLISIS NUMÉRICO EN UNA ZONA DE ALTA COMPLEJIDAD GEOTÉCNICA





## CASO 4: ANÁLISIS NUMÉRICO EN UNA ZONA DE ALTA COMPLEJIDAD GEOTÉCNICA

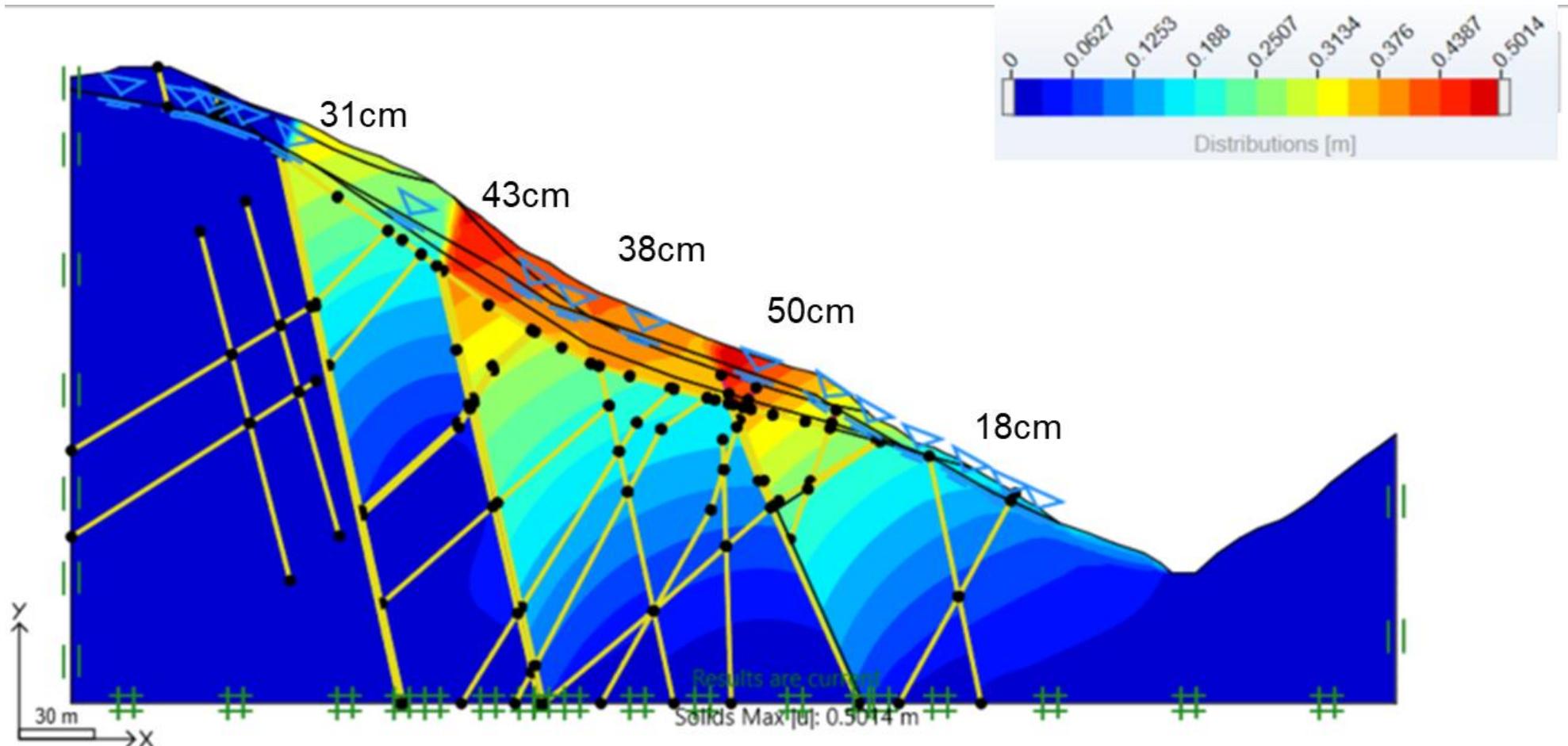
Factor de Seguridad condición inicial





## CASO 4: ANÁLISIS NUMÉRICO EN UNA ZONA DE ALTA COMPLEJIDAD GEOTÉCNICA

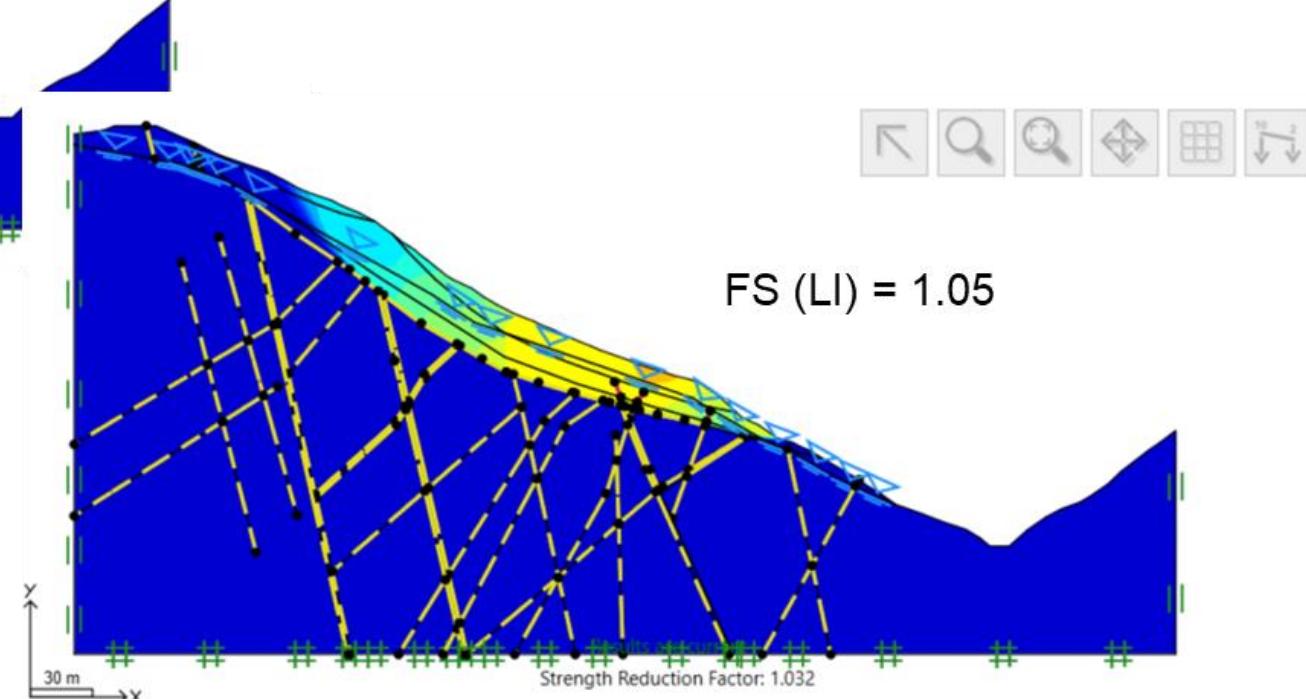
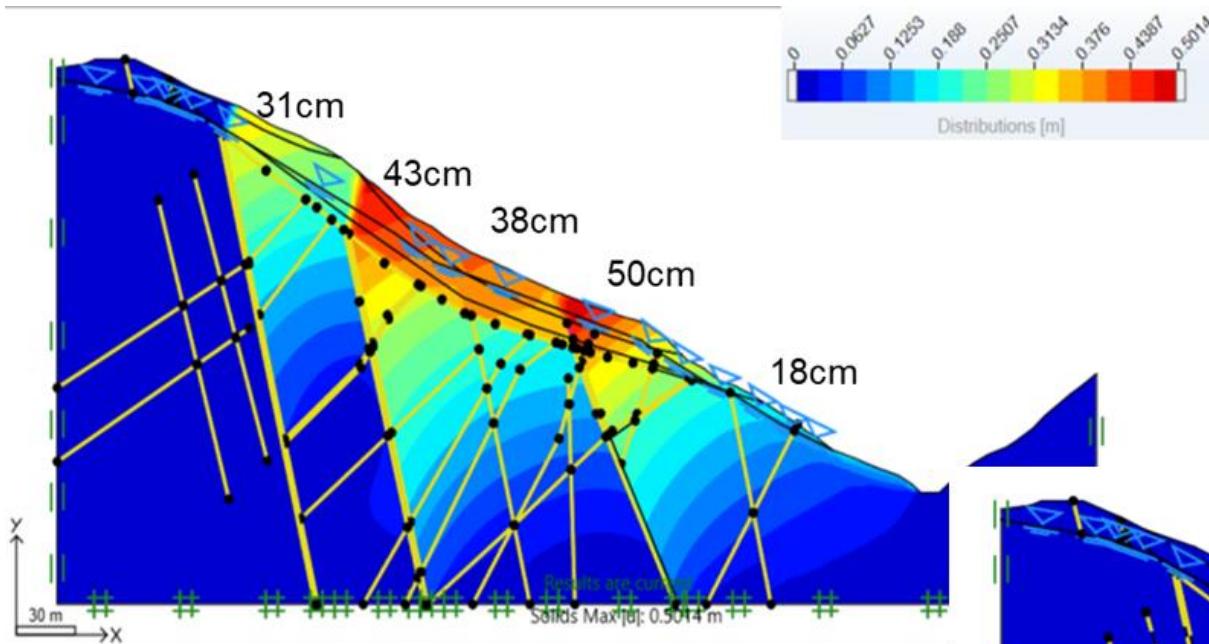
Desplazamientos horizontales debido a un incremento en la lámina de agua

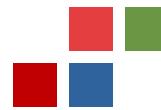




## CASO 4: ANÁLISIS NUMÉRICO EN UNA ZONA DE ALTA COMPLEJIDAD GEOTÉCNICA

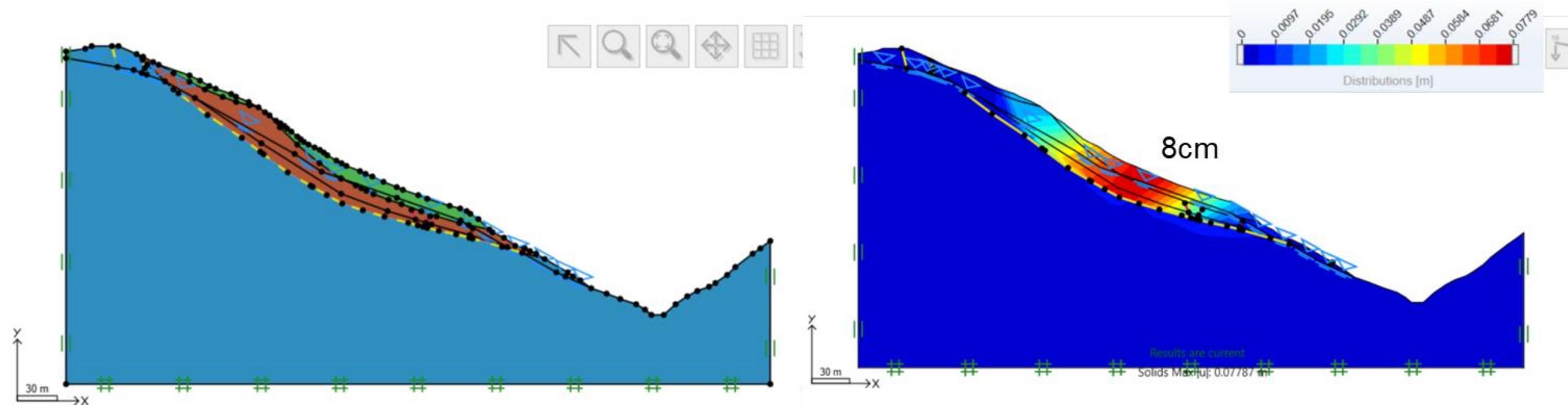
Desplazamientos horizontales debido a un incremento en la lámina de agua





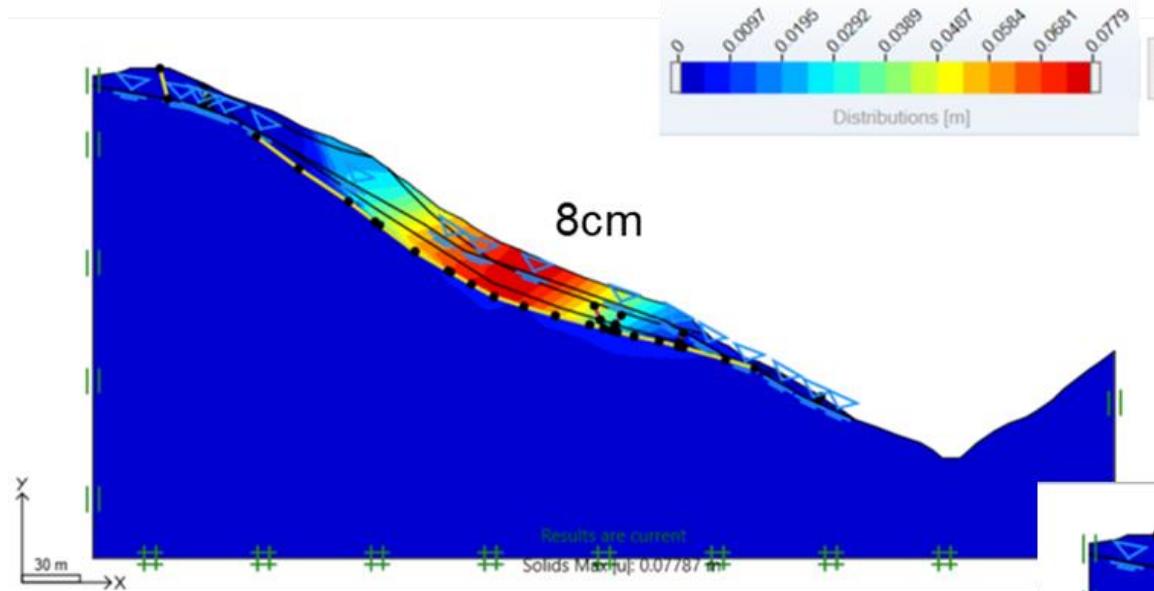
## CASO 4: ANÁLISIS NUMÉRICO EN UNA ZONA DE ALTA COMPLEJIDAD GEOTÉCNICA

Desplazamientos horizontales sin tener en cuenta las zonas de corte (fracturas a más de 30m de profundidad)

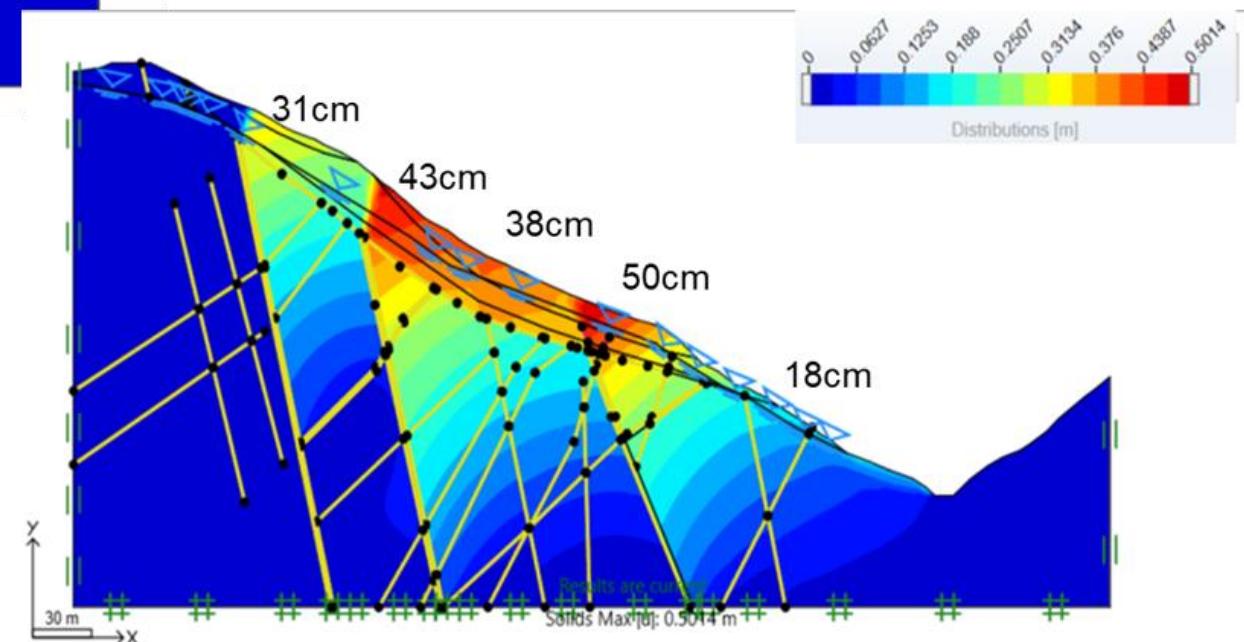




## CASO 4: ANÁLISIS NUMÉRICO EN UNA ZONA DE ALTA COMPLEJIDAD GEOTÉCNICA



Influencia de las fracturas en los desplazamientos superficiales





## CONCLUSIONES

Con el método de los elementos finitos se permite modelar heterogeneidad, anisotropía, condiciones de frontera complicadas, condiciones de carga complejas y geometrías arbitrarias.

A diferencia de los métodos de equilibrio límite, el método de los elementos finitos no requiere realizar hipótesis de la forma de la superficie de falla previa a la realización del análisis. La “forma” de la superficie de falla es un resultado del análisis de elementos finitos, y se puede observar en los campos de desplazamiento o de deformación.

De acuerdo con los resultados obtenidos de algunos casos prácticos en los cuales se empleó el Método de los Elementos Finitos (MEF) se pudo analizar el efecto de esfuerzo - deformación que generan los desplazamientos ocasionados por procesos de inestabilidad geotécnica y cargas de impacto sobre la infraestructura del transporte de hidrocarburos, los cuales ayudan a disminuir las incertidumbres en los diseños de obras.

Al poder incluir las propiedades de resistencia y deformación de las tuberías en los análisis de Elementos Finitos, es posible realizar la interacción suelo – tubería, para obtener no solo desplazamientos del terreno, sino también los momentos flectores y cargas axiales que están sometidos la tubería ante procesos de inestabilidad del terreno.