

SIMULACION COMPUTACIONAL MULTIMATERIAL NO LINEAL COMO HERRAMIENTA DE OPTIMIZACION DE LA GESTION DE INTEGRIDAD ANTE GEOAMENAZAS

Hernán G. Kunert^a, Jhon Malpartida^b

^aGIE S.A.-Área Integridad Mecánica - Argentina

e-mail: kunert@giegroup.net

^bCOGA.- Compañía Operadora de Gas del Amazonas.

e-mail: jmalpartida@coga.com.pe

Sinopsis

Los ductos que operan en áreas geotécnicamente inestables, sufren esfuerzos adicionales transmitidos por el movimiento de suelo. Asegurar su integridad depende, en parte, de la cuantificación de estos esfuerzos, deformaciones y desplazamientos, adicionales a los generados por presión interna). Las prácticas usuales de la industria del Oil & Gas acostumbran a tratar en forma aislada (o con escasa vinculación) los aspectos de geoamenazas y los aspectos de integridad mecánica del ducto.

Transportadora de Gas del Perú (TGP), y sus operadoras, son pionera en gestión integrada. El sistema de ductos que opera atraviesa geografías muy complejas y susceptibles a procesos geotécnicos que inestabilizan el derecho de vía, agravadas por las extremas lluvias estacionales que ocurren en la selva amazónica. Gie es un activo consultor desde 2007 y trabaja junto a TGP desarrollando nuevas tecnologías aplicadas a la gestión de integridad y optimización de procesos.

Como parte de esa optimización, el presente estudio implementa diferentes modelos de interacción suelo-ducto con los siguientes objetivos particulares:

- Nivel de desplazamientos necesarios a nivel de suelo para producir deformaciones plásticas elevadas (por ejemplo una arruga). El objetivo es que con esta información se retroalimente al proceso de evaluación del riesgo de las geoamenazas y poder definir a su vez valores que signifiquen la necesidad de ejecutar acciones en campo para la mitigación de dichos riesgos.
- Establecer los sitios más adecuados para la instalación de nueva instrumentación de monitoreo para la gestión futura de integridad.

Se ha integrado toda la información en un modelo de interacción suelo-ducto valiéndose de las capacidades del software Simulia® (propiedad intelectual de Dassault Systèmes) como herramienta de simulación geomecánica. Se ha incluido los estratos de suelo, la información de monitoreo en campo y la no linealidad geométrica y material. Se realizaron dos simulaciones numéricas: la “A”, con los desplazamientos medidos en terreno mediante monitoreo topográfico; y la “B”, en la cual se generó, mediante proceso iterativo, un desplazamiento que fuera capaz de generar un estado tensional capaz de producir una arruga.

De este modo, se concluyó sobre los valores de desplazamiento que pueden poner en riesgo al sistema de transporte, se confirmó el carácter local de los instrumentos de medición utilizados y se definieron los sitios más adecuados para la instalación de instrumentación adicional.

Introducción

Con la baja mundial de precios del petróleo, disminuir el costo operativo (OPEX por sus siglas en inglés) o mantenerlo acotado, se ha convertido en el principal desafío de los operadores. Si bien las normas internacionales API, ASME, ISO dan lineamientos específicos para la industria, se han generado nuevos

requerimientos normativos basados en los protocolos medioambientales internacionales. Así los operadores responsables implementan esquemas de gestión de integridad mecánica para sus activos, sea como parte de acciones de gestión de seguridad de procesos, excelencia operativa o en forma eventual. Estos esquemas, normalmente, monitorean variables como presiones, caudales, temperaturas, vibraciones, tasas de corrosión o profundidad y largo de fisuras, entre otros. Sin embargo, las geo-amenazas parecieran representar un área de vacancia en la industria, donde aún no existe consenso ni prácticas recomendadas para gestionar el riesgo asociado. Clara evidencia de esto lo conforman los últimos ASME International Pipeline Geotechnical Conference (en sus desarrollos IPG2013 [1], IPG2015 [2] y la que se realizará en 2017[3]) o la Guía de Geo-amenazas desarrollada por ARPEL en 2015, como sanos intentos de contribuir al desarrollo de las estrategias necesarias.

En la misma línea, profesionales de Gie han aportado un capítulo completo sobre el particular en el “Handbook of Materials Failure Analysis With Case Studies from the Oil and Gas Industry” (2016 Elsevier Ltd. ISBN: 978-0-08-100117-2) [4].

Un compendio específico es el libro “Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales” del Profesor Jaime Suarez Diaz [5].

Lo anterior pone de manifiesto la necesidad del sector por avanzar en aspectos técnicos sobre la gestión sistemática de las geo-amenazas. El impulsor principal de esta preocupación proviene del elevado número de fallas, ocurridas durante la última década, cuya causa raíz se adjudicó Geo Amenazas. Ejemplos recientes como la rotura en Julio del año 2000 de un ducto en el sur de Brasil, donde se derramaron cuatro millones de litros de crudo al Río Iguazú, o los 14000 barriles que se derramaron en la amazonia ecuatoriana cuando en Febrero de 2009 falló un oleoducto de crudos pesados. Una falla de estas características para un operador en Sudamérica con una capacidad de transporte promedio de 600000bdpd, considerando un precio del barril de petróleo del orden de los 40 U\$S/bdp (WTI 39,43 U\$S/bdp al 30-3-16) y una reparación simple de tres días implica una pérdida de 72 millones de dólares. La cifra, de por sí muy significativa, no contempla aspectos colaterales como remediación medioambiental, penalizaciones y multas, gastos de logística en zonas de difícil acceso, costos de imagen pública, reputación y primas de seguros.

Desde un punto de vista específicamente técnico, los ductos soterrados son estructuras que interactúan con el suelo de fundación y su medio circundante. Antecedentes de fallas en ductos de compañías transportadoras y operadoras de gas y petróleo han revelado que los movimientos de suelo y su traspaso de cargas asociadas, así como los aspectos vinculados a los cursos de agua en inmediaciones de derecho de vía, juegan un papel determinante en la integridad de ductos. Cuando los ductos están implantados en áreas inestables, son sometidos a esfuerzos adicionales transmitidos por el movimiento del suelo; esfuerzos que no son contemplados por los códigos de diseño. Cuando la zona es sísmica y tropical (o subtropical), aspectos hídricos superficiales o sub-superficiales colaboran significativamente a agravar el problema. En estos casos, asegurar la integridad del ducto depende, en parte, de poder cuantificar los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos que sufre el ducto de modo adicional a su presión interna como producto de su interacción con el suelo.

Las prácticas tradicionales de la industria acostumbraban a tratar en forma separada (o con muy escasa vinculación) los aspectos de integridad geotécnica y los aspectos de integridad del ducto propiamente dicho. Sin embargo, las nuevas tecnologías los vinculan a través de la simulación computacional, el monitoreo de la instrumentación integral en campo y las lecciones aprendidas en base a los análisis de causa raíz.

Resulta siempre relevante tomar conciencia de las consecuencias que implican las fallas producidas por la interacción suelo-ducto, en tal sentido se podrían puntualizar aspectos tales como:

- Ocasionalmente pérdidas humanas
- Afectación social a pobladores
- Daño ambiental
- Afectación al ecosistema (flora, fauna, cursos de agua)
- Salida de producción con lucro cesante
- Focalización de los entes contralores
- Imagen negativa para la compañía
- Cuantiosos gastos de reparación
- Logística de reparación muy compleja
- Aumentos de primas de seguros

- Presión directa sobre directivos y profesionales del sector involucrado

Las **Figuras 1 y 2** ejemplifican claramente la severidad de las consecuencias (fotos extraídas de internet).



Figura 1: Falla y derrame en Israel.

La simulación computacional de interacción suelo-estructura por elementos finitos, la instrumentación con sensores de resistencia eléctrica, cuerda vibrante o fibra óptica, las alternativas en el monitoreo y la transmisión de datos, y el análisis de performance son tecnologías que GIE y TGP han desarrollado e implementado en los últimos diez años como parte de su sistema de gestión geo-estructural integrado, y algunos de sus aspectos principales y casos de éxito son presentados en este trabajo, demostrando cómo su implementación puede impactar favorablemente sobre las personas, el medio ambiente y finalmente, pero no menos importante, sobre el OPEX.



Figura 2: Falla y derrame en Venezuela.

Desarrollo

El caso seleccionado como ejemplo, forma parte de una larga y pronunciada ladera que discurre paralela al eje del ducto (que transporta líquidos de gas natural) por aproximadamente 800 metros (**Figura 3**). Como resultado de las inspecciones programadas sobre el derecho de vía los geotécnicos de campo advirtieron reactivación de los movimientos del suelo.

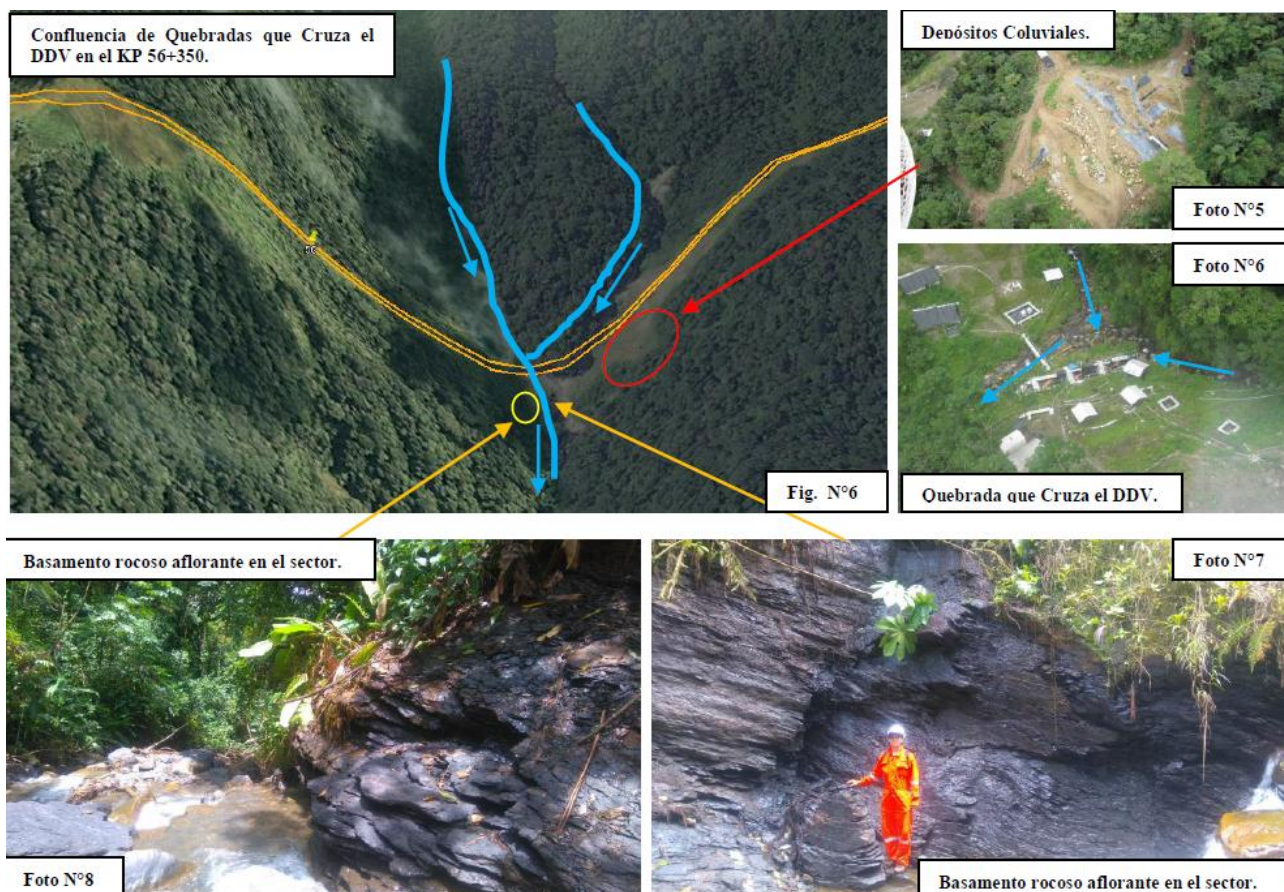


Figura 3: Vista de ladera y ducto. Confluencia de Quebradas que Cruza el DDV en el PK 56+350. Se Se agregan detalles. (Fuente Coga-TGP).

Se contaba con dos puntos de instrumentación mediante VWSG (Vibrating Wire Strain Gauges), ubicados en las PK 56+420 y PK 56+447. Estos instrumentos venían acusando lecturas moderadas de entre 200 y - 400 $\mu\epsilon$ atento al registro del 13/01/16 (**Figura 4**).

En la **Figura 5** se puede ver la zona donde están instalados los extensómetros VWSG; la zona donde están los mojones de monitoreo de movimiento de suelo; y el sector donde se observaron algunos escarpes indicativos de deslizamientos (**Figura 6**).

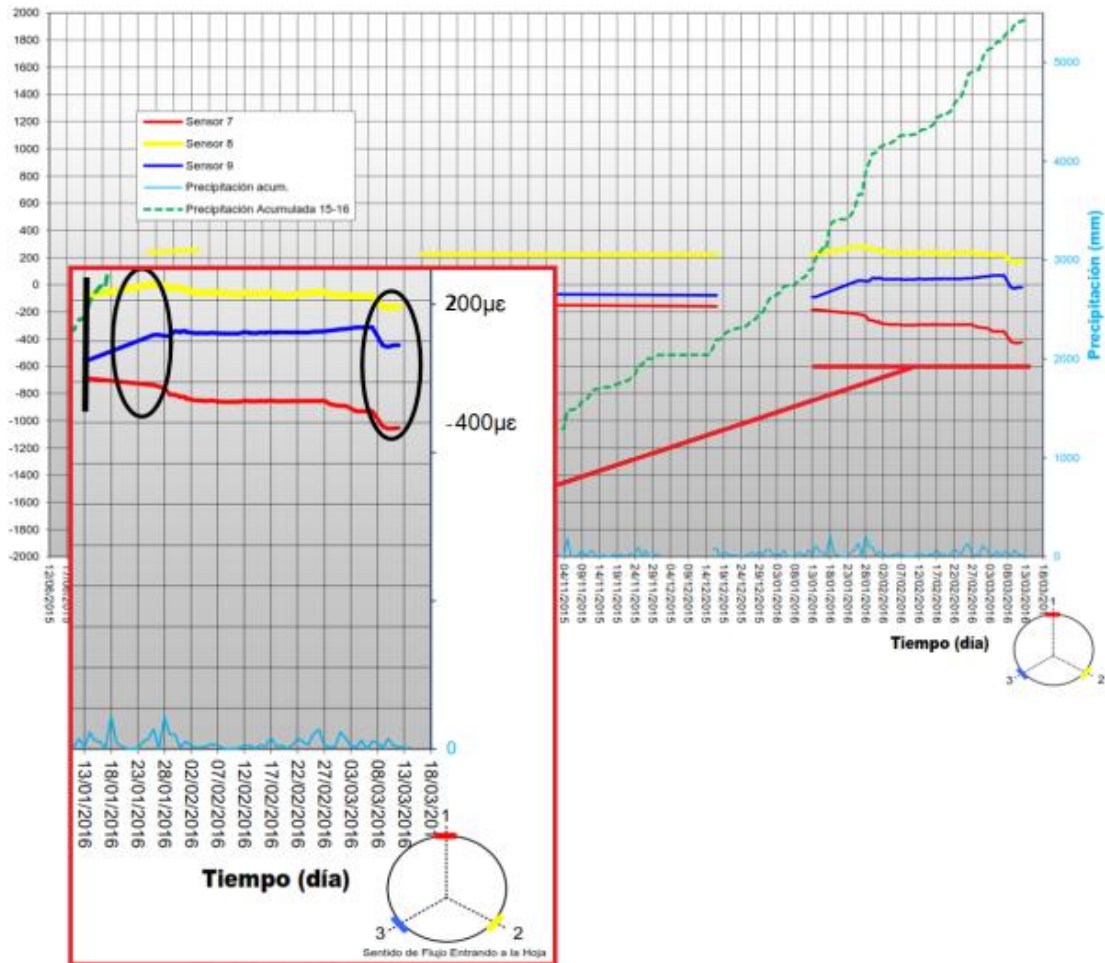


Figura 4: Registro de VWSG en PK 56+447

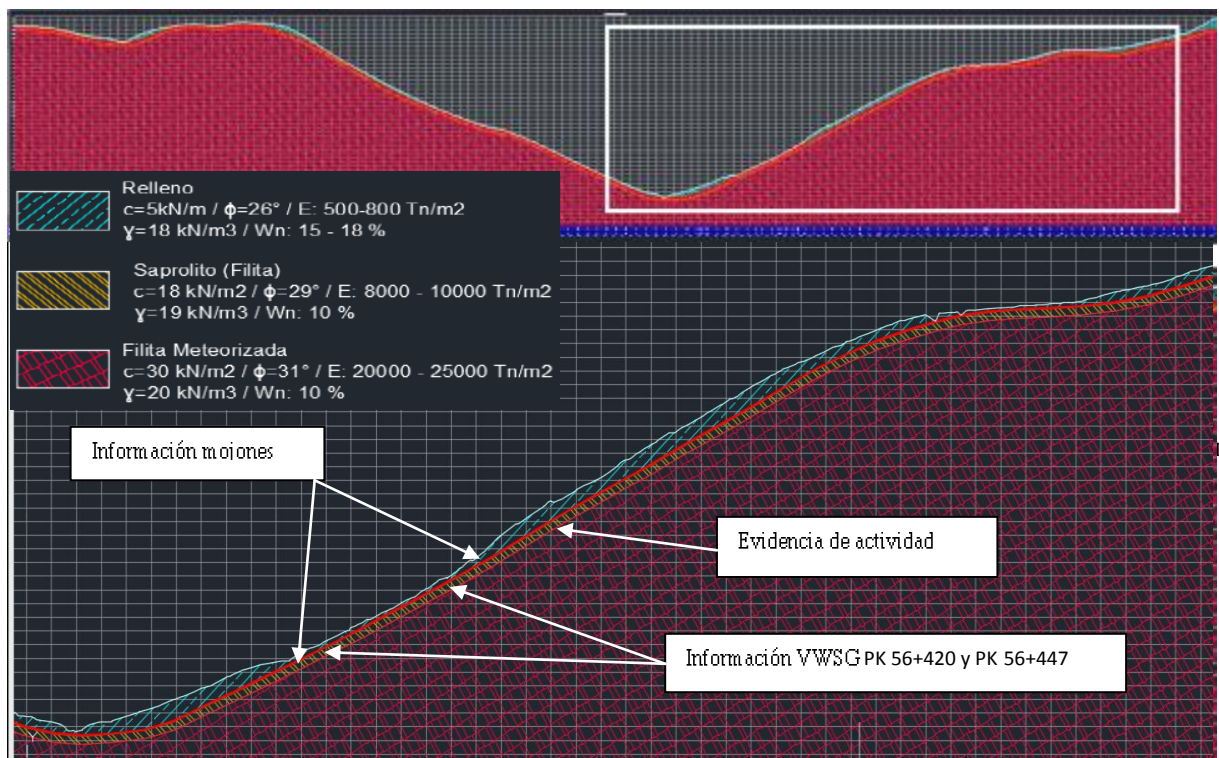




Figura 6: Grieta que evidencia actividad del suelo sobre el DDV (largo:8m, ancho:0.3m, profundidad:0.5m)

Para relacionar la información del movimiento del suelo con el nivel tensional y de deformación del ducto se desarrolló un modelo de interacción suelo ducto, valiéndose de las capacidades del software Simulia® (propiedad intelectual de Dassault Systèmes). Todo modelo correctamente desarrollado por el método de elementos finitos permite reproducir el comportamiento mecánico del suelo y del ducto (y su mutua influencia), lo que proporciona una herramienta única para la cuantificación de los parámetros que definen la resistencia e integridad del conjunto.

El ducto, construido en material API 5L X70 PSL2, tiene un diámetro de 14" y 5.56 mm de espesor nominal en la zona de análisis. Para generar el modelo, se utilizaron las coordenadas de las soldaduras, acotado al tramo de interés definido por las juntas indicadas en la **Tabla 1**.

Tabla 1: Referencias de inicio y fin del modelo

Junta id inicio	Dist. Modelo [m]
056/23	0
056/72	584,09

Las propiedades del acero del ducto se listan a continuación. El comportamiento plástico del mismo se presenta en la **Tabla 2**.

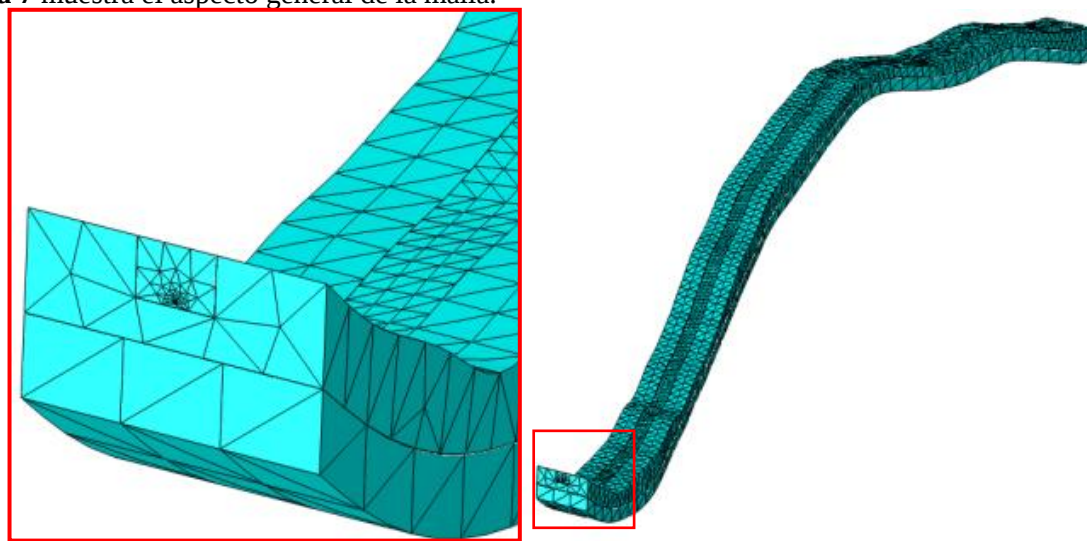
- Densidad: 7800 Kg/m³ (486 pound/ft³);
- Elasticidad, Módulo Young: 210000 MPa (3,045792e+007 psi)
- Módulo Poisson: 0,3

Tabla 2: Curva de deformación plástica para API 5L X70.

API 5L X70	
Tensión (MPa)	Deformación plástica (%)
480	0
510	0,005
565	0,17

Para los diferentes estratos de suelo se utilizan las propiedades y espesores definidos en **Figura 5**. Se generaron con Solidworks® (propiedad intelectual de Dassault Systèmes) las partes por separado (ducto, relleno y suelo -llamados saprolito y lutita-) para que, una vez importadas al software de cálculo Simulia

(propiedad intelectual de Dassault Systèmes), se unieran con ligadura¹. Se generaron las mallas de elementos finitos con elementos tetraédricos para el suelo y la zanja, y elementos de cáscara triangulares para el ducto. La **Figura 7** muestra el aspecto general de la malla.



Se realizaron dos simulaciones distintas, a partir de dos casos de carga:

- Simulación A (estado actual real): se le aplicó como condición de borde el desplazamiento registrado por los mojoneros.
- Simulación B (caso hipotético): se le agregó una componente vertical en la zona de la abolladura de manera de lograr un efecto de flexión que pudiera provocar un estado compatible con la formación de arrugas.

En cuanto a la segunda simulación, debe agregarse que el estado de carga final fue hallado a partir de un proceso iterativo, encontrando así las condiciones de desplazamiento de suelo necesarias para que sobreviniera una eventual falla.

Se aplicó una presión de operación máxima de 8 MPa (80 Barg) uniforme para toda la longitud modelada. Se aplicó un campo gravitatorio constante de $9,8 \text{ m/s}^2$ que multiplicado por la densidad de cada cuerpo resulta en su peso propio. Adicionalmente, para contemplar la contribución del peso del producto transportado, se le dio al ducto una densidad aparente de 17178 Kg/m^3 , coherente con el peso del ducto más producto por metro lineal de cañería (se supuso ducto lleno).

Se definieron tres tipos de condiciones de borde:

- Un empotramiento en la zona inferior (fondo) y extremos aguas arriba y abajo del modelo para simular el contacto con el suelo contiguo (**Figura 8**).

¹ Ligadura: esta característica de modelado une superficies entre sí durante toda la simulación. Los valores de los desplazamientos y las cargas de una de las superficies "ligadas" se restringen al valor del punto más cercano en la otra superficie. Capacidad del Software Simulia (propiedad intelectual de Dassault Systèmes)

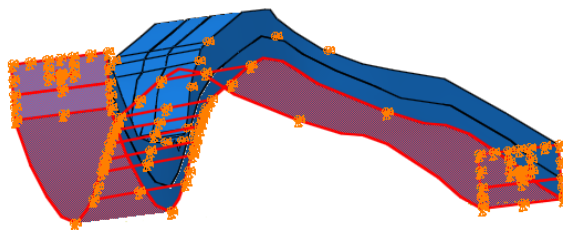


Figura 8: Condiciones de borde en la parte inferior

- Se restringieron las traslaciones perpendiculares a cada una de las caras laterales del modelo, simulando un “encajonamiento del suelo” pero dándole la posibilidad de deformarse en la dirección vertical (**Figura 9**).

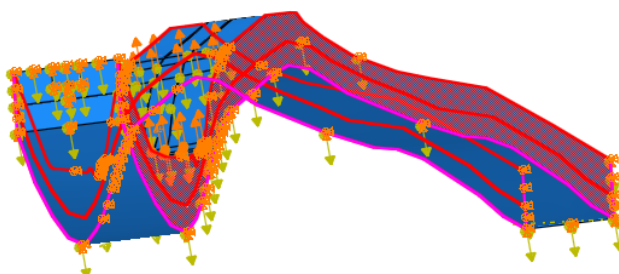
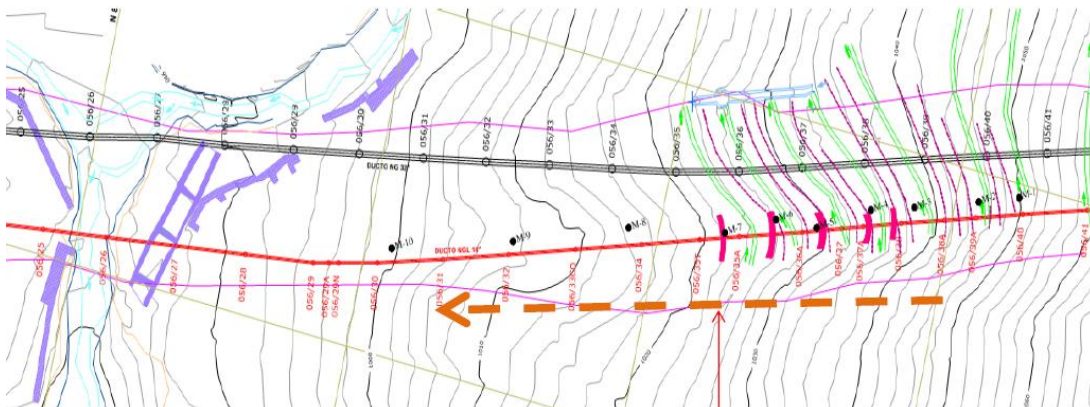


Figura 9: Condiciones de borde en la zona lateral

- Las cargas debidas al movimiento de suelos en la zona de los mojones (para la simulación A) se aplicaron como desplazamientos impuestos al modelo. Se muestran los desplazamientos en los 10 mojones ubicados en el sector activo (**Figura 10**). De dichos valores se consideraron los máximos y se extrapolaron temporalmente al momento de instalación del ducto para obtener así el desplazamiento acumulado. Esos desplazamientos se le impusieron al modelo (**Figura 11**).

Monitoreo en zona Kp 56+500

Topografía a Noviembre de 2015



Los resultados del monitoreo evidencian movimiento lento de 4 cm en promedio en un año en sentido longitudinal.

Punto	Coordenadas bases Iniciales			Coordenadas de Monitoreo Diario			Fecha actual 31/10/2015			10-10-2015 - 31-10-2015		
	X	Y	Z	X	Y	Z	Diferencia acumulada			Diferencia Diaria		
							Dif. X	Dif. Y	Dif. Z	Dif. X	Dif. Y	Dif. Z
Inicio Monitoreo 09/11/2014												
M1	716698.042	8647939.168	1050.136	716698.033	8647939.122	1050.130	-9	-46	-6	-10	2	-5
M2	716695.788	8647945.980	1045.450	716695.791	8647945.937	1045.451	3	-43	1	-6	2	4
M3	716692.395	8647956.838	1039.099	716692.392	8647956.797	1039.107	-3	-41	8	-3	1	0
M4	716690.252	8647964.262	1035.095	716690.245	8647964.223	1035.097	-7	-39	2	-5	2	3
M5	716685.586	8647972.968	1029.684	716685.598	8647972.947	1029.700	12	-21	16	-6	0	2
M6	716685.054	8647980.295	1026.970	716685.045	8647980.258	1026.962	-9	-38	-8	-11	1	-3
M7	716681.121	8647988.622	1022.187	716681.131	8647988.603	1022.198	10	-19	11	-11	1	0
M8	716677.863	8648005.315	1014.924	716677.866	8648005.277	1014.928	3	-38	4	-2	1	6
M9	716671.249	8648024.738	1007.684	716671.254	8648024.706	1007.683	5	-32	-1	-4	2	2
M10	716665.299	8648045.402	999.502	716665.288	8648045.368	999.509	-11	-34	7	-17	-5	7

Figura 10: Desplazamiento monitoreado en mojones

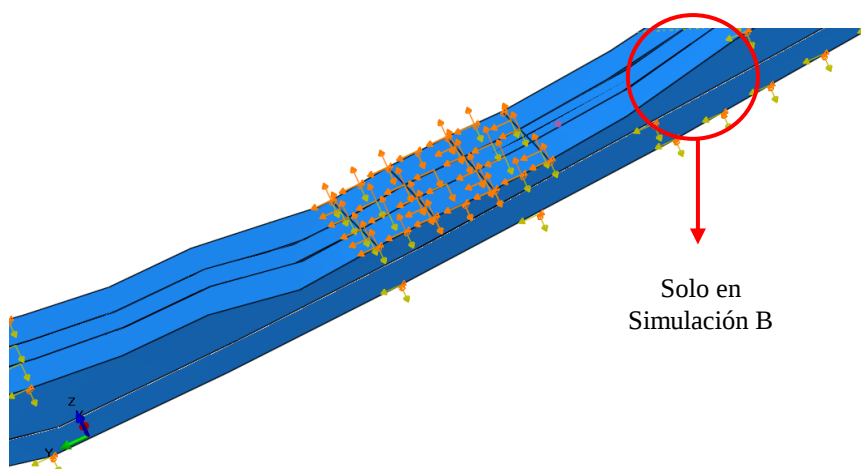


Figura 11: Desplazamiento impuesto en la Simulación A

Las cargas debidas al movimiento de suelos en la zona de mayor actividad (para la Simulación B) se aplicaron iterativamente como desplazamientos del suelo normales a la superficie (en sentido descendente), hasta lograr una deformación compatible con una arruga.

Tanto las cargas como las condiciones de borde se aplicaron a cada modelo de manera sucesiva; en primer lugar se aplicaron las condiciones de borde fijas, seguidamente se aplicaron la gravedad, la presión, y por último los desplazamientos impuestos que simulan el desplazamiento monitoreado del suelo.

Resultados

De los modelos desarrollados siguiendo los lineamientos descritos, surge el estado tensional del ducto para las magnitudes de desplazamiento impuestas.

Fuera de las regiones donde el ducto se deforma considerablemente, se observa en ambos modelos que los valores de tensiones son coherentes con la teoría membranar de cáscaras de revolución. El valor teórico de tensión circunferencial (debido únicamente a presión interna) se puede calcular con la ecuación:

$$\sigma = \frac{pD}{2t} = 267 \text{ MPa}$$

Donde:

p : presión interna, 8 MPa

D : diámetro externo del ducto

t : espesor del ducto

Los valores tensionales del ducto al final de la presurización en las zonas no perturbadas (por los desplazamientos impuestos) coinciden con este valor, como puede observarse en la **Figura 12**.

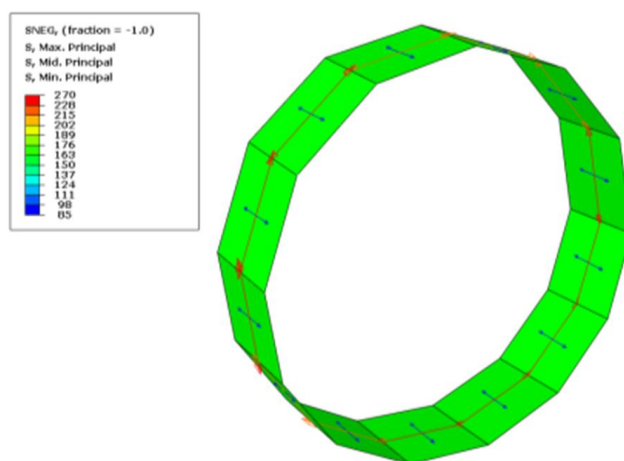


Figura 12: Componentes principales del tensor de tensiones sobre el plano de la membrana para un aro alejado de la zona de desplazamientos aplicados

SIMULACIÓN A (sólo desplazamientos registrados en mojones)

La simulación A se realizó a partir de los desplazamientos medidos por los mojones (**Figuras 10 y 11**). Esto se realizó para comparar los resultados obtenidos del modelo con los valores medidos por los VWSG.

En la **Figura 13** se muestran los desplazamientos provocados sobre el ducto por el suelo circundante. En dicha imagen se indican también las zonas de aplicación de desplazamiento medido en cada mojón para referencia. Debe aclararse que los desplazamientos están magnificados 100 veces en la imagen para que se aprecie la forma que toma el ducto. El suelo ha sido excluido de la imagen intencionalmente.

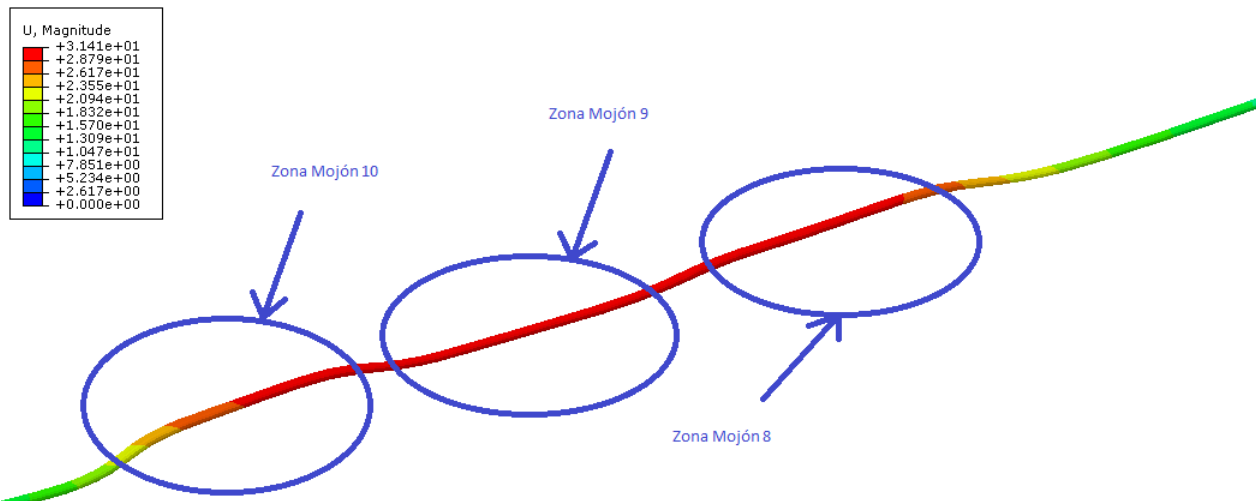


Figura 13: Desplazamientos inducidos en el modelo y zonas de condiciones de borde

En la **Figura 14** se aprecian las tensiones de von Mises en la zona de los VWSG (entre los mojon 8 y 10). Se observa que los valores rondan el rango de 0.6 al 0.9 de fluencia del material pero no se llega en ningún punto al rango plástico del material.

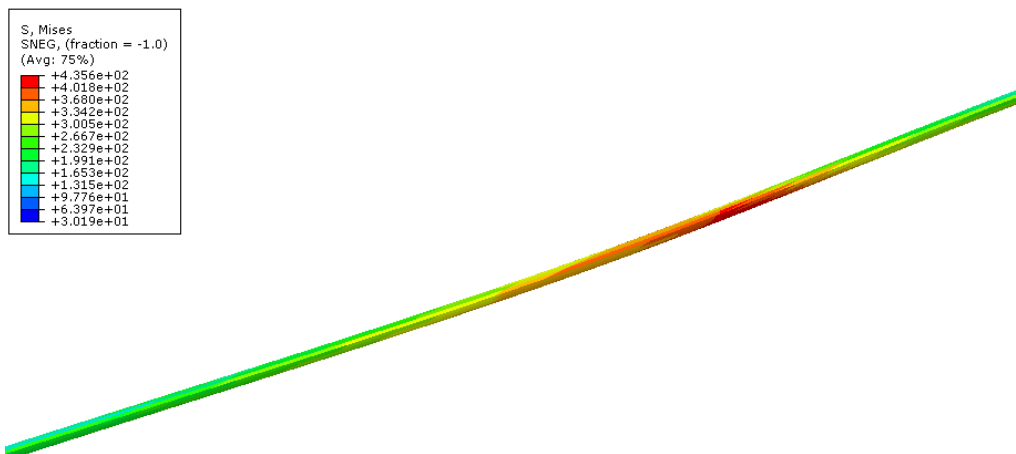


Figura 14: Tensiones de von Mises en la zona de mojon 8, 9 y 10

En las **Figuras 15** y **16** se muestran las deformaciones longitudinales calculadas por el modelo en las posiciones de ambos VWSG (PK56+420 y PK56+447).

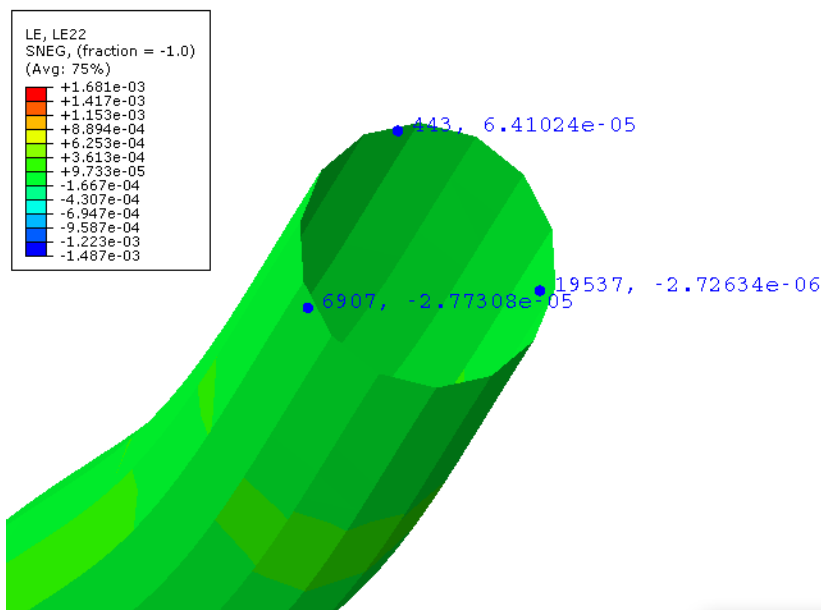


Figura 15: Deformaciones en PK 56+420



Figura 16: Deformaciones en PK 56+447

Debe notarse que el rango de valores de deformación longitudinal en ambas zonas del modelos (0 a $-580\mu\epsilon$) coincide con las mediciones de los instrumentos (200 a $-500\mu\epsilon$). Sin embargo, los valores calculados en el modelo no se ajustan perfectamente a los valores medidos por los VWSG. Esto puede deberse principalmente a que el comportamiento del suelo no es totalmente caracterizado por los mojones, dado que los mismos dan referencias puntuales de lo que ocurre a nivel superficial y el movimiento en masa del suelo es intrínsecamente continuo y tridimensional. Otra variable que puede influir sería que la estratigrafía utilizada no sea totalmente representativa de la presente en cada caso. Esto deviene en una simplificación del mecanismo de movimiento del suelo y su comportamiento asociado; pueden haber sucedido movimientos de suelo de los que se desconoce la magnitud y dirección. Modelos de sectores mas pequeños podrían eventualmente desarrollarse con un refinamiento de la información.

SIMULACIÓN B (Situación hipotética, desplazamiento vertical añadido)

La simulación B tiene por objeto determinar un desplazamiento de suelo compatible con las condiciones de contorno que sea capaz de producir una arruga. El objetivo final (como se presentó al inicio) es contar con algún valor de “desplazamiento de suelo de alarma” a nivel de superficie para los recorridores del DDV.

La teoría indica que para producirse una arruga se requiere un elevado esfuerzo normal sobre el componente que resulte en tensiones longitudinales de compresión. En geometrías cilíndricas factores tales como los esfuerzos de flexión, que modifican la ovalización, o la presión interna (o externa) constituyen “catalizadores” para el mecanismo de pandeo local como es una arruga. Algunos aspectos de esto son presentados y analizados en las referencias [6,7].

La experiencia sugiere además que los cambios de dirección (por pequeños que sean) en mínimos relativos de la traza (vista en plano de corte) son sitios preferenciales para la aparición de arrugas.

Para conocer de antemano cuál será la deformación longitudinal crítica que desencadene una eventual arruga, puede usarse como referencia el código Z662-03 de la Asociación de Standard Canadiense para Sistemas de Tuberías de Petróleo y Gas. Con él es posible obtener límites aceptables para las deformaciones por compresión. La cláusula C6.3.3.2 establece que las arrugas locales se pueden prevenir si la deformación por compresión longitudinal se limita a:

$$\varepsilon_{cf} = C \times \varepsilon_c^{crit}$$

Donde ε_{cf} es el factor de resistencia y ε_c^{crit} es la capacidad de deformación por compresión de la pared del tubo. El valor sugerido por el código para ε_{cf} es de 0.8 y ε_c^{crit} se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$\varepsilon_c^{crit} = \frac{0.5 \times t}{d} - 0.0025 + 3000 \times \left[\frac{(p_i - p_e) \times d}{2 \times t \times E_s} \right]^2$$

donde:

t: espesor

d: diámetro externo del tubo

p_i: presión interna

p_e: presión externa

E_s: módulo de Young

Calculando el valor más bajo que pudiera producir la falla (esto es, sin presión interna), y para la geometría correspondiente al ducto, se encuentra que el valor crítico ε_{cf} , superado el cual es factible de producirse una arruga, es de 4254 $\mu\epsilon$ (0,004254).

De esta manera, se aplicaron sucesivamente al modelo, desplazamientos incrementales en la zona de mayor actividad hasta lograr una deformación longitudinal en el ducto del orden de 4254 $\mu\epsilon$.

Los expertos geotécnicos, basados en su experiencia y entrenamiento en inspección visual en campo consideraron que la cinemática más viable que podría afectar el DDV es el deslizamiento de talud del tipo traslacional (**Figura 17**). Un informe de inspección geológica en la zona concluye que “...El basamento rocoso tiene como cobertura a depósitos coluviales que yacen sobre suelos residuales, lo que facilita la generación de procesos de inestabilidad en la zona. El buzamiento de los estratos rocosos es favorable al desplazamiento del coluvión, por lo que la estabilidad local es precaria...”. En base a esto y dado que las componentes en planos horizontales se venían monitoreando se decidió agregar un desplazamiento normal a la superficie, y hacia abajo (circulo rojo en **Figura 11**) del orden de 750 mm. Con este desplazamiento del suelo, se alcanza un estado tensional en el ducto capaz de producir una arruga, conforme a lo buscado.

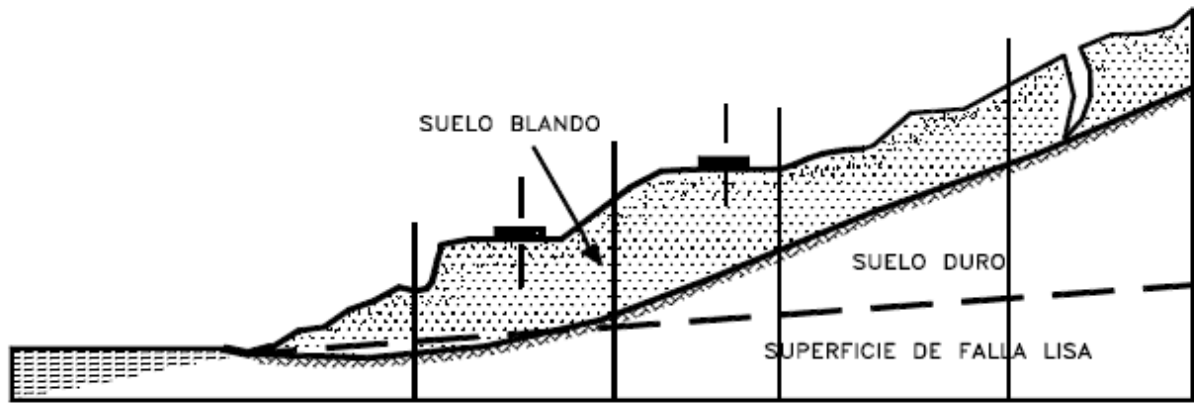


Figura 17: Esquema de deslizamiento por traslación de talud (fuente: [4])

La **Figura 18** muestra las zonas del tubo que alcanzaron el valor de fluencia del material (en rojo), como resultado de los desplazamientos impuestos.

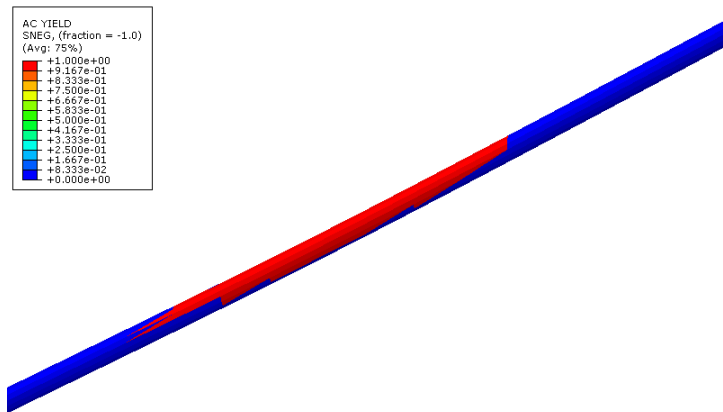


Figura 18: Zonas plastificadas en el ducto

La **Figura 19** presenta el valor de las tensiones de von Mises en la zona de mayor sollicitación. Como puede apreciarse, el modelo reporta tensiones de von Mises máximas de 500 MPa, levemente superiores la fluencia del material.

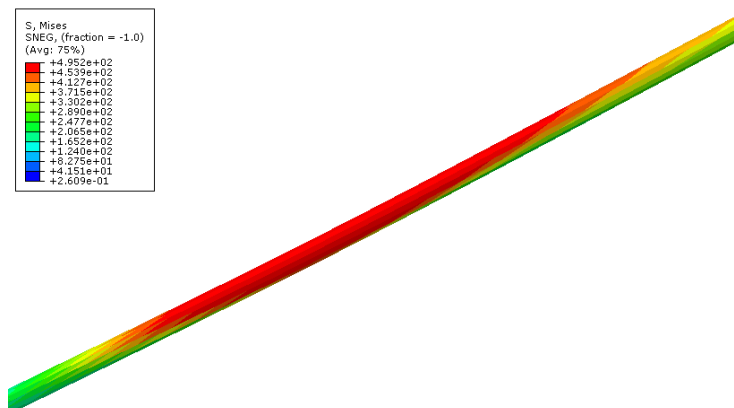


Figura 19: Tensiones de von Mises en la zona de la abolladura

La **Figura 20** muestra las tensiones longitudinales en la zona. Se puede apreciar que existe un estado de compresión en la zona que se acentúa en la parte superior del ducto. Esto es compatible con la formación de una arruga.

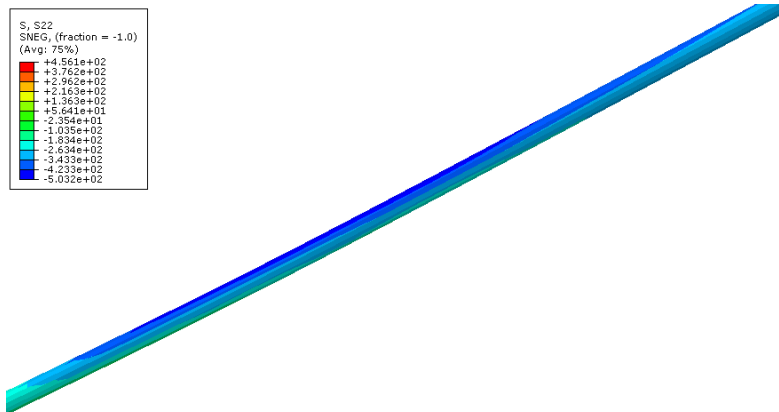


Figura 20: Tensiones longitudinales en la zona de la arruga

La **Figura 21** muestra los valores de deformación longitudinal. Como puede observarse, se alcanza un valor muy cercano al crítico calculado anteriormente (4254 $\mu\epsilon$). Además, este resultado predice que la eventual falla (arruga) se producirá en la parte superior del ducto, ya que es en esta zona donde se alcanza la deformación de compresión crítica. Este resultado constituye una herramienta para la gestión de integridad, dado que el operador puede definir un factor de modo tal de establecer un “valor de alarma” suficientemente conservativo con para los recorridores de línea en el DDV.

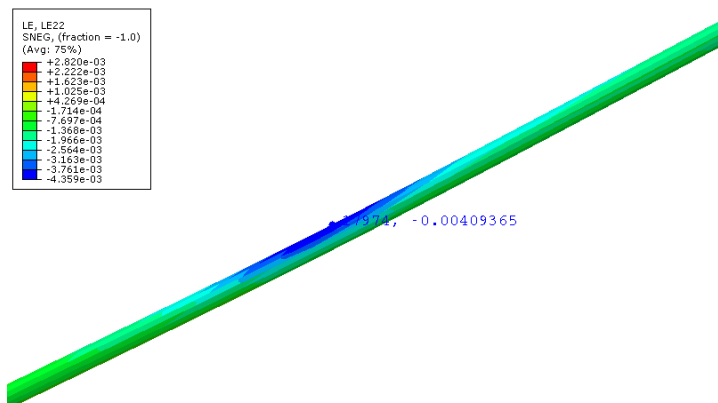


Figura 21: Deformación longitudinal compresiva máxima

Conclusiones

Se ha analizado la documentación disponible. Se ha integrado toda la información en un modelo de elementos finitos de interacción suelo-ducto utilizando las capacidades de simulación geomecánica del software Simulia (propiedad intelectual de Dassault Systèmes). Se ha incluido la caracterización material correspondiente al suelo. Se ha incluido la información de monitoreo en campo disponible como condición de borde.

El modelo ha incorporado la no linealidad geométrica y de comportamiento del material. Con esta información se han realizado dos simulaciones numéricas: la simulación A (caso real), de acuerdo a los desplazamientos medidos en el terreno mediante mojones; y la simulación B (caso hipotético), en la cual se generó, mediante un proceso iterativo, un desplazamiento de suelo que fuera capaz de generar un estado tensional compatible con una arruga, considerando a la misma como el modo de falla más viable en este caso.

Los resultados del primer modelo se compararon con la con los registros de los instrumentos VWSG. El nivel de deformación registrado (200 a $-500\mu\epsilon$) por los VWSG distantes unos 130 metros del sector actual de análisis, mostró concordancia en los rangos de deformaciones simulados (0 a $-580\mu\epsilon$).

El proceso iterativo aplicado en la simulación B permitió calcular que un desplazamiento de suelo normal a la superficie y hacia abajo, del orden de los 750 mm, sería suficiente para generar un estado deformacional compatible con una arruga. Este desplazamiento produce un campo de deformaciones local y se observó que no afecta la deformación del ducto en las posiciones distantes (como en las que se hallaba instrumentado).

En este informe se ha puesto de manifiesto la importancia de la instrumentación con VWSG como medio de recolección de información y su coherencia con los desplazamientos que sufre el terreno en su área de influencia (en este caso, podría considerarse unas decenas de metros). Sin embargo el carácter local (o puntual) de los VWSG, podría jugar en este caso en contra de la integridad global del sector.

Lo anterior sugiere extender el monitoreo a toda la ladera, no limitándose a instrumentar solo el ducto con VWSG sino también el suelo, no solo superficialmente sino además en profundidad con instrumentos geotécnicos como son los inclinómetros. Piezómetros y pluviómetros podrían completar la información. Los estudios confirman que el suelo está activo y la experiencia confirma que el ducto se ve forzado a acompañarlo. Si la tendencia continua el foco debería ponerse en unos 100 a 200 mts en dirección a Pk 57, esto sería en Pk 56+650.

Hasta tanto se implementen las instrumentaciones antes mencionadas, el “valor de alarma” para los inspectores de campo lo constituyen escarpes de dimensiones del orden de 350mm o superiores.

Así se presentó la simulación interacción suelo-ducto como herramienta para la gestión de integridad cuya implementación puede impactar favorablemente sobre las personas, el medio ambiente y finalmente, pero no menos importante, sobre el OPEX de la compañía.

Bibliografía

- [1] www.asmeconferences.org/IPG2013/
- [2] www.asmeconferences.org/ipg2015/
- [3] <https://www.asme.org/events/ipg>
- [4] “Failures and integrity of pipelines subjected to soil movements”, HANDBOOK OF MATERIALS FAILURE ANALYSIS WITH CASE STUDIES FROM THE OIL AND GAS INDUSTRY, 1E, edited by Abdel Salam Hamdy Makhlouf and Mahmood Aliofkhazraei, Elsevier Limited, 09/2015
- [5] “Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales” Jaime Suarez Diaz. 1998, Distribuido por Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Ingeniería de Suelos Ltda. Calle 41 # 28-33 Bucaramanga, Colombia.
- [6] R. G. Toscano, M. Gonzalez, E. N. Dvorkin, “Experimental validation of a finite element model that simulates the collapse and post-collapse behavior of steel pipes” - Second MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics – 2003.
- [7] R.G. Toscano, P. Assanelli, E.N. Dvorkin “Colapso y post-colapso de tuberías de conducción submarinas” - Mecánica Computacional Vol XIX, pp.435-440. San Carlos de Bariloche - 2000.

Breve Cv, según modelo:

Mag. Ing. Hernán Kunert

Ingeniero Mecánico de la Universidad Nacional de Mar del Plata

Magister en Ingeniería Estructural de la Universidad Nacional de Tucumán.

Trayectoria y cargo actual: En la actualidad se desempeña como project manager en proyectos de desarrollo de herramientas para la gestión de integridad con énfasis en simulación mecánica con Gie S.A. Tambien es docente en distintas asignaturas (mecánica del continuo, estructuras, métodos numéricos, vibraciones) en las Universidad Nacional de Mar del Plata y la Universidad Tecnológica Nacional. Ha participado de varios proyectos de investigación y cuenta en su haber con más de 20 presentaciones de trabajos a congresos y publicaciones en revistas de circulación internacional.

