

SIMULACION COMPUTACIONAL DE LA INTERACCION SUELO-DUCTO COMO HERRAMIENTA DE GESTION DE INTEGRIDAD

Hernán Kunert ^{a,d}, José Luis Otegui ^{c,d}, John Malpartida ^b

^a*GIE S.A.-Área Integridad Mecánica, Argentina*

^b*COGA, Compañía de Gas del Amazonas, Perú.*

^c*División Soldadura y Fractomecánica – INTEMA – Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina*

^d*Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina*

e-mail: kunert@giemdp.com.ar

Palabras clave: Integridad, simulación, modelado, computacional, interacción.

RESUMEN

Este trabajo presenta una herramienta computacional para la gestión de integridad de ductos enterrados. Ha permitido reproducir escenarios de falla y cuantificar los parámetros que la provocaron. Ha confirmado observaciones de campo, pero no intuitivas, sobre la influencia del diámetro del ducto en la ocurrencia de las fallas debidas a movimientos de suelo. Su principal novedad es que incorpora la geometría real del tramo, con las pendientes del terreno y las curvas de los ductos.

Se basa en una simulación tridimensional de la zona bajo análisis, cuya extensión puede abarcar hasta un kilómetro de longitud. Se fundamenta en el método de elementos finitos para la resolución de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. Incorpora complejos modelos físico-matemáticos no lineales incluyendo algoritmos de contacto y criterios de falla a nivel material. La geometría incorpora 20 m de ancho (sobre el derecho de vía) y profundidad variable hasta la roca sólida. El suelo se modela con elementos tetraédricos y sus parámetros describen cuatro capas diferenciadas.

En una aplicación concreta, dos ductos paralelos de distinto diámetro se modelaron a través de elementos cuadráticos tipo viga. El efecto de interacción suelo ducto se consideró a través del vínculo rígido (nodo en común) entre elementos que modelan el ducto y elementos que modelan el suelo. La herramienta fue convenientemente ajustada con datos de instrumentos y ensayos en la zona de estudio. Su función actual y futura es la de colaborar en el proceso de toma de decisión para las intervenciones de integridad del operador de las líneas.

INTRODUCTION

El sistema del transporte de Camisea es operado y mantenido por COGA. El sistema consiste en dos ductos enterrados que comparten un derecho de vía común que atraviesa la selva peruana, cruzando las montañas de los Andes (por encima de los 4.800 msnm), y descendiendo por escarpadas cuevas hasta la costa del Océano Pacífico. El ducto de gas natural (NG) tiene su origen en Malvinas y su estación terminal en Lurin (al sur de Lima), y el ducto de líquidos de gas natural (NGL) transporta los condensados líquidos de Malvinas a una planta cerca de Pisco. La tubería de NGL cambia sus diámetros paulatinamente de 14" a 10", y la tubería del NG comienza en 32" y luego se reduce a 24" para finalizar en 18". La construcción de los ductos comenzó en 2002, y la operación comercial en agosto de 2004. Los dos incidentes analizados en este modelo numérico fueron situados en uno de los sectores más lluviosos de la selva peruana. Ningún incidente ocurrió en el ducto de NG de mayor diámetro. Ambos incidentes ocurrieron con un año de diferencia y al final de la estación de lluvias.

Las abundantes lluvias (hasta 7000 milímetros cada año en la estación de lluvias) crean corrientes a lo largo y a través de los ductos en las secciones analizadas. Los incidentes investigados en la región de la selva tropical se relacionan no sólo con la presión interna, sino también con la flexión y las tensiones combinadas que se pueden generar durante la operación por posibles movimientos de suelo -ver **Figura 1-**.

La inestabilidad geotécnica causó o contribuyó substancialmente en los dos incidentes. A finales de 2006, después de extraordinarios esfuerzos por estabilizar condiciones geológicas a lo largo del derecho de vía, COGA continuó con la implementación de medidas de mitigación que redujeron perceptiblemente este riesgo mejorando la estabilidad geotécnica en los sitios específicos de mayor peligro.

Las medidas geotécnicas de estabilización construidas durante 2006-2008 resultan confiables y robustas. En las áreas más críticas, la instrumentación (extensómetros, piezómetros, inclinómetros y pluviómetros) se está utilizando para interpretar y advertir sobre la inestabilidad del suelo, permitiendo reparaciones más expeditivas y confiables. En base a datos geotécnicos se desarrolló una matriz de riesgo híbrida para determinar adecuadamente la probabilidad de falla. Este sistema fue validado usando la información de inspecciones de campo. Los sitios identificados que han exhibido manifestaciones de inestabilidad de suelo se enumeran en la matriz de riesgo, la mayoría de estos puntos potencialmente susceptibles de falla se encuentran en el sector de selva. El sistema de supervisión de COGA ayuda a reducir el riesgo de falla producto de fuerzas geotécnicas externas detectando y cuantificando muestras tempranas de la inestabilidad. Este programa permite la detección temprana y la corrección de las áreas problemáticas potenciales.

Como parte del plan de integridad de ductos, COGA vio por conveniente desarrollar una herramienta confiable que le permitiera estimar el estado tensional de los ductos. Los strain gauges dada su instalación particularmente complicada debido a la logística necesaria y las dificultades del terreno conforman una solución cara; sin embargo brindan información muy importante acerca del estado tensional de las tuberías en las zonas donde se encuentran instaladas. Por esa misma razón, una de sus principales limitaciones, es que sólo permiten analizar datos y obtener conclusiones sobre dichas zonas. Por el contrario, el desarrollo de una herramienta confiable que a priori estime los puntos más solicitados, permitiría optimizar la ubicación de los strain gauges.

COGA y Gie se propusieron desarrollar durante 2009 una herramienta basada en el método de elementos finitos que permita simular el estado tensional de ductos ante desplazamientos impuestos al suelo. Estos escarpes o derrumbes localizados son detectados por los equipos geotécnicos y sirven como datos de entrada de la simulación.



Figura 1: Zona a modelar y escarpe

Diferentes proyectos y publicaciones científicas han abordado el tema de la simulación computacional de la interacción entre el suelo y el ducto durante los últimos años. Prueba de esto es “Modelo extendido para interacción Suelo-Ducto” preparada por C-Core y D.G. Honegger Consulting para el Consejo Internacional de Investigación en Ductos [1]. Este proyecto compila el estado del arte en la materia, incluyendo varias normas que tratan el problema, las últimas técnicas y avances en modelado numérico y simulaciones de laboratorio hasta el 2003. Fredj A. et al [2] presentó varios modelos tridimensionales de pequeñas secciones rectas y curvas de ducto sujetas a desplazamientos laterales. De esta manera, una herramienta útil para el análisis forense o diseños especiales fue desarrollada. Al mismo tiempo H. Mahdavi [3] y colaboradores investigan el comportamiento mecánico de un pequeño tramo de la tubería sujeto a un gran movimiento lateral del suelo hasta que se forma una arruga. Desarrollaron pruebas de laboratorio para calibrar el modelo de elementos finitos hasta lograr buen acuerdo entre ambos. Así estiman la carga última de soporte.

Dos esquemas básicos se utilizan históricamente para el modelado numérico de tuberías enterradas: (1) la práctica habitual, usando un tipo especial de elementos de viga para modelar el ducto y el modelo de Winkler para representar el suelo circundante (materializado a través de resortes con una resistencia correspondiente al suelo), y (2) el avanzado, usando elementos finitos de tipo sólido continuo.

El primer esquema exige considerablemente menos de cómputo que el que incorpora elementos sólidos continuos. Sin embargo, la representación del suelo por los resortes no lineales carece de significación física

y tiene limitaciones serias relacionadas con modelado plástico del suelo y de la interacción entre diversas zonas del suelo a lo largo del ducto. Por el contrario, los modelos constitutivos que incorporan plasticidad cuando se trabaja con el modelo continuo, explican el estado real tridimensional de tensión del suelo –ver **Figura 2**–.

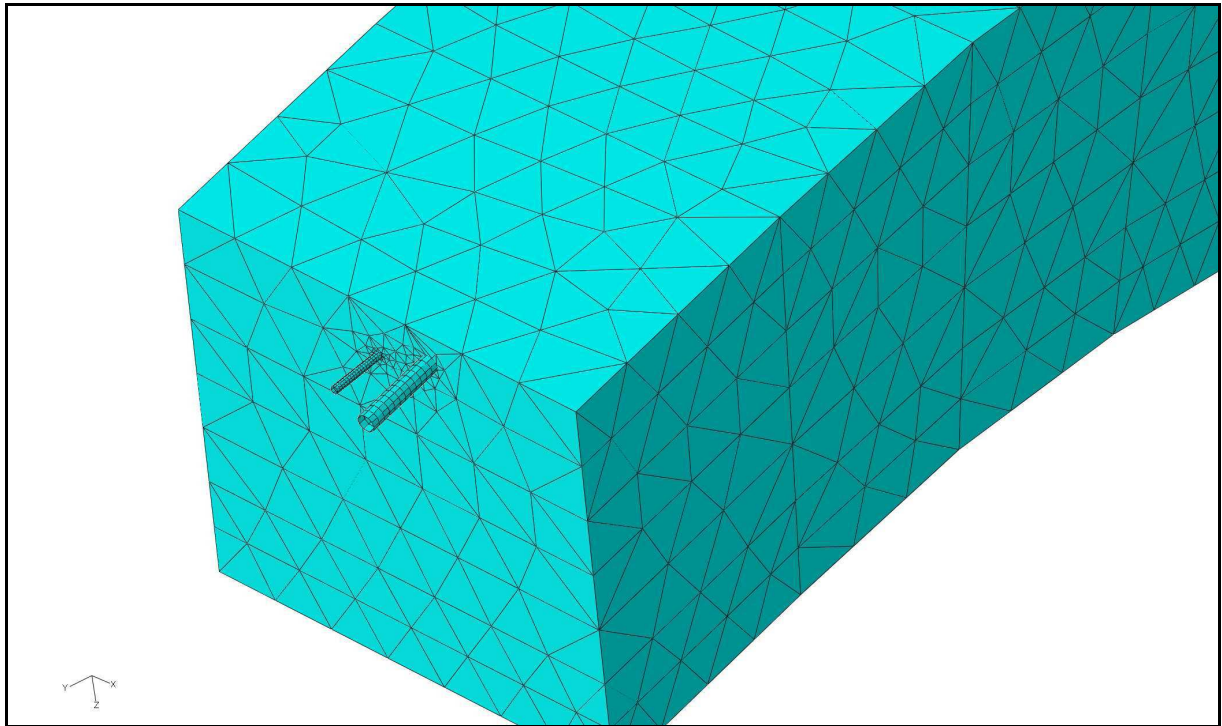


Figura 2: Modelo solid-shell

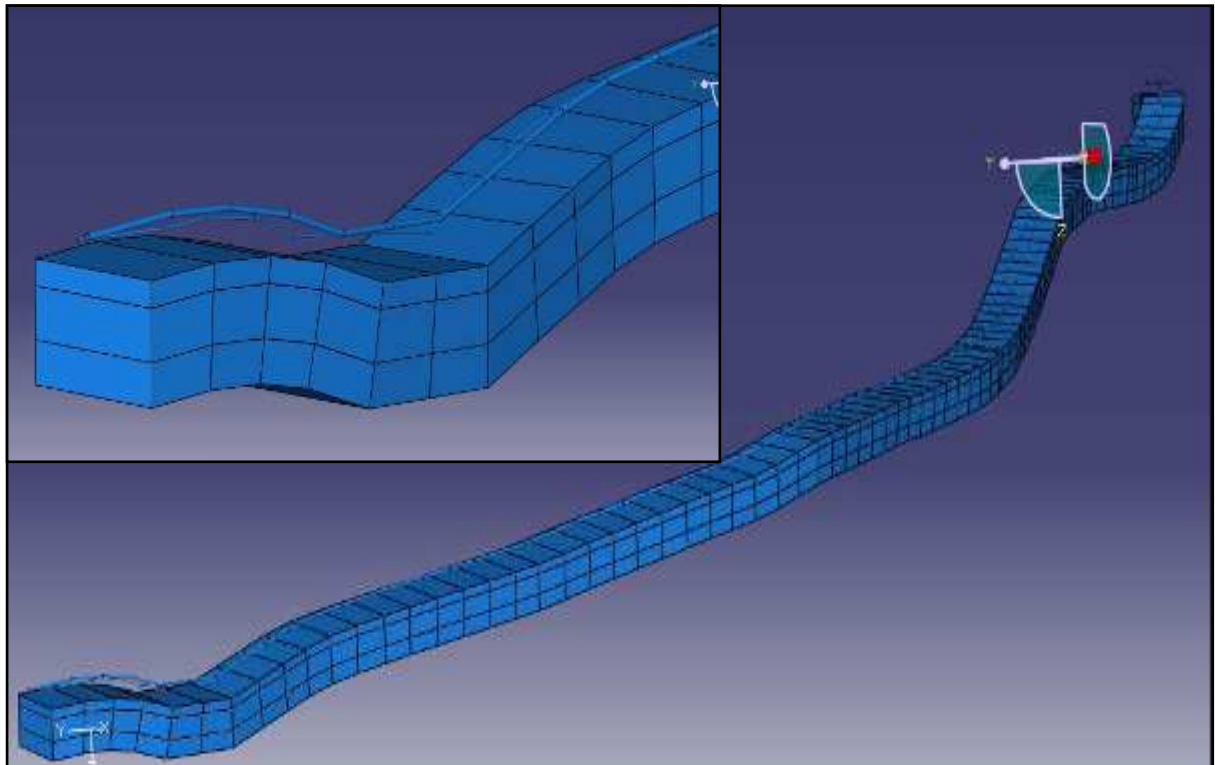


Figura 3: Tramo modelado long. Aprox. 1 Km. Se quitó capa 1 de suelo para mejor visualización

DESARROLLO

Se desarrolló un estudio de la interacción suelo-ducto que utiliza un modelo de elementos finitos no lineales. El software Abaqus fue utilizado para este propósito. Un método híbrido (entre el estructural y el continuo) resultó de esta investigación. Este modelo incluye los elementos tipo “pipe” (un elemento especial de viga para este propósito) para modelar la tubería. El suelo se simula con el elemento sólido continuo, mientras que la interacción entre ambas es modelada por un nodo compartido. Este sistema, internamente conocido como “modelo solid-beam” trabaja como un material compuesto y demostró un buen acuerdo con el comportamiento físico real del ducto en campo.

Otra alternativa, conocida internamente como “solid-shell”, que incluye los elementos de cáscara para el ducto, elementos sólidos continuos para el suelo y un algoritmo de contacto para modelar la interacción, también fue desarrollada para este proyecto. Pero los tiempos de proceso no eran compatibles con la condición del proyecto de lograr una herramienta útil para contribuir con las decisiones del equipo de integridad. Por este motivo este modelo fue abandonado en esta etapa del proyecto.

El modelo presenta las características siguientes:

- Respecto a la geometría, la misma surge en base a los puntos reportados por la herramienta ILI. En base a estos datos se generan los ductos y las distintas capas de suelo circundante. Esto conforma una de las características distintivas de este modelo que simula la geometría real con curvas y pendientes en los tres planos coordenados mientras que la mayoría de los estudios abordan geometrías simples.
- Las dimensiones generales y los comportamientos materiales son:
Longitud: entre la PK 126+436 y 125+407 que incluye ambos incidentes (rotura y arruga) [4,5].
Ancho: entre ambas tuberías el promedio es 5 m. El modelo incluye un ancho de suelo de 20 m.
Profundidad: La profundidad promedio de esta sección hasta la roca firme es de 20 m. Diversos estudios del suelo permiten definir cuatro estratos (o capas) con características diferentes que se presentan en la **Tabla 1** y su distribución en la **Figura 4**.

Capa	Peso específico saturado [Kg/cm3]	Cohesión [kg/cm2]	Angulo de fricción [°]	Modulo elástico [kg/cm2]
1	1700	0.25	20	20
2	1900	0.3	16	30
3	2000	0.3	16	35
4	2200	0.3	16	10

Tabla 1: Características de los materiales del suelo

Las condiciones de drenaje del suelo se incluyen en el análisis vía el peso específico del estrato.

- El mallado completo del modelo “solid-beam” incorpora cerca de 50000 elementos mientras que el modelo completo “solid-shell” se acerca a casi 500000 elementos. Esta es otra razón por la que el tiempo de procesamiento de datos es varias veces más grande.

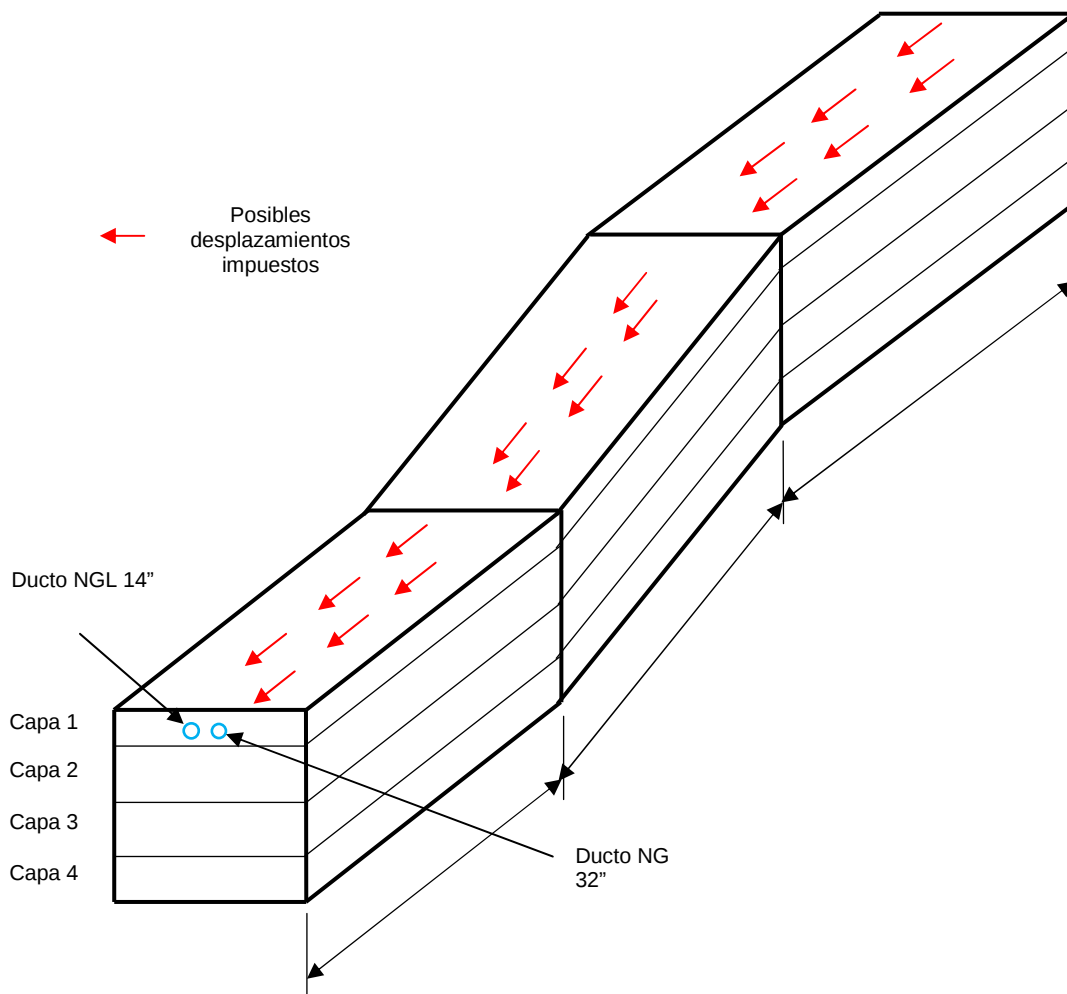


Figura 4: Esquema del modelo

- El material de la tubería es API 5L X70 con el modulo elástico de 2.1×10^{11} Pa y coeficiente de Poisson 0,3. El comportamiento plástico se define en la **Tabla 2** obtenida por ensayo según informe INTEMA 070605 GIE [6]:

Metal Base	
Tensión [Pa]	Deform
4.80E+08	0
5.50E+08	0.005
6.00E+08	0.017
6.75E+08	0.057
7.00E+08	0.077
7.35E+08	0.117

Tabla 2: Valores de tensión (en Pa) y deformación para el material de ducto

- Las condiciones de borde se imponen de acuerdo a la realidad física. Ambas traslaciones longitudinales de los extremos se fijan en el estrato más profundo. Las traslaciones verticales son limitadas a lo largo de la cara inferior de la capa más profunda donde existe roca sólida. Finalmente las traslaciones transversales se fijan a lo largo de ambos laterales del modelo para evitar el vuelco ficticio (dado que en realidad está el resto del suelo que bordea el sector bajo análisis). En algunos casos una cuidadosa distribución hidrostática fue aplicada para modelar el suelo ausente circundante

al modelo, pero esto requiere una cuidadosa calibración que significa una importante inversión de tiempo.

- La presión interna y el peso propio de la tubería y del primer estrato de suelo se incluyen en el modelo. Diversos movimientos de suelo observados por los equipos geotécnicos son modelados como traslaciones impuestas.

RESULTADOS

Dos eventos suficientemente documentados fueron utilizados para verificar si la herramienta realmente reproduce el estado tensional en la tubería debido a los movimientos del suelo. El primer acontecimiento es conocido como “Incidente PK 125+950”. Luego del cual los especialistas Geotécnicos señalaron que la rotura fue causada principalmente por dos movimientos transversales a la tubería. A continuación se aplican sobre el modelo dichos desplazamientos impuestos. Este estado de condiciones de borde se identifica en adelante como escenario “A1-f”. El objetivo era verificar si el modelo reproduce lo que sucedió en la realidad y, en tal caso, determinar cual debió haber sido la magnitud del desplazamiento de suelo que provocó esta falla en el ducto de NGL. Los desplazamientos se aplican sobre las capas 1 y 2 de suelo como se muestra en la **Figura 5**. Las tensiones equivalentes de Von Mises sobre ambos ductos se presentan en la **Tabla 3** para desplazamientos impuestos crecientes.

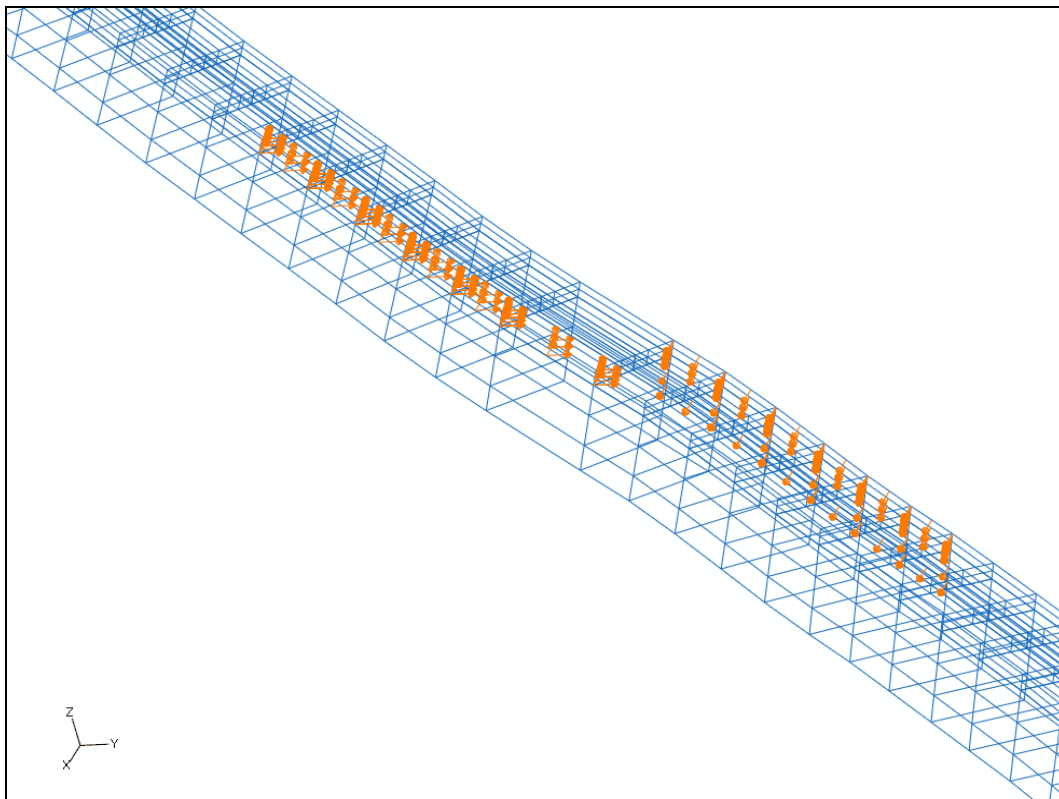


Figura 5: Condiciones de borde aplicadas para reproducir la Falla 5. Escenario “A1-f”

Fondo	Ext Gas Arriba	Ext Gas Abajo	Pi NGL	Pi NG	Max Sigma (MPa)		Caso Validación
			(MPa)	(MPa)	Ducto NGL	Ducto NG	
Fijo	Fijo	Fijo	18,6	16	3,29E+08	3,18E+08	A1-f-10cm
Fijo	Fijo	Fijo	18,6	16	3,06E+08	3,20E+08	A1-f-25cm
Fijo	Fijo	Fijo	18,6	16	3,28E+08	3,31E+08	A1-f- 50cm
Fijo	Fijo	Fijo	18,6	16	3,58E+08	3,48E+08	A1-f- 75cm
Fijo	Fijo	Fijo	18,6	16	3,94E+08	3,69E+08	A1-f- 100cm
Fijo	Fijo	Fijo	18,6	16	4,82E+08	4,21E+08	A1-f-150cm
Fijo	Fijo	Fijo	18,6	16	5,84E+08	4,37E+08	A1-f- 177cm

Tabla 3: Resultados validación A1-f con desplazamientos crecientes hasta la rotura (falla 5)

El criterio de rotura se definió teniendo en cuenta los resultados de los ensayos de tracción biaxial a plena escala llevados a cabo en CFER, Canadá. La **Figura 6** muestra como ejemplo la curva carga – desplazamiento en un ensayo uniaxial de tracción del material base del tubo. Se indica la región aproximada que corresponde a una deformación del 3%. En la región de deformación plástica de los materiales de los tubos API 5L X70 la pendiente de la curva tensión – deformación es muy baja, así que un cambio pequeño en resistencia o espesor implicaría una diferencia grande en la deformación acumulada en cualquier carga aplicada durante la prueba, por lo que se puede considerar que una tensión de rotura (biaxial) del orden de 500-600 MPa es un criterio de falla adecuado para este material.

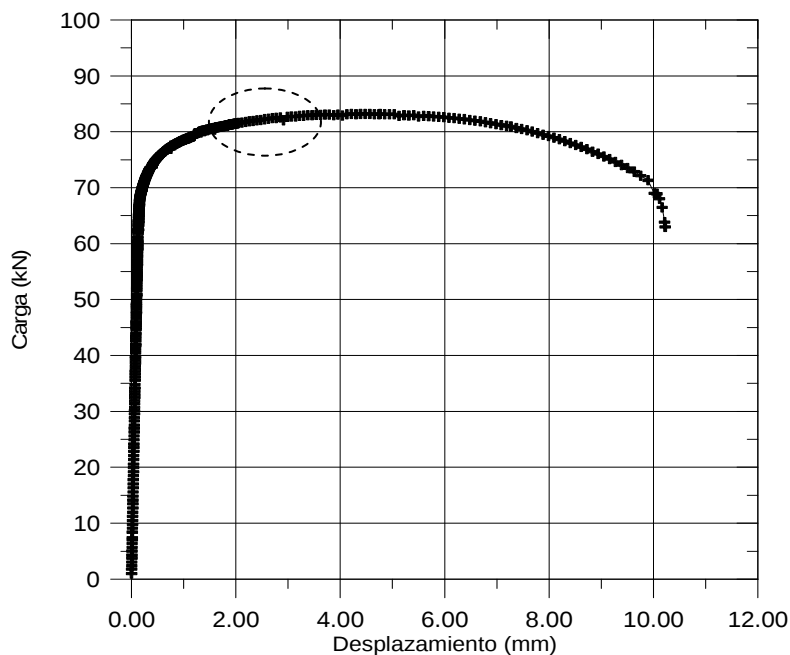


Figura 6: Curva carga-desplazamiento de ensayo

Del análisis de los valores de la Tabla 3 obtenidos de las corridas del modelo se observó que para este estado de carga (Figura 5) los valores tensionales se hacen críticos para desplazamientos acumulados superiores a 150 cm. Debe notarse también que los estados tensionales se mantuvieron acotados y comparables entre ambos ductos para desplazamientos menores. Luego, a medida que los desplazamientos aumentaron, el ducto NGL crece en tensión. Para valores de desplazamiento superiores a los 150 cm, el ducto NGL toma valores de tensiones del orden de rotura mientras que el ducto NG permanece en régimen elástico. Esto confirma que el modelo no solo predice la rotura del NGL, sino que justifica la integridad de ducto NG. Además cuantifica el desplazamiento, lo que ratifica y complementa las conclusiones de los especialistas geotécnicos.

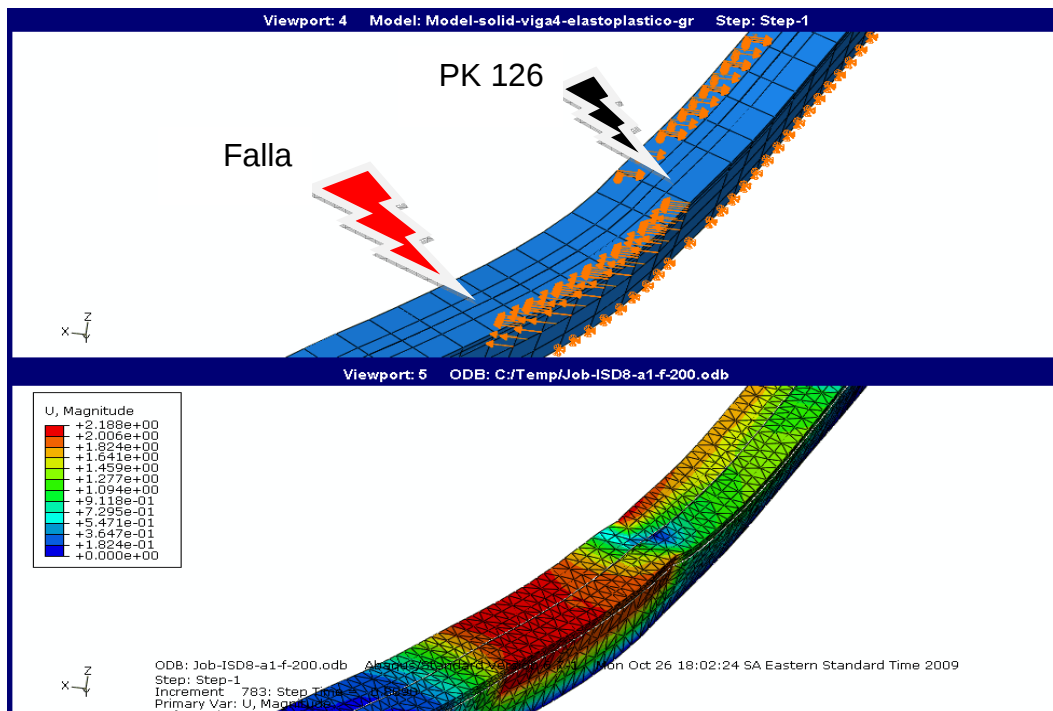


Figura 7: PK 126, sitio de Falla y condiciones de borde. Debajo desplazamientos del modelo

En la **Figura 7** se presenta la ubicación del PK 126 y del PK 125+950 donde se aplicaron los desplazamientos ya descritos en la Tabla 3. Se muestra el gradiente desplazamiento resultante en el suelo en la parte inferior de la Figura 7. Finalmente, en la **Figura 8** se muestra en la parte inferior el punto de mayor sollicitación sobre el ducto NGL en la posición correspondiente al PK 125+950.

Se demostró que, como concluyeron los especialistas geotécnicos aplicando dos desplazamientos como los modelados, se obtiene la tensión de rotura para 177,8 cm de desplazamiento impuesto. La tensión obtenida para el ducto de NGL es de 584 MPa, mientras que el de NG permanece en régimen elástico. Este hecho justifica lo observado en campo que el ducto de NGL es más susceptible a los desplazamientos de suelo comparado con el ducto de NG.

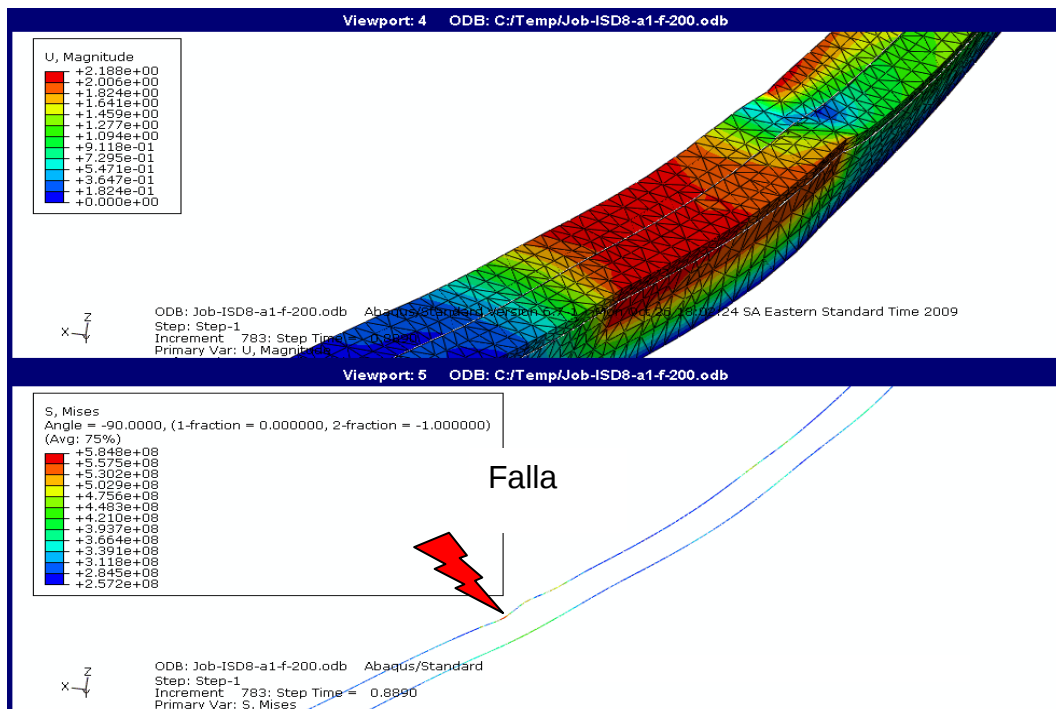


Figura 8: Localización del punto más solicitado sobre el ducto de NGL (584 MPa)

Como segunda validación se presentan los resultados del modelo para reproducir otro evento que llevó a la formación de una arruga identificada en Abril de 2007 en el PK 125+487 de la línea NGL. Los resultados de la herramienta MFL permiten asegurar su existencia (**Figura 9**).

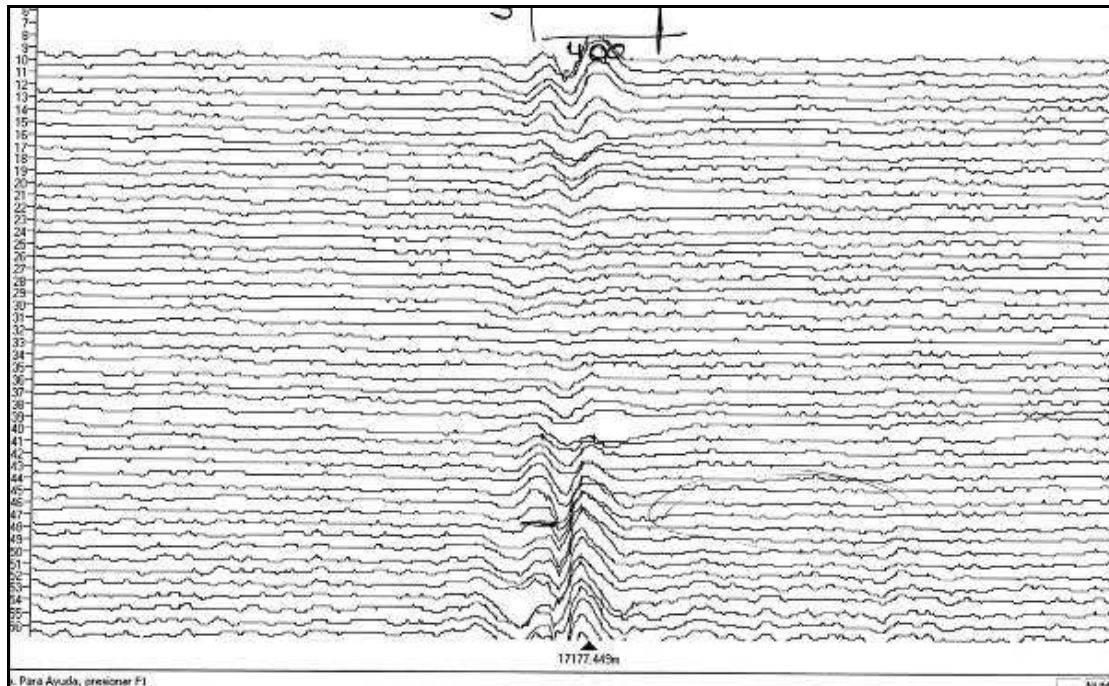


Figura 9: Evidencia MFL – mayo 2006

Esto se confirma en los reportes geológicos de campo y en las lecturas que reflejaban los extensómetros instalados por el sistema de integridad de COGA. A continuación se transcriben párrafos que ayudan a entender la cinemática del suelo y del ducto.

Del reporte extensométrico: "... Para los puntos de monitoreo del PK125+418, PK125+555 y PK125+655 se tiene que las últimas lecturas están reflejando que el ducto entre el PK125+418 y el PK125+555 estuvo comprimido en un principio (efecto que produjo la arruga en esa zona) y al destapar la zona se descomprimieron (aumento en los 3 sensores)."

Del reporte geológico: "...Se considera que el empuje del terreno en flujo de tierras muy lento, que ocurre tanto a lo largo del DDV (componente principal del movimiento en la dirección en que descende la ladera), como hacia la izquierda de éste (componente impuesta por la acción de las quebradas y por la dirección de los deslizamientos y flujos de tierra reconocidos o inferidos, dibujados en la Figura 10) en todo el tramo, ha generado esfuerzos importantes sobre la tubería, los cuales se concentran en la parte más baja, en el cruce de la quebrada, donde el ducto encuentra una gran restricción al movimiento por estar confinado en la roca y presentar bajo la margen derecha de la quebrada una curva cóncava hacia arriba, es decir, contraria a la del sitio de la arruga. En respuesta a estos esfuerzos y teniendo la tubería un punto fijo (el cruce de la quebrada), el ducto se levantó y se deformó hacia donde está menos confinado y tiene posibilidad de movimiento, es decir en la curva cóncava hacia abajo, en la cual finalmente se formó la arruga..."

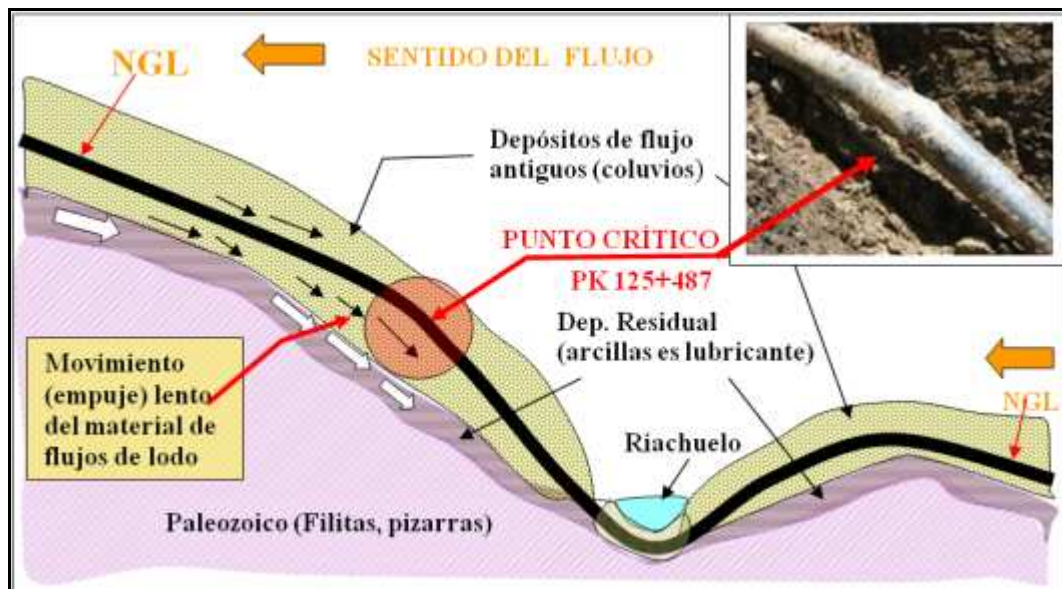


Figura 10: Esquema de la cinemática del ducto por geotécnico de campo.

En base a la evidencia presentada se modificó el modelo: se le quitó un tramo de ducto para reproducir el efecto de la desvinculación hecha durante la reparación de la Falla 5. La **Figura 11** muestra este detalle.

La **Figura 12** presenta los desplazamientos impuestos según el eje longitudinal de los ductos y la pequeña componente lateral en la zona de la arruga. En este caso los desplazamientos son impuestos sobre la cara superior con magnitudes crecientes según los valores reportados en la **Tabla 4**. El resto de las cargas son las presiones internas de los ductos (150 barg para NGL y 145 barg para NG) y la acción de la gravedad sobre los ductos y la capa 1 de suelo.

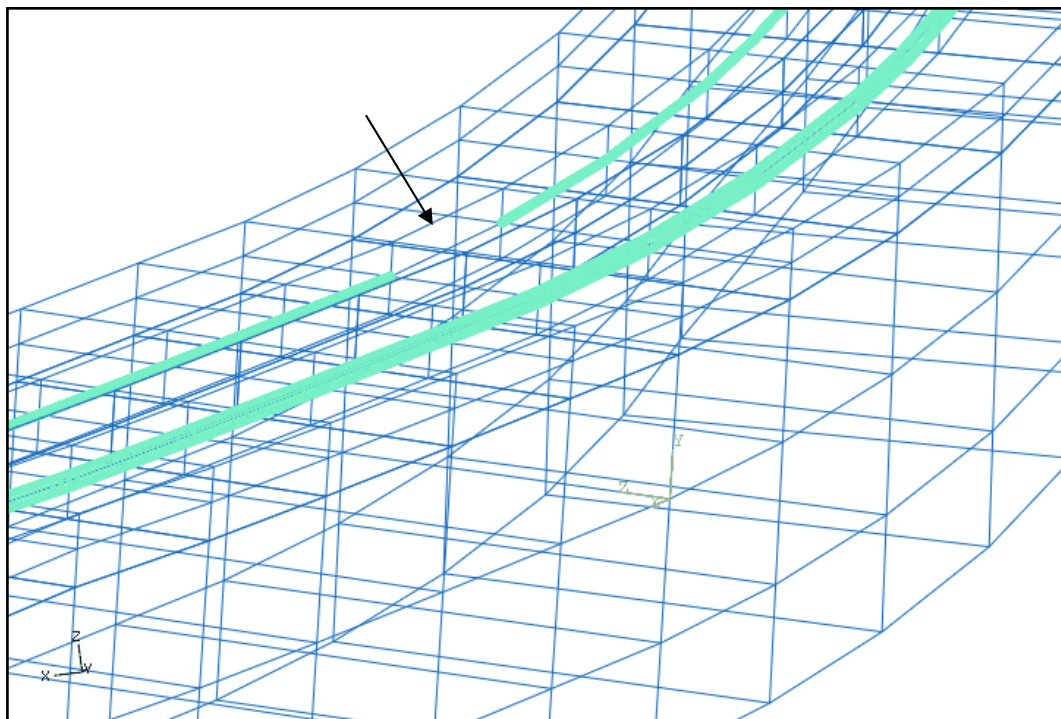


Figura 11: Ducto NGL cortado en ocasión de la reparación de la falla PK 125+950.

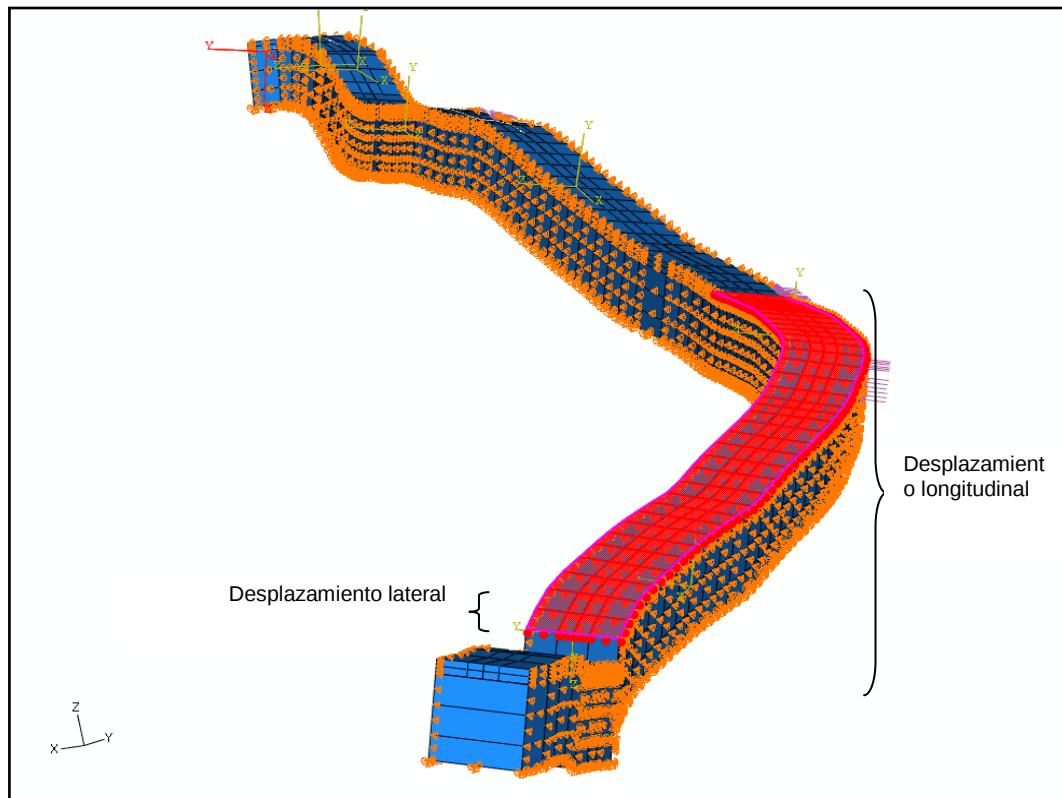


Figura 12: Desplazamientos impuestos en la zona superior de la capa 1 de suelo.

En la **Tabla 4** se presentan los resultados obtenidos. En la primera columna se presenta el número de fila. En las 3 columnas siguientes se indican las condiciones de borde. En las columnas 5ta y 6ta se indica la presión interior a la que opera cada ducto. Las columnas 7ma y 8va presentan la tensión equivalente de Von Mises (en MPa) para el punto más solicitado de cada ducto. Las columnas 9na y 10ma presentan la magnitud de los desplazamientos impuestos sobre la cara superior de la capa 1 de suelo (ver figura 14). La columna 11va muestra si la máxima tensión equivalente se localiza en la arruga. Finalmente la última columna indica si se considera o no la gravedad sobre la capa 1 de suelo. Esto último fue agregado para realizar un análisis de sensibilidad sobre esta variable.

Los colores presentan condiciones de carga diferentes. Las filas 1 y 2 presentan resultados sin considerar desplazamientos impuestos. La única diferencia entre ellas es que la fila 1 no incluye la gravedad sobre la capa 1 de suelo, mientras que la fila 2 si. Las filas 3 a 6 incluyen desplazamientos longitudinales de magnitud creciente. Las filas 7 a 10 incorporan además el desplazamiento lateral en la zona de la arruga (ver figura 12). Las filas 11 a 13 presentan desplazamientos longitudinales crecientes pero sin considerar la gravedad sobre la capa 1 de suelo.

El criterio de rotura se definió en 500-600 MPa de tensión equivalente como se indicó más arriba.

Si se comparan las filas 3 a 6 se observa que para desplazamientos pequeños, entiéndase 30 cm, hay una inversión en la criticidad de los ductos. Este fenómeno también se observó en el caso de la falla PK 125+950. Cuando los desplazamientos longitudinales crecen en magnitud (45, 60 y 69 cm) la sección más crítica aparece en el ducto NGL. Puede observarse que para desplazamientos mayores de 45cm el ducto NGL alcanza los valores tensionales críticos definidos anteriormente. Para esa misma circunstancia el ducto NG permanece en valores de tensión del orden de los 300 MPa. En cuanto a la localización del estado tensional máximo en la zona de la arruga, se observa que cuando las tensiones son importantes y se acercan a la tensión de fluencia del material, las tensiones se localizan en la arruga, lo que demuestra que el modelo reproduce correctamente la realidad y coincide con las observaciones del geotécnico de campo.

Fila	Fondo	Lateral cercano	Lateral lejano	Pi NGL	Pi NG	Max Sigma (MPa)		Desplazamientos impuestos		Localiza en arruga	Gravedad capa 1
				(MPa)	(MPa)	Ducto NGL	Ducto NG	longitudinal	lateral		
1	Fijo	Fijo despl. normal	Fijo despl. normal	15	14,5	239,00	295,00	-	-	no	no
2	Fijo	Fijo despl. normal	Fijo despl. normal	15	14,5	319,00	320,00	-	-	no	si
3	Fijo	Fijo despl. normal	Fijo despl. normal	15	14,5	313,00	324,00	30	-	no	si
4	Fijo	Fijo despl. normal	Fijo despl. normal	15	14,5	500,00	302,00	45	-	si	si
5	Fijo	Fijo despl. normal	Fijo despl. normal	15	14,5	624,00	316,00	60	-	si	si
6	Fijo	Fijo despl. normal	Fijo despl. normal	15	14,5	647,00	334,00	69	-	si	si
7	Fijo	Fijo despl. normal	Fijo despl. normal	15	14,5	337,00	324,00	30	20	no	si
8	Fijo	Fijo despl. normal	Fijo despl. normal	15	14,5	492,00	310,00	45	20	si	si
9	Fijo	Fijo despl. normal	Fijo despl. normal	15	14,5	627,00	326,00	60	20	no	si
10	Fijo	Fijo despl. normal	Fijo despl. normal	15	14,5	644,00	247,00	71	10	si	si
11	Fijo	Fijo despl. normal	Fijo despl. normal	15	14,5	317,00	330,00	30	-	si	no
12	Fijo	Fijo despl. normal	Fijo despl. normal	15	14,5	497,00	362,00	45	-	si	no
13	Fijo	Fijo despl. normal	Fijo despl. normal	15	14,5	539,00	347,00	51	-	si	no

Tabla 4: Resultados de los modelos para validar “la arruga”

En las filas 7 a 10 se impone adicionalmente el desplazamiento transversal al eje de los ductos. Se observa que para desplazamientos pequeños (30 cm) los estados tensionales son similares en ambos ductos repitiendo lo observado para los casos analizados anteriormente (solo carga longitudinal). Luego, las tensiones para desplazamientos crecientes son similares a los casos de carga solo longitudinal. Sin embargo la localización no es tan franca (solo 2 de los 4 casos localizan).

Finalmente, las filas 1 y 2 como las 11 a 13 presentan corridas adicionales que se realizaron para estudiar la sensibilidad del modelo frente a la incorporación de la gravedad en la capa 1 de suelo. Esto no es trivial y su incorporación requiere mayor tiempo de cálculo y un proceso de ajuste muy cuidadoso y laborioso. Por este motivo, si esta carga se pudiera omitir en futuros modelos, ahorraría mucho tiempo de preparación, ajuste y análisis. Esta es una de las características más importantes para usar el modelo como herramienta de análisis y gestión de la operación.

Al comparar los resultados de las filas 1 y 2 se observa una importante aleatoriedad de los resultados, pero solo a niveles tensionales bajos comparados con los de fluencia del material. En las filas 10 a 13 se incorporan desplazamientos crecientes en sentido longitudinal. De hecho, los resultados deben compararse con los de las filas 3, 4 y 5. Se observa que el no considerar la gravedad en la capa 1 de suelo no muestra un comportamiento diferente, no afecta los resultados predichos en la ocurrencia de la arruga.

En la **tabla 5** se transcriben algunos resultados de la tabla 4 y se incorporan nuevos para hacer los datos perfectamente comparables.

Análisis de sensibilidad		con gravedad		sin gravedad	
Desplazamientos impuestos		Max Sigma (MPa)		Max Sigma (MPa)	
longitudinal	lateral	Ducto NGL	Ducto NG	Ducto NGL	Ducto NG
0	-	319,00	320,00	239,00	295,00
30	-	317,00	330,00	313,00	324,00
45	-	497,00	362,00	500,00	302,00
51	-	539,00	347,00	561,00	307,00

Tabla 5: Resultados de los modelos con y sin gravedad en la capa 1 de suelo.

En la **Figura 13** se presentan las curvas tensión vs desplazamiento impuesto (basada en la tabla 5). Se observa claramente que la evolución de los estados tensionales difiere muy poco al considerar o no la gravedad de la capa 1 de suelo, por lo que no reviste mayor influencia en los resultados para el nivel de tapada considerado en este modelo.

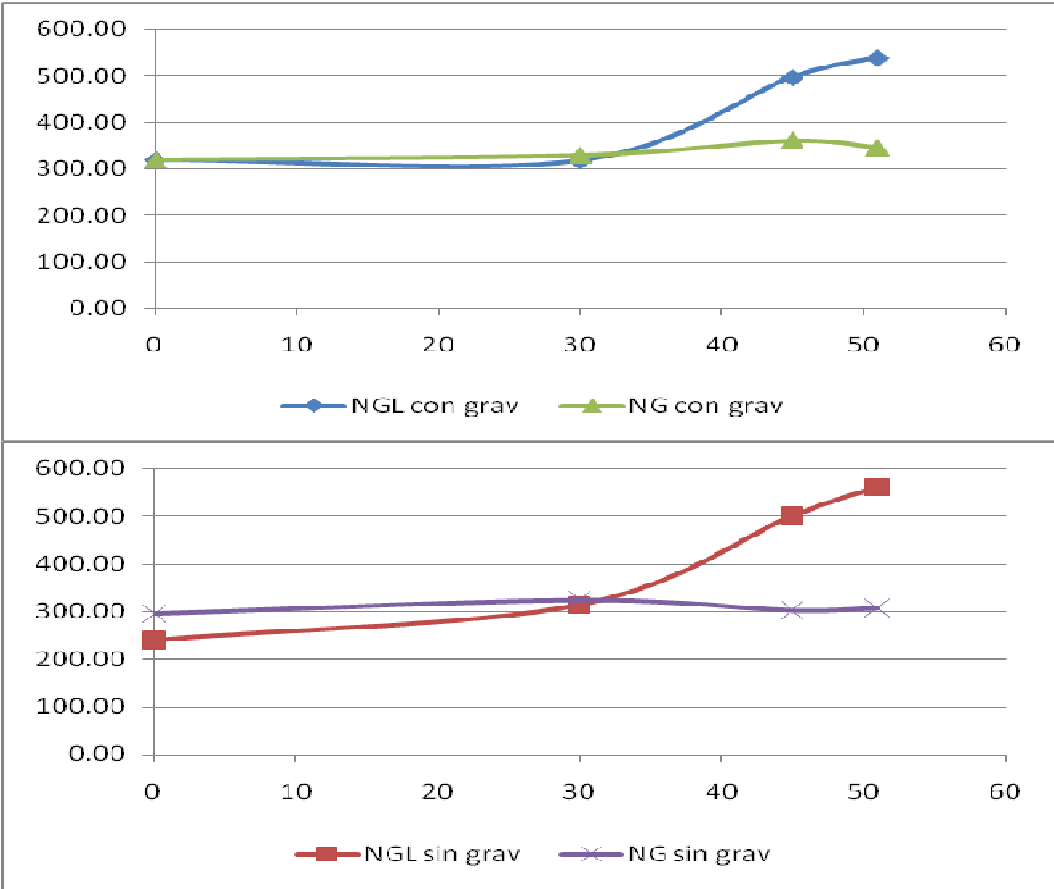


Figura 13: Evolución tensional (MPa) vs desplazamientos (cm) con y sin gravedad en la capa 1 de suelo.

A continuación se presenta los resultados para el modelo de la fila 5 (60 cm de desplazamiento longitudinal) de la tabla 4, por ser el que más fielmente reproduce lo sucedido en campo. En la **Figura 14** se presenta una distribución del vector desplazamiento. Se observa el “anclaje” en la zona del arroyo, como indica el geotécnico de campo, y que el máximo desplazamiento es del orden de los 90 cm.

En la **Figura 15** (que muestra solo los ductos) se presenta la localización de tensiones en la zona de la arruga. En la **Figura 16** se muestra la evolución de la componente longitudinal en cada punto de la “Pipe Section” (puntos 1, 3, 5, 7 según muestra en la **Figura 19**). Los puntos 1, 3, 5, 7 se definen de acuerdo a la terna positiva de cada elemento de tipo viga. Si se observan conjuntamente las figuras 17 y 16 se observa que el punto SP7 es el punto inferior y el SP3 es el punto superior de la sección del ducto. Esto reproduce la compresión sobre el borde inferior del ducto y tracción sobre el borde superior, coherente con la cinemática de formación de la arruga.

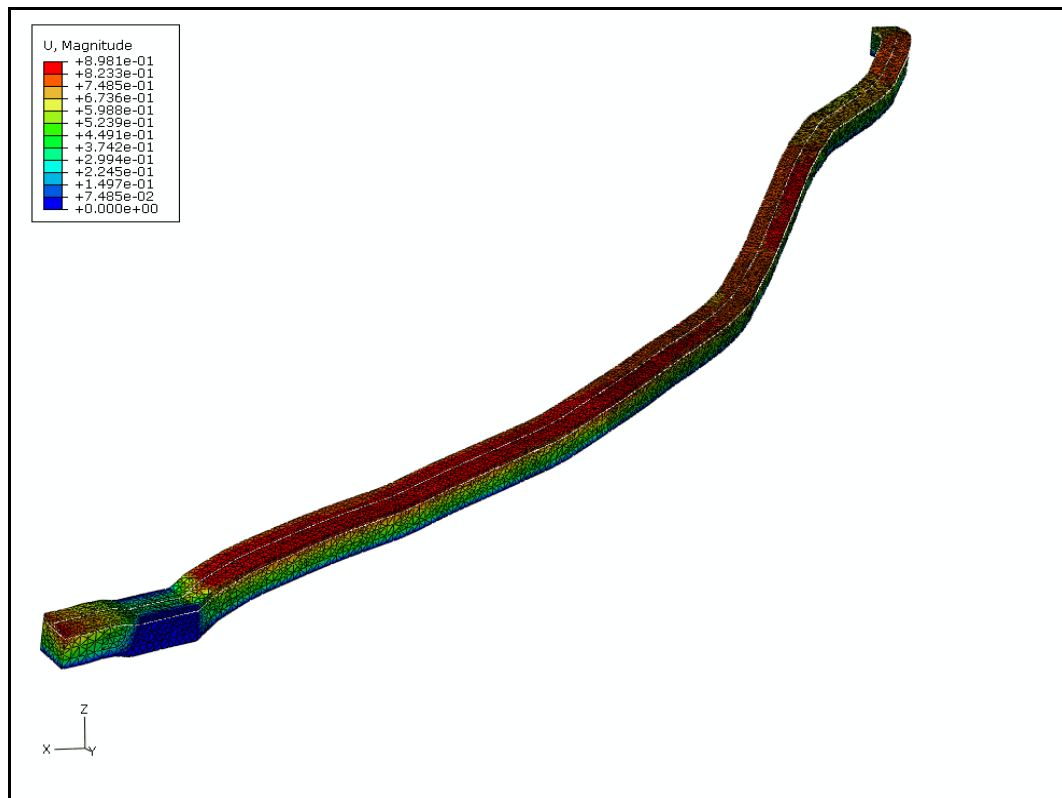


Figura 14: Desplazamientos del modelo

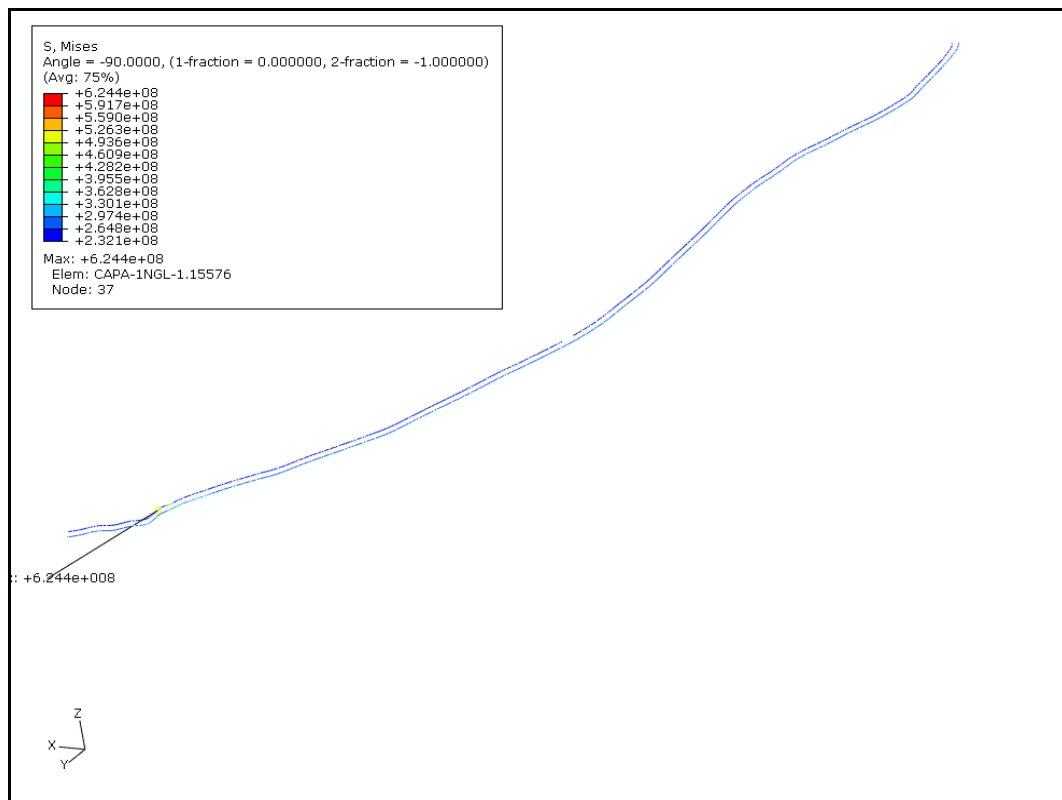


Figura 15: Localización de tensiones en zona de arruga en el ducto NGL

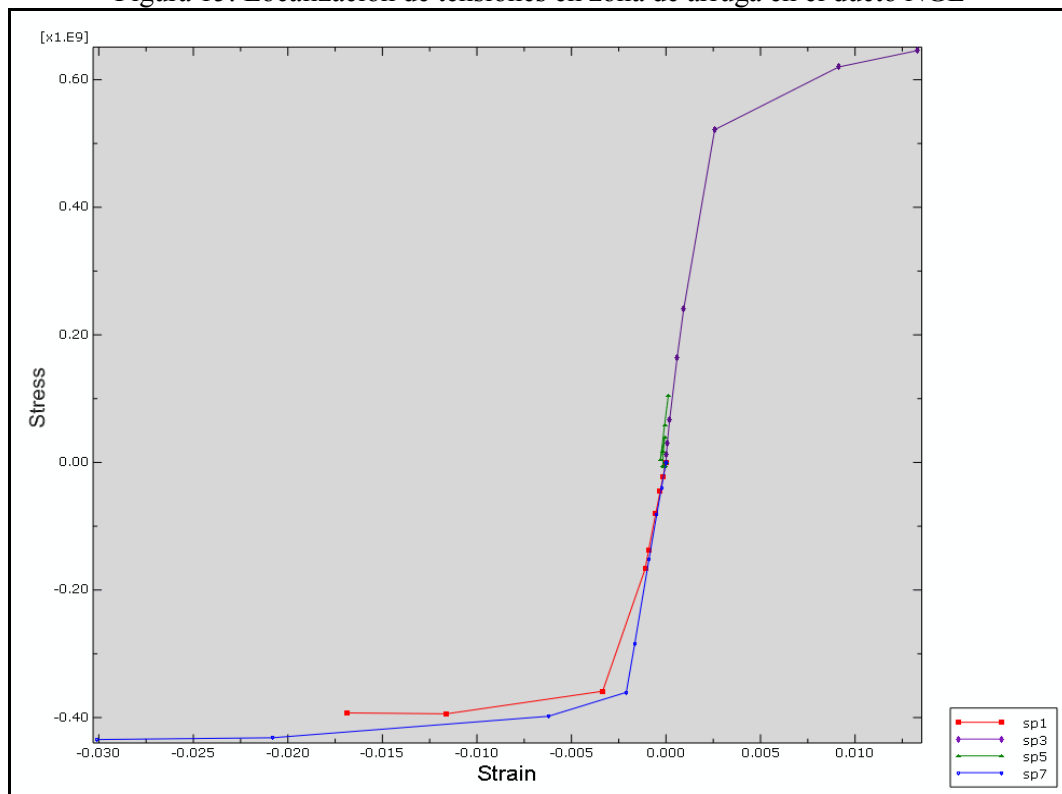


Figura 17: Evolución de la tensión longitudinal S11 vs deformación longitudinal E11 en cada punto de la sección de la arruga

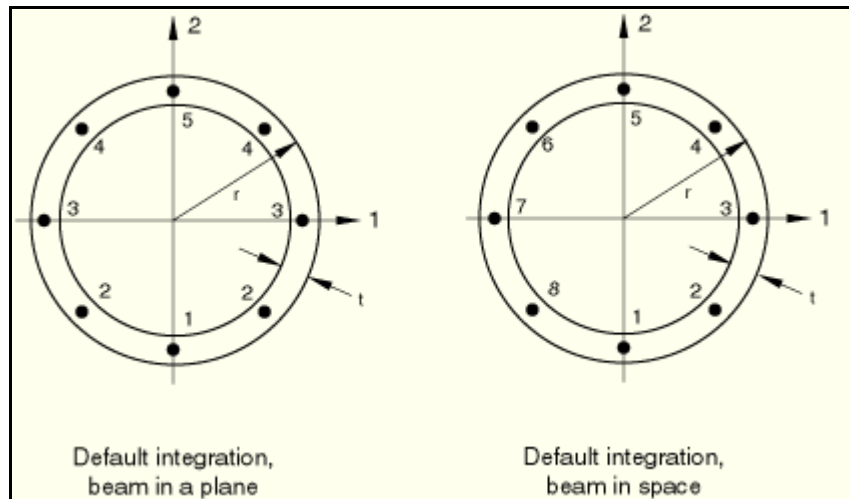


Figura 17: “Section Point” del elemento tipo “pipe” utilizado

Por otro lado, si se utiliza como referencia el código Z662-03 de la Asociación de Standard Canadiense para Sistemas de Tuberías de Petróleo y Gas [7], 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:

$$\epsilon_{cf} = \Phi_{ec} \times \epsilon_c^{crit}$$

Donde ϵ_{ec} 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 Φ_{ec} es de 0.8 y ϵ_c^{crit} se puede calcular con la siguiente fórmula:

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

Donde:

- t = espesor
- d = diámetro externo del tubo
- p_i = presión interna
- p_e = presión externa
- E_s = modulo de Young

En la **Tabla 6** se presentan los valores de deformación crítica obtenidos para un caño de 356 mm (14”) de diámetro, con una presión externa de 1 Bar, como si la tubería hubiese salido de servicio, ya que esta es la condición más crítica para el pandeo local. El cálculo se realiza para los espesores que el ducto de 14” presenta en la línea. Los resultados entre paréntesis se expresan en micro strain.

Presión Interna [barg]	Espesores de pared del Tubo [mm]			
	5.56	6.35	7.14	9.53
1	0.0053 (5300)	0.0064 (6400)	0.0075 (7500)	0.0109 (10090)
100	0.0121 (12100)	0.0117 (11700)	0.0117 (11700)	0.0132 (13200)
150	0.0208 (20800)	0.0183 (18300)	0.0169 (16900)	0.0162 (16200)

Tabla 6: Valores según Z662-03

Se puede ver que, para el espesor en la zona de estudio, el tubo puede soportar un 1% de deformación en compresión antes de producirse la arruga cuando no tiene presión interna. Los registros de presión provistos por COGA indican que en esta zona la misma varía entre 147 y 150 Barg. Se calculó también la máxima deformación compresiva para 100 barg, tomada como la mínima presión en operación posible, sin que el tramo salga de servicio y para 150 Barg.

Utilizando esta información y la proporcionada por el modelo en la figura 16 (puntualmente la gráfica que corresponde al “Section Point” compresivo) puede concluirse cuál sería el máximo desplazamiento de suelo que provocaría la deformación crítica de acuerdo a la norma mencionada. En este caso el ducto se encontraba a 150 barg. La deformación crítica --según Tabla 6— es 17000 micro strain para esa presión. Interpolando en forma lineal entre los factores de proporcionalidad de aplicación de carga del modelo numérico que se presentan en la **Figura 18** resulta que para un 87,02% (0.8702) de los 60 cm de desplazamiento total aplicados, estaría en una deformación longitudinal de aproximadamente 17000 micro strain. De esta manera el modelo permite cuantificar los desplazamientos observados por los especialistas geotécnicos y compatibilizar los conservativos datos de norma.

0	Increment	0: Step Time = 0.000
1	Increment	1: Step Time = 0.1000
2	Increment	2: Step Time = 0.2000
3	Increment	3: Step Time = 0.3500
4	Increment	4: Step Time = 0.5750
5	Increment	5: Step Time = 0.6594
6	Increment	6: Step Time = 0.7859
7	Increment	7: Step Time = 0.9125
8	Increment	8: Step Time = 1.000

Figura 18: Evolución del factor de proporcionalidad de aplicación de la carga

CONCLUSIONES

Se describió una herramienta computacional para la gestión de integridad de ductos enterrados en suelos susceptibles a deslizamientos, y su aplicación a dos tuberías paralelas (NG y NGL) en una traza común en suelo selvático. Se desarrollaron dos modelos conceptualmente distintos. El denominado solid-shell usa elementos sólidos para el suelo y elementos placa para el ducto. El denominado solid-beam mantiene los elementos sólidos para el suelo y elementos viga para el ducto. El solid-shell presenta mayor versatilidad dado que permite simular diferentes tipos de contactos entre el suelo y el ducto, es superior en cuanto a su capacidad de visualización de resultados pero es excesivamente lento en su proceso de cálculo. El solid-beam presenta una gran velocidad de cálculo (horas o minutos) debido a su significativamente menor cantidad de elementos, y se constituye en una herramienta rápida que colabora en la toma de decisiones del personal de integridad.

Se simularon los movimientos de suelo que los geotécnicos definieron como causantes de una falla por carga axial en el ducto NGL. Para desplazamientos pequeños, el ducto de NG aparece como más solicitado que el NGL, pero los valores tensionales encontrados están lejos de comprometer la integridad del ducto (en el orden de la mitad de la tensión de rotura). Para desplazamientos superiores esta tendencia se invierte, el ducto de NGL es más solicitado que el de NG. El modelo predice que desplazamientos longitudinales del orden de los 70 cm para esta configuración geométrica específica producen la rotura del ducto de NGL.

Se adoptó como criterio de rotura de los tubos una tensión equivalente en el ducto de entre 500 y 600 MPa. Para los deslizamientos máximos impuestos el modelo numérico predice deformaciones en el ducto del orden del 2 al 3%, similares a los que provocaron la rotura en ensayos biaxiales a plena escala de los tubos. Los resultados numéricos predicen la tensión de rotura en el NGL para 178 cm de desplazamiento transversal impuesto con la geometría definida por el estudio geotécnico. La tensión obtenida para el ducto de NGL es de 584 MPa, bajo este mismo estado de desplazamientos el ducto NG permanece en régimen elástico (437 MPa). Estos resultados coinciden con la conclusión de los especialistas geotécnicos que analizaron los sucesos que condujeron a la falla.

Se demostró que el modelo no solo predice la rotura del ducto de NGL, sino que justifica la integridad del ducto NG. Además cuantifica el desplazamiento, lo que ratifica y complementa las conclusiones de los especialistas geotécnicos. Se demostró que cuando los desplazamientos longitudinales crecen en magnitud (45, 60 y 69 cm) la sección más crítica aparece en el ducto NGL. Para desplazamientos mayores de 45cm, dada la configuración, el ducto NGL alcanza los valores tensionales críticos. Para esa misma circunstancia el ducto NG permanece en valores del orden de los 300 MPa.

Se demostró que si se impone adicionalmente el desplazamiento transversal al eje de los ductos las tensiones para desplazamientos crecientes son similares a los casos de carga solo longitudinal. Cuando los valores tensionales son importantes y se acercan a la tensión de fluencia del material, las tensiones se localizan en la sección de una arruga, ocurrida aguas abajo de la falla anterior. En un análisis puntual de la sección transversal del ducto en la zona de la arruga se demostró la compresión sobre el borde inferior y tracción sobre el borde superior, coherente con la cinemática de formación de la arruga. De nuevo el modelo reproduce correctamente la realidad y coincide con las observaciones del geotécnico de campo.

Finalmente se mostró como compatibilizar los datos de norma Z662-03 de la Asociación de Standard Canadiense para Sistemas de Tuberías de Petróleo y Gas con los desplazamientos impuestos al modelo. De este modo se pueden definir desplazamientos límites que ayuden a la toma de decisiones en las estrategias de integridad. El modelo quedó operativo para la sección bajo estudio. Su función actual y futura es la de colaborar en el proceso de toma de decisión de las intervenciones de integridad del operador de las líneas.

REFERENCIAS

- [1] Pipeline Research Council International, Inc., “Extended Model for Pipe Soil Interaction”, PR-271-0184, 2003.
- [2] H. Mahdavi, Kenny S., Phillips R, Popesku R, “Influence of Geotechnical Loads on Local Buckling Behavior of Buried Pipelines”, Proceedings of 7th International Pipeline Conference, 2008, Calgary, Alberta, Canada
- [3] Fredj, A, Dinovitzer, A, Zhou Joe, “A 3-Dimensional. Continuum ALE Model for soil-Pipe Interaction”, Proceedings of 7th International Pipeline Conference, 2008, Calgary, Alberta, Canada
- [4] CSA Standard Z662, Oil and Gas Pipeline System, June 2007
- [5] Report GIE 2402-03-06 Expert assessment and definition of root causes of failures in Camisea 14” Pipeline
- [6] Informe de ensayo INTEMA 070605 GIE
- [7] J.L. Otegui. Report GIE 2801-06-07, Root cause analysis of failures 1 & 5, 14” NGL pipeline, Camisea. TGP, Peru, 2007.