

READECUACIÓN GEOMÉTRICA DE UNA ESTRUCTURA METÁLICA

GEOMETRIC READJUSTMENT OF A METALLIC STRUCTURE

Daniela S. de la Canal^a y Adriana Pernich^b

^a *Departamento Ingeniería Civil Facultad de Ingeniería Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina, delacanal.daniela@gmail.com, <http://www.uncoma.edu.ar>*

^b *Departamento Ingeniería Civil Facultad de Ingeniería Universidad Nacional del Comahue, IITSI, Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina, adriana.pernich@fain.uncoma.edu.ar, <http://www.uncoma.edu.ar>*

Palabras clave: Análisis Estático de Tensiones, Retesado de Cables de Acero.

Resumen. Una facilidad de transporte y distribución de gas en operación y que presta servicio hace más de treinta y cinco años registra en el ducto desplazamientos del orden de su diámetro. Esta línea de conducción cruza el cauce de un río por medio de un sistema estructural compuesto por torres, un cable principal y péndolas. En función de las condiciones de emplazamiento de la estructura y la tecnología instalada se desarrolla una propuesta factible y confiable de readecuación geométrica para los desplazamientos registrados que además facilite futuros estadios de mantenimiento. La propuesta se simula en un software de elementos finitos de propósitos generales donde se verifica en cada paso del procedimiento que durante la recomposición geométrica las tensiones desarrolladas en el ducto no sobrepasen las tensiones admisibles.

Keywords: Static Stress Analysis, Retensioning of Steel Cables.

Abstract. A gas transportation and distribution facility in operation and that has been in service for more than thirty-five years, registers displacements in the pipeline of the order of its diameter. This line of conduction crosses a riverbed by means of a structural system made up of towers, a main cable and hangers. Depending on the location conditions of the structure and the installed technology, a feasible and reliable geometric readjustment proposal is developed for the registered movements that also facilitate future maintenance stages. The proposal is simulated in a general purpose finite element software where it is verified in each step of the procedure that during the geometric recomposition the stresses developed in the pipeline do not exceed the allowable stresses.

1 INTRODUCCIÓN

En un gasoducto se detectaron desplazamientos del orden del diámetro de la línea de conducción. En dos oportunidades se realizaron mediciones de posición y en la última campaña se registraron desplazamientos descendentes de 0,65m en el cable principal y 0,63m en el ducto, tal y como se muestra en la Figura 1, recopilado en el proyecto integrador profesional De la Canal, D., 2021.

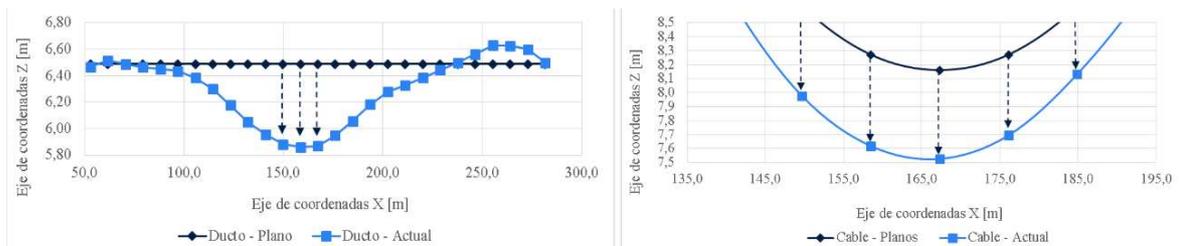


Figura 1: Registro del descenso de posición en ducto y cable, respectivamente.

El sistema en estudio se compone por una estructura sostén que resiste el cruce aéreo del ducto sobre el cauce del río, Figura 2. Sobre el extremo superior de cada torre metálica, ubicadas una en cada margen, se vincula el cable principal por medio de veintisiete cables secundarios equidistantes (veinticinco entre torres y uno a continuación de cada torre) que sostienen un gasoducto de 24” de diámetro. De los brazos laterales de las torres se vinculan cables de viento que arriostan el gasoducto lateralmente.



Figura 2: Sistema estructural objeto del trabajo.

La estructura posee más de treinta y cinco años en operación y servicio y ha sido administrada por al menos tres compañías distintas. El ducto se corresponde con una línea de transporte primaria y el emplazamiento se encuentra en cercanías a zonas que hoy están pobladas. La documentación que brindó la compañía que opera la línea solo incluye planos descriptivos de montaje. El tipo de tecnología instalada en la estructura (clip prensa cable) no permite efectuar mantenimientos correctivos o preventivos de los cables, de manera tal de poder corregir los desplazamientos. Tampoco se detectan válvulas, derivaciones ni trampas en cercanía al ducto, las que pudieran facilitar la ejecución de ensayos no destructivos y/o mantenimiento sobre éste. No se evidenció mantenimiento ni se hallaron documentos con registro de éste.

La motivación del trabajo se fundamenta en el hecho de proveer una solución práctica y factible de corrección, proponiendo además tecnología que facilite futuros estadios de mantenimiento sobre la estructura. Específicamente el proyecto concibe el desarrollo de una propuesta de reacondicionamiento geométrico, que permita corregir en la medida de lo posible, los desplazamientos registrados, sin comprometer la operación del gasoducto.

El objetivo principal del trabajo fue confeccionar un modelo de elementos finitos que reproduzca fielmente la propuesta de readecuación geométrica de la estructura metálica. El modelo se calibró con mediciones para garantizar que los resultados que se obtienen concuerden con lo que sucedería en la estructura en cada paso del reacondicionamiento. En cada uno de los pasos se verificó que la máxima tensión en la unión soldada del ducto no supere el valor admisible para la misma.

2 ANTECEDENTES, COMPLETACION DE DATOS Y PROPUESTA DE READECUACIÓN

2.1 Antecedentes

Los planos hallados son del tipo descriptivo, y no incluyen memoria de cálculo de ninguno de sus componentes, de estos se obtuvieron datos de geometría, material y secciones nominales. De las campañas de medición y ensayos se obtuvieron datos de tensiones y posición para ratificar los resultados del modelo teórico que se presenta en el Punto 3 y luego calibrar el modelo de elementos finitos del Punto 4. En la Figura 3 se indica un esquema de la estructura donde se puede visualizar una perspectiva de esta y cada uno de los elementos estructurales.

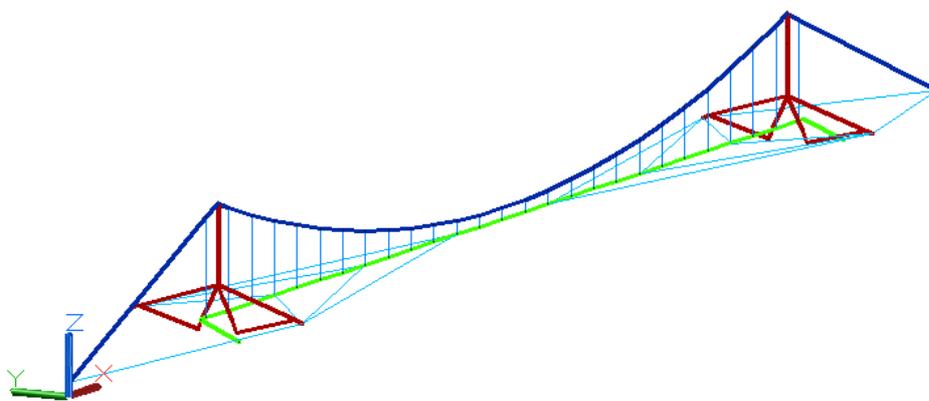


Figura 3: Esquema de la estructura metálica con sus componentes.

2.2 Completación de datos

La información obtenida de la documentación gráfica, mediciones y ensayos no es suficiente para caracterizar los elementos estructurales. Motivo por el cual se recurrió a estándares industriales y fabricantes, IPH 2012, Bridon, ASTM A 586-04a 2004 y ASTM A 603-98 Reapproved 2003, en busca de los datos faltantes para la correcta caracterización de los elementos estructurales donde se incorporan secciones, resistencias, Modulo de Young y densidad del material constitutivo.

2.3 Propuesta de readecuación

La solución propuesta para la alineación de la tubería es concebida bajo la consideración de evitar el uso de barcasas y/o grandes grúas debido a la dificultad operativa que conlleva la presencia del río. De las campañas de inspección realizadas a la estructura se verifica que el estado de las péndolas es satisfactorio y no es necesario cambiarlas, sí deben ser retesadas. Considerando esto, se propone elevar el ducto por efecto del retesado de las péndolas. Es importante destacar que el tipo de tecnología actual instalada en los cables impide el retesado de las péndolas, por lo tanto, la propuesta no sólo se enfoca en la corrección del desvío sino también en la selección e inclusión de tecnología sencilla que facilite la ejecución y el futuro mantenimiento. Los elementos tensores por incluir y su ubicación se muestran en la Figura 4, de acuerdo con Crosby y ASTM F-1145/92 1992.



Figura 4: Materialización de la propuesta de readecuación geométrica.

La propuesta tiene como requisito principal asegurar que las tensiones generadas en el ducto durante la corrección no superen el valor límite admisible. La propuesta consta de dos etapas según las cuales se completará la readecuación geométrica: instalación de tensores en péndolas e inclusión de la primera corrección de 15cm y secuencia de reposicionamiento con pasos de 5cm. El esquema de la Figura 5 describe la propuesta.

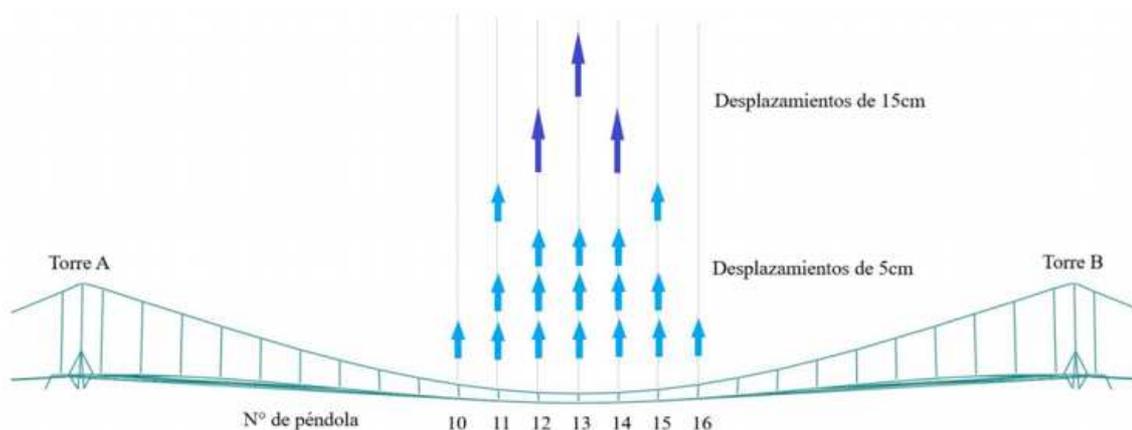


Figura 5: Propuesta de readecuación geométrica.

En cada etapa del proceso y mediante la aplicación de desplazamientos en nodos del ducto se irán elevando los puntos de la tubería como reacción al descenso de los puntos homónimos del cable. Físicamente se ejecutará mediante el equipo criquet tensor y a continuación con el retesado de las péndolas. La propuesta incluye elevar puntos del ducto y en consecuencia

provocar descenso de los puntos vinculados del cable principal. Esta acción-reacción de elevación y descenso es lo que se simula buscando la opción que satisfaga los requisitos de tensión admisible en el ducto. El parámetro a considerar durante la ejecución es el desplazamiento vertical. A modo de resumen y en la Figura 6 se indica un esquema con los pasos propuestos: 1) a ambos lados de la péndola se posicionan dos equipos criquet tensor, cada eslinga se enlaza a la parte superior del cable principal y la parte inferior del ducto; 2) se acciona sobre el criquet tensando la eslinga y elevando 15(5)cm el ducto; 3) se procede a desenlazar la péndola e incorporar el tensor; 4) una vez el tensor comience a tomar carga, se retiran las eslingas; 5) se acciona sobre el tensor elevando 5cm el ducto; y 6) se acciona nuevamente sobre el tensor elevando 5cm el ducto.

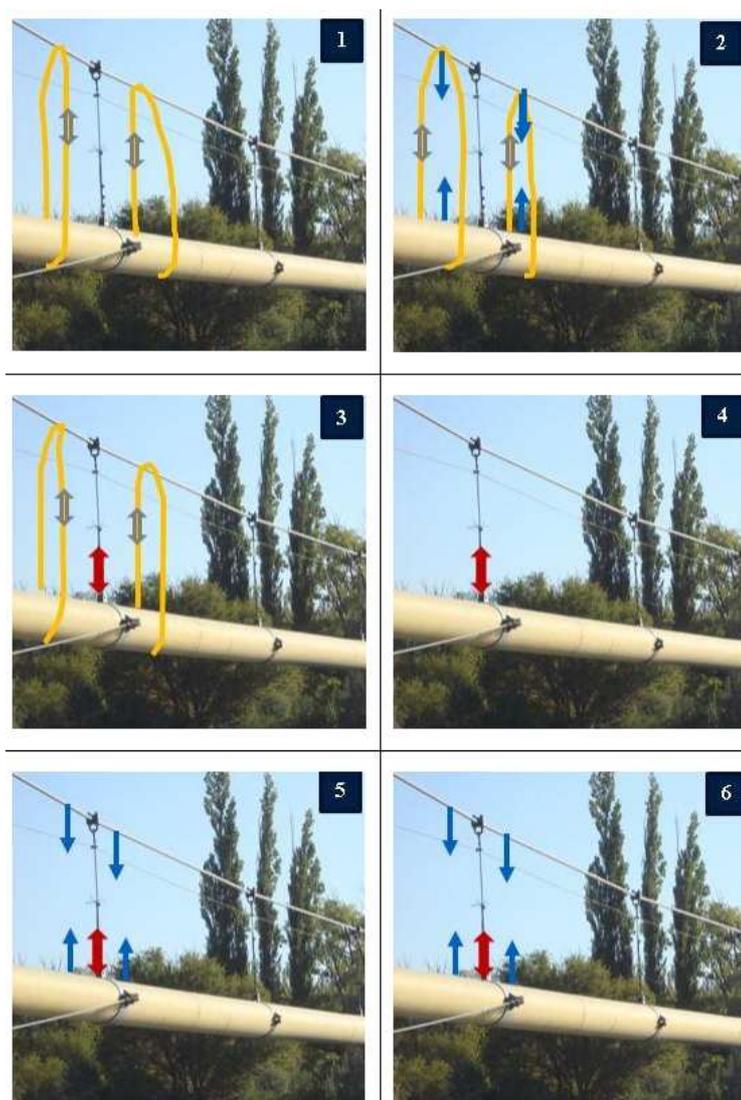


Figura 6: Secuencia de reposicionamiento a aplicar en cada péndola.

3 ANALISIS TEORICO DEL CABLE PRINCIPAL

Mediante la aplicación de un modelo teórico se calculan los valores de tensión y posición en los cables registrados al momento de la puesta en servicio de la estructura. Tanto los valores registrados en las campañas de medición (posición y tensiones en péndolas) como los

valores que se obtendrán del modelo de elementos finitos (desplazamientos y tensiones) deben reproducir en primer lugar el modelo teórico para luego ajustar a las mediciones. En la Figura 7 se indican los diagramas utilizados para plantear las ecuaciones de equilibrio del modelo teórico de un cable colgante.

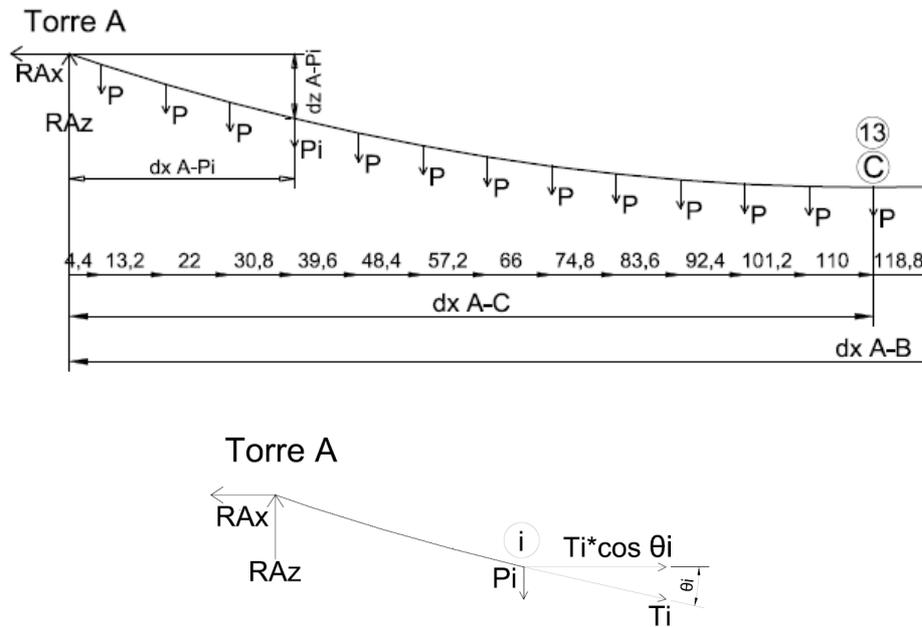


Figura 7: Diagramas utilizados para el análisis estático del cable.

La Figura 8 muestra que la posición teórica de equilibrio coincide con las coordenadas registradas en los planos. Del cálculo también se verifica que la tensión en péndolas coincide con el promedio de las tensiones registradas durante las campañas de ensayos dinámicos. Finalmente se asume que los esfuerzos teóricos calculados en la trayectoria del cable principal son los valores que éste registró en el período de la puesta en servicio (valores de diseño). Las tensiones se ingresarán como tensiones iniciales al modelo de elementos finitos y se modificarán iterativamente hasta alcanzar la geometría que presenta hoy la estructura.

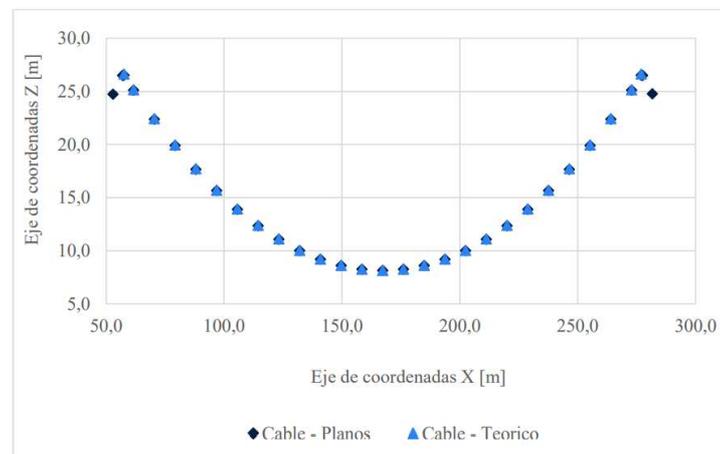


Figura 8: Comparación de posición del cable según planos y la resultante del modelo teórico.

4 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

El sistema se compone de torres metálicas, cables metálicos de distintos tamaños y configuración, un ducto de gran longitud y pequeños y variados dispositivos de unión. La complejidad de cada componente, su representación y las opciones/limitaciones que tiene el software requieren que la formulación del modelo incluya ciertas consideraciones especiales. Es importante el análisis y selección de los elementos adecuados del software para representar de la mejor manera posible cada parte y su material. Se seleccionaron elementos tipo viga con seis grados de libertad para representar las torres y el ducto y elementos tipo barra con tres grados de libertad, de dos y tres nodos para representar los cables. Las consideraciones especiales que se incluyeron en el modelo son:

- Definir un tipo de elemento especial denominado conector, que cumple con la función de compatibilizar los grados de libertad en la unión de los elementos viga y barra (6 GL y 3 GL respectivamente). En la Figura 9 se indica la ubicación y tipo de elemento conector adoptado.



Figura 9: Ubicación y tipo de elemento conector utilizado para compatibilizar grados de libertad.

- Incorporar nodos adicionales, indicados con círculos negro en la Figura 10, para definir los elementos conectores entre los elementos viga y elementos barra.

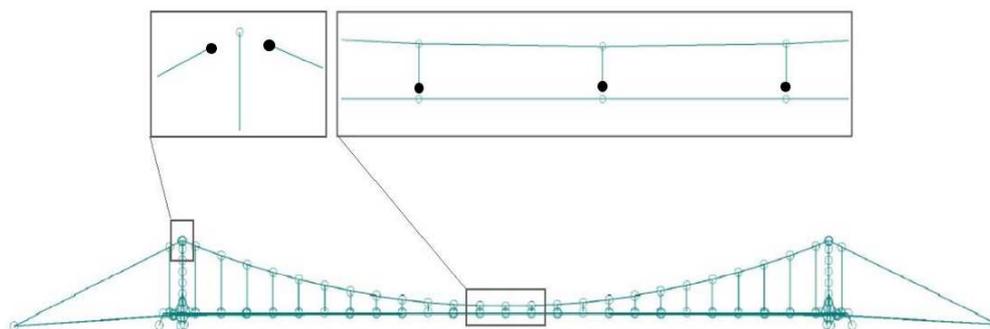


Figura 10: Detalle de nodos adicionales para definir los conectores entre elementos de viga y barra.

- La librería del software no cuenta con elementos tipo cable motivo por el cual se adoptó elementos de barra, pero cuidando en la definición del material incluir la opción “no compresión” de manera tal que el material solo reaccione ante esfuerzos de tracción. Los tres materiales que conforman la estructura son: acero al carbono convencional en torres y ducto, alambres de acero torcidos helicoidales simples que conforman un torón para el cable principal y alambres de acero distribuidos en seis torones trenzados en sentido helicoidal alrededor de un torón central para péndolas y cables de viento.

La secuencia utilizada en el software comprende: mallado de la geometría, asignación de elementos (en la Figura 11 se indica este paso), asignación de secciones, asignación de materiales, definición de las condiciones de borde (apoyo fijo en anclajes y empotramiento en base de torres y extremos del ducto), definición de las condiciones iniciales, asignación de cargas y por último resultados-postproceso.

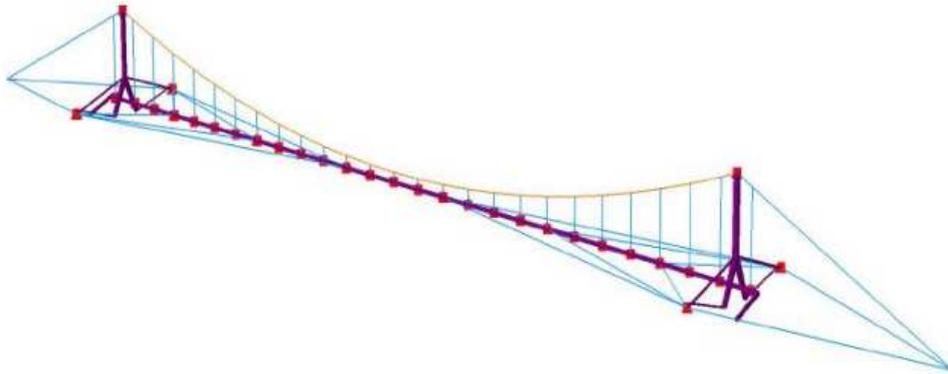


Figura 11: Malla de elementos finitos con todos los elementos, incluyendo conectores.

El modelo de elementos finitos calibrado reproduce adecuadamente los valores de desplazamiento y tensión que registra actualmente la estructura. En la Figura 12 se comparan de las posiciones del cable y ducto medidas en su condición actual y los resultados del modelo, los cuales concuerdan razonablemente.

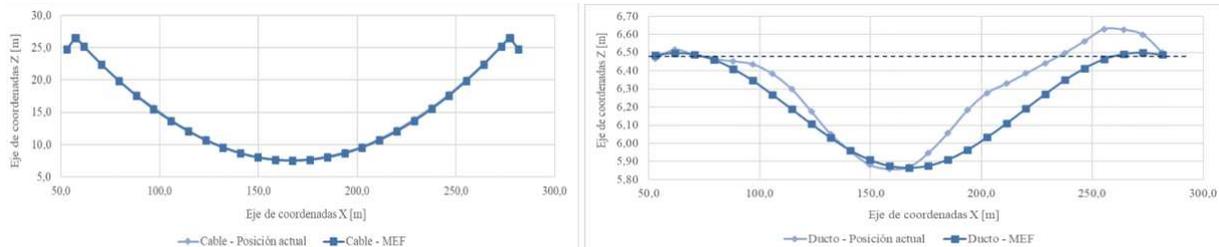


Figura 12: Comparación de posiciones actual medidas versus modeladas (MEF) del cable principal (izq) y ducto (der).

5 MODELADO DE LA PROPUESTA DE READECUACION

Durante las inspecciones y ensayos se definió el procedimiento de materialización de la readecuación. A partir de la documentación gráfica y la normativa se obtuvieron la geometría de la estructura y sus características. Se completaron los datos necesarios para la elaboración del modelo, calibrando el mismo, al momento en la puesta en servicio, con las tensiones y desplazamientos calculados con el modelo teórico. El modelo calibrado luego se modificó introduciendo las tensiones medidas en las péndolas con el fin de reproducir la posición medida de la estructura. Finalmente, con el modelo de elementos finitos calibrado **en su condición actual** se procede a simular la propuesta de reacondicionamiento geométrico, registrando y analizando la respuesta de la estructura ante cada etapa de rectificación del ducto. En la Figura 14 se presentan las deformadas correspondientes a la condición deformada actual y la condición final luego de implementada la readecuación.

El objetivo es verificar la propuesta mediante el análisis de resistencia de los elementos. El secuenciamiento del ajuste geométrico que se presenta es el resultado de varias simulaciones e iteraciones siendo esta la opción que mejor se adecua considerando que verifiquen las tensiones límites en el ducto, se obtengan desplazamientos en el ducto y cables buscados y además sea de fácil ejecución.

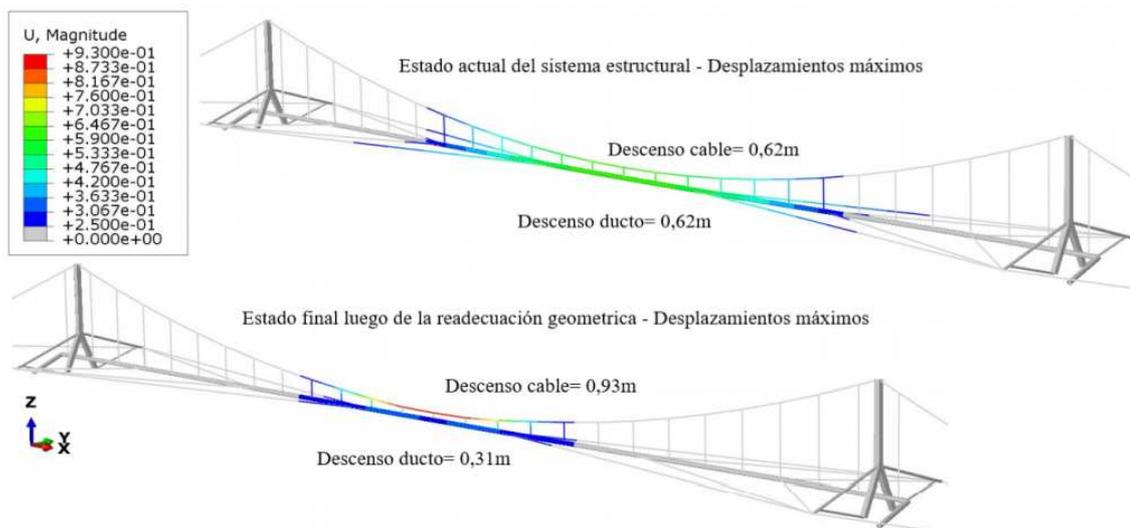


Figura 14: Desplazamientos actuales y desplazamientos luego del reacondicionamiento geométrico.

Durante el desarrollo se simularon y evaluaron las distintas etapas del procedimiento de readecuación geométrica (en la Figura 15 se indica la evolución de posición del ducto luego de la ejecución de cada paso de la propuesta de readecuación), se verificó que los esfuerzos solicitantes en los elementos estructurales en ningún caso superen la resistencia de la sección, específicamente para el ducto calculada según especificaciones de ASTM A-53 2012, penalizada por ASME B31.8_2003 e indicada como Carga Segura de Trabajo del Ducto en Tabla 1. También se dimensionaron los accesorios a incluir para la ejecución de la propuesta. De lo anterior se concluye que el procedimiento propuesto es factible y no sitúa la estructura ni sus elementos bajo ningún estado de riesgo estructural.

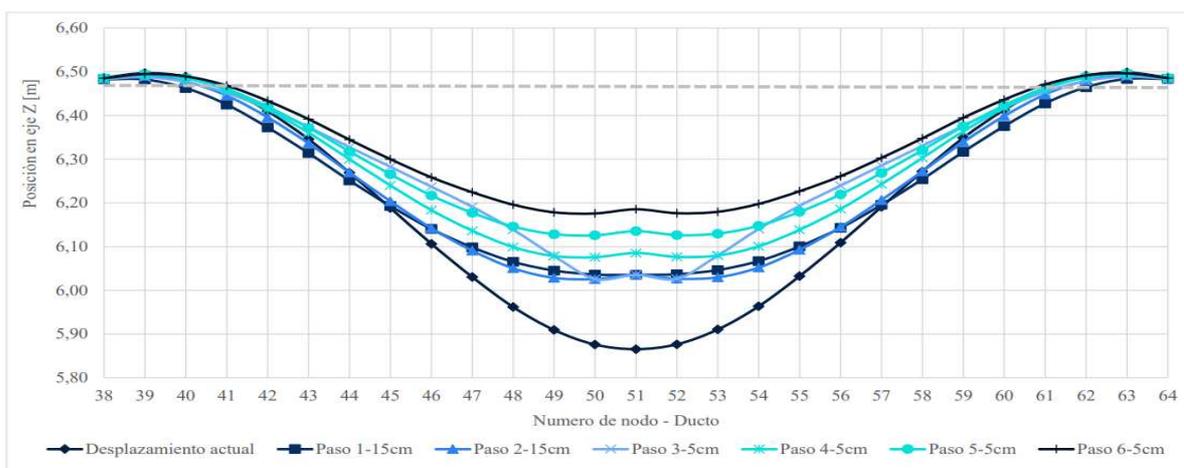


Figura 15: posición del ducto en la ejecución de cada paso de la propuesta de readecuación.

La metodología de ejecución propuesta para la rectificación del ducto y su modelado estiman ejecutar en seis pasos una recuperación de 31cm, de los 62cm que registra actualmente el ducto, a expensas de incrementar el descenso del cable, como se indica en la Figura 15.

Etapa	Tensión máxima del modelo en el ducto (σ máx.)	Tensión segura de trabajo del ducto	Estado
[Nombre]	[N/m ²]	[N/m ²]	[V/NV]
Actual	3,10E+07	1,15E+08	Verifica
Paso 1	2,30E+07	1,15E+08	Verifica
Paso 2	3,38E+07	1,15E+08	Verifica
Paso 3	9,13E+07	1,15E+08	Verifica
Paso 4	3,58E+07	1,15E+08	Verifica
Paso 5	3,58E+07	1,15E+08	Verifica
Paso 6	3,58E+07	1,15E+08	Verifica

Tabla 1: Verificación de resistencia en el ducto durante cada paso de la secuencia de readecuación geométrica.

6 CONCLUSIONES

Se concluye que el objetivo principal del trabajo fue alcanzado; se diseñó el modelo de elementos finitos y se simuló correctamente la propuesta de readecuación geométrica de la estructura metálica. También se verificó que para cada paso de la secuencia de elevación del ducto las tensiones máximas que registra el modelo son menores a la tensión segura de trabajo del ducto. Los cables registran tensiones muy inferiores a los valores máximos admisibles en todas las etapas. La metodología de ejecución y su modelado estiman una recuperación de 31cm, de los 62cm que registra actualmente el ducto al aplicar una vez el procedimiento descripto.

REFERENCIAS

- De la Canal, D., *Readecuación geométrica de una estructura metálica*, 2021 <http://rdi.uncoma.edu.ar/browse?type=subject&value=Tesinas>
- IPH SAICF, Guía de consulta para izaje general: cables de acero, eslingas y accesorios. www.iph.com.ar, 2012.
- Crosby, *Catalog*, www.thecrosbygroup.com/catalog
- Bridon, *North American Catalog*, www.bridon.com
- ASTM A 586-04a, *Standard Specification for Zinc-Coated Parallel and Helical Steel Wire Structural Strand*, 2004.
- ASTM A 603-98 Reapproved 2003, *Standard Specification for Zinc-Coated Steel Structural Wire Rope*, 2003.
- ASME B31.8_2003, *Gas Transmission and Distribution piping systems*, 2003.
- ASTM A-53, *Standard Specification for Pipe, Steel, Black and Hot-Dipped, Zinc-Coated, Welded and Seamless*, 2012.
- ASTM F-1145/92, *Standard Specification for Turnbuckles, Swaged, Welded, Forged*, 1992.